



Rapport de stage de fin de cycle

Thème :

Audit Energétique et Evaluation technologique des fours industriels de la SODEPAL

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en Ingénierie de l'eau et de
l'environnement,

Option : Energie & Procédés Industriels

Présenté et soutenu publiquement le 25/06/2012

Par : *BALOU MOMO Julian Chryst A.*

Membres du jury :

- ◆ Yézouma COULIBALY (Président)
- ◆ Yohan RICHARDSON
- ◆ Gildas TAPSOBA
- ◆ William FOTSEU

Professeur de suivi :

Pr. Yézouma COULIBALY

Chef de UTER - GEI

Maître de stage :

Dr. Pousga KABORE

Expert Industriel au BRMN

Année académique 2011-2012

Avant-propos

La formation à la fondation 2iE, Institut International de l'Ingénierie, de l'Eau et de l'Environnement vise à former et assurer la préparation des cadres polyvalents dans les domaines de : l'Hydraulique, l'Environnement, l'Energie, et le Génie-civil.

Le parcours académique est découpé en trois cycles à savoir :

- Le cycle **Bachelor (Ingénieur des travaux)** ;
- Le cycle **Master d'ingénierie** ;
- Le cycle **Doctoral**.

Le cycle Bachelor (Ingénieur des travaux) s'effectue en trois ans, après le baccalauréat dans les options suivantes :

- **Bachelor (Ingénieur des travaux) en Eau et Environnement** ;
- **Bachelor (Ingénieur des travaux) en Eau et Assainissement** ;
- **Bachelor (Ingénieur des travaux) en Infrastructures et Equipements**.

La première année (Bachelor1 ou L1), permet à l'étudiant d'avoir les éléments scientifiques, techniques de base afin de mieux affronter les matières qui sont pour la majorité nouvelles.

Les éléments scientifiques de base sont : mathématiques, physique et Informatique tandis que les éléments techniques de base sont : Topographie, Dessin technique, mécanique, Hydraulique générale et Energie.

La deuxième année (bachelor2 ou L2), est consacrée aux enseignements de techniques appliquées, aux enseignements en infrastructures et équipements qui regroupent les enseignements de génie civil et d'énergie, aux enseignements en eaux et aménagements qui regroupent les enseignements en hydraulique agricole, urbaine et en assainissement.

A l'issue de la deuxième année de formation, les étudiants en troisième année (bachelor3 ou L3), peuvent selon leur capacité, opter pour une licence professionnelle et se positionner sur

le marché de l'emploi au terme de la formation ou pour une licence de recherche en vue d'accéder à la première année de master.

Le cycle de master en ingénierie quant à lui, s'étale sur deux ans après le bachelor dans les domaines correspondant aux options suivantes :

- Sciences de l'eau ;
- Sciences de l'environnement ;
- Ingénierie du Génie-civil ;
- Génie Energétique & des procédés industriels.

La première année vise à acquérir les techniques et méthodes de l'ingénieur afin de permettre des études concrètes de conception et de réalisation des projets, voire l'optimisation des process existants. La deuxième année consolide ces connaissances par des projets d'étude, le tout couronné par l'insertion de l'étudiant quatre mois durant afin de le préparer en conséquence à un bon professionnalisme. C'est dans ce contexte, que nous avons séjourné dans les locaux du BRMN afin de travailler sur l'audit énergétique et l'évaluation technologique des fours de la SODEPAL.

DEDICACES :

Je dédie le présent rapport à :

- ◆ Mon Père & ma Mère qui se sont sacrifiés à part entière pour ma réussite et mon épanouissement durant tout mon parcours scolaire et académique ;
- ◆ Mes adorables Frères et Sœurs, qui demeurent la source de mon énergie et de ma motivation à toujours m'appliquer dans tout ce que j'entreprends ;
- ◆ A tous mes Oncles et mes Tantes qui n'ont pas cessé de me prodiguer des conseils et de me soutenir moralement ;
- ◆ A tous les membres du Collectif des Etudiants & Stagiaires Congolais du 2iE (CEC-2iE) pour le soutien moral et logistique infaillibles qu'ils m'ont apporté pendant ma soutenance.

REMERCIEMENTS

Je remercie le Directeur Général de la fondation 2iE, Paul GINIES, les membres de l'administration ainsi que ceux du corps professoral pour ces connaissances qu'ils m'ont transmises tout au long de ma formation.

Ce rapport est l'aboutissement d'un effort collectif. Comme pour tous les travaux analogues, nombreux sont ceux qui y ont contribué à différents niveaux. Qu'ils trouvent ici mes sentiments de sincère gratitude. Il s'agit entre autres de :

- ❖ M. TRAORE Sylvanus, Directeur Général du BRMN pour m'avoir accueilli, pendant la période de stage, au sein du bureau dont il est en charge ;
- ❖ Messieurs Pousga KABORE, Yézoumah COULIBALY et Gildas TAPSOBA pour l'appui technique, les conseils et orientations pertinents qu'ils m'ont apportés pendant l'évolution de mon travail ;
- ❖ M. BAYALA Bapio, pour m'avoir aidé à comprendre le principe et la méthode de calcul de la facturation SONABEL ;
- ❖ Appolinaire COMPAORE dit « le chef des stagiaires » pour son aide
- ❖ Tout le personnel du BRMN, plein de sympathie, de convivialité mais aussi de dynamisme, me permettant ainsi de m'intégrer facilement au sein du groupe.
- ❖ Tout le personnel de SODEPAL pour m'avoir accordé sa confiance au cours de notre collaboration, quoique difficile à ses débuts, pendant mon stage.
- ❖ A mes "frères de valeurs" pour m'avoir soutenu pendant la période trouble au cours de mon stage. Il s'agit de : MIANTAMA Legassy, DOMBAS Franky, IBOUANGA Placide, OSSOA Wilfrid, KAFACK Frank, ZIBARE Rachid et MOUSSA Razak.

Que tous mes amis, trouvent ici le témoignage de notre sincère amitié.

RESUME

Le présent document traite de l'audit énergétique de la SODEPAL et de l'évaluation technologique de ses fours. Dans un premier temps nous avons commencé par faire une analyse des factures électriques. Au cours de cette analyse il est ressorti que l'entreprise bénéficie d'une bonification due au facteur de puissance et qu'elle a de bonnes habitudes, d'un point de vue énergétique (heures de production). Nous avons aussi constaté que la puissance souscrite est plus ou moins élevée, ce qui fait que la prime fixe a un impact considérable sur la facture électrique. Nous avons donc proposé de passer au tarif D2 industriel afin d'économiser 800 986 CFA.

