جامعة سيدي محمد بن عبد الله بفاس
UNIVERSITE SIDI MOHAMED BEN ABDALLAH DE FES
كلية العلوم ظهر المهراز فاس
FACULTE DES SCIENCES DHAR EL MEHRAZ FES

N° d'ordre 66/ 2020

Formation Doctorale : Ressources naturelles environnement et développement durable

Discipline : Chimie

Spécialité : Matériaux et Génie des procédés

Laboratoire : Catalyse, Matériaux et environnement

THESE DE DOCTORAT

Présentée par

Mme Imane CHRAMATE

Efficacité Energétique et Bilan Carbone dans l'industrie

Soutenue le 28 /11 /2020 devant le jury composé de :

Pr. Farid ZERROUQ	***Ecole supérieure de technologie de Fès***	***Président***
Pr. Omar TANANE	***Faculté des sciences Ben M'sik- Casablanca***	***Rapporteur***
Pr. Mohammed SRITI	***Ecole nationale supérieure des arts et metiers-Méknes***	***Rapporteur***
Pr. Mustapha TALEB	***Faculté des sciences dhar el Mahraz- Fès***	***Rapporteur***
Pr. Abdennebi TALBI	***Ecole supérieure de technologie de Fès***	**Examinateur**
Pr. Fouzi BELMIR	***Ecole supérieure de technologie de Fès***	**Directeur de thèse**

Année *universitaire* : 2020-2021

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail et ma profonde gratitude A tous ceux qui ont sacrifié pour m'offrir les conditions propices à ma réussite :

A l'âme de mon père,

A ma mère, à qui j'offre cette réussite, pour l'éducation qu'elle m'a prodigué; avec tous les moyens et au prix de tous les sacrifices qu'elle a consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'elle m'a enseigné depuis mon enfance.

A mon mari, mes chers frères et a toute ma famille avec tous mes sentiments de respect, d'amour, de gratitude et de reconnaissance pour tous les sacrifices déployés pour m'élever dignement et assurer mon éducation dans les meilleurs conditions pour leurs encouragements et leurs soutiens

Que ce travail soit l'expression de ma grande affection et un témoignage de mon attachement et de mon grand profond amour.

Remerciements

Mon expérience de thèse a été riche d'enseignements, tant sur le plan professionnel que personnel. Elle a été une étape structurante dans mon parcours professionnel et je dois la réussite de ce projet à l'écoute, aux conseils et la bonne humeur de toutes les personnes qui m'ont soutenu pendant ces années. Voici venu le moment des remerciements.

Je tiens d'abord à remercier chaleureusement Professeur **Fouzi BELMIR**, mon directeur de thèse, de m'avoir accepté pour réaliser cette thèse, pour son accompagnement, sa disponibilité, pour la confiance qu'il m'a accordée et pour avoir partagé ses connaissances et son expérience. Merci de m'avoir laissé toute la liberté dans les choix que j'ai pu faire tout au long de la thèse et de m'avoir offert de nombreuses opportunités pour présenter mon travail dans des conférences internationales.

J'adresse mes remerciements sincères, aux professeurs, **Omar TANANE**, **Mohammed SRITI**, **Mustapha TALEB**, **Abdennebi TALBI** pour le temps qu'ils ont consacré à examiner mon travail et pour leurs retours constructifs. Je tiens aussi à remercier Professeur **Farid ZERROUQ** d'avoir présidé cette soutenance de thèse.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leurs soutiens et leurs encouragements. Je remercie particulièrement ma mère pour leur amour et leur écoute à toute épreuve. Je remercie du fond du cœur mon mari pour sa patience et son soutien sans faille au quotidien.

Résumé

Au cours de ces deux dernières décennies, un grand intérêt a été consacré aux sujets de l'environnement, la préservation des ressources naturelles et principalement la gestion des ressources énergétiques en raison de leur importance considérable pour les prochaines générations. A l'instar des pays engagés dans cette voie, le Maroc a mis en œuvre de manière intensive une stratégie énergétique nationale dans le cadre de sa vision de Développement Durable et qui érige l'efficacité énergétique en priorité nationale. En effet, la loi n°47-09 relative à l'efficacité énergétique a pour but d'exploiter le potentiel important en efficacité énergétique, de renforcer la sécurité d'approvisionnement en énergie et de mitiger le changement climatique. D'autre part, à l'issue de la COP21, parmi les mesures promises par le Royaume du Maroc figure, notamment, la réduction de 13% des émissions de gaz à effet de serre (GES) à l'horizon 2030 par rapport à 2010, et qui pourrait même atteindre 32% en cas de soutien international.

De ce fait, on remarque un accroissement de l'intérêt du secteur industriel envers l'audit énergétique, qui est une démarche ayant pour but l'identification des gisements d'amélioration de l'efficacité énergétique et la réduction des émissions des GES. C'est dans cette optique qu'a été promulgué le décret n° 2.17.746 publié le 2 décembre 2019 relatif à l'audit énergétique, qui précise les modalités des audits énergétiques obligatoires ainsi que les procédures d'accréditation et de contrôle des organismes d'audit.

L'efficacité énergétique joue un rôle très important dans la réduction de la facture énergétique et les émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs, en effet le secteur industriel représente 21% de la consommation énergétique globale. La réduction de cette consommation est nécessaire pour l'amélioration de la compétitivité des entreprises industrielles d'une part et d'autre part pour la réduction de leurs émissions de GES.

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent travail de recherche dont la préparation et la réalisation a consisté en 3 phases principales :

- Une première phase a consisté en une synthèse et dépouillement de l'arsenal normatif, législatif et réglementaire en la matière (Développent durable, Environnement, Efficacité énergétique, Energies renouvelables, …) tant au niveau national qu'international.
- Une deuxième phase a porté sur l'analyse bibliographique des principaux travaux de recherche réalisés dans le domaine de l'efficacité énergétique ainsi que des émissions des gaz à effet de serre. Cette dernière nous a permis d'étudier les modèles et les démarches proposés dans le domaine de l'efficacité énergétique et de la réductions des GES d'une part, et d'autre part de faire l'inventaire des bonnes pratiques applicables pour différents secteurs industriels ou tertiaires, afin d'apporter des solutions innovantes pour améliorer l'efficacité énergétique dans les différentes installations (moteurs électriques, chaudières, compresseurs, fours, systèmes de chauffage ou de climatisation, éclairage...).

- Une troisième phase a été consacrée à la mise en pratique de ces modèles, démarches et techniques proposées précédemment, dans le cadre de trois études de cas distinctes réalisées dans trois unités industrielles marocaines différentes, et ce, dans l'objectif de réduire leur consommation énergétique d'une part et d'autre part diminuer les émissions des GES.

La première étude de cas a été réalisée dans une entreprise spécialisée en production et commercialisation des aliments de bétails. Après une analyse des différents facteurs qui influencent sur la facture énergétique, à l'aide d'un analyseur de réseaux électriques, on a constaté que les facteurs les plus influençant sont l'énergie réactive et le facteur de déplacement de puissance (DPF), la diminution de la valeur de ce dernier entraînera une augmentation de l'énergie réactive et par la suite une pénalité sur la facture énergétique, donc l'installation de nouveaux condensateurs en batteries était nécessaire afin de réduire l'énergie réactive.

La deuxième étude de cas a été effectuée dans une entreprise spécialisée dans les projets de cogénération et de valorisation du biogaz. En effet, Fès est la première ville au Maroc éclairée à 40% de l'éclairage public, grâce à ses déchets ménagers. Ce projet a contribué efficacement à l'amélioration de la gestion et l'exploitation de la décharge au moyen d'une centrale électrique de 1 Mégawatt. L'objectif de cette étude de cas est de réduire les émissions de CO_2 par l'amélioration de la méthode du calcul selon le procédé de fabrication et les données disponibles à cet effet. Cette méthode de calcul propre a été développée en interne et vise à estimer les émissions qui peuvent être réduites dans la dite décharge pour chaque année jusqu'à la fin de sa durée de vie.

La troisième étude de cas traite d'un des grands défis que connaissent les cimenteries : les émissions de GES et surtout les NOx. Plusieurs techniques et méthodes de traitements sont proposées pour réduire ces émissions en prenant en compte le rapport «Coût-efficacité ». L'objectif de cette étude de cas était de proposer une technique adaptée aux besoins de la société concernée. Après une analyse des émissions de NOx de la cimenterie, deux types de procédés sont proposés: la réduction sélective non catalytique (RSNC) et la réduction sélective catalytique (RSC). Tous les deux utilisent l'ammoniac pour réduire les oxydes d'azote en azote moléculaire. La différence entre eux, réside dans le catalyseur qui a pour rôle la réduction de la température opératoire et la consommation de réactif. Dans notre cas on a choisi la réduction sélective non catalytique (RSNC) car cette proposition répond à l'exigence de la société en matière d'investissement et d'efficacité.

A l'issue de ce travail, des recommandations ont été formulées pour l'élaboration et la proposition de modèles, d'approches, de méthodes et d'outils qui pourraient être mis à la disposition des organisations industrielles ou tertiaires afin de faciliter l'intégration en leur sein des concepts de développement durable (dont notamment ceux liés à l'efficacité énergétique et aux émissions de GES) et contribuer ainsi à l'atteinte des objectifs stratégiques nationaux liés à la réduction de la facture énergétique fossile d'une part et au changement climatique d'autre part.

Mots clés : développement durable, émission des gaz à effet de serre, efficacité énergétique, changement climatique, bilan carbone.

Abstract

Over the last two decades, a great deal of interest has been devoted to the subjects of the environment, the preservation of natural resources and, above all, the management of energy resources because of their considerable importance for future generations. Following the example of the countries engaged in this path, Morocco has intensively implemented a national energy strategy within the framework of its vision of Sustainable Development and which sets energy efficiency as a national priority. Indeed, the law n°47-09 relating to energy efficiency aims at exploiting the significant potential in energy efficiency, strengthening the security of energy supply and mitigating climate change. On the other hand, at the end of COP21, among the measures promised by the Kingdom of Morocco is, in particular, 13% reduction in greenhouse gas (GHG) emissions by 2030 compared to 2010, which could even reach 32% if international support is provided.

As a result, there has been an increase in the interest of the industrial sector in the energy audit, which is an approach aimed at identifying areas for improving energy efficiency and reducing GHG emissions. To this end, Decree N° 2.17.746 was issued on 2 December 2019 on energy auditing, specifying the terms and conditions of mandatory energy audits and the procedures for accrediting and monitoring audit bodies.

Energy efficiency plays a very important role in reducing energy bills and greenhouse gas emissions in the various sectors, as the industrial sector accounts for 21% of overall energy consumption. Reducing this consumption is necessary to improve the competitiveness of industrial companies on the one hand and to reduce their GHG emissions on the other.

It is within this framework that the present research work is being carried out, the preparation and implementation of which has consisted of three main phases:

- A first phase consisted of a synthesis and analysis of the normative, legislative and regulatory arsenal in the field (Sustainable Development, Environment, Energy Efficiency, Renewable Energy...) at both national and international levels.
- A second phase focused on the bibliographical analysis of the main research work carried out in the field of energy efficiency and greenhouse gas emissions. The latter enabled us to study the models and approaches proposed in the field of energy efficiency and GHG reductions on the one hand, and on the other hand to make an inventory of good practices applicable for different industrial or tertiary sectors, in order to provide innovative solutions to improve energy efficiency in different installations (electric motors, boilers, compressors, furnaces, heating or air-conditioning systems, lighting, etc.).
- A third phase was devoted to the practical application of these models, approaches and techniques previously proposed, in the framework of three separate case studies carried out in three different Moroccan industrial units, with the aim of reducing their energy consumption on the one hand and reducing GHG emissions on the other.

The first case study was carried out in a company specialized in the production and marketing of cattle feed. After an analysis of the various factors that influence the energy bill, using an electrical network analyzer, it was found that the most influential factors are reactive energy and the power displacement factor (PDF). A decrease in the value of the latter will lead to an increase in reactive energy and subsequently a penalty on the energy bill, so the installation of new battery capacitors was necessary in order to reduce reactive energy.

The second case study was carried out in a company specializing in cogeneration and valorization of biogas projects. Indeed, Fez is the first city in Morocco to have 40% of public lighting, thanks to its household waste. This project has effectively contributed to the improvement of the management and operation of the landfill site by means of a 1 Megawatt power plant. The objective of this case study is to reduce CO_2 emissions by improving the method of calculation according to the manufacturing process and the data available for this purpose. This clean calculation method was developed in-house and aims to estimate the emissions that can be reduced in the said landfill for each year until the end of its lifetime.

The third case study deals with one of the major challenges facing cement plants: GHG emissions, especially NOx. Several techniques and treatment methods are proposed to reduce these emissions, but each company chooses the treatment that suits it in terms of "Cost-effectiveness". The objective of this case study was to propose a technique adapted to the needs of the company concerned. After an analysis of the NOx emissions of the cement plant, two types of processes are proposed: Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) and Selective Catalytic Reduction (SCR). Both use ammonia to reduce nitrogen oxides to molecular nitrogen. The difference between them lies in the catalyst, which has the role of reducing the operating temperature and reagent consumption. In our case we have chosen Selective Non-Catalytic Reduction (SNCR) because this proposal meets the company's requirements in terms of investment and efficiency.

Finally, recommendations were formulated for the development and proposal of models, approaches, methods and tools that could be made available to industrial or tertiary organizations in order to facilitate the integration within them of sustainable development concepts (including those related to energy efficiency and GHG emissions) and thus contribute to the achievement of national strategic objectives related to the reduction of the fossil energy bill on the one hand and climate change on the other.

Keywords: sustainable development, greenhouse gas emissions, energy efficiency, climate change, carbon assessment.

Liste des Abréviations

ADEREE : Agence Nationale pour le Développement des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique

AMEE : Agence Marocaine de l'Efficacité Energétique (ex ADEREE)

AIE : Agence Internationale de l'Energie

CCNUCC : Convention-Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques

CO_2 : Dioxyde de carbone

DEPF : Direction des Etudes et des Prévisions Financières

DPF : Facteur de Déplacement de Puissance

EE : Efficacité Energétique

ER : Energie Renouvelable

ISO 50001 : Norme internationale du système de management d'énergie

IRESEN : Institut de Recherche en Energie Solaire et Energies Nouvelles

GES : Gaz à Effet de Serre

MEM : Ministère de l'Energie et des Mines

MENA : Moyen-Orient et Afrique du Nord

MHT: Montant hors taxes (MAD/KWh)

ONEE : Office Nationale de l'Eau et d'Electricité

PA: Puissance Apparente (KVA)

PA max: Puissance Apparente maximum (KVA)

PIB : Produit Intérieur Brut

PME : Petites et Moyennes Entreprises

PMI : Petites et Moyennes Industries

PNAP : Plan National d'Actions Prioritaires

PPS : Prix de Puissance Souscrite (MAD/KWh)

PUHT : Prix Unitaire Hors Taxe

PS : Puissance Souscrite (KVA)

SIE : Société d'Investissement Energétique

Q : Puissance Réactive (KVAR)

Liste des figures

Figure 1: Comparaison des sources d'énergie en Allemagne en 2018. 6
Figure 2: Evolution des sources d'énergie au Maroc(MEM, 2013) 8
Figure 3: Répartition de la production de l'énergie solaire au Maroc (AMEE, 2017) 10
Figure 4: Répartition de la consommation énergétique par secteur (MEM, 2016) 14
Figure 5: Quatre objectifs fondamentaux au Maroc pour 2030. 15
Figure 6: Démarche d'audit énergétique 17
Figure 7: Répartition des investissements et des gains par système. 18
Figure 8: Répartition des recommandations par système 19
Figure 9: Pourcentage de chaque système en tonnes de CO_2 évités. 19
Figure 10: Actions proposées pour le suivi et la mise en œuvre de recommandations. 20
Figure 11: Nombre d'actions réalisés par système. 20
Figure 12: Famille de l'ISO 50000. 22
Figure 13: Modèle de système de management de l'énergie suivant la norme ISO 50001. 24
Figure 14: Différentes étapes du bilan Carbone 43
Figure 15: Plan de découpage de la société Alf al Maghreb 50
Figure 16: Diagramme de fabrication des aliments de bétails. 52
Figure 17: Diagramme de fabrication de farine 53
Figure 18: Circuit électrique de la société Alf al Maghreb. 54
Figure 19: Facture énergétique de l'année 2014. 57
Figure 20: Facture énergétique de l'année 2015. 57
Figure 21: Facture énergétique de l'année 2016. 58
Figure 22: Analyseur Chauvin Arnoux. 59
Figure 23: Composition vectorielle des puissances. 60
Figure 24: Condensateur CIRCUTOR 62
Figure 25: Condensateur du bloc N°1 62
Figure 26: Condensateur du bloc N°2 63
Figure 27: Condensateur du bloc N°3 63
Figure 28: Comparaison entre la consommation énergétique de 2016 et 2017 66
Figure 29: Etapes de la démarche de management d'énergie 67
Figure 30: Etapes de la démarche de management d'énergie 67
Figure 31: Différents Filiales d'ECOMED au Maroc. 70
Figure 32: Réseaux de collecte du biogaz et de lixiviat. 72
Figure 33: Tête de puits 73
Figure 34: La torchére 74
Figure 35: Générateur de 1MW 75
Figure 36: Filtre Figure 37: Deux aspirateurs 77
Figure 38: Vannes et aspirateurs 77
Figure 39: Analyseurs 77
Figure 40: Principaux axes de MDP nationale 79
Figure 41: Variation des émissions réduites en fonction des années et de la production de biogaz 86
Figure 42: Cimenterie de Fès Ras El Ma. 88
Figure 43: Cuisson Clinker 92
Figure 44: Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès 93
Figure 45: Etapes Fabrication ciment 93
Figure 46: Processus de fabrication du ciment 94
Figure 47: Mécanisme de formation de NOx 95
Figure 48: Variation de NOx en 2016 102

Figure 49: Variation de NOx en 2017 102
Figure 50: Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°1. 117
Figure 51:Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°2 117
Figure 52: Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°3 118
Figure 53: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°1 118
Figure 54: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°2 119
Figure 55: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°3 119
Figure 56: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°1 120
Figure 57: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°2 120
Figure 58: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°3 121
Figure 59: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°1 121
Figure 60: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°2 122
Figure 61: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°3 122
Figure 62: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°1 123
Figure 63: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°2 123
Figure 64: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°3 124
Figure 65: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°1 124
Figure 66: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°2 125
Figure 67: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°3 125
Figure 68: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°1 126
Figure 69: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°2 126
Figure 70: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°3 127
Figure 71: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°1 127
Figure 72: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°2 128
Figure 73: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°3 128

Liste des tableaux

Tableau 1: Ressources d'énergie renouvelable dans les pays de MENA 6
Tableau 2: Ressources énergétiques au Maroc 9
Tableau 3: Projets pour les différentes sources d'énergies (AMEE, 2019) 13
Tableau 4: Nombres d'unités bénéficiaires ainsi leurs consommation énergétiques et Rejet en CO_2 18
Tableau 5: Actions d'économies d'énergies proposées par l'ADEREE 18
Tableau 6: Exemples-types d'actions d'amélioration énergétique 28
Tableau 7: Les lois relatives à la stratégie nationale de l'énergie 33
Tableau 8: Prix de l'électricité pour une facture de moyenne tension au Maroc 55
Tableau 9: Variation de la puissance active 64
Tableau 10: Variation de la puissance apparente 64
Tableau 11: Variation de la puissance réactive 65
Tableau 12: Variation de DPF 65
Tableau 13: Fiche technique de la société 71
Tableau 14: Variation des différents paramètres en fonction des années 86
Tableau 15: Valeurs limites générales de rejets dans l'atmosphère au Maroc (MEM, 2013) 101
Tableau 16: Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2014 115
Tableau 17:Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2015 115
Tableau 18: Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2016 116
Tableau 19: Variation de NOx du mois de janvier 2016 129
Tableau 20: Variation de NOx du mois de Février 2016 129
Tableau 21: Variation de NOx du mois d'avril 2016 130
Tableau 22: Variation de NOx du mois de mai 2016 131
Tableau 23: Variation de NOx du mois d'Août 2016 131
Tableau 24: Variation de NOx du mois de septembre et d'octobre 2016 132
Tableau 25: Variation de NOx du mois de Novembre 2016 132
Tableau 26: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de janvier 2017 133
Tableau 27: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de février 2017 134
Tableau 28: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de mars et d'avril 2017 135
Tableau 29: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de mai 2017 135
Tableau 30: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de juin 2017 136
Tableau 31: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de juillet 2017 137
Tableau 32: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de septembre et d'octobre 2017 137

Sommaire

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralités sur l'énergie 3

I. Introduction au changement climatique 3

II. Problématique de l'énergie à l'échelle mondiale 4

III. Economie marocaine et consommation d'énergie 6

IV. Energies renouvelables au Maroc 8

1. Potentiels d'énergies renouvelables au Maroc 8

1.1 Energie solaire 9

1.2 Biomasse 10

1.3 Energie éolienne 11

1.4 Energie hydroélectrique 11

V. Programmes des énergies renouvelables au Maroc 12

VI. Energie dans l'industrie 14

1. Consommation industrielle et économie d'énergie au Maroc 14

2. Efficacité énergétique dans l'environnement industriel 15

3. Audit énergétique 16

3.1 Démarche d'audit énergétique 16

3.1.1 Analyse préalable ou pré-diagnostic énergie 17

3.1.2 Analyse détaillée des gisements d'économies d'énergie 17

3.1.3 Actions et solutions 17

3.2 Résultats des audits énergétiques dans l'industrie Marocaine 17

Chapitre II : Règlementation et normalisation en matière de l'efficacité énergétique .....

I. Règlementation et normalisation au niveau international 20

1. Normalisation du domaine de l'environnement 20

2. Norme au service du système de management de l'énergie 21

3. Structure de l'ISO50001 et approche PDCA (Plan-Do-Check-Act) 23

3.1. Exigence de l'ISO50001 23

3.2. Structure PDCA 26

3.2.1. Phase 1 « Plan (Planifier) » 26

3.2.2. Phase 2 « DO (faire) » 28

3.2.3. Phase 3 « Check (vérifier) » 29

3.2.4. Phase 4 : « Act (Agir) » 29

II. Contexte réglementaire Marocain 29

1. Historique de la réglementation marocaine en énergie et en environnement 30

2. Loi N° 47-09 relative à l'efficacité énergétique au Maroc 33

2.1. Décret N° 2-17-746, relatif à l'audit énergétique 34
Chapitre III : Etat d'art et démarches de bonnes pratiques 19
I. Etat d'art sur l'efficacité énergétique 36
II. Etat d'art sur les émissions de gaz à effet de serre 40
III. Modèles et démarches de bonnes pratiques 41
1. Démarche de mise en œuvre et conditions de réussite 41
2. Démarche du bilan carbone 42
3. Démarche de la réussite d'un audit énergétique 43
3.1 Objectifs et cibles de l'audit énergétique 46
4. Proposition d'une démarche et de modèle de bonne pratique 47
4.1 Démarche de bonnes pratiques en efficacité énergétique 47
Chapitre IV : Amélioration d'efficacité énergétique : cas de l'alf al maghreb .....
Introduction 49
I. Description du site industriel 49
1. Plan de découpage de l'usine 49
2. Utilisation rationnelle de l'énergie électrique 53
2.1 Les différentes sources de l'énergie de la société 53
2.2. Analyse de la facture énergétique 54
2.2.1. Frais de consommation 54
2.2.2. Prix unitaire d'électricité hors taxe 54
2.2.3. Pénalité pour un facteur de puissance inférieur à 0,8 55
II. Matériels et Méthodes 55
1. Méthodologie 55
1.1. Audit énergétique 55
1.2. Collecte de données et mesures 56
1.3. Analyse de la facture énergétique 56
1.4 . Poste électrique de transformation 58
2. Matériels 58
III. Résultats et discussions 59
1. Paramètres influant sur la facture énergétique 59
2. Compensation d'énergie réactive 60
3. Condensateurs en batteries 62
3.1 Remplacement des batteries de condensateurs 62
3.2 Répartition de la chaine de production pour chaque condensateur 62
4. Variation de la puissance active 63
5. Variation de la puissance apparente 64
6. Variation de la Puissance réactive 64
7. Variation du facteur DPF 65

8. Comparaison entre les factures énergétiques 2016 et 2017 65
9. Démarche de la mise en œuvre de la norme ISO 50001 66
Conclusion 67
Chapitre V : Réduction des émissions de gaz à effet de serre : cas de ECOMED .....
Introduction 69
I. Présentation d'ECOMED 69
1. ECOMED Fès 70
2 .Fiche technique d'ECOMED Fès 71
II. Département de la décharge 71
1. Salle de pesage et de contrôle des déchets 71
2. Enfouissement des déchets 71
3 .Tête de puits 73
4. Bassins de stockage des lixiviats 73
5. Station de combustion et de valorisation du biogaz 74
5.1. Torchère 74
5.2. Générateur 75
III. Matériels et Méthodes 78
1. Méthodologie 78
1.1. Stratégie nationale du mécanisme de développement propre 78
1.2. Description générale de l'activité du projet 79
1.3. Application d'une méthodologie de référence et de suivi 80
1.4. Méthode de calcul des émissions réduites 80
2. Matériels 82
IV. Résultats et discussions 82
1. Réduction des émissions dans les décharges 82
2. Résultats et discussions 85
Conclusion 86
Chapitre VI: Réduction des émissions NOx : Cas de Lafarge-Holcim .....
Introduction 88
I. Présentation de la société HOLCIM 88
1. HOLCIM Maroc 88
1.1. Cimenterie HOLCIM de Fès 88
1.2. Domaines d'activités de l'entreprise 89
1.2.1. Missions 89
1.2.2. Vision 89
1.2.3. Produits 89
1.3. Fusion Lafarge-Holcim 89
II. Procédé de fabrication du ciment 90

1. Préparation de la matière première 90
1.1. Carrière 90
1.2. Concasseur 90
1.3. Transport de la matière première 90
2. Homogénéisation et broyage cru 91
2.1. Pré-homogénéisation 91
2.2. Broyage du cru 91
3. Production du clinker 91
3.1. Préchauffage 91
3.2. Cuisson 91
3.3. Refroidisseur 91
4. Broyage du ciment et expédition 92
4.1. Silos à clinker 92
4.2. Broyage du ciment 92
4.3. Ensachage et expédition 93
III. Matériels et Méthodes 94
1. Méthodologie 94
1.1. Différents oxydes d'azotes 94
1.2. Mécanisme de formations des émissions NOx 95
1.3. Sources d'émission de NOx 95
1.4. Effets négatifs des oxydes d'azote 96
1.4.1. Impacts des NOx sur la santé 96
1.4.2. Impacts des NOx sur l'environnement 96
1.5. Techniques de traitement pour réduire les émissions de NOx 96
1.5.1. Les principes 96
1.5.2. Technologies émergentes 97
1.5.3. Techniques de traitement 97
1.5.4. Technique de recombustion ou reburning 98
IV. Résultats et discussions 99
1. Variation des émissions de NOx 99
2. Proposition d'une technique de réduction des émissions en NOx 101
Conclusion 103
Conclusion générale et perspectives 105
Références Bibliographiques 107
Annexe I 115
Annexe II 129

Introduction générale

Le Maroc a adopté dans sa stratégie nationale le concept de développement durable (SNDD) qui favorise l'équilibre entre les dimensions environnementales, économiques et sociales, qui a pour objectifs l'amélioration du cadre de vie des citoyens, le renforcement de la gestion durable des ressources naturelles et la promotion des activités économiques respectueuses de l'environnement. Cette stratégie avait été adoptée par le conseil des ministres, tenu le 25 juin 2017 sous la présidence de SM le Roi Mohammed VI. Dans les détails, la SNDD s'articule autour de sept principaux défis: le renforcement de la gouvernance du développement, la réalisation de la transition progressive vers l'économie verte, l'amélioration de la gestion et la valorisation des ressources naturelles et la biodiversité biologique, la lutte contre le changement climatique et l'amélioration des espaces territoriaux précaires, le renforcement de la cohésion sociale, ainsi que la promotion de la culture.

Face aux problématiques énergétiques actuellement posées et aux enjeux législatifs, il est important de prendre en compte une contrainte supplémentaire : l'efficacité énergétique et bilan carbone dans l'industrie. Ces deux derniers jouent un rôle très important dans la réduction de la facture énergétique et des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans les différents secteurs (Bâtiments, industries et tertiaires), en effet le secteur industriel représente 21% de la consommation énergétique, la réduction de cette consommation est nécessaire d'où l'importance de la réalisation de l'audit énergétique dans les grandes et petites industries est primordiale.

C'est dans ce cadre s'inscrit notre travail de thèse, qui a pour but de réduire la consommation énergétique et les émissions des GES dans trois entreprises différentes.

Cette thèse a pour objectif, la diminution de la facture énergétique liée à la consommation énergétique de différentes installations et la réduction des émissions des GES. En effet, Nous proposons une méthodologie basée sur l'audit énergétique permettant d'améliorer l'efficacité énergétique dans une industrie, d'une part et d'autre part trouver des solutions susceptibles de réduire les émissions GES.

Cette méthodologie s'articule autour des étapes suivantes :

- **Méthodes d'analyse :** Mise en œuvre des méthodes d'analyse basées sur la détermination des installations énergivores et la réduction des émissions des GES.

  La première méthode a permis d'identifier les paramètres influant sur la facture énergétique. L'application de l'audit énergétique dans la société Alf al Maghreb a montré que les paramètres énergie réactive et facteur de déplacement de puissance ont plus d'influence sur la facture énergétique.

  La deuxième méthode a porté sur l'analyse des émissions des GES dans deux sites différents : la décharge de la ville de Fès et la cimenterie LAFARGE-HOLCIM. Il nous a paru opportun d'entreprendre cette analyse approfondie pour mettre en avant des solutions adaptées aux besoins des industries afin de réduire les GES.

- **Proposition des solutions d'améliorations:** Le changement des condensateurs en batteries a permis d'avoir une réduction notable sur la facture énergétique du site industriel ainsi que sur leurs émissions des GES.

  L'adaptation d'une méthode de calcul des émissions de CO_2 dans la décharge a pu réduire leurs émissions jusqu'à la fin de la durée de vie de cette dernière. En effet, la proposition d'une méthode de réduction sélective sans catalyseur dans une cimenterie a permis de réduire leurs émissions en NOx.

Ce manuscrit est organisé en six chapitres :

Le premier donne un aperçu bibliographique sur les enjeux énergétiques, et industriels ainsi que les problématiques liées à la réduction de la consommation énergétique et des émissions de GES.

Le deuxième chapitre présente une synthèse normative, législative et réglementaire en matière (Développent durable, Environnement, Efficacité énergétique, Energies renouvelables, …) tant au niveau national qu'international.

Le troisième chapitre porte sur l'état de l'art concernant les modèles et les démarches proposées dans le domaine d'efficacité énergétique et des émissions des gaz à effet de serre, Les bonnes pratiques applicables dans les différents secteurs industriels et la mise en pratique de ces modèles, démarches et techniques proposées précédemment.

Le quatrième chapitre est consacré à une étude de cas qui a été réalisée dans la société Alf al magherib, spécialisée dans la production et la commercialisation des aliments de bétails. Suite à cette étude, on propose la mise en œuvre de nouveaux condensateurs en batteries afin de réduire leur facture énergétique et leurs émissions en GES.

Le cinquième chapitre concerne une étude de cas effectuée dans une société spécialisée dans les projets de cogénération et de valorisation du biogaz. Cette étude consiste à réduire les émissions de CO_2 par l'amélioration d'une méthode du calcul selon le procédé de fabrication et les données disponibles à cet effet.

Le dernier chapitre présente une étude de cas qui traite les défis que connaissaient les cimenteries : les émissions de GES et surtout les NOx et qui répond à l'exigence de la société en matière d'investissement et d'efficacité.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale et des perspectives à ces travaux de thèse.

Chapitre I : Généralités sur l’énergie

I. Introduction au changement climatique

Le réchauffement de la planète est l'un des plus grands problèmes qui menacent la vie sur notre planète dans les années à venir. La hausse des températures, la fonte les glaciers, les sécheresses et les inondations présentent des risques énormes pour la planète et pour les générations futures. Des mesures immédiates et efficaces s'imposent pour s'attaquer pleinement au problème de la menace de réchauffement climatique (Allouhi et al., 2015a). A cet effet, l'AIE a proposé des améliorations dans les investissements dans l'efficacité énergétique dans les bâtiments et les l'industrie en tant que solution qui peuvent aider à réduire les émissions de gaz à effet de serre causées par les activités humaines à l'échelle mondiale. La situation s'aggrave parce que la plus grande partie de l'approvisionnement en énergie dans le monde est basée sur des combustibles fossiles caractérisés par leur effet nocif sur l'environnement.
Après la COP 21 à Paris en 2015, Marrakech en 2016 avait accueilli la COP 22 qui avait pour thèmes l'atténuation aux effets le changement climatique et l'innovation en matière d'adaptation. La COP 22 avait aussi pour mission de développer des outils opérationnels dans le cadre du plan Paris-Lima puis Paris-Marrakech.

A l'instar de tous les pays, le Maroc a été engagé dans la COP 22 afin de réduire leurs émissions des gaz à effet de serre car le Maroc fait partie des quatres pays les plus écologiques au monde aux côtés du Costa Rica, du Bhoutan et de l'Éthiopie. Ce virage écologique marocain s'est concrétisé par un plan énergétique très ambitieux. Ce plan est porté sur la contribution à 42% des énergies renouvelables à la production électrique au cours de 2020 et à 52% à l'horizon 2030. De nombreux projets sont lancés tel que la centrale solaire de Ouarzazate (Noor). Noor sera à terme le plus grand projet solaire du monde et pourra fournir de l'énergie à plus d'un million de foyers et produira un volume électrique de 580 mégawatts qui est réparti sur 450 hectares.

Afin de diminuer le volume des gaz à effet de serre, certains chercheurs (Boharb et al, 2016) ont suggéré l'amélioration de l'efficacité de la consommation d'énergie dans l'industrie et les bâtiments. Cependant, le secteur industriel représente 30% à 70% de la consommation mondiale totale d'énergie et il est certainement responsable d'une grande partie des émissions de gaz à effet de serre dans le monde.

La réduction des émissions de gaz à effet de serre aux niveaux mondial, national et régional nécessite la mise en place des organismes de réglementation, tels que le Protocole de Kyoto, un accord international lié à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) a été proposé afin d'aider les pays à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Le mécanisme de développement propre qui a été mis au point afin que les pays très développés puissent remplir une partie de leur engagement envers le protocole par la réalisation des projets dans les pays en développement.

II. Problématique de l'énergie à l'échelle mondiale

Le secteur de l'énergie représente un secteur économique fondamental, car son efficacité affecte fortement la compétitivité de l'ensemble de l'économie nationale, notamment en ce qui concerne l'industrie (Jankauskas et al, 2014). Les écologistes avertissent la société et les entreprises que les ressources naturelles pourraient s'épuiser beaucoup plus rapidement qu'on ne le prévoit pas actuellement et le brûlage des ressources fossiles augmente le niveau de CO_2, ce qui entraine un impact négatif sur l'environnement en causant l'effet de serre (Sarkis et Tamarkin, 2008).

En 2018, les émissions mondiales de CO_2 dues à la consommation d'énergie fossile et à l'industrie pourraient augmenter de 2,7% selon les dernières estimations du Global Carbon Project rendues publiques en pleine COP24.

Selon les prévisions de l'AIE, le mix énergétique mondial restera, en l'état des engagements actuels, largement dominé par les énergies fossiles dans les décennies à venir, malgré une croissance très rapide des énergies renouvelables. En 2017, les énergies fossiles ont encore compté pour 85,2% de la consommation mondiale d'énergie primaire selon les dernières données de BP.

À cette « transition » très lente du système énergétique mondial se superpose la hausse quasi continue de la consommation mondiale d'énergie (+ 2,1% en 2017 selon l'AIE) et en particulier sous sa forme électrique. Pour faire face à cette croissance de la demande, l'Inde et l'Asie du Sud-Est prévoient notamment d'avoir encore massivement recours au charbon, qui a compté pour 38% de la production mondiale d'électricité en 2017.

En effet, cela a permis de donner lieu à la recherche des sources d'énergie de remplacement. Cependant, les technologies basées sur les combustibles fossiles prédominent dans la plupart des pays industriels. Alors que le monde s'engage dans la transition vers un avenir énergétique véritablement durable.

L'augmentation de la population et de l'économie mondiale s'est accompagnée d'une augmentation de la consommation de l'énergie. Au cours de la période 2004-2008, la population mondiale a augmenté de 5 % alors que la production totale d'énergie et les émissions annuelles de CO_2 ont augmenté d'environ 10 % par an (Agence internationale de l'énergie, 2016 ; Frankl et al, 2010).

Plusieurs pays ont cherché des solutions pour réduire leurs émissions, la consommation de sources d'énergie fossile en France était de 45,6 % en 2018, alors que le pays prévoit de réduire ce chiffre à 17 % d'ici à 2050. La valeur est toujours la même, la consommation totale de combustibles fossiles et nucléaires était de 31 % en 2018, l'énergie renouvelable représentait 35 % de toute l'énergie produite en France Ainsi que la consommation des sources d'énergie renouvelables ne représentaient que 14 % du total.

En effet, l'Allemagne prévoit de supprimer toutes ses centrales nucléaires d'ici 2022, et ses centrales au charbon d'ici 2038. Elle perdra alors 43 % de sa production pilotable par rapport à 2019. Cette politique en faveur des énergies renouvelables intermittentes, principalement l'énergie éolienne et l'énergie solaire, provoque une flambée des prix de l'électricité et un encombrement par « bouffée » du réseau électrique lorsqu'il y a du vent et du soleil.

Le prix de l'électricité en Allemagne est déjà 45 % supérieur à la moyenne européenne pour les particuliers, et deux fois supérieurs à celui de la France. Les taxes « vertes » représentent désormais 54 % du prix de l'électricité pour les ménages.

La construction de nouvelles centrales de secours au gaz, de lignes de transport d'électricité, et l'installation d'instruments de contrôle de la demande d'électricité, entraînera encore une hausse des prix de l'électricité.

Le plan climatique de 100 milliards d'euros de l'Allemagne prévoit davantage de panneaux solaires et d'éoliennes, 7 à 10 millions de voitures électriques d'ici 2030, un réseau d'un million de stations de recharge, une hausse des prix du carburant, ainsi qu'une taxe sur le trafic aérien. L'Allemagne a émis (en 2018) 15 % de plus de CO_2 (866 millions de tonnes) que son objectif en 2020 (750 millions de tonnes). Actuellement, elle n'a atteint que 39 % de sa prévision de réduction de consommation d'énergie primaire.

L'Allemagne devrait devenir un importateur net d'électricité d'ici 2023. Sa sécurité d'approvisionnement continuera de se détériorer pour au moins trois raisons :

- la dépendance accrue du pays à l'égard des productions intermittentes ;
- l'abandon progressif de l'énergie nucléaire (encore 12% de son électricité) ;
- le retrait prévu du charbon (comprenant la houille et le lignite) fournissant aujourd'hui 35% de son électricité.

L'insécurité de l'approvisionnement énergétique de l'Allemagne est aggravée par le fait que la Belgique et les Pays-Bas (ses voisins) risquent de fermer aussi respectivement leurs centrales nucléaires et au charbon. L'Allemagne aura alors davantage de difficultés à satisfaire ses importations d'électricité en augmentation, alors que la capacité de production de l'ensemble du réseau européen se détériorera jusqu'en 2030.

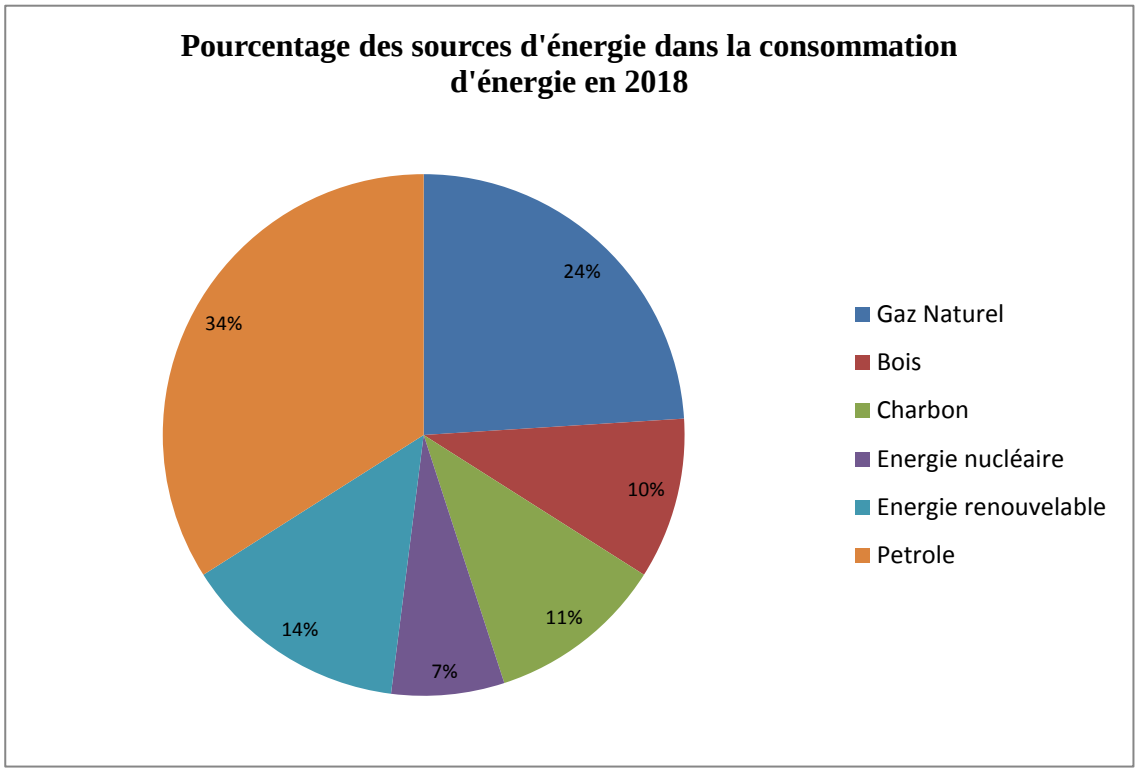


Figure 1: Comparaison des sources d'énergie en Allemagne en 2018.

III. Economie marocaine et consommation d'énergie

Dans les pays de la région du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA), en particulier dans les pays du Conseil de coopération, à l'exclusion du Qatar et d'Oman, sont ceux qui produisent le plus de gaz. Ce n'est que récemment certains pays de la région MENA ont commencé à explorer le potentiel des sources d'énergie renouvelable. Depuis les années 2000, la demande d'énergie dans la région MENA a connu une croissance plus rapide que prévu en 2011, cette croissance augmentent de 9 % d'une année à l'autre.

Plusieurs chercheurs marocains en 2017 ont remarqué que la raison sur laquelle il y a une forte dépendance des sources d'énergie importées est principalement les combustibles fossiles, le Maroc a été placé dans une situation d'insécurité énergétique très forte en situation financière car il importe 96% de ces énergies fossiles.

Tableau 1: Ressources d'énergie renouvelable dans les pays de MENA

Ressources	Algérie	Égypte	Libye	Maroc	Tunisie
Rayonnement solaire direct (kwh/m^2/an)	1700-2600	2000-3000	2590-2960	1800-3500	1500-1900
Vent (m/s)	Vitesse du vent >4 et >6 a Adrar	6-11	6-11	4.7-10.4	7-10
Hydraulique	Faible potentiel	Grand potentiel pour les grandes centrales	Aucun potentiel important n'a	Potentiel technique de 2500 MW.	Faible potentiel pour les grandes centrales

		hydroélectriques, mais ne convient pas aux petits et moyens projets	été découvert	Bon potentiel pour la petite et la moyenne hydraulique.	hydroélectriques. Trois sites identifiés avec un bon potentiel pour les petits et moyens projets.
Géothermie	200 sources dans le Nord-Est et Nord-ouest. Capacité confirmée >700 MW de sources albiennes	Potentiel de développement de la géothermie ressources le long de la mer Rouge et de la côte du golfe de Suez	Aucun potentiel important n'a été découvert	Potentiel important dans le Nord-Est	Limité à l'utilisation directe, mais pas à la production d'électricité
Biomasse	3,7 millions de tep provenant des forêts et 133 millions de tep par an provenant de l'agriculture et des déchets urbains.	16 millions de tonnes par an de résidus agricoles et de déchets urbains de 47 millions de tonnes par an	Le potentiel de la biomasse est estimé à 2 TWh/an. Ne convient pas à la production d'électricité à grande échelle	Déchets domestiques urbains estimés à 3 millions de tonnes par an	Les déchets organiques produits annuellement en Tunisie sont de plus de 30 millions de tonnes.

Le Maroc importe principalement de l'électricité d'Algérie et d'Espagne. En effet, L'énergie actuelle au Maroc dépend des hydrocarbures ainsi que la demande d'énergie est constante et qui devrait être triplé d'ici 2030.

Le Maroc est le seul pays d'Afrique du Nord sans presque aucune réserve fossile (Hanger et al., 2016) cependant, le Maroc dispose de plusieurs ressources renouvelables, en particulier l'énergie éolienne et solaire. De plus, c'est au Maroc que le potentiel de développement des énergies renouvelables est le plus important, en accord avec les objectifs politiques du pays et les ressources dont il dispose.

Par ailleurs, selon l'AIE, la quantité des émissions de gaz à effet de serre du Maroc a atteint 42,1 $MtCO_2$ en 2008 et il ne cesse pas d'augmenter dans la consommation énergétique annuel moyen de 5,7%. En outre, l'AIE a prédit que les émissions de gaz à effet de serre pourrait doubler en 2020 au Maroc. Entre-temps, le Maroc a installé des centrales électriques dont 70% de la capacité électrique est basée sur des combustibles fossiles, charbon et pétrole lourd et qui sont les principaux combustibles du mix électrique, qui représentent 68 % de la capacité actuelle (Alhamwi et al. 2015).

Les résultats des recherches d'Adom et al. (2012) ont montré que l'émission de dioxyde de carbone agit comme un facteur limitant de la croissance économique au Maroc. Apergis et Tang (2013) ont découvert que dans les 85 pays étudiés, le Maroc a été parmi les neuf pays qui rejettent l'appui solide au développement économique local dans le domaine de l'énergie. La figure 2 présente l'évolution du Maroc en matière des énergies renouvelables de l'année 2015 au 2030.

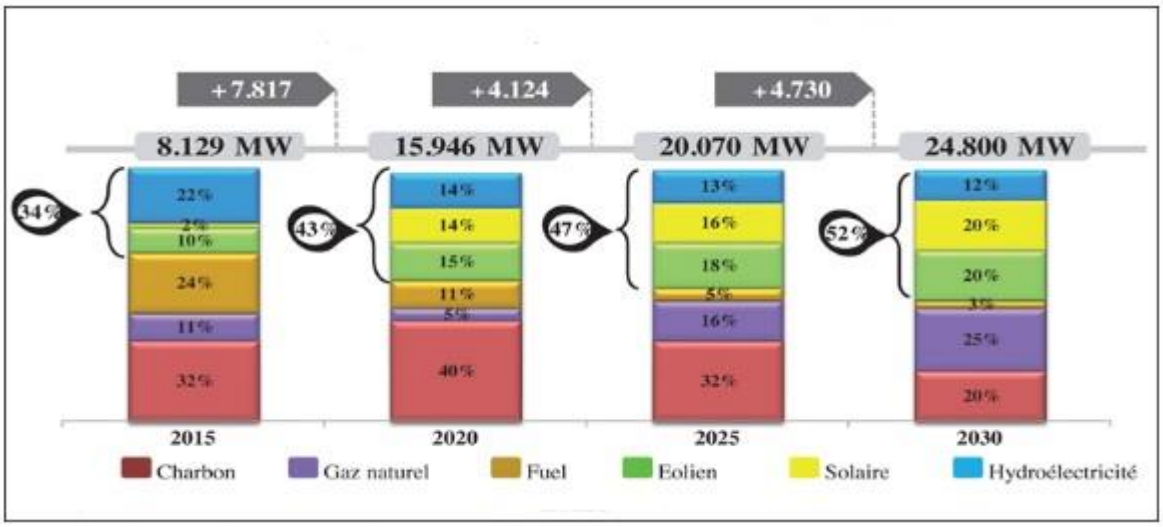


Figure 2: Evolution des sources d'énergie au Maroc(MEM, 2013)

IV. Energies renouvelables au Maroc

1. Potentiels d'énergies renouvelables au Maroc

La situation actuelle du Maroc dans le changement climatique et la diminution des ressources fossiles nécessite l'intégration des ressources énergétiques alternatives. Saidi et Mbarek (2016) ont révélé que l'expansion des technologies de production basées sur le nucléaire et les énergies renouvelables réduiraient considérablement les émissions futures de GES. L'énergie éolienne comme l'une des meilleures perspectives pour les sources d'énergie renouvelables a été constaté par les scientifiques italiens Savino et al. (2017) qui ont affirmé que bien que les grandes centrales éoliennes ont atteint une maturité relative, il y a eu un manque de recherche sur la rentabilité des éoliennes et leur perspective environnementale.

En effet, Bortolini et al. (2014) ont remarqué que les petites et moyennes centrales éoliennes nécessitent des investissements plus importants par rapport aux grandes, ainsi que le coût de l'électricité produite par les petites et moyennes les centrales éoliennes pourrait augmenter selon Sebri (2015). L'augmentation des prix de l'énergie, le réchauffement climatique et l'épuisement des sources d'énergie primaire exigent que l'énergie renouvelable doive être utilisée de façon appropriée pour soutenir le développement économique. Le Maroc a été sensibilisé de créer plusieurs organismes étatiques (AMEE, IRESEN, SIE, MASEN) et privés pour aider les chercheurs et les entreprises à trouver des solutions innovantes.

Le Maroc dispose d'un grand potentiel d'exploitation des énergies renouvelables, qui permettrait de résoudre deux problèmes : la sécurité énergétique et les problèmes liés au changement climatique. Le tableau 2 présente le lien entre la production d'électricité et les sources d'énergies renouvelables.

Tableau 2: Ressources énergétiques au Maroc

Ressources énergétiques	Niveau de production actuel (MW)	Niveau potentiel de production
Vent	500 MW avec 1500 MW en construction	25,000 MW
Hydraulique	1770MW avec 1625 MW en construction	--
Solaire	20 MW avec 500 MW en construction	20,000 MW
Biomasse	5 MW	950 MW
Géothermie	--	5 MW

Le Maroc bénéficie d'un riche potentiel des énergies renouvelables, principalement le solaire et l'éolien. A l'échelle mondiale, le Maroc occupe la neuvième position pour le solaire et la 31 pour l'éolien (Kousksou et al, 2015a). En effet, plusieurs projets d'énergie renouvelable qui sont en cours de réalisation afin de produire plus d'électricité propre et de réduire les émissions des GES. Le plan solaire marocain est l'un des plus grands projets au monde et on estime qu'il coûtera 7,8 milliards de dollars ainsi que les projets marocains d'efficacité énergétique et les programmes solaires et éoliens.

L'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le total de l'énergie primaire au Maroc résoudrait à la fois les problèmes environnementaux et la demande énergétique. Par conséquent, L'expansion de la sécurité énergétique pourrait également aider à comprendre les liens entre la sécurité, le développement durable et le changement climatique (Moore, 2017).

1.1 Energie solaire

L'énergie solaire est considérée comme l'une des alternatives d'énergie renouvelable, les technologies convertissent les radiations solaires en énergie électrique. Les centrales solaires sont généralement basées sur deux technologies différentes : la technologie photovoltaïque (PV) et la technologie solaire à concentration puissance (CSP). Actuellement, deux types de technologie (PV) sont disponibles sur le marché (Bahadori et Nwaoha, 2013) : Cellules PV à base de silicium cristallin et la technologie de couches minces fabriquées à partir de différents matériaux semi-conducteurs.

