

N°81



UNIVERSITE D'ABOMEY-CALAVI (UAC)

Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur (ED-SDI)

**Master de Recherche en Efficacité Energétique et Energies
Renouvelables**

Rapport de Stage

Thème

**Conception d'un logiciel pour
l'efficacité énergétique des moteurs
industriels.**

Présenté par :

Mathieu Mahougnon **KAKPO**

Sous la direction de :

Docteur Latif **FAGBEMI**,

Maître de Conférences des Universités CAMES.

EPAC/UAC (BENIN)

DEDICACE

À ma très chère mère,

À mon cher père,

Je dédie ce travail.

REMERCIEMENTS

« Il faut toujours remercier l'arbre à karité sous lequel on a ramassé de bons fruits pendant la bonne saison. » C'est avec cette belle citation du célèbre écrivain Ahmadou KOUROUMA (1927–2003) que je voudrais dire toute ma gratitude à tous ceux qui de près ou de loin, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réalisation de ce travail.

- ❖ J'exprime ma gratitude à mon Maître de mémoire, Docteur Latif FAGBEMI, Maître de Conférences des Universités CAMES. Merci à vous très cher Professeur pour votre disponibilité inconditionnelle et pour votre accompagnement. Merci pour votre encouragement.

Mes remerciements vont également à l'endroit de :

- ❖ Professeur Titulaire Antoine VIANOU, Directeur de l'Ecole Doctorale des Sciences de l'Ingénieur de l'Ecole Polytechnique d'Abomey-Calavi (ED-SDI/EPAC)
- ❖ Professeur Clément AHOUANNOU, Coordonnateur du Master Recherche en Efficacité Énergétique et Energies Renouvelables.
- ❖ Professeur Aristide HOUNGAN, Coordonnateur-Adjoint du Master de Recherche Efficacité Énergétique et Energies Renouvelables ;
- ❖ Tous les enseignants intervenant dans la formation du Master Recherche en Efficacité Énergétique et Energies Renouvelables pour toute l'attention qu'ils m'ont consacrée durant ma formation ;
- ❖ Monsieur Gabriel MONTEIRO, Technicien Supérieur en Maintenance Biomédicale et Hospitalière qui a contribué activement à la réalisation du présent document. Merci à vous pour votre disponibilité et détermination ;
- ❖ Tous mes parents, collègues, amis et proches.

RESUME

Le besoin de la maîtrise de l'énergie ne cesse d'être une préoccupation majeure pour tous. C'est ainsi qu'après avoir même mis sur pied un système énergétique, l'on procède périodiquement à l'auditer sur le plan énergétique afin d'y chercher des points d'économies tant d'énergie que financière ; ce qui pointe de doit, la notion d'efficacité énergétique. Cette dernière est appliquée tant au niveau des bâtiments qu'au niveau des industries. Puisque la recherche d'efficacité est périodique, plusieurs outils informatiques ont été développés en ce qui concerne l'évaluation de l'efficacité énergétique dans le bâtiment mais très peu d'outils informatiques dans le domaine des moteurs industriels. Ce travail s'est donc consacré à la mise en place d'un outil dans ce sens. Il s'agit d'un logiciel conçu à l'aide de WinDev dans son langage WLangage, qui demande juste de renseigner un certain nombre de valeurs concernant le moteur telles que la tension, le courant, l'efficacité nominale, la puissance nominale, puis qui nous donne, après calculs en son sein, l'état du moteur avec des recommandations pour une meilleure efficacité du moteur. Après conception, nous avons appliqué le logiciel à trois différents moteurs électriques en fonctionnement dans l'industrie cimentière de CIMBENIN. Les résultats ont révélés qu'un de ces moteurs, le moteur CM2BM01MM01 fonctionne dans de meilleures conditions avec une bonne efficacité énergétique (rapport de charge évalué à 74%). En ce qui concerne le deuxième moteur, le moteur CM1FN42_M1, les résultats ont révélés que le moteur fonctionne également dans de meilleures conditions avec une bonne efficacité énergétique (rapport de charge évalué à 92%). Mais le logiciel nous a informé que la vitesse d'usure des composants du moteur est importante, ce qui engendra un vieillissement précoce dudit moteur. Le logiciel a donc recommandé de bien vouloir changer ledit moteur en utilisant un moteur de puissance nominale supérieure à l'actuelle (132kW) de telle sorte que le

rapport de charge soit compris entre 70 et 85%. Le troisième moteur étudié, le moteur CM2FN15 quant à lui, fonction en déperdition énergétique assez prononcée avec un rapport de charge évalué à 49%. Le logiciel a donc recommandé de bien vouloir changer ledit moteur en utilisant un moteur de puissance nominale inférieure à l'actuelle (160kW) de telle sorte que le rapport de charge soit compris entre 70 et 85%.

Mots clés : énergie, efficacité énergétique, outil informatique, moteur industriel

ABSTRACT

The need to control energy is a major concern for everyone. This is why, after having even set up an energy system, it is periodically audited to look for energy and financial savings; this is what the concept of energy efficiency is all about. The concept of energy efficiency is applied to both buildings and industries. Since the search for efficiency is periodic, several computerized tools have been developed for the evaluation of energy efficiency in buildings but very few computerized tools in the field of industrial motors. This work was therefore devoted to the implementation of a tool in this sense. It is a software program designed using WinDev in its WLanguage, which just asks us to enter a certain number of values concerning the motor such as voltage, current, rated efficiency, rated power, and then gives us, after calculations within it, the state of the motor with recommendations for better motor efficiency. After design, we applied the software to three different electric motors in operation in the cement industry of CIBENIN. The results revealed that one of these motors, the CM2BMM01MM01 motor operates in better conditions with a good energy efficiency (load ratio evaluated at 74%). For the second motor, the CM1FN42_M1 motor, the results revealed that the motor also operates in better conditions with good energy efficiency (load ratio evaluated at 92%). However, the software informed us that the wear rate of the engine components is high, which will lead to early aging of the engine. Therefore, the software recommended to change the motor by using a motor with a higher power rating than the current one (132kW) so that the load ratio is between 70 and 85%. The third motor studied, the CM2FN15 motor, has a fairly pronounced energy loss function with a load ratio estimated at 49%. Therefore, the software recommended to change the said motor by using a

motor with a lower power rating than the current one (160kW) so that the load ratio is between 70 and 85%.

Key words : energy, energy efficiency, computerized tool, industrial engine

LISTE DES TABLÉAUX

<u>Tableau 1</u> : Facteur de correction de l'efficacité d'un moteur à induction à charge partielle	23
<u>Tableau 2</u> : Caractéristiques de trois différents moteurs.....	34

LISTE DES FIGURES

<u>Figure 1</u> : courbe de rendement d'un moteur [1].....	9
<u>Figure 2</u> : Image du compteur d'énergie Siemens SENTRON PAC3200.....	19
<u>Figure 3</u> : Image de la base des données du logiciel	32
<u>Figure 4</u> : Image de l'environnement du travail du logiciel	33
<u>Figure 5</u> : Cas du moteur du broyeur CM2BM01MM01	35
<u>Figure 6</u> : Cas du moteur du broyeur CM2BM01MM01, recommandation	35
<u>Figure 7</u> : Cas du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1	36
<u>Figure 8</u> : Cas du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1, recommandation	36
<u>Figure 9</u> : Cas du moteur du filtre séparateur CM2FN15.....	37
<u>Figure 10</u> : Cas du moteur du filtre séparateur CM2FN15, recommandation	37
<u>Figure 11</u> : Processus d'audit énergétique	viii
<u>Figure 12</u> : Photo de la plaque signalétique du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1	xii
<u>Figure 13</u> : Photo de la plaque signalétique du moteur du broyeur CM2BM01MM01	xii
<u>Figure 14</u> : Photo de la plaque signalétique du moteur du filtre séparateur CM2FN15.....	xiii

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	ii
RESUME.....	iii
ABSTRACT	v
LISTE DES Tableaux.....	vii
LISTE DES FIGURES	vii
TABLE DES MATIERES	viii
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE.....	2
Introduction.....	2
1.1. Notion d'efficacité énergétique.....	2
1.2. Notion d'audit énergétique.....	10
1.3. Outils informatiques disponibles dans le cadre de l'efficacité énergétique	12
Conclusion.....	18
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE	19
Introduction.....	19
2.1. Matériel	19
2.2. Méthodologie	20
Conclusion.....	29
CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET APPLICATION DU LOGICIEL	30
Introduction.....	30

3.1. Présentation du logiciel.....	30
3.2. Etude de cas.....	33
Conclusion.....	38
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES.....	39
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	vii
ANNEXES	viii

INTRODUCTION GENERALE

La consommation énergétique mondiale augmente de plus en plus et cette croissance, qui touche tous les domaines, traduit les besoins de plus en plus exigeants de confort dans le bâtiment, de performance des systèmes de production. C'est d'ailleurs pour cette raison que de nombreuses industries s'inscrivent dans une démarche de recherche des gisements d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique à travers des audits énergétiques. Nous remarquons alors que la problématique qui se pose, est celle de l'efficacité énergétique en général.

Aujourd'hui, plusieurs outils informatiques sont disponibles pour l'évaluation de l'efficacité énergétique dans le bâtiment mais très peu d'outils informatiques existent pour celle dans l'industrie. C'est le cas de la non-existence de l'outil informatique pour l'évaluation de l'efficacité énergétique des moteurs industriels alors que la consommation énergétique des moteurs industriels représente plus de 60% de la consommation totale d'une industrie [1]. Il faudra donc créer un outil informatique afin de trouver une solution à ce problème. C'est le but du présent travail dont l'objectif et le thème ne font qu'un : « Conception d'un logiciel pour l'évaluation de l'efficacité énergétique des moteurs industriels. »

Le présent travail est subdivisé en trois chapitres. Le premier présente des généralités sur l'efficacité énergétique et les outils informatiques disponibles dans ce sens. Le deuxième aborde la méthodologie suivie pour la conception de l'outil informatique pour l'efficacité énergétique des moteurs industriels. Le dernier chapitre nous a permis de valider le logiciel avec une étude de cas. Ces trois chapitres sont encadrés par une introduction générale et une conclusion générale et perspectives.

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR L'EFFICACITE ENERGETIQUE

Introduction

Nous ne pouvons pas parler de l'efficacité énergétique sans parler de l'audit énergétique. Ce sont des expressions qui vont très souvent de pair. Ainsi, nous aurons à travers ce chapitre, une idée générale sur les travaux déjà effectués dans le cadre de l'efficacité énergétique dans l'industrie comme dans les bâtiments et par extension, sur la notion d'audit énergétique,

1.1. Notion d'efficacité énergétique

Généralement, l'on a tendance à confondre la notion d'« efficacité énergétique » à celle d'« économie d'énergie ». Même si ces deux termes désignent tous les deux, une diminution de la quantité totale d'énergie consommée, il est important de notifier qu'il existe une différence entre eux.