La seconde étape de notre travail a été de scruter la documentation relative aux différentes technologies des fours, des avantages que les uns présentent par rapport aux autres puis d'en évaluer la technologie de ceux de l'entreprise, particulièrement celle du four tunnel car il est le principal facteur du coût élevé de la facture mensuelle. Il s'agit entre autres de réévaluer ses paramètres électriques, sa consommation spécifique, sa température, etc.

La troisième étape consiste en une étude financière relative à l'acquisition d'un nouveau four.

	source d'énergie	temps de production (h/mois)	charge d'exploitation (CFA/mois)	I ₀ (CFA)	DRCI (CFA)
four actuel	électricité	96,0	464 363		
four à gaz (proposé)	gaz	36,12	318 930	17 500 000	10 semaines

Mots clés :

- Energie
- Coût
- Evaluation
- Technologie
- Fours

ABSTRACT

This paper deals with the energy audit of SODEPAL and technology assessment of its furnaces. Initially we started with an analysis of electric bills. During this analysis it emerged that the company has a bonus due to power factor and it has good habits, an energy point of view (production hours). We also found that the contract power is higher or lower, so that the fixed premium has a significant impact on the electricity bill. We therefore proposed to move to industrial tariff D2 to save 800,986 CFA.

The second step of our study was to examine the documentation for various technologies furnaces, each have advantages over other then to evaluate the technology from those of the company, particularly that of the tunnel kiln as it is the main factor of the high cost of the monthly bill. These include re-evaluate its electrical parameters, the specific fuel consumption, temperature, etc.

The third step is a financial study on the acquisition of a new furnace.

	energy source	production time (h / month)	operating expense (CFA / month)	Io (CFA)	DRCI (CFA)
current oven	electricity	96,0	464 363		
gas oven (proposed)	gas	36,12	318 930	17 500 000	10 semaines

Key words :

- Energy
- Cost
- Evaluation
- Technology
- oven

Liste des abréviations et sigles

BRMN : Bureau de Restructuration et de de Mise à Niveau

UEMOA : Union Economique et Monétaire Ouest-Africaine

CPN : Comité de Pilotage National

PMI : Petite et Moyenne Industrie

PIB : Produits Intérieur Brut

SONABEL : Société Nationale d'Electricité du Burkina

SODEPAL : Société d'Exploitation des Produits Alimentaires

1ère : Première

2ème : Deuxième

vs : Versus

MT : Moyenne Tension

BT : Basse Tension

VAN : Valeur Actuelle Nette

I₀ : Investissement initial

Hpleine / Hpl : Heures pleines

Hpointe / Hpt : Heures de pointe

P. dépassement : Pénalité de dépassement

P. cos_phi : Pénalité de cos_phi

Redev : Redevances

TGBT : Tableau Général Basse Tension

Nomenclature :

Nomenclature	Désignation	Unité
I	Intensité	A : (Ampère)
U	Tension	V : (volt)
S	Puissance apparente	kVA : (kilo-volt-ampère)
Q	Puissance réactive	kVAr : (kilo-volt-ampère-réactance)
P	Puissance active	kW : (kilo-Watt)
t	Temps	mn : (minute) ; s : (seconde) ; h : (heure)
T	Température	K : (kelvin) ; °C : (degré Celsius)
Qté	Quantité	kg : (kilo-gramme) ; t : (tonnes)
E	Energie électrique	kWh : (kilo-watt-heure)

Liste des figures

Figure 1: Répartition de la puissance globale / équipement	4
Figure 2: Répartition moyenne de la facture / mois	8
Figure 3: Etude de la puissance souscrite	9
Figure 4: Après optimisation (1ère possibilité)	12
Figure 5: Comparaison des coûts	13
Figure 6: Après optimisation (2ème possibilité)	13
Figure 7: Comparaison des coûts	14
Figure 8: Evolution des températures et des puissances de chauffe dans les fours, Source : « Fours industriels » ©Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 842.....	16
Figure 9: Evolution de la température en fonction du temps.....	20
Figure 10: Courbes d'intensité du moteur en fonction du temps.....	23
Figure 11: Durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant consommé. source: 4Démarriage et protection des moteurs, Schneider electric	24
Figure 12: Evolution de la tension en fonction du temps	24
Figure 13: Evolution des courants de ligne du four (moteur + résistances) en fonction du temps.....	25

Liste des tableaux

Tableau 1: Coûts des tarifs E2 & D2 Industriel	11
Tableau 2: Relevé de température du four par pas de 10mn	19
Tableau 3: Valeurs de mesure du temps de séjour des biscuits dans le four	26
Tableau 4: Calcul de la consommation spécifique du four	27
Tableau 5: Informations relatives à la production de biscuits (vitaline & vitacasui)	28
Tableau 6: Fiche technique du four KQ.....	29
Tableau 7: Détermination du gain économique sur la prime fixe.....	30
Tableau 8: Coûts d'acquisition des deux types de four	30
Tableau 9: Coût relatif à l'exploitation des fours	32
Tableau 10: Hypothèses de calculs de la VAN.....	32
✓ Tableau 11: Calcul de la VAN du four à gaz.....	33
✓ Tableau 12: Calcul de la VAN du four électrique.....	33

SOMMAIRE

Avant-propos	i
<i>DEDICACES</i> :	iii
<i>REMERCIEMENTS</i>	iv
<i>RESUME</i>	v
<i>ABSTRACT</i>	vi
Liste des abréviations et sigles	vii
Liste des figures	ix
Liste des tableaux	x
SOMMAIRE	1
INTRODUCTION :	4
<i>PROBLEMATIQUE</i>	4
<i>OBJECTIFS DE L'ETUDE</i> :	5
<i>PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : LE BRMN</i>	5
Partie 1 : Analyse des factures électriques :	8
I- Avant optimisation :	8
1.) Analyse et interprétation :	8
2.) Etude de la puissance souscrite :	9
3.) La pénalité de $\cos\varphi$:	10
II- Propositions d'optimisation de la facture :	10
1.) Puissance à souscrire	10
2.) La compensation d'énergie réactive	11
III- Après optimisation :	11
1.) Récapitulatif des dispositions :	11
2.) Formalités relatives à l'application des recommandations :	12
3.) Résultats :	12
Partie 2 : Revue bibliographique :	15
I- Définition d'un four :	15