La capacité de production de l'énergie solaire au Maroc dans les différentes centrales solaires se répartis entre 100 MW et 500MW comme il est montré dans la figure 3.



Figure 3: Répartition de la production de l'énergie solaire au Maroc (AMEE, 2017)

Le Maroc a un grand potentiel pour la production d'énergie solaire, en appliquant à la fois les technologies photovoltaïques et à concentration (Nfaoui et El-Hami, 2018), il a commencé à construire une centrale solaire basée sur ces deux technologies. En effet, les centrales solaires au Maroc mettent en œuvre des projets l'exploitation d'autres ressources renouvelables telles que l'énergie éolienne et l'hydraulique. Ces centrales à base d'énergie renouvelable fourniraient de l'énergie à la population générale à un coût de prix abordable et compétitif dans le but d'atteindre un développement durable, accroître la productivité et la compétitivité, renforcer l'intégration régionale par l'ouverture aux marchés euro-méditerranéens de l'énergie, et harmoniser les législations énergétiques (Kousksou et al., 2015a).

1.2 Biomasse

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétale ou animale. Les principales formes de l'énergie de biomasse sont: les biocarburants pour le transport (produits essentiellement à partir de céréales, de sucre, d'oléagineux et d'huiles usagées) ; le chauffage domestique (alimenté au bois) ; et la combustion de bois et de déchets dans des centrales produisant de l'électricité, de la chaleur ou les deux.

Le Maroc dispose également d'un fort potentiel d'énergie de biomasse en exploitant les déchets de produits agricoles et de produits biologiques ménagers. La biomasse peut être sèche ou humide et elle peut être produite par transformation thermochimique, ce qui implique la combustion, la pyrolyse, la liquéfaction directe, et la gazéification. La biomasse pourrait être dérivée des déchets solides municipaux qui pourraient être utilisé dans une centrale électrique. La production annuelle moyenne de déchets urbains est de 270 kg par habitant.

Afin de définir le concept de la gestion des déchets, le Maroc a introduit la loi 28-00, publiée le 7 décembre 2006. Cette loi a classé les différents types de déchets, a précisé leur gestion, y compris les déchets dangereux. Elle a également défini la valorisation énergétique des déchets, car ces derniers sont importants

comme matériau de production de biomasse qui pourrait plus tard être utilisé dans une centrale électrique. La loi 28-00 précise deux façons de récupérer l'énergie des déchets, la première est la digestion anaérobie (méthanisation) et l'autre est l'incinération. Le méthane peut être utilisé pour les mêmes applications que le gaz naturel ou transformé en essence et mazout. L'incinération en tant que procédé peut être utilisée pour divers types de déchets, en revanche, cette méthode nécessite une température de 1000°C, cependant, l'incinération des déchets pollue l'environnement et rejette des volumes importants de CO_2.

Selon l'AMEE, le potentiel de production de biogaz par année est de 700 millions m^3, ce qui représenterait 4,2 MWh par année. Ainsi que, le potentiel théorique de biomasse provenant des eaux usées est de 230 millions de m^3 de biogaz par an, soit 1376MWh par an.

1.3 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une énergie produite à partir de la force du vent sur les pales d'une éolienne. Lorsque le vent se met à souffler, les forces qui s'appliquent sur les pales des hélices induisent la mise en rotation du rotor. L'énergie électrique ainsi produite peut être distribuée sur le réseau électrique grâce à un transformateur.

Le Maroc dispose d'un potentiel d'énergie éolienne de 25 000 MW. Actuellement, Dakhla est le site le plus approprié pour l'installation de centrales éoliennes. En effet, Dakhla et Laayoune conviennent au raccordement dans un système de réseau de conversion d'énergie éolienne, ainsi qu'Assila et Essouira (Allouhi et al., 2017). Le potentiel total d'énergie éolienne du Maroc est de 7936 TWh/an.

Dans le monde entier, des turbines modernes spéciales ont été utilisées pour convertir l'énergie éolienne en électricité. Cette puissance peut varier de 750 kW à 2,5 MW. Des projets d'énergie éolienne ont été planifiés ou développés aux endroits suivants : Tanger (150 MW) ; Midelt (100 MW) ; Jbel Lahdid (Essaouira) (200 MW) ; Tiskrad (Laayoune) (300 MW) ; et Boujdour (100 MW). Certains des projets mentionnés sont toujours en cours de réalisation.

1.4 Energie hydroélectrique

L'hydroélectricité ou énergie hydroélectrique exploite l'énergie potentielle des flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins, etc.). L'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur.

Il existe quatre technologies hydroélectriques :

- L'hydroélectricité sans barrage qui fournit un approvisionnement continu avec une certaine souplesse d'exploitation pour les fluctuations quotidiennes de la demande ;

- L'hydroélectricité de stockage est généralement un grand système qui utilise un barrage pour stocker l'eau dans un réservoir et elle peut offrir une capacité de stockage suffisante pour fonctionner indépendamment pendant plusieurs semaines ou même plusieurs mois ;
- L'hydroélectricité à accumulation par pompage assure l'alimentation en période de pointe, en exploitant l'eau qui est recyclée entre un réservoir inférieur et supérieur par des pompes qui utilisent l'énergie excédentaire du système en période de faible demande ;
- L'hydroélectricité en mer est un groupe moins établi qui utilisent les courants ou la puissance des vagues pour produire de l'électricité à partir de l'eau de mer.

A l'instar de tous les pays, le Maroc a commencé la gestion de l'eau avec la construction de barrages en 1945 qui a devenu particulièrement importants depuis les années 1960. La contribution de la puissance hydroélectrique installée est de 1800 MW selon les précipitations et elle représente de 5,1 % à 13,7 % de la consommation nette d'électricité.

Actuellement, la puissance installée de l'hydroélectricité est de 1,77 GW avec une production de 216 kilotonnes par an, soit 3689 GWh (2017). La demande d'énergie devrait tripler d'ici 2030, c'est pour cette raison le gouvernement marocain a accéléré le rythme de la réforme du système énergétique afin de mettre en œuvre une stratégie énergétique permettant aux opérateurs privés et publics de développer plus de10100 MW de capacité supplémentaire. Il est prévu que 1330 MW d'hydroélectricité dont 550 MW qui seraient développés par le secteur privé et environ 100,6 MW de petite hydroélectricité seraient développés par des opérateurs publics. Ainsi, le Maroc atteindrait une capacité hydroélectrique installée de 2000 MW en 2020. Actuellement, 10 centrales hydroélectriques de différentes capacités sont en cours de construction.

V. Programmes des énergies renouvelables au Maroc

Les programmes d'énergie renouvelable au Maroc suscitent un intérêt croissant de la part des investisseurs internationaux et locaux, ce qui permet au Maroc d'attirer davantage d'investissements dans ce secteur, comme l'investissement de Siemens de près de 100 millions de dollars pour la fabrication des parcs d'éoliennes au Maroc.

Le Maroc vise également, à travers l'exploitation de ses ressources naturelles en énergies renouvelables à contribuer à la préservation de l'environnement et à l'assurance de la durabilité de son développement économique et social. En plus de la garantie d'une terre propre pour les générations futures, le Maroc devrait respecter ses engagements internationaux pris lors de la COP22 en 2016 à Marrakech, dans le cadre de l'Accord de Paris sur le changement climatique, afin de réduire les GES, principalement le dioxyde de carbone. La mise en œuvre de la stratégie nationale en énergie a été financée par le Fonds de développement de l'énergie (FDE).

Le concept DESERTEC est l'un des projets majeurs qui se développent au Maroc, en effet, DESERTEC est un projet éco-énergétique de grande envergure qui prévoit l'exploitation du potentiel énergétique des déserts d'Afrique du Nord et du Moyen-Orient afin d'approvisionner durablement les régions avoisinantes en électricité verte, l'objectif de ce projet est de construire des centrales thermiques solaires à concentration (CSP) et d'exporter de l'énergie renouvelable de la région MENA aux pays européens. DESERTEC implique le développement d'un super réseau qui intègre tous les types d'énergies renouvelables.

Le Tableau 3 résume tous les projets qui vont être réalisés où en cours de construction pour les différentes sources d'énergie renouvelable.

Tableau 3: Projets pour les différentes sources d'énergies (AMEE, 2019)

Source d'énergie	Projets prévus	Lieu	Situation du projet	Potentiel de la production	Coût d'investissement
Energie éolienne	Taza	Taza	En cours de construction	Capacité : 150 MW Production annuelle : 430 GWh	3 milliard DH
	Jbel Lahdid	Essaouira	Appel d'offres	Capacité : 200 MW	
	Tiskarad	Tarfaya	Appel d'offres	Capacité : 300 MW Production annuelle : 1000 GWh	28,5 milliard DH
	Boujdour	Boujdour	Appel d'offres	Capacité : 100 MW Production annuelle : 325 GWh	
	Midelt	Midelt	Appel d'offres	Capacité : 150 MW	
	Tanger	Tanger	Appel d'offres	Capacité : 100 MW Production annuelle : 450 GWh	
	Tarfaya	Tarfaya	En cours de construction	Capacité : 300 MW	4,5 milliard DH
	Al koudia Al baida I	Tetouan	Projet planifié	Capacité : 100 MW	
	Al koudia Al baida II	Tetouan	Projet planifié	Capacité : 200 MW	
	Jbel Khalladi	Tanger	En cours de construction	Capacité : 120 MW	1,9 milliard DH
	Akhfenir	Tantan	Projet planifié	Capacité : 100 MW	
Energie Solaire	Ouerzazate	Ouerzazate	En cous de construction	Capacité : 580 MW Production annuelle : 1150 GWh	70 milliard DH
	Ain beni Mathar	Beni Mathar	En cous de construction	Capacité : 572 MW Production annuelle : 3538 GWh	4,6 milliard DH
	Foum el oued	Laayoune	Finalisé	Capacité : 500 MW	16,8 milliard DH
	Boujdour	Boujdour	Projet planifié	Capacité : 100 MW Production annuelle : 230 GWh	
	Sebkha Tah	Laayoune	Projet planifié	Capacité : 500 MW Production	

				annuelle : 1040 GWh	
	M'dez el menzel	Sefrou	En cous de construction	Capacité : 300 MW	2,87 Milliard DH
	Step abdelmoumen	Agadir	En cous de construction	Capacité : 350 MW	2,4 Milliard DH
Energie hydro-éléctrique	Khenifra	Khenifra	En cous de construction	Capacité : 128 MW	
	Lfahsa	Oued Laou	En cous de construction	Capacité : 300 MW	
Biomasse	Décharge de Fés	Fés		Capacité : 5 MW	

VI. Energie dans l'industrie

1. Consommation industrielle et économie d'énergie au Maroc

Au Maroc, la consommation électrique du secteur industriel représente 33% de la consommation nationale (figure 4). Elle est donc une privilégiée de tous les programmes d'économie d'énergie. En outre, l'industrie dispose des techniques pour la gestion d'énergie pour une meilleure utilisation.

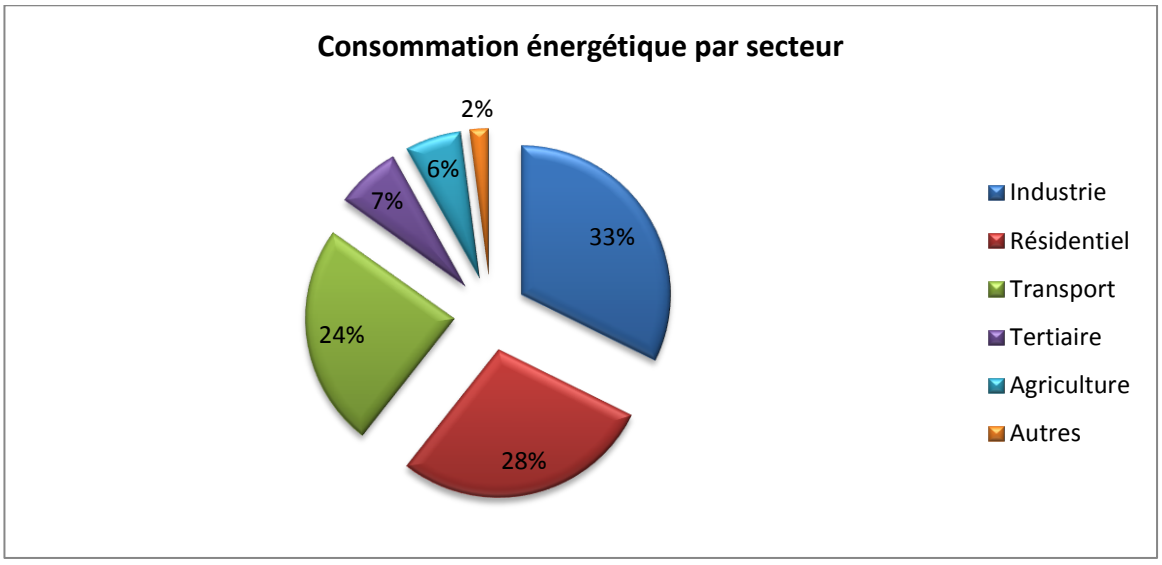


Figure 4: Répartition de la consommation énergétique par secteur (MEM, 2016)

Le coût de l'énergie diffère d'une énergie à une autre (Fioul N° 2, et le Fioul N° 7 etc…). Cette différence importante est due au coût de sa production, distribution et d'une certaine mesure de la facture énergétique. Dans la plupart des applications, l'énergie thermique du fioul ne peut pas se substituer à l'énergie électrique. Par conséquent, le coût élevé de l'énergie électrique doit inciter le consommateur à son utilisation judicieuse et efficace.

Des enquêtes détaillées pour l'estimation de la consommation électrique par poste d'utilisation n'ont pas été réalisées au niveau de secteur industriel (l'ONEE - Branche Electricité, 2017). Une analyse des consommations électriques des usines a été effectuée par des auditeurs et ils ont trouvés que les consommations des moteurs comptent respectivement entre 60% et 80% de la consommation totale. Les

moteurs électriques sont utilisés intensivement pour entraîner les ventilateurs, les pompes, les compresseurs et d'autres équipements des procédés industriels.

2. Efficacité énergétique dans l'environnement industriel

Aujourd'hui, les questions d'efficacité énergétique deviennent de plus en plus importantes au sein des organisations internationales, ce qui est traduit par son importance dans la lutte contre les crises énergétiques actuelles et futures. Efficacité énergétique est un outil de réduction la consommation d'énergie primaire permettant en même temps la réduction des émissions des GES de manière rentable (Rameh, 2018). De nombreux problèmes surviennent lorsque ces organisations relèvent le défi de produire avec moins de ressources, comme les matériaux et l'énergie. Ceci permettra d'atteindre les objectifs de long terme, comme le maintien d'un prix de l'énergie compétitif, l'assurance de la sécurité d'approvisionnement.
En effet, l'AIE (Agence internationale de l'énergie, 2015) a proposé des améliorations et des investissements dans l'efficacité énergétique dans le secteur du bâtiment et de l'industrie en tant que solution qui peuvent aider à réduire les émissions de GES causées par les activités humaines à l'échelle mondiale. La situation s'aggrave parce que la plus grande partie de l'approvisionnement en énergie dans le monde est basée sur les combustibles fossiles caractérisés par leur effet nocif sur l'environnement.
Au Maroc, à l'instar de tous les pays, l'énergie constitue le moteur principal du développement économique et social. Pour satisfaire des besoins énergétiques grandissants de son économie et de sa population croissante (Boharb et al, 2016), notre pays importe actuellement plus de 97% de ses approvisionnements en énergie en raison de la modicité de ses propres ressources. Visant une large applicabilité à travers tous les secteurs économiques du Maroc, une stratégie énergétique nationale s'articule sur quatre objectifs fondamentaux. Avec l'efficacité énergétique on peut économiser 12% d'énergie en 2020 et de 15% à l'horizon de 2030 (MEM, 2015).

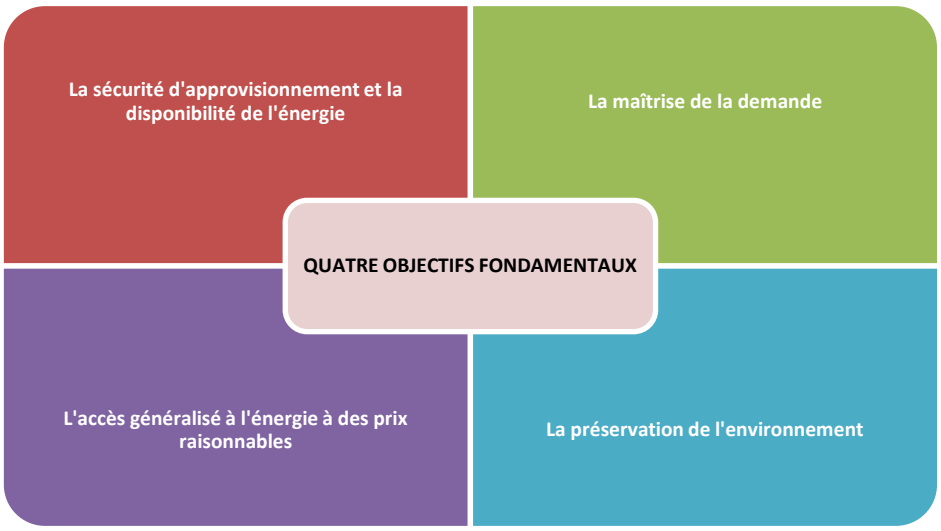


Figure 5: Quatre objectifs fondamentaux au Maroc pour 2030.

Le secteur industriel représente la plus grande partie de la consommation totale d'énergie mondiale et certainement responsable d'une grande partie des émissions mondiales de gaz à effet de serre (Xu, T.T., 2011 ; Broberg Viklund and Johansson, 2014). Plusieurs recherches récentes ont étudié le potentiel de réduction des émissions de gaz à effet de serre en améliorant l'efficacité énergétique dans le secteur industriel (Siitonen et al., 2010 ; Utlu and Parali, 2013).

Actuellement, le secteur industriel est responsable de 21% de la consommation d'énergie au Maroc (MEM, 2013), d'où l'obligation de l'audit énergétique dans les industries marocaines par le biais de la nouvelle loi (N°47-09 relative à l'efficacité énergétique), qui a pour but la réduction de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2 dans les industries.

3. Audit énergétique

Un audit est défini comme un « Examen et analyse méthodologique de l'usage et de la consommation énergétique d'un site, bâtiment, système ou organisme ayant pour objet d'identifier les flux énergétiques et les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique en définissant les actions nécessaires à la réalisation de ces économies et d'en rendre compte » (Selon la norme EN 16247-1 adoptée en septembre 2012)**..**

Pour toute organisation, la vérification énergétique aide à comprendre, à quantifier et à analyser son utilisation de l'énergie afin d'identifier les points les plus critiques et découvrir les opportunités où la consommation d'énergie peut être réduite (Saidur, 2010).

Après une étude sur les différentes installations énergivores (éclairage, chauffage, climatisation, ventilation, transport, Bâtiment…) on a pu constater qu'à partir des faibles investissements on peut garantir une meilleure gestion d'énergie.

Parmi les objectifs de l'audit énergétique on cite :

- ➔ Réaliser des économies d'énergie;
- ➔ Sécuriser l'entreprise vis-à-vis de fluctuations futures des prix de l'énergie;
- ➔ Réduire son impact environnemental (CO_2, poussières, et autres…);
- ➔ Disposer d'un plan d'action;
- ➔ Mettre en place une politique de management énergétique ;
- ➔ Répondre aux exigences réglementaires.

3.1 Démarche d'audit énergétique

L'audit énergétique dans les différents secteurs s'effectue selon les étapes présenté dans la figure suivante :

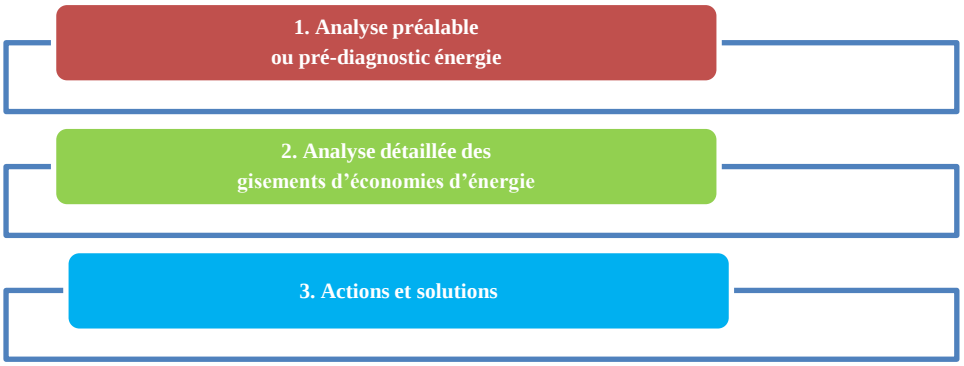


Figure 6: Démarche d'audit énergétique

3.1.1 Analyse préalable ou pré-diagnostic énergie

Cette étape vise à positionner l'entreprise de point de vue actions et réalisations en matière d'efficacité énergétique et de l'orienter vers une meilleure gestion d'énergie en choisissant le niveau qui convient en audit énergétique et qui sera le plus rentable et efficace (Audit énergétique réglementaire : AFNOR Energies, 2011).

3.1.2 Analyse détaillée des gisements d'économies d'énergie

Sur la base des résultats de l'étape 1, l'industriel décide d'orienter l'audit sur tout ou partie des gisements d'économies identifiés par le prestataire. Ce dernier approfondit les axes de travail préférentiels retenus en établissant les besoins en énergie (en quantité et qualité, suivant les cycles de production et dans le temps) des différents processus industriels et les moyens énergétiques associés, ainsi que la fourniture en utilités (Audit énergétique réglementaire : AFNOR Energies, 2011).

3.1.3 Actions et solutions

En accord avec l'entreprise et en fonction des résultats de la phase précédente, l'auditeur détermine les différentes actions sur les procédés et les utilités (chauffage, éclairage, etc.), les coûts liés aux solutions d'amélioration sont évalués (études, investissement, bonnes pratiques, etc.) ainsi que l'impact sur le bilan d'exploitation du site. Ceci permet d'établir les temps de retour brut sur investissement. Les actions peuvent inclure une optimisation des achats d'énergie (Audit énergétique réglementaire : AFNOR Energies, 2011).

3.2 Résultats des audits énergétiques dans l'industrie Marocaine

L'audit énergétique dans les industries est la méthode la plus efficace utilisée pour évaluer l'économie d'énergie potentielle et de proposer un plan d'actions correctives pour parvenir à un processus industriel propre et durable, voilà pourquoi les institutions, les entreprises et les individus dont l'énergie thermique de la consommation et / ou dépasse électrique un seuil spécifique à chaque secteur fixé par la réglementation

sont soumises à un audit énergétique obligatoire et périodique. Audit énergétique obligatoire s'applique également aux institutions et sociétés de production, le transport et la distribution d'énergie.

L'ADEREE a été accompagnée par plus de 42 entreprises à réaliser leur audit énergétique, et de déterminer la consommation énergétique par les différents sites industriels, et par la suite, il a présenté un certain nombre de recommandations par le système comme il est montre dans les deux figures suivantes.

Tableau 4: Nombres d'unités bénéficiaires ainsi leurs consommation énergétiques et Rejet en CO_2

Nombre d'unités bénéficiaires	**42 entreprises**
Consommation énergétique	1393 GWH
Rejet en CO_2	635 Kt eq de CO_2
Facture énergie-eau	749 Millions de Dhs

Tableau 5: Actions d'économies d'énergies proposées par l'ADEREE

Actions d'économies d'énergies	**449**
Investissements	264 Millions de Dhs
Economie annuelle de la facture	16% soit 120 Millions de Dhs
Réduction des GES	94 Kt eq de CO_2

Ce réel gain par l'audit énergétique ouvre la porte, au-delà de l'action "sans regrets" bonnes pratiques, des solutions de profondeur d'analyse techno- envisagées, et d'étudier les phases ingénierie technique et financière détaillée (En tenant compte notamment des possibilités offertes par le dispositif d'économie d'énergie Certificats). Cette approche permet en outre de structurer la politique de maintenance pour assurer la performance à long terme des investissements de milliers de Dirham, et parmi les investissements réalisés dans les systèmes que nous siégeons déjà, où l'eau représente les faibles valeurs d'investissement.

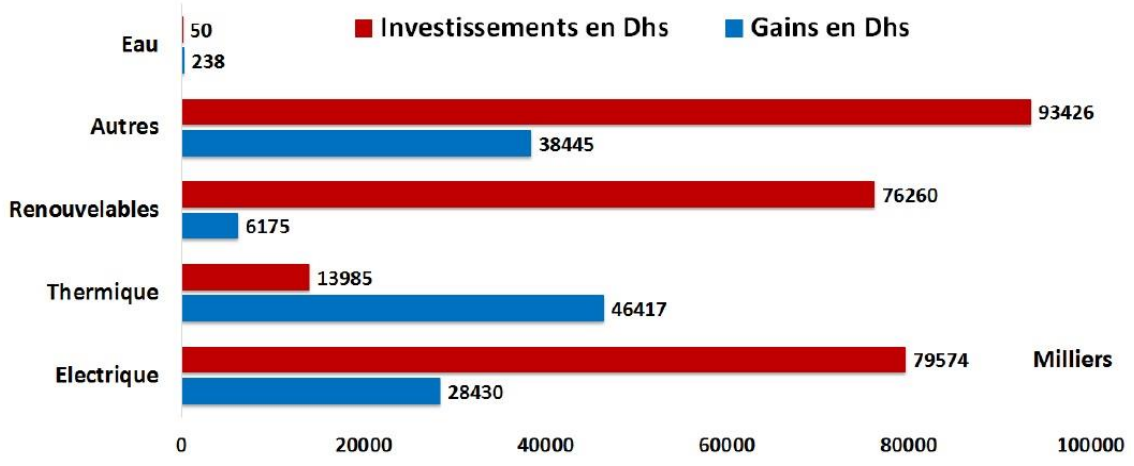


Figure 7: Répartition des investissements et des gains par système.

L'objectif d'investissement est d'assurer des gains financiers pour les entreprises environnementales et industrielles respectés pour réduire l'effet de serre des émissions de gaz où il est représenté dans la tonne équivalent CO_2 et de donner des recommandations qui peuvent aider les entreprises à atteindre leurs objectifs visés en consommations énergétiques et les émissions en CO_2, la deux figures ci-dessous permettent de montrer respectivement le nombre de recommandations par système ainsi que le système qui nécessite plusieurs modifications et le pourcentage de chaque système en quantité d'émissions de CO_2.

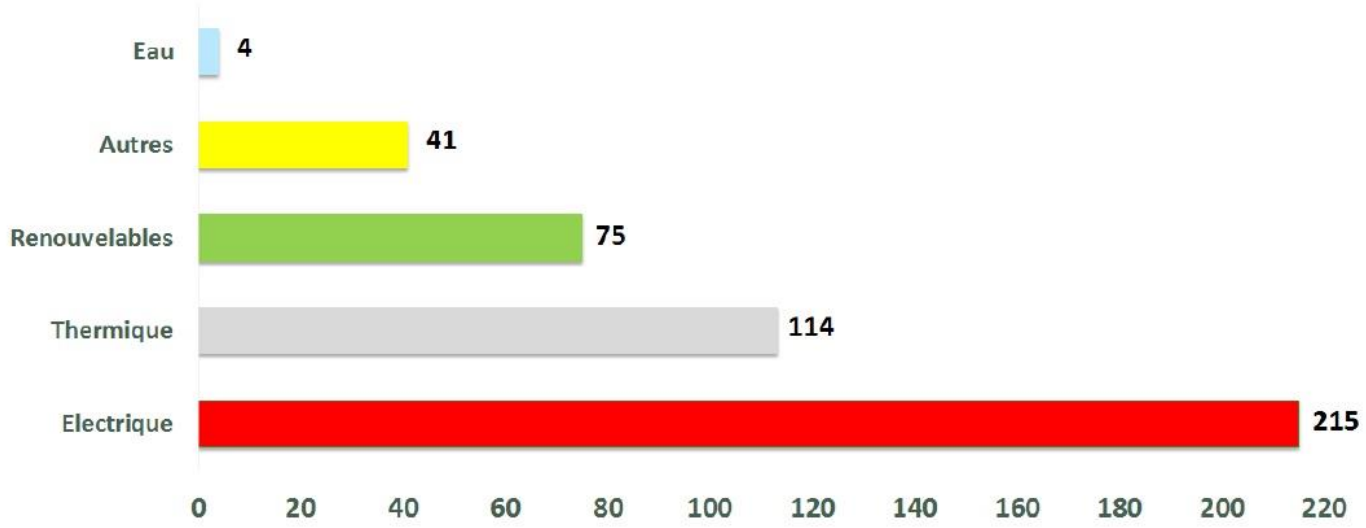


Figure 8: Répartition des recommandations par système

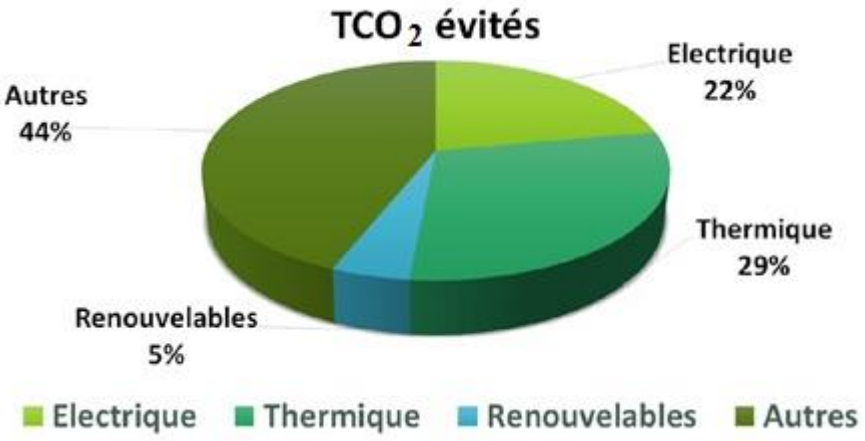


Figure 9: Pourcentage de chaque système en tonnes de CO_2 évités.

Le suivi des actions et des recommandations qui a été proposé par ADEREE est une finalité nécessaire pour réduire les factures d'énergie maximales et de se conformer à l'environnement, et parmi les actions il y on a qui ont été écartées et autres qui ont planifiées et réalisées.

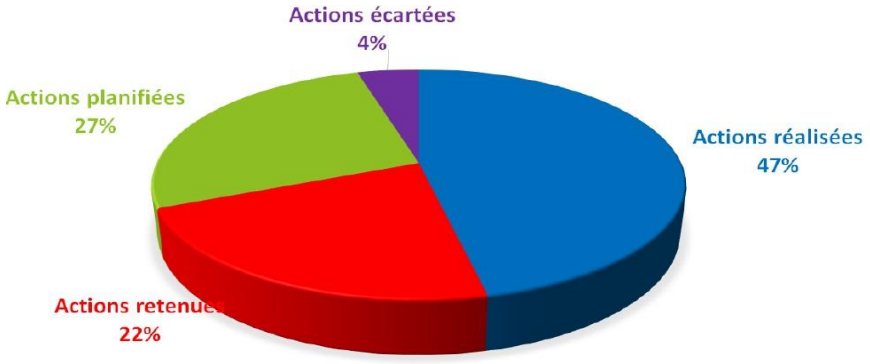


Figure 10: Actions proposées pour le suivi et la mise en œuvre de recommandations.

Les actions qui ont été réalisées, la figure ci-dessous résume, ou il y a le système électrique qui présente 123 actions réalisées.

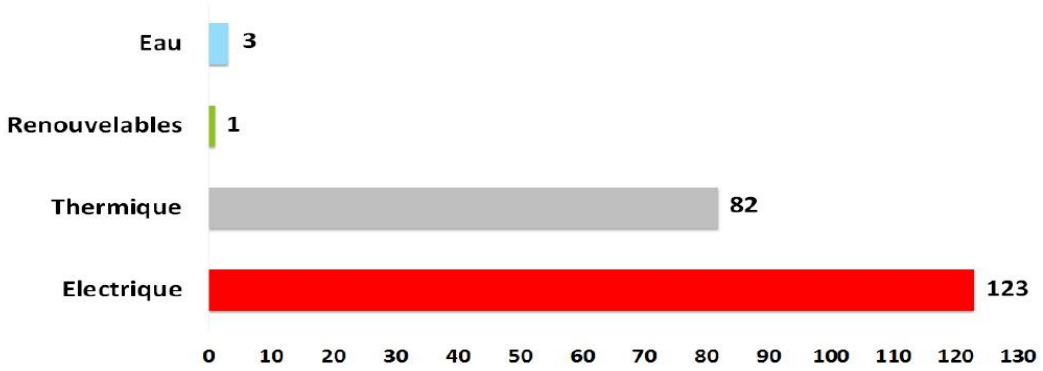


Figure 11: Nombre d'actions réalisés par système.

Chapitre II : Règlementation et normalisation en matière de l’efficacité énergétique

I. Règlementation et normalisation au niveau international

1. Normalisation du domaine de l'environnement

L'ISO 14001 est la norme qui définit les critères d'un système de management environnemental. Son objectif est d'encourager les organisations à améliorer continuellement leurs pratiques dans ce domaine (Belmir and Zahri, 2017). Tout type d'organisation, indépendamment de ses activités ou de son secteur, peut l'utiliser et être certifié. La norme garantit à la direction, au personnel et aux intervenants externes que leurs impacts environnementaux sont abordés et améliorés.

La mise en place d'un système de management de l'environnement (SME) devient une nécessité pour les entreprises de toutes sortes dans le but d'améliorer leurs performances globales. La norme ISO 14001 propose aux acteurs économiques, sur une base volontaire, de mettre en place un système de management environnemental et d'obtenir une certification d'entreprise qu'ils peuvent utiliser dans leur communication externe. La notion de système de management de l'environnement reprend les règles d'assurance de la qualité et les transpose dans l'environnement industriel (réduction de la consommation d'énergie et de matières premières, gestion des déchets et rejet, réduction des émissions de CO_2, etc.). La norme ne traite pas de la façon dont une organisation élimine ou réduit ses déchets dangereux, et ses émissions ou comment elle construit ses processus pour une plus grande efficacité environnementale. Il traite de la mise en œuvre, par un organisme, de la structure de gestion qui garantira, entre autres, que les programmes de réduction des émissions seront appliqués, Le but d'un SME est de fournir une assistance aux entreprises qui leur permettent de mieux gérer leurs impacts environnementaux et d'améliorer leurs résultats. Il est basé sur l'amélioration continue de la performance globale; le but étant de régler de nouveaux objectifs lorsque les premiers sont atteints, etc.

La norme ISO 14001 ne définit pas d'objectifs précis, ni de technologies, ni même une forme particulière d'organisation. Grâce à des recommandations générales, il invite les entreprises à repenser et formaliser leur organisation tout en respectant certaines règles concernant les points suivants: engagement de la direction, planification des améliorations et gestion des activités, organisation des actions correctives et préventives, formation du personnel dans le domaine de l'environnement. Cette norme constitue un outil essentiel pour aider les PME/ PMI à atténuer leur impact sur l'environnement en général et de réduire leur émissions en CO_2 en particulier. C'est le cas de la norme 14064 qui concerne la mise en place d'une gestion rationnelle des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES). Ce référentiel est destiné aux entreprises, aux institutions et aux promoteurs de projets impliqués dans des programmes, volontaires ou réglementés, ainsi qu'aux gestionnaires chargés d'assurer la gestion de projets de GES.

L'objectif de cette norme est de :

- Promouvoir la cohérence, la transparence et la crédibilité de la quantification, de la surveillance, de la rédaction des rapports et de la vérification des émissions de GES ;
- Permettre aux entités d'identifier et de gérer les charges, les ressources et les risques liés aux GES ;
- Faciliter le commerce des permis et crédits d'émission de GES ;
- Favoriser la conception, le développement et la mise en œuvre d'initiatives et de programmes GES comparables et cohérents.

Les textes normatifs proposent trois parties organisationnelles:

- ISO 14064-1:2006, Gaz à effet de serre – Partie 1 : Spécifications et directives, au niveau des organisations, pour la quantification et la déclaration des gaz à effet de serre et leur suppression.
- ISO 14064-2:2006, Gaz à effet de serre – Partie 2 : Spécifications et directives, au niveau du projet, pour la quantification, le contrôle et la déclaration des réductions d'émission ou d'accroissement de suppression des gaz à effet de serre.
- ISO 14064-3:2006, Gaz à effet de serre – Partie 3 : Spécifications et directives pour la validation et la vérification des déclarations des gaz à effet de serre.

L'enveloppe gazeuse de la Terre, l'atmosphère, est à l'origine de notre climat actuel et régit ce que l'on appelle "l'effet de serre". Certains gaz (H_2O, CO_2, CH_4...), présents naturellement, retiennent la chaleur et permettent le maintien d'une température moyenne à la surface du globe d'environ 14°C au lieu de – 18°C. Dans cet état d'équilibre, l'effet de serre est naturel et nécessaire. Par contre, si l'on augmente la concentration de ces gaz, ou que l'on crée de nouveau gaz "chauffants" (les halocarbures, dont les plus connus sont les gaz fluorés : les CFC, les HCFC, les HFC, les PFC, le SF6 et le NF_3), cet équilibre sera bouleversé.

2. Norme au service du système de management de l'énergie

Dans le contexte économique et environnemental actuel, la performance énergétique constitue un objectif prioritaire et stratégique pour les organismes (entreprises, autorités ou institutions de droit public ou privé). Elle permet de diminuer les coûts liés à l'énergie et conduit à une réduction des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux associés. Destinée à tous les organismes, la norme NF EN ISO 50001 a pour objectif de les aider à développer une gestion méthodique de l'énergie pour améliorer leur performance énergétique. Elle s'inspire des principes de la norme d'origine européenne NF EN 16001 qu'elle remplace dans les collections nationales. Publiée le 15 juin 2011 par l'ISO, l'ISO 50001 a été reprise à l'identique par les organismes de normalisation européens CEN et CENELEC en octobre 2011. L'ISO 50001:2018 adopte la structure universelle des normes de management (HLS) commune à toutes les

normes ISO. Certains des changements de l'ISO 50001:2018 par rapport à l'ISO 50001:2011 sont dus à la structure HLS, d'autres sont spécifiques au management de l'énergie.
Une gestion efficace de l'énergie aide les organismes à réaliser des économies, à réduire leur consommation d'énergie et à faire face au réchauffement climatique (Belmir and Chramate, 2016). ISO 50001 guide les organismes, quel que soit leur secteur d'activité, dans la mise en œuvre d'un système de management de l'énergie qui leur permettra de faire un meilleur usage de l'énergie.

La réduction des coûts et amélioration de l'efficacité font partie des critères que recherchent les organismes – sans distinction de taille ou de statut – en se dotant d'un système de management de l'énergie. On parle alors d'amélioration de la performance énergétique. Cinq nouvelles normes ISO dans ce domaine offrent des conseils et des outils plus spécifiques pour les y aider.

Parmi les normes qui sont essentielles pour les entreprises est celle de l'ISO 50002: 2014 de l'audit énergétique, L'audit énergétique doit idéalement s'insérer dans une démarche plus globale que l'on peut qualifier d'étude énergétique.

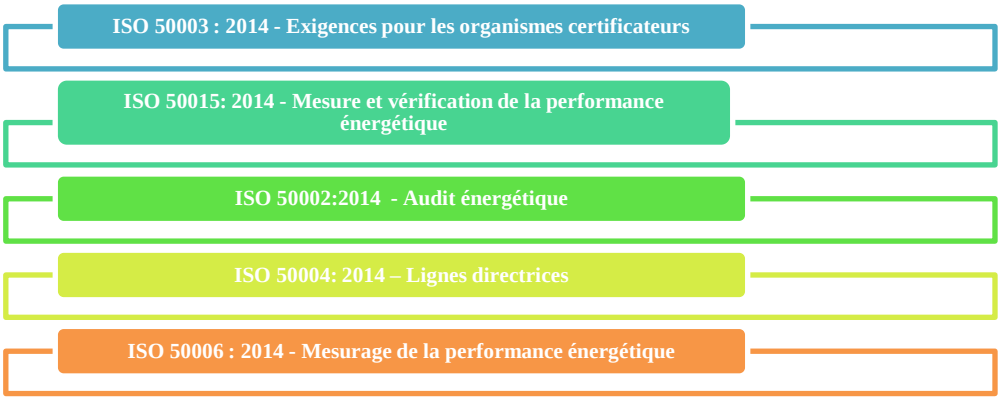


Figure 12: Famille de l'ISO 50000.

L'étude énergétique est le moyen d'identifier le gisement d'économies d'énergie et d'établir un plan directeur pour son exploitation rationnelle qui permet d'adapter en continu la stratégie énergétique de l'entreprise. Cette approche comporte trois phases : l'audit dont il est question ici, les études de faisabilité et le plan directeur qui en découlent.

L'étude énergétique peut ensuite être suivie d'avant projets et de réalisations concrètes, y compris sans investissement (organisation, management, méthodologie, etc.), et selon la norme EN 16247-1 adoptée en septembre 2012, un audit est défini comme un « examen et analyse méthodologique de l'usage et de la consommation énergétique d'un site, bâtiment, système ou organisme ayant pour objet d'identifier les flux énergétiques et les potentiels d'amélioration de l'efficacité énergétique en définissant les actions nécessaires à la réalisation de ces économies et d'en rendre compte ».

La NF EN 16247 indique comment réaliser un Audit énergétique, elle décrit une succession d'étapes du processus d'audit ainsi que les caractéristiques générales que l'auditeur doit respecter (objectivité, transparence…). Elle se compose de 5 normes en fait : une norme « chapeau » qui s'applique à tous types d'activités (la NF EN 16247-1), 3 normes sectorielles dédiées respectivement aux Bâtiments, aux Procédés industriels et au Transport (16247-2, -3 et -4), et enfin une norme à venir sur les compétences de l'auditeur (la future 16247-5). Ces normes permettent d'encadrer la qualité des audits obligatoires, puisqu'ils doivent respecter tous les points de la norme, et de qualifier les fournisseurs de l'audit réglementaire.

A remarquer qu'avec cette définition officielle, on abandonne le terme « diagnostic » au profit de celui « d'audit » énergétique. Auparavant, un référentiel des bonnes pratiques BP X30-120 définissait la méthodologie des audits énergétiques dans l'industrie depuis 2006. L'audit énergétique est ainsi le point de départ essentiel pour une bonne définition des actions de maîtrise de l'énergie.

3. Structure de l'ISO50001 et approche PDCA (Plan-Do-Check-Act)

3.1. Exigence de l'ISO50001

La norme ISO 50001 spécifie les exigences liées à un système de management de l'énergie et fournit des recommandations de mise en œuvre.

La norme requiert que l'organisme définisse une politique énergétique adaptée à ses usages et à sa consommation. Cette politique inclura un engagement de mise à disposition des informations et ressources nécessaires et encouragera l'achat de produits et de services économes en énergie ainsi que la conception en vue de l'amélioration de la performance énergétique.

La direction devra démontrer son engagement à soutenir la démarche et elle désignera un représentant, doté des compétences nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système de management de l'énergie.

Au cours de la revue énergétique, les secteurs à forte consommation et les opportunités d'amélioration de la performance énergétique seront identifiés. La consommation de référence sera un des éléments de sortie de la revue énergétique. La norme exige par ailleurs la définition d'indicateurs de performance énergétique.

Pour assurer le bon suivi des caractéristiques de son activité déterminant la performance énergétique, l'organisme définira et mettra en œuvre un plan de mesure de l'énergie adapté.

Il établira des objectifs et cibles cohérents avec sa politique énergétique et les plans d'actions correspondants.

Cette norme reprend la structure de la norme ISO 14001 sur le management environnemental : elle repose sur l'approche PDCA (Belmir, 2016) et s'appuie sur l'analyse des usages et consommation énergétiques pour identifier les secteurs d'usage énergétique significatifs et les potentiels d'amélioration.

Surveillance et mesurage sont au cœur de la démarche : la définition et la mise en œuvre d'un plan de mesure énergétique, adapté à la taille et à la complexité de l'organisme, est une exigence de la norme.

Outre intégrer la performance énergétique parmi les critères d'évaluation des offres lors de l'achat d'équipements, de matières premières et de services, la norme demande également que l'organisme prenne en compte les opportunités d'amélioration lors de la conception ou la rénovation d'installations, équipements, systèmes et processus pouvant avoir un impact significatif sur la performance énergétique.

En accord avec les exigences de la norme, les organismes évalueront et réviseront leur système de management de l'énergie pour adapter leur politique énergétique et la mettre en œuvre. Ils seront alors à même de démontrer leur conformité à la norme internationale par une auto-évaluation ou par une certification tierce partie

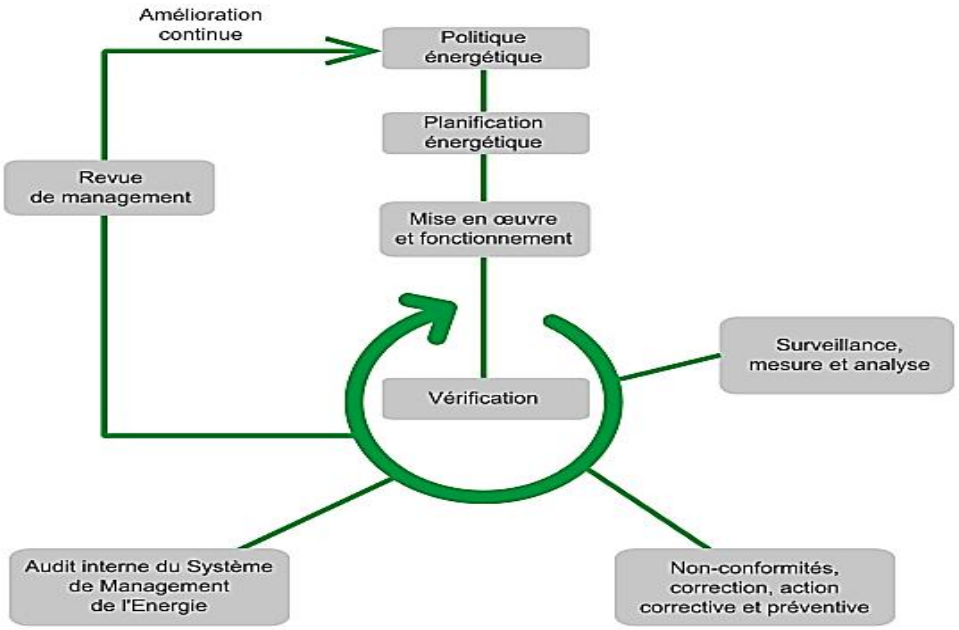


Figure 13: Modèle de système de management de l'énergie suivant la norme ISO 50001.

La norme spécifie les exigences liées à un système de management de l'énergie et fournit des recommandations de mise en œuvre. La norme requiert que l'organisme définisse une politique énergétique adaptée à ses usages et à sa consommation. Cette politique inclura un engagement de mise à disposition des informations et ressources nécessaires et encouragera l'achat de produits et de services économes en énergie ainsi que la conception en vue de l'amélioration de la performance énergétique. La direction devra démontrer son engagement à soutenir la démarche et elle désignera un représentant, doté des compétences nécessaires pour assurer le bon fonctionnement du système de management de l'énergie. Au cours de la revue énergétique, les secteurs à forte consommation et les opportunités d'amélioration de la performance énergétique seront identifiés. La consommation de référence sera un des éléments de sortie de la revue énergétique. La norme exige par ailleurs la définition d'indicateurs de performance énergétique. Pour

assurer le bon suivi des caractéristiques de son activité déterminant la performance énergétique, l'organisme définira et mettra en œuvre un plan de mesure de l'énergie adapté. Il établira des objectifs et cibles cohérents avec sa politique énergétique et les plans d'actions correspondants. En accord avec les exigences de la norme, les organismes évalueront et réviseront leur système de management de l'énergie pour adapter leur politique énergétique et la mettre en œuvre. Ils seront alors à même de démontrer leur conformité à la norme internationale par une auto-évaluation ou par une certification tierce partie.

- **Un système de management de l'énergie conforme à la NF EN ISO 50001 : l'assurance d'un usage optimisé de l'énergie**

La norme ISO 50001 s'inspire de la norme européenne EN 16001 et de plusieurs normes et bonnes pratiques nationales développées par certains pays (Chine, Danemark, Irlande, Suède, Pays Bas, USA…). Les pouvoirs publics ou les agences de l'énergie de ces pays ont mis en place des accords avec des organisations sectorielles ou des entreprises, qui requièrent la mise en place de systèmes de management de l'énergie conformes à un référentiel (actuellement remplacé progressivement par la norme ISO 50001), les entreprises qui s'engagent bénéficient en retour d'aides publiques et d'appui technique. Senternovem, agence de l'énergie néerlandaise, rapporte que les entreprises impliquées dans les accords de long terme montrent, sur la période 2001- 2007, une amélioration de leur efficacité énergétique annuelle de 2,4% contre une amélioration de seulement 1% pour les entreprises hors accords de long terme. SEI témoigne que l'amélioration de la performance énergétique pour les entreprises ayant mis en place un système de management a été supérieure, respectivement de 8 et 6% en 2007 et 2008, à celle des sociétés simplement engagées dans de bonnes pratiques de maîtrise de l'énergie, respectivement de 1 et 4,7% (résultat exceptionnel lié au prix du baril très élevé en 2008). En Suède, les opportunités d'investissement révélées en appliquant des systèmes de management de l'énergie normalisés dans une centaine d'entreprises ont permis l'économie de 1 TWh annuel d'électricité. De plus, souligne l'agence de l'énergie nationale, les investissements permettant ces économies furent 20% moins onéreux que des investissements pour une même quantité d'électricité produite à partir d'installations éoliennes ou nucléaires. Par ailleurs, la majorité des entreprises avaient développé au préalable des systèmes de management environnemental et identifié l'énergie comme un aspect important ; néanmoins les systèmes de management de l'énergie ont eu une forte valeur ajoutée.

- **La référence mondiale sur le management de l'énergie**

Dans son rapport 2008 présentant 25 recommandations pour des politiques d'efficacité énergétique, l'AIE rapporte qu'au sein de l'OCDE l'adoption de pratiques de management de l'énergie par les industries fortes consommatrices permettent d'économiser de 5 à 22% d'énergie finale. Suite à la recommandation 6.3 sur le management de l'énergie, l'agence a publié un guide pour des programmes gouvernementaux dans ce domaine, lequel fait largement référence à la norme ISO 50001.

3.2. Structure PDCA

Le Système de management de l'énergie comprend un ensemble d'éléments ayant des interrelations ou des interactions entre eux pour établir la politique énergétique, les objectifs énergétiques et les processus et procédures pour atteindre ces objectifs. Pour ce faire, la norme est basée sur un système d'amélioration en continu: Plan > Do > Check >Act (Planifier > Faire > Vérifier > Agir) qui intègre les exigences de système de management de l'énergie dans toutes les pratiques de l'entreprise comme détaillé ci-dessous pour chaque étape de cycle :

3.2.1. Phase 1 « Plan (Planifier) »

Cette phase est consacrée à l'évaluation des facteurs énergétiques selon les étapes suivantes :

- ***Réalisation de la revue énergétique***

Au cours de la revue énergétique, les secteurs à forte consommation et les opportunités d'amélioration de la performance énergétique seront identifiés par l'analyse des usages et des consommations énergétiques (Belmir et al., 2017) c'est à dire l'identification des sources d'énergie actuelles (électricité, gaz, pétrole…) et des secteurs d'usage énergétique significatifs (installations, équipements, systèmes, procédés..) et tout facteur d'impact significatif pertinent.