1.1.1. Définition

On rencontre une kyrielle de définitions quand l'on aborde la notion d'efficacité énergétique mais qui tend toujours vers un même but. Dans certaine littérature, elle est définie comme l'ensemble des actions menées en vue de réduire les dépenses imputables à l'utilisation de l'énergie dans le respect des normes en vigueur [1]. Pour d'autres, c'est le rapport de l'énergie exploitée de manière "utile" sur le total de l'énergie dont on dispose globalement. Ce rapport tend donc vers 1 dans un système parfait, où on ne peut observer de pertes, de gaspillage, et où les différents produits permettant le transport et l'utilisation de cette énergie sont "parfaits" [2]. Pour d'autres encore, c'est le rapport entre le service délivré au sens large (performance, produit, énergie, confort, service) et l'énergie qui y a été consacrée [3]. Dans son acception la plus large, cette définition de l'efficacité énergétique englobe

à la fois l'amélioration du « rendement énergétique » des installations et des équipements et la « sobriété énergétique [4] », entendue comme la réduction des consommations d'énergie liée à la modification du comportement du consommateur.

1.1.2. Economie d'énergie et efficacité énergétique

L'économie d'énergie a trait aux mesures qui réduisent la quantité totale d'énergie consommée. Ces mesures visent habituellement à diminuer le gaspillage ou à éliminer les étapes ou les activités non essentielles. L'économie d'énergie est exprimée en unités d'énergie économisée. Comme exemples de mesures d'économie, mentionnons le fait d'éteindre les lumières des pièces non occupées, l'utilisation de thermostats programmables ou la réduction du temps de préchauffage d'un four. On réalise souvent des économies simplement en modifiant les procédés ou en établissant un horaire des activités. En outre, des économies considérables peuvent être réalisées à peu de frais.

Le terme « **économie d'énergie** » est encore terni par l'image négative des toutes premières mesures mises à l'essai qui consistaient parfois à « ne pas consommer d'énergie ». Les méthodes modernes d'économie efficaces sont celles qui permettent d'atteindre des résultats similaires, voire supérieurs, en consommant moins d'énergie.

Le terme « **efficacité énergétique** » a trait à une utilisation plus judicieuse de l'énergie, de façon à maintenir le niveau de production et à fabriquer des produits de qualité similaire ou supérieure tout en utilisant moins d'énergie. Afin d'améliorer l'efficacité énergétique, il est habituellement nécessaire d'investir des capitaux et d'avoir recours à des technologies plus énergétiques. Par ailleurs, afin de mesurer l'amélioration de l'efficacité énergétique, un niveau de référence doit être établi. Ce dernier

peut être une étape d'un processus ou d'une activité « avant la prise de mesures », une installation ou un processus de référence. L'efficacité énergétique, c'est-à-dire la différence en termes de la quantité d'énergie réellement utilisée, est habituellement exprimée en pourcentage. Ce gain, en pourcentage, est uniquement applicable au rendement énergétique du matériel concerné. Comme exemples de mesures d'efficacité énergétique, mentionnons le remplacement des dispositifs de chauffage par des systèmes à infrarouge, l'amélioration du brûleur d'une chaudière ou le préchauffage de l'air de combustion d'un four.

Aux fins du présent document, on ne fera pas de distinction entre les mesures d'efficacité énergétique et d'économie d'énergie ou encore d'amélioration. Elles seront simplement appelées mesures d'efficacité énergétique.

La gestion de l'énergie consiste en un plan d'amélioration continue qui vise à intégrer l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique aux activités d'une entreprise. On définit la gestion de l'énergie comme étant l'utilisation judicieuse de l'énergie pour atteindre des objectifs préétablis. Il faut souligner qu'une saine gestion de l'énergie ne doit pas réduire l'efficacité de la production, ni la qualité du produit.

Une saine gestion de l'énergie est également bénéfique pour l'environnement. En diminuant sa consommation d'énergie, une entreprise réduit la quantité d'émissions et de polluants relâchés dans le sol, dans l'atmosphère et dans les eaux. Les entreprises devraient tirer profit de tous les crédits et des relations publiques positives découlant de la mise en œuvre de mesures d'efficacité énergétique. Dans certains cas, les avantages environnementaux peuvent compenser les coûts liés aux mesures d'efficacité. Avant de passer à une action de protection de l'environnement, une entreprise devrait, selon les stratégies qu'elle a adoptées, communiquer avec les services

publics locaux et des organismes gouvernementaux afin de savoir si des programmes d'aide sont offerts dans ce cadre ou pas.

La plupart des programmes d'efficacité énergétique et d'économie d'énergie tiennent compte de tous les services publics, y compris toutes les sources d'énergie, l'eau achetée ou traitée et les égouts, de même que des services secondaires, comme la vapeur ou l'air comprimé produits sur place.

1.1.3. Efficacité énergétique du bâtiment

L'efficacité énergétique d'un bâtiment est définie comme étant le rapport d'énergie exploitée de manière utile sur le total d'énergie qu'il dispose globalement [2]. Parmi les solutions d'amélioration de cette efficacité, il est d'usage de distinguer les solutions dites « passives » qui consistent à réduire la consommation d'énergie des équipements et des matériaux grâce à une meilleure performance intrinsèque et les solutions dites « actives » visant à optimiser les flux et les ressources.

1.1.3.1. Les solutions « passives »

Elles consistent à accroître les qualités intrinsèques d'un bâtiment afin d'optimiser l'utilisation des énergies qui lui sont fournies. En un mot, l'efficacité énergétique passive est axée sur l'enveloppe du bâtiment et son isolation. Ainsi, de nombreux paramètres peuvent être pris en compte lors de la construction d'un bâtiment. Parmi ces paramètres, figure en bonne place [5] :

- l'orientation et la capacité du bâtiment à profiter de l'énergie lumineuse, à capter et à se protéger de l'énergie solaire ;
- l'isolation thermique renforcée grâce à des faux plafonds, à des matériaux comme la laine minérale, et ou l'isolation thermique par l'extérieur à l'aide de briques de polystyrène expansé ou extrudé ;

- un meilleur rapport des surfaces des ouvertures sur les surfaces opaques (ROM).

En dehors des paramètres liés à la construction d'un bâtiment, il faut aussi faire recours au remplacement des équipements énergivores par ceux économiques. Des lampes à incandescence peuvent donc être remplacées par des lampes économiques (fluorescentes ou LED) dans le cas de l'éclairage par exemple. Des systèmes de chauffage à base d'énergies renouvelables (systèmes solaires) peuvent aussi être utilisés en lieu et place des systèmes de chauffage électrique (ces derniers serviront juste d'appoint). Notons que nous disposons d'un indicateur appelé RO défini comme étant la consommation totale d'énergie en kilowattheure (kWh) du bâtiment sur la surface occupée par ce bâtiment. La valeur de cet indicateur comparée à la valeur normative, nous permet d'apprécier l'enveloppe du bâtiment.

1.1.3.2. Les solutions « actives »

Elles visent à optimiser la consommation des bâtiments en supprimant les gaspillages, grâce à une gestion et à un pilotage automatisés des énergies du bâtiment en fonction de leurs usages. L'efficacité énergétique active est une approche systémique et globale de gestion de l'énergie centrée sur le pilotage de l'ensemble des consommations énergétiques du bâtiment. Elle consiste dans un premier temps à installer dans le bâtiment les outils de mesure et de comptage permettant un audit de sa performance énergétique puis dans un second temps à mettre en œuvre des solutions de pilotage de ses différents usages énergétiques pour optimiser les consommations. Ceci fait appel à l'utilisation des **systèmes technologiques « intelligents »**.

En effet, afin de piloter efficacement les équipements du bâtiment, il est nécessaire de mesurer ses consommations réelles, local par local, usage par usage. Les systèmes de mesure, d'analyse des données et d'affichage énergétique permettent aux occupants de connaître leurs consommations

d'énergie par usage, notamment le chauffage, l'eau chaude sanitaire, la climatisation, l'éclairage et les appareils auxiliaires. Ces systèmes mesurent également certains paramètres complémentaires comme la température intérieure et extérieure, les degrés-jours. L'efficacité des solutions d'efficacité énergétique active repose sur quatre 'étages' complémentaires [5] :

- ❖ **les technologies** : appareils de mesure, interfaces de communication, dispositifs d'automatisme, logiciels ;
- ❖ **les procédures** : règles d'utilisation des équipements (par exemple : à partir d'une certaine température, quand personne n'est dans la maison de vacances, la maison se met automatiquement en mode « hors gel »), règles de maintenance... ;
- ❖ **le comportement des utilisateurs** : formation, sensibilisation à la sobriété énergétique ;
- ❖ **la maintenance** : services ou télé-services d'exploitation et de maintenance pour le maintien de la performance dans le temps.

1.1.4. Efficacité énergétique dans l'industrie

Dans l'industrie, l'efficacité énergétique est le rapport entre l'énergie minimale nécessaire au fonctionnement d'une installation et l'énergie totale consommée [6]. Dans les faits, elle est confondue avec l'efficacité énergétique qui désigne l'état d'un système dont la consommation d'énergie est minimisée pour un service rendu égal. L'efficacité énergétique se jouera alors ici, sur les principaux équipements (les moteurs, les variateurs de vitesse, les systèmes d'air comprimé, les organes cinématiques à haut rendement, capteurs autonomes, ...) utilisés par l'industrie, spécialement sur les moteurs.

Un moteur est un système énergétique qui transforme toute forme d'énergie en énergie mécanique. Le type de l'énergie à l'entrée permet donc de catégoriser le moteur en moteur thermique ou moteur électrique. Les moteurs servent à entraîner plusieurs appareils. En industrie, les moteurs électriques sont les plus souvent utilisés. Généralement, ils consomment jusqu'à 60% de la consommation d'énergie électrique. Il est donc important de leur appliquer les mesures d'efficacité énergétique afin de réduire les coûts liés à l'énergie.