II-	Classification des fours	15
1.)	Fours continus et fours discontinus	15
2.)	Fours à chauffage direct et chauffage indirect	16
3.)	Fours à haute température et fours à basse température	17
4.)	Les fours, selon le type de combustible	17
	Partie 3 : Evaluation technologique du four de la biscuiterie :.....	18
I-	Description du four à biscuits de la SODEPAL :	18
1.)	Interprétations :	20
II-	Matériels et méthodes :	21
1.)	Les paramètres électriques :	21
2.)	La température à l'intérieur du four :	21
3.)	Le temps de séjour (t_s) des biscuits dans le four :	21
4.)	Quantité de biscuits produits en une portée (pendant le t_s)	22
5.)	La consommation spécifique	22
III-	Résultats : analyses et discussion	22
1.)	Les paramètres électriques	22
2.)	Le temps de séjour :	26
3.)	La quantité produite pendant le temps de séjour	26
4.)	La consommation spécifique :	26
IV-	Conclusions et Recommandation :	28
V-	Choix d'un nouveau four :	28
1.)	Avantages de ce four :	30
2.)	Justification économique de cet investissement :	30
3.)	Impact environnemental de l'utilisation du four à Gaz	34
	Partie 4 : Evaluation technologique du four de la pâtisserie :	35
I-	Description du four :	35
II-	Fonctionnement actuel du four et Diagnostic :	35
1.)	Observations :	35
2.)	Analyse et interprétation	36
III-	Les recommandations :	36
	Récapitulatif des différentes recommandations :	38
1.)	A propos du four tunnel de la biscuiterie :	38

2.) Sur la facture électrique :.....	38
3.) Pour d'autres équipements :	39
Conclusions & perspectives	40
BIBLIOGRAPHIE :	42
ANNEXES.....	43

INTRODUCTION :

PROBLEMATIQUE :

L'efficacité énergétique dans les entreprises industrielles est un sujet d'actualité. En effet, les coûts de production et par conséquent de revient dépendent fortement des coûts d'énergie : transport, électricité, vapeur, etc. Dans un contexte national et international concurrentiel, toute réduction de coût a un impact sur la compétitivité et la survie de l'entreprise.

La Société d'Exploitation de Produits Alimentaires (SODEPAL) créée en juin 1978 est une PMI œuvrant dans la transformation des produits céréaliers en vue de lutter contre la malnutrition chez les adultes et les enfants en particulier. Dans ce contexte elle produit des farines infantiles enrichies en vitamines et en oligo-éléments. Ces farines infantiles sont obtenues à partir de biscuits, produits au sein même de la SODEPAL, qui sont par la suite écrasés puis mélangés à d'autres ingrédients pour en faire une poudre (une bouillie) prête à cuire en l'espace de 5 à 10 mn. Aussi, au fil des années, l'entreprise s'est faite une place non moins négligeable sur le marché et continue, aujourd'hui encore, son expansion. Malheureusement, elle est sujette à des coûts énergétiques élevés.

C'est pourquoi un pré-diagnostic fut réalisé afin de repérer les postes clés en termes de consommation électrique, et il est ressortit que le four tunnel en est la cause principale. En effet, en regardant la figure 1, illustrant la répartition de la puissance globale de toute l'installation, à une période de forte activité, il est facile de se faire une idée claire sur la situation.

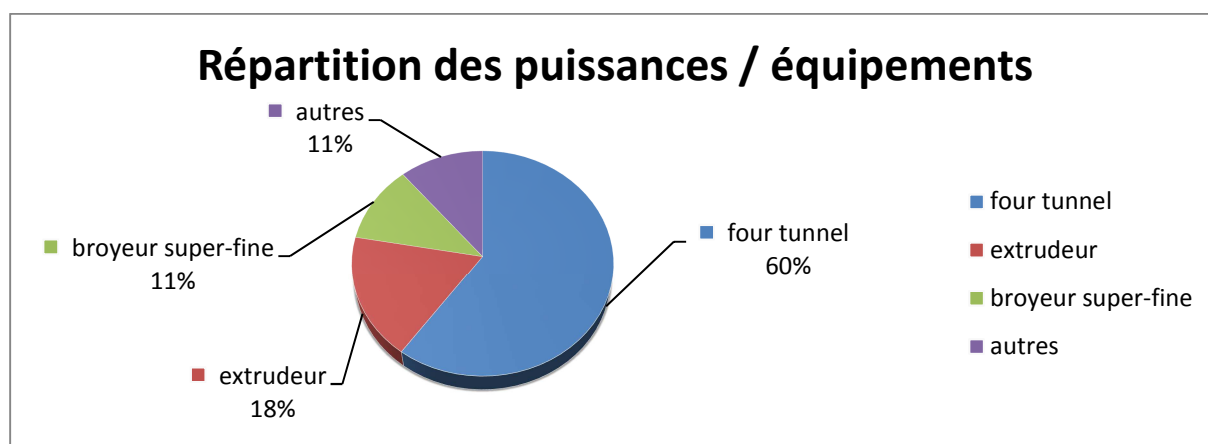


Figure 1: Répartition de la puissance globale / équipement

OBJECTIFS DE L'ETUDE :

L'objectif global de cette étude est donc de faire un audit, d'un point de vue énergétique, de l'atelier de production de la SODEPAL en vue de réduire, autant que possible, le coût énergétique. De façon spécifique, cela consiste à organiser le travail de la manière suivante :

- ✓ Analyser les factures électriques sur la période minimum des deux (02) dernières années (2010 – 2011) ;
- ✓ Faire une revue bibliographique sur la technologie des fours à biscuits et à pains et proposer un type de four pouvant aider à réduire la consommation ;
- ✓ Vérifier la consommation actuelle du four tunnel afin de confirmer ou non de sa participation au rehaussement de la facture électrique et proposer, s'il y a lieu, des dispositions à prendre afin de réaliser des économies d'énergie ;
- ✓ Vérifier les consommations actuelles des autres équipements de l'installation (four à pain de la pâtisserie, et extrudeur) afin de déterminer leur apport sur la facture globale puis proposer, au besoin, des mesures d'économies d'énergie ;

PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL : LE BRMN

Créé en mars 2008, le Bureau de Restructuration et de Mise à Niveau (BRMN), bras opérationnel au service de la restructuration et de la mise à niveau de l'industrie, est l'interface opérationnelle, mis en place par le gouvernement pour assurer la conduite :

- Du Programme de Restructuration et de Mise à Niveau de l'UEMOA (PRMN), dont l'objectif est de relancer la production industrielle, de promouvoir l'investissement, l'emploi et d'améliorer la compétitivité des économies nationales aux niveaux régional et international. Adopté depuis le 22 juin 2006, par décision 12/2006/CM/UEMOA d'intégrer et de positionner avantageusement son secteur productif dans le contexte concurrentiel des accords de l'Organisation Mondiale du Commerce (OMC) et la perspective de ceux de partenariat économique avec l'Europe (APE). En effet, le tissu industriel des pays de l'UEMOA et partant celui du Burkina Faso est en général très faible et participe peu à la formation du Produit Intérieur Brut de l'union. Ainsi, la contribution de l'industrie dans l'UEMOA varie entre 12% et 27% du PIB pour un tissu de l'ordre de 2500 entreprises. A ces entreprises, viennent s'ajouter dans chacun des pays, une multitude de micro-entreprises, généralement du secteur informel et la mise en œuvre du Programme devrait contribuer à inverser cette tendance.