A titre d'exemple, ci-dessous les données ou informations-types collectées lors de cette analyse :

- Consommation et coûts énergétiques annuels ;
- Profil de charge énergétique et son développement lors des dernières années ;
- Connexions et données (puissance nominale, maximale, réactive, etc…) des charges principales ;
- Contrats d'approvisionnement et tarifs pour tous les types d'énergie ;
- Situation de l'acquisition de données relatives à l'énergie (nombre et location des compteurs et des appareils de mesure pour l'électricité, l'eau, le gaz, etc…) ;
- Réflexion sur la pertinence de mesurer, d'enregistrer et de surveiller la qualité du courant.

Afin de garder la complexité d'une analyse des consommations électriques dans des limites raisonnables, toutes les zones ou appareils énergivores ne peuvent être examinés avec la même profondeur. Tout d'abord les zones et l'étendue des analyses sélectionnées. Cela inclut les équipements et les zones que l'on soupçonne d'être les plus énergivores tels que les groupes froids, la climatisation, les compresseurs, les machines de production, etc…ou les zones qui garantissent des économies d'énergie simples et rapides.

Les données de sortie de la revue énergétique seront principalement :

- Identification des sources d'énergie ;
- Répartition des consommations par usages énergétiques ;

- Les usages énergétiques significatifs et les critères de significativité ;
- L'estimation et hiérarchisation des potentiels d'économies d'énergie ;
- Liste des facteurs énergétiques ayant un impact sur les consommations énergétiques.

❖ ***Établir une situation de référence***

La situation ou consommation de référence peut être déterminée à partir des données des années précédentes en tenant compte des paramètres d'ajustement (facteurs énergétiques, conditions climatiques, saisons, cycles d'activités économiques, …). La situation de référence est associée à une période pertinente qui est généralement l'année.

❖ ***Déterminer les indicateurs de performances énergétiques***

Ces indicateurs doivent permettre de suivre la performance énergétique de l'entreprise et les objectifs qu'elle s'est fixés. Ils peuvent être spécifiques par type d'énergie ou par usage et doivent être rapportés à des éléments qui traduisent l'activité et/ou l'occupation (exemple : kWh/unité produite/mois…). Pour les activités tertiaires, l'indicateur de performance le plus souvent utilisé est le kWh/m² sur une période de temps (Jebbour et al., 2020). L'entreprise a le choix de ses indicateurs de performance énergétique. Ils sont généralement rapportés à la notion d'unité d'œuvre. Il est recommandé d'utiliser les indicateurs de performances énergétiques communs à la profession concernée.

❖ ***Déterminer les objectifs et les cibles énergétiques***

A partir des résultats de la revue énergétique, de la situation de référence, l'entreprise se fixe des objectifs d'amélioration de sa performance énergétique. Ces objectifs généraux sont déclinés en cibles pour chaque secteur ou sous-secteur pertinent. Les cibles doivent être quantifiables avec des délais fixés ; l'atteinte de ces objectifs et cibles est évaluée grâce aux indicateurs de performance énergétique déterminés.
L'établissement des objectifs et cibles doit prendre en compte les conditions financières, opérationnelles et commerciales de l'organisme, ses choix technologiques, la conformité aux exigences légales et les points de vue des parties intéressées.

❖ ***Déterminer le plan d'actions énergétique***

Les résultats de l'analyse énergétique sont la base pour la planification des actions d'efficacité énergétique pour réduire la consommation et les coûts. Le plan d'actions décrit les actions à mettre en œuvre afin d'atteindre les objectifs et les cibles. Il s'appuie sur les éléments de la revue énergétique et notamment sur la partie « potentiels d'économie d'énergie ». Le plan d'actions doit identifier les investissements éventuels mais aussi les actions qui ne nécessitent pas d'investissement matériel (exemple : modification de consigne

de température, de démarrage, intégration de bonnes pratiques). Il doit préciser pour chaque tâche, une personne, un délai, les moyens nécessaires et la description de la méthode de suivi des résultats.

3.2.2. Phase 2 « DO (faire) »

Cette étape consiste à la mise en œuvre d'un plan d'action de management de l'énergie dont la politique énergétique constitue l'étape initiale où sont définis les objectifs qui doivent être accomplis, les cibles à atteindre, les actions à mettre en œuvre, les ressources pour leur implantation et les investissements à réaliser, c'est dans ce cadre s'inscrit la 2^{éme} étape de l'audit énergétique qui est basé sur les axes suivants :

Tableau 6: Exemples-types d'actions d'amélioration énergétique

Exemples d'actions organisationnelles d'efficacité énergétique :	**Exemples d'actions techniques d'efficacité énergétique :**
- Les coûts du cycle de vie sont au premier plan : l'efficacité énergétique comme un critère de choix. - Formation des employés - Ajustement des processus de productions. - Adapter les contrats énergétiques en fonction des besoins. - Mise en route progressive des processus de productions afin d'éviter des pics de consommations. - Optimisation des paramètres des processus (aussi bien d'un point de vue de la consommation).	- Utilisation de moteurs de classe IE2 (env. 95% des coûts de cycle de vie d'un moteur électrique sont des coûts énergétiques). - Gestion des charges – optimisation de la gestion de pic de demande. - Optimisation du dimensionnement des moteurs. - Réduction des fuites dans le réseau d'air comprimé. - Utilisation de la récupération de chaleur.

Les plans d'action préalablement conçus seront implantés, la documentation requise et le plan de communication interne seront réalisés et les services énergétiques, produits, équipements et énergie nécessaires seront acquis (Idrissi and Belmir, 2016).

Deux types de mesures sont différenciés. Ce sont les actions techniques pour lesquelles différents niveaux d'investissements sont nécessaires, mais aussi des actions organisationnelles qui intègrent une meilleure utilisation de l'énergie dans les opérations quotidiennes de l'entreprise. Les deux types d'actions offrent des potentiels d'économies considérables et doivent être entreprises avec le même degré de priorité. Les actions d'efficacité énergétiques doivent être mises en valeur dans le plan d'actions et priorisées quelle action offre le plus grand bénéfice au moindre coût.

3.2.3. Phase 3 « Check (vérifier) »

Cette phase comprend les points de surveillance et de mesure des processus et leurs caractéristiques opérationnelles qui permettent de les comparer avec la politique et les objectifs, et informer des résultats susceptibles d'améliorer les indicateurs de performances proposés. Ceci fait référence aux processus de contrôle. Il sera important d'évaluer l'efficacité de l'action entreprise grâce à une revue ciblée et des processus d'audit. Si les faiblesses du système sont complexes, une étude pilote peut être nécessaire afin d'en appréhender tous les aspects. L'organisme doit planifier et mettre en œuvre les processus de surveillance, de mesure, d'analyse et d'amélioration nécessaires pour :

- Les usages énergétiques significatifs et autres données (revue énergétique) ;
- Les facteurs pertinents associés ;
- Les IPé ;
- L'efficacité des plans d'action dans l'atteinte des objectifs et cibles ;
- L'évaluation de la consommation énergétique réelle par rapport à celle attendue.

Il doit également effectuer une révision périodique des besoins en mesure, garantir la fiabilité de ses équipements de mesure, assurer le suivi des écarts ainsi que l'enregistrement et documentation des résultats. Les mesures et surveillances peuvent porter également sur l'évaluation de la conformité aux exigences légales et celles souscrites, les audits internes du système de management de l'énergie.

3.2.4. Phase 4 : « Act (Agir) »

L'objectif de cette étape est de mener à bien des actions pour améliorer en permanence la performance énergétique et le système de management de l'énergie. Ces actions peuvent être réparties en deux types : des actions organisationnelles et des actions techniques. Il s'agit principalement de mettre en œuvre des procédures de maitrise des non-conformités, des actions correctives et des actions préventives. Les actions proposées doivent être prises en compte dans le cadre de la revue énergétique. Enfin, une revue de direction doit être conduite périodiquement afin de s'assurer de la conformité, de la pertinence, de la viabilité et de l'efficacité du système de management de l'énergie et de son éventuelle mise à jour ou amélioration.

II. Contexte réglementaire Marocain

Le Maroc, à l'instar de tous les pays dans ces dernières années, s'est engagé ouvertement vers l'économie «verte» que ce soit à travers les programmes éolien et solaire, ou les programmes d'efficacité énergétique (EE) dans le bâtiment, l'industrie ou le transport. A l'échelle internationale, l'augmentation du prix des

combustibles est un des facteurs qui viennent consolider notre choix. Les pouvoirs publics sollicitent les citoyens, professionnels et institutionnels d'œuvrer dans cette vision de développement durable. Le débat national sur l'EE reste l'un des éléments clefs de cette politique. Plusieurs actions et programmes ont été d'abord nécessaires pour préparer le terrain, ce sont les programmes et actions entrepris actuellement par l'agence nationale pour le développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (ADEREE) comme le code d'efficacité énergétique dans le bâtiment avec ses volets règlementaires et de renforcement de capacité, la mise en place des exigences et standards techniques dans le bâtiment et l'industrie, les audits énergétiques dans l'industrie et l'agriculture ou la préparation de plans de déplacement urbains.

Afin de relever ces multiples défis, maîtriser l'avenir énergétique et assurer le développement durable du Maroc, une nouvelle stratégie énergétique a été élaborée sur la base d'options technologiques et économiques réalistes dans le cadre d'une vision prospective claire. Cette nouvelle stratégie énergétique est basée sur des objectifs et des orientations bien précises, parmi ces orientations on cite :

- Un mix diversifié et optimisé autour de choix technologiques fiables et compétitifs ;
- Mobilisation des ressources nationales par la montée en puissance des énergies renouvelables ;
- L'efficacité énergétique érigée en priorité nationale ;
- L'intégration régionale.

La dynamique de développement du Maroc et l'augmentation de la demande mondiale en énergie a favorisé l'émergence des règlementations nationales dans les domaines d'énergie et d'environnement, telles que les lois sur l'énergie renouvelable, l'efficacité énergétique, la pollution d'air.

1. Historique de la réglementation marocaine en énergie et en environnement

En 2008, le Roi Mohammed VI a lancé le développement de la SNE et de la PNAP. Le PNAP repose sur quatre piliers stratégiques (Climate investment funds, 2009) :

- La sécurité d'approvisionnement avec la diversification des types et des origines de combustibles ;
- Accès à l'énergie pour tous les segments de la société à des prix compétitifs ;
- La promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique ;
- L'intégration énergétique régionale entre les marchés euro-méditerranéens.

En 2008, la loi 16-08 a augmenté le plafond de l'autoproduction par les sites industriels de 10 à 50 MW. Elle a été conçue principalement pour soutenir l'énergie éolienne, mais elle s'applique également à d'autres technologies. Cette loi a adopté le décret de 1963, qui a permis la mise en place de (ONEE) et attribué à ce dernier un monopole de production supérieure à 10 MW.

En 2009, les énergies renouvelables représentent 4% du mix énergétique marocain (hors biomasse) et produit 10 % de la demande totale d'électricité. La même année, le gouvernement marocain a introduit la loi 13-09 sur les énergies renouvelables avec pour objectif de faire passer ces parts de 4 % à 10 % et de 10 à 20 % de la production d'électricité d'ici 2012. La loi 13-09 a ouvert partiellement le marché de l'électricité à la concurrence pour la production et la commercialisation de l'énergie électrique de sources d'énergie renouvelables pour les clients. La loi a introduit une autorisation régime de production, d'exploitation, d'extension de la capacité ou de modification des installations qui produisent de l'énergie à partir de sources d'énergie renouvelables, lorsque la puissance installée est supérieure à ou égale à 2 MW (Ghezloun et al., 2014). Cependant, la loi 13-09 n'a pas fixé de limite à la puissance par projet ou par type d'énergie, et a fourni un cadre juridique pour la mise en place de l'exportation d'énergie. La même année, la SNE a été adoptée et a fait de l'efficacité énergétique une priorité nationale.

L'objectif de la loi 13-09 est de promouvoir la production d'énergie à partir de ressources renouvelables au marché local et à l'exportation par des entités publiques ou des entreprises privées. En outre, "cette loi permet à un opérateur de produire de l'électricité à partir de sources renouvelables pour le compte d'un consommateur ou un groupe connecté au réseau national de tension minimale (MV), de haute tension (HV) ou de tension extra haute tension (EHC) " (Invest in Morocco, 2019). Depuis que la loi 13-09 a permis la commercialisation de produire de l'énergie à partir de ressources renouvelables, les opérateurs bénéficient du droit l'accès au réseau électrique national.

L'IRESEN est un institut de recherche créé en 2011 par le Ministère de l'Energie, des Mines, de l'Eau et de l'Environnement et plusieurs acteurs clés du secteur énergétique au Maroc pour accompagner la stratégie énergétique nationale en soutenant la R&D appliquée dans le domaine de l'énergie solaire et des énergies nouvelles. L'Institut se positionne dans le domaine de la R&D à travers son agence de moyens et son centre de recherche, offrant ainsi plusieurs opportunités pour la création de synergie entre le monde socio-économique et le monde scientifique autour de projets collaboratifs de R&D.

La loi 16-09, votée en 2009, a été introduite pour la création de l'Agence Nationale pour le Développement (ADEREE). L'agence est en train de finaliser le cadre réglementaire sur l'efficacité énergétique dans les bâtiments passifs. Après avoir travaillé sur les aspects techniques de ce type de la construction, l'agence travaille actuellement sur son cadre réglementaire en collaboration avec le Ministère de l'énergie du Maroc.

La loi 47-09 sur l'efficacité énergétique a été publiée le 17 novembre 2011. Cette loi a pour objet d'accroître l'efficacité énergétique tout en utilisant des sources d'énergie renouvelables, en évitant le gaspillage, en réduisant le poids des coûts de l'énergie sur l'économie marocaine pour le développement durable en intégrant des mesures d'efficacité énergétique, et en aidant les entreprises industrielles à réduire leurs consommations d'énergie. La loi 47-09 permet de mettre en œuvre quatre objectifs principaux, qui sont

dédiés à la mise en œuvre d'un code de conduite sur l'efficacité énergétique, à la promotion des chauffages solaires, la diffusion des lampes à économie d'énergie, la promotion et l'adoption des équipements d'éclairage public.

Afin de mettre en œuvre la loi 47-09, l'accord de partenariat sur l'efficacité énergétique dans l'industrie a été signé par le Ministère de l'Energie et le Ministère de l'Industrie du Maroc. Le site est axé sur l'évaluation de la consommation d'énergie actuelle dans le secteur industriel, la réalisation d'audits énergétiques, l'optimisation de la consommation d'énergie des entreprises auditées, la formation, le renforcement et le suivi des capacités, la mise en place de mécanismes de financement et la certification normalisation (AMEE, 2019).

L'Agence Marocaine de l'Energie Solaire (MASEN) a été créé par la loi 57-09. MASEN est le groupe chargé de la gestion de l'énergie renouvelable au Maroc. L'objectif de cette agence est de conduire des programmes de projets intégrés une fois mis en œuvre, générerait une capacité supplémentaire de 3000 MW d'électricité propre d'ici 2020 et 6 000 MW supplémentaires d'ici 2030. La Société d'Investissements Energétiques (SIE) référence pour les investisseurs dans la stratégie énergétique du Maroc ; elle a été fondée en février 2010 conformément aux orientations de la stratégie énergétique nationale visant la diversification de ressources, la promotion des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique (Ministère marocain de Énergie, mines, eau et environnement, 2016).

Quant à la réglementation marocaine pour l'environnement, la loi n° 13-03 relative à la lutte contre la pollution de l'air vise la prévention et la lutte contre les émissions des polluants atmosphériques susceptibles de porter atteinte à la santé de l'homme, à la faune, au sol, au climat, au patrimoine culturel et à l'environnement en général. Elle s' applique à toute personne physique ou morale soumise au droit public ou privé, possédant, détenant, utilisant ou exploitant des immeubles, des installations minières, industrielles, commerciales ou agricoles, des installations relatives à l'industrie artisanale ou des véhicules, des engins à moteur, des appareils de combustion, d'incinération des déchets ou de chauffage ou de réfrigération. Cette loi a pour but d'assurer une meilleure qualité de l'air en surveillant les substances dans l'air ambiant en gardant en esprit les objectifs de qualité, les valeurs limites et les seuils d'alerte contenus dans la loi.

Tout de même il existe des autres décrets pour l'amélioration de la qualité sur l'air à savoir :

- Décret n° 2-09-286 du 20 hija 1430 (8 décembre 2009) fixant les normes de qualité de l'air et les modalités de surveillance de l'air (B.O. n° 5806 du 21 janvier 2010)
- Décret n° 2-09-631 du 23 rejeb 1431 (6 juillet 2010) fixant les valeurs limites de dégagement, d'émission ou de rejet de polluants dans l'air émanant de sources de pollution fixes et les modalités de leur contrôle (B.O. n° 5862 du 5 août 2010).

On peut résumer ces lois dans le tableau suivant :

Tableau 7: Les lois relatives à la stratégie nationale de l'énergie

Loi	Objectifs
Loi n° 28-00 publiée le 7 décembre, 2006, relative à la gestion des déchets.	La loi définit et précise les principes de la gestion des déchets : définit les différents types de déchets ; précise leur gestion ; précise le niveau de soutien des déchets ; introduit la notion de déchets dangereux et la gestion de ce type de déchets en les soumettant à un système d'autorisation préalable à toutes les étapes de la gestion : collecte, transport, stockage et élimination.
La loi n° 57-09 portant création de la Cadre de l'Agence pour l'énergie solaire (MASEN) de définir un cadre spécifique pour les projets solaires (14 janvier 2010)	MASEN est l'acteur le plus important pour le secteur de l'énergie solaire au Maroc..
Loi n° 47-09 relative à l'efficacité énergétique, en date du 29 septembre 2011	Cette loi vise à augmenter l'efficacité de la ressource énergétique pour réduire les coûts énergétiques de l'économie nationale et pour contribuer au développement durable.
Loi n° 16-09 portant création de l'Agence nationale pour la promotion des énergies renouvelables et Économies d'énergie (ADEREE), en date du le 13 janvier 2010.	Cette loi définit la réorganisation et le changement de nom du Centre pour le développement des énergies renouvelables (CDER) existant. L'ADEREE est principalement active dans le cadre du Programme d'efficacité énergétique et des énergies renouvelables pour les entreprises.
Le décret N° 2-17-746, relatif à l'audit énergétique obligatoire et aux organismes d'audit énergétique vient d'être publié au bulletin officiel du 2 mai 2019	Définition des termes généraux d'audit Processus et des modalités de réalisation de l'audit énergétique Agrément et control des organismes d'audit

2. Loi N° 47-09 relative à l'efficacité énergétique au Maroc

La présente loi a pour objet d'augmenter l'efficacité énergétique dans l'utilisation des sources d'énergie, éviter le gaspillage, atténuer le fardeau du coût de l'énergie sur l'économie nationale et contribuer au développement durable. Sa mise en œuvre repose principalement 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. Elle tend également à intégrer de manière durable les techniques d'efficacité énergétique au niveau de tous les programmes de développement sectoriels, à encourager les entreprises industrielles à rationaliser leur consommation énergétique, à généraliser les audits énergétiques,

à mettre en place des codes d'efficacité énergétique spécifiques aux différents secteurs, à généraliser l'usage des lampes à basse consommation et des équipements adaptés au niveau de l'éclairage public. Afin de renforcer l'efficacité énergétique dans les secteurs clé de l'économie nationale.
Par ailleurs, des actions de formation, de perfectionnement, de la formation professionnelle, de recherche scientifique et de démonstration de techniques concernant tous les secteurs doivent être mises en œuvre pour promouvoir l'efficacité énergétique et les économies d'énergie.

2.1. Décret N° 2-17-746, relatif à l'audit énergétique

En application des dispositions du chapitre IV de la loi n° 47-09, le présent décret relatif à l'audit énergétique obligatoire et aux organismes d'audit a été élaboré afin d'instituer un système d'audit énergétique obligatoire et périodique pour rationaliser l'utilisation d'énergie dans les entreprises et établissements grands consommateurs d'énergie dans les secteurs clés de l'économie nationale.

De ce fait, le décret fixe les obligations générales que doivent respecter les assujettis à l'audit énergétique obligatoire et les organismes d'audit :

– Il fixe les seuils de consommation d'énergie obligeant l'audit énergétique : 1500 tep par an pour les entreprises et les établissements relevant du secteur industriel et 500 tep par an pour le secteur tertiaire, entreprises et établissements de transport et distribution d'énergie et pour les personnes physiques ;

– Il précise le contenu de l'audit énergétique obligatoire par secteur, ainsi que les modalités de sa réalisation et de présentation de ses résultats ;

– Il fixe la périodicité de l'audit énergétique obligatoire à 5 ans ;

– Il définit les conditions et les principales modalités de délivrance, renouvellement et suspension de l'agrément octroyé aux organismes d'audit et fixe la validité de cet agrément à 5 ans ;

– Il précise les modalités du contrôle des organismes d'audit.

Le décret est réparti en trois titres et 20 articles traitant principalement les volets précédemment cités. Les dispositions dudit décret entrent en vigueur le premier jour du septième mois suivant la date de sa publication au bulletin officiel.

Chapitre III : Etat d'art et démarches de bonnes pratiques

I. Etat d'art sur l'efficacité énergétique

Face à la crise écologique et sociale qui se manifeste aujourd'hui au niveau mondial (changement climatique, raréfaction des ressources naturelles, pénurie d'eau douce, combinaison du pic pétrolier, différences entre pays développés et pays en développement, sécurité alimentaire, déforestation et perte drastique de biodiversité, croissance démographique, catastrophes naturelles et industrielles), le développement durable est une réponse pour tous les acteurs (gouvernements, acteurs économiques, sociétés civiles) en développement culturel et social (Dhaoui, 2012), d'où l'importance de l'efficacité énergétique pour réduire la consommation énergétique d'une part et d'autre part limiter les émissions des gaz à effet de serre.

(Tanaka, 2008) a constaté que l'efficacité énergétique dans l'industrie joue un rôle clé dans l'amélioration de la sécurité énergétique, de la durabilité environnementale et de la performance économique. Elle est particulièrement importante dans les stratégies d'atténuation du changement climatique. Les preuves d'un grand potentiel de réduction de la consommation d'énergie et des émissions de gaz à effet de serre (GES) dans l'industrie grâce à l'efficacité énergétique ont incité les gouvernements à mettre en œuvre de nombreuses politiques et mesures visant à améliorer l'efficacité énergétique dans leurs industries, environ 570 mesures qui ont été mises en œuvre par les gouvernements des pays de l'AIE, Brésil, Chine, Inde, Mexique, Russie et Afrique du Sud.

(Giacone and Mancò, 2012) ont proposé une méthodologie pour construire un cadre de l'efficacité énergétique dans l'ensemble du système énergétique d'un site industriel, ce cadre est représenté par une seule équation matricielle, qui exprime la relation entre les énergies importées et les facteurs énergétiques. Les éléments de la matrice sont :

- Les consommations d'énergie spécifiques de chaque processus.
- La modélisation mathématique des processus, par l'analyse statistique des données de consommation d'énergie.

Les résultats qui ont été obtenus à partir de cette approche sont pertinents pour l'analyse comparative en matière de réduction de l'efficacité énergétique.

Selon (Zhao and Lin, 2019), Il est important d'améliorer l'efficacité énergétique pour assurer la croissance économique tout en conservant l'énergie et en réduisant les émissions polluantes. En se basant sur l'efficacité énergétique totale de l'industrie de textile chinoise, l'application d'un modèle d'équation a permis d'obtenir des résultats empiriques montrent que la rétroaction positive entre le commerce extérieur et l'efficacité énergétique dans l'industrie textile, les importations ayant plus d'impact sur l'efficacité énergétique que les exportations.

(Bonilla-Campos et al., 2019) ont constaté qu'il existe de nombreux outils et mesures d'efficacité énergétique (MEE). L'adaptation d'une mesure dans un processus spécifique est une tâche difficile, en raison des caractéristiques et des restrictions différentes de chaque processus de fabrication spécifique, ces mesures peuvent réduire la consommation énergétique de 21 % à 50 %.

Le travail de (Muhammad, 2019) a été pour objectif d'examiner l'effet de la croissance économique, de la consommation d'énergie et des émissions de CO_2 les unes sur les autres pour un panel de 68 pays. Il a utilisé des données de panel provenant de 68 pays sur la période 2001-2017 pour les pays développés, les pays émergents et les pays du Moyen-Orient et de l'Afrique du Nord (MENA), puis il a appliqué des modèles de régression et des modèles dynamiques estimés au moyen de la méthode généralisée des moments (GMM) et de la méthode généralisée des moments du système pour l'analyse des données. Il était recommandé que les décideurs politiques de ces pays adoptent des stratégies axées sur l'adoption de technologies respectueuses de l'environnement pour réduire les émissions de CO_2.

Les moteurs industriels consomment une grande partie de l'énergie totale consommée par l'industrie ce qui est constaté par (Saidur, 2010), donc il a effectué une analyse documentaire exhaustive sur la consommation de l'énergie des moteurs électriques. Différents types de pertes survenant dans un moteur ont été identifiés et des moyens de les surmonter ont été expliqués. Un audit énergétique permettant d'identifier les gaspillages d'énergie des moteurs a fait l'objet de discussions approfondies. Comme les moteurs sont les principaux consommateurs d'énergie, différentes stratégies d'économie d'énergie ont été proposées:

- L'utilisation d'un moteur à haut rendement énergétique ;
- Installation d'un variateur de vitesse;
- Changement d'une batterie de condensateurs pour améliorer le facteur de puissance et réduire leur consommation énergétique.

Finalement, il a conclu que les outils informatiques peuvent être utilisés pour analyser l'énergie consommée par les moteurs électriques afin d'identifier les paramètres qui influencent sur la facture énergétique.

(Mousavi et al., 2014) ont adopté des techniques de modélisation de la consommation d'énergie ainsi que des diverses approches utilisées pour contrôler le système de l'air comprimé. Une technique de modélisation a été utilisée pour développer un modèle de simulation qui inclut à la fois des compresseurs à vitesse fixe et variable. Ceci a été appliqué à l'analyse de différents scénarios de contrôle du système, et par la suite ont réalisé une étude de cas industriel comprenant deux compresseurs à vitesse variable et un compresseur à vitesse fixe pour démontrer la dynamique de la consommation énergétique du système et la validité du modèle proposé.

Sur la base de six études de cas en audit énergétique, les résultats montrent que les potentiels de rentabilité et d'économie d'énergie représentent une réduction de la consommation d'énergie de 30%, 13%, 70%, 14%,

10% et 5% respectivement pour les procédés ciblés utilisés par les investissements en efficacité énergétique (Kluczek and Olszewski, 2017). Les plans d'investissement en efficacité énergétique ont été soigneusement élaborés en fonction de la capacité financière de l'industrie, avec une période de rendement raisonnable et acceptable de moins de deux ans.

(Garcia et al., 2007) ont montré que le remplacement des moteurs électrique dans un site industriel est avantageux. Un échantillon de neuf mille moteurs industriels a été utilisé, avec un fonctionnement mesuré en conditions réelles, pour analyser le rapport coûts-avantages de l'investissement dans trois scénarios différents. Cette analyse a également démontré l'intérêt du remplacement des moteurs, avec un coût moyen en MWh de 20 à 35 US$ et quelques substitutions seulement présentant un rapport coût-bénéfice défavorable à l'utilisateur. Néanmoins, étant donné que le coût de l'énergie économisée pour cette mesure est généralement inférieur au coût marginal de l'expansion du système électrique brésilien et ils ont fini par la proposition des mécanismes pour partager les coûts d'investissement entre l'ensemble de la société.

(Jovanović et al., 1991) ont examiné la compensation de la puissance réactive, la réduction de la puissance active et des pertes d'énergie des grands réseaux d'énergie dans l'industrie des mines et des fonderies. Ils ont proposés par la suite une procédure d'optimisation efficace pour le positionnement et le dimensionnement des condensateurs dans les grands systèmes industriels, dans le but d'avoir une méthode simple d'analyse de réseau énergétique.

(Trifunovic et al., 2009) ont présenté une méthodologie générale pour l'évaluation de la réduction de la consommation d'électricité, ainsi que la réduction de la demande de puissance de pointe en cas d'utilisation massive de lampes fluorescentes compactes (LFC), illustrée sur le réseau électrique. L'évaluation reposait sur l'hypothèse que les deux lampes à incandescence les plus utilisées dans chacun des 25 à 50 % du nombre total de logements en Serbie seront remplacées par des ampoules fluo-compactes adéquates et que le même nombre total de lampes sera remplacé dans les secteurs résidentiel et non résidentiel. Les diagrammes journaliers de la demande totale d'électricité en Serbie pour les jours avec les charges maximales et minimales annuelles de pointe sont présentés et comparés aux diagrammes journaliers correspondants qui tiennent compte du remplacement prévu des lampes et des facteurs de coïncidence (CF) pour les lampes observées, qui dans le cas du secteur résidentiel sont obtenus par une surveillance sur site de 344 logements. Il a été démontré que, pour calculer avec précision le rapport coût-efficacité de l'action prévue, il faut calculer la diminution de la consommation d'électricité pour chaque heure, car le taux de coût de l'électricité (TWh) change généralement sur une base horaire.

Cette transition devient une nécessité en raison de la limitation des sources d'énergie et de l'augmentation des prix de l'énergie. (Akbaba, 1999) a montré que les moteurs électriques consomment environ les trois quarts de l'énergie électrique totale au Bahreïn, les efforts de conservation de l'énergie consommée par les moteurs électriques ont récemment fait l'objet de recherches intensives. Par conséquent, l'efficacité

énergétique des moteurs éco-énergétiques est comparée à celle des moteurs à rendement standard allant de 5 à 300 HP. Afin d'apporter plus de précisions à cet égard, les détails complets de la conception des moteurs de 200 HP à rendement standard et des moteurs éco-énergétiques sont comparés. Il a été question des délais de récupération en cas de remplacement des moteurs à efficacité normale par des moteurs à haut rendement énergétique, par rapport au marché du Bahreïn. Enfin, la capacité d'économie d'énergie des moteurs EE dans l'industrie pétrochimique a été discutée.

Le travail de (Hasegawa and Azuma, 2008) a pour but de montrer que les propriétés magnétiques d'un alliage amorphe à base de fer récemment développé avec une induction de saturation élevée de 1,65 T sont examinées. L'induction de saturation accrue est pleinement utilisée dans les transformateurs avec des pertes magnétiques et des dimensions physiques. Les impacts de ce phénomène sur les économies d'énergie et la réduction des émissions de gaz à effet de serre à l'échelle mondiale sont discutés afin d'obtenir une induction de saturation supérieure à 1,65 T dans les alliages nanocristallins.

La croissance économique du Cameroun exige une augmentation des services énergétiques. Celles-ci, à leur tour, augmentent la demande de vecteurs énergétiques, comme l'électricité. Cependant, la production d'électricité à partir de combustibles fossiles émet des gaz à effet de serre (GES). (Guemene Dountio et al., 2016) ont proposé trois scénarios de la demande d'électricité au Cameroun à des niveaux de croissance économique différents. L'expansion correspondante du système de production d'électricité (et ses émissions) a ensuite été analysée. Le modèle MAED est utilisé pour l'évaluation de la demande d'énergie. Le modèle MESSAGE sert à optimiser le système d'approvisionnement et à quantifier les émissions de GES.

L'année 2012 a été choisie comme année de référence, avec une consommation totale d'électricité de 5 TWh les résultats montrent qu'en 2035, la demande d'électricité pourrait atteindre 35 TWh, 19 TWh et 17 TWh pour les scénarios Haut, Intermédiaire et Bas respectivement. Les projets de centrales hydroélectriques, thermiques (GAS, HFO, LFO) à biomasse, solaires et éoliennes ont été pris en compte dans l'étude, avec des implications différentes en fonction des politiques nationales. Finalement les résultats qui ont été obtenu, montrent que les contraintes liées aux émissions de GES peuvent être respectées si les investissements appropriés sont faits.

Principalement, la majorité des auteurs ont proposé des différents méthodes d'amélioration de l'efficacité énergétique soit par des modèles, des mesures et/ou par l'application de l'audit énergétique dans différents secteurs et particulièrement dans le secteur industriel. Ce secteur qui représente une quantité importante en matière des émissions des gaz à effet de serre qui peut constituer une menace néfaste sur l'humanité. Pour faire face à cette dérive, le Maroc a créé plusieurs institut comme IRESEN qui s'intéresse à la recherche en efficacité énergétique et en énergie renouvelable dans le but de développer la recherche afin de trouver des solutions innovantes pour la réduction de la consommation énergétique et des organisations étatiques et

privés comme l'ADEREE, SIE pour aider les industries à améliorer leur efficacité énergétique afin de diminuer leur facture énergétique entrainant une réduction sur les émissions de gaz à effet de serre.

(Fouzi BELMIR, 2016) a montré que l'importance de l'Efficacité énergétique dans le cadre d'un système de management de l'énergie conforme à la norme internationale ISO 50001 dans l'amélioration des performances énergétiques et de l'empreinte écologique (notamment les émissions des GES) pour les entreprises quel que soit leur secteur d'activité (industrie, tertiaire…). En effet la limitation de la consommation énergétique s'effectue à travers des mesures de l'efficacité énergétique, qui est une composante principale du Développement Durable. Elle vient pour répondre à 3 besoins mondiaux urgents :

- La réduction des émissions de Gaz à Effet de Serre(GES) ;
- L'augmentation constante de la demande en énergie ;
- La flambée des prix de l'énergie.

II. Etat d'art sur les émissions de gaz à effet de serre

En tant que premier émetteur de gaz à effet de serre au monde, la Chine a une tâche ardue à accomplir en matière de conservation de l'énergie (EC) et de réduction des émissions (RE). Le CO_2 provenant de la consommation d'énergie au cours des processus industriels constitue la grande majorité des émissions de gaz à effet de serre en Chine. C'est la clé pour que le gouvernement chinois atteigne son objectif de réduction des émissions en 2030 tout en identifiant les industries clés émettrices de CO_2 et en sondant leur potentiel en matière d'EC&RE.

(Zhou et al., 2018) ont élaboré deux scénarios pour la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 dans le secteur industriel jusqu'en 2050 en intégrant les exigences actuelles de la Chine en matière de macroéconomie, de capacité industrielle, d'efficacité énergétique et de politiques dans un modèle modifié d'évaluation du changement mondial. L'analyse quantitative indique que la consommation d'énergie et la croissance des émissions de CO_2 du secteur industriel atteindront un sommet d'ici 2025, pour ensuite diminuer. Dans le premier scénario de référence, les valeurs de consommation d'énergie de pointe et d'émissions de CO_2 en 2025 seront respectivement de 2,42 gigatonnes d'équivalent charbon (Gtce) et 4,43 gigatonnes de CO_2 (Gt eqCO2). Dans le deuxième scénario à faible intensité de carbone, ces valeurs maximales en 2025 seront respectivement de 2,28 Gtce et 4,13 Gt eq CO2, soit 5% et 7% inférieures aux valeurs respectives du premier scénario. Après 2025, la consommation d'énergie et les émissions de CO_2 diminueront progressivement jusqu'en 2050. Les mesures nécessaires pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone en période de pointe comprennent des politiques d'ajustement et d'optimisation de la structure industrielle, de promotion de l'énergie à faible émission de carbone, de plafonnement de la consommation d'énergie et de charbon, et des émissions de CO_2 dans ce secteur.

(Ajdour et al., 2019) ont trouvé que la dégradation de la qualité de l'air extérieur au Maroc est devenue pour les décideurs un sujet de préoccupation majeur. Cependant, compte tenu des coûts d'achat et d'entretien du réseau de surveillance, la modélisation de la qualité de l'air est un outil primordial pour prévoir les scénarios d'évolution de la qualité de l'air sur l'ensemble du territoire marocain. En conséquence, une première modélisation de la qualité de l'air basée sur les deux modèles CHIMERE et WRF a été mise en œuvre et testée pour la première fois à Agadir-City.

(Ajdour et al., 2019) ont permi d'obtenir une cartographie préliminaire de la distribution spatiale de 5 concentrations pertinentes de polluants sur l'ensemble de la ville. En outre, les évaluations des modèles ont été comparées aux données disponibles de la station de surveillance au sol installée dans la ville d'Agadir.

(Kofi Adom et al., 2012) ont examiné les relations causales à court terme et les relations d'équilibre à long terme entre les émissions de dioxyde de carbone, la croissance économique, l'efficacité technique et la structure industrielle pour trois pays africains (le Ghana, le Sénégal et le Maroc). Les résultats du test de causalité de Toda -Yamamoto ont montré qu'un mélange de relations bidirectionnelles, unidirectionnelles et neutres pour tous les pays ont montrés que la croissance économique contribue largement aux changements des futures émissions de dioxyde de carbone au Sénégal et au Maroc tandis qu'au Ghana. Ces résultats ont des implications politiques importantes sur les systèmes d'efficacité énergétique dans ces pays.

L'objectif principal étaient pour (Mardani et al., 2019) est de présenter une vue d'ensemble complète de la relation entre les émissions de CO_2 et la croissance économique. A cet égard, un examen de 175 articles publiés dans 55 revues scientifiques internationales entre 1995 et 2017 a été réalisé afin d'obtenir un examen général du lien entre la croissance économique et les émissions de CO_2 et d'autres indicateurs. Par conséquent, les articles sélectionnés ont été catégorisés selon le nom de l'auteur, l'année de publication, la durée des données, les types de techniques, la méthode d'analyse des données, le nom des indicateurs, le pays, les revues, les résultats dans lesquels ils ont été publiés.

III. Modèles et démarches de bonnes pratiques

1. Démarche de mise en œuvre et conditions de réussite

Afin de garantir la réussite, l'efficacité énergétique doit s'intégrer dans une approche globale d'entrepris. En effet, La mise en place d'une gestion de l'efficacité énergétique nécessite une approche globale structurée, suivant des étapes successives, qui permettra de gérer les projets avec un objectif de résultats.
Cette approche, qui a déjà prouvé sa fiabilité et son efficacité, s'applique aussi bien à des tâches simples qu'à des tâches complexes.
Un système de mesure et d'information fournissant des données fiables et précises doit donc être intégré dans cette approche globale. Cette approche consiste à obtenir l'adhésion du management à travers l'engagement de la majorité des membres de l'équipe de Direction :

- Évaluer la situation initiale ;
- Programmer et organiser ;
- Identifier de la politique énergétique adaptée à l'entreprise ;
- Engager la volonté d'excellence dans l'efficacité énergétique.

Le diagramme ci-dessous met en évidence les différentes pertes énergétiques d'un procédé et les mesures correctives associées. La mise en œuvre d'un système de management de l'énergie permet de prendre en compte la globalité de ces pertes : les aspects techniques, mais également organisationnels et comportementaux.

2. Démarche du bilan carbone

Un « bilan carbone » désigne une démarche permettant de comptabiliser l'ensemble des GES liées à une organisation. Il vise à calculer les émissions directes (par exemple, les émissions d'une voiture lorsqu'elle roule) mais aussi les émissions indirectes, également dites « cachées » (par exemple, les émissions liées à la construction des différents matériaux d'une voiture).

Par conséquent, un bilan carbone doit permettre de prendre conscience et d'évaluer l'impact réel d'une organisation en matière d'émissions de GES afin de les réduire par la suite. Cette comptabilisation est de plus en plus employée dans le cadre de la lutte contre le changement climatique. Il existe toutefois différentes méthodologies pour réaliser un « bilan des gaz à effet de serre » et aucune n'a été entérinée à l'échelle internationale.

En France, le bilan carbone est un référentiel à la principale démarche de comptabilisation et de réduction des émissions de gaz à effet de serre. Créée par l'Ademe en 2002 et transférée à l'association bilan carbone (ABC) en octobre 2011.

Précisons qu'aucune obligation ne porte sur le bilan carbone en France : la loi Grenelle II impose à certaines structures de comptabiliser leurs émissions de gaz à effet de serre mais avec un périmètre plus restreint (sans prendre en compte une partie des émissions « indirectes »). On parle alors de « bilan GES réglementaire ».

Le bilan carbone est un outil de management environnemental, remplissant un rôle de guide et de support des organisations dans le cadre de leurs démarches de transition climat-énergie. Le Bilan Carbone s'articule en particulier avec le Système de Management des GES (SM-GES), démarche visant une amélioration continue au travers de plans d'actions. D'autres méthodologies existent et sont compatibles avec le Bilan Carbone, dont les principales sont l'ISO 14064-1-2-3:2006, l'ISO 14069:2013, le GHG Protocol ou les réglementations nationales. Les outils Bilan Carbone sont utilisables dans le cadre de ces démarches car ils répondent à leurs différentes exigences.

Le bilan carbone répond aux principes suivants :

- Cohérence : la démarche est centrée sur les besoins ;
- Exactitude : les biais et les incertitudes de la démarche sont réduits au maximum ;
- Exhaustivité : la démarche cherche à couvrir un maximum d'émissions ;
- Pertinence : la démarche s'intéresse aux émissions pertinentes pour l'organisation ;
- Transparence : la démarche doit être suffisamment transparente pour permettre une prise de décision éclairée ;
- Vérification : la démarche doit aboutir à des résultats vérifiables.

De même, le bilan carbone permet une analyse stratégique des émissions de GES. Pour ce faire, il répond aux principes suivants :

- ➔ Stratégie bas carbone : la démarche cherche à ajouter une dimension d'atténuation à la stratégie de l'organisation ;
- ➔ Vision long-terme : la démarche contribue à la définition d'une vision de transition bas carbone de l'organisation sur le long terme ;
- ➔ Anticipation : la démarche invite à anticiper les changements à venir et leurs conséquences sur les opérations de l'organisation, notamment en ce qui concerne sa vulnérabilité au changement climatique et sa dépendance énergétique ;
- ➔ Pragmatisme : la démarche demande à rester pragmatique vis-à-vis des résultats obtenus, qui ne sont pas toujours ceux anticipés au préalable.

Comme on peut résumer les différentes étapes du bilan carbone dans la figure suivante :



Figure 14: Différentes étapes du bilan Carbone

3. Démarche de la réussite d'un audit énergétique

La réussite d'un audit énergétique est une priorité de l'entreprise et elle s'organise pour:

- Mobiliser le management et les équipes techniques

A l'heure où la recherche d'une meilleure compétitivité devient cruciale pour assurer la pérennité de l'entreprise, le volet maîtrise de l'énergie (MDE) doit être pris en compte de manière prioritaire au niveau de la Direction générale et pas seulement dans les entreprises à forte intensité énergétique : 40 % des gisements d'économies d'énergie, souvent facilement « exploitables », se trouvent dans les utilités.

Pour que la démarche d'audit énergétique trouve sa pleine mesure il faut une implication forte de la chaîne hiérarchique. L'intégration des démarches de MDE dans la stratégie globale doit se faire dans la durée, en évitant les approches trop « à court-terme ».

- ***Créer des postes de Responsables énergie opérationnels***

L'entreprise doit se doter d'une organisation interne disposant des compétences techniques, de l'autorité nécessaire et des moyens suffisants (Belmir,F, Chramate,I, 2016). Selon la taille de l'entreprise, cette structure sera plus ou moins étoffée autour du Responsable Energie. Pour les PME /PMI ou les entreprises pour lesquelles l'énergie pèse peu dans le bilan, il existe des solutions mutualisées et externalisées comme le responsable énergie partagé. Il est fondamental en effet que le déroulement de l'audit soit conduit de manière conjointe par l'exploitant et l'expert extérieur à « égalité de compétences » et sans divergences d'objectifs, la finalité de l'opération n'étant pas seulement de définir un catalogue de recettes à mettre en œuvre rapidement mais plutôt de proposer une démarche d'échanges visant à lancer une véritable dynamique sur la durée.

- ***Bien choisir le(s) spécialiste(s) pour :***

- Apporter un œil neuf, convaincant et discret

Les diagnostics ne sont en général pas réalisés par les industriels seuls mais en partenariat avec des spécialistes (ingénierie, bureau d'études, centre technique, etc.). Ces prestataires doivent apporter la preuve de leur qualification, de leur connaissance de l'état de l'art (meilleures techniques disponibles, gisements d'économies d'énergie existants, etc.) et de leur capacité à choisir des solutions réalistes et économiquement acceptables. Ils viennent naturellement apporter leur expérience et leurs facultés d'analyse, ainsi qu'un œil neuf extérieur pour dessiner au mieux les possibilités d'action et en s'engageant à respecter la confidentialité des données qu'ils recueillent.

- Garantir la neutralité de l'intervenant

Entre un bureau d'étude indépendant, un fournisseur d'énergie, une société de services exploitante, un bureau de contrôle, un fournisseur d'équipements, un centre technique, une Chambre de Commerce et d'Industrie, il est évident que les principes d'analyse et la sélection des priorités d'action risquent d'être différents. Il en résulte que l'offre de diagnostics peut paraître peu lisible pour les maîtres d'ouvrages.

- ***Etablir un cahier des charges précis et structuré pour***

- Définir précisément la nature de l'audit énergétique envisagée :

Dans tous les cas il semble essentiel de réaliser une phase de pré-diagnostic avant de définir ce qu'il faudra analyser en détail. Le pré-diagnostic est trop souvent perçu comme un audit très simple alors qu'il nécessite une grande expérience pour le diagnostiqueur conduit à saisir en un temps court, sur un périmètre large et souvent sans campagnes de mesures, les enjeux énergétiques de l'entreprise. Il est à noter que le prestataire

d'une phase d'accompagnement (de la mise en œuvre d'une ou plusieurs préconisations formulées) peut être différent de celui ayant réalisé l'audit.

- Détailler la « Check List » des informations nécessaires à la réalisation de l'audit énergétique :

L'audit énergétique doit s'appuyer sur un corpus d'informations pouvant être utilement préparées à l'avance. Il s'agit en premier lieu de documents généraux concernant le site : chiffres caractéristiques d'activités, organisation et organigramme, plans d'usine et schémas des fluides, des lignes de production. Il s'agit ensuite d'informations plus spécifiques à la gestion de l'énergie comme :

- l'organisation du « plan de comptage » (énergies utilisées, implantation des compteurs, mode de relevé, projets d'automatisation) ;

- le tableau de bord (factures d'énergie, répartitions des consommations énergétiques par utilisation, ratios divers, campagnes de mesure) ;

- les contrats de fourniture d'énergie (types, pénalités, simulations tarifaires, fournisseurs et prix, taxes locales, modifications d'activité prévisibles).

Viennent ensuite les informations spécifiques aux aspects techniques de la production et de la consommation d'énergie (utilités et processus) : structures des bâtiments, systèmes de chauffage et climatisation, éclairage, productions thermiques et électriques, air comprimé, eaux, processus, impacts environnementaux. Les informations issues de la communication interne permettent aussi de « mesurer » les niveaux d'implication interne des personnels sur cette thématique.

- Préciser clairement les différentes étapes de l'étude dans le temps et l'espace :

Il est important de bien distinguer les interventions, leur chronologie et de les détailler dans le cahier des charges fourni au prestataire. En premier lieu l'auditeur retenu fournira à son interlocuteur désigné la « check list » des opérations nécessaires à la réalisation de l'étude. Cette dernière sera détaillé ensuite le déroulement des rencontres prévues sur site : rencontre avec la direction du site (plan de travail et signature d'un accord de confidentialité), présentation du site et examen de tous les documents préparés, rencontres avec les différents responsables concernés (maintenance, production et méthodes, contrôle financier, achats, etc.). Un temps important doit être réservé au dialogue entre l'expert et le correspondant énergie pour bien prendre en compte dans l'analyse les enjeux internes (voire les « pressions ») concernant la gestion de l'énergie, les gisements d'économies réalistes et le choix de priorités compte tenu d'un contexte spécifique.

Toute cette démarche aura nourri la phase initiale de pré-diagnostic ; d'autres étapes pourront être prévues comme la préparation des audits approfondis. Il sera possible à ce stade d'envisager des campagnes de mesure additionnelles pouvant s'appuyer sur des systèmes de comptages existants ou complémentaires.

- Proposer des résultats utiles, classés par ordre de priorités :

Les préconisations doivent couvrir en premier lieu les bonnes pratiques aussi bien comportementales (sensibilisation et formation du personnel, connaissance des installations et suivi d'exploitation) que relatives aux processus d'exploitation des installations (maintenance, conduite des procédés, remplacement ou mise en place de matériels à investissement faible par exemple). Elles doivent s'intéresser ensuite aux actions nécessitant des investissements à coût significatif.

Les actions à mettre en œuvre doivent être mises en cohérence avec tout engagement du site ou de l'entreprise (management environnemental, qualité, développement durable, etc.).

Idéalement les préconisations d'économies d'énergie pourront être classées selon un ordre de priorité. Tout d'abord les actions immédiates, permettant une économie d'énergie sans nécessiter d'investissement. Ensuite les actions prioritaires, à mener à court terme car ayant un niveau de rentabilité élevé.

Enfin les actions utiles, à mettre en œuvre car de rentabilité certaine, mais pouvant être différées du fait d'implications sur le fonctionnement de l'entreprise (modification des installations, remplacement des matériels) ou d'interactions avec des actions prioritaires.

3.1 Objectifs et cibles de l'audit énergétique

L'audit énergétique est une démarche « gagnante » car elle permet d'enclencher un mouvement vertueux d'économies d'énergie dont les répercussions sont nombreuses.

- La réduction des coûts de production : la maîtrise des consommations énergétiques participe à la réduction des coûts de fonctionnement de l'installation et a un impact direct sur le compte d'exploitation du procédé. Au-delà, les améliorations systémiques améliorent la productivité (fonctionnements en régime nominal plus fréquents, meilleures synergies avec les opérateurs, etc.). Ces bénéfices se retrouvent directement au niveau des résultats.

Pour être acceptable, l'investissement engagé ne doit pas générer des temps de retour supérieurs à deux, voire trois ans. La plupart des options proposées à l'issue d'un diagnostic entrent dans ce cadre.

- L'amélioration de la qualité des produits : la réduction des sources de contamination et l'optimisation de la précision et de la régularité des conditions de production (température, humidité, etc.) vont permettre d'améliorer la qualité des produits. Au-delà, ils peuvent également permettre d'améliorer la productivité en contribuant par exemple à réduire les rebuts de production.

- La promotion d'une image citoyenne : en s'engageant dans une politique de réduction de ses consommations énergétiques, de ses impacts environnementaux (notamment un bilan gaz à effet de serre amélioré) et d'amélioration des conditions de travail de son personnel, l'industriel s'inscrit dans une démarche de développement durable et contribue ainsi à donner à son organisation l'image d'une entreprise citoyenne.

Une fois réalisé, l'audit énergétique fournit le socle nécessaire à des démarches encore plus complètes. Il permet particulièrement de :

- Mettre en œuvre un Système de Management de l'Energie (SMÉ) **:** un SMÉ dont le dispositif des Certificats d'Economies d'Energie facilite aujourd'hui le déploiement, peut jouer un rôle déterminant pour favoriser la concrétisation et de la structuration des plans d'action qui découlent des conclusions de l'audit énergétique. Ceci est particulièrement vrai pour les entreprises qui ont des ressources suffisantes et un intérêt marqué à s'engager en raison du poids des dépenses énergétiques dans leurs comptes d'exploitation. On l'a vu, il existe des gisements notables, facilement accessibles à moindre coût, en amont dans la maîtrise de l'énergie au quotidien qu'une organisation structurée par SMÉ permet d'exploiter facilement à la lumière des premières recommandations mises en application des pré-diagnostics énergétiques. Autant de gains « faciles » qui peuvent rentabiliser très rapidement les coûts de mise en place de telles structures.

4. Proposition d'une démarche et de modèle de bonne pratique

4.1 Démarche de bonnes pratiques en efficacité énergétique

Les entreprises nationales doivent faire face à une pression croissante à la fois écologique, économique et réglementaire. Dans ce cadre l'efficacité énergétique présente des enjeux stratégiques importants, à savoir :

- Concilier la performance économique et l'économie durable d'énergie : Au-delà d'acheter l'efficacité au meilleur coût, il s'agit de :
  - Sécuriser les approvisionnements d'énergie,
  - Maîtriser et optimiser la facture énergétique en consommant moins et de manière intelligente,
  - Optimiser la gestion des utilités (production de chaleur, de froid et d'air comprimé).