On distingue deux types de moteurs : **les moteurs classiques** ou standards et les moteurs à haut rendement ou efficaces. Les moteurs classiques sont les plus utilisés même si on note beaucoup de pertes à leur niveau ; c'est à cause de leur coût d'achat. Par contre, **les moteurs à haut rendement**, identiques aux moteurs standards en apparence, non seulement limitent significativement les pertes énergétiques mais aussi produisent le même travail que les moteurs standards avec une faible puissance électrique à l'entrée, mais coûtent plus chers à l'achat. Les pertes énergétiques d'un moteur sont souvent dues à la résistance électrique des enroulements du moteur et aux frictions mécaniques des parties mobiles [7]. Une autre variante qui permet d'économiser encore plus d'énergie est **l'utilisation de moteur électrique efficace à régime variable**. C'est-à-dire que la vitesse de rotation du moteur s'ajuste à la demande de puissance [7]. Plusieurs paramètres permettent d'analyser le fonctionnement d'un moteur électrique. Il s'agit de la puissance à l'entrée du moteur, de la puissance à la sortie du moteur, de l'efficacité du moteur, de la puissance nominale, de l'efficacité nominale et du rapport de charge. Pour une bonne efficacité énergétique, un moteur doit fonctionner dans l'intervalle d'un rapport de charge compris entre 70 et 85% [1]. En bref, pour une bonne efficacité énergétique au niveau des moteurs, il faut :

- faire fonctionner les moteurs avec un rapport de charge compris entre 70 et 85% ;
- adapter la vitesse de rotation du moteur à celle de la machine qu'il entraîne ;
- utiliser au besoin, les moteurs à haut rendement.

Les constructeurs fournissent un document dans lequel figure la courbe de rendement du moteur. Cette courbe donne l'efficacité du moteur en fonction du rapport de charge $E_m = f(RC)$. Cette courbe présente l'allure suivante :

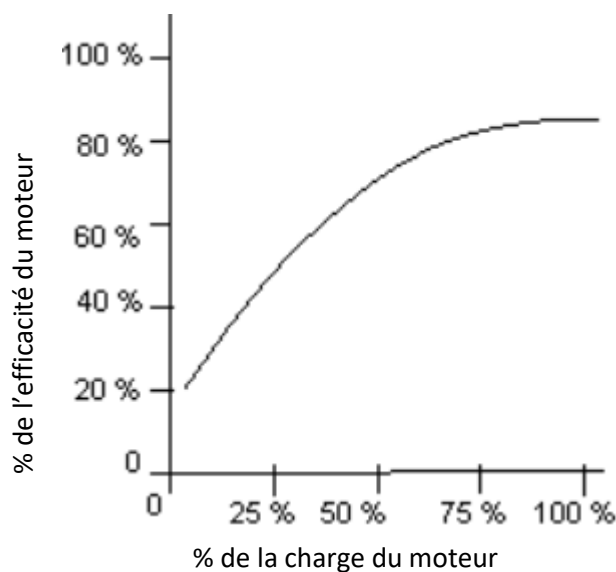


Figure 1 : courbe de rendement d'un moteur [1]

Cette courbe permet de conclure que :

- au-dessous de demi-charge, le moteur consomme beaucoup d'énergie
- au-dessus de la pleine charge, l'efficacité du moteur connaît une réduction. Ceci limite la durée de vie du moteur.

Ceci confirme clairement la théorie selon laquelle, pour une bonne efficacité énergétique, un moteur doit fonctionner dans l'intervalle d'un rapport de charge compris entre 70 et 85%.

1.2. Notion d'audit énergétique

1.2.1. Définition

On entend par **audit énergétique**, toute opération de diagnostic de la consommation d'énergie au sein d'un bâtiment, d'un établissement ou d'une entreprise à travers la réalisation de recherches, d'études et de contrôles visant à évaluer le niveau de performance énergétique, à analyser les insuffisances, les causes et à proposer des actions correctives. L'audit énergétique est aussi considéré comme une étude permettant d'établir l'inventaire des mesures d'économie d'énergie applicables à un édifice ou à une industrie, tout en prenant soin de ne pas affecter la qualité et le niveau de confort dans le cas d'un bâtiment, ou affecter la qualité des denrées alimentaires dans le cas d'une chambre froide.

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 norme NF EN 16247 (Voir annexe 2) définit les exigences générales de méthode et de qualité pour la préparation de l'audit énergétique, sa réalisation et sa restitution. Ces méthodes sont définies en fonction de l'activité audité. Ainsi, pour les bâtiments, nous avons la norme NF EN 16247-2:2014 ; pour les procédés industriels la norme NF EN 16247-3:2014 et la norme NF EN 16247-4:2014 pour le transport.

Nous remarquons que l'audit énergétique fait appel à deux expressions : « économie d'énergie » et « efficacité énergétique ». Les paragraphes ci-dessous donnent les détails pour ces deux expressions.

1.2.2. Les étapes d'audit énergétique

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 d'une entreprise. Il est ainsi le point de départ essentiel pour une bonne définition des actions de maîtrise de l'énergie. Il comporte trois étapes, généralement réalisées en concertation étroite avec les responsables techniques de l'entreprise [8].

Étape 1 - Analyse préalable ou pré-diagnostic en énergie

Cette étape essentielle a pour objectif d'avoir une vision globale de la situation de l'entreprise, ce qui permet de mettre en évidence les actions « sans regret » à coûts faibles, voire nuls et de l'orienter vers des audits plus ciblés concernant les actions les plus rentables. Pour mener à bien cette étape, il est important que l'auditeur dispose d'outils et d'un canevas de recueils de renseignements qui puissent lui permettre de mener à bien et efficacement son étude.

Étape 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 sur une partie des gisements d'économies identifiés par l'auditeur. 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.

Étape 3 - Actions et solutions

En accord avec l'entreprise et en fonction des résultats de la phase précédente, l'auditeur détermine les actions à mener sur les procédés et les utilités (chauffage, éclairage, climatisation,...). 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 sans oublier d'éventuels impacts environnementaux. Ceci permet d'établir les temps de retour brut. Les actions peuvent inclure une optimisation des achats d'énergie.

L'audit est évidemment à adapter à la taille des entreprises et à leurs priorités, aux actions déjà réalisées, à la nature des procédés industriels concernés, au poids relatif de l'énergie dans le compte d'exploitation.

Dans la suite de notre travail, nous allons juste nous focaliser sur l'efficacité énergétique dans l'industrie.

1.3. Outils informatiques disponibles dans le cadre de l'efficacité énergétique

Un nombre considérable de recherches dans le cadre de la réglementation de l'éclairage a débouché sur la mise en place d'outils informatiques tels que les logiciels de calcul et les assistants web. Le premier objectif de ces outils est d'alléger la tâche des techniciens en matière de dimensionnement du système d'éclairage. Au nombre de ces outils, on distingue :

- ❖ Le logiciel **TracePro** (Etats-Unis 1994) développé par Lambda Research Corporation, Littleton, Massachusetts. Le logiciel est conçu pour la conception et l'analyse de systèmes optiques et d'éclairage. Il a connu des Editions telles que TracePro LC, TracePro Standard, TracePro Expert, TracePro ultime. A l'aide de cet outil, les utilisateurs créent une géométrie à l'aide de l'interface CAO du logiciel ou par importation de modèles. Ils appliquent ainsi, des propriétés optiques directement dans leur modèle et leur source de surface de tracé de rayons sous forme de jeux de rayons afin de visualiser la propagation de la lumière.

❖ Le logiciel **Daysim** (1998) développé par Christoph Reinhart. Ce logiciel permet la modélisation de la quantité annuelle d'éclairage dans et autour des bâtiments. Ainsi, à l'aide cet outil, les utilisateurs peuvent facilement réaliser les tâches suivantes :

- la modélisation de systèmes de façade statiques et dynamiques ;
- la spécification d'un système de contrôle de l'éclairage électrique du type d'un interrupteur on/off manuel, un détecteur de présence ou une cellule de gradation de la lumière en fonction des disponibilités de lumière naturelle ;
- la définition des horaires d'occupation, des charges internes et du statut des protections solaires qui peuvent être couplées directement avec des engins de simulation thermique tels qu'EnergyPlus, eQuest et TRNSYS ;
- l'obtention des métriques dynamiques basées sur le climat telles que l'autonomie dynamique et l'UDI (Useful Daylight Illuminance), l'éblouissement annuel ainsi que les consommations annuelles d'éclairage électrique, sur base de la puissance électrique installée.

Mais notons que l'utilisation de ce logiciel nécessite une connaissance minimale du logiciel RADIANCE car DAYSIM est basé sur celui-ci ; de plus, il ne présente aucun outil de rendu de couleur.

❖ Le logiciel **Dialux** (2009) développé par l'entreprise DIAL GmbH à Lüdenscheid, plateforme de services pour les techniques du bâtiment et de l'éclairage. Il permet le calcul de la lumière du jour et de la lumière artificielle en extérieur ou dans un espace intérieur et la vérification des paramètres d'installation de l'éclairage. Ce calcul repose sur la norme DIN 5034 (Deutsches Institut für Normung EV) et la publication 110 de la CIE. Les algorithmes de Dialux utilisent la méthode de la

radiosité : les surfaces du modèle sont discrétisées en facettes et le rayonnement (émis et reçu) est calculé pour chacune des facettes. L'éclairement en chaque point est calculé sur base du bilan des rayonnements lumineux reçus et émis depuis les facettes. Dialux permet de calculer les éclairagements, les facteurs lumières du jour, les luminances, et permet de réaliser des études d'ombrage ainsi que des rendus. Les possibilités de modélisation intégrées étape par étape permettent de créer des modèles simples, tandis que le logiciel permet l'importation de modèles conçus sur d'autres programmes de DAO pour des projets géométriquement plus complexes. Le maillage de calcul est entièrement paramétrable. Ce didacticiel a été développé en utilisant la version Dialux 4.9.0.2. La dernière version à cette date (avril 2012) est Dialux 4.10.0.1 et l'historique des versions et des innovations est disponible sur le site de DIAL. Dans ce cadre, cet outil facilite :

- le calcul d'éclairement moyen avec visualisation des résultats sous forme de courbes isolux, point par point ou diagramme des nuances ;
 - l'implantation individuelle ou groupée de luminaires ;
 - la visualisation d'une représentation 3D du projet sous forme de rendus réels ;
 - l'obtention de la bibliothèque de mobilier évolutive ;
 - le choix sur les textures du mobilier et des parois ;
 - la réalisation des évaluations énergétiques selon les normes DIN V 18599 et EN 15193
- ❖ La plateforme web de simulation **FENER-WEBPORT Simulation (2011)** : Développé par Dr Bruno BUENO. Cette plateforme a pour objectif de :

- faciliter le développement de nouveaux produits de façade par les fabricants de composants de façade ;
- quantifier les avantages et choisir l'un ou l'autre système de fenêtre par les architectes et les concepteurs de bâtiment dans les premières étapes de leurs projets.

Comme moyens d'action, la plateforme web de simulation compare des scénarios en termes de demande d'énergie, de métriques dynamiques de lumière du jour et d'éblouissement. La plateforme peut être utilisée à partir de différents appareils portables. Elle inclut une possibilité de visualisation interactive 3D de la géométrie. Mais elle n'a pas de possibilité de rendu d'éclairage intérieur.