- Du Programme de Restructuration des Entreprises en Difficulté (PRED) initié par le gouvernement dans le cadre du plan d'action de lutte contre les effets de la crise financière et économique mondiale et qui a pour objectif de donner à ces entreprises les moyens de :
 1. Résorber les effets négatifs de la crise économique persistante, par la relance de la production ;
 2. Tirer parti des opportunités de développement qu'offre la situation de crise que traverse l'économie mondiale, en préservant des emplois et en créant de la valeur ajoutée.

Logé au sein de la Chambre de Commerce et d'Industrie du Burkina Faso et animé par des cadres de cette institution, le BRMN, a démarré ses activités en juin 2008 et est chargé :

- De la promotion au niveau national, du PRMN et du PRED,
- Du traitement des dossiers des entreprises éligibles au PRMN et au PRED,
- De la mesure de l'impact desdits Programmes sur les entreprises bénéficiaires,
- Du suivi des prestations des Consultants commis à l'élaboration des diagnostics stratégiques des entreprises retenues pour la phase pilote du PRMN et sélectionnées par le Gouvernement dans le cadre de la phase initiale du PRED
- De la conduite des différentes études (formulation du Programme national, de mise en place des Fonds nationaux ...) initiées dans le cadre des deux Programmes avec le concours des différents partenaires,
- Et de la conduite de toute action de promotion et de développement de l'industrie nationale.

Pendant la phase de déploiement, le BRMN sera la structure opérationnelle de mise en œuvre du Programme National de Restructuration et de Mise à Niveau, adopté en juillet 2010 par un atelier national convoqué à cet effet.

Le CPN, structure d'orientation de la politique national.

Le Bureau de Restructuration et de Mise à Niveau (BRMN), depuis le démarrage de ses activités est en contact direct avec tous les partenaires et acteurs de la mise en œuvre des deux Programmes, sous la responsabilité directe du Comité de Pilotage National (CPN).

Présidé par Monsieur Abdoulaye NABOLE, Directeur Général de la Filature du Sahel (FILSAH), le comité de Pilotage National est composé de 12 membres représentant à parité le

secteur Privé et l'Etat. Il est l'organe de gestion des deux Programmes et à ce titre il est chargé d'appuyer le gouvernement dans la conception et la mise en œuvre de la politique nationale en matière de restructuration et de mise à niveau des entreprises.

En outre, il est responsable de :

- la coordination des interventions des partenaires au développement dans la mise en œuvre de la stratégie de restructuration et de mise à niveau des entreprises,
- la définition des modalités d'intervention des deux Programme (règlement intérieur, procédures du BRMN, critères d'adhésion au programme et taux de primes versées aux entreprises, modalité d'intervention du "Fonds de restructuration des entreprises") ;
- la validation des plans de restructuration ou de mise à niveau à lui soumis par le BRMN à l'issue des diagnostics stratégiques.

Partie 1 : Analyse des factures électriques :

Cette étape consiste à vérifier que les factures que la SONABEL envoie ne sont pas biaisées par une erreur quelconque (c'est-à-dire que le montant facturé est bien juste), mais aussi et surtout afin de repérer certains aspects sur lesquels on pourrait apporter des modifications comme la puissance souscrite, la compensation, etc.

I- Avant optimisation :

Nous avons de ce fait conçu une feuille de calcul « Excel » afin de recalculer d'abord les factures puis proposer des pistes d'amélioration. Les résultats du calcul des factures des deux dernières années sont reportés dans le tableau 2 en annexes. En faisant la moyenne sur les douze (12) mois, on constate la répartition suivante moyenne par mois de la facture :

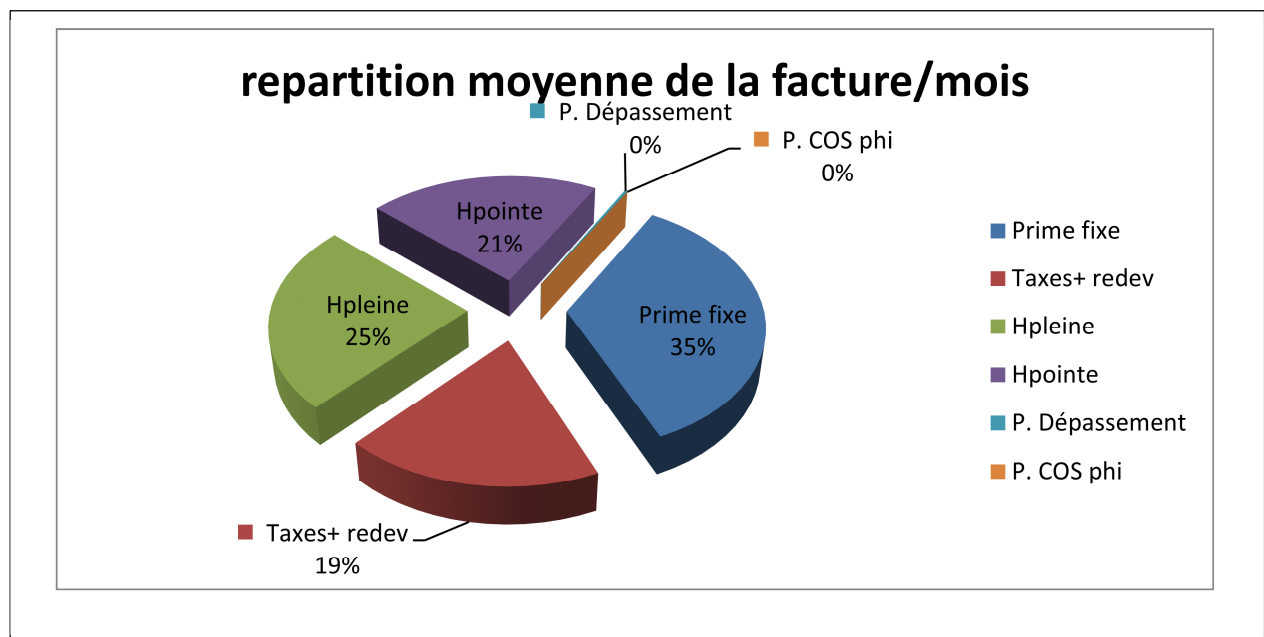


Figure 2: Répartition moyenne de la facture / mois

1.) Analyse et interprétation :

Le camembert ci-dessus nous montre que pour une facture mensuelle de la SODEPAL, à peine environ 46% du montant correspond à la consommation réelle de l'usine tandis que 35% du montant correspond à la prime fixe. Le reste étant dédié aux taxes et redevances. Il est donc clair qu'il y a des postes d'amélioration afin de réduire cette facture. En ce qui concerne

les taxes, il n'y a vraiment rien que nous puissions faire à notre niveau pour les diminuer, si ce n'est de prier le gouvernement et/ou la SONABEL de revoir les taux à la baisse. Notre travail va donc s'articuler autour de la prime fixe afin de la réduire le plus possible, et par conséquent réduire la facture globale.