Des gains potentiels quantifiables : Un projet d'efficacité énergétique, appliqué à une unité de production, permet la réalisation d'importantes économies d'énergie dans les domaines suivants (source ADEME) :

- Les systèmes d'air comprimé: jusqu'à 60 % par poste,
- Les systèmes de production de chaud et de froid : jusqu'à 60 % par poste,
- Les systèmes de pompage : 2 à 5 % par poste,
- Les systèmes de ventilation : jusqu'à 60 % par poste,
- Les systèmes d'entrainements : jusqu'à 50 % par poste,
- Les réseaux de distribution électrique industrielle : jusqu'à 15 % par poste.

Les systèmes de management de l'énergie selon l'ISO 50001 aident les entreprises à optimiser l'utilisation énergétique de façon systématique, économique et écologique de l'approvisionnement à la consommation

de l'énergie. Le management de l'énergie permet d'améliorer l'efficacité des processus, des équipements et des appareils, et de réduire les coûts, la consommation énergétique et les émissions de CO_2. Il y aussi des avantages en plus de la réduction directe des coûts pour l'entreprise tels que :

- Conformité aux différentes lois et réglementations en vigueur ;
- Transparence des consommations énergétiques dans les différents départements ;
- Amélioration de la sécurité de l'approvisionnement en énergie ;
- Protection environnementale, valorisation de l'image de l'entreprise ;
- Optimisation des contrats énergétiques ;
- Sensibilisation du personnel sur l'efficacité énergétique et la protection du climat ;
- Avantages fiscaux.

Chapitre IV : Amélioration d’efficacité énergétique : cas d’Alf al Maghreb

Introduction

D'une capacité de production de 4 millions de tonnes environ, l'industrie des aliments pour bétail au Maroc satisfait entièrement la demande du marché. Principal débouché de cette industrie est le secteur avicole, ce secteur connaît un taux de croissance annuel de 7,4% selon les enquêtes effectuées par un bureau d'étude au Maroc (Serec : études de marchés, études sectorielles, conseil, formation, 2018). A cet égard l'amélioration de l'efficacité énergétique dans ce secteur industriel est donc un axe de progrès prioritaire, ainsi de nombreuses études de cas ont été effectuées pour réduire la consommation énergétique.
Le concept de l'efficacité énergétique prend, de plus en plus, une place important dans un contexte de forte demande en énergie. La norme ISO 50001 concrétise ce désir d'économie d'énergie. Cette norme se base sur l'audit énergétique préliminaire et la mise en œuvre de systèmes de mesure et de surveillance afin de garantir la réalisation des objectifs préalablement définis.

Pour ce faire, ce chapitre sera consacré à une étude de cas réalisée dans un site industriel basé à Fès spécialisée dans la production et la commercialisation des aliments composés destinés à la volaille et au bétail. Une analyse détaillée des caractéristiques de la consommation d'énergie et le changement des condensateurs en batteries ont permis d'améliorer le facteur de puissance à une valeur de 0,99 et de diminuer la facture énergétique de 8,84%.

I. Description du site industriel

1. Plan de découpage de l'usine

La société ALF el Maghreb est spécialisée dans la fabrication d'aliments de bétails et de volailles. Au fil du temps, elle s'est améliorée au niveau de la qualité et des services fournis aux clients, d'une part, par ses différentes certifications (ISO 9001, OHSAS 18001, ISO 22000), et d'autre part par la mise en place d'une gestion de production performante, Elle est considérée comme l'une des principales entreprises agricoles au Maroc avec un capital de 50.000.000 DH. Sa production journalière est de 800 T/J. Le plan de découpage de la société nous a permis de situer les différents services et le positionnement de différentes installations dans le but d'identifier les circuits de la production d'énergie, ainsi que le suivi des indicateurs de performances qui permet d'améliorer le rendement de la production.

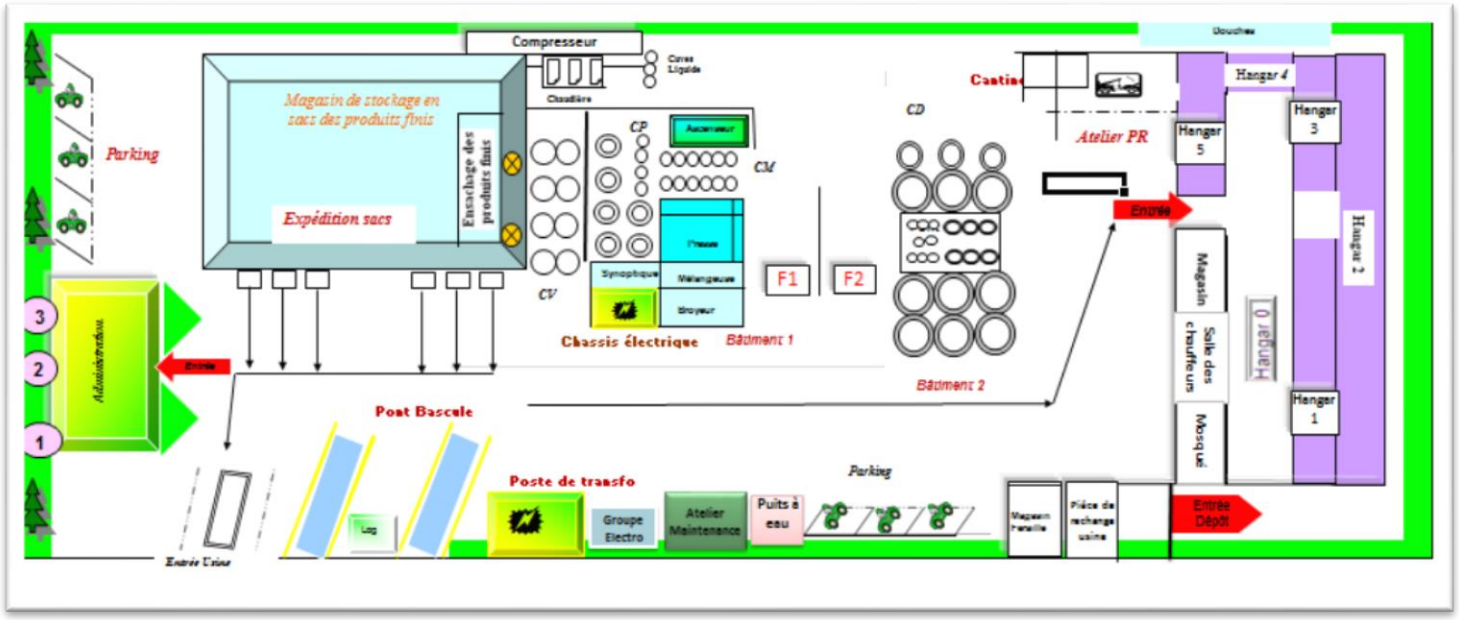


Figure 15: Plan de découpage de la société Alf al Maghreb

Le procédé de fabrication des aliments de bétails dans la société s'effectue selon plusieurs étapes comme il est cité ci-dessous :

- **Pré-mélange**

Une fois les matières premières sont dosées, elles sont dirigées vers une grande trémie pour un premier mélange grossier, appelé pré- mélange.

- **Broyage**

La matière ainsi dosée et pré-mélangée subit un broyage mécanique qui permet de réduire les matières premières à une granulométrie plus petite, afin de réaliser des mélanges homogènes et ceci à l'aide du broyeur à marteaux.

- **Mélange**

Au cours de cette étape le pré-mélange broyé part vers une mélangeuse qui reçoit des apports de liquides, tels que l'huile, la choline, et les apports d'additifs tels que le prémix et les macro-minéraux (carbonate de calcium, phosphate bi calcique) dosés à l'aide d'une benne peseuse N°3 afin d'obtenir un mélange homogène.

➔ **Cette étape occupe une place essentielle dans la ligne de fabrication et requiert une attention importante car l'homogénéité du produit doit être parfaite.**

- **Distribution**

Le mélange ainsi préparé passe vers une trémie sous-mélangeuse puis vers un distributeur. Selon le type de produit fini désiré **« Granulé ou Farine »,** le mélange est envoyé soit :

- Directement dans des cellules de vidange (**CV**) qui sont au nombre de 8 afin d'être expédié sous forme de farine.
- Stocké dans des cellules de presse (**CP**) qui sont en nombre 6 pour les envoyer vers les presses 1 et 2.

❖ **Malaxage et Pressage**

Avant l'étape de pressage, le mélange passe d'abord par un malaxeur qui a pour activité de malaxer le mélange avec la mélasse, puis dirigé vers une presse dans laquelle est injectée de la vapeur pour obtenir une pâte à 85°C. Cette pâte est ensuite poussée vers un anneau d'acier perforé où elle prend la forme de spaghettis qui seront découpés par la suite en morceaux de quelques millimètres donnant ainsi des granulés.

❖ **Refroidissement**

Le refroidissement consiste à refroidir et à sécher des granulées afin d'éliminer l'excès d'eau et aussi d'assurer leur consistance.

❖ **Emiettage**

Il s'effectue à l'aide d'un émietteur qui sert à casser les granulés en particules de taille variante selon la nature de produit voulu.

❖ **Tamisage**

Elle s'effectue à l'aide du tamiseur à l'intérieur duquel s'installent 3 grilles de dimension décroissante. Au cours du tamisage les grands granulés retournent à l'émietteur pour être cassés de nouveau, alors que les fines passent vers la presse en suivant les étapes de granulation.

❖ **Expédition**

L'ensachage est la dernière étape de la production, elle dépend de la commande du client. Le produit fini stocké dans des cellules vrac selon les commandes demandées, les produits finis seront expédiés soit :

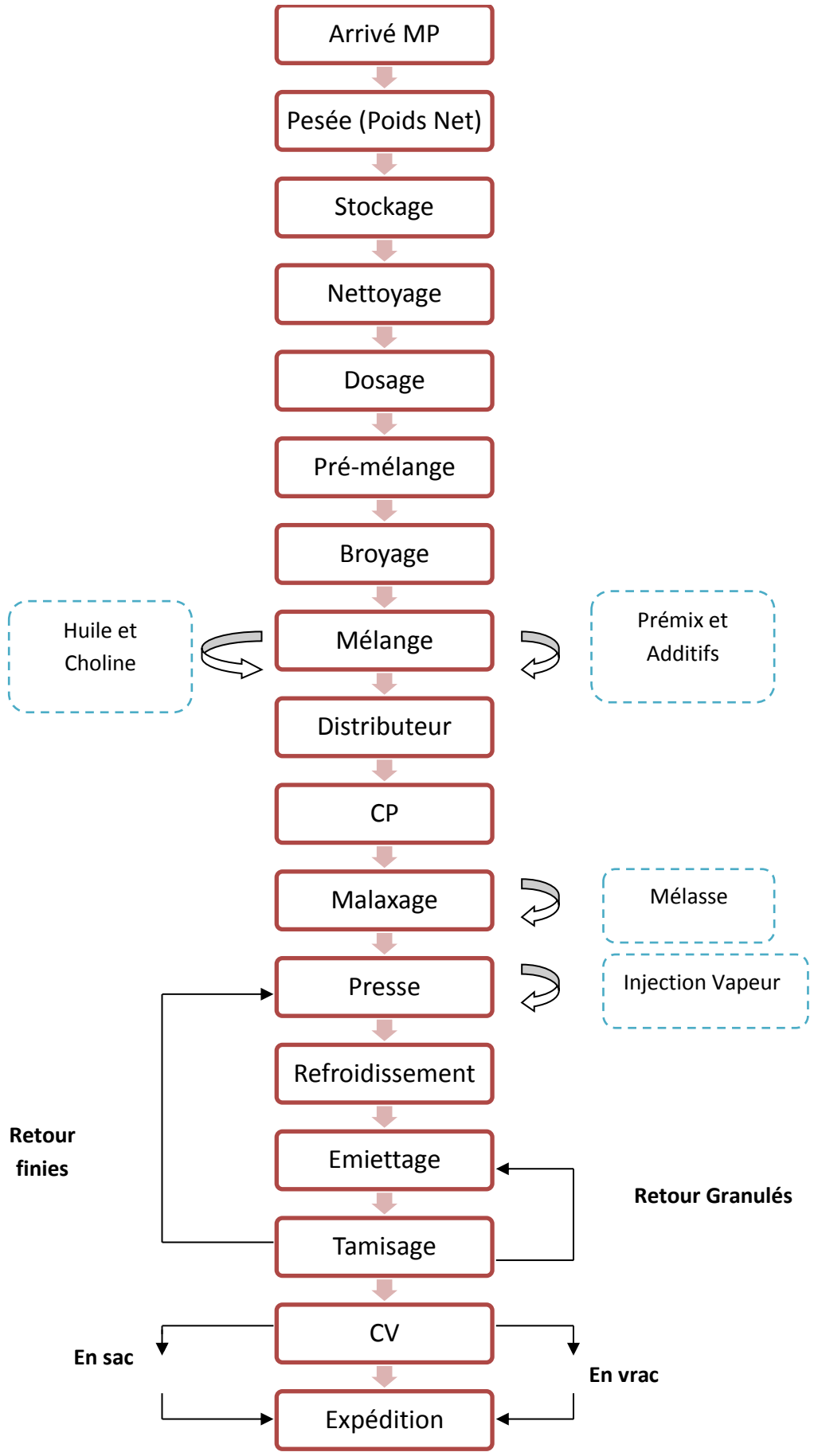


Figure 16: Diagramme de fabrication des aliments de bétails.

Diagramme de fabrication de farine

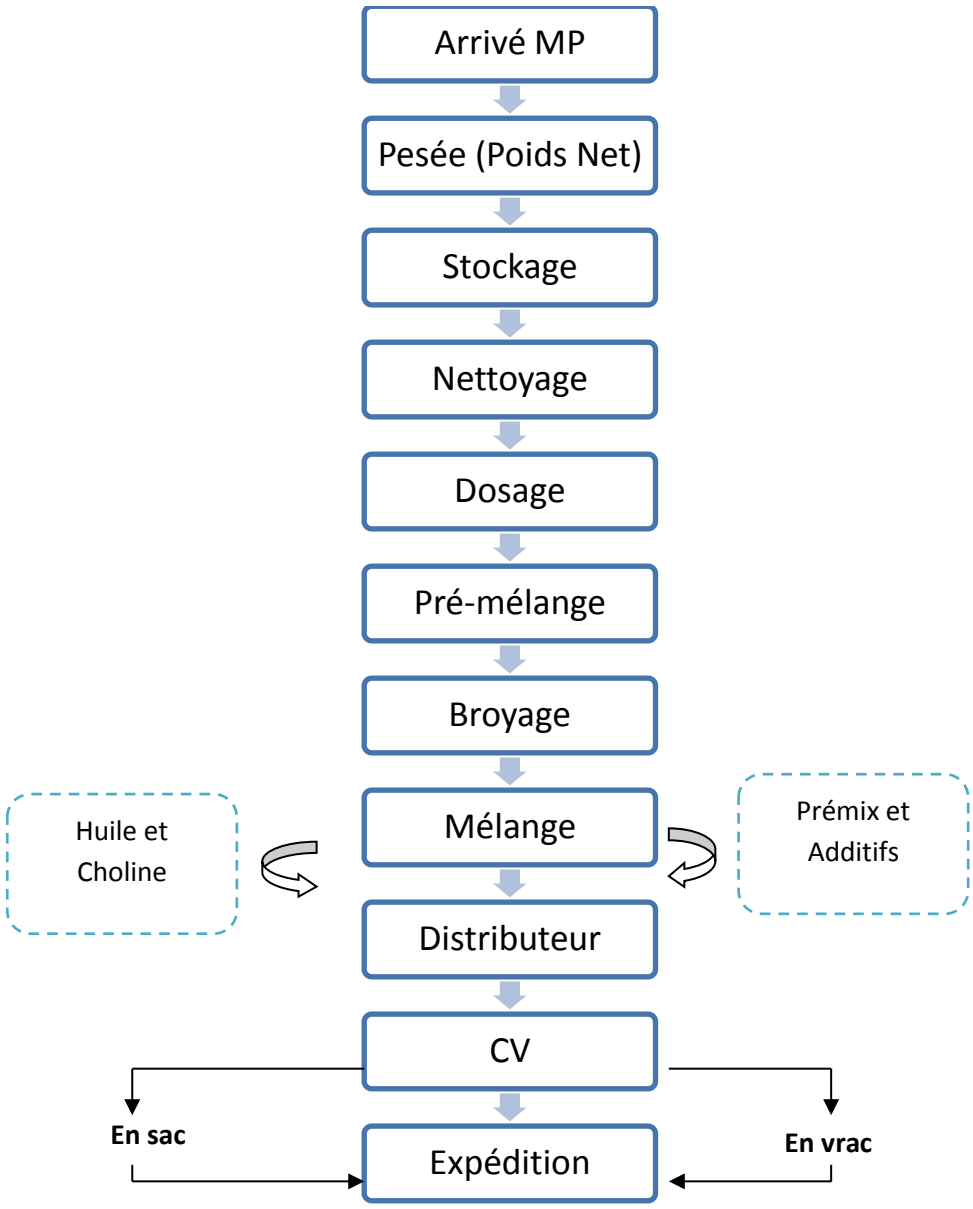


Figure 17: Diagramme de fabrication de farine

2. Utilisation rationnelle de l'énergie électrique

2.1 Les différentes sources de l'énergie de la société

La société ALF AL MAGHERIB dispose de plusieurs sources d'énergie afin d'assurer un bon fonctionnement des installations, mais le circuit le plus important est celui d'électricité, comme on le montre dans la figure ci-dessous y compris l'administration et les différents services de la société. Après la réception de l'électricité par l'office national de l'électricité (ONE), cette énergie sert à alimenter l'usine après son passage par le poste de transformation.

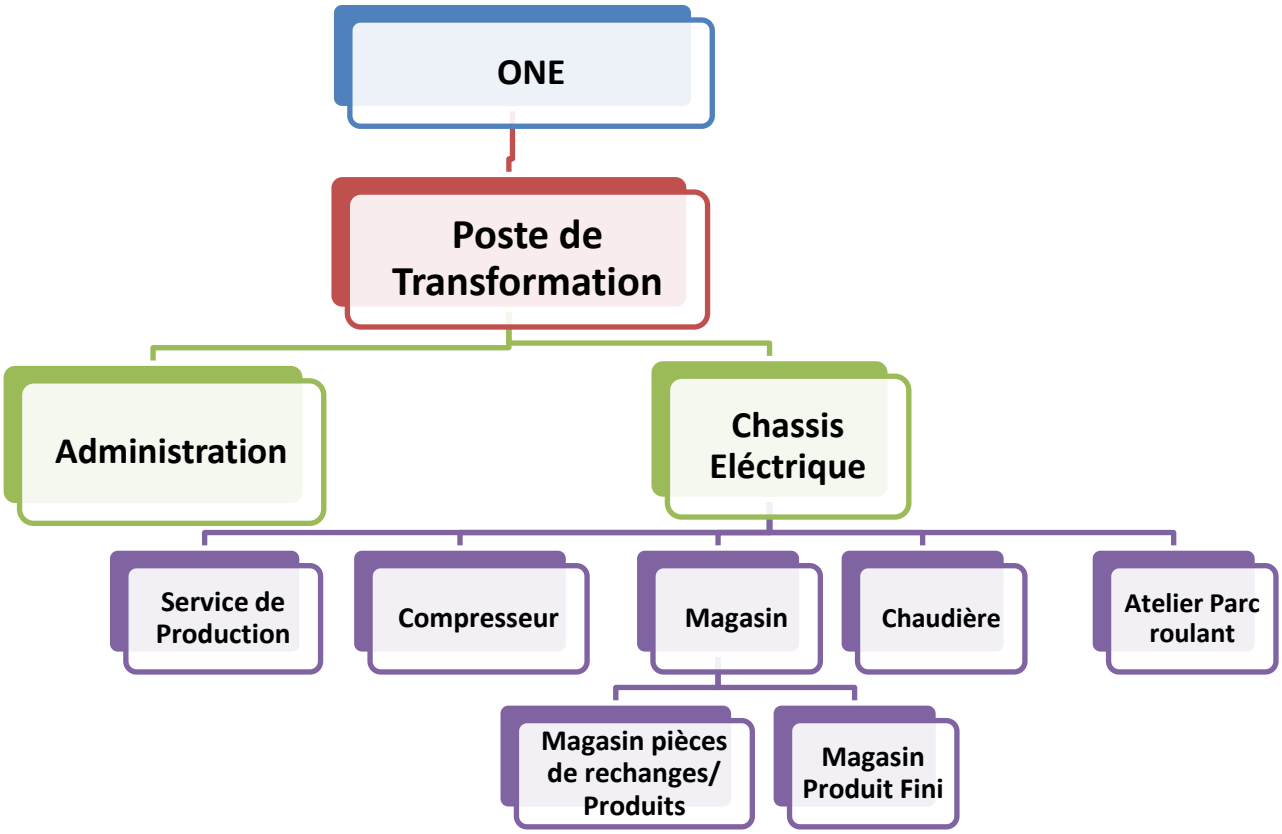


Figure 18: Circuit électrique de la société Alf al Maghreb.

2.2. Analyse de la facture énergétique

2.2.1. Frais de consommation

Les frais de consommations diffèrent d'une période a une autre comme il est montré dans les tableaux (voir annexe I) (l'ONEE - Branche Electricité, 2017).

2.2.2. Prix unitaire d'électricité hors taxe

Le prix du kilowatt proposé par l'ONE est associé au besoin de la société et selon les 3 niveaux de consommations :

- Consommations en heures normales ;
- Consommations en heures creuses ;
- Consommations en heures de pointes.

Tableau 8: Prix de l'électricité pour une facture de moyenne tension au Maroc

Description	Heures creuses	heures normales	heures de pointes
Période			
Octobre-Mars	[22h - 07h]	[07h - 17h]	[17h - 22h]
Avril –Septembre	[23h - 07h]	[07h - 18h]	[18h - 23h]
Facturation			
Prix de l'électricité (MAD/KWH)	0,5363	0,8135	1,1646
Prix de la puissance souscrite (MAD/KVA)	466,02		

2.2.3. Pénalité pour un facteur de puissance inférieur à 0,8

Selon la structure tarifaire actuelle au Maroc, les grands consommateurs industriels sont pénalisés par des frais additionnels sur leur note électrique, si le facteur de puissance moyen mensuel est inférieur à 0,8. Le montant de la pénalité représente 2% du montant total des redevances de consommations pour chaque centième d'insuffisance, par rapport à 0,8 du facteur de puissance constaté.

II. Matériels et Méthodes

1. Méthodologie

Cette partie décrit la méthodologie suivie pour atteindre les objectifs envisagés, compte tenu du type et des différentes étapes de l'audit énergétique réalisé et explique les instruments utilisés pour la collecte des données. Les méthodes de facturation des sociétés à moyenne tension au Maroc et les approches pour l'estimation des économies d'énergie résultant des améliorations proposées pour une meilleure gestion de l'énergie**.**

1.1. Audit énergétique

L'audit énergétique est une analyse des flux d'énergie dans un système, dans le but de réduire son apport énergétique sans affecter négativement ses rendements (Hasanbeigi et al., 2010).

L'ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) a défini trois niveaux progressifs, ou types d'audits : (ASHRAE Niveau 1 – pré-diagnostic/audit préliminaire, ASHRAE Niveau 2 - Enquête et analyse énergétiques et ASHRAE Niveau 3 - Analyse détaillée des modifications intensives en capital).

Cette étude est une vérification énergétique de niveau 2 et elle est présenté selon 4 étapes. Le processus suivi au cours de cette vérification est décrit ci-dessous :

- Etape 1 : L'usine a été visitée et tous les documents nécessaires ont été collectés, principalement : puissances, données de production, et factures mensuelles d'énergie pour les années 2014, 2015, 2016.
- Étape 2 : Un ensemble de mesures a été effectué à l'aide d'appareil de mesure « Chauvin Arnoux ». L'analyseur triphasé est utilisé afin de détecter les anomalies dans l'utilisation de l'énergie électrique.
- Étape 3 : Après avoir analysé les données et les mesures recueillies, un rapport complet de la vérification énergétique a été préparé. Il contient tous les problèmes détectés par chaque consommateur d'énergie. Le rapport contient également un plan d'action et des recommandations pour améliorer l'efficacité énergétique de chaque consommateur d'énergie. Les économies d'énergie sont ensuite évaluées.

Le rapport est ensuite présenté aux chefs des services de l'usine.

- Etape 4 : Mise en œuvre des actions retenues par l'entreprise après une analyse économique de leur faisabilité

1.2. Collecte de données et mesures

Avant de commencer l'analyse, les données suivantes ont été recueillies :

- Les factures d'électricité des trois dernières années ;
- Les mesures du facteur de puissance de déplacement (DPF) pour identifier les possibilités d'amélioration.
- Une liste complète des principales caractéristiques des équipements audités (transformateur, compresseurs d'air, moteurs, système d'éclairage, pompes, ventilation, climatisation, chauffage), leur puissance, leur marque et leur mode d'utilisation.

1.3. Analyse de la facture énergétique

La période de mesure est représentative, puisque l'installation fonctionne de façon continue durant l'année et produit des quantités différentes par mois selon les commandes des clients, ce qui est justifié par sa consommation mensuelle d'électricité qui est différente d'un mois à un autre (voir l'annexe I). Par conséquent, les besoins en énergie et le fonctionnement des installations sont périodiques. De plus, les économies d'énergie estimées sont basées sur des données historiques réelles et annuelles de la société.

On a représenté ces résultats dans les figures ci-dessous pour montrer la variation de la consommation énergétique mensuelle en fonction des heures de productions ainsi que le tarif du kwh qui se diffère d'une heure à une autre.

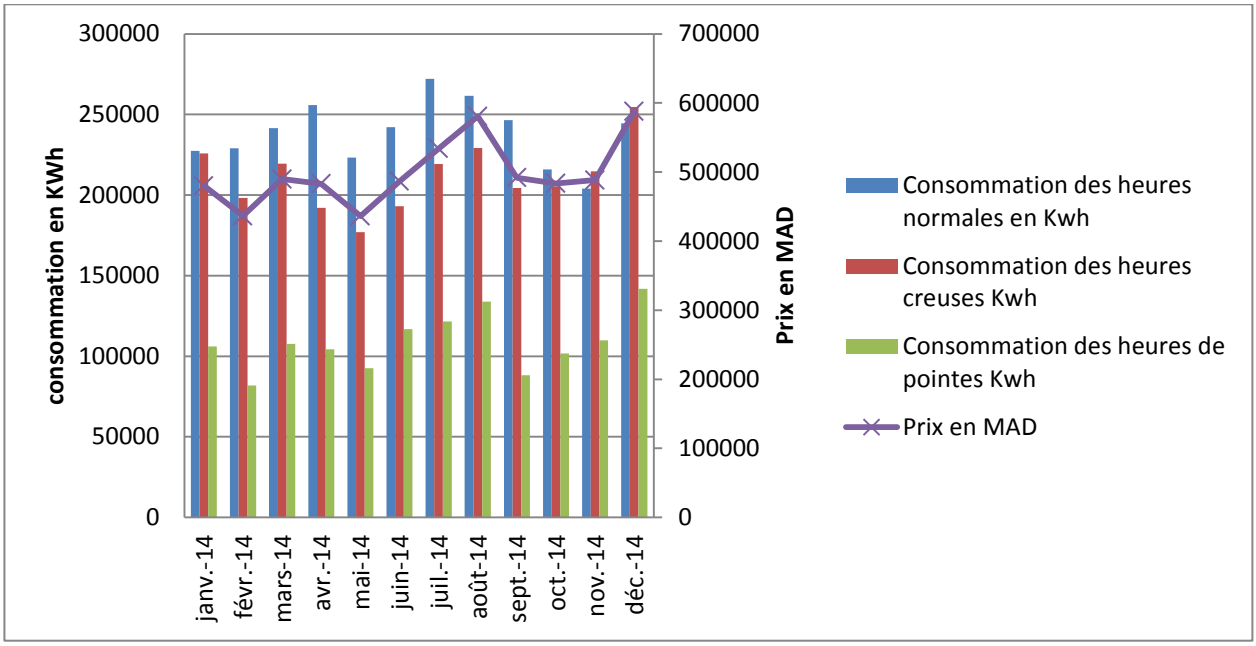


Figure 19: Facture énergétique de l'année 2014

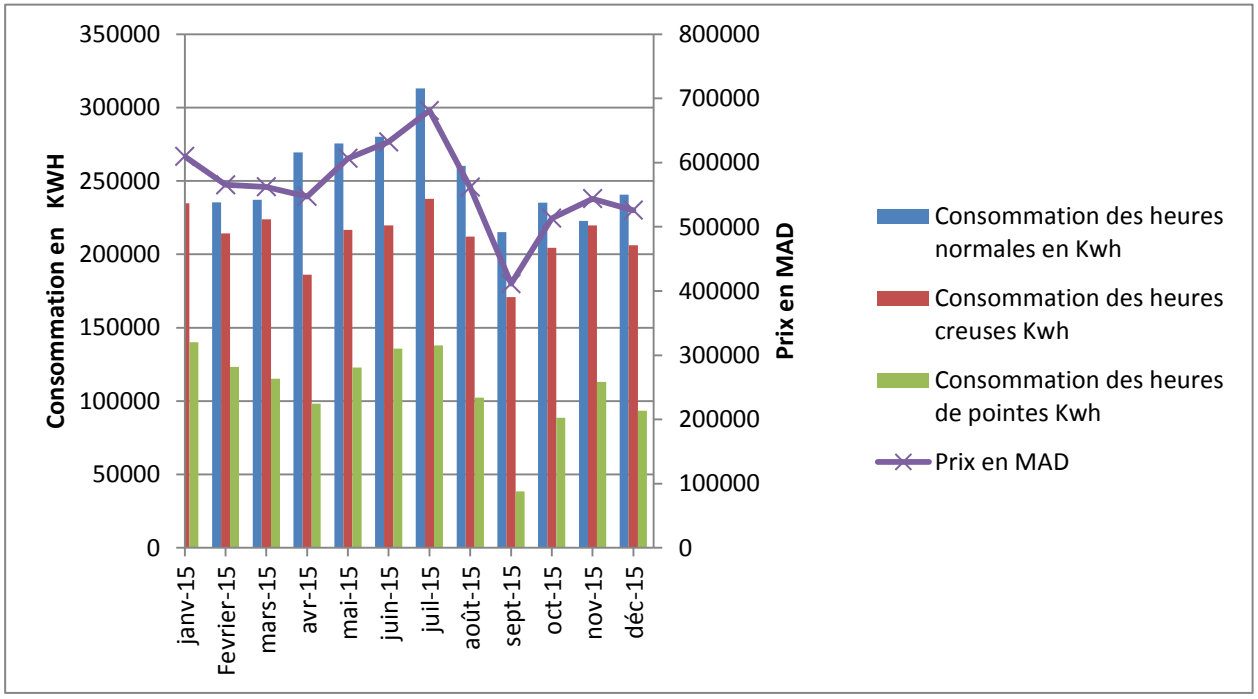


Figure 20: Facture énergétique de l'année 2015

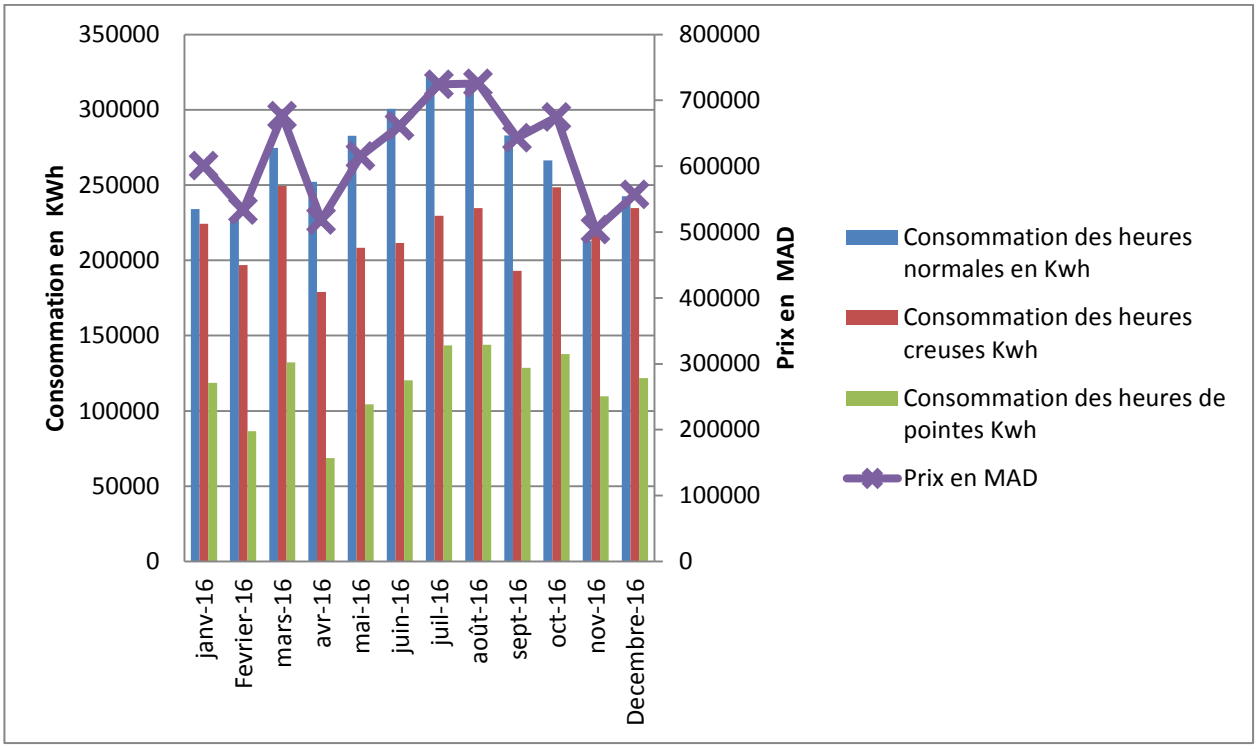


Figure 21: Facture énergétique de l'année 2016

L'historique de la consommation mensuelle d'électricité pour les années 2014, 2015 et 2016 sont présentés aux tableaux (voir l'annexe I). Il est démontré que l'énergie consommée par l'usine est généralement de l'ordre de 220 MWh/mois et le facteur de puissance de la société est acceptable et sa variation mensuelle varie de 0,80 à 0,87, mais il est encore possible de l'améliorer jusqu'à une plage de 0,98-1.

1.4 Poste électrique de transformation

Le poste de transformation utilisé par l'usine est situé à l'entrée dans un local sécurisé avec une capacité de 630 kVA (20 kV/400V), il contient un système de mesure moyenne tension. Chaque minute, les paramètres électriques (tension, ampérage, énergie, facteur de puissance, puissances et harmoniques) sont enregistrés par l'analyseur de puissance triphasé. L'efficacité maximale de ce type de transformateurs se produit dans des charges entre 60% et 70%. Plusieurs recherches ont souligné que les charges comprises entre 40 % et 70 % n'affectent pas de façon significative le rendement maximal du transformateur. Compte tenu de ce qui précède, on peut affirmer que le transformateur fonctionne à un niveau proche des rendements nominaux.

2. Matériels

L'appareil de mesure C.A 8335 (Qualistar+) utilisé dans cette étude de cas, un analyseur de réseau électrique triphasé à affichage graphique couleur et à batterie rechargeable intégrée. Son rôle est triple qui permet :

- la mesure des valeurs efficaces, des puissances et des perturbations des réseaux de distribution d'électricité ;
- L'obtention des résultats instantanés des principales caractéristiques du réseau triphasé ;
- Le suivi des variations des différents paramètres dans le temps.

L'incertitude de mesure de l'appareil est meilleure que 1 % (sans compter les incertitudes dues aux capteurs de courant). A cela s'ajoute une grande flexibilité due au choix des différents capteurs pour des mesures de quelques milliampères (MN93A) à plusieurs kilo ampères (Amp*FLEX*™).

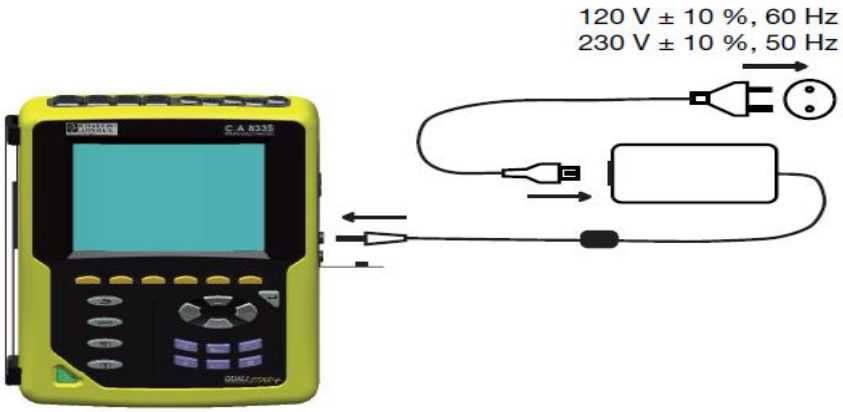


Figure 22: Analyseur Chauvin Arnoux.

Parmi les principales mesures réalisées sont :

- Mesure de la valeur continue des tensions et des courants (neutre compris) ;
- Mesure des valeurs efficaces sur demi-période minimale et maximale en tension et courant (hors neutre) ;
- Mesure des valeurs crêtes pour les tensions et les courants (neutre compris) ;
- Mesure du facteur de crête en courant et en tension (neutre compris) ;
- Mesure taux de distorsion harmonique total par rapport au fondamental (THD en %f) des courants et des tensions (hors neutre) ;
- Mesure des puissances actives, réactives (capacitive et inductive), non actives, déformantes et apparentes par phase et cumulées (hors neutre) ;
- Mesure des facteurs de puissance (PF) et des facteurs de déplacement (DPF ou cosφ) (hors neutre).

III. Résultats et discussions

1. Paramètres influant sur la facture énergétique

Les appareils consommant de l'énergie dans cette unité sont alimentées par des condensateurs en batteries automatiques et un analyseur de facteur de puissance qui permet d'indiquer la valeur de DPF. Après une analyse du fonctionnement de condensateurs par l'analyseur du réseau (Chauvin Arnoux), on a constaté que le DPF est faible, ce qui donne l'obligation de diagnostiquer le système de compensation d'énergie.

Parmi les paramètres qui influencent la facture énergétique, il y'a :

- ➔ Puissance active ;
- ➔ Puissance apparente ;
- ➔ Puissance réactive ;
- ➔ DPF.

Les mesures du DPF indiquent un besoin de compensation d'énergie réactive, afin d'obtenir un meilleur gain et une réduction des pertes. La définition de l'armoire de compensation d'énergie réactive doit se faire au plus juste, car il faut impérativement éviter de surcompenser.
En effet, la surcompensation signifie que nous injectons de la puissance réactive dite capacitive et qui serait comptabilisée dans la puissance apparente, donc la batterie de condensateur doit avoir un effet de neutralisation de l'énergie réactive consommé par l'installation tout en bénéficiant de maximum de puissance disponible.

2. Compensation d'énergie réactive

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension.

L'énergie active consommée (kwh) résulte de la puissance active P (kw) des récepteurs. Elle se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes).

L'énergie réactive consommée (kvarh) sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques des machines électriques. Elle correspond à la puissance réactive Q (kvar) des récepteurs.

L'énergie apparente (kvah) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente S (kva) des récepteurs, somme vectorielle de P (kW) et Q (kvar).

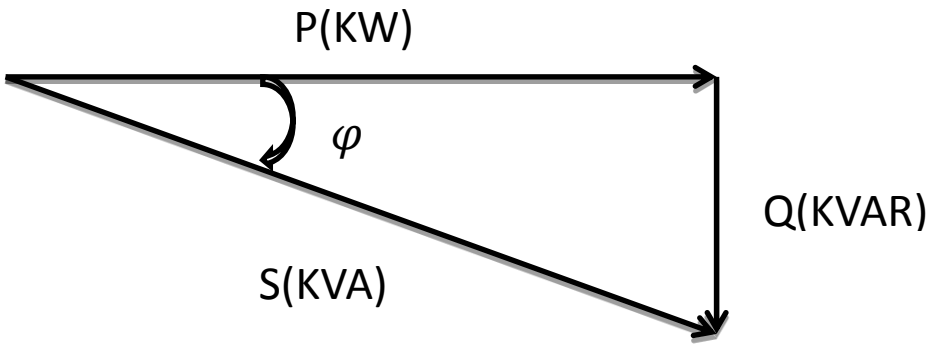


Figure 23: Composition vectorielle des puissances.

Le cos φ représente le rendement électrique d'une installation et il est calculé selon la formule suivante :

$$\cos\varphi = \frac{Puissance\ Active}{Puissance\ Apparente}$$

L'objectif de la compensation d'énergie réactive est la réduction du courant appelé sur le réseau. L'énergie réactive est fournie par des condensateurs, au plus près des charges inductives. Sur une période de temps donnée, Ainsi, du fait d'un courant appelé plus important, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne :

- ➔ Des surcharges au niveau des transformateurs ;
- ➔ L'échauffement des câbles d'alimentation ;
- ➔ Des pertes supplémentaires ;
- ➔ Des chutes de tension importantes.

En effet, (Liudvinavičius, 2017) a montré que si on veut augmenter le facteur de puissance cos φ de 0,85 à 0,97, il faut compenser la puissance réactive mais les compensateurs statiques de puissance réactive sont plus chers que les condensateurs à commutation mécanique. Les compensateurs statiques de puissance réactive sont utilisés pour supporter les changements rapides et les condensateurs à commutation mécanique pour fournir des VAR en régime permanent.

(Águila Téllez et al., 2018) ont proposé une révision bibliographique exhaustive des méthodes mathématiques utilisées pour la sélection et la localisation optimale des éléments de compensation de puissance réactive, les résultats obtenus ont démontré que la compensation de la puissance réactive dans les réseaux de distribution est un problème qui doit être analysé, dans le but d'obtenir une solution globale qui envisage un emplacement et un dimensionnement optimal des éléments de compensation de puissance réactive, qui contribuent à l'amélioration conjointe des profils de tension, la minimisation des pertes de puissance et l'amélioration du facteur de puissance, tout cela à un coût minimum d'investissement et un rendement maximum.

Après ces résultats obtenus par les différents chercheurs on peut conclure qu'il existe trois types de compensation d'énergie réactive :

- ➔ Compensation globale.
- ➔ Compensation locale.
- ➔ Compensation individuelle.

Dans notre étude de cas, l'entreprise a constaté que le changement des condensateurs en batteries peuvent affecter une diminution du facteur DPF et d'améliorer l'efficacité énergétique dans la société.

3. Condensateurs en batteries

3.1 Remplacement des batteries de condensateurs

Les condensateurs installés sont des condensateurs de moyenne tension de CIRCUTOR, formées par une série complète de condensateurs monophasés et triphasés totalement conformes à la Norme internationale IEC 60871. La conception et la production des condensateurs sont réalisées avec la garantie et la fiabilité des meilleures matières premières, et avec la souplesse suffisante pour apporter une solution personnalisée pour chaque application.



Figure 24: Condensateur CIRCUTOR

3.2 Répartition de la chaine de production pour chaque condensateur

La société Alf Al Maghreb se compose de trois condensateurs dont chaque condensateur assure le fonctionnement des installations de différentes étapes de procédés de fabrication :

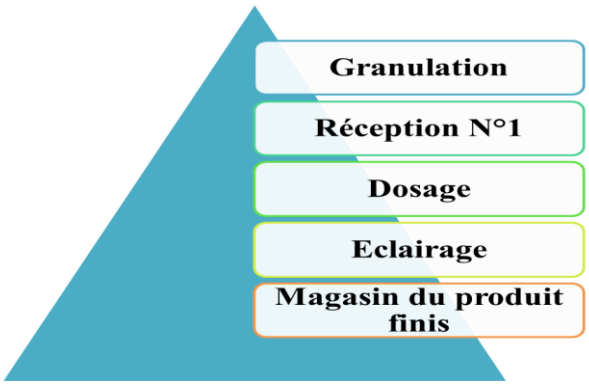


Figure 25: Condensateur du bloc N°1



Figure 26: Condensateur du bloc N°2

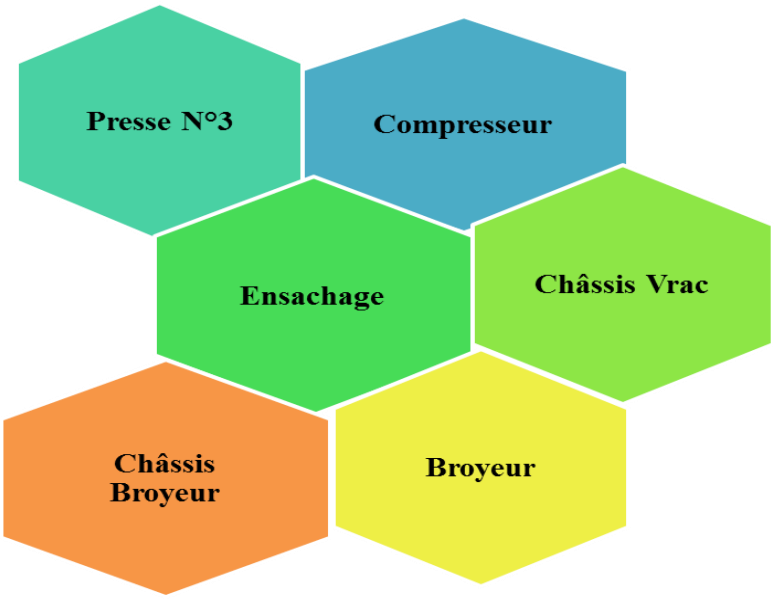


Figure 27: Condensateur du bloc N°3

4. Variation de la puissance active

D'après les résultats présentés dans le tableau 8 ci-dessous sur la variation de la puissance active et qui sont obtenu par l'analyseur « Chauvin Arnoux » dans les trois condensateurs avant compensation (P1, P2 et P3), pour le condensateur N°1 la puissance active varie de 107,2 kw à 117,1kw, de 138,8kw à 165,2kw pour condensateur N°2 et pour le condensateur N°3 les valeurs augmentent de 100,8kw à 104,7 kw. Après l'installation des nouveaux condensateurs (P'1, P'2, P'3), on a constaté une augmentation de 142,9kw à 168,4kw pour le condensateur N°2, les valeurs dans le condensateur N°1 restent presque constante, au contraire le condensateur N°3 a subi une diminution de 107,1 kw à 100,2 kw

Tableau 9: Variation de la puissance active

Puissance active / Condensateurs	P (KW)			P'(KW)		
	P_1	P_2	P_3	P'_1	P'_2	P'_3
Condensateur N° 1	**107,2**	**110,2**	**117,1**	**101,9**	**103**	**106,8**
Condensateur N° 2	**138,8**	**159**	**165,2**	**142,9**	**156,6**	**168,4**
Condensateur N° 3	**100,8**	**104,7**	**103,1**	**107,1**	**102,4**	**100,2**

5. Variation de la puissance apparente

Avant l'installation des nouveaux condensateurs (S1, S2 et S3) dans le site industriel, la puissance apparente dans les condensateurs N°1 et N°3 reste constante par contre les valeurs dans le condensateur N°2 ont été augmentées de 159,9 kva à 191,6 kva. Après l'installation des condensateurs (S'1, S'2, S'3), on a constaté une augmentation de 102,5 kva à 107,5kva pour le condensateur N°1 et de 143,9 kva à 170,2 kva pour le condensateur N°2 par contre les valeurs dans le condensateur N°3 a été varié de 113,5 kva à 105,6 kva.

Ces résultats sont présentés dans le tableau 10 ci-dessous :

Tableau 10: Variation de la puissance apparente

Puissance apparente / Condensateurs	S (KVA)			S'(KVA)		
	S_1	S_2	S_3	S'_1	S'_2	S'_3
Condensateur N° 1	**130,6**	**131,1**	**139,8**	**102,5**	**103,5**	**107,5**
Condensateur N° 2	**159,9**	**174,8**	**191,6**	**143,9**	**157,5**	**170,2**
Condensateur N° 3	**127,8**	**132,4**	**132,9**	**113,5**	**110,1**	**105,6**

6. Variation de la Puissance réactive

La répartition optimale de la puissance réactive joue un rôle majeur dans le fonctionnement économique du réseau électrique et dans la stabilité de tension, l'amélioration de cette puissance permet de réduire la facture énergétique et les émissions de gaz à effet de serre.

D'après les résultats mentionnés dans le tableau 10 ci-dessous, la puissance réactive (Q1, Q2 et Q3) avant l'installation des nouveaux condensateurs, on observe une augmentation des valeurs de 74,59 kvar à 76,43 kvar pour le condensateur N°1, de 79,01 kvar à 96,18 kvar pour le condensateur N°2 et pour le condensateur N°3 les valeurs varient de 77,96 kvar à 83,20 kvar. Après l'installation des nouveaux condensateurs (Q'1, Q'2, Q'3), on constate que des valeurs des puissances réactives dans les 3

condensateurs ont été diminuées, cette diminution remarquable aura une influence importante sur la facture énergétique.

Tableau 11: Variation de la puissance réactive

Puissance réactive / Condensateurs	Q (KVAR)			Q'(KVAR)		
	Q_1	Q_2	Q_3	Q'_1	Q'_2	Q'_3
Condensateur N° 1	**74,59**	**71,02**	**76,43**	**4,47**	**3,87**	**7,48**
Condensateur N° 2	**79,01**	**71,60**	**96,18**	**11,79**	**-0,16**	**23,71**
Condensateur N° 3	**77,96**	**80,44**	**83,20**	**37,30**	**40,25**	**33,11**

7. Variation du facteur DPF

La réduction de l'énergie réactive a amélioré le facteur de puissance de 0,83 à 0,99 comme il représenté dans le tableau ci-dessous dans les trois condensateurs, cette amélioration résulte d'une réduction des pertes d'énergie dans les différentes installations et d'une diminution de la facture énergétique. On peut dire qu'une amélioration du facteur de déplacement de puissance d'une valeur supérieure à 0,9 offre des économies d'énergie, une pénalité évitée et un gain financier sur la facture énergétique.

Tableau 12: Variation de DPF

DPF / Condensateurs	DPF			DPF'		
	DPF_1	DPF_2	DPF_3	DPF'_1	DPF'_2	DPF'_3
Condensateur N° 1	**0,820**	**0,840**	**0,836**	**0,997**	**0,997**	**0,997**
Condensateur N° 2	**0,863**	**0,905**	**0,854**	**0,996**	**0,998**	**0,993**
Condensateur N° 3	**0,780**	**0,783**	**0,768**	**0,943**	**0,928**	**0,948**

8. Comparaison entre les factures énergétiques 2016 et 2017

Le changement des condensateurs en batteries a été effectué à la fin de l'année 2016, cet investissement a permis d'améliorer le facteur de déplacement de puissance jusqu'à la valeur de 0 ,997 et après une comparaison entre les factures énergétiques de 2016 par rapport au 2017 on a pu constater que la consommation a été diminuée de 8,84% (voir la figure ci-dessous), cette diminution n'est pas suffisante car il y a encore des investissements à réaliser pour réduire le maximum des pertes sur la facture énergétique.