- ❖ Le plug-in **DIVA-for-Rhino (2012)** Développé par Graduate school of design de l'Université de Harvard et ayant pour but, la modélisation de la lumière du jour et de l'énergie pour le modèleur Rhinoceros. Ainsi, on peut facilement s'en servir pour :
 - Evaluer la performance environnementale de bâtiments et de paysages urbains individuels, notamment des cartes de rayonnement, des rendus photo-réalistes, des mesures de l'éclairage naturel basées sur le climat ;
 - analyser l'éblouissement annuel et individuel par pas, des conditions de conformité à la lumière du jour ;
 - calculer l'énergie et la charge d'une seule zone thermique.
- ❖ « M@DOC » conçu par **LAFIA TAMOU Kora Alex** et **ZOHOUN Chadrac Elie** en 2019. Il s'agit d'un logiciel prenant en compte deux aspects à savoir le dimensionnement de l'éclairage dans une pièce à construire et l'audit du confort visuel dans un bâtiment existant. « M@DOC » est un assistant web programmé sur la base des langages

HTML5, CSS3, JavaScript et PHP. Il dispose d'une base de donnée MySQL bien fournie sur les tables et normes en vigueur de l'éclairage. Le dimensionnement de l'éclairage grâce au logiciel se fait par calcul du flux lumineux nécessaire dans la pièce compte tenu de l'éclairement minimal indiqué par des normes. De plus, le logiciel renseigne sur la quantité totale de lampes à installer ainsi que le temps de dépréciation des luminaires prévus dans le local. L'audit du confort visuel en outre permet de vérifier si le confort visuel est atteint dans une pièce existante et de proposer dans le cas échéant un autre système d'éclairage profitable à l'utilisateur dans le cadre de son bien-être et de sa santé visuelle. Lorsque le système d'éclairage en place est surdimensionné, l'audit permet enfin de proposer un système plus rentable en montrant à l'utilisateur l'économie réalisée par rapport à l'installation précédente.

Ces outils informatiques mis en place sont très approfondis dans la modélisation de l'éclairage et du confort visuel, notamment à travers l'incorporation de Plug-ins et la proposition d'interface de modélisation et de visualisation 2D/3D. Ces deux aspects offrent aux utilisateurs une plus grande gamme de sélection de luminaire ainsi que la possibilité de visualiser le résultat du dimensionnement.

A l'instar dans le domaine de l'éclairage, les recherches ont aussi débouchées sur la mise en place d'outils informatiques en ce qui concerne la climatisation. Aux nombres de ces outils, on peut faire part de :

- ❖ **Xpair** qui permet de faire le bilan de climatisation simplifiée. Avec Xpair, les apports de chaleur par rayonnement ne sont pas évalués ; la température intérieure de confort et la température extérieure ne sont pas prises en compte ; l'humidité n'est pas prise en compte ; le COP

n'est pas utilisé. Seuls les apports de chaleur internes, les apports par les parois (murs, plancher, vitrage) sont évalués.

- ❖ **ClimaMaison** qui permet de faire le bilan thermique de climatisation. A l'instar de Xpair, ClimaMaison présente beaucoup de limites. En effet, avec ClimaMaison, les apports de chaleur par rayonnement ne sont pas évalués ; le COP n'est pas utilisé. Seuls les apports par transmission à travers les parois et les apports internes sont évalués.
- ❖ **Énergie+** qui permet l'évaluation d'un bilan thermique en été. Là aussi, c'est pour un bilan simplifié. En effet, l'humidité n'est pas prise en compte ; les équipements disponibles pour évaluer les apports de chaleur interne sont limités ; le COP n'est pas utilisé ; les apports de chaleur au niveau des murs ne sont pas évalués séparément.

Mais en 2019, **ABALLO KASSIFA O. Michaël & WEKE Cyrille Raoul D.** ont développé un outil dynamique appelé **Clim CONFORT MADOC** pour le dimensionnement des climatiseurs dans les bâtiments en milieu tropical humide. La méthode de dimensionnement adoptée pour la conception de Clim CONFORT MADOC est la méthode Carrier, méthode qui tient compte de tous les paramètres entrant en compte dans le dimensionnement des installations de climatisation et le langage de programmation utilisé est le WLangage. L'outil obtenu permet également de dimensionner la puissance du climatiseur nécessaire pour le conditionnement d'air et respecte les normes environnementales et de performance énergétique.

Conclusion

Dans ce chapitre développé, nous avons faire la lumière sur ce que c'est que l'efficacité énergétique en faisant part de la différence entre l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique, en traitant l'efficacité énergétique dans le bâtiment puis l'efficacité énergétique dans l'industrie. Nous avons également faire la lumière sur la notion d'audit énergétique en faisant part des étapes d'audit énergétique et des outils informatiques disponibles dans le cadre de l'efficacité énergétique. Les outils informatiques développés sont pour l'efficacité énergétique dans le bâtiment. L'efficacité énergétique, puisqu'elle englobe généralement l'industrie et le bâtiment, nous avons alors décidé de développer un outil informatique pour apprécier l'efficacité énergétique dans les industries en général et l'efficacité énergétique des moteurs en particulier. C'est à cet exercice que nous allons nous donner dans la suite de ce travail.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE

Introduction

Dans ce chapitre, nous allons faire part du matériel utilisé dans le cadre de notre travail et la méthodologie adoptée. La méthodologie consistera à décrire l'évaluation du rapport de charge, paramètre clé permettant de juger de l'efficacité d'un moteur, puis à mettre sous forme algorithme, les étapes de cette évaluation.

2.1. Matériel

Pour la conception du logiciel, nous avons utilisé l'Atelier de Génie Logiciel (AGL) WinDev.

Pour l'application du logiciel conçu, nous avons utilisé le compteur d'énergie Siemens SENTRON PAC3200 pour relever les valeurs de tension, du courant et du cosinus phi des moteurs choisis.



Figure 2 : Image du compteur d'énergie Siemens SENTRON PAC3200

2.2. Méthodologie

2.2.1. Evaluation du rapport de charge

La détermination de l'efficacité énergétique au niveau des moteurs passe par l'analyse d'éléments de fonctionnement du moteur. Comme éléments d'analyse, on distingue la puissance à l'entrée du moteur, la puissance à la sortie du moteur, l'efficacité du moteur, la puissance nominale, l'efficacité nominale, le facteur de correction et le rapport de charge.

La puissance à l'entrée du moteur : dans le cas des moteurs électriques, c'est la puissance électrique qui approvisionne le moteur. Généralement notée P_e , elle peut être mesurée à l'aide d'un wattmètre ou calculée par les formules suivantes :

$$P_e = UI \cos \varphi \text{ (Monophasé)} \quad (1)$$

$$P_e = UI\sqrt{3} \cos \varphi \text{ (Triphasé)} \quad (2)$$

U et I étant respectivement la tension et l'intensité et $\cos \varphi$ le facteur de puissance.

La puissance à la sortie du moteur : c'est l'énergie mécanique par unité du temps que le moteur nous restitue. Elle est généralement notée P_s et se calcule de manière itérative.

L'efficacité du moteur : généralement notée E_m , l'efficacité du moteur se calcule par la connaissance des deux précédentes puissances. C'est donc le rapport de l'énergie à la sortie sur l'énergie à l'entrée.

$$E_m = \frac{P_s}{P_e} \quad (3)$$

La puissance nominale : généralement notée P_N , elle désigne la puissance maximale que le moteur peut nous restituer. C'est une donnée du constructeur.

L'efficacité nominale : notée E_N , elle désigne l'efficacité maximale. C'est également une donnée du constructeur.

Le facteur de correction : noté FC, il désigne le rapport de l'efficacité du moteur sur l'efficacité nominale. La connaissance du rapport de charge (RC) et de la puissance nominale (P_N) permet de lire le facteur de charge (FC) dans une table.

$$FC = \frac{E_m}{E_N} \quad (4)$$

Le rapport de charge : C'est le rapport de la puissance à la sortie sur la puissance nominale. On le note RC.

$$RC = \frac{P_s}{P_N} \quad (5)$$

Nous remarquons que l'évaluation du rapport de charge nécessite le calcul de la puissance à la sortie du moteur, la puissance nominale étant une donnée du constructeur.

Calcul de la puissance à la sortie du moteur

Le calcul de la puissance à la sortie est le socle de l'étude de l'efficacité énergétique au niveau des moteurs. A la date d'aujourd'hui, aucun appareil ne permet la détermination de cette puissance du faite qu'elle est mécanique. Elle se calcule donc par itérations.

Dans un premier temps, on suppose que l'efficacité nominale du moteur est égale à l'efficacité du moteur ($E_N = E_m$) puis on calcule la puissance à la sortie du moteur par la relation :

$$P_s = P_e \times E_m = P_e \times E_N \quad (6)$$

Ensuite, on calcule le rapport de charge $RC = \frac{P_s}{P_N}$ avec lequel on lira le facteur de correction FC puisque P_N est connue (donnée de constructeur).

On calcule la nouvelle efficacité du moteur par la relation :

$$E'_m = FC \times E_N \quad (7)$$

Cette nouvelle efficacité du moteur nous permettra de calculer la nouvelle puissance à la sortie du moteur par la relation :

$$P'_s = P_e \times E'_m \quad (8)$$

On compare cette nouvelle puissance à la sortie avec la précédente puissance à la sortie puis on déterminera l'erreur commise. Si cette erreur est supérieure à l'erreur tolérée, on recalcule la puissance à la sortie en calculant d'abord le nouveau rapport de charge et une nouvelle efficacité du moteur. La nouvelle puissance à la sortie calculée à nouveau sera comparée à sa précédente puis l'erreur commise sera déterminée à nouveau et comparée à l'erreur tolérée. On procédera ainsi par itération jusqu'à atteindre l'erreur tolérée. Nous résumons cette méthodologie dans l'algorithme ci-dessus.

Détermination du facteur de correction

Le facteur de correction est lu ou déterminé grâce à la connaissance du rapport de charge et de la puissance nominale du moteur. Le tableau ci-dessous nous renseigne sur les facteurs de correction de l'efficacité d'un moteur à induction à charge partielle.