Par contre, ce qu'il faut souligner et surtout féliciter, c'est que la SODEPAL ne paye pas de pénalités de $\cos\phi$, mais qu'elle a au contraire une bonification d'environ vingt-milles (20 000) francs CFA / mois. En ce qui concerne les pénalités de dépassement, la SODEPAL n'en paye quasiment pas au cours d'une année.

Nous encourageons aussi le fait que l'entreprise a déjà adopté de bonnes habitudes en ce sens qu'elle travaille beaucoup plus aux heures pleines afin de profiter du faible coût du kWh.

2.) Etude de la puissance souscrite :

Traçons sur un même graphe l'évolution de la puissance souscrite (actuelle) ainsi que la puissance maximum enregistrée chaque mois (figure 3). On constate que les dépassements ont lieu seulement trois fois dans l'année (notamment de février à mars 2010) et que pendant les autres mois, la puissance souscrite n'a pas vraiment été atteinte (voir tableau 3, annexes).

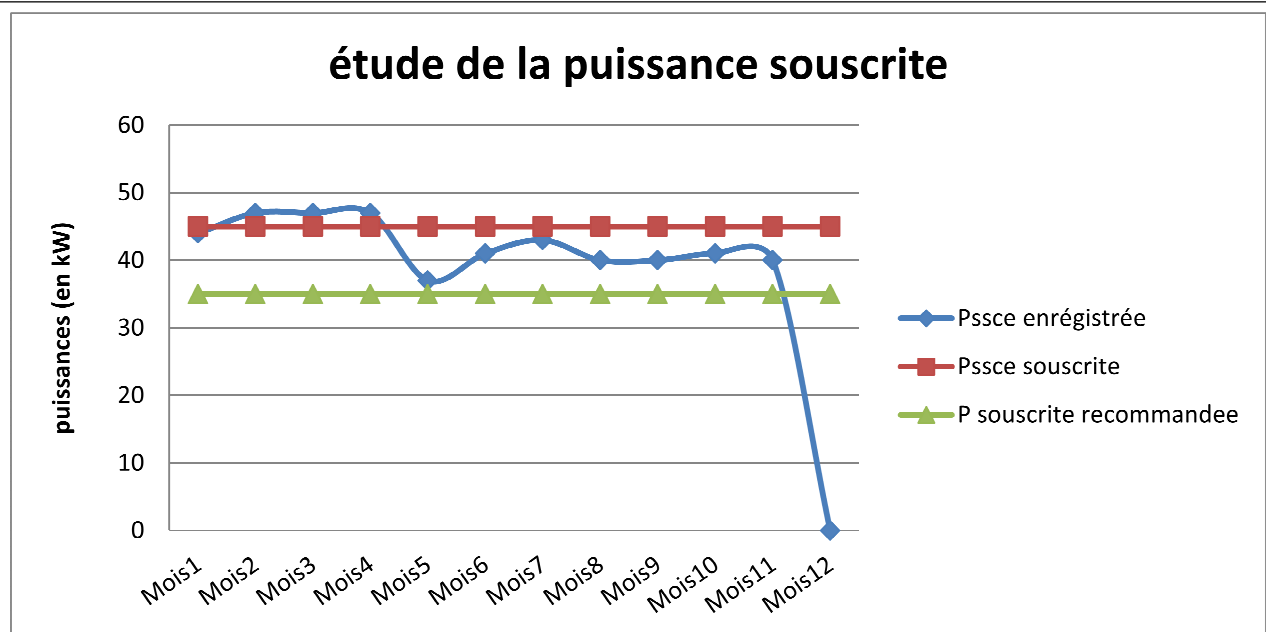


Figure 3: Etude de la puissance souscrite

3.) La pénalité de $\cos\varphi$:

Fort heureusement, la SODEPAL ne paye pas de pénalités relative à un mauvais facteur de puissance. En effet, une batterie de compensation de 10kVAr est installée au niveau de l'atelier.

Cependant cette batterie n'est-elle pas surdimensionnée ?

En effet, en recalculant les factures SONABEL, il apparaît que l'atelier a un facteur de puissance compris entre 0,98 et 1. **On aurait pu avoir la même valeur en installant une batterie de 3 kVAr.** Cela signifie donc que les batteries de compensation sont surdimensionnées ce qui n'est pas du tout conseillé car il y a surcompensation avec risques de surtensions nuisible à l'installation et aux équipements.

II- Propositions d'optimisation de la facture :

1.) Puissance à souscrire

a- 1^{ère} proposition :

On sait qu'il est toujours mieux de payer des pénalités de dépassement de puissance souscrite afin de réduire au mieux le montant de la prime fixe car, les dépassements ne sont pas effectifs tous les mois de l'année et n'atteignent pas toujours la même valeur. C'est pourquoi, nous avons préconisé de prendre une puissance souscrite plus petite de 35kW. Cela nous permet de réduire la proportion de la prime fixe à 29% pour une augmentation des pénalités de dépassement de 4%. Néanmoins, on économise tout de même en moyenne 32 027F CFA/mois, soit un total de **384 325F CFA/an.** Les détails sont consignés dans le tableau 4, en annexes.

b- 2^{ème} proposition :

Compte tenu du fait que la prime fixe a toujours une proportion très grande dans la facture, nous avons envisagé de passer d'une tarification MT à celle BT double tarif ; c'est-à-dire choisir le tarif D2 industriel (voir tableau 1). En effet, cette tarification a l'avantage de :

- Ne pas tenir compte des pertes engendrées par le transformateur ;
- Avoir un tarif prime fixe trois fois moins cher que celui du type E2.

Par contre, le coût du kWh est plus élevé. Et, dans le cas de SODEPAL, on n'a pas vraiment une grande plage de variation possible de la puissance souscrite. En effet, la plus petite puissance à laquelle on pourra souscrire est de 40kW mais le gain supplémentaire généré par année serait vraiment insignifiant (environ 38 000F CFA pour toute une année).