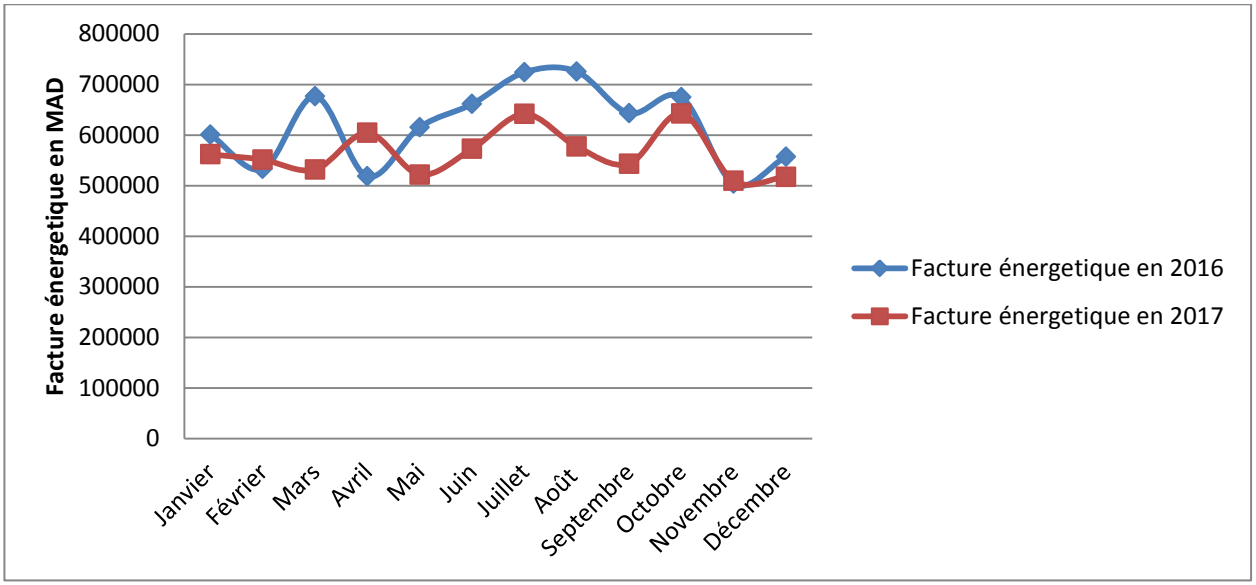


Figure 28: Comparaison entre la consommation énergétique de 2016 et 2017

9. Démarche de la mise en œuvre de la norme ISO 50001

Les objectifs fondamentaux de la norme ISO 50001:2011, tels qu'énoncés dans son introduction, sont les suivants : l'amélioration de la performance énergétique - efficacité énergétique, la réduction des coûts énergétiques et des émissions de gaz à effet de serre et d'autres impacts environnementaux connexes (International Organization for Standardization, 2011).

L'enquête AFNOR (AFNOR Energies, 2015) a confirmé qu'on peut faire une réduction de 5 à 15 % à court terme et une réduction de 30 % à long terme et comme on peut envisager le rendement du capital investi (RCI) comme mesure de la réduction des coûts énergétiques, ainsi que (Agence Suédoise de l'Énergie, 2013) a constaté que la comparaison du coût de la mise en œuvre de la norme ISO 50001 par rapport aux valeurs de la consommation d'énergie et un retour sur investissement de moins de 2 ans.

Dans notre cas on a réalisé une auto-évaluation dans la société Alf al Maghreb dans le but est la mise en œuvre d'un système de management d'énergie (ISO 50001), cette auto-évaluation a permis d'identifier plusieurs axes qui ont été mis en place comme le montre les deux figures ci-dessous, cette dernière a été destinée aux personnels administratif (responsable de maintenance, responsable de production, etc…), puisqu'elle s'engage dans la réduction et dans la meilleure gestion de l'énergie. Les résultats de cette auto-évaluation ont montré que 50% des étapes de management d'énergie ont été déjà réalisés, ce qui montre que la société est prête à être certifiée par la norme ISO50001.

Les résultats de cette auto-évaluation sont montrés en détails dans les deux figures suivantes.

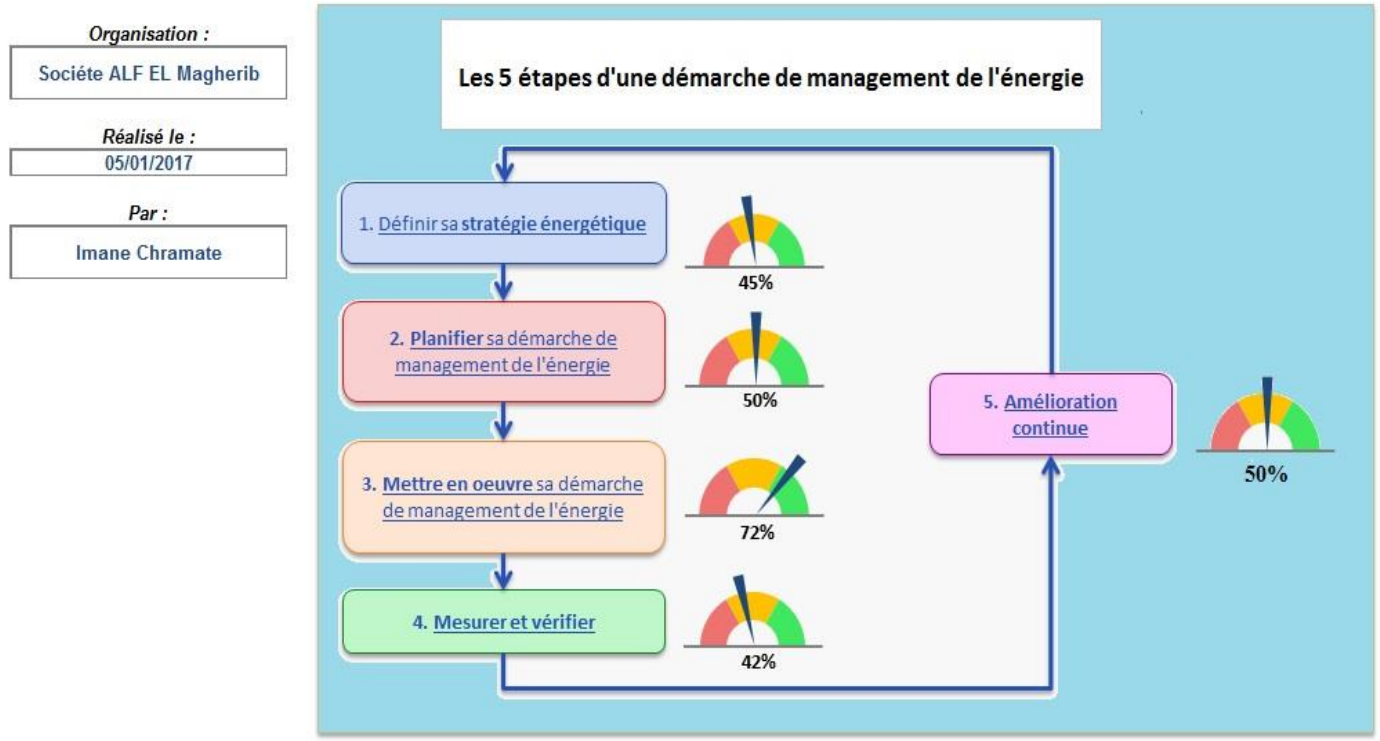


Figure 29: Etapes de la démarche de management d'énergie

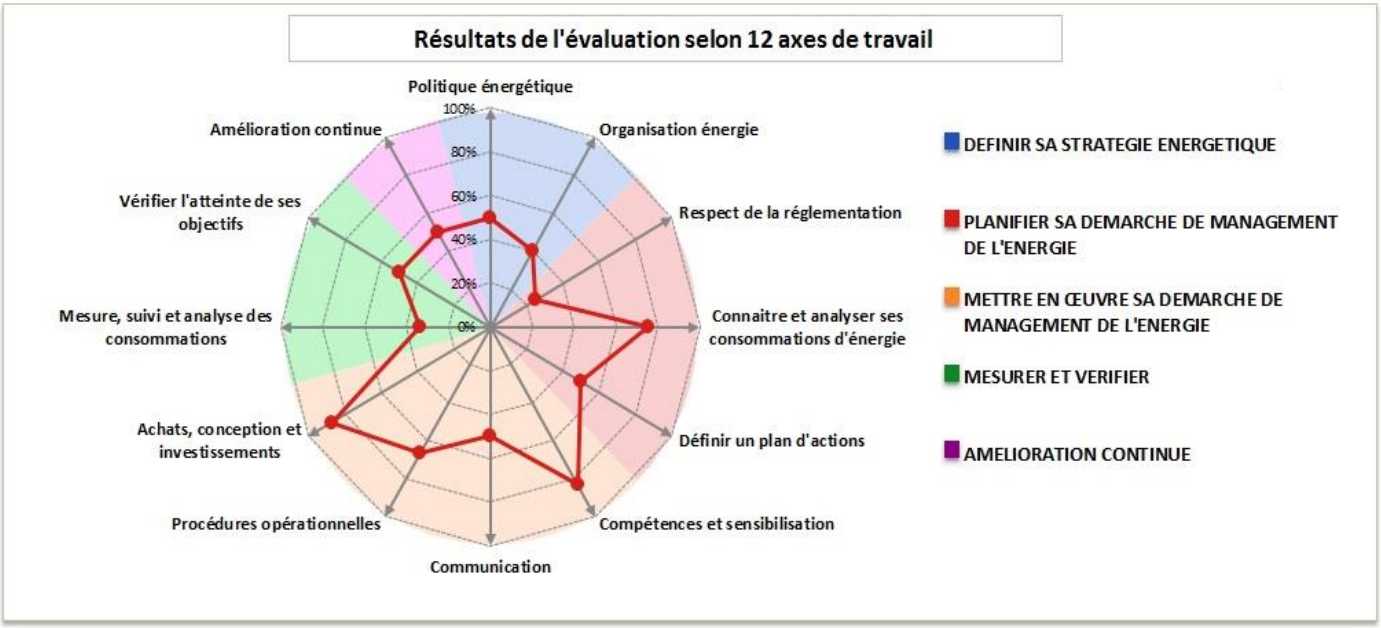


Figure 30: Etapes de la démarche de management d'énergie

Conclusion

Au cours de cette étude de cas, qui a été réalisée dans la société Alf Al Maghreb basée sur Fès, plusieurs recommandations ont été proposées pour diminuer la consommation énergétique. Parmi ces recommandations, on cite :

- ➔ Changement des condensateurs en batterie ;
- ➔ Installation d'une chaudière à Biomasse pour réduire les émissions de GES ;
- ➔ Installation des panneaux solaires ;
- ➔ Changement des variateurs de vitesses.

Le remplacement des batteries de condensateurs a abouti à une prolongation de la durée de vie des machines et des équipements et une augmentation du rendement, ainsi une diminution des pertes d'énergie avec une amélioration de la fiabilité du réseau électrique. Cette solution a permis l'entreprise de devenir plus compétitive dans le secteur industriel.

L'analyse des différents facteurs qui influencent sur la facture énergétique a montré que l'énergie réactive et le facteur de déplacement avaient un impact considérable sur la charge énergétique. Les résultats obtenus ont montré que la valeur de l'énergie réactive a baissé de 36,75 Kvarh à 12,50 Kvarh, et l'énergie active et apparente ont augmenté respectivement de 55,82 KWh à 95,35 KWh et de 66,85 KVa à 96, 21 KVa. Cette diminution de l'énergie réactive a pu améliorer le facteur de puissance de 0,83 à 1.

Finalement, L'intérêt de la mise en œuvre de l'ISO 50001 est d'avoir la certification par cette norme et l'amélioration de la facture énergétique de la société. On peut conclure qu'une amélioration du facteur de puissance à une moyenne mensuelle dépassant 0,8 offre des économies d'énergie, une pénalité évitée et gain financier sur la facture énergétique de 8,84% par rapport à la facture énergétique de 2016.

Chapitre V : Réduction des émissions de gaz à effet de serre : cas d'ECOMED

Introduction

ECOMED (ECOlogie et **MED**iation**)** est la première société au Maroc et en Afrique, spécialiste des projets de cogénération et de valorisation du biogaz. Fès est la première ville au Maroc éclairée à 40% sur l'éclairage publique, grâce à ces déchets ménagers. Ce projet a contribué efficacement à l'amélioration de la gestion et l'exploitation de la décharge au moyen d'une centrale électrique de 1 Mégawatt.

La décharge de Fès représente un modèle réussi de la valorisation énergétique du déchet et de la contribution à la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables. La capacité totale de la centrale bioélectrique peut atteindre **5 MW** et produire **40.000MWh/an.** Cette technologie a été installée par la société Clarke Energy, le leader mondial des projets de cogénération et de valorisation du biogaz par le biais de la technologie des moteurs à Gaz GE Jenbacher.

Le biogaz est une source d'énergie renouvelable qui présente de nombreux avantages sociaux et environnementaux. Il provient de la fermentation anaérobie de la matière organique, il est composé principalement de méthane et de gaz carbonique, généralement saturé en vapeur d'eau. Il contient également de faibles concentrations d'autres gaz issus de la fermentation tels que le sulfure d'hydrogène, de l'hydrogène, de la silicone. En plus du biogaz, la fermentation des déchets solides produit du lixiviat, qui est un liquide toxique provenant de la dégradation des déchets. La valorisation énergétique du biogaz assure une production d'énergie renouvelable qui réduit la consommation d'énergie fossile. Le biogaz obtenu est constitué en moyenne de 60 % de méthane, 37,02 % de dioxyde de carbone et il est saturé en eau. Il contient des traces de sulfure d'hydrogène, de diazote, d'oxygène, d'ammoniac, d'hydrogène et de siloxanes, en fonction de l'origine des matières dégradées.

L'objectif de cette étude de cas est de réduire les émissions de CO_2 à l'aide de l'amélioration d'une méthode de calcul en se basant sur le procédé de production et les données de la société.

I. Présentation d'ECOMED

Le Groupe ECOMED est un holding marocain créé par 2 sociétés américaines **EDGEBORO INTERNATIONAL et GLOBAL ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY.** Ce Groupe est spécialisé dans la gestion des déchets solides plus particulièrement dans le domaine du traitement et de la valorisation des déchets solides, implanté au Maroc depuis une douzaine d'années.

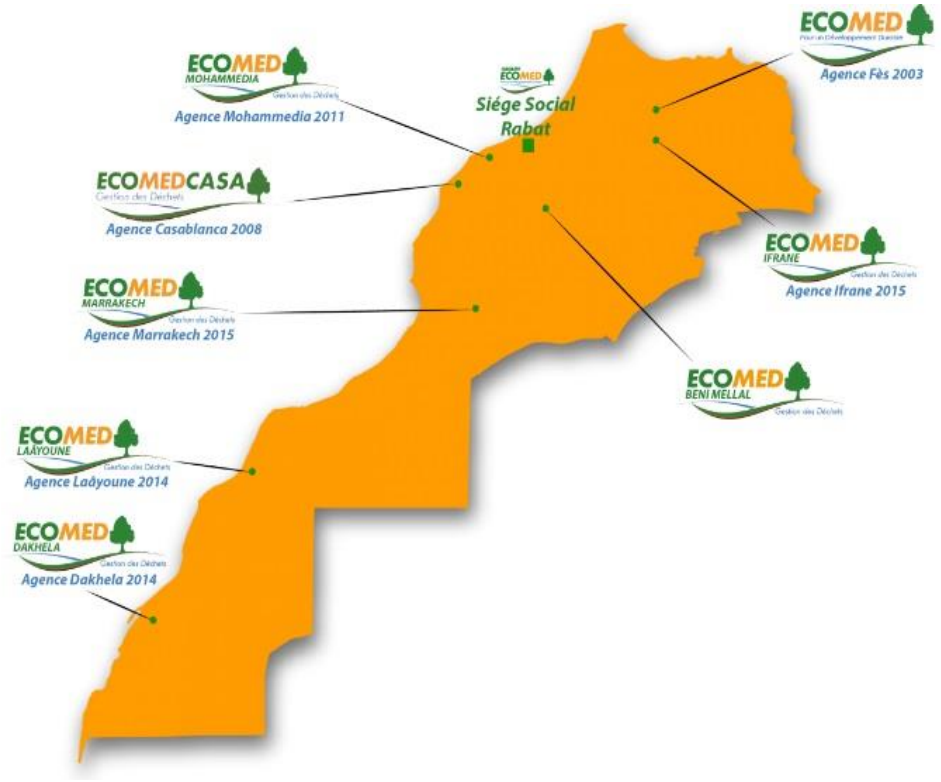


Figure 31: Différents Filiales d'ECOMED au Maroc.

Depuis 2002 et conformément à la loi 54-00 sur la gestion déléguée, le Groupe ECOMED a créé aux fils des années, et au fur et à mesure des projets dont il a obtenu la concession, des filiales/Agences, afin d'assurer leur gestion dans différentes villes du Maroc. Ainsi, le nombre de ces filiales/agences a évolué sept fois entre 2003 et 2015.

1. ECOMED Fès

Dans le cadre d'un partenariat public-privé tripartite, regroupant la Commune urbaine de Fès, le ministère de l'intérieur et la société délégataire « ECOMED », un projet a été réalisé en vue de pallier les problèmes (odeurs nauséabondes, moustiques et microbes) de l'ancienne décharge des «Oudayas».

La nouvelle décharge est située à environ 12 km du centre-ville sur la route de Sidi Hrazem. Les travaux de développement de la nouvelle installation d'enfouissement comprennent la construction de voies d'accès, de cellules et de travaux de collecte et de traitement de lixiviat, les installations de collecte, de traitement de biogaz, les travaux de collecte et d'élimination de l'eau de pluie. La mise en décharge est également équipée d'un bâtiment opérationnel, d'un atelier, d'un pont-bascule et d'une station-service.

Tous les travaux dans la nouvelle décharge ont été construits en utilisant la main-d'œuvre locale sous la supervision et l'assistance technique d'EDGEBORO et GESI. L'exploitation des décharges a commencé le 2 avril 2004. Toutes les mesures sont prises pour préserver la pollution de tous les composants de l'environnement, à savoir l'eau, l'air, le sol, la faune et la flore. Le système de collecte de lixiviat, les

bassins de stockage de lixiviat, le système de collecte de biogaz, le revêtement journalier de déchets, l'équipement approprié et le mode de fonctionnement approprié sont mis en place avec un personnel qualifié pour atteindre l'objectif d'exploitation de la première décharge contrôlée au Maroc.

2 .Fiche technique d'ECOMED Fès

Tableau 13: Fiche technique de la société

Raison social	**ECOMED**
Date de création	**2 Avril 2004**
Statut juridique	**Holding**
Secteur d'activités	**Gestion et exploitation des déchets**
Domaines d'activités	**Gestion des décharges et production d'énergie**

II. Département de la décharge

1. Salle de pesage et de contrôle des déchets

A l'entrée du site, se trouve une bascule, pilotée à partir d'une loge de pesage. Les camions arrivent avec des déchets et sont pesés sur le pont bascule. La décharge reçoit entre 750 et 1000 tonnes de déchets par jour.

La bascule électronique est doté de six capteurs en dessous liés à un appareil appelé terminal, dont le but est d'afficher la masse sur le pont bascule, sa capacité est de 60 tonnes et son incertitude est de 20 kg par tonne, qui est considérée comme négligeable.

Le terminal est lié à un ordinateur qui enregistre les masses des déchets reçues de chaque jour à l'aide d'un logiciel appelé Transistor.

2. Enfouissement des déchets

Un site d'enfouissement technique permet la disposition finale des déchets solides de façon sécuritaire en minimisant les impacts sur l'environnement. Le site d'enfouissement de la décharge contrôlée de Fès est subdivisé en trois casiers. Actuellement, le premier casier est exploité car les deux casiers 2 et 3 sont déjà utilisés et ils ont atteint 40 mètres de hauteur des déchets enfouis durant les 11 ans de fonctionnement. Le déchargement se fait d'une manière horizontale, avec une profondeur de 3 à 4 mètres, sur tout le casier et puis une autre couche se refait et remonte jusqu'à atteindre une hauteur prescrite.

Des tractopelles compactent ensuite les déchets mélangés pour diminuer leurs volumes et favoriser la

fermentation des matières organiques qu'ils contiennent, en chassant l'air. L'enfouissement des déchets se fait à l'aide des argiles qui sert à couvrir et compacter les déchets.

Sous les déchets, se trouvent les réseaux de collecte des lixiviats et biogaz. Ces réseaux sont installés après chaque trois couches, chaque couche est de 4 mètres de hauteur donc les réseaux sont installés tous les 12 mètres. Les 40 mètres de hauteur atteintes, depuis le premier jour de fonctionnement du site jusqu'à maintenant, les trois réseaux de collecte ont été installés, chaque réseau est commun pour les trois casiers.

Le réseau de collecte des lixiviats et biogaz est installé sous forme d'une colonne vertébrale et ses vertèbres (figure 33) tel que :

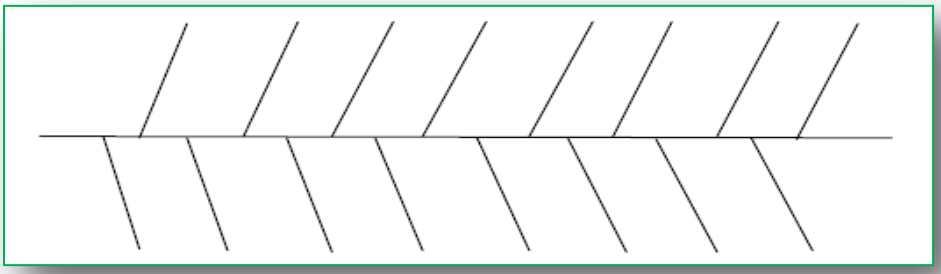


Figure 32: Réseaux de collecte du biogaz et de lixiviat.

Le collecteur au milieu est un collecteur central et principal dont les deux tiers sont occupés par le biogaz et le un tiers restant est occupé par les lixiviats et donc ils sont conduits directement vers les bassins. Pendant l'installation du réseau de collecte des lixiviats et biogaz, le collecteur principal est installé avec une pente de 2,5% pour aider les lixiviats à s'écouler vers leurs bassins. Le collecteur central est soudé avec d'autres collecteurs qui sont sous formes de vertèbres, de diamètres plus petits que celui du collecteur principal, parallèles entre eux et espacés de 17 mètres l'un de l'autre. De chaque côté du collecteur montent huit vertèbres contenant du biogaz et qui finissent leurs chemins au niveau des têtes des puits.

3 .Tête de puits

Pour contrôler l'état du biogaz dans chaque vertèbre, l'électromécanicien fait visiter chaque tête de puits pour mesurer le pourcentage des composantes du biogaz tel que le méthane, le dioxyde de carbone, l'azote (toujours inférieur à 1%) et l'oxygène dans chaque vertèbre à l'aide d'un appareil qui permet aussi de mesurer la pression.



Figure 33: Tête de puits

4. Bassins de stockage des lixiviats

La décharge contrôlée de Fès reçoit deux types de déchets:

- les déchets sans chrome ;
- les déchets avec chrome: déchets de tannerie.

Les deux types de déchets ne sont pas mélangés, mais plutôt chacun à son site et ses bassins de lixiviats particuliers. Les lixiviats des déchets sans chrome sont stockés dans quatre bassins qui ont presque la même surface, chacun est de 2000 m^2 de surface et de 2,7 m de profondeur. Ces lixiviats sont conduits par le collecteur principal au premier bassin. Ce dernier est connecté au deuxième bassin et les lixiviats du premier sont poussés vers le deuxième à travers le connecteur puis du deuxième au troisième jusqu'à arriver au quatrième.

Chaque jour la décharge contrôlée de Fès produit environ **21,6** m^3 des lixiviats. Au cours de ces dernières années, les bassins commencent à se remplir et par conséquence les lixiviats sont transportés à quelques mètres des bassins pour les vider un peu et laisser la place pour les nouveaux lixiviats conduits aux bassins, puisque la zone est argileuse le fait de transporter et verser quelques quantités de lixiviats à quelques mètres des bassins ne cause pas un problème.

5. Station de combustion et de valorisation du biogaz

Le biogaz monte du site d'enfouissement dans des tubes de polyéthylène jusqu'à arriver à la station, où à son entrée se trouve une tête de puits qui indique à l'aide du GEM le pourcentage du méthane dans le biogaz, venant du site d'enfouissement puis à quelques pas se trouve le débitmètre appelé débitmètre d'entrée qui indique le débit du biogaz venant du site d'enfouissement, il est appelé aussi débitmètre général parce qu'il indique le débit général du biogaz entrant aux deux types d'appareil : torchère et générateur.

5.1. Torchère

Le mécanisme utilisé pour brûler sur place le biogaz dégagé par les sites d'enfouissement est la torchère. C'est un système clos, n'émettant aucun gaz dans l'atmosphère. Dans ce dispositif thermique, les gaz sont soumis à une combustion totale et à une température maximale de 1000 °C.



Figure 34: La torchére

5.2. Générateur

Le générateur est le dispositif nécessaire pour la génération de l'électricité à partir du biogaz. Le générateur disponible présent est: le générateur de 1 MW.



Figure 35: Générateur de 1MW

Le tronc contenant le débitmètre général se divise en deux: un tronc allant vers la torchère et l'autre tronc vers le générateur :

Le tronc allant vers la torchère contient un filtre qui permet d'éliminer les particules d'eau qui se trouvent dans le biogaz, et pour contrôler la vitesse d'aspiration du moteur, il existe deux aspirateurs, dans ce cas, quand le moteur aspire le débit du biogaz souhaitable, l'aspiration est dite active. À côté des deux aspirateurs, se trouvent deux vannes manuelles, chaque aspirateur a sa propre vanne avec laquelle on lui donne la possibilité d'aspirer le biogaz ou non, si elle est ouverte, l'aspirateur peut aspirer le biogaz, mais si elle est fermée, l'aspirateur ne le peut pas. À quelques pas des deux aspirateurs se trouve une vanne électronique propre à la torchère, à travers laquelle on peut contrôler la quantité de biogaz passée à la torchère. Parfois, tout le biogaz passe à la torchère dans le cas où le moteur provoque un problème ou lorsqu'il faut changer la vidange. En dessous de la vanne se trouve le débitmètre qui indique le débit du biogaz qui va passer à la torchère. Entre la torchère et les deux aspirateurs se trouve l'analyseur qui représente le GEM fixe de la torchère puisqu'il indique le pourcentage de méthane contenu dans le biogaz entrant à la torchère qui peut atteindre de 60 % à 63 %.

L'autre tronc contient le biogaz allant vers le générateur. Le tronc a un débitmètre qui indique le débit (N/h) du biogaz allant vers le générateur.

Les figures ci-dessous représentent les différents variateurs et filtres ainsi que des analyseurs qui servent à mesurer la quantité de biogaz produits :



Figure 36: Filtre



Figure 37: Deux aspirateurs



Figure 38: Vannes et aspirateurs





Figure 39: Analyseurs

III. Matériels et Méthodes

1. Méthodologie

La décharge de Fès permet de produire d'électricité à partir des déchets des habitants de la ville et elle permet aussi de réduire les émissions de gaz à effet de serre par l'application d'un mécanisme de développement propre qui pour but d'élaborer une méthode de calcul adaptée à la décharge pour calculer les émissions réduites jusqu'à la fin de vie de la décharge qui est envisagés en 2045, c'est dans ce contexte s'articule notre étude de cas réalisé dans la société ECOMED.

1.1. Stratégie nationale du mécanisme de développement propre

Le mécanisme pour un développement propre a pour objectif d'encourager les pays en développement à investir dans la réduction des émissions de GES et de contribuer au développement durable, ce mécanisme établi dans le cadre du Protocole de Kyoto (PK) à la Convention Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC).

Les projets du MDP mis en œuvre dans les pays en développement devraient permettre d'obtenir des réductions d'émissions certifiées. Les pays industrialisés pourraient utiliser ce projet pour s'acquitter en partie de leur engagement à réduire à l'avenir leurs émissions conformément au Protocole de Kyoto. Le MDP représente pour les pays industrialisés une source de potentiel de crédits d'émissions, tandis que les pays en développement espèrent qu'il pourra attirer de nouveaux investissements qui peuvent contribuer à un développement plus rapide et plus durable. Le MDP a en outre attiré l'intérêt du secteur privé, tant dans les pays industrialisés que dans les pays en développement.

Le Maroc à renforcé sa politique nationale de développement durable pour participer à l'effort mondial d'atténuation des émissions en GES, c'est pour cette raison que le Maroc a investi dans le MDP, il a ratifié le protocole de Kyoto en 2002 et n'a ménagé aucun effort, lors de la septième Conférence des Parties (Marrakech Novembre 2001), pour que les textes d'application du PK et des mécanismes de flexibilité y afférents puissent être adoptés (Programme du Mécanisme de Développement Propre (MDP), 2016).



Figure 40: Principaux axes de MDP nationale

L'offre du Maroc en secteur pouvant recevoir des projets dans le cadre du MDP qui s'étalent sur tous les secteurs prévus dans le Protocole de Kyoto, avec une grande potentialité de développement pour chaque secteur :

- ➔ Les énergies renouvelables ;
- ➔ L'efficacité énergétique ;
- ➔ Le transport ;
- ➔ La gestion de déchets.

Dans notre cas nous intéressons à l'application du projet MDP dans le secteur de la gestion des déchets et précisément des déchets de la ville de Fès.

1.2. Description générale de l'activité du projet

L'objectif du projet est de maximiser le captage et la destruction des gaz d'enfouissement (GES) provenant du nouveau site d'enfouissement afin de réduire les impacts locaux des odeurs, des explosions et des risques d'incendie associés aux gaz d'enfouissement.

L'augmentation des émissions GES contribue au réchauffement planétaire et au changement climatique, ce projet est développé par le consortium Ecomed-Edgeboro.

Les activités du projet comprennent l'installation d'équipement d'extraction et de brûlage à la torche des gaz d'enfouissement, l'installation d'un dispositif d'évaporation des lixiviats pour le traitement et l'élimination des gaz d'enfouissement et l'installation d'équipement de production d'électricité sur place pour la production d'électricité à partir de gaz d'enfouissement. Chacune de ces activités implique la combustion du méthane contenu dans le gaz d'enfouissement et par conséquent, elles mèneront toutes à la réduction des émissions de gaz à effet de serre (CDM: Fes New Landfill Gas Recovery Reuse and Flaring Project, 2015).

1.3. Application d'une méthodologie de référence et de suivi

Cette méthodologie s'applique aux activités du projet de captage des gaz d'enfouissement, comme dans le cas de la décharge de Fès, où le scénario de référence est le rejet atmosphérique partiel ou total des gaz d'enfouissement et où les activités du projet comprennent des situations telles que :

a) Le gaz capturé est brûlé à la torche ; et/ou

b) Le gaz capté est utilisé pour produire de l'énergie (par exemple : électricité / énergie thermique) ;

c) Le gaz capté est utilisé pour alimenter les consommateurs par le réseau de distribution de gaz naturel.

L'activité du projet consiste à capter, à brûler le gaz et à produire de l'énergie pour évaporer le lixiviat dans le but de produire l'électricité pour que la commune de Fès puisse éclairer. Par conséquent, les situations a) et b) décrites ci-dessus ont été choisies pour la décharge de Fès.

Cette méthode de référence doit être utilisée conjointement avec la méthode de surveillance approuvée ACM0001/Ver 9 ("CDM: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities --- Version 9.0," 2009).

1.4. Méthode de calcul des émissions réduites

Selon ACM0001, version 9 : la réduction des émissions de gaz à effet de serre obtenue par l'activité de projet au cours d'une année "y" (ER y) est exprimée selon la formules suivante par :

$$ER\ y = (MD_{Project,\ y} - MD_{reg,\ y}) * GWP_{CH4} + EL_{LFG,\ y} * CEF_{elec,\ BL,\ y} - EL_{Pr} * CEF_{elec,\ pr,y} + EL_{LFG,y} * CEF_{ther,\ BL,y} - EL_{pr,y} * ET_{fuel,pr,y}$$

ERy : les émissions réduites en tonnes d'équivalent CO_2 (teq en CO_2).

MD project, y : Quantité de méthane qui serait détruite ou brûlée pendant l'année à la suite de la mise en œuvre du projet, en tonnes de méthane (tCH_4).

MD reg, y : Quantité de méthane qui aurait été détruite ou brûlée durant l'année en l'absence du projet, en tonnes de méthane (tCH_4).

GWP_{CH4} : Le potentiel de réchauffement planétaire du méthane pour la première période d'engagement est de 21 teq CO_2/t eq CH_4.

$EL_{LFG, y}$: Quantité nette d'électricité produite à partir de gaz de décharge qui, en l'absence de l'activité de projet, aurait été produite par des centrales électriques raccordées au réseau ou par une production captive d'électricité à partir de combustibles fossiles sur place ou hors site, pendant l'année y, en mégawattheures (MWh).

$CEF_{elec,BL,y}$: Intensité des émissions de CO_2 de la source de référence de l'électricité déplacée, en t eq CO_2/MWh.

$ET_{LFG, y}$: Quantité d'énergie thermique produite à partir du gaz d'enfouissement qui, en l'absence de l'activité de projet, aurait été produite à partir d'une chaudière alimentée aux combustibles fossiles sur place ou hors site, pendant l'année y, en TJ.

$CEF_{ther, BL, y}$: Intensité des émissions de CO_2 du combustible utilisé par la chaudière pour produire de l'énergie thermique qui est déplacée par la production d'énergie thermique à partir de gaz de décharge, en teqCO_2/TJ.

$EL_{PR, y}$: Quantité d'électricité produite dans une centrale électrique alimentée aux combustibles fossiles sur place ou importée du réseau à la suite de l'activité de projet, mesurée au moyen d'un compteur électrique (MWh).

$CEF_{elec, PR, y}$: Facteur d'émission de dioxyde de carbone pour la production d'électricité dans l'activité de projet (teqCO2/MWh).

$ET_{PR, y}$: Consommation de combustibles fossiles sur place pendant l'activité de projet de l'année y (tonne).

$EF_{fuel, PR y}$: facteur d'émission de CO_2 du combustible fossile utilisé par la chaudière pour produire de l'énergie thermique dans l'activité du projet pendant l'année y.

Puisque la société ne dispose pas de chaudière pour produire de l'énergie thermique donc les valeurs des paramètres $CEF_{ther, BL, y}$ et $EF_{fuel, PR\ y}$ sont nul et la relation devient :

(1)$ER\ y = (MD_{Project, y} - MD_{reg, y}) * GWP_{CH4} + EL_{LFG, y} * CEF_{elec, BL, y} - EL_{Pr} * CEF_{elec, pr,y}$

2. Matériels

Les différents analyseurs installés dans la décharge permettent de mesurer des valeurs qui sert à calculer les émissions de CO_2.

IV. Résultats et discussions

1. Réduction des émissions dans les décharges

La croissance de la population mondiale, l'urbanisation et les changements de mode de vie social entraînent la production d'une grande quantité de déchets solides municipaux (DSM) (Asase et al., 2009). (Behrooznia et al., 2018) ont montré qu'une mauvaise gestion des déchets solides municipaux entrainent des risques pour la santé, d'où l'importance de la mise en place d'une décharge a été principalement utilisée pour gérer les déchets solides municipaux dans les différents pays.

En effet, l'absence d'un système de récupération d'énergie ou de contrôle des émissions des déchets solides municipaux provoque plusieurs problèmes de la santé publique. Ces problèmes entrainent une augmentation des émissions GES et une contamination des eaux souterraines (Tan et al., 2014).

Actuellement, la gestion des déchets solides municipaux est connue sous le nom de grand défi pour les autorités locales et les urbanistes municipaux en raison de l'industrialisation, de la population et de l'urbanisation (Khan et al., 2016). Pour cette raison, les gouvernements et les citoyens ont tenté d'élaborer des stratégies de gestion plus durables et plus propres des déchets municipaux (Assamoi and Lawryshyn, 2012).

Le méthane dans les décharges a été toujours la source la plus importante des émissions de GES dans le secteur des déchets (Vadillo et al., 2005). L'estimation des émissions mondiales des sites d'enfouissement est d'environ 500 à 800 Mt éq CO_2 par an (Bogner et al., 2008; Monni et al., 2006). Au cours des 20 dernières années, le taux de croissance des émissions de méthane des sites d'enfouissement a été augmenté. Cependant, le nombre des décharges à l'échelle mondiale est en augmentation (Scheehle and Kruger, 2006).

En effet, les émissions des sites d'enfouissement sont plus élevées. Une estimation de 4000 Mt d'éqCO_2 par an pour l'année 2050 a été envisagé par (Bogner et al., 2008). Toutefois, une grande incertitude subsiste quant à l'avenir une augmentation de 20 % lors de l'estimation des émissions de méthane provenant des sites d'enfouissement, car cette valeur dépend fortement des conditions environnementales (Börjesson et al., 2009; Scheutz et al., 2011).

En Espagne, le secteur des déchets ne représente que 5 % des émissions totales, seulement 12 % des émissions de déchets sont constituées de méthane par contre les émissions de CO_2 représentent 78 %. En 2016, les émissions de méthane provenant des déchets mis en décharge en Espagne ont été estimées à 14 Mt d'éq CO_2 d'où la nécessité de trouver des solutions innovantes afin de réduire ces émissions.

(Haro et al., 2019) ont constaté que l'urbanisation rapide, le taux de croissance de la population ont conduit à une augmentation significative de la production de déchets solides municipaux dans les sous-pays du Sahara, dont le Burkina Faso, au cours des dernières décennies et leur gestion est donc devenue un problème majeur en raison de la mauvaise gestion des déchets. Actuellement, la décharge reste la principale option pour le traitement des déchets solides municipaux et autres déchets non dangereux (Lee et al., 2017; Manfredi et al., 2009; Staub et al., 2011). La décharge est un processus dans lequel les déchets sont éliminés et compactés. Cela donne lieu à la production de gaz d'enfouissement en raison des processus physiques, chimiques et microbiens qui se produisent dans les déchets solides. La dégradation microbienne anaérobie associée de la fraction organique dans les déchets mis en décharge et qui génère un mélange de centaines de gaz différents.

2. Données nécessaires pour le calcul des émissions

Pour calculer les émissions réduites de chaque année, plusieurs données ont été fournies par la société ECOMED.

La méthodologie de référence appliquée dans la décharge offre plusieurs façons de déterminer MDreg. L'une des options est l'utilisation d'un "facteur d'ajustement" (AF) qui doit être utilisé et justifié, en tenant compte du contexte du projet.

$$\mathbf{MD_{reg,y} = MD_{project,y} \times AF \quad (AF = 3\%)} \qquad (2)$$

Le calcul de MD project s'effectue selon la relation suivante, puisque la décharge ne produit pas d'énergie thermique donc MD $_{ther}$ est nul :

$$\mathbf{MD}_{\boldsymbol{project,y}} = \boldsymbol{MD_{flared,y}} + \boldsymbol{MD_{elec,y}} + \boldsymbol{MD_{ther,y}} \quad (\mathbf{3})$$

MD flared,y : est la quantité de méthane détruite par le brûlage à la torche.

MD elect,y : est la quantité de méthane détruite par la production d'électricité.

MD therm,y : est la quantité de méthane détruite pour la production d'énergie thermique.

Ensuite, la méthodologie dit : "Le côté droit de l'équation (3) est la somme de tous les points d'utilisation du méthane capturé dans le cas où le méthane est brûlé à plus d'une torche, et/ou utilisé dans plus d'une source de production d'électricité, et/ou plus d'un générateur d'énergie thermique. L'alimentation de chaque point de destruction du méthane, par brûlage à la torche ou utilisation pour la production d'énergie, doit être mesurée séparément."

Nous devons donc déterminer le méthane détruit par la torche, le méthane détruit dans la production d'électricité.

Le calcul de MD_{flared} :

$$\boldsymbol{MD_{flared}} = \left(\boldsymbol{LFG_{flared,y}} * \boldsymbol{w_{CH4,y}} * \boldsymbol{D_{CH_4}}\right) - \left(\frac{\boldsymbol{PE_{flared,y}}}{\boldsymbol{GWP_{CH_4}}}\right) \quad (\mathbf{4})$$

Afin de déterminer la quantité de méthane brulé dans la torche au cours d'une année, nous devons calculer la masse de méthane au cours de l'année. Étant donné que la fraction de méthane du gaz d'enfouissement et la densité du gaz changent généralement avec le temps, une formule plus précise pour le méthane détruit par la torche est :

$$PE_{flared,y} = \sum_{h=1}^{8760} TM_{RG,h} * \left(1 - \eta_{flare,y}\right) * \frac{GWP_{CH_4}}{1000} \quad (4a)$$

$\eta_{\text{flared,y}} = 0{,}9$ (Efficacité de la torche en heure)

Une fois les émissions $PE_{\text{flared,y}}$ est calculé, on calcule par la suite MD_{elec} :

$$\boldsymbol{MD_{elec}} = \boldsymbol{LFG_{elec,y}} * \boldsymbol{w_{CH_4,y}} * \boldsymbol{D_{CH_4}} \quad (\mathbf{5})$$

MD elect,y : quantité de méthane détruite par la production d'électricité (tCH4/an)

LFGelect,y : quantité de gaz d'enfouissement injectée dans le générateur d'électricité (m3/an)

WCH_4,y : fraction moyenne de méthane du gaz de décharge telle que mesurée au cours de l'année (m^3 CH4 /m^3LFG) ($w_{CH4,y} = 50\%$).

D_{CH4} : densité du méthane dans des conditions normales (tCH4/m3 CH4)

La quantité de méthane détruite par la production d'électricité dans une année est :

$$MD_{elec,y} = \sum_{h=1}^{8760} \left(LFG_{elec,h} * w_{CH\ 4,h} * D_{CH_4} \right) \quad (5a)$$

Le calcul de MD_{Total} s'effectue selon la relation suivante :

$$\boldsymbol{MD_{total,y} = \sum_{h=1}^{8760} \left(LFG_{total,h} * w_{CH_{4,h}} * D_{CH_4} \right)} \quad \boldsymbol{(6)}$$

La prise en compte de toutes les relations citées, la relation (1) devient :

$$\boldsymbol{ER_y = \left(MD_{project,y}(1 - AF)\right) GWP_{CH4} + EL_{LFG,y} * CEF_{elec,BL,y} - EL_{pr} * CEF_{elec,Pr,y}}$$

Les Constantes fixes par la société sont :

$$CEF_{elec,BL,y} = 0{,}75 \quad ; \quad CEF_{elec,pr} = 0{,}75 \; ; \quad GWP_{CH4} = 21$$

3. Résultats et discussions

La méthode de calcul développée par CDM vise à estimer les émissions qui peuvent être réduites dans cette décharge, le tableau 13 ci-dessous montre l'évolution de la production du biogaz en fonction des années, des émissions réduites, des puissances installées et les moteurs ajoutés.

L'étude de cas a été commencée dès l'année 2017 selon les données disponibles dans la société qui exploite cette décharge, la durée de vie de cette décharge est de 45 ans, pour l'année 2017 les émissions réduites de CO_2 ont été estimées à la valeur 40833 teq CO_2/an, cette valeur augmente jusqu'à la fin de la décharge ou les émissions atteindra 204029 teq CO_2/an.

L'installation des moteurs est nécessaire car la quantité de production de biogaz augmente, ceci traduit par l'élévation de la puissance installée.

Le tableau 14 permet de montrer l'importance de la production du biogaz dans l'éclairage public de la ville de Fès.

Tableau 14: Variation des différents paramètres en fonction des années

Année	Production de biogaz (m3/an)	Puissance installé (MW)	Nombre de Moteur installé	% de l'éclairage public	Emissions réduites (teq CO_2/an)
2017	8258751	1 MW	1	31%	40833
2018	8690138	1 MW	1	31%	42680
2019	9104610	1 MW	1	31%	41261
2024	10945570	2 MW	2	62%	83881
2029	12452821	3 MW	3	92%	125826
2035	13905402	4 MW	4	100%	167771
2040	14876127	5 MW	5	100%	204029

L'installation du troisième moteur dans l'année 2029 serait nécessaire afin d'avoir des réductions de 125826 teq CO_2/an, cette valeur résulte d'un pourcentage de 92% de l'éclairage public.A partir de cette année les déchets de la commune de Fès peuvent éclairer 100% de la ville et avec une puissance installée de 5MW.

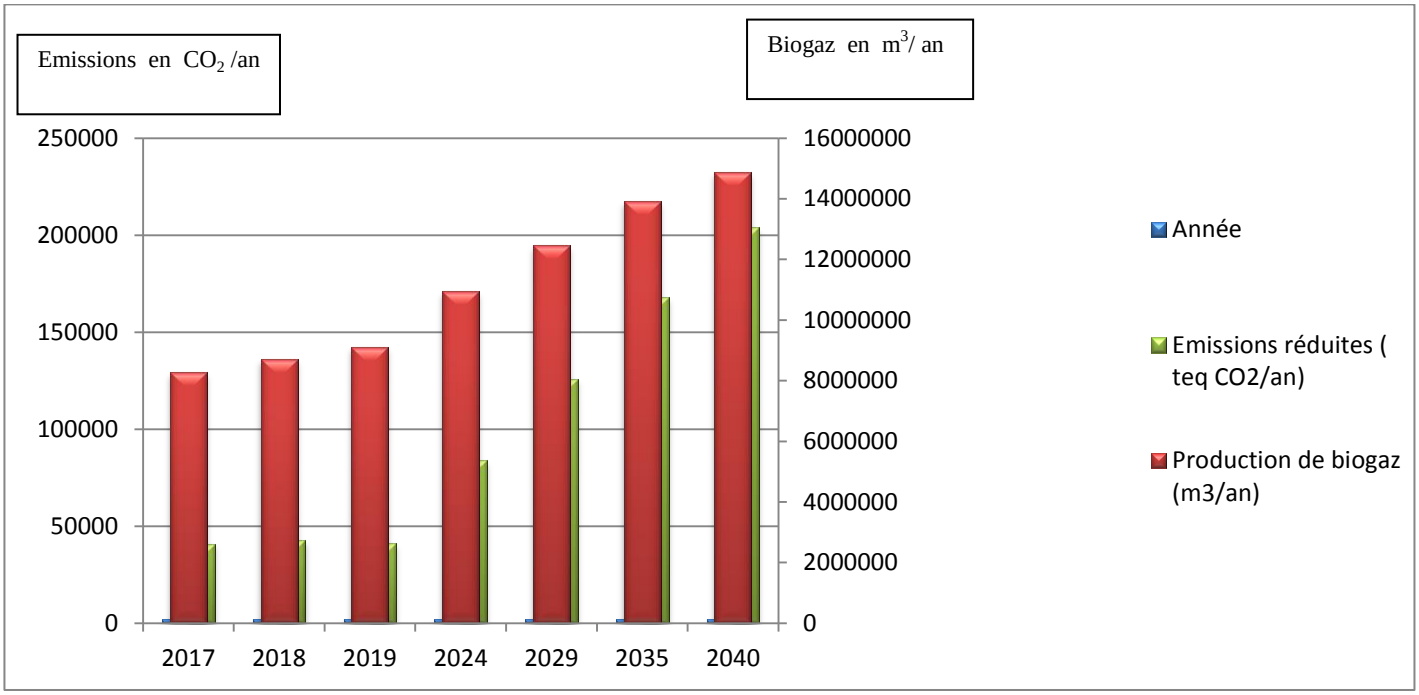


Figure 41: Variation des émissions réduites en fonction des années et de la production de biogaz

Conclusion

La décharge contrôlée de Fès est la première au Maroc. Ce projet a contribué à l'amélioration de la gestion des déchets dans le site d'enfouissement tout en convertissant le biogaz en énergie électrique grâce à une centrale électrique installée dans l'entreprise. Ce projet a fait de Fès une ville pionnière

dans le domaine du développement durable au Maroc et en Afrique, grâce à l'utilisation d'énergies propres et renouvelables issues de ses déchets pour l'éclairage.

D'où la nécessité de recycler ces déchets d'une part et de réduire d'autre part les émissions de CO_2 émises par cette décharge qui peut poser un problème majeur de pollution de l'air pour la ville, d'où la nécessité de réduire ces émissions en CO_2. La décharge est l'une des plus importantes sources d'émissions de gaz à effet de serre (GES) car elle produit de grandes volumes de gaz d'enfouissement (GES : principalement du CH_4 et du CO_2) pendant la décomposition des déchets solides biodégradables.

Le CO_2 est l'un des gaz dégagé par la décharge, c'est pour cette raison l'objectif de cette étude de cas réalisée dans cette décharge était le développement d'une méthode de calcul adaptée à la société dans le but d'estimer les émissions réduites en CO_2 jusqu'à la fin de la vie de cette décharge (2045), cette estimation est de 204029 teq CO_2/an avec une puissance installée de 5MW et un pourcentage d'éclairage public de 100%.

Chapitre VI: Réduction des émissions NOx : Cas de Lafarge-Holcim

Introduction

La société HOLCIM, parmi les grands producteurs mondiaux de ciment, veille constamment à garder ce statut par l'adoption d'une politique de travail qui vise à assurer la sécurité du personnel au sein de l'usine, ainsi que l'organisation du travail et ceci pour fabriquer des produits de meilleure qualité.

Parmi les grands défis que connait la cimenterie, ce sont les émissions de GES et surtout NOx. Plusieurs techniques et traitements ont été proposés pour réduire ces émissions, tout en prenant en considération le rapport << Coût-efficacité >>.

L'objectif de cette étude de cas est de proposer une technique adaptée aux besoins de la société pour réduire les émissions de NOx.

I. Présentation de la société HOLCIM

1. HOLCIM Maroc

HOLCIM peut produire 4,5 millions de tonnes/ an. D'origine suisse, le groupe est fondé en 1912 et son siège central se trouve à Zurich. Aujourd'hui, il est présent sur les 5 continents. Sa présence témoigne de la stratégie mondiale la plus diversifiée de l'industrie du ciment.

1.1. Cimenterie HOLCIM de Fès

C'est une usine qui a été mise en service en 1990 et rénovée en 2012, elle s'étend sur 230 hectares et se situe à 25 Km au sud de Fès.



Figure 42: Cimenterie de Fès Ras El Ma.

Elle utilise le procédé de fabrication à voie sèche intégrale. Cette unité est construite selon les technologies les plus récentes dans le domaine de l'industrie de ciment. Le site a été choisi en tenant compte de plusieurs critères :

- ✓ La disponibilité des matières premières en quantité et qualité ;
- ✓ La possibilité d'alimentation en eau et en énergie électrique ;
- ✓ La qualité des terrains de point de vue fondation et écoulement de la production et l'approvisionnement de la cimenterie ;
- ✓ Accès à la route et au chemin de fer.

1.2. Domaines d'activités de l'entreprise

1.2.1. Missions

Elle a pour but d'apporter au marché des produits et des solutions reconnues, performantes et durables accompagnant le développement économique et social du Maroc dans les filières du BTP.

1.2.2. Vision

Elle veille d'être le promoteur du professionnalisme des filières BTP et du développement durable au Maroc.

1.2.3. Produits

L'entreprise offre trois types de ciments qui s'adaptent aux besoins des clients, elle assure un service de transport adapté et respecte les délais de livraison. Les trois produits sont alors:

- Cpj35 : Ciment portland composé avec ajouts
- Cpj45 : Ciment portland composé avec ajouts
- CPJ 55 : Ciment portland artificiel

1.3. Fusion Lafarge-Holcim

Le 7 Avril 2014, Holcim et Lafarge (groupe français de matériaux de construction) ont annoncé leur intention de procéder au rapprochement des deux sociétés dans le cadre d'une fusion qui par la suite est officiellement lancée le 15 juillet 2015 sous le nom de LafargeHolcim.

Suite à la fusion, le groupe LafargeHolcim deviendra un leader mondial avec une forte présence dans toutes les régions et les principaux pays du monde, au service des besoins des clients. Le groupe

deviendra un partenaire privilégié dans le secteur du bâtiment et des infrastructures, à l'écoute des consommateurs tout le long de la chaîne logistique.

Pour réaliser son ambition stratégique, le groupe combiné a identifié trois éléments fondamentaux : les personnes, l'intégrité ainsi que la santé et la sécurité.

Suite à la fusion, le groupe bénéficiera d'un portefeuille large et diversifié de produits et services de matériaux de construction répondant aux principaux besoins tant dans les marchés émergents que dans les marchés développés. Ce portefeuille, ajouté à la large implantation géographique de Lafarge Holcim, sa forte capacité d'innovation, son approche centrée sur le client et l'étendue de son activité, place le groupe dans une position favorable pour une croissance rentable.