Tableau 1 : Facteur de correction de l'efficacité d'un moteur à induction à charge partielle

Rapport de charge (kW/kW nominal)	Puissance nominale du moteur (kW)							
	25	50	100	150	250	500	1,000	1,500
0.10	0.728	0.812	0.864	0.899	0.923	0.940	0.953	0.963
0.15	0.757	0.836	0.884	0.915	0.936	0.951	0.962	0.970
0.20	0.782	0.856	0.900	0.928	0.947	0.960	0.969	0.976
0.25	0.794	0.866	0.908	0.934	0.952	0.964	0.973	0.979
0.30	0.808	0.878	0.917	0.942	0.958	0.969	0.977	0.982
0.35	0.826	0.891	0.928	0.950	0.964	0.974	0.981	0.985
0.40	0.841	0.903	0.937	0.957	0.970	0.978	0.984	0.988
0.45	0.849	0.909	0.941	0.960	0.973	0.980	0.986	0.990
0.50	0.970	0.976	0.981	0.984	0.986	0.989	0.991	0.992
0.55	0.976	0.981	0.985	0.987	0.989	0.991	0.993	0.994
0.60	0.980	0.985	0.988	0.990	0.991	0.993	0.995	0.995
0.65	0.984	0.988	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	1.000
0.70	0.987	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	1.000	1.000
0.75	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	1.000	1.000	1.000
0.80	0.991	0.993	0.995	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000
0.85	0.992	0.994	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.90	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
0.95	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Si le facteur de correction n'est pas lu directement dans la table ci-dessus, il est déterminé suivant les cas.

CAS 1 :

Si la puissance nominale se trouve dans la table et que le rapport de charge est situé entre deux valeurs de la table, on procède par l'interpolation pour la détermination du facteur de correction. De la même manière, si le rapport de charge se trouve dans la table et que la puissance nominale est située entre deux valeurs de la table, on procède également par l'interpolation pour la détermination du facteur de correction. Prenons l'exemple d'un moteur de puissance nominale égale à 250kW et dont le rapport de charge,

après calcul donne 0.52. La détermination du facteur de charge dans ce cas par interpolation se présente comme suit :

A $P_N = 250\text{kW}$, on a :

RC	→	FC
0.50	→	0.986
0.52	→	FC
0.55	→	0.989

$$\frac{0.55 - 0.52}{0.55 - 0.50} = \frac{0.989 - \text{FC}}{0.989 - 0.986}$$

Ainsi,

$$\underline{\underline{\text{FC} = 0.9872}}$$

CAS 2 :

Si la puissance nominale se trouve dans la table et que le rapport de charge est inférieur à 0.1, on procède par extrapolation en utilisant les deux premières valeurs immédiatement supérieures à la valeur du rapport de charge et se trouvant dans la table, c'est-à-dire les valeurs 0.10 et 0.15 pour la détermination du facteur de correction. De même, si le rapport de charge se trouve dans la table et que la puissance nominale est supérieure à 1500kW, on procède par extrapolation en utilisant les deux premières valeurs immédiatement inférieures à la valeur de la puissance nominale se trouvant dans la table, c'est-à-dire les valeurs 1000 et 1500kW pour la détermination du facteur de correction. Prenons l'exemple d'un moteur de puissance nominale égale à 100kW et dont le rapport de charge, après calcul donne 0.09. La détermination du facteur de charge dans ce cas par extrapolation se présente comme suit :

A $P_N = 100\text{kW}$, on a :

RC	→	FC
0.09	→	FC
0.1	→	0.864
0.15	→	0.884

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.884 - 0.864} = \frac{0.1 - \text{FC}}{0.864 - \text{FC}}$$

Ainsi,

$$\underline{\underline{\text{FC} = 0.86}}$$

CAS 3 :

Si la puissance nominale est inférieure à 25kW et le rapport de charge est inférieur à 0.1, pour déterminer le facteur de correction dans ce cas, on détermine d'abord le facteur de correction avec ledit rapport de charge puis avec une puissance nominale égale à 25kW (à l'aide du CAS 2). Ensuite, on détermine le facteur de correction avec ledit rapport de charge puis avec une puissance nominale égale à 50kW (à l'aide du CAS 2). Etant donné que le facteur de correction est connu pour la puissance nominale de 25kW puis pour la puissance nominale de 50kW avec ledit rapport de charge, on calcul aisément par la suite, le facteur de correction pour la puissance nominale inférieure à 25kW avec ledit rapport de charge par extrapolation. Prenons l'exemple d'un moteur de puissance nominale égale à 20kW et dont le rapport de charge, après calcul donne 0.09. La détermination du facteur de charge dans ce cas par extrapolation se présente comme suit :

- Facteur de correction avec 25kW et 0.09

A $P_N = 25\text{kW}$, on a :

RC	→	FC
0.09	→	FC
0.1	→	0.728
0.15	→	0.757

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.757 - 0.728} = \frac{0.1 - 0.09}{0.728 - \text{FC}}$$

Ainsi,

$$\underline{\underline{\text{FC} = 0.7222}}$$

- Facteur de correction avec 50kW et 0.09

A $P_N = 50\text{kW}$, on a :

RC	→	FC
0.09	→	FC
0.1	→	0.812
0.15	→	0.836

$$\frac{0.15 - 0.1}{0.836 - 0.812} = \frac{0.1 - 0.09}{0.812 - \text{FC}}$$

Ainsi,

$$\underline{\underline{\text{FC} = 0.77852}}$$

Pour le rapport de charge de 0.09, on a donc les relations suivantes pour l'extrapolation :

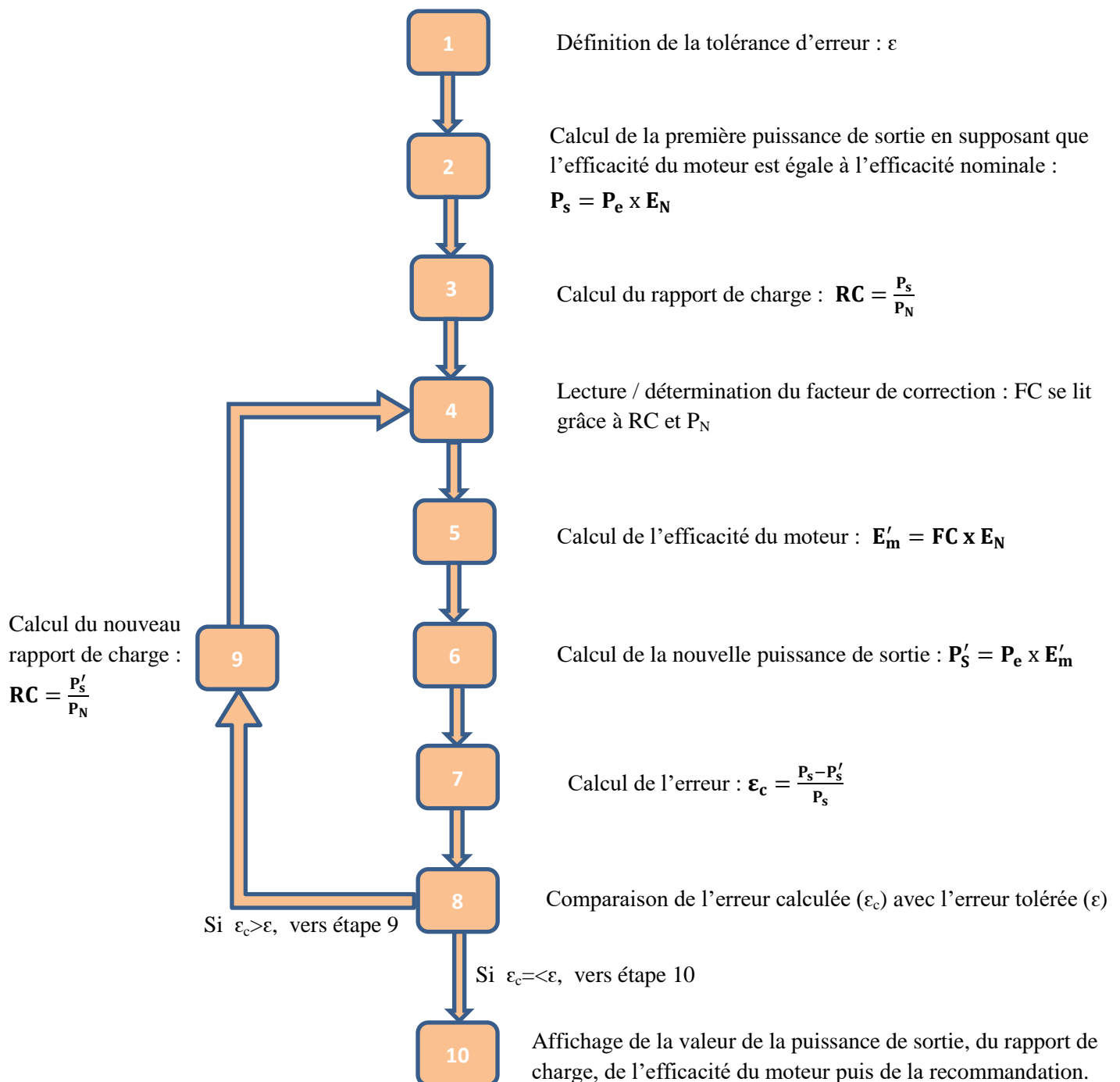
P_N		FC
20	→	FC
25	→	0.7222
50	→	0.77852

$$\frac{50 - 25}{0.77852 - 0.7222} = \frac{25 - 20}{0.7222 - \text{FC}}$$

Ainsi,

$$\underline{\underline{\text{FC} = 0.710936}}$$

2.2.2. Algorithme



Conclusion

Ce chapitre nous a permis de faire part du matériel utilisé dans l'exécution de notre travail et d'exposer la méthode suivie. Cette méthode, mise sous forme algorithme dans Ce chapitre sera transcrit en code source pour la conception du logiciel dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 3 : CONCEPTION ET APPLICATION DU LOGICIEL

Introduction

Ce chapitre est essentiellement consacré à une brève présentation du logiciel et à une étude de cas. Cette dernière nous permettra de manipuler le logiciel afin d'y ressortir les avantages et les éventuelles limites.

3.1. Présentation du logiciel

Le logiciel conçu est un logiciel d'efficacité énergétique des moteurs industriels qui permet de savoir si un moteur est utilisé avec un rapport de charge optimum. Il renseigne alors sur un ensemble de paramètres tels que la puissance à la sortie du moteur, l'efficacité du moteur, le rapport de charge puis laisse une recommandation en fonction de la valeur du rapport de charge. Le logiciel a été conçu à l'aide de l'Atelier de Génie Logiciel (AGL) WinDev, édité par PC SOFT, une société française fondé en 1984. La toute dernière version de WinDev, la version 22 est sortie fin 2016 et plus précisément au patch du 24 mai 2017. Sa récente apparition et toute la richesse de son environnement, nous a motivé à le choisir parmi tant d'autres pour la conception de notre logiciel.