Tableau 1: Coûts des tarifs E2 & D2 Industriel

Type de tarif	Tarif heures pleines (F CFA/kWh)	Tarif heures de pointe (F CFA/kWh)	Tarif heures prime fixe (F CFA/an/kW)
E2 Industriel	54	118	64 387
D2 Industriel	75	140	28 818

Les résultats de calculs sont consignés dans le tableau 3. On peut aisément constater que l'entreprise pourra économiser en moyenne environ 66 748 CFA/mois, soit un total de **800 986CFA/an.**

Dans ce cas, que fait-on du transformateur ?

Ce transformateur MT/BT de 100kVA appartient à la SODEPAL. Donc une fois que la solution énoncée sera effective, le transformateur sera tout simplement démagnétisé et placé au magasin. A la longue, à mesure que les besoins électriques de l'entreprise croîtront (si tel est le cas), on pourra envisager de le remettre en service. Toutefois si l'entreprise n'a pas l'intention d'acquérir de nouveaux équipements de grande puissance électrique elle peut toujours envisager de revendre le dit transformateur (voir SONABEL pour savoir si elle peut le payer pour un autre client).

2.) La compensation d'énergie réactive

Aucune recommandation particulière, mais nous voulons tout de même attirer l'attention sur le fait qu'une batterie de 5kVAr aurait été largement suffisante.

III- Après optimisation :

1.) Récapitulatif des dispositions :

- Changer la puissance souscrite de 45kW à 35kW et garder le tarif E2 industriel ;

- **Ou** passer du tarif type E2 Industriel au tarif type D2 Industriel, mais en gardant la même puissance souscrite ;
- S'il y a deux batteries de 5kVAr en fonctionnement actuellement, alors ne connecter qu'une seule et garder l'autre au magasin (comme pièce de rechange, au cas où).

2.) Formalités relatives à l'application des recommandations :

- Il faut écrire une correspondance au service facturation de la SONABEL pour le changement de puissance et aussi du type de tarif. Se référer aux annexes afin de voir le modèle de lettre possible à envoyer.
- Il y a une somme de 635 488F CFA, correspondant aux frais d'abonnement, à payer pour que le changement de tarif soit effectif.

3.) Résultats :

a- 1^{ère} possibilité :

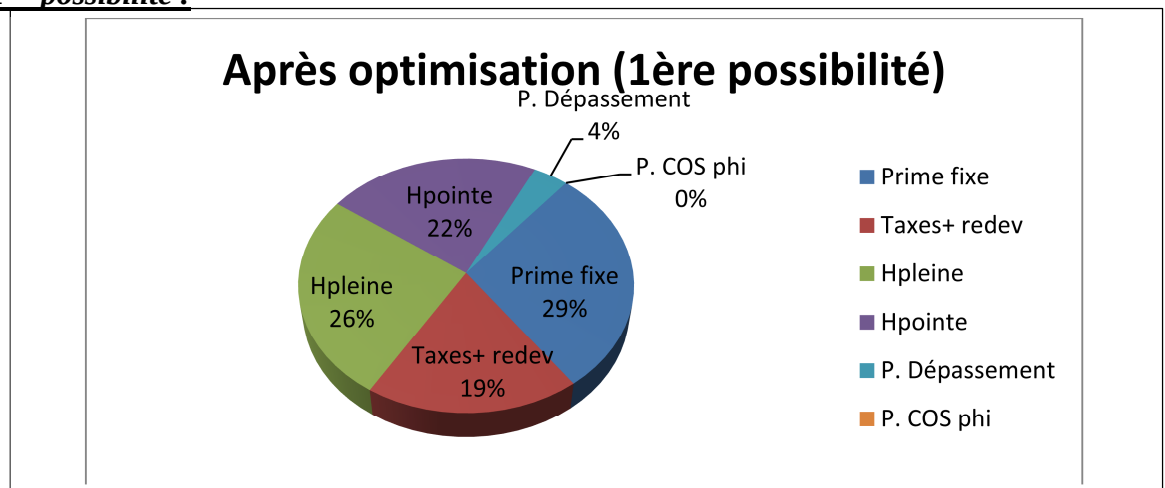


Figure 4: Après optimisation (1^{ère} possibilité)

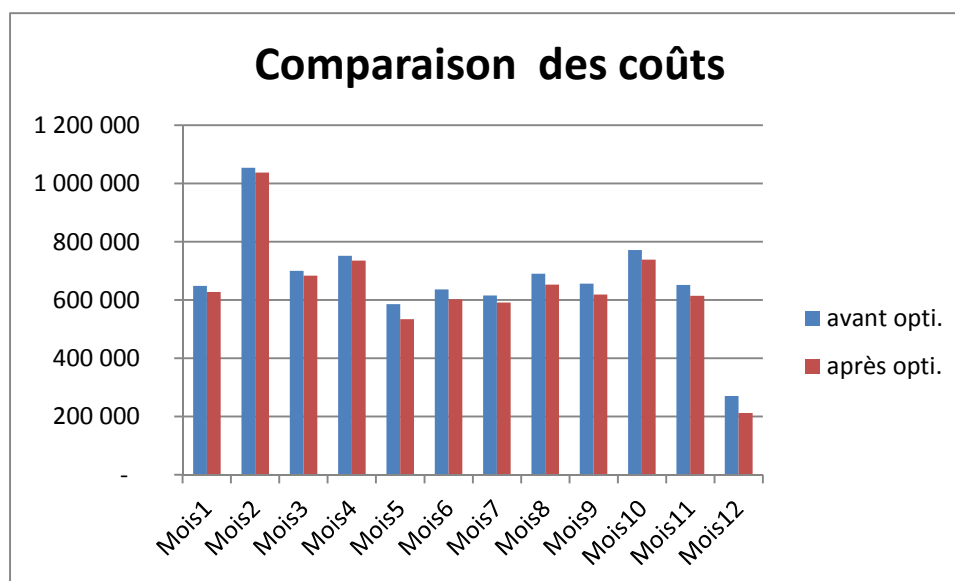


Figure 5: Comparaison des coûts

b- 2ème possibilité :