II. Procédé de fabrication du ciment

Le procédé de fabrication du ciment se résume en 4 étapes principales

1. Préparation de la matière première

1.1. Carrière

Les matières premières sont en général le calcaire qui se trouve au sein de l'usine et le schiste qui est importé. Le calcaire est abattu à l'explosif et acheminé par dumper vers le hall de concassage, l'oxyde Fer et le sable sont aussi des matières premières importées de l'extérieur qui seront utilisées pour le dosage.

1.2. Concasseur

Les matériaux sont réduits à une taille maximum de 80mm par un concasseur comportant deux moteurs à rotor bobinés qui tournent en sens opposé, la roche est ensuite échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (Sable, Schiste, Oxyde de Fer) et arriver ainsi à la composition chimique idéale. Après avoir mélangé les différentes matières premières, on forme ainsi ce que l'on appelle le tas de mélange. Ce dernier est ensuite stocké par l'intermédiaire du stocker dans un hall de pré homogénéisation. La reprise de la matière vers l'alimentation du broyeur se fait par le gratteur.

1.3. Transport de la matière première

Le transport de la matière à l'intérieur de l'usine se fait par un transporteur à bande.

2. Homogénéisation et broyage cru

2.1. Pré-homogénéisation

La pré-homogénéisation des matières premières est une opération qui consiste à assurer une composition chimique adéquate, des échantillons sont prélevés régulièrement pour être analysés dans le laboratoire du l'usine. Le résultat de ces analyses permet de définir les corrections nécessaires à apporter au mélange des matières premières.

2.2. Broyage du cru

Le broyage cru se fait par un broyeur qui est composé de deux balanciers contenant deux pairs de galets, ce dernier permet d'obtenir de la farine qui va être stockée dans des silos d'homogénéisation. La farine sera ensuite introduite dans le four sous forme pulvérulente ou préalablement transformée en granules.

3. Production du clinker

3.1. Préchauffage

Le préchauffage permet essentiellement de préparer la farine du point de vue chimique et thermique. Cette opération consiste à sécher, déshydrater et décarbonater la matière crue en réutilisant une partie de l'énergie calorifique évacuée par les gaz d'exhaure du four. La farine est chauffée à environ 800 °C dans un préchauffeur à grille ou à cyclones

3.2. Cuisson

La cuisson se fait dans un four rotatif où la température de la flamme avoisine 1450°C. Le combustible utilisé est le PETCOKE en marche normale et le gasoil au moment de chauffe. A la sortie du four, la matière appelée clinker passe dans un refroidisseur.

3.3. Refroidisseur

Le refroidisseur dit à ballonnets est constitué de tubes montés en parallèle au four, son rôle consiste à garantir la trempe du clinker pour avoir une structure minéralogique et des dimensions de cristaux favorables. Les refroidisseurs permettent aussi de baisser la température du clinker pour faciliter la manutention et le stockage.

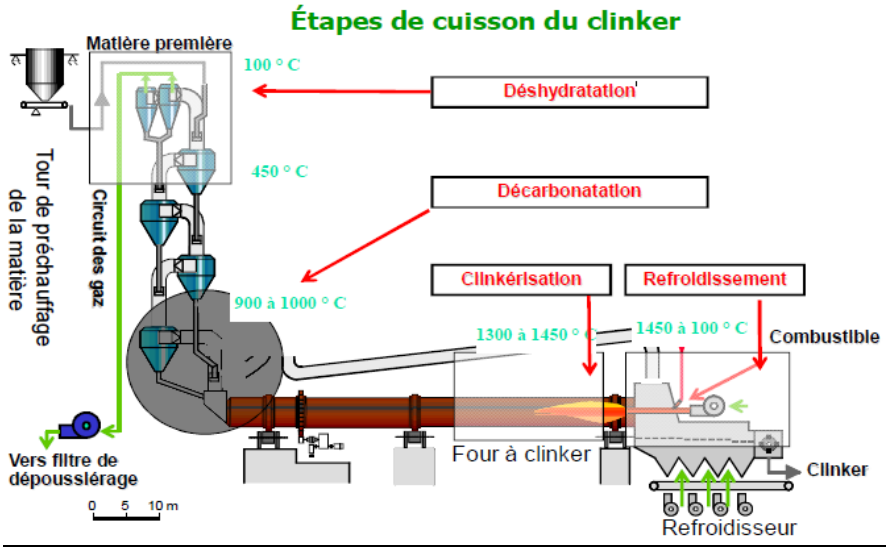


Figure 43: Cuisson Clinker

4. Broyage du ciment et expédition

4.1. Silos à clinker

Le clinker issu du four est stocké dans des silos qui d'une part, confèrent à l'atelier de broyage ciment (étape suivante) une autonomie de marche en cas d'arrêt intempestif du four et d'autre part, prémunissent le clinker d'une dégradation physico-chimique que causerait un stockage prolongé à l'air libre.

4.2. Broyage du ciment

L'atelier du broyage ciment est alimenté en clinker, gypse, calcaire et pouzzolane parfois à partir de silos de stockage de ces matières, par un ensemble de doseurs et transporteuses à bande. Le clinker et les ajouts, qui sont des matériaux grossiers par rapport à la granulométrie du ciment, sont introduits au niveau du broyeur dans des proportions prédéfinies pour subir des efforts mécaniques du broyage et produire ainsi le ciment qui est d'une finesse inférieur à 40 microns. L'atelier de broyage comprend le broyeur qui est constitué de deux pairs de galets à suspension flottante (deux galets masters et deux galets esclaves), le séparateur (qui sélectionne les particules selon leur grosseur), le dépoussiéreur du broyeur et accessoirement la presse à rouleaux



Figure 44: Broyeur du ciment de la société Holcim-Fès

4.3. Ensachage et expédition

- L'ensachage du ciment se fait par fluidisation à l'aide de suppresseurs au niveau des silos de stockage. Le ciment est ensuite transporté par des aéroglisseurs et des élévateurs à godets puis passe par des cribles pour l'élimination des corps étrangers. L'installation d'ensachage comporte trois ensacheuses automatique

- L'expédition des différents types de ciment se fait en sacs de 50 Kg et en vrac soit par route soit par voie ferrée. Le chargement des camions en sacs se fait automatiquement par la caricamat et celui des wagons est assuré par des chargeurs de wagons. L'expédition du ciment en vrac par camion ou wagons citernes se fait directement à partir des silos de stockages

La figure ci-dessous résume les 4 étapes de fabrication de ciment déjà citées.



Figure 45: Etapes Fabrication ciment

On peut résumer tout le processus de fabrication dans la figure suivante :

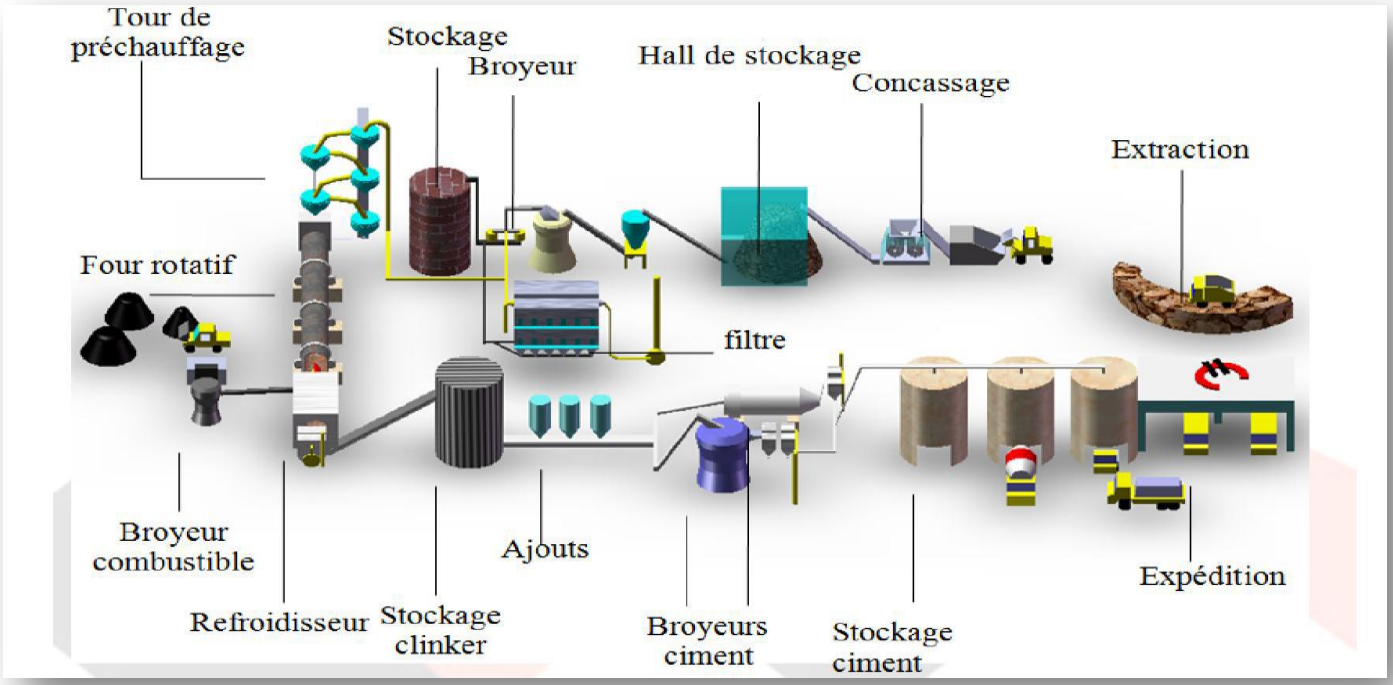


Figure 46: Processus de fabrication du ciment

III. Matériels et Méthodes

1. Méthodologie

1.1. Différents oxydes d'azotes

Les oxydes d'azote sont un groupe de sept gaz et composés d'azote et d'oxygène, parfois appelés collectivement gaz NOx. Les deux oxydes d'azote les plus courants et les plus dangereux sont l'oxyde nitrique et le dioxyde d'azote. L'oxyde nitreux, communément appelé gaz hilarant, est un gaz à effet de serre qui contribue au réchauffement climatique. La pollution par les oxydes d'azote provient des gaz d'échappement des véhicules et de la combustion du charbon, du mazout, du carburant diesel et du gaz naturel, en particulier des centrales électriques. Ils sont également émis par les cigarettes, les cuisinières à gaz, les appareils de chauffage au kérosène, la combustion du bois et les silos qui contiennent de l'ensilage.

Les oxydes d'azote peuvent créer des risques pour la santé environnementale lorsqu'ils réagissent avec la lumière du soleil et d'autres produits chimiques pour former le smog. Les oxydes d'azote et le dioxyde de soufre réagissent avec les substances présentes dans l'atmosphère pour former des pluies acides

Le dioxyde d'azote est utilisé pour produire des combustibles pour fusées et des explosifs. L'oxyde nitreux est émis lors des activités agricoles et industrielles, ainsi que lors de la combustion de combustibles fossiles et de déchets solides. De plus, il est utilisé comme anesthésique.

1.2. Mécanisme de formations des émissions NOx

L'azote peut se combiner avec l'oxygène à plus ou moins haute température pour former le monoxyde d'azote. Cependant, ces réactions sont dépendantes des énergies de liaison des molécules qui constitueront la source d'azote. L'énergie de liaison de l'atome d'azote dans la molécule N_2 (environ 950 kJ/mol) est plus élevée que dans les molécules azotées organiques présentes dans les huiles lourdes résiduelles et dans le charbon que l'on désigne sous le nom « d'azote du combustible » (ou « fuel-N »).

En effet, les valeurs approximatives des liaisons C≡N et C=N ne sont respectivement que de 770 et 615 kJ/mol, les liaisons C–N et H–N étant encore plus faibles (260 à 460 kJ/mol). Nous distinguerons donc deux groupes de réactifs azotés : d'une part le N_2 de l'atmosphère, d'autre part les espèces azotées du combustible que l'on désignera par le nom « fuel-N ».

Le milieu réactionnel se divise en deux zones distinctes dans la flamme : la zone de front de flamme (caractérisée par la présence de radicaux hydrocarbonés CX, X étant n'importe quel atome ou groupe d'atome, à l'exception de N) et la zone des produits de combustion. La figure ci-dessous permet de résumer le mécanisme de formation des émissions NOx.

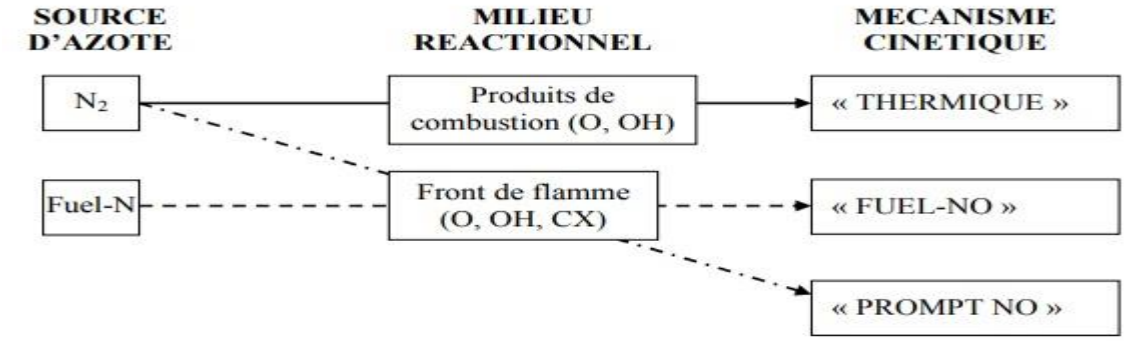


Figure 47: Mécanisme de formation de NOx

1.3. Sources d'émission de NOx

Les oxydes d'azote proviennent essentiellement de procédés fonctionnant à haute température. Dans l'industrie, il s'agit des installations de combustion pour tout type de combustible (combustibles

liquides fossiles, charbon, gaz naturel, biomasses, gaz de procédés...) et de procédés industriels (fabrication de verre, métaux, ciment...).
Les principales sources d'émission de NOx sont :

- le transport routier ;
- les secteurs de l'industrie et de la production d'énergie.

Les mesures prises depuis 2000 pour réduire les émissions dues au transport routier et aux installations fixes ont été efficaces. Cependant, des efforts supplémentaires seront nécessaires pour que la majorité des industries respecte ses engagements dans la réduction des émissions de NOx.

1.4. Effets négatifs des oxydes d'azote

1.4.1. Impacts des NOx sur la santé

Le NO_2 est un gaz irritant, qui pénètre dans les ramifications les plus fines des voies respiratoires. Il peut provoquer des difficultés respiratoires ou une hyperréactivité bronchique chez les personnes sensibles et favoriser l'accroissement de la sensibilité des bronches aux infections chez l'enfant. Le NO_2 est 40 fois plus toxique que le monoxyde de carbone (CO) et quatre fois plus toxique que le NO.

1.4.2. Impacts des NOx sur l'environnement

Associés aux composés organiques volatils (COV) et sous l'effet du rayonnement solaire, les oxydes d'azote favorisent la formation d'ozone dans les basses couches de l'atmosphère (troposphère). En France, des dépassements des normes sanitaires dans l'air ambiant persistent, mais sont moins nombreux que par le passé. Les NOx contribuent aussi à la formation des retombées acides et à l'eutrophisation des écosystèmes. Les oxydes d'azote jouent enfin un rôle dans la formation de particules fines dans l'air ambiant.

1.5. Techniques de traitement pour réduire les émissions de NOx

1.5.1. Les principes

La réduction à la source peut reposer sur plusieurs principes – dont celui de la combustion étagée (étagement de l'air de combustion, étagement du combustible) et de la recirculation des gaz de combustion – qui peuvent être appliqués au niveau des brûleurs (brûleurs bas NO_x) et/ou du procédé. L'efficacité des brûleurs bas NO_x de seconde génération peut, par exemple, atteindre de 40 à 60 % selon les principes mis en œuvre, les combustibles considérés et les caractéristiques de l'installation. Ces performances peuvent toutefois être différentes avec des combustibles non commerciaux riches en

azote ou en hydrogène. Bien qu'efficace, la combustion étagée présente des inconvénients, comme la formation de monoxyde de carbone (CO) et d'imbrûlés solides, ou une consommation d'énergie significative dans le cas d'une recirculation externe des gaz de combustion.
La réduction à la source peut également être réalisée grâce à la combustion à basse température en lit fluidisé**,** dans le cas de combustibles solides. Le lit, constitué d'un matériau inerte ou désulfurant, assure un très bon transfert de chaleur et des températures homogènes. Avec cette technique, dont l'efficacité peut atteindre de 50 à 70 % par rapport à une chaudière à charbon pulvérisé classique, la température est de l'ordre de 850 à 950 ℃ et les émissions de NO_x sont moins importantes.

1.5.2. Technologies émergentes

De la vérification de concepts à l'échelle « laboratoire » aux essais à l'échelle « pilotes de terrain », de nombreux travaux de recherche sont actuellement menés afin de répondre aux exigences continues de réduction des émissions de NOx du secteur industriel. Ils portent notamment sur :

- **Le procédé d'oxycombustion** qui consiste à remplacer l'air comburant par de l'oxygène de grande pureté pour diminuer nettement le volume des fumées. Cette technologie permet non seulement de réduire les émissions de NOx thermiques, mais aussi de concentrer le CO_2, ce qui facilite son captage et son stockage éventuels ;
- **Le procédé de combustion sans flamme** qui consiste à diluer fortement comburant et combustible. Les géométries du brûleur et de la chambre de combustion créent des recirculations des produits de combustion vers le brûleur, diluant ainsi le comburant et le combustible avec ces produits de combustion. La combustion devient alors homogène dans un volume donné de l'enceinte. Par conséquent, le taux d'oxygène et les pics de températures diminuent dans la zone réactionnelle, réduisant ainsi la formation de NOx.

1.5.3. Techniques de traitement

Différentes techniques de traitement peuvent être mises en œuvre pour réduire les émissions de NO_x.
Elles consistent en la réduction de monoxyde d'azote (NO) et dioxyde d'azote (NO_2) en présence d'oxygène, pour produire de la vapeur d'eau et du diazote gazeux. Les agents réducteurs utilisés sont principalement l'ammoniac (NH_3) ou l'urée ($CO(NH_2)_2$). La réduction peut se faire à deux niveaux de température : autour de 950 ℃ sans catalyseur par réduction non catalytique (SNCR), ou autour de 300 ℃ avec catalyseur par réduction catalytique sélective (SCR).

1.5.3.1. Réduction catalytique sélective (SCR)

De l'urée ou de l'ammoniac, précurseur de NHi, est injecté dans les fumées en amont du réacteur SCR où se trouve le catalyseur. L'agent de réduction est d'abord vaporisé, puis mélangé à l'air avant d'être

injecté dans les fumées**.** Les NO_x sont ensuite réduits par le réactif injecté pour former du diazote (N_2) et de l'eau (H_2O).

1.5.3.2. Réduction sélective non catalytique (SNCR)

Cette mesure secondaire permet de réduire les $N0_x$ formés lors de la combustion. Son principe est comparable à celui de la SCR, à la différence qu'il n'utilise pas de catalyseur. Un agent réducteur (généralement urée ou ammoniac) est injecté dans les fumées de combustion. La réaction, qui a lieu à haute température (850 à 1 100 °C), a pour effet de réduire les NO_x précédemment formés en N_2 et en H_2O.

Les performances de dénitrification de la technologie SNCR sont généralement moins élevées que celles de la technologie SCR, mais cette dernière présente des effets croisés plus importants : sensibilité du catalyseur à certains inhibiteurs, encombrement du réacteur, ou encore coût d'investissement. Les deux technologies présentent également l'inconvénient de générer des émissions de NH_3, de l'ordre de quelques mg/m^3.

1.5.4. Technique de recombustion ou reburning

Elle consiste en la réduction de NO à l'aide d'hydrocarbures en milieu légèrement oxydant et tient compte des paramètres suivants :

- La nature du combustible secondaire ;
- La température de la zone de recombustion ;
- La concentration en O_2 en zone de recombustion ;
- L'homogénéité du mélange fumées/combustible secondaire ;
- La concentration initiale en NO ;
- Le temps de séjour dans la zone de recombustion.

Le rendement de dénitrification peut dépasser 50 %, en fonction de la quantité d'hydrocarbures qu'il est possible d'injecter sans augmenter les imbrûlés. La technique de recombustion entraine une surconsommation potentielle de combustible secondaire et la génération d'émissions de cyanure d'hydrogène (HCN) ou de NH_3

IV. Résultats et discussions

1. Variation des émissions de NOx

Plusieurs études ont été élaborées dans le but de réduire les émissions de NOx dans les différentes industries, la valeur de ces émissions diffère d'un site à un autre ainsi que la méthode de traitement et la technique utilisée, c'est dans ce contexte que s'articulent les objectifs de cette partie.

(Farcy et al., 2016) ont proposé une stratégie visant à effectuer des simulations de la réduction sélective non catalytique (SNCR) des oxydes d'azote par l'ammoniac. Le processus de conversion du NO par l'ammoniac est connu car ce dernier est très sensible au niveau de température. Le couplage complexe entre l'évaporation par pulvérisation, le mélange turbulent et la chimie ammoniac-azote est étudié numériquement. Tout d'abord, les problèmes canoniques d'écoulement sont abordés à la fois par des simulations quasi-directes et par de grandes simulations de tourbillons, afin de chercher les ingrédients clés qui doivent être inclus dans les simulations des systèmes industriels, dans le but de les optimiser. Deuxièmement, à partir de cette analyse préliminaire, une procédure de réduction par la méthode SNCR est proposée pour construire un modèle numérique dans le laboratoire. Dans cette version réduite, toutes les longueurs ont été réduites d'un facteur donné pour permettre d'effectuer des simulations instationnaires hautement résolues d'unités de réduction de NO présentant des géométries complexes, avec convection d'écoulement turbulente sur des longueurs supérieures à 10 m. En utilisant le calcul haute performance, les simulations instationnaires d'un système SNCR représentatif sont finalement présentées.

(Van Caneghem et al., 2016) ont constaté que dans la plupart des incinérateurs de déchets modernes, la réduction sélective non catalytique (SNCR) est appliquée pour éliminer les NOx des gaz de combustion et atteindre la valeur limite d'émission européenne (VLE) de 200 mg/Nm^3. Toutefois, si la VLE pour les NOx des incinérateurs de déchets devait être abaissée à 100 mg/Nm^3, par exemple, le SNCR, dont l'efficacité d'élimination des NOx est d'environ 50 %, ne suffirait pas pour atteindre la nouvelle VLE. Dans ce cas, la réduction catalytique sélective (SCR), avec une efficacité d'élimination des NOx allant jusqu'à 90 % en configuration arrière, pourrait être une alternative intéressante. Toutefois, du point de vue du cycle de vie, la production, la construction et le fonctionnement des équipements SCR, y compris le catalyseur, impliquent également des émissions polluantes et une consommation de ressources indirectes (c'est-à-dire non liées au procédé lui-même mais liées à d'autres parties du cycle de vie), avec les impacts environnementaux qui en résultent. L'étude de cas d'un incinérateur type de déchets dangereux montre que le remplacement du SNCR par le SCR de

queue réduit l'impact environnemental direct de l'incinérateur (c'est-à-dire l'impact environnemental des NOx émis à la cheminée) dans les catégories d'impact acidification, eutrophisation et formation de photo-oxydants, comme prévu par les émissions de NOx inférieures dans le cas du SCR. Cependant, principalement en raison de la nécessité de réchauffer les gaz de combustion, la SCR a des impacts indirects plus importants que la SNCR, notamment dans la catégorie d'impact du réchauffement climatique. En raison de ces impacts indirects, les réductions directes de l'impact environnemental de la RCS dans les catégories d'impact acidification, eutrophisation et formation de photo-oxydants ne constituent pas des avantages environnementaux nets ; lorsque, par exemple, le fioul est utilisé comme source d'énergie pour réchauffer les gaz de combustion, l'impact indirect dans ces catégories est supérieur à la réduction directe liée à la concentration inférieure de NOx dans les fumées émises à l'échappement des installations. Dans ce cas, il n'y a qu'un bénéfice net pour l'environnement dans la catégorie d'impact eutrophisation. Globalement, on peut conclure que dans l'incinérateur de déchets dangereux à l'étude, qui est représentatif dans son domaine, le remplacement du SNCR par le SCR pour atteindre une nouvelle VLE inférieure, augmente l'impact environnemental net global de l'incinérateur, en particulier dans la catégorie d'impact réchauffement climatique. D'un point de vue environnemental, l'optimisation du SNCR devrait être préférée à l'installation d'un SCR en aval dans les installations existantes, comme l'incinérateur de déchets.

Dans notre cas au Maroc, la valeur des émissions dans l’air de NOx ne doit pas dépasser la valeur de 100mg/ m^3, comme il est montré dans la figure suivante :

Tableau 15: Valeurs limites générales de rejets dans l'atmosphère au Maroc (MEM, 2013)

Substances	N° de la classe	Normes	
		Débit massiques	Seuils limites
Poussières		≥ 0.5 kg/h	≤ 50 mg/m^3
Substances inorganiques essentiellement sous forme de poussières	**Classe 1**	≥ 1 g/h	≤ 0.2 mg/m^3
	Classe 2	≥ 5 g/h	≤ 1 mg/m^3
	Classe 3	≥ 25 g/h	≤ 5 mg/m^3
Substances inorganiques essentiellement sous forme de gaz ou de vapeur	**Classe 1**	≥ 10 g/h	≤ 1 mg/m^3
	Classe 2	≥ 50 g/h	≤ 5 mg/m^3
	Classe 3	≥ 300 g/h	≤ 30 mg/m^3
	Classe 4	≥ 5000 g/h	≤ 500 mg/m^3
Substances organiques sous forme de gaz, de vapeurs ou de particules	**Classe 1**	≥ 0.1 kg/h	≤ 20 mg/m^3
	Classe 2	≥ 2 kg/h	≤ 100 mg/m^3
	Classe 3	≥ 3 kg/h	≤ 150 mg/m^3
Substances cancérigènes	**Classe 1**	≥ 0.5 g/h	≤ 0.1 mg/m^3
	Classe 2	≥ 5 g/h	≤ 1 mg/m^3
	Classe 3	≥ 25 g/h	≤ 5 mg/m^3

2. Proposition d'une technique de réduction des émissions en NOx

Après une analyse des émissions de NOx, on a constaté que les valeurs enregistrées par l'analyseur en 2016 et 2017 varient entre 830 et 1193,4 mg/ m^3 pour l'année 2017 et de 622,1 à 1182,4 mg/ m^3 pour l'année 2016, les résultats de l'analyse sont détaillées dans l'annexe II.

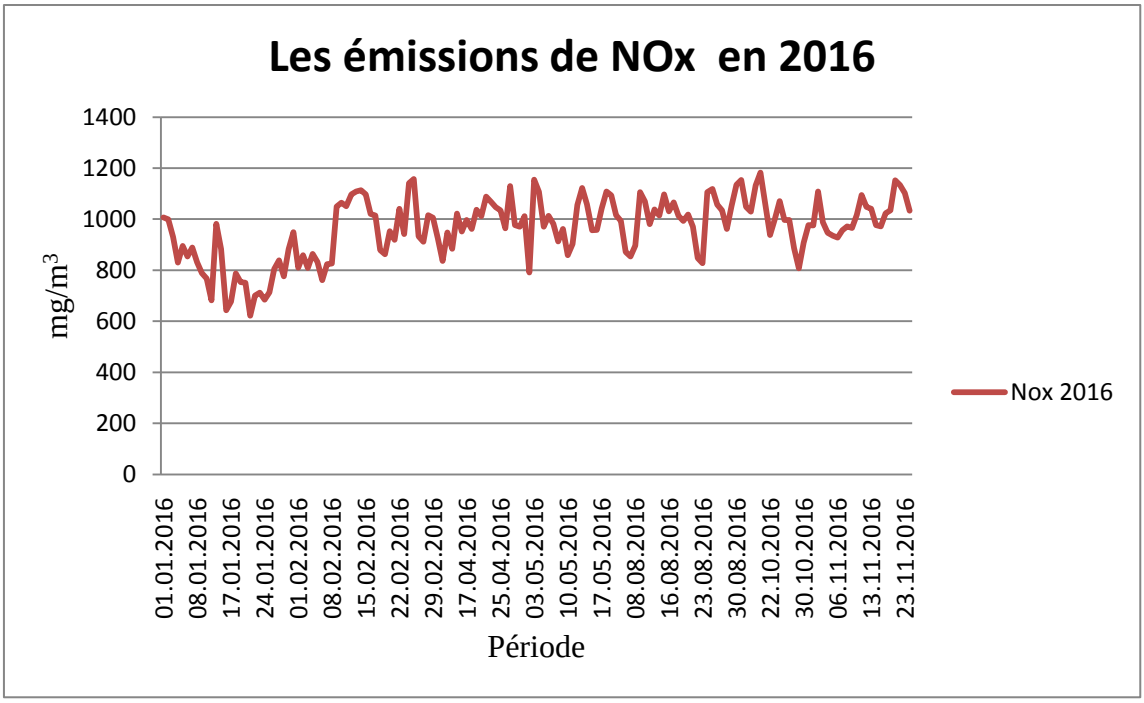


Figure 48: Variation de NOx en 2016

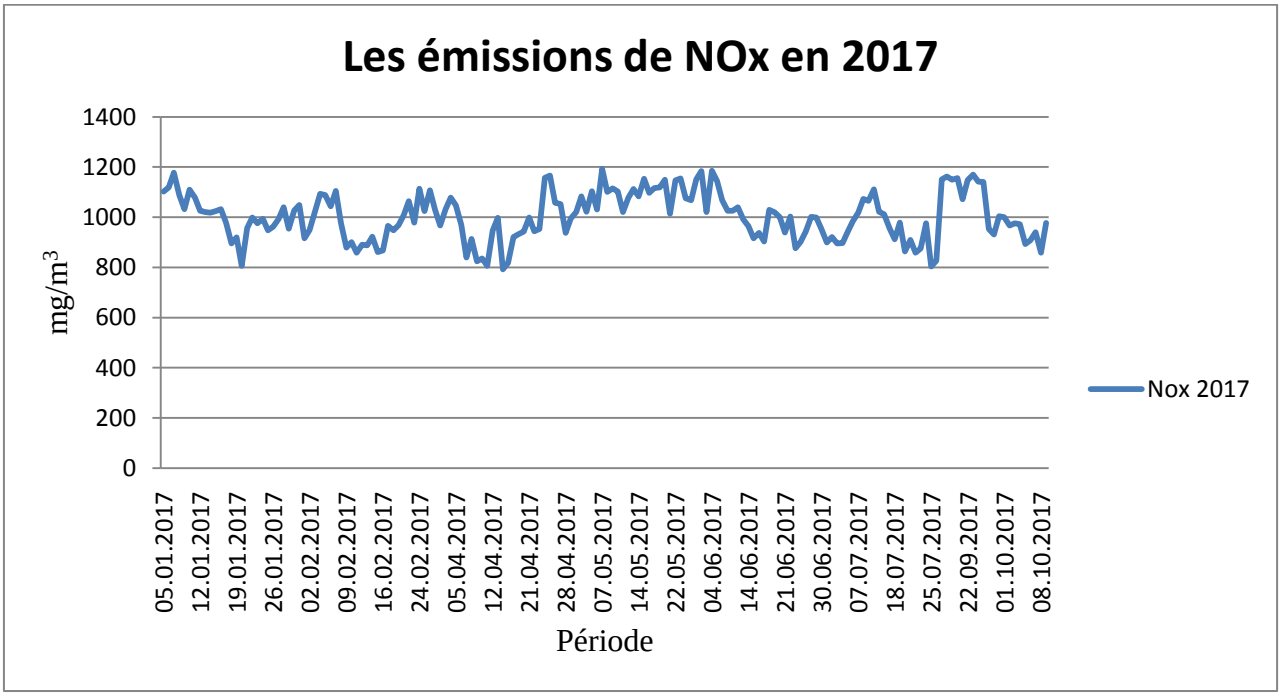


Figure 49: Variation de NOx en 2017

Cette élévation de la concentration des émissions de NOx se produit dans le four (étape de cuisson clinker), dans cette étape la température augmente jusqu'à une valeur de 1450°C. Le combustible utilisé est le PETCOKE en marche normale et le gasoil au moment de chauffe, donc on a proposé

plusieurs techniques et traitements de réduction de NOx et on a évalué les différents technique selon le coté investissement et réalisation.

La technique la plus utilisée et la plus adaptée pour la société Lafarge-Holcim est la réduction sélective non catalytique (SNCR), qui est l'une des techniques de réduction des NOx qui présente le meilleur rapport « coût-efficacité ». Elle résulte des réactions de réduction qui s'opèrent à haute température (850 à 1050°C) entre les NOx et l'ammoniac, l'urée ou l'acide cyanurique injecté dans les fumées.

La réduction par SNCR doit s'effectuer dans une plage de températures comprises entre 850 et 1050°C. L'existence de cette plage résulte d'une compétition entre diverses réactions chimiques : à plus basse température, il ne se forme pas suffisamment de radicaux NHi actifs ; à plus haute température, d'autres réactions apparaissent qui favorisent la production de NO. On constate également que l'efficacité de NOx double lorsque le rapport NH/NO passe de 1 à 2. Dans des conditions tout à fait optimales, il est possible d'atteindre un taux de dénitrification de l'ordre de 90%, équivalent à celui de la SCR. Mais dans la pratique, le taux se situe généralement entre 40 et 65%.

Conclusion

LafargeHolcim Maroc, la plus importante implantation du groupe en Afrique du Nord et de l'Ouest, évolue dans un environnement similaire à celui d'autres pays de la région, caractérisé entre autres par la rareté des ressources en eau, un faible niveau de développement des communautés locales et une conscience écologique naissante.

Le développement durable est depuis toujours au cœur des activités de LafargeHolcim Maroc qui l'intègre dans tous ses processus et à tous les stades de la chaîne de valeur : santé & sécurité dans tous les sites et dans les chantiers des clients, substitution énergétique, réhabilitation des carrières et l'utilisation d'énergies vertes etc. Pour cette raison la société cherche toujours d'être en conformité avec les normes de la pollution de l'air.

Pour cette étude de cas qui traite l'un des grands défis que connaissent les cimenteries : les émissions de GES et surtout les NOx. Plusieurs techniques et méthodes de traitement sont proposées pour réduire ces émissions mais chaque société adopte le traitement qui offre le meilleur rapport «Coût-efficacité ». L'objectif de cette étude de cas était de proposer une technique adaptée aux besoins de la société concernée. Après une analyse des émissions de NOx de la cimenterie, deux types de procédés sont proposés: la réduction sélective non catalytique (SNCR) et la réduction sélective catalytique (SCR). Tous les deux utilisent, certes, l'ammoniac pour réduire les oxydes d'azote en azote moléculaire, mais

la différence réside dans le catalyseur qui a pour rôle la réduction de la température opératoire et la consommation de réactif. La société a choisi la réduction sélective non catalytique (SNCR) car cette proposition répond à leur exigence en matière d'investissement et d'efficacité

Conclusion générale et perspectives

Le travail présenté dans ce mémoire de thèse s'inscrit dans le cadre du développement durable. Ce domaine de recherche a pour objectif de répondre aux besoins des générations actuelles mais sans nuire aux générations futures.

Plusieurs recherches foisonnent dans ce domaine et ne cessent de faire des progrès remarquables pour parvenir à un avenir meilleur et durable pour tous.

En effet, l'augmentation de la demande d'énergie, les fluctuations des prix pétroliers, l'incertitude pesant sur les approvisionnements énergétiques et les craintes suscitées par le réchauffement climatique ont renforcé la priorité accordée par plusieurs pays à travers le monde aux politiques d'efficacité énergétique, notamment par la mise en œuvre de nouveaux instruments adaptés à leurs spécificités aussi bien sur le plan économique que sur le plan social et environnemental.

En réalité, l'industrie est l'un des secteurs les plus énergivores du Maroc avec 32% de la consommation énergétique finale. Plusieurs actions ont été entreprises afin d'intégrer l'efficacité énergétique dans ce secteur.

Au Maroc, l'efficacité énergétique, parallèlement au développement des énergies renouvelables, constitue une priorité majeure dans la stratégie énergétique nationale. L'ambition de cette stratégie est d'économiser 12% au cours de l'année 2020 et 15% en 2030 de la consommation énergétique. D'autres chantiers sont en cours de réalisation pour la mise en œuvre du programme d'efficacité énergétique, Il s'agit notamment de l'installation des chauffe-eaux solaires, la généralisation des audits énergétiques dans l'industrie, la promotion d'utilisation des lampes à basse consommation et l'installation des chaudières à biomasse dans l'agro-industrie.

Dans ce cadre, l'Agence Marocaine pour Efficacité Energétique a lancé plusieurs programmes d'efficacité énergétique dans le bâtiment, l'industrie (y compris l'agro-alimentaire) et le transport, secteurs qui représentent plus de 90% de la consommation énergétique marocaine. Elle a déjà lancé un programme d'efficacité énergétique dans l'industrie (PEEI), l'objectif est d'optimiser la consommation d'énergie dans les unités industrielles, dont notamment les unités agroalimentaires, pour une économie totale estimée à 618 325 tonnes et une réduction des émissions CO_2 estimée à 2 268 000 tonnes.

Les résultats présentés dans cette thèse s'articulent autour de trois axes portant sur des études de cas dans trois domaines différents. La diminution de la facture énergétique et la réduction des émissions

des gaz à effet de serre étaient l'objectif majeur de cette thèse, en se basant sur les différents chapitres, on a pu donner un aperçu sur l'état énergétique et environnemental au monde et précisément au Maroc.

Au cours de cette étude, la mise en place des démarches et des outils de bonne pratique adaptés à chaque procédé, nous a aidés à réduire la facture énergétique de la société Alf al Maghrib. En se basant sur ces résultats et l'analyse bibliographique des différents chercheurs dans le domaine de réduction de la consommation énergétique et la diminution des émissions des gaz à effet de serre, nous avons présenté trois études de cas basés à Fès dans trois domaine différents. Le but de ces études était de mettre en évidence l'importance de la réalisation des audits énergétiques qui aident les entreprises à réduire leurs factures énergétiques avec de faibles investissements d'une part et d'autre part réduire les émissions de CO_2 et de NOx soit par l'application d'une méthode de calcul ou par la proposition des techniques et méthodes de traitements.

Perspectives :

Quant à l'application des procédés du modèle, il sera tout d'abord opportun de faire une analyse comparative des différents outils de performance énergétique (IPMVP, ISO50001). D'autre part, il sera également intéressant d'élaborer une base de données de bonnes pratiques énergétiques, proposer un modèle de l'efficacité énergétique dans l'industrie. Et en dernier lieu Faire une enquête sur les états des lieux de l'efficacité énergétique le bilan carbone au Maroc et le comparé avec un autre pays.

Références Bibliographiques

Abdelaziz, E.A., Saidur, R., Mekhilef, S., 2011. A review on energy saving strategies in industrial sector. Renew. Sustain. Energy Rev. 15, 150–168. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.09.003

Abokyi, E., Appiah-Konadu, P., Abokyi, F., Oteng-Abayie, E.F., 2019. Industrial growth and emissions of CO2 in Ghana: The role of financial development and fossil fuel consumption. Energy Rep. 5, 1339–1353. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2019.09.002

AFNOR Energies, 2015. Audit énergétique réglementaire : AFNOR Energies - Groupe AFNOR. URL https://www.afnor.org/energie/audit-energetique-reglementaire-afnor-energies/ (accessed 12.8.19).

AFNOR Normalisation, 2011. Recherche pour "ISO 50001." AFNOR Norm. URL https://normalisation.afnor.org/search/ISO+50001/ (accessed 11.24.19).

Agence internationale de l'énergie, 2013. World energy outlook 2013. International energy agency : OECD, Paris.

Agence Suédoise de l'Énergie, 2013. Agence Suédoise de l'Énergie. URL https://fundit.fr/fr/institutions/agence-suedoise-lenergie (accessed 12.8.19).

Águila Téllez, A., López, G., Isaac, I., González, J.W., 2018. Optimal reactive power compensation in electrical distribution systems with distributed resources. Review. Heliyon 4, e00746. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2018.e00746

Ajdour, A., Leghrib, R., Chaoufi, J., Chirmata, A., Menut, L., Mailler, S., 2019. Towards air quality modeling in Agadir City (Morocco). Mater. Today Proc. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.438

Akbaba, M., 1999. Energy conservation by using energy efficient electric motors. Appl. Energy 64, 149–158. https://doi.org/10.1016/S0306-2619(99)00051-3

Allouhi, A., El Fouih, Y., Kousksou, T., Jamil, A., Zeraouli, Y., Mourad, Y., 2015a. Energy consumption and efficiency in buildings: current status and future trends. J. Clean. Prod., Special Issue: Toward a Regenerative Sustainability Paradigm for the Built Environment: from vision to reality 109, 118–130. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.139

Allouhi, A., Jamil, A., Kousksou, T., El Rhafiki, T., Mourad, Y., Zeraouli, Y., 2015b. Solar domestic heating water systems in Morocco: An energy analysis. Energy Convers. Manag. 92, 105–113. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.055

Allouhi, A., Kousksou, T., Jamil, A., Agrouaz, Y., Bouhal, T., Saidur, R., Benbassou, A., 2016a. Performance evaluation of solar adsorption cooling systems for vaccine preservation in Sub-Saharan Africa. Appl. Energy 170, 232–241. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.123

AMEE, 2019. AMEE - Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique. URL http://www.amee.ma/index.php?lang=fr (accessed 1.11.20).

AMEE- Agence Marocaine pour l'Efficacité Energétique. www.amee.ma. URL http://www.amee.ma/index.php?lang=fr (accessed 11.20.19).

Anderson, S.T., Newell, R.G., 2004. Information programs for technology adoption: the case of energy-efficiency audits. Resour. Energy Econ. 26, 27–50. https://doi.org/10.1016/j.reseneeco.2003.07.001

Anisimova, T., 2015. Analysis of the Reasons of the Low Interest of Russian Enterprises in Applying the Energy Management System. Procedia Econ. Finance, 2nd GLOBAL CONFERENCE on BUSINESS, ECONOMICS, MANAGEMENT and TOURISM 23, 111–117. https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00424-4

António da Silva Gonçalves, V., Mil-Homens dos Santos, F.J., 2019b. Energy management system ISO 50001:2011 and energy management for sustainable development. Energy Policy 133, 110868. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.07.004

António da Silva Gonçalves, V., Mil-Homens dos Santos, F.J., 2019a. Energy management system ISO 50001:2011 and energy management for sustainable development. Energy Policy 133, 110868. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.07.004

Asase, M., Yanful, E.K., Mensah, M., Stanford, J., Amponsah, S., 2009. Comparison of municipal solid waste management systems in Canada and Ghana: A case study of the cities of London, Ontario, and Kumasi, Ghana. Waste Manag. 29, 2779–2786. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2009.06.019

Assamoi, B., Lawryshyn, Y., 2012. The environmental comparison of landfilling vs. incineration of MSW accounting for waste diversion. Waste Manag. 32, 1019–1030. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.10.023

Behrooznia, L., Sharifi, M., Alimardani, R., Mousavi-Avval, S.H., 2018. Sustainability analysis of landfilling and composting-landfilling for municipal solid waste management in the north of Iran. J. Clean. Prod. 203, 1028–1038. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.307

Belmir, F., 2016 "QSE management and sustainable développement", Ph D. thesis, Sidi Mohammed Ben Abdellah University, Fez, Morocco

Belmir, F., Chramate, I., 2016, ISO 50001 pour une amélioration des performances énergétiques : cas du Maroc, 2016. Noor publishing- ISBN: 987-3-330-80329-9.

Belmir, F., 2016. Présentation d'une démarche de conception du tableau de bord prospectif dans le contexte de développement durable dans les établissements d'enseignement supérieur. Strategy Manag. Logist. 1.

Belmir, F., Chramate, I., 2016. ISO 50001: Economie d'énergie et Réduction des GES. Rev. L'ENTREPRENEURIAT L'INNOVATION 1.

Belmir, F., Chramate, I., Zerrouq, F., Idrissi, H.D.E., 2017. Health and security risk management method in university laboratories. Rev. L'ENTREPRENEURIAT L'INNOVATION 1.

Belmir, F., Zahri, I., 2017. Designing of an ISO 14001: 2015 self-diagnostic tool for SME/SMI. Rev. L'ENTREPRENEURIAT L'INNOVATION 1.

Bogner, J., Pipatti, R., Hashimoto, S., Diaz, C., Mareckova, K., Diaz, L., Kjeldsen, P., Monni, S., Faaij, A., Gao, Q., Zhang, T., Ahmed, M.A., Sutamihardja, R.T.M., Gregory, R., Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Working Group III (Mitigation), 2008. Mitigation of global greenhouse gas emissions from waste: conclusions and strategies from the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Fourth Assessment Report. Working Group III (Mitigation). Waste Manag. Res. J. Int. Solid Wastes Public Clean. Assoc. ISWA 26, 11–32. https://doi.org/10.1177/0734242X07088433

Boharb, A., Allouhi, A., Saidur, R., Kousksou, T., Jamil, A., Mourad, Y., Benbassou, A., 2016. Auditing and analysis of energy consumption of an industrial site in Morocco. Energy 101, 332–342.

Bonacina, F., Corsini, A., De Propris, L., Marchegiani, A., Mori, F., 2015. Industrial Energy Management Systems in Italy: State of the Art and Perspective. Energy Procedia 82, 562–569. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.871

Bonilla-Campos, I., Nieto, N., del Portillo-Valdes, L., Manzanedo, J., Gaztañaga, H., 2019. Energy efficiency optimisation in industrial processes: Integral decision support tool. Energy 116480. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116480

Börjesson, G., Samuelsson, J., Chanton, J., Adolfsson, R., Galle, B., Svensson, B.H., 2009. A national landfill methane budget for Sweden based on field measurements, and an evaluation of IPCC models. Tellus B 61, 424–435. https://doi.org/10.1111/j.1600-0889.2008.00409.x

Broberg Viklund, S., Johansson, M.T., 2014. Technologies for utilization of industrial excess heat: Potentials for energy recovery and CO2 emission reduction. Energy Convers. Manag. 77, 369–379. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.09.052

Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brülhart, M., Ernst, F.O., 2011a. Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. J. Clean. Prod. 19, 667–679. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011

Bunse, K., Vodicka, M., Schönsleben, P., Brülhart, M., Ernst, F.O., 2011b. Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature. J. Clean. Prod. 19, 667–679. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.11.011

CDM: Consolidated baseline and monitoring methodology for landfill gas project activities --- Version 9.0, 2009. URL https://cdm.unfccc.int/methodologies/DB/203B03KT6N8QCC0R1C56DFOF9OYO2T/view.html (accessed 11.29.19).

Chramate, I., Assadiki, R., Zerrouq, F., Belmir, F., 2018. Energy audit in Moroccan industries. ASIA LIFE Sci. Suppl. 16(1).213–221.

Chramate, I., Belmir, F., 2019 Consumption energy saving of an energy audit within industry in Morocco, International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, ISSN 2278-3091, Volume 8, No.1.5, 2019, 136- 140. https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/2781.52019

Christenson, M., Manz, H., Gyalistras, D., 2006. Climate warming impact on degree-days and building energy demand in Switzerland. Energy Convers. Manag. 47, 671–686. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.06.009

de Mello Santana, P.H., Bajay, S.V., 2016. New approaches for improving energy efficiency in the Brazilian industry. Energy Rep. 2, 62–66. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2016.02.001

Dzene, I., Polikarpova, I., Zogla, L., Rosa, M., 2015. Application of ISO 50001 for Implementation of Sustainable Energy Action Plans. Energy Procedia, International Scientific Conference "Environmental and Climate Technologies, CONECT 2014 72, 111–118. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.06.016

Engin, T., Ari, V., 2005. Energy auditing and recovery for dry type cement rotary kiln systems—A case study. Energy Convers. Manag. 46, 551–562. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2004.04.007

Farcy, B., Vervisch, L., Domingo, P., 2016. Large eddy simulation of selective non-catalytic reduction (SNCR): A downsizing procedure for simulating nitric-oxide reduction units. Chem. Eng. Sci. 139, 285–303. https://doi.org/10.1016/j.ces.2015.10.002

Filippini, M., Geissmann, T., Karplus, V.J., Zhang, D., 2019. The productivity impacts of energy efficiency programs in developing countries: Evidence from iron and steel firms in China. China Econ. Rev. 101364. https://doi.org/10.1016/j.chieco.2019.101364

Fleiter, T., Fehrenbach, D., Worrell, E., Eichhammer, W., 2012. Energy efficiency in the German pulp and paper industry – A model-based assessment of saving potentials. Energy 40, 84–99. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.02.025

Garcia, A.G.P., Szklo, A.S., Schaeffer, R., McNeil, M.A., 2007. Energy-efficiency standards for electric motors in Brazilian industry. Energy Policy 35, 3424–3439. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2006.11.024

Giacone, E., Mancò, S., 2012. Energy efficiency measurement in industrial processes. Energy 38, 331–345. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.11.054

Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., Latif, H., 2014a. A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. Sustain. Energy Technol. Assess. 7, 154–165. https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.006

Gopalakrishnan, B., Ramamoorthy, K., Crowe, E., Chaudhari, S., Latif, H., 2014b. A structured approach for facilitating the implementation of ISO 50001 standard in the manufacturing sector. Sustain. Energy Technol. Assess. 7, 154–165. https://doi.org/10.1016/j.seta.2014.04.006

Guemene Dountio, E., Meukam, P., Pahane Tchaptchet, D.L., Okono Ango, L.E., Simo, A., 2016. Electricity generation technology options under the greenhouse gases mitigation scenario: Case study of Cameroon. Energy Strategy Rev. 13–14, 191–211. https://doi.org/10.1016/j.esr.2016.10.003

Haro, K., Ouarma, I., Nana, B., Bere, A., Tubreoumya, G.C., Kam, S.Z., Laville, P., Loubet, B., Koulidiati, J., 2019. Assessment of CH4 and CO2 surface emissions from Polesgo's landfill (Ouagadougou, Burkina Faso) based on static chamber method. Adv. Clim. Change Res. 10, 181–191. https://doi.org/10.1016/j.accre.2019.09.002

Hasanbeigi, A., Price, L., Lu, H., Lan, W., 2010. Analysis of energy-efficiency opportunities for the cement industry in Shandong Province, China: A case study of 16 cement plants. Energy 35, 3461–3473. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.04.046

Hasegawa, R., Azuma, D., 2008. Impacts of amorphous metal-based transformers on energy efficiency and environment. J. Magn. Magn. Mater., Proceedings of the 18th International Symposium on Soft Magnetic Materials 320, 2451–2456. https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.04.052

Idrissi, H.D.E., Belmir, F., 2016. Amélioration des interactions entre les parties intéressées et analyse des risques au sein d'un aéroport. Strategy Manag. Logist. 1.

International Organization for Standardization, 2011. ISO 50001:2011 [WWW Document]. ISO. URL http://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/05/12/51297.html (accessed 11.21.19).

ISO - Organisation internationale de normalisation, n.d. ISO - Organisation internationale de normalisation [WWW Document]. URL https://www.iso.org/fr/home.html (accessed 12.7.19).

Iturbe, I.L., 2015. Adopción de estándares de gestión energética e integración con estándares de gestión medioambiental 183.

Javied, T., Rackow, T., Franke, J., 2015. Implementing Energy Management System to Increase Energy Efficiency in Manufacturing Companies. Procedia CIRP, 12th Global Conference on Sustainable Manufacturing – Emerging Potentials 26, 156–161. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.07.057

Jebbour, N., Zerrouq, F., Tannane, O., Belmir, F., 2020. Performance and Sustainable Development: the role of standardization?