En effet, le logiciel WinDev se compose d'un environnement de développement riche complet et clair, qui permet la conception de programmes simples comme avancés. WinDev se destine exclusivement au développement d'applications lourdes. Cependant, il existe une version pour les applications web (WebDev) et pour les applications mobiles (WinDev Mobile). Le logiciel utilise son propre langage de programmation le WLangage, qui possède une documentation très bien fournie, consultable depuis l'interface du logiciel. L'interface et le WLangage sont disponibles en version française, anglaise et chinoise. A noter que les versions française et

anglaise sont supportées par la même version de l'interface et qu'elles peuvent être utilisées conjointement. L'utilité de WinDev n'est plus à démontrer. En effet, il permet de développer rapidement toutes sortes d'applications, dont la complexité et les fonctionnalités peuvent être diverses et variées, ce qui peut convenir à un large panel de projets d'entreprise. Bien qu'essentiellement disponible sous Windows, WinDev permet aussi la création d'applications sur linux et Mac OS X, ce qui limite le nombre d'outils nécessaires pour couvrir ces différents systèmes d'exploitation en termes de création applicatif, un logiciel plusieurs rendus.

WinDev gère très bien les bases de données que ce soit Oracle, PostgreSQL ou encore MySQL. Il dispose d'une multitude de fonctionnalités pour lire, extraire, visualiser et gérer des tables. Pour les entreprises ne voulant pas s'encombrer d'une base de données, WinDev possède son propre système : HyperFileSQL ou HFSQL, une base de données intégrée facile à prendre en main. Grâce à la gestion avancée des bases de données on peut gérer automatiquement toute une interface fonctionnelle à partir d'une base de données.

Le design d'une application quelle qu'elle soit, est très important, mais c'est aussi une charge de travail conséquente et des coûts supplémentaires pour l'entreprise. Ce problème n'en est plus un, grâce à la palette de design d'interface que propose le logiciel, des chartes graphiques prêtes à l'emploi ou personnalisables selon le choix de l'utilisateur. Les programmes gagnent en efficience et en efficacité grâce à l'audit de performance intégré, et aux tests automatiques que l'on peut créer, modifier et exécuter dès que le besoin s'en fait sentir. C'est un bon moyen de s'assurer une bonne mise en production de l'application.

Malgré une communication qui se veut légèrement provoquante, PC SOFT sort constamment des mises à jour et des correctifs pour garantir une

fiabilité à toutes épreuves à leur produit ainsi qu'une excellente satisfaction client. Enfin si un travail de groupe a été effectué, un récapitulatif est disponible pour chaque projet, celui-ci indique les différentes personnes ayant travaillé sur le projet en précisant chaque contribution. Eu égard ce qui précède, on comprend aisément, la raison de notre choix.

Notre logiciel dispose d'une base de données qui contient les valeurs de facteur de correction en fonction du rapport de charge et de la puissance nominale pour les moteurs à induction à charge partielle. Si la puissance nominale du moteur à auditer ou le rapport de charge calculé pour lire le facteur de correction ne figure pas dans la base de données, le logiciel procède en son sein, à une interpolation ou extrapolation, selon le cas, afin de déterminer le facteur de correction. La figure suivante donne une image de la base des données.

Fiche d'enregistrement des facteurs de corrections

Rapport de Charge

Facteur Correction 1

Facteur Correction 2

Facteur Correction 3

Facteur Correction 4

Facteur Correction 5

Facteur Correction 6

Facteur Correction 7

Facteur Correction 8

Facteur Correction

ID	RC	P25	P50	P100	P150	P250	P500	P1000	P1500
1	0.10	0.728	0.812	0.864	0.899	0.923	0.940	0.953	0.963
2	0.15	0.757	0.836	0.884	0.915	0.936	0.951	0.962	0.970
3	0.20	0.782	0.856	0.900	0.928	0.947	0.960	0.969	0.976
4	0.25	0.794	0.866	0.908	0.934	0.952	0.964	0.973	0.979
5	0.30	0.808	0.878	0.917	0.942	0.958	0.969	0.977	0.982
6	0.35	0.826	0.891	0.928	0.950	0.964	0.974	0.981	0.985
7	0.40	0.841	0.903	0.937	0.957	0.970	0.978	0.984	0.988
8	0.45	0.849	0.909	0.941	0.960	0.973	0.980	0.986	0.990
9	0.50	0.970	0.976	0.981	0.984	0.986	0.989	0.991	0.992
10	0.55	0.976	0.981	0.985	0.987	0.989	0.991	0.993	0.994
11	0.60	0.980	0.985	0.988	0.990	0.991	0.993	0.995	0.995
12	0.65	0.984	0.988	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	1.000
13	0.70	0.987	0.990	0.992	0.993	0.995	0.996	1.000	1.000
14	0.75	0.989	0.992	0.994	0.995	0.996	1.000	1.000	1.000
15	0.80	0.991	0.993	0.995	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000
16	0.85	0.992	0.994	0.996	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
17	0.90	0.993	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
18	0.95	0.995	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
19	1.00	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Figure 3 : Image de la base des données du logiciel

L'environnement de travail de notre logiciel est illustré sur la ci-dessous.

The screenshot shows a software window titled "Fiche de calcul de la Puissance". At the top, there is a field "Définissez la Tolérance" with a value of "0.00000". The interface is divided into several sections:

- Calcul de la puissance d'entrée du moteur:** Includes input fields for "Intensité (A)" (0.00), "Tension (V)" (0.00), and "Facteur de puissance" (0.000000). There is a "Triphasé?" section with a toggle set to "OFF".
- Calcul de la puissance de sortie du moteur:** Includes input fields for "Efficacité Nominale" (0.00000) and "Puissance Sortie" (0.000000).
- Calcul du Rapport de charge RC:** Includes input fields for "Puissance nominale" (0.00) and "Rapport de Charge" (0.00000).

On the right side, there are sections for "Efficacité du Moteur" (0.00000), "la nouvelle puissance de sortie du moteur" (0.00), and "Erreur relative" (0.00000). There are "Valider" and "Plus" buttons on the right.

Figure 4 : Image de l'environnement de travail du logiciel

3.2. Etude de cas

Pour cette étude de cas, nous avons choisi trois différents moteurs d'une même industrie, CIMBENIN, dont les caractéristiques sont consignées dans le tableau 1 ci-dessous. Ainsi, il s'agira juste de renseigner dans l'environnement de travail, la tolérance d'erreur, généralement une tolérance de 2 à 5%, l'intensité mesurée, la tension mesurée, le facteur de puissance mesurée, d'indiquer si le moteur est triphasé ou pas, de renseigner l'efficacité nominale et la puissance nominale du moteur puis de cliquer sur valider. Le

logiciel, après calculs d'intégration en son sein, sort une fiche renseignant sur l'état actuel du moteur suivie de recommandations.

Tableau 2: Caractéristiques de trois différents moteurs

	Moteur du broyeur CM2BM01MM01	Moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1	Moteur du filtre séparateur CM2FN15
Puissance nominale [kW]	1400	132	160
Efficacité nominale [%]	95	95.4	84.8
Tension mesurée [V]	6063	387.1	391.4
Intensité mesurée [A]	130	206.5	151.9
Cosphi	0.8	0.92	0.9
Date et heure de prise de mesure	29/07/2020 07 :47 :51	22/07/2020 08 :35 :29	02/08/2020 20:24

Les figures suivantes nous présentent une image de l'étude de cas pour chaque moteur choisi.

Fiche de calcul de la Puissance

Définissez la Tolérance: 0,02000 [Initialiser]

Calcul de la puissance d'entrée du moteur

Intensité (A): 130,00
 Tension (V): 6 063,00
 Facteur de puissance: 0,8000000

ON Triphasé ?

La Puissance d'entrée est égale à 1092120W

Calcul de la puissance de sortie du moteur

Efficacité Nominale (%): 0,95000
 Puissance Sortie (W): 1 037 510,200000

Calcul du Rapport de charge RC

Puissance nominale (W): 1 400 000,00
 Rapport de Charge: 0,741079

Efficacité du Moteur

Efficacité Moteur: 0,95000

la nouvelle puissance de sortie du moteur

Puissance Sortie (W): 1 037 510,20

Erreur relative

Erreur relative: 0,00000 [Valider]

La puissance à la sortie est: :Ps=1037510.2
 Le Rapport de Charge est :RCh=0.7410787142857
 Le facteur de correction est :FC=1
 L'efficacité du moteur est :Em=0.95

Figure 5 : Cas du moteur du broyeur CM2BM01MM01

Fiche d'évaluation de l'efficacité d'un moteur 17/08/2020

Recommandation Technique

Nombre d'itération	0,00
--------------------	------

Puissance à la Sortie (W) :	1037510.2
Rapport de Charge :	0.7410787142857
Facteur de Correction :	1
Efficacité du Moteur :	0.95

Description :

Le moteur fonctionne dans de meilleure condition avec une très bonne efficacité énergétique. Merci de le maintenir dans la condition actuelle.

Nombre de fiches : 1

Figure 6 : Cas du moteur du broyeur CM2BM01MM01, recommandation

Fiche de calcul de la Puissance

Définissez la Tolérance: 0,02000 [Initialiser]

Calcul de la puissance d'entrée du moteur

Intensité (A): 206,50
 Tension (V): 387,10
 Facteur de puissance: 0,9200000

ON Triphasé ?

La Puissance d'entrée est égale à 127374W

Calcul de la puissance de sortie du moteur

Efficacité Nominale (%): 0,95400
 Puissance Sortie (W): 121 513,842000

Calcul du Rapport de charge RC

Puissance nominale (W): 132 000,00
 Rapport de Charge: 0,920559

Efficacité du Moteur

Efficacité Moteur: 0,95400

la nouvelle puissance de sortie du moteur

Puissance Sortie (W): 121 513,84

Erreur relative

Erreur relative: 0,00000 [Valider]

La puissance à la sortie est: :Ps=121513.842
 Le Rapport de Charge est :RCh=0.9205594090909
 Le facteur de correction est :FC=1
 L'efficacité du moteur est :Em=0.954

Figure 7 : Cas du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1

17/08/2020

Fiche d'évaluation de l'efficacité d'un moteur

Recommandation Technique

Nombre d'itération	0,00
Puissance à la Sortie (W) :	121513.842
Rapport de Charge :	0.9205594090909
Facteur de Correction :	1
Efficacité du Moteur :	0.954

Description :

Le moteur fonctionne dans de meilleure condition avec une très bonne efficacité énergétique. Cependant la vitesse d'usure des composants du moteur est importante, ce qui entrainera un vieillissement précoce du moteur. Pour pallier cet inconvénient, il faut procéder au remplacement du moteur en utilisant un moteur de puissance nominale supérieur à l'actuelle de telle sorte que le rapport de charge soit compris entre 70 et 85%.