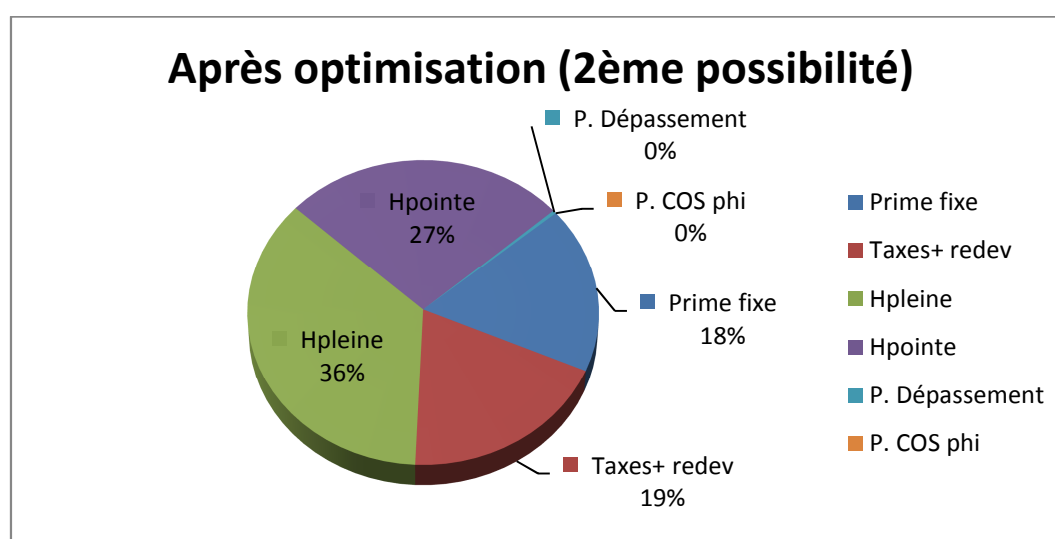


Figure 6: Après optimisation (2ème possibilité)

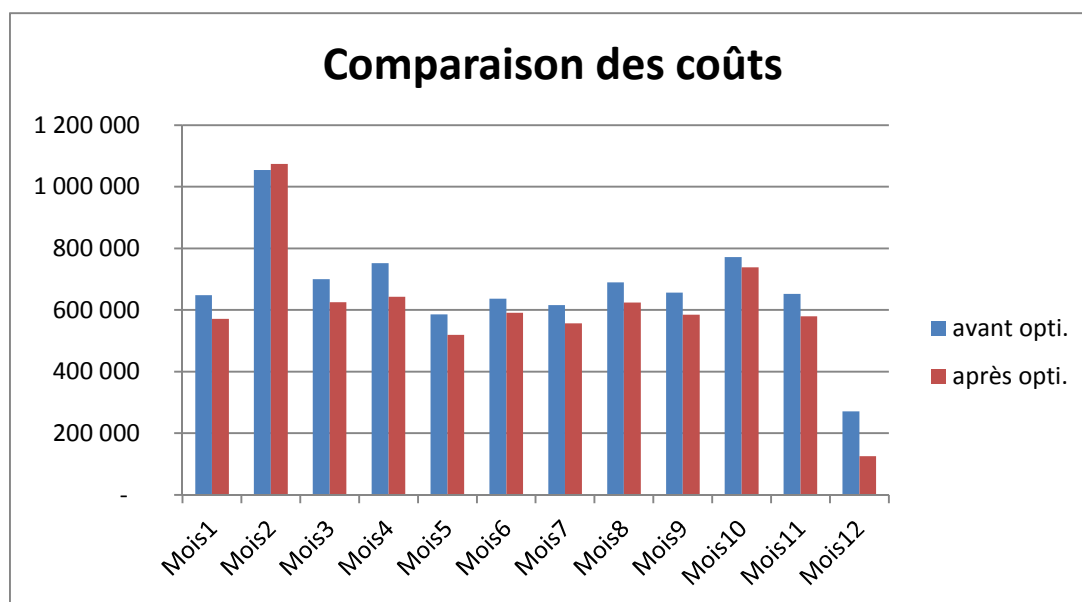


Figure 7: Comparaison des coûts

Partie 2 : Revue bibliographique :

I- Définition d'un four :

Un four est un ouvrage muni d'un système de chauffage puissant dont l'objectif est d'assurer la transformation physique ou chimique de la matière qui y est insérée. C'est donc un outil utilisé pour élever la température d'un produit. En cuisine il permet de cuire des aliments tandis que dans un processus de production d'objets il peut être soit :

- Un équipement destiné uniquement au chauffage (exemple : réchauffage de l'acier avant déformation plastique, réchauffage de pétrole brut avant distillation) ;
- Un véritable réacteur dans lequel on élabore les produits (exemple : four de fusion de verre, four de vapocraquage de la pétrochimie).

Il s'intègre généralement dans une ligne de production complexe dont il est un des éléments. On trouve des fours dans un très grand nombre d'activités industrielles, ce qui rend une approche globale assez délicate.

II- Classification des fours

Toute classification est arbitraire, elle est toutefois utile dans la mesure où elle permet de retrouver des caractéristiques commune à des équipements, à première vue, très différents. Nous proposons ici quatre classifications, en fonction :

- de la manutention du produit : fours continus ou discontinus
- du procédé de chauffage : direct ou indirect ;
- du niveau de température ;
- du combustible.

1.) Fours continus et fours discontinus

C'est la manutention et la circulation du produit qui est ici le critère. Dans un four continu, le produit à chauffer entre à une des extrémités et en ressort à l'autre. C'est le cas :

- Des fours tunnel pour la cuisson des biscuits, gâteaux ;
- Des fours de l'industrie chimique et du raffinage ;
- Des fours rotatifs de l'industrie cimentière.

Dans un four discontinu, le produit à chauffer est immobile dans le four ; il est chargé et déchargé (enfourné et défourné) au même endroit. C'est le cas :

- Des fours à pains de boulangerie ;
- Des fours à micro-ondes électriques ;

Cette différence dans la manutention entraîne des différences notables du point de vue thermique. En effet, dans un four continu, un point du four sera toujours (ou à peu près) à la même température tandis que dans un four discontinu la température en un point donné du four évoluera en fonction du cycle de chauffage que l'on veut faire subir au produit (figure 8). On notera que l'amélioration des performances des procédés continus et l'augmentation des capacités de production des installations ont peu à peu repoussé le domaine d'utilisation des fours discontinus que l'on trouve surtout pour :

- Les produits demandant un temps de séjour en four très long ;
- Les produits nécessitant des cycles de chauffage et/ou de refroidissement très précis.