Jovanović, S., Gajić, B., Mijailović, S., 1991a. Reactive power compensation and loss reduction in large industrial enterprises. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 13, 337–342. https://doi.org/10.1016/0142-0615(91)90042-T

Jovanović, S., Gajić, B., Mijailović, S., 1991b. Reactive power compensation and loss reduction in large industrial enterprises. Int. J. Electr. Power Energy Syst. 13, 337–342. https://doi.org/10.1016/0142-0615(91)90042-T

Kaya, D., Phelan, P., Chau, D., Ibrahim Sarac, H., 2002. Energy conservation in compressed-air systems. Int. J. Energy Res. 26, 837–849. https://doi.org/10.1002/er.823

Kersting, W.H., Phillips, W.H., 1997. Phase frame analysis of the effects of voltage unbalance on induction machines. IEEE Trans. Ind. Appl. 33, 415–420. https://doi.org/10.1109/28.568004

Khan, Md.M.-U.-H., Jain, S., Vaezi, M., Kumar, A., 2016. Development of a decision model for the techno-economic assessment of municipal solid waste utilization pathways. Waste Manag. 48, 548–564. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.016

Kluczek, A., Olszewski, P., 2017. Energy audits in industrial processes. J. Clean. Prod. 142, 3437–3453. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.10.123

Kofi Adom, P., Bekoe, W., Amuakwa-Mensah, F., Mensah, J.T., Botchway, E., 2012. Carbon dioxide emissions, economic growth, industrial structure, and technical efficiency: Empirical evidence from Ghana, Senegal, and Morocco on the causal dynamics. Energy, Asia-Pacific Forum on Renewable Energy 2011 47, 314–325. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.09.025

Kong, L., Price, L., Hasanbeigi, A., Liu, H., Li, J., 2013. Potential for reducing paper mill energy use and carbon dioxide emissions through plant-wide energy audits: A case study in China. Appl. Energy, Special Issue on Advances in sustainable biofuel production and use - XIX International Symposium on Alcohol Fuels - ISAF 102, 1334–1342. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.07.013

Kousksou, T., Allouhi, A., Belattar, M., Jamil, A., El Rhafiki, T., Arid, A., Zeraouli, Y., 2015. Renewable energy potential and national policy directions for sustainable development in Morocco. Renew. Sustain. Energy Rev. 47, 46–57. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.056

Krones, M., Müller, E., 2014. An Approach for Reducing Energy Consumption in Factories by Providing Suitable Energy Efficiency Measures. Procedia CIRP, Variety Management in Manufacturing 17, 505–510. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.01.045

Lee, U., Han, J., Wang, M., 2017. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. J. Clean. Prod. 166, 335–342. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.08.016

Li, D., Zhang, L., Li, G., Lu, Z., Zhou, S., 2012. Reducing the core loss of amorphous cores for distribution transformers. Prog. Nat. Sci. Mater. Int. 22, 244–249. https://doi.org/10.1016/j.pnsc.2012.04.005

Lin, H.-C., Chan, D.Y.-L., Lin, W.-C., Hsu, C.-H., Hong, G.-B., 2014. Status of energy conservation in Taiwan's pulp and paper industry. Energy 73, 680–685. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.070

Liudvinavičius, L., 2017. Compensation of Reactive Power of AC Catenary System. Procedia Eng., TRANSBALTICA 2017: TRANSPORTATION SCIENCE AND TECHNOLOGY: Proceedings of the 10th International Scientific Conference, May 4–5, 2017, Vilnius Gediminas Technical University, Vilnius, Lithuania 187, 185–197. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.364

Lozano, M., Vallés, J., 2007. An analysis of the implementation of an environmental management system in a local public administration. J. Environ. Manage. 82, 495–511. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2006.01.013

Manfredi, S., Tonini, D., Christensen, T.H., Scharff, H., 2009. Landfilling of waste: accounting of greenhouse gases and global warming contributions: Waste Manag. Res. https://doi.org/10.1177/0734242X09348529

Mardani, A., Streimikiene, D., Cavallaro, F., Loganathan, N., Khoshnoudi, M., 2019. Carbon dioxide (CO2) emissions and economic growth: A systematic review of two decades of research from 1995 to 2017. Sci. Total Environ. 649, 31–49. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.229

MEM, 2013. MEM [WWW Document]. URL https://www.mem.gov.ma/Pages/index.aspx (accessed 11.20.19).

Monni, S., Pipatti, R., Lehtilä, A., Syri, S., 2006. Global climate change mitigation scenarios for solid waste management 55.

Morvay, Z., Gvozdenac, D., 2008. Applied Industrial Energy and Environmental Management. John Wiley & Sons.

Mousavi, S., Kara, S., Kornfeld, B., 2014. Energy Efficiency of Compressed Air Systems. Procedia CIRP, 21st CIRP Conference on Life Cycle Engineering 15, 313–318. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.026

Moya, D., Torres, R., Stegen, S., 2016. Analysis of the Ecuadorian energy audit practices: A review of energy efficiency promotion. Renew. Sustain. Energy Rev. 62, 289–296. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.052

Muhammad, B., 2019. Energy consumption, CO2 emissions and economic growth in developed, emerging and Middle East and North Africa countries. Energy 179, 232–245. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.03.126

Müller, E., Poller, R., Hopf, H., Krones, M., 2013. Enabling Energy Management for Planning Energy-efficient Factories. Procedia CIRP, Forty Sixth CIRP Conference on Manufacturing Systems 2013 7, 622–627. https://doi.org/10.1016/j.procir.2013.06.043

Munir, Q., Lean, H.H., Smyth, R., 2019. CO2 emissions, energy consumption and economic growth in the ASEAN-5 countries: A cross-sectional dependence approach. Energy Econ. 104571. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.104571

Narasimha Raju, V.S.N., Premalatha, M., Siva Krishna Rao K., D.V., 2019. A novel approach for reactive power compensation in hybrid wind-battery system using distribution static compensator. Int. J. Hydrog. Energy 44, 27907–27920. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.261

Olayinka, O.S., Oladele, A.T., 2013. Energy Audit of Manufacturing and Processing Industries in Nigeria: A Case Study of Food Processing Industry and Distillation & Bottling Company. Am. J. Energy Res. 1, 36–44. https://doi.org/10.12691/ajer-1-3-1

Programme du Mécanisme de Développement Propre (MDP), 2016. Programme du Mécanisme de Développement Propre (MDP) [WWW Document]. http://pndm.environnement.gov.ma/mdp. URL /mdp (accessed 11.29.19).

Protocole de Kyoto [WWW Document], 2011. . Connaiss. Énerg. URL https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/protocole-de-kyoto (accessed 11.23.19).

Rameh, H., 2018. Instrumentation optimale pour le suivi des performances énergétiques d'un procédé industriel.

Saidur, R., 2010. A review on electrical motors energy use and energy savings. Renew. Sustain. Energy Rev. 14, 877–898. https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.10.018

Scheehle, E.A., Kruger, D., 2006. Global Anthropogenic Methane and Nitrous Oxide Emissions. Energy J. 27, 33–44.

Scheihing, P., n.d. Save Energy through the Superior Energy Performance Program 4.

Scheutz, C., Fredenslund, A.M., Chanton, J., Pedersen, G.B., Kjeldsen, P., 2011. Mitigation of methane emission from Fakse landfill using a biowindow system. Waste Manag. 31, 1018–1028. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.01.024

Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., 2016b. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. J. Clean. Prod. 112, 3692–3708. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060

Schulze, M., Nehler, H., Ottosson, M., Thollander, P., 2016a. Energy management in industry – a systematic review of previous findings and an integrative conceptual framework. J. Clean. Prod. 112, 3692–3708. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.06.060

Serec : études de marchés, études sectorielles, conseil, formation, 2018. Serec : études de marchés, études sectorielles, conseil, formation [WWW Document]. URL https://serec.ma/116-s20--le-secteur-de-lalimentation-animale-au-maroc (accessed 12.6.19).

Siitonen, S., Tuomaala, M., Suominen, M., Ahtila, P., 2010. Implications of process energy efficiency improvements for primary energy consumption and CO2 emissions at the national level. Appl. Energy, Special Issue of the IGEC-IV, the 4th International Green Energy Conference (IGEC-IV), Beijing, China, October 20–22, 2008 87, 2928–2937. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.09.024

Staub, M.J., Marcolina, G., Gourc, J.-P., Simonin, R., 2011. An incremental model to assess the environmental impact of cap cover systems on MSW landfill emissions. Geotext. Geomembr. 29, 298–312. https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2011.01.013

Su, T.-L., Chan, D.Y.-L., Hung, C.-Y., Hong, G.-B., 2013. The status of energy conservation in Taiwan's cement industry. Energy Policy 60, 481–486. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.04.002

Tan, S.T., Lee, C.T., Hashim, H., Ho, W.S., Lim, J.S., 2014. Optimal process network for municipal solid waste management in Iskandar Malaysia. J. Clean. Prod., Special Volume: PSE Asia for Cleaner Production 71, 48–58. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.005

Tanaka, K., 2011. Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. Energy Policy, Sustainability of biofuels 39, 6532–6550. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.058

Tanaka, K., 2008. Assessment of energy efficiency performance measures in industry and their application for policy. Energy Policy 36, 2887–2902. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.03.032

Trifunovic, J., Mikulovic, J., Djurisic, Z., Djuric, M., Kostic, M., 2009. Reductions in electricity consumption and power demand in case of the mass use of compact fluorescent lamps. Energy 34, 1355–1363. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.014

UNFCCC [WWW Document], n.d. URL https://unfccc.int/fr (accessed 11.24.19).

Utlu, Z., Parali, U., 2013. Investigation of the potential of thermophotovoltaic heat recovery for the Turkish industrial sector. Energy Convers. Manag. 74, 308–322. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.05.030

Vadillo, I., Andreo, B., Carrasco, F., 2005. Groundwater Contamination by Landfill Leachates in a Karstic Aquifer. Water. Air. Soil Pollut. 162, 143–169. https://doi.org/10.1007/s11270-005-5998-4

Van Caneghem, J., De Greef, J., Block, C., Vandecasteele, C., 2016. NOx reduction in waste incinerators by selective catalytic reduction (SCR) instead of selective non catalytic reduction (SNCR) compared from a life cycle perspective: a case study. J. Clean. Prod. 112, 4452–4460. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.068

Vittorini, D., Cipollone, R., 2016. Energy saving potential in existing industrial compressors. Energy 102, 502–515. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.02.115

Wohlfarth, K., Worrell, E., Eichhammer, W., 2019. Energy efficiency and demand response – two sides of the same coin? Energy Policy 111070. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2019.111070

Xia, F., Zhang, X., Cai, T., Wu, S., Zhao, D., 2019. Identification of key Industries of industrial sector with energy-related CO2 emissions and analysis of their potential for energy conservation and emission reduction in Xinjiang, China. Sci. Total Environ. 134587. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134587

Zahare, D., Rošā, M., 2011a. Analysis of Energy Intensive Enterprises under EU Emission Trading System in Latvia 7, 125–132.

Zahare, D., Rošā, M., 2011b. Analysis of Energy Intensive Enterprises under EU Emission Trading System in Latvia 7, 125–132.

Zhao, H., Lin, B., 2019. Impact of foreign trade on energy efficiency in China's textile industry. J. Clean. Prod. 118878. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118878

Zhou, S., Wang, Y., Yuan, Z., Ou, X., 2018. Peak energy consumption and CO2 emissions in China's industrial sector. Energy Strategy Rev. 20, 113–123. https://doi.org/10.1016/j.esr.2018.02.001

Zoran Morvay,, Dušan Gvozdenac, n.d. Applied Industrial Energy and Environmental Management | Wiley [WWW Document]. Wiley.com. URL https://www.wiley.com/en-us/Applied+Industrial+Energy+and+Environmental+Management-p-9780470697429 (accessed 11.17.19).

Annexes

Annexe I

1. Tableaux représentants la variation de la facture énergétique

Tableau 16: Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2014

Mois	Consommation des heures normales en Kwh	Consommation des heures creuses Kwh	Consommation des heures de pointes Kwh	Prix en MAD
janv-14	227320	225820	106090	479938,4
févr-14	229000	198220	81940	436566,4
mars-14	241420	219570	107720	489755,7
avr-14	255860	192040	104280	483063,2
mai-14	223240	177060	92600	436225,2
juin-14	242190	192980	116790	486688,2
juil-14	272150	219190	121600	534098
août-14	261670	229130	133910	580677,3
sept-14	246460	204370	88290	491862,1
oct-14	215910	205360	101630	483439,1
nov-14	204010	214640	109760	488294
déc-14	244500	254650	141790	587743,6

Tableau 17:Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2015

Mois	Consommation des heures normales en Kwh	Consommation des heures creuses Kwh	Consommation des heures de pointes Kwh	Prix en MAD
janv-15	245470	234750	140180	609574,54
Fevrier-15	235410	214240	123260	565240,27
mars-15	237210	223800	115160	562000,24
avr-15	269320	186130	98120	547110,53
mai-15	275570	216660	122860	606547,03
juin-15	280190	219780	135740	632075,21
juil-15	313080	237890	138010	680918,92
août-15	260270	211950	102400	561699,55
sept-15	215030	170800	38510	411307,81

oct-15	235250	204370	88570	513168,83
nov-15	222810	219770	113080	543542,94
déc-15	240700	206160	93430	525600,75

Tableau 18: Facture de la consommation de l'électricité durant l'année 2016

Mois	**Consommation des heures normales en Kwh**	**Consommation des heures creuses Kwh**	**Consommation des heures de pointes Kwh**	**Prix en MAD**
Janvier-16	234070	224340	118590	600569,03
Fevrier-16	228420	196780	86510	533029,47
Mars-16	274600	249240	132110	676350,41
Avril-16	252050	178950	68570	518160,94
Mai-16	282690	208370	104290	615488,16
Juin-16	300660	211610	120340	661224,36
Juillet-16	321610	229640	143560	723976,73
Aout-16	317760	234610	143830	725511,62
Septembre-16	282920	192960	128660	642993,37
Octobre-16	266440	248390	137690	674789,96
Novembre-16	212800	218770	109780	503543,82
Decembre-16	242500	234640	121890	557265,93

2. Résultats de puissance active avant compensation

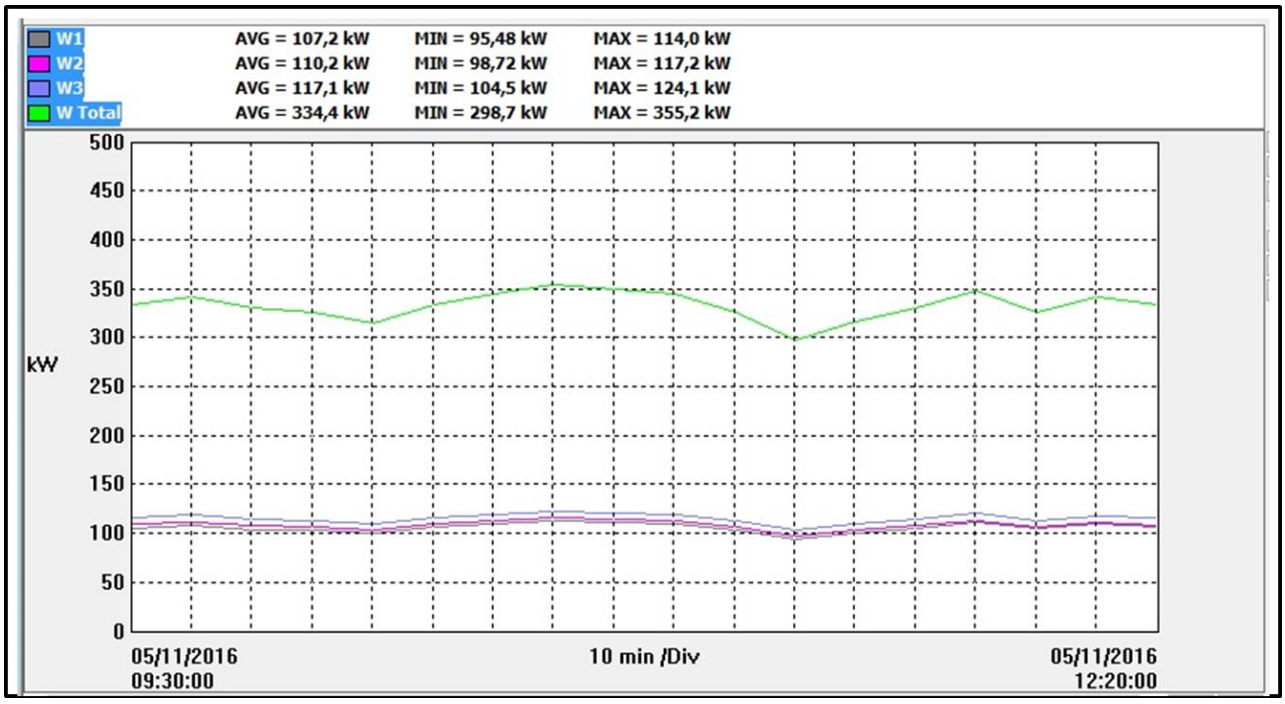


Figure 50: Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°1.

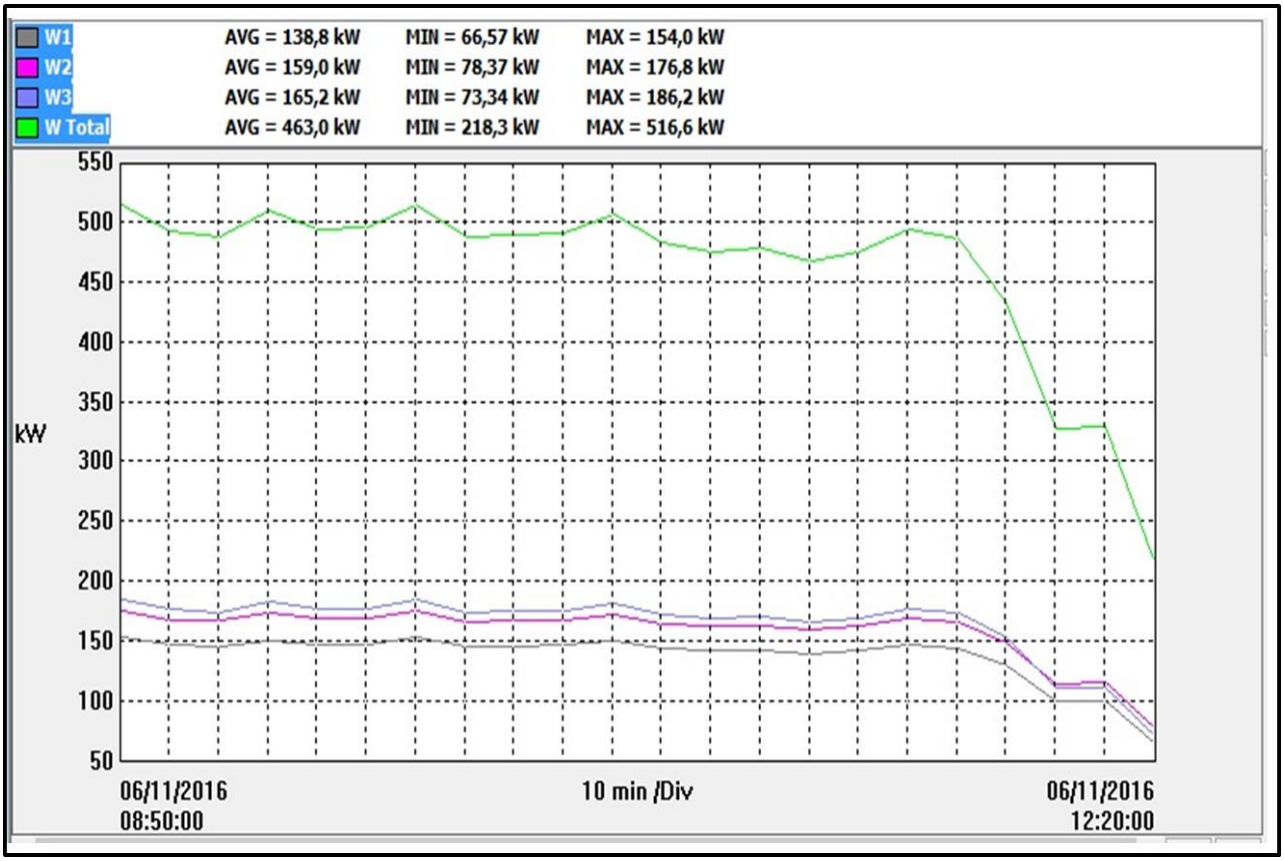


Figure 51:Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°2

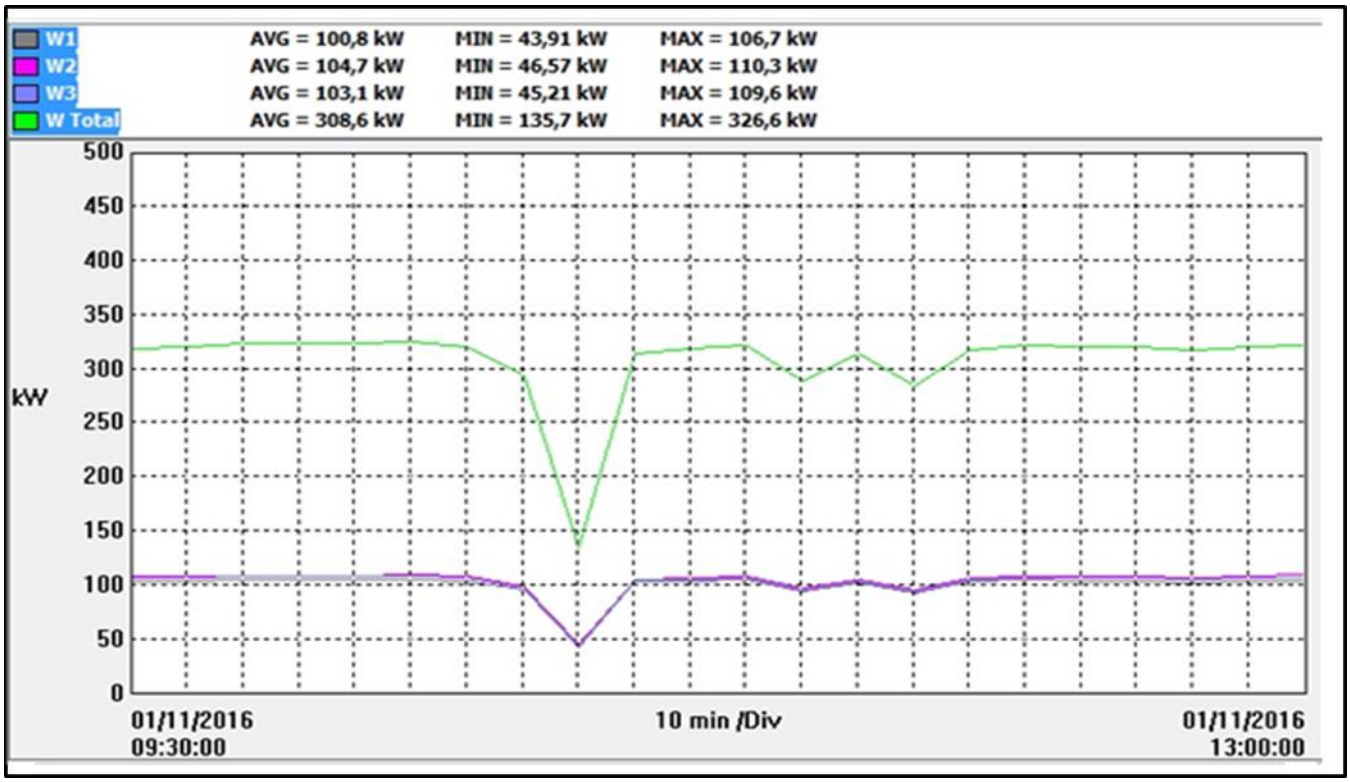


Figure 52: Variation de la puissance appelée avant la compensation pour le condensateur N°3

3. Variation de la puissance réactive avant compensation

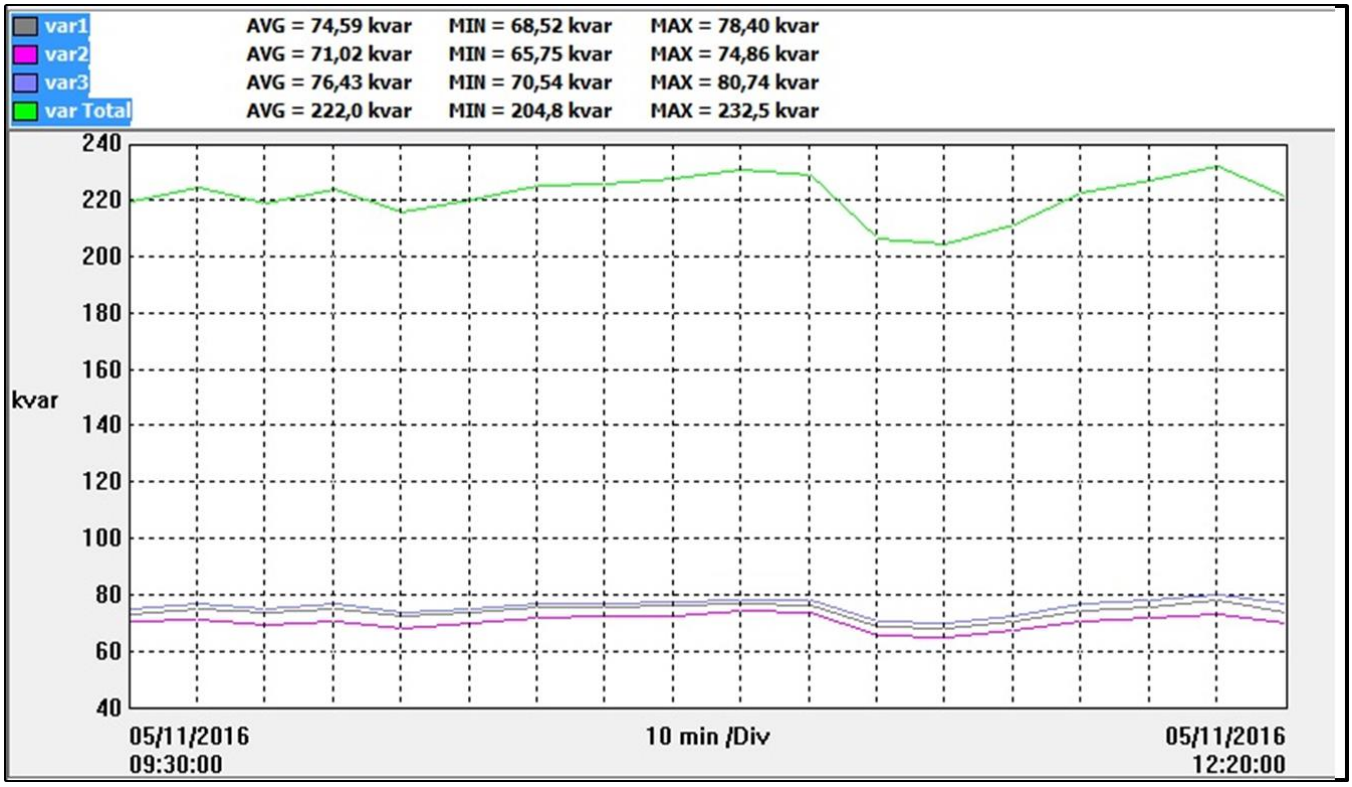


Figure 53: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°1

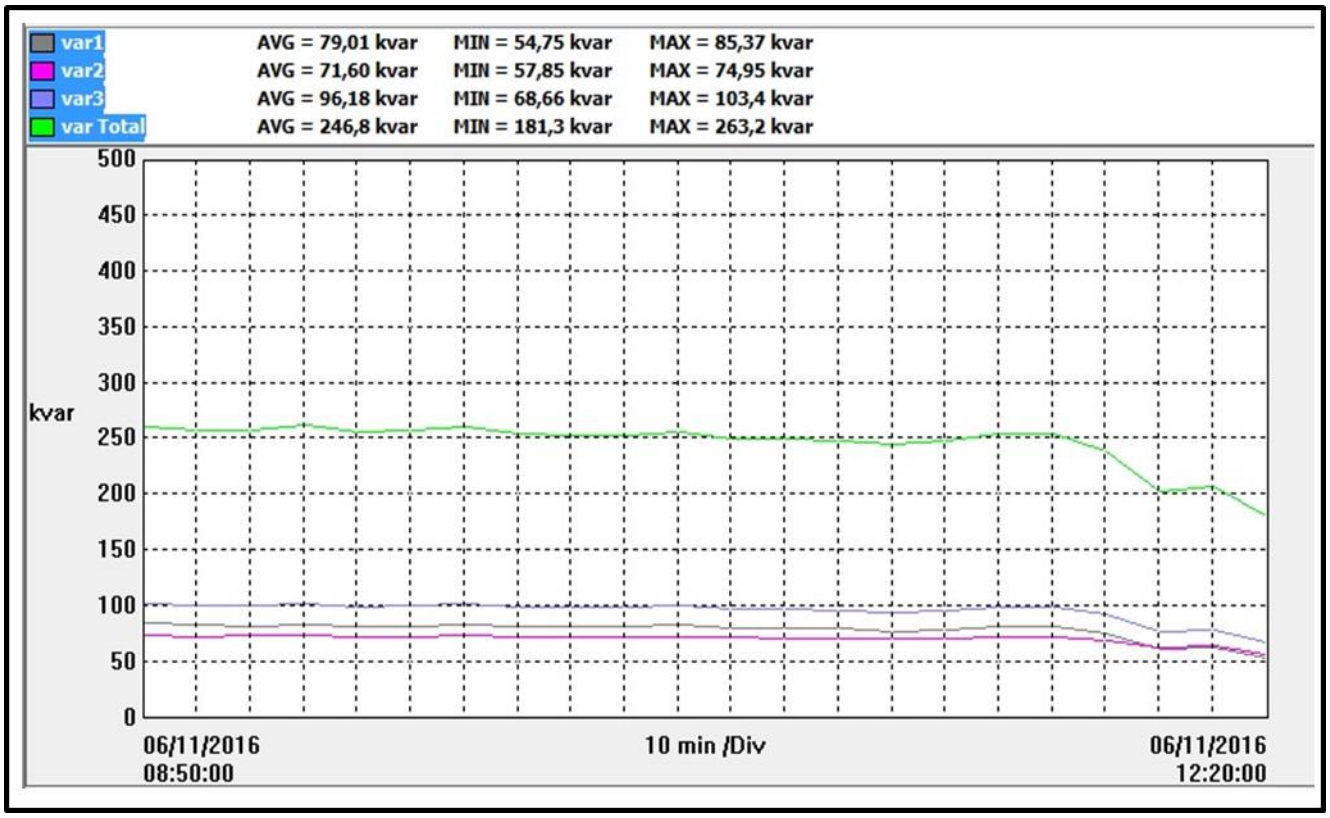


Figure 54: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°2

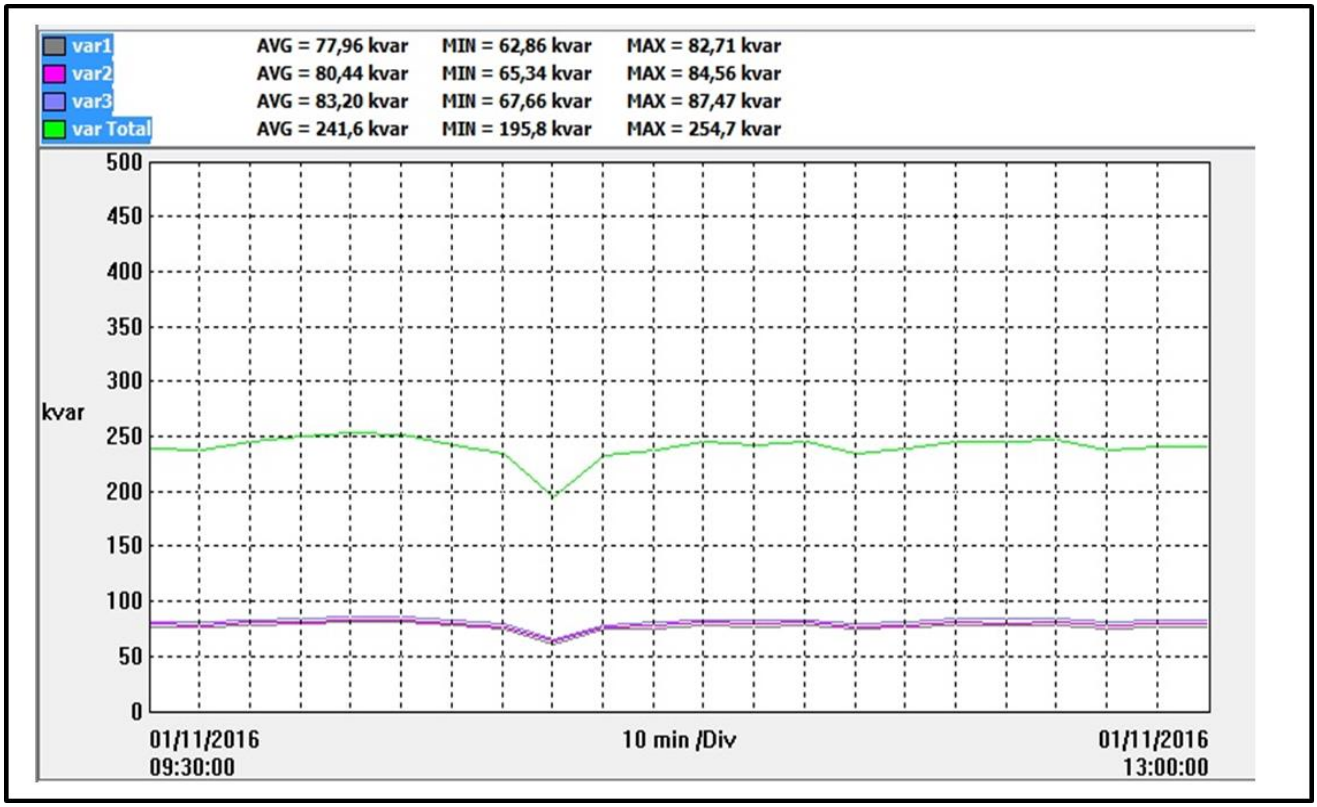


Figure 55: Variation de la puissance réactive avant la compensation pour le condensateur N°3

4. Variation de la puissance apparente avant la compensation

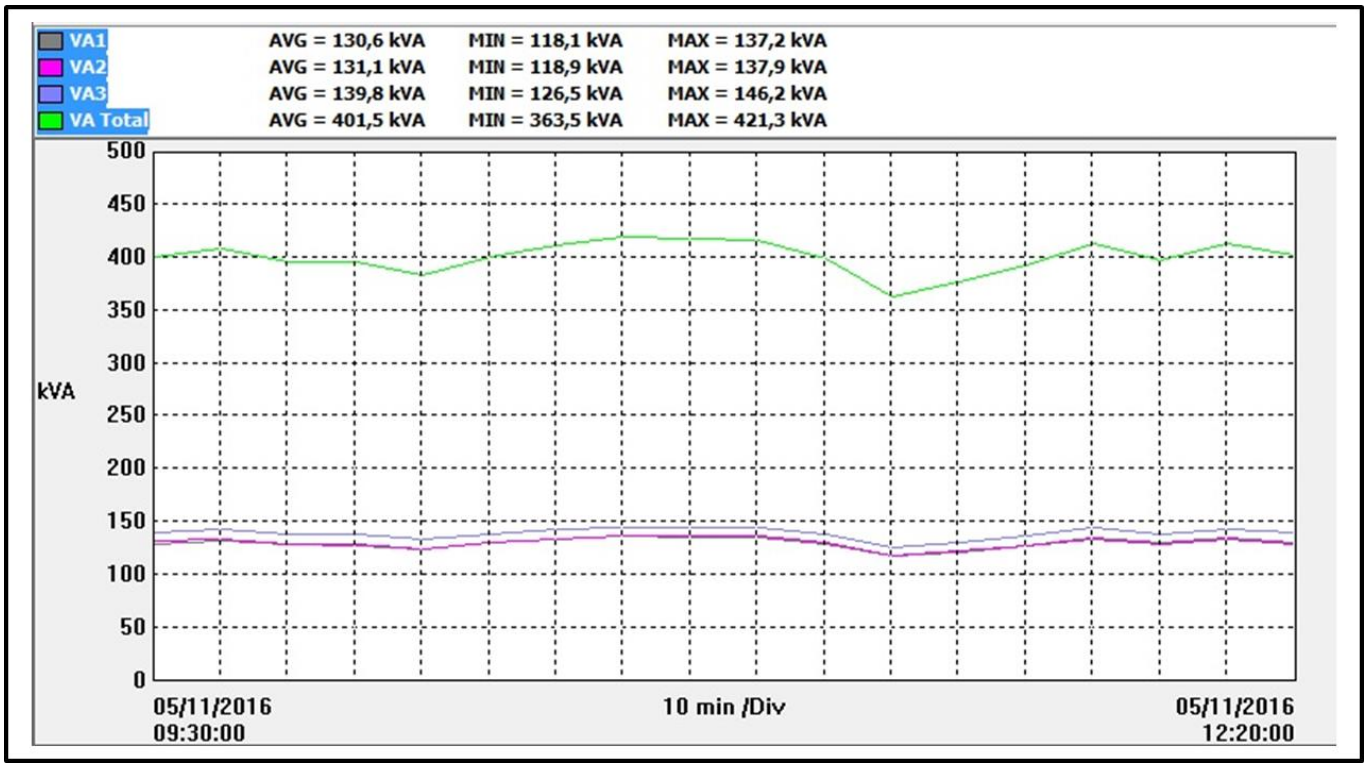


Figure 56: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°1

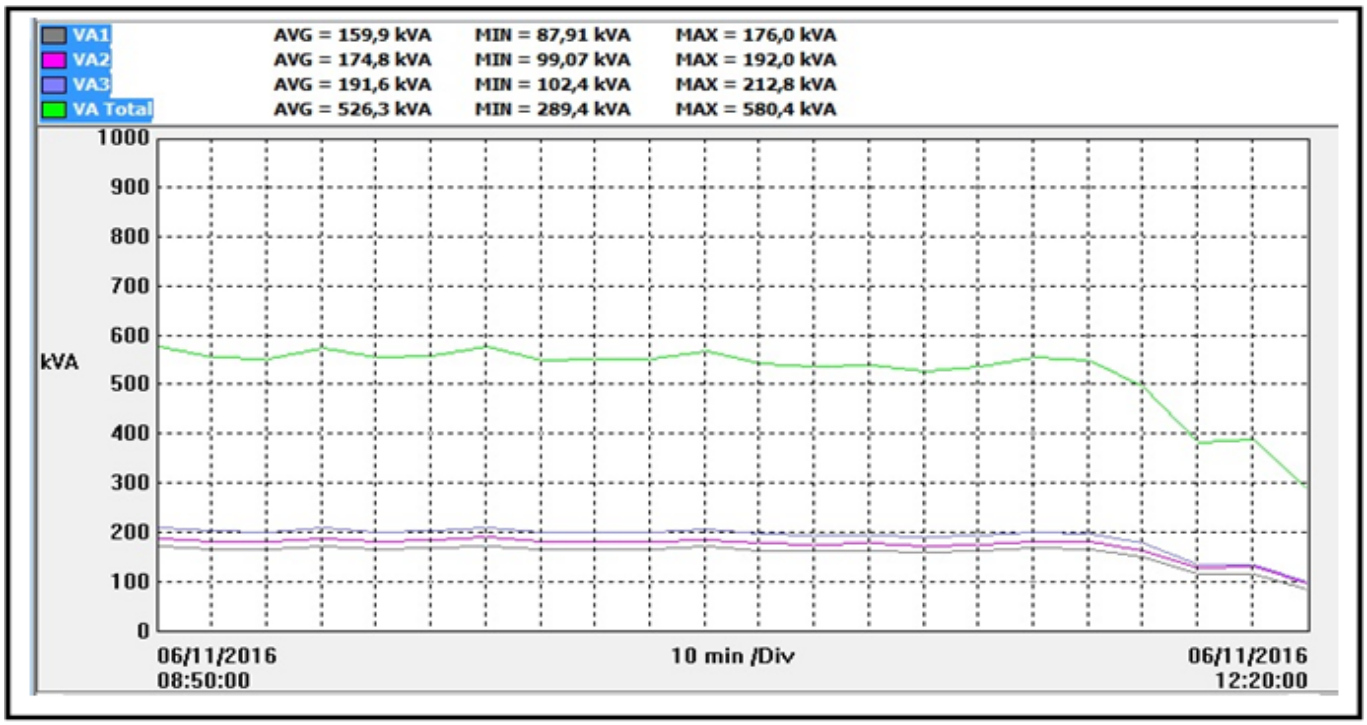


Figure 57: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°2

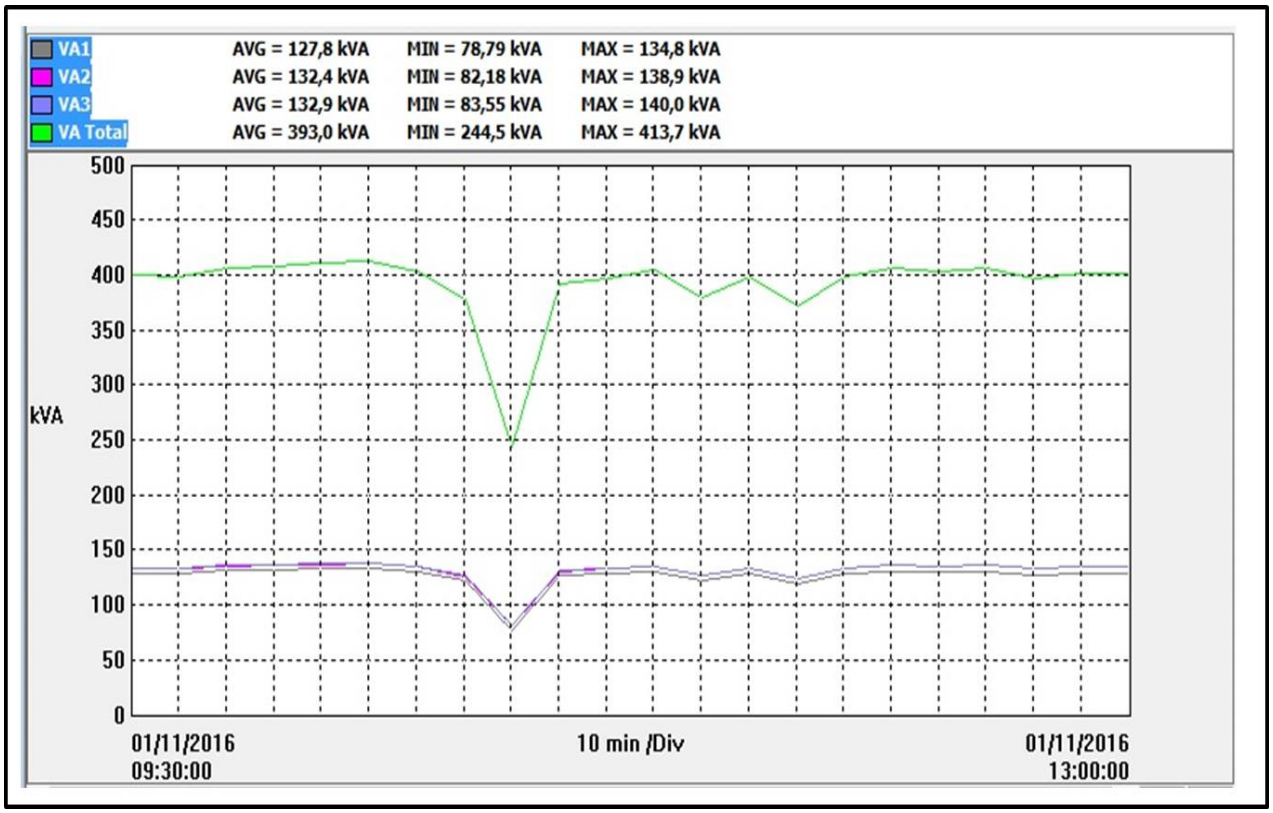


Figure 58: Variation de la puissance apparente avant la compensation pour le condensateur N°3

5. Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation

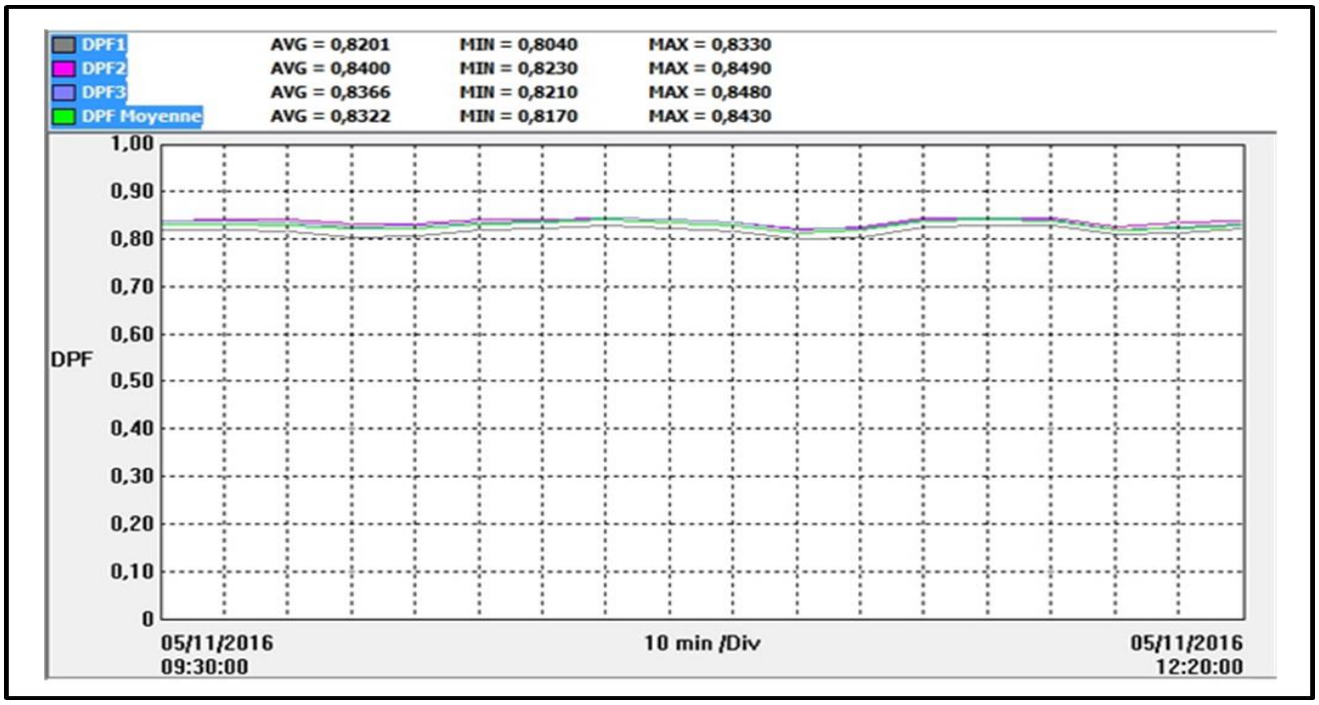


Figure 59: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°1

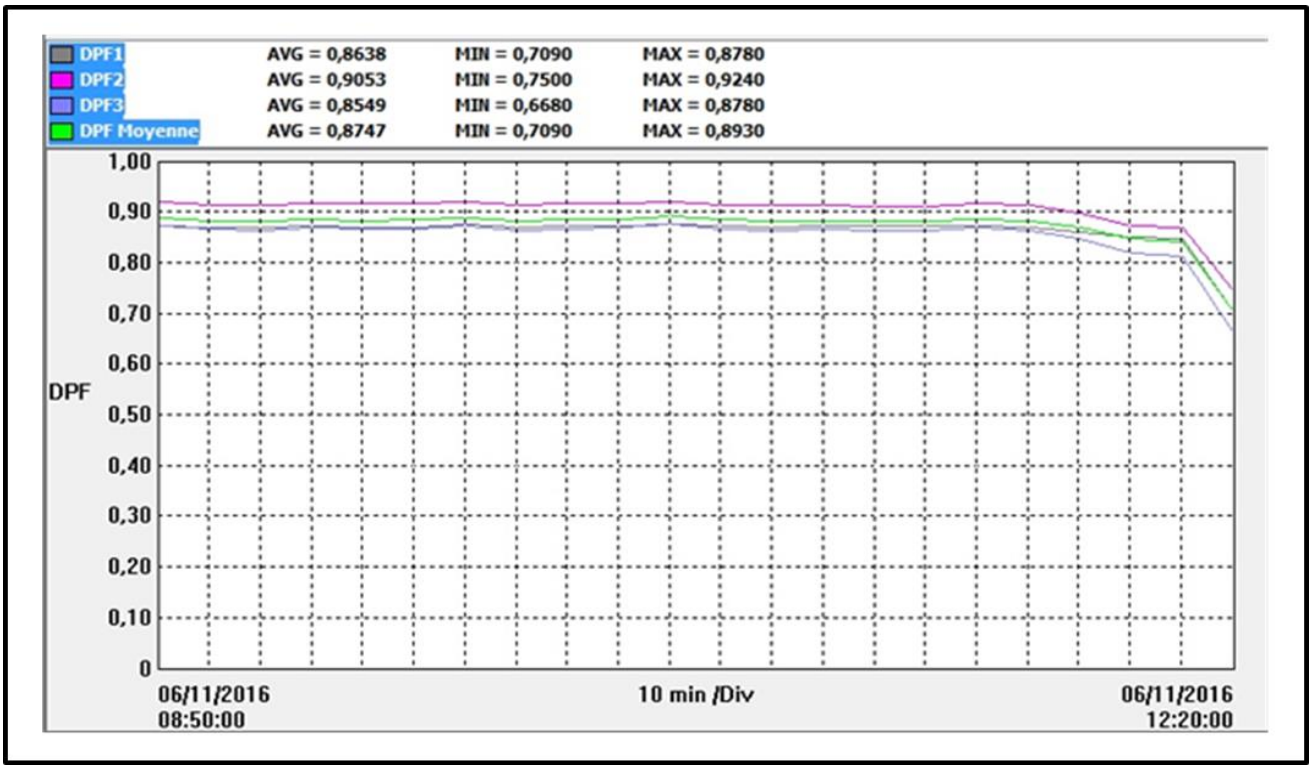


Figure 60: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°2

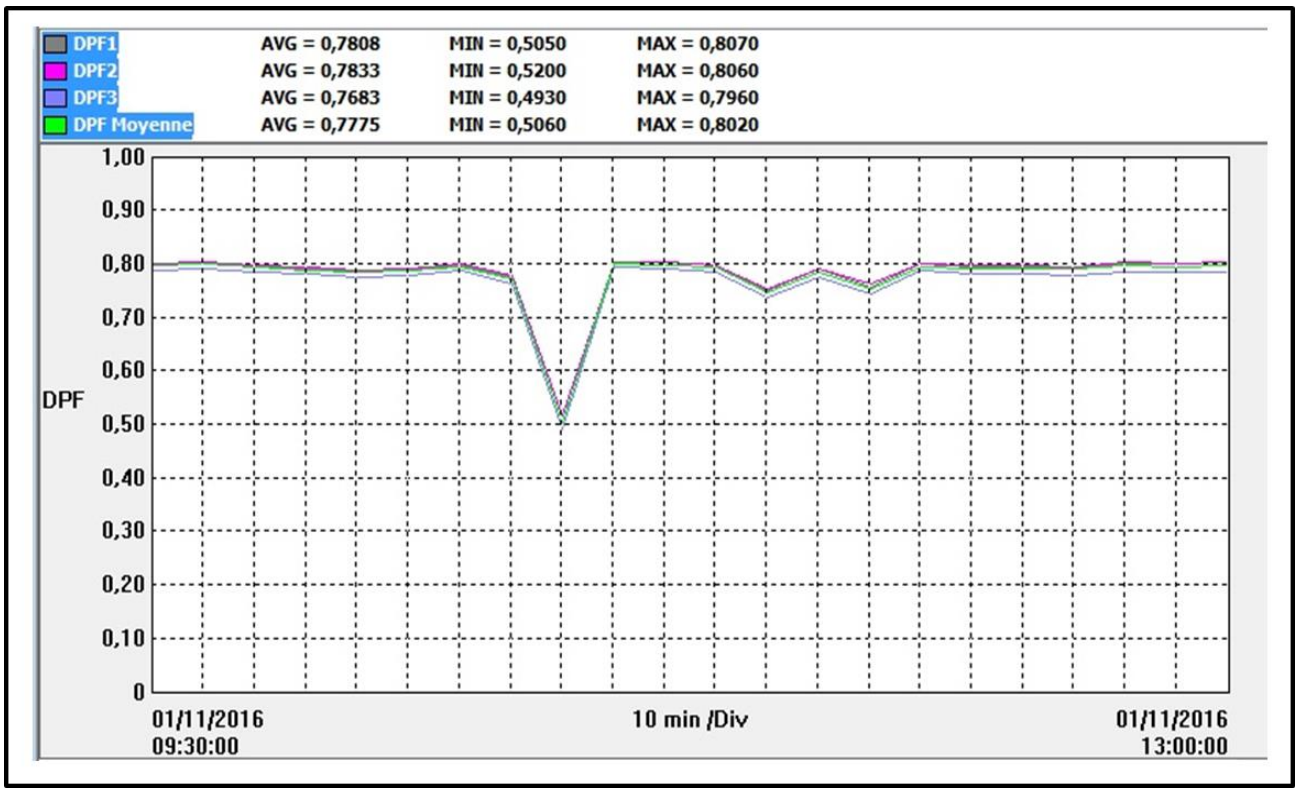


Figure 61: Variation du facteur de déplacement de puissance avant la compensation pour le condensateur N°3