Nombre de fiches : 1

Figure 8 : Cas du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1, recommandation

Figure 9 : Cas du moteur du filtre séparateur CM2FN15

Fiche d'évaluation de l'efficacité énergétique d'un moteur 24/08/2020

Recommandation Technique

Nombre d'itération	0,00
Puissance à la Sortie (W) :	77811.17275463
Rapport de Charge :	0.4911828
Facteur de Correction :	0.9900994695182
Efficacité du Moteur :	0.8396043501514

Description :

Le moteur fonctionne en déperdition énergétique assez prononcée. L'efficacité énergétique n'est pas respectée. Veuillez bien vouloir changer le moteur en utilisant un moteur de puissance nominale inférieure à l'actuelle de telle sorte que le rapport de charge soit compris entre 70 et 85%.

Nombre de fiches : 1

Figure 10 : Cas du moteur du filtre séparateur CM2FN15, recommandation

Si le logiciel a la limite de ne pas pouvoir nous calculer ce qu'une entreprise perd en thème de coût financier sur un moteur utilisé avec un mauvais rapport de charge, son avantage réside quand même dans le fait que dans une industrie, on a souvent plus d'une centaine de moteurs dont l'analyse risque de prendre trop de temps avec la possibilité de se tromper.

Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons présenté le logiciel conçu. Nous l'avons conçu à l'aide de l'Atelier de Génie Logiciel (AGL) WinDev, édité par PC SOFT. Après conception, nous avons appliqué le logiciel avec trois différents étude de cas.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La recherche des gisements d'économie d'énergie et d'efficacité énergétique à travers d'audits énergétiques ne cesse d'être une préoccupation majeure surtout pour les entreprises. Malheureusement, il n'existe pas encore d'outils informatiques dans le cadre de l'évaluation d'efficacité énergétique des moteurs, sous-secteur représentant plus de 60% [1] de la consommation d'une entreprise. Le présent travail s'est donc inscrit dans la perspective de mise à disposition à tous, d'un outil informatique dans ce cadre spécifique.

Le logiciel conçu permet donc d'être renseigné sur quelques paramètres importants de moteurs en fonctionnement dont le principal est le rapport de charge, paramètre permettant de juger de l'utilisation optimum du moteur. Après, la saisie dans le logiciel de quelques paramètres d'entrée du moteur tels que la tension mesurée, l'intensité mesurée, le facteur de puissance, l'efficacité nominale, la puissance nominale et après avoir indiqué si le moteur est triphasé ou pas puis l'erreur relative maximal tolérée, le logiciel nous sort en retour, les paramètres tels que la puissance de sortie du moteur, l'efficacité du moteur, le rapport de charge,... puis quelques recommandations en fonction de l'état du moteur principalement jugé grâce à la valeur du rapport de charge.

Il serait souhaitable de combiner cet outil avec d'autres outils informatiques en vue d'obtenir un outil complet pour l'évaluation de performance énergétique en générale. Cela regroupera l'efficacité énergétique dans le bâtiment (lampes et climatiseurs) et celle dans l'industrie (moteurs).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] - Latif FAGBEMI, *efficacité énergétique : connaissance et méthode d'audit énergétique*, Support de cours EPAC.
- [2] - Boris Aristophane W. ALODE (2017), *Contribution à l'audit en énergie électrique à la CIMBENIN S.A.*, mémoire EPAC, 136p.
- [3] - Toussaint DJE (2013), *Diagnostic de performance énergétique des bâtiments : CAMP EL et CONSTRUCTION OFFICE du site Essakane au BURKINA-FASO*, mémoire 2iE, 97p.
- [4] - EuroGROUP consulting (2010), *l'efficacité énergétique dans le bâtiment : une filière industrielle d'excellence pour la France*, page 4.
- [5] - Fondation d'Entreprise Alcen pour la Connaissance des Énergies (2018), *Connaissance des énergies : Efficacité énergétique et bâtiments*. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/efficacite-energetique-et-batiments>. Consulté le mardi 23 Octobre 2018.
- [6] - Environnement (2015), *Guide pratique de l'usine de futur - Enjeux et panorama de solutions*, pp 87 et 88.
- [7] - QUEBEC Bureau de l'efficacité et de l'innovation énergétiques, *Moteurs efficaces*, 11p.
- [8] - Association Technique Énergie Environnement (2013), *L'audit énergétique dans l'entreprise*, 8p.

ANNEXES

Annexe 2 : la norme NF EN 16247

Le processus d'audit énergétique se présente en quatre étapes :

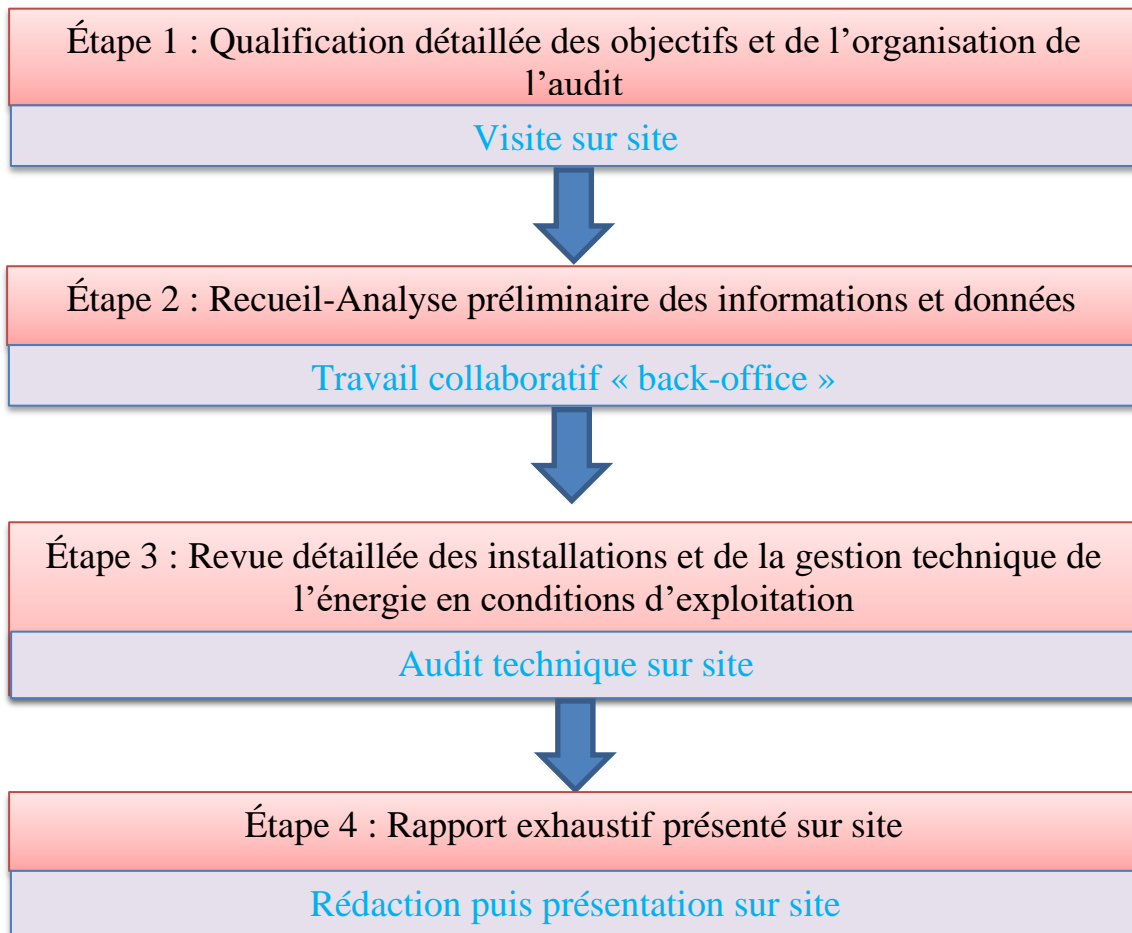


Figure 11 : Processus d'audit énergétique

Étape 1 : Qualification détaillée des objectifs et de l'organisation de l'étude

Cette étape 1 est déterminante pour la conduite efficace d'un audit qui répond aux exigences réglementaires et des objectifs de réduction des factures. Elle doit permettre d'identifier clairement les potentiels d'amélioration de la performance énergétique sur le périmètre défini.

- ❖ Périmètre audité : procédés, utilités, bâtiments et transports pris en compte.

- Identification des procédés ou installations présentant une spécificité technique justifiant le cas échéant de méthodes d'analyse ou moyens de mesurage particuliers.
- Le périmètre intègre 80 % des factures énergétiques.
- ❖ Identification des interlocuteurs clés pour la réalisation de l'audit.
- ❖ Validation du planning d'intervention et des éventuelles contraintes techniques et / ou organisationnelles inhérentes à l'exploitation et / ou à la maintenance du site.

Étape 2 : Recueil-analyse préliminaire des informations et données

Le recueil-analyse préliminaire des informations et données doit être particulièrement relatif :

- ❖ à l'organisation de l'activité. Il s'agit du Planning / saisonnalité et des contraintes d'exploitation (notamment HSE), exigences usagers et de certification ;
- ❖ aux sources et consommations énergétiques ;
- ❖ aux consignes opérationnelles (les bâtiments, le process et transports) ;
- ❖ au système de surveillance et de mesurage (Compteurs / sous-compteurs / modes de relevés) ;
- ❖ à la gestion des données énergétiques ;
- ❖ à l'organisation de la maintenance et outils associés.

Étape 3 : Revue détaillée des installations et de la gestion technique de l'énergie en conditions d'exploitation

Une revue détaillée des installations en conditions d'exploitation pour, notamment :

- ❖ compléter en tant que besoin, le recueil préliminaire d'informations et de données ;

- ❖ identifier les paramètres physiques qui influent potentiellement sur les consommations (température extérieure, kilomètres, volume et / ou nature des travaux...);
- ❖ réaliser si nécessaire les mesures complémentaires définies en étape 2
- ❖ consolider la consommation de référence ;
- ❖ consolider la consommation d'énergie, le bilan énergétique et les facteurs d'ajustement.

Étape 4 : Rapport exhaustif présenté sur site

Le rapport synthétise les analyses menées comme suite à l'étude préliminaire, l'audit sur site. Il présente en particulier :

- ❖ l'origine et la cohérence des données ;
- ❖ la répartition de la consommation énergétique ;
- ❖ les flux énergétiques et le bilan énergétique ;
- ❖ l'évolution de la demande énergétique dans le temps ;
- ❖ le lien existant entre la consommation énergétique et les facteurs d'ajustement ;
- ❖ un ou plusieurs indicateurs de performance énergétique ;
- ❖ une évaluation de l'optimisation énergétique réalisable.

Les potentiels d'amélioration de la performance énergétique sont segmentés en trois catégories :

- ❖ les propositions qui relèvent du management : elles ne nécessitent pas ou nécessitent très peu d'investissement et présentent un temps de retour très court, généralement inférieur à 12 mois, 18 mois au maximum. Il s'agit des consignes comportementales et / ou de maîtrise opérationnelle puis d'adaptation de l'organisation et / ou du pilotage de l'activité ;

- ❖ les propositions qui relèvent d'une optimisation ou d'une évolution technique de l'existant : elles nécessitent un investissement « maîtrisé » avec un temps de retour généralement inférieur à 4 ans ;
- ❖ les propositions qui nécessitent une reconfiguration plus structurante de l'existant et / ou une « innovation » technique, donc un investissement plus important et un temps de retour potentiellement plus long.

Chaque potentiel d'amélioration est analysé avec :

- ❖ présentation de la solution envisageable et des principes techniques de déploiement ;
- ❖ détail de la performance énergétique cible et des économies d'énergie réalisables ;
- ❖ bilan économique global, incluant les investissements, charges d'exploitation et temps de retour.

Le rapport doit être présenté sur site. Le dossier comprend :

- ❖ le rapport intégral avec le document de synthèse, l'historique, l'audit énergétique, les opportunités d'amélioration de l'efficacité énergétique, les conclusions. Toutes les annexes de calculs ;
- ❖ un support de présentation au format « power point ».

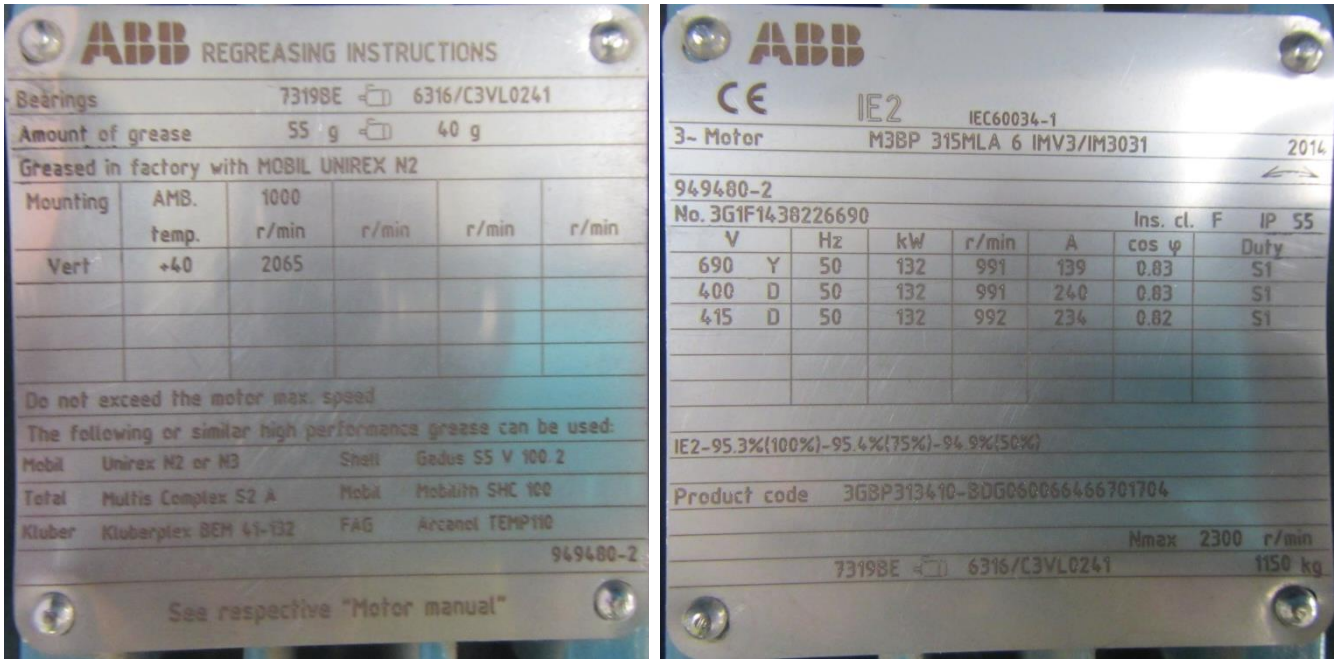


Figure 12 : Photo de la plaque signalétique du moteur de la roue du séparateur CM1FN42_M1

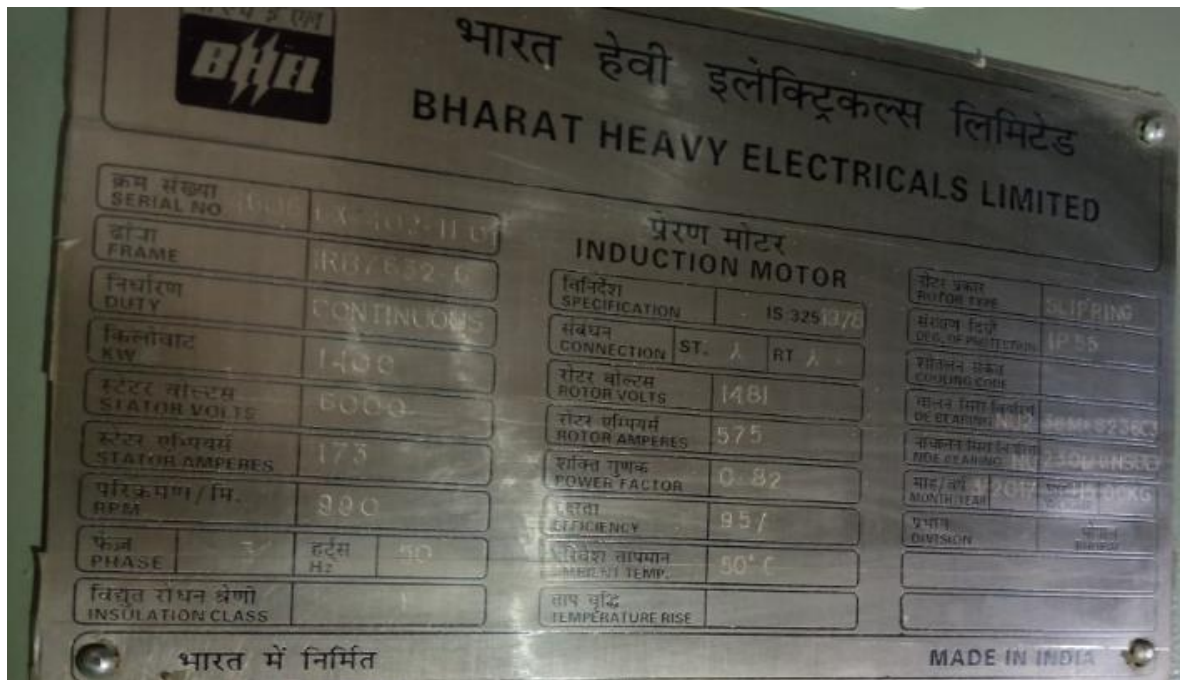
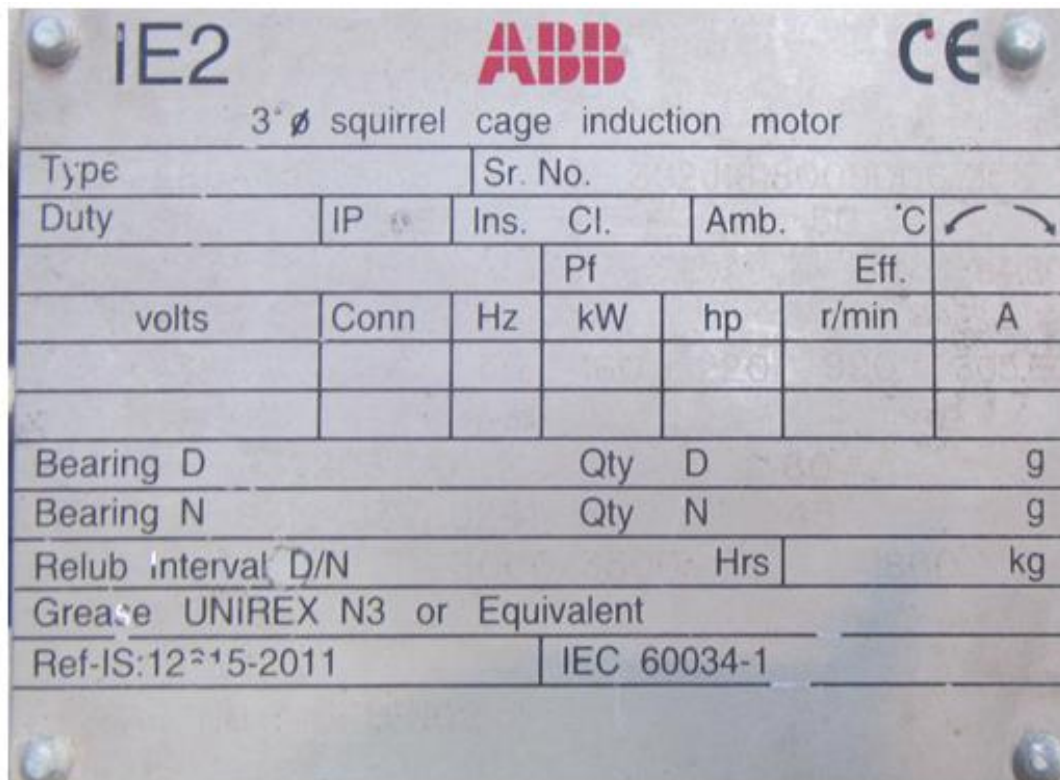


Figure 13 : Photo de la plaque signalétique du moteur du broyeur CM2BM01MM01



volts	conn	Hz	kW	hp	r/min	A
380	Δ	50	160	220	990	305
<u>Bearing D 652203</u>			<u>Qty D 60</u>		g	
<u>Bearing N 6319/C3VL0241</u>			<u>Qty N 45</u>		g	
<u>Relub Interval D/N 3000/3500 Hrs</u>			1800 kg			

Figure 14 : Photo de la plaque signalétique du moteur du filtre séparateur CM2FN15

Annexe 3 : INSTALLATION DU PROLOGICIEL

- 1- Installer "WX170PACKHFSQLCS" et finir l'installation par "Non terminer"
- 2- Copier le dossier "Eff_Energ" puis aller dans le disque système C, (aller dans le groupe "Affichage", cocher "Eléments masqués". Vous verrez dans les dossiers du disque, le dossier "ProgramData"), ouvrir le dossier "ProgramData", ouvrir le dossier "PC SOFT", ouvrir le dossier "ServeurHyperFilesSQL", ouvrir le dossier "**BDD**" puis coller le dossier précédemment copié. Une boîte de dialogue apparaîtra automatiquement. Choisir "Remplacer le dossier"
- 3- Installer maintenant "INSTALL" (INSTALL application)