6. Variation de la puissance appelée après la compensation

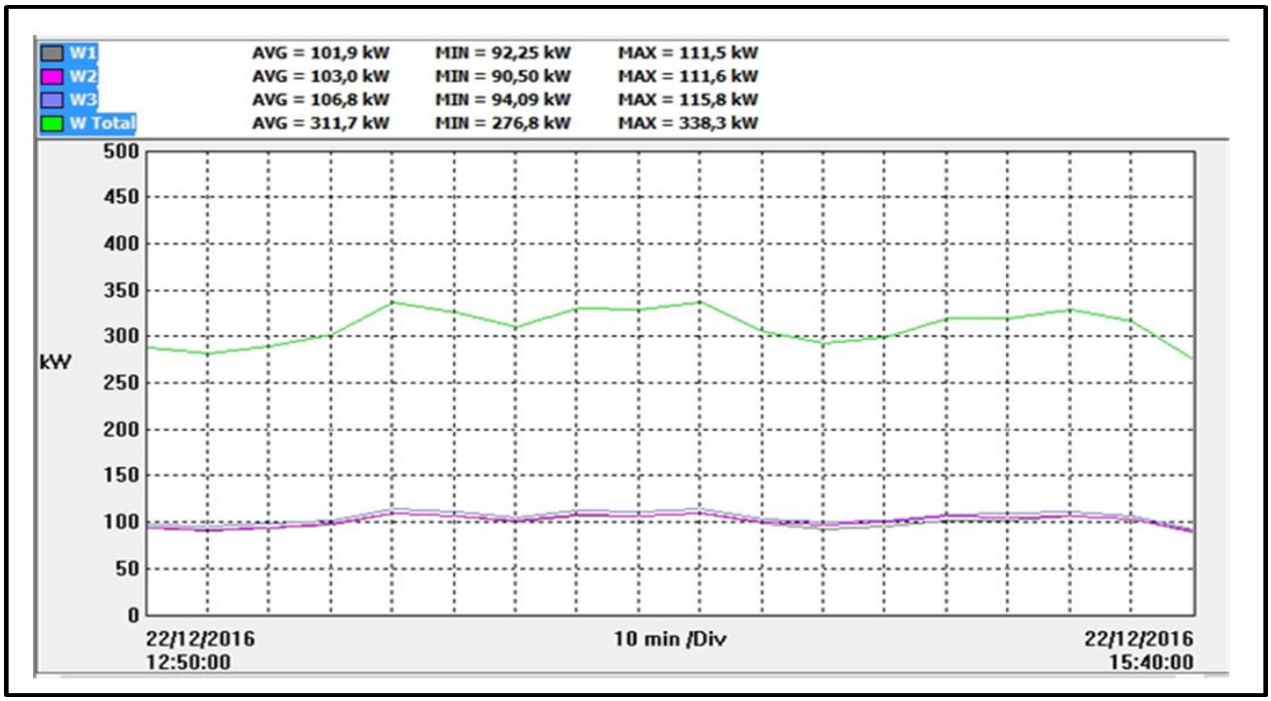


Figure 62: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°1

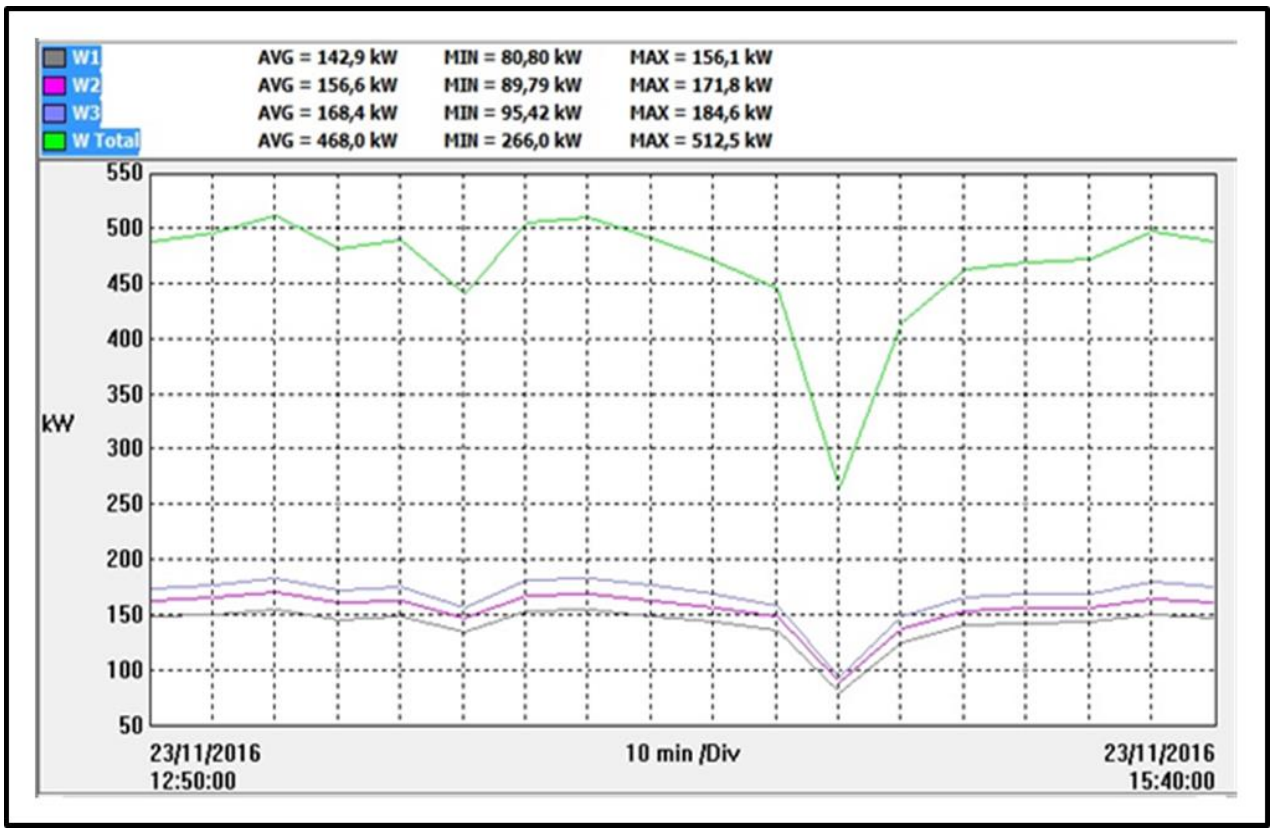


Figure 63: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°2

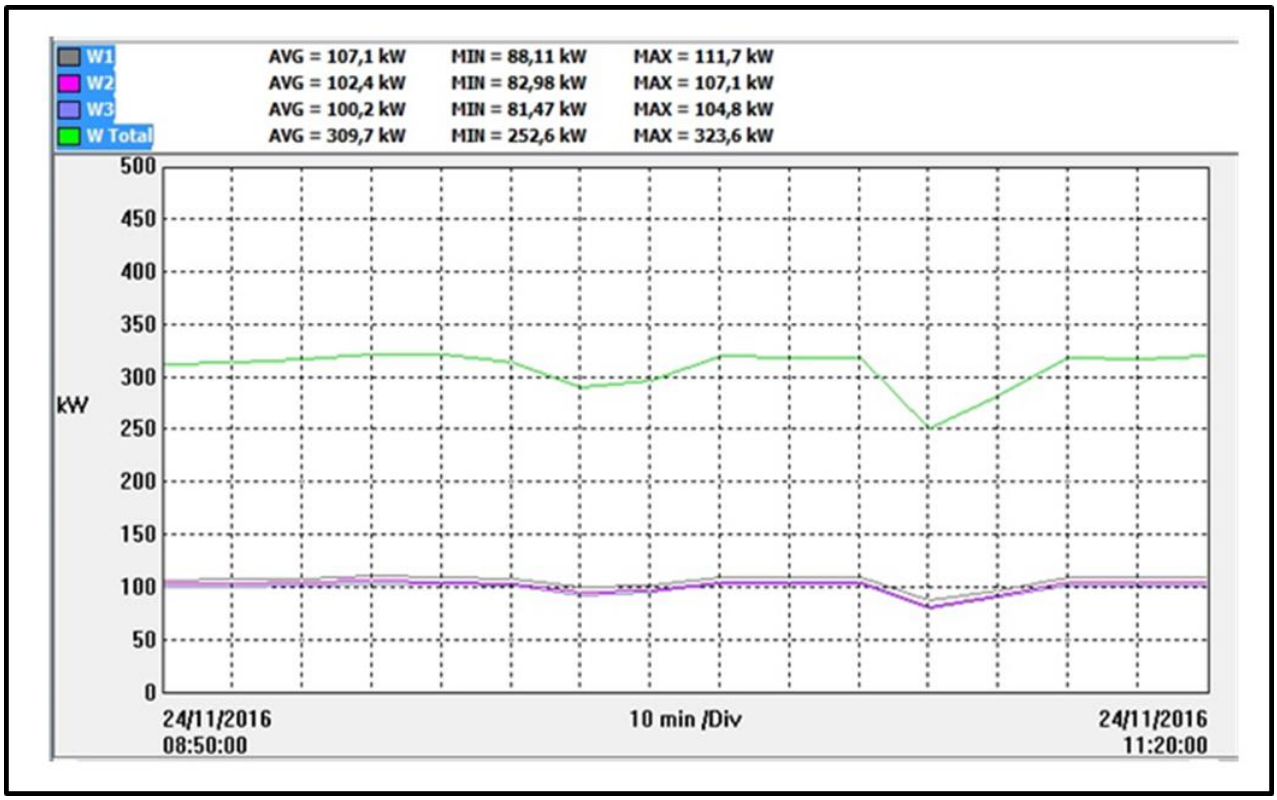


Figure 64: Variation de la puissance appelée après la compensation pour le condensateur N°3

7. Variation de la puissance apparente après la compensation

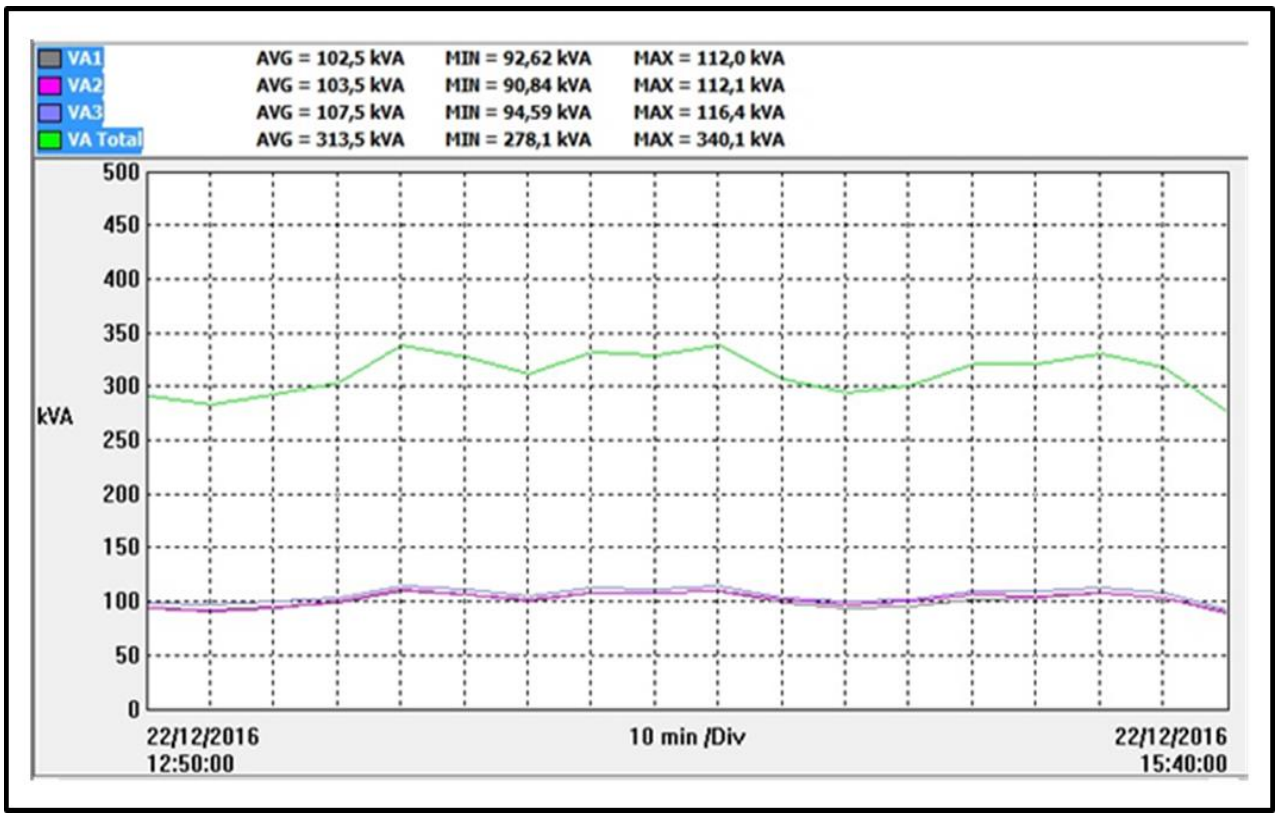


Figure 65: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°1

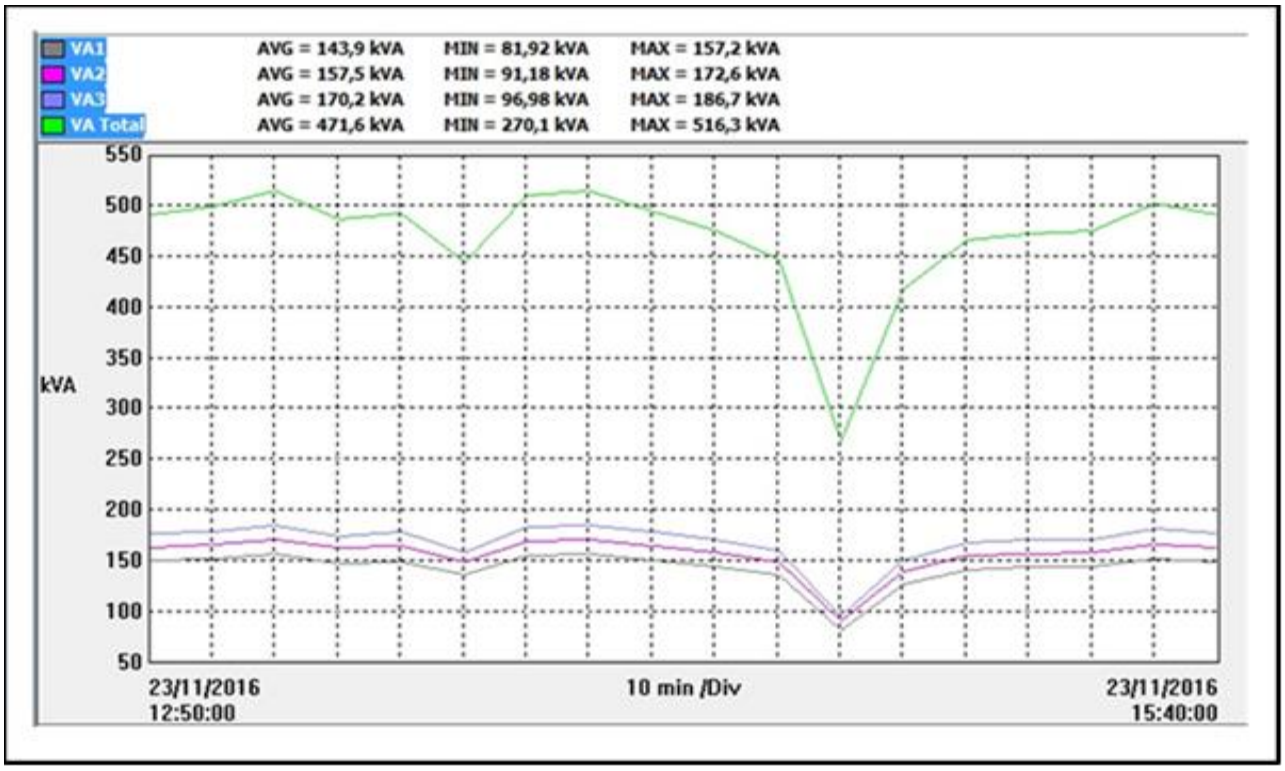


Figure 66: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°2

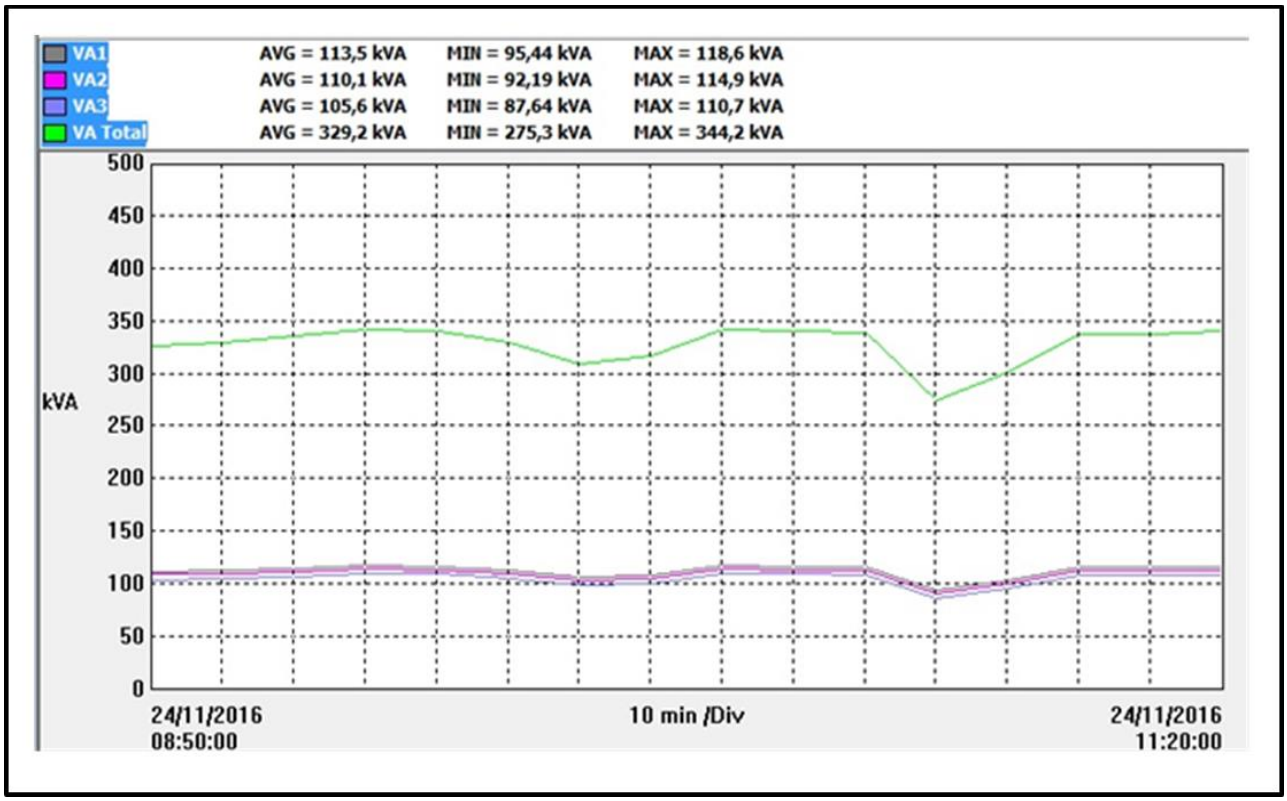


Figure 67: Variation de la puissance apparente après la compensation pour le condensateur N°3

8. Variation de la puissance réactive après la compensation

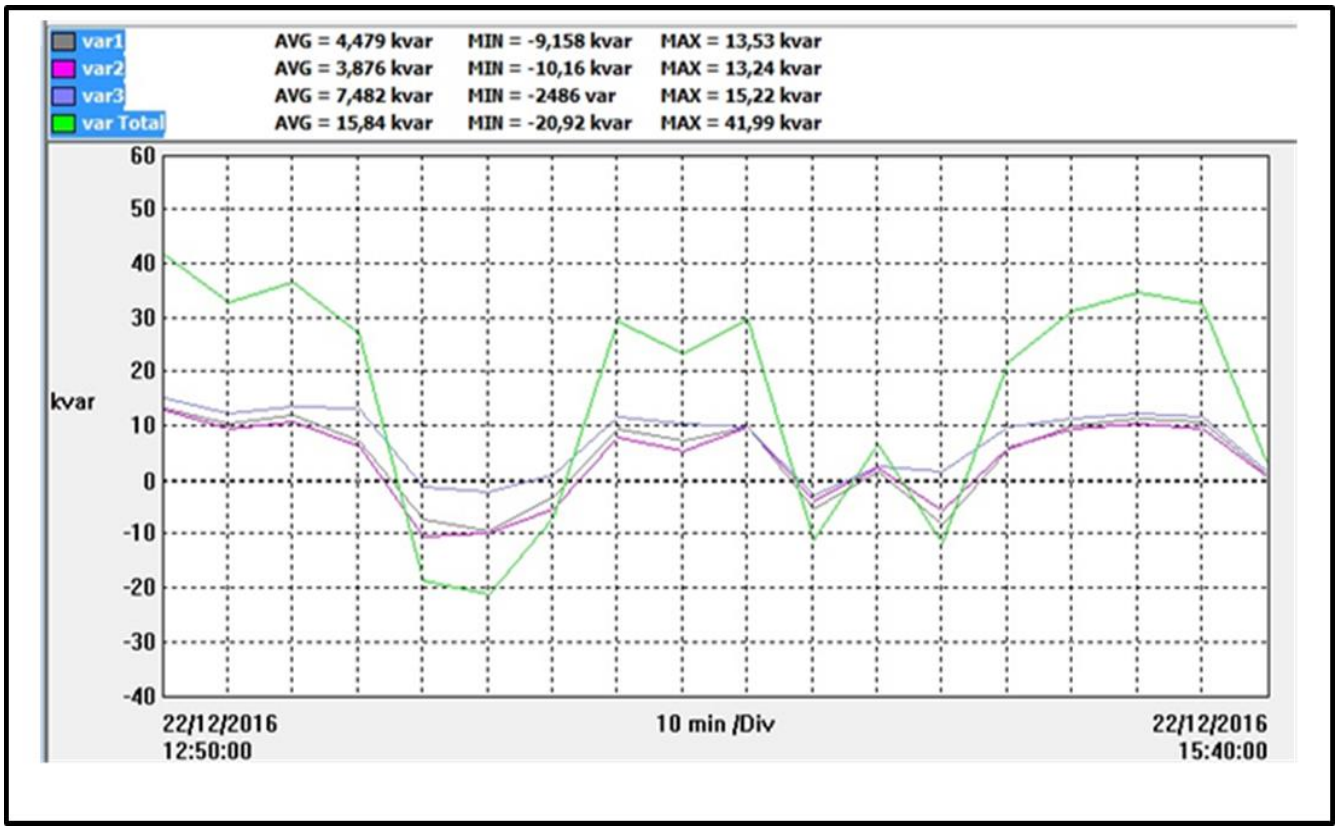


Figure 68: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°1

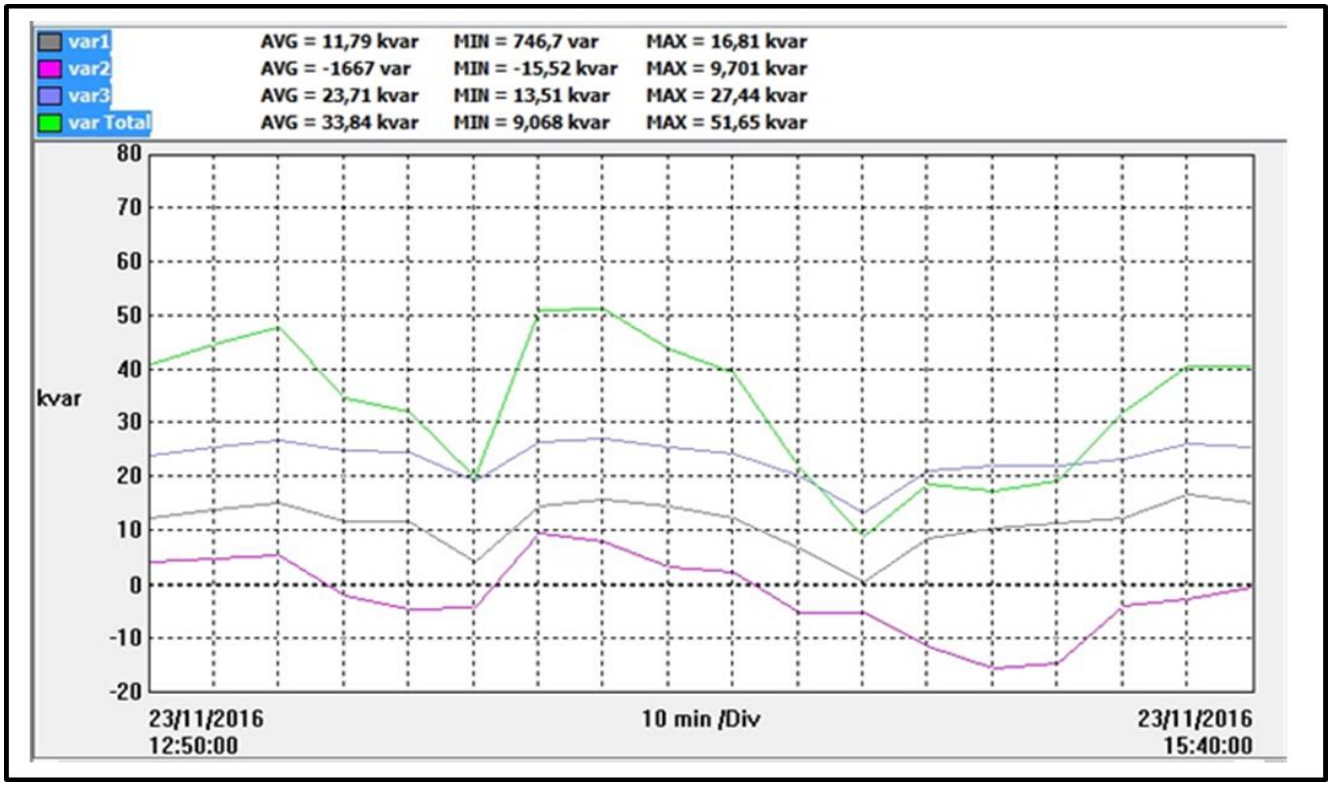


Figure 69: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°2

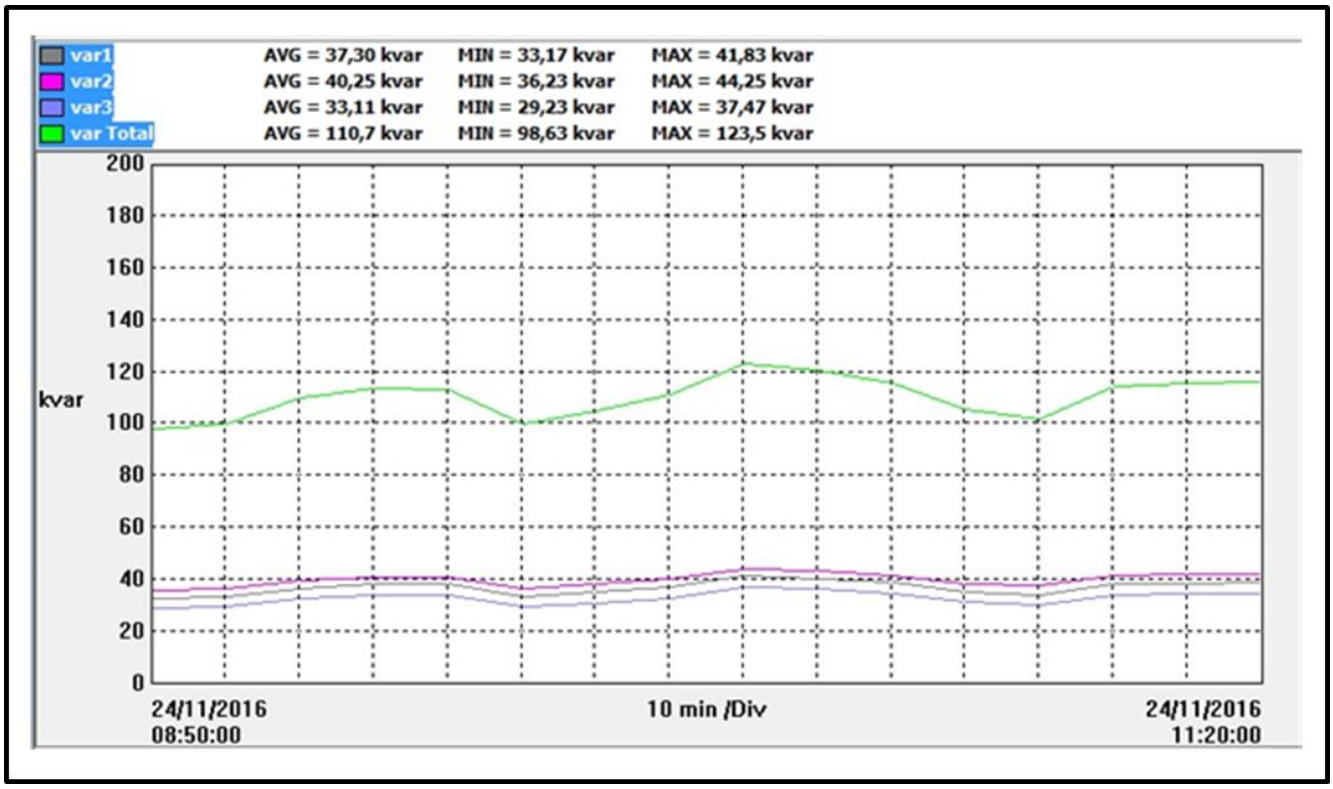


Figure 70: Variation de la puissance réactive après la compensation pour le condensateur N°3

9. Variation du facteur de déplacement de puissance

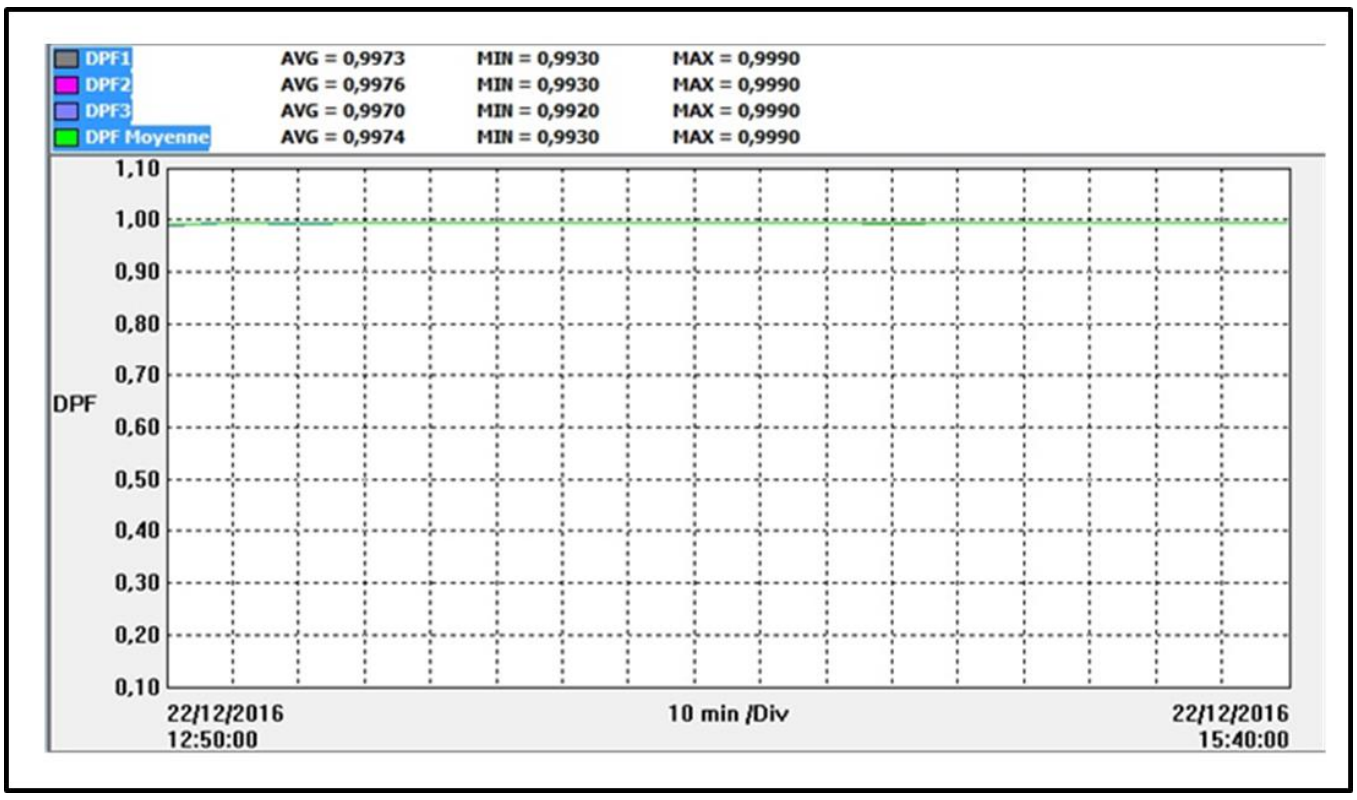


Figure 71: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°1

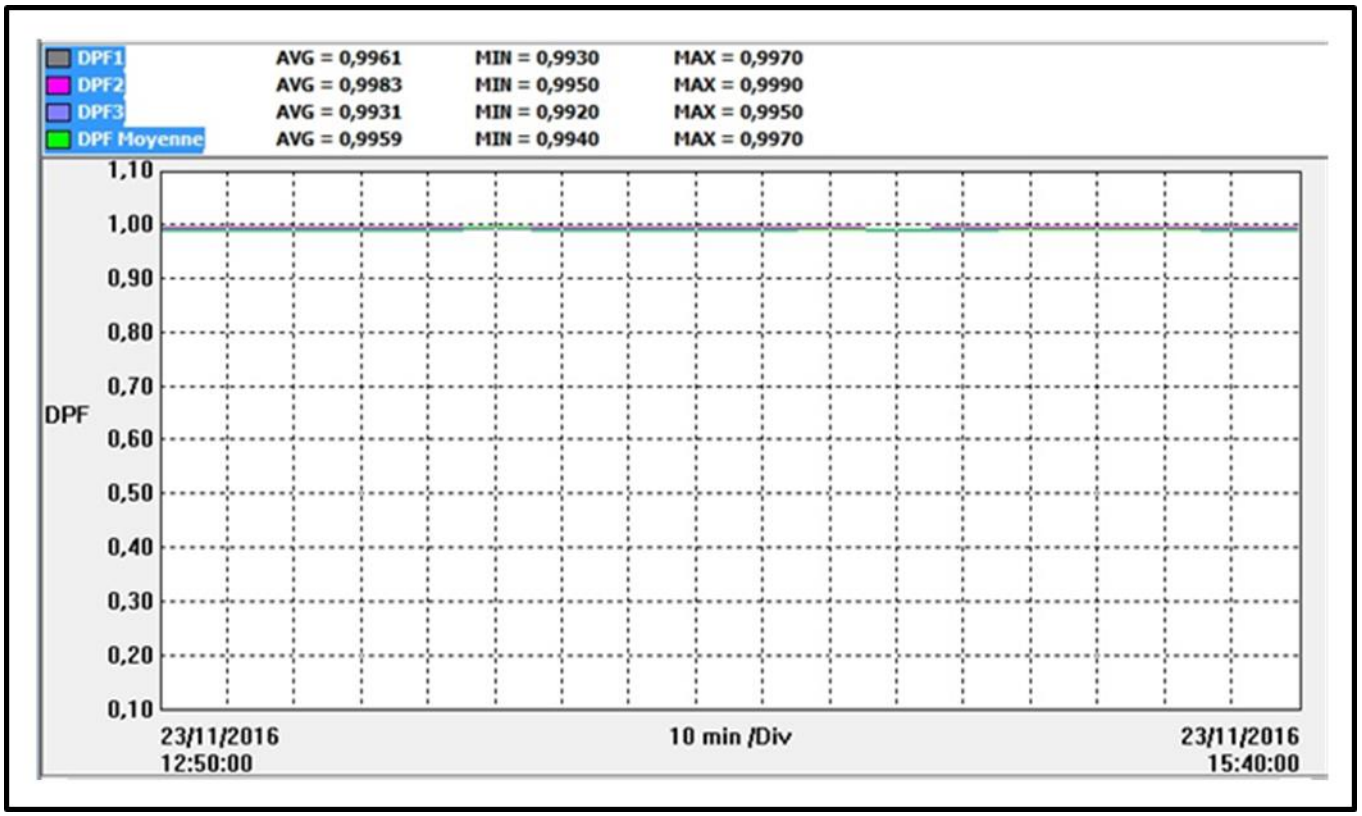


Figure 72: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°2

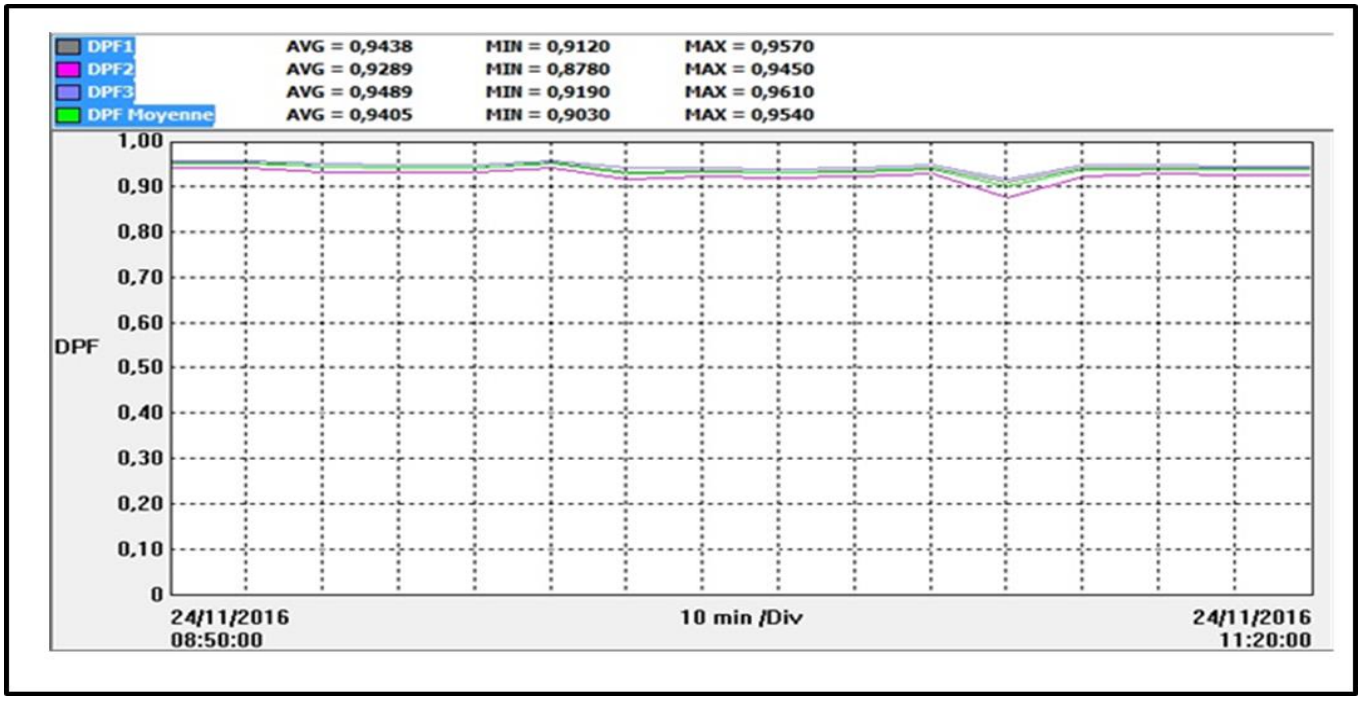


Figure 73: Variation du facteur de déplacement de puissance pour le condensateur N°3

Annexe II

I. Variation des valeurs de NOx pour l'année 2016

Tableau 19: Variation de NOx du mois de janvier 2016

Date	Concentration de NOx en [mg/Nm3]
01.01.2016	1006,8
02.01.2016	999,1
03.01.2016	930,1
04.01.2016	829,6
05.01.2016	894,6
06.01.2016	854,1
07.01.2016	888,6
08.01.2016	831
09.01.2016	788,6
10.01.2016	767,4
13.01.2016	682,4
14.01.2016	981,3
15.01.2016	883
16.01.2016	643
17.01.2016	676,6
18.01.2016	786,8
19.01.2016	753
20.01.2016	750,6
21.01.2016	622,1
22.01.2016	700,7
23.01.2016	712,5
24.01.2016	684,2
25.01.2016	713,5
26.01.2016	804,5
28.01.2016	839,2
29.01.2016	776,5
30.01.2016	882,9
31.01.2016	949,5

Tableau 20: Variation de NOx du mois de Février 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.02.2016	809,4
02.02.2016	859,2
03.02.2016	809,2
04.02.2016	863,8

05.02.2016	832,3
06.02.2016	761
07.02.2016	823,9
08.02.2016	826,2
09.02.2016	1048,9
10.02.2016	1064,5
11.02.2016	1051
12.02.2016	1097,7
13.02.2016	1108,3
14.02.2016	1113,5
15.02.2016	1097,5
16.02.2016	1020,3
17.02.2016	1015
18.02.2016	878,7
19.02.2016	862,2
20.02.2016	952,6
21.02.2016	918,6
22.02.2016	1040,3
23.02.2016	942,2
24.02.2016	1140,5
25.02.2016	1158
26.02.2016	933,3
27.02.2016	911,7
28.02.2016	1015,2
29.02.2016	1005,4

Tableau 21: Variation de NOx du mois d'avril 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
09.04.2016	925,4
10.04.2016	835,9
12.04.2016	947,9
13.04.2016	883,5
14.04.2016	1021,6
16.04.2016	952
17.04.2016	997,3
18.04.2016	962,2
19.04.2016	1036,4
21.04.2016	1012,5
22.04.2016	1087,9
23.04.2016	1068,5
24.04.2016	1047,5
25.04.2016	1034
26.04.2016	964,8

27.04.2016	1129,7
28.04.2016	976,3
29.04.2016	970,2
30.04.2016	1012,5

Tableau 22: Variation de NOx du mois de mai 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
02.05.2016	790,9
03.05.2016	1154,4
04.05.2016	1107,5
05.05.2016	971,1
06.05.2016	1012,7
07.05.2016	981,5
08.05.2016	912,9
09.05.2016	961,6
10.05.2016	859,2
11.05.2016	902,9
12.05.2016	1056,1
13.05.2016	1122,7
14.05.2016	1058,6
15.05.2016	957,3
16.05.2016	957,7
17.05.2016	1041,5
18.05.2016	1108,1
19.05.2016	1092,9
20.05.2016	1016,2
21.05.2016	992,8
22.05.2016	871,5
23.05.2016	853,6

Tableau 23: Variation de NOx du mois d'Août 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
08.08.2016	895,9
09.08.2016	1105,5
10.08.2016	1069,6
11.08.2016	980,9
12.08.2016	1038,1
13.08.2016	1014,8
14.08.2016	1097,3
16.08.2016	1030,9

17.08.2016	1066,4
18.08.2016	1013,4
19.08.2016	992,8
20.08.2016	1018,5
21.08.2016	971,1
22.08.2016	847,7
23.08.2016	826,9
24.08.2016	1106,4
25.08.2016	1118,3
26.08.2016	1057
27.08.2016	1034,2
28.08.2016	961,2
29.08.2016	1053,5
30.08.2016	1134,5
31.08.2016	1153,8

Tableau 24: Variation de NOx du mois de septembre et d'octobre 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.09.2016	1047,9
02.09.2016	1029,3
03.09.2016	1132,2
04.09.2016	1182,4
21.10.2016	1059,5
22.10.2016	938,3
23.10.2016	1000,8
24.10.2016	1071,2
26.10.2016	996,4
27.10.2016	996,2
28.10.2016	886,9
29.10.2016	807,2
30.10.2016	908,1
31.10.2016	977,2

Tableau 25: Variation de NOx du mois de Novembre 2016

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.11.2016	976
02.11.2016	1108,2
03.11.2016	987,7
04.11.2016	946,5
05.11.2016	935,3

06.11.2016	927,9
07.11.2016	957
08.11.2016	971,6
09.11.2016	965,7
10.11.2016	1017
11.11.2016	1094,8
12.11.2016	1048,6
13.11.2016	1040,3
14.11.2016	976,4
15.11.2016	972,3
16.11.2016	1022,9
17.11.2016	1034,8
21.11.2016	1152,9
22.11.2016	1133,9
23.11.2016	1102,2
24.11.2016	1033,1

II. Variation des concentrations des émissions NOx au cours de l'année 2017

Tableau 26: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de janvier 2017

Date	Concentration de NOx en [mg/Nm3]
05.01.2017	1102,7
06.01.2017	1119,3
07.01.2017	1177,2
08.01.2017	1088,4
09.01.2017	1031,9
10.01.2017	1110
11.01.2017	1077,5
12.01.2017	1025,1
13.01.2017	1020
14.01.2017	1018,3
15.01.2017	1024,1
16.01.2017	1032
17.01.2017	978,5
18.01.2017	895,1
19.01.2017	920,3
20.01.2017	806,4
21.01.2017	957,1
22.01.2017	999,2
23.01.2017	976,2
24.01.2017	994,4
25.01.2017	947,2

26.01.2017	962
27.01.2017	992
28.01.2017	1039,7
29.01.2017	953,6
30.01.2017	1027,1
31.01.2017	1049,2

Tableau 27: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de février 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.02.2017	916,1
02.02.2017	948,5
03.02.2017	1023,4
04.02.2017	1093,3
05.02.2017	1087,6
06.02.2017	1043,2
07.02.2017	1104,9
08.02.2017	977
09.02.2017	878,7
10.02.2017	900,8
11.02.2017	858,4
12.02.2017	890,3
13.02.2017	887,6
14.02.2017	922,5
15.02.2017	861,4
16.02.2017	867,4
17.02.2017	965,2
18.02.2017	948,3
19.02.2017	968,6
20.02.2017	1008,3
21.02.2017	1064,2
23.02.2017	978,1
24.02.2017	1114,2
25.02.2017	1024,1
26.02.2017	1107,3
27.02.2017	1029,8
28.02.2017	967

Tableau 28: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de mars et d'avril 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.03.2017	1031,5
02.03.2017	1078,2
05.04.2017	1047,2
06.04.2017	969,3
07.04.2017	839,1
08.04.2017	913,5
09.04.2017	823,7
10.04.2017	835,9
11.04.2017	806,2
12.04.2017	946,4
13.04.2017	998,2
14.04.2017	792,5
16.04.2017	817,9
18.04.2017	921
19.04.2017	932,7
20.04.2017	942,3
21.04.2017	999,4
22.04.2017	943,4
23.04.2017	952,8
24.04.2017	1157,4
25.04.2017	1165,8
26.04.2017	1057,3
27.04.2017	1052,2
28.04.2017	938,2
29.04.2017	995,6
30.04.2017	1020,8

Tableau 29: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de mai 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.05.2017	1083,6
02.05.2017	1021,9
03.05.2017	1103,1
04.05.2017	1031,4
07.05.2017	1193,4
08.05.2017	1100,8
09.05.2017	1115,2
10.05.2017	1101,7
11.05.2017	1020,6
12.05.2017	1078,4

13.05.2017	1112,6
14.05.2017	1083,2
16.05.2017	1153,8
17.05.2017	1096,9
18.05.2017	1116,1
19.05.2017	1118,5
20.05.2017	1149,8
21.05.2017	1014,3
22.05.2017	1147,4
23.05.2017	1154,6
25.05.2017	1074,9
26.05.2017	1068
30.05.2017	1150,5
31.05.2017	1184,2

Tableau 30: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de juin 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.06.2017	1020,2
04.06.2017	1184,6
06.06.2017	1144,3
07.06.2017	1068,4
08.06.2017	1026,1
09.06.2017	1025,1
10.06.2017	1039,9
13.06.2017	991,1
14.06.2017	965
15.06.2017	915,6
16.06.2017	938,2
17.06.2017	903,5
18.06.2017	1029,1
19.06.2017	1019,8
20.06.2017	999,6
21.06.2017	939,2
22.06.2017	1002,2
23.06.2017	876,9
26.06.2017	901,3
27.06.2017	942,4
28.06.2017	1001,9
29.06.2017	998,8
30.06.2017	952,9

Tableau 31: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de juillet 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
01.07.2017	899
02.07.2017	920,6
03.07.2017	895,4
04.07.2017	896,5
05.07.2017	941,1
06.07.2017	983,5
07.07.2017	1017,8
12.07.2017	1072,3
13.07.2017	1065,3
14.07.2017	1111,1
15.07.2017	1021,6
16.07.2017	1011,7
17.07.2017	955,2
18.07.2017	912,2
19.07.2017	977,9
20.07.2017	863,1
21.07.2017	910,1
22.07.2017	858,9
23.07.2017	875,3
24.07.2017	976,3
25.07.2017	803,6
26.07.2017	826,5

Tableau 32: Variation des concentrations des émissions NOx pour le mois de septembre et d'octobre 2017

Date	Concentration de Nox en [mg/Nm3]
16.09.2017	1150,3
17.09.2017	1161,9
19.09.2017	1149,6
20.09.2017	1155,7
21.09.2017	1072,2
22.09.2017	1148,8
23.09.2017	1170,1
25.09.2017	1141,7
26.09.2017	1140,2
27.09.2017	952,4
28.09.2017	930,9
30.09.2017	1004,3
01.10.2017	1000,7
02.10.2017	966,7

03.10.2017	976,2
04.10.2017	972,2
05.10.2017	892,4
06.10.2017	908,5
07.10.2017	940,6
08.10.2017	858,8
09.10.2017	977,5