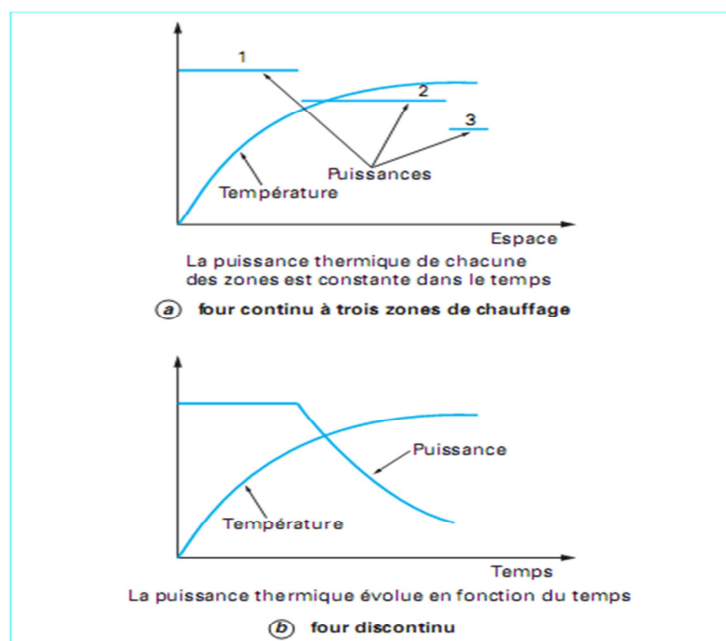


Figure 8: Evolution des températures et des puissances de chauffe dans les fours, Source : « Fours industriels » ©Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 842

2.) Fours à chauffage direct et chauffage indirect

Le critère est ici le contact entre le produit et les gaz issus de la combustion. Dans un Four à chauffage direct, Il y a contact entre les gaz issus de la combustion et les produits à chauffer. Du point de vue thermique, cela entraîne qu'une partie du transfert de chaleur s'effectue par

convection. Cette dernière (la convection) provoque, à la surface du produit, des phénomènes qui peuvent lui être préjudiciables. C'est le cas dans les fours de cimenterie où il y a interaction entre le soufre du combustible et le clinker.

Pour éviter ce contact, on place parfois, entre les produits et les gaz un écran protecteur : le chauffage est alors indirect. Dans un Fours à chauffage indirect l'interaction entre les gaz de combustion et les produits n'existe plus. Par contre, il s'introduit une résistance supplémentaire au transfert de chaleur qui doit se faire par conduction au travers de la paroi protectrice, puis par rayonnement et éventuellement convection vers la charge. Le problème technologique est alors la tenue de cette paroi qui est portée à haute température et est au contact de la flamme et/ou des gaz à haute température.

3.) Fours à haute température et fours à basse température

La classification est ici plus arbitraire car une même température peut être considérée comme haute dans un type d'activité et basse dans une autre activité. Même si cette limite est un tant soit peu arbitraire, elle n'en est pas moins réelle.

4.) Les fours, selon le type de combustible

On peut également classer les fours en fonction de l'énergie utilisée. En effet, le type d'énergie disponible et utilisé a un impact important sur la conception, l'utilisation et l'exploitation des fours. On trouvera dans le domaine des fours industriels, avec plus ou moins d'importance selon les activités, toutes les formes d'énergie :

- Des fours électriques : il s'agit des fours à résistances (effet Joule), à micro-ondes, à arcs, à induction, à électrodes submergées, etc. ;
- Des fours à gaz ; ils utilisent le gaz naturel, mais aussi le gaz de cokerie, le gaz de raffinerie, le gaz de haut-fourneau, etc. ;
- Des fours à combustibles liquides : ils utilisent le fuel lourd, mais aussi le gazole, le naphtha, etc. ;
- Des fours à combustibles solides : ils utilisent les charbons ou le coke de pétrole (généralement sous forme pulvérisée), mais aussi les déchets divers comme des pneus usagés qui sont incinérés dans les fours de cimenterie

Partie 3 : Evaluation technologique du four de la biscuiterie :

I- Description du four à biscuits de la SODEPAL :

C'est un four tunnel électrique fait essentiellement de résistances chauffantes. La chambre de cuisson de dimensions $L \times l \times h = 9 \times 0,72 \times 0,74 \text{ m}$ est traversée, en son centre, par une bande métallique de 40m de long (replié en deux sur elle-même) sur laquelle on pose la pâte à biscuit. Cette bande est continuellement en mouvement (entraînée par un moteur à embrayage), de telle sorte qu'on ait la pâte à l'entrée du four qui, sous l'effet de la chaleur va cuire jusqu'au moment où il en sort à l'autre bout de la chambre.

Ce four possède un panneau de commande totalement détaché de la chambre de cuisson. Sur celui-ci, se trouvent :

- Trois (03) ampèremètres (un pour chaque phase) ;
- Un (01) thermomètre ;
- Un (01) tachymètre (pour la vitesse de rotation du moteur entraînant le tapis) ;
- Deux (02) boutons poussoirs : marche/arrêt du moteur à embrayage ;
- Un rhéostat pour régler la vitesse de rotation du tapis ;
- Quatre (04) commutateurs pour enclencher les différentes.

La plaque signalétique indique les données ci-contre. On peut le scinder en trois (03) modules.

A ses débuts :

Ce four pouvait atteindre une température maximale de 400°C avec une puissance électrique de 50kW. On pouvait compter au total soixante-douze (72) résistances (de caractéristiques 600W / 220V) disposées en dessus / dessous de la bande métallique à raison de vingt-quatre (24) résistances par module.

TGYB -390
Electric Current Controlling Table
Size : 800x500x1150 Weight 50kg
Electricforce 380V Power 50kW
Date : 87 10 01
Made by the Light Industrial Machinery Plant Sishui

Et actuellement, qu'en est-il de ce four ?

Depuis que le four a été mis en fonctionnement au sein de la SODEPAL en 1989, il a plusieurs fois fait l'objet de maintenance. Rien que depuis les deux dernières années, environ 12 millions de FCFA ont été déboursés pour la réparation des différentes avaries. D'après le

technicien en charge de la maintenance, la plupart des pannes qui y surviennent sont souvent dues aux résistances défectueuses. Et, malheureusement, il est aujourd'hui très difficile de trouver des résistances de mêmes caractéristiques sur le marché. Ce qui fait qu'il est obligé de faire des adaptations. Il est donc clair que la consommation du four n'est plus la même que celle qui était la sienne à ses débuts. Ne disposant d'aucun relevé (écrit ou archivé) de consommation électrique dudit four, nous avons commencé notre étude par la mesure des valeurs actuelles.

Lors de notre première visite du four (en fonctionnement) nous avons constaté que :

- A. les ampèremètres affichaient les grandeurs suivantes : $\begin{cases} I_1 = 40A \\ I_2 = 20A \\ I_3 = 55A \end{cases}$
- B. le relevé des températures à intervalle de temps réguliers :

Tableau 2: Relevé de température du four par pas de 10mn

HH : MM	temps_cumul (mn)	T (°C)	observations
15:21	0	35	démarrage du four
15:50	29	80	Chauffage du four
16:00	39	115	
16:10	49	140	
16:20	59	158	
16:30	69	170	
16:40	79	180	
16:50	89	200	
17:00	99	205	
17:09	109	220	lancement de la patte
17:10	119	220	
17:17	129	190	Les 1er biscuits sortent
17:20	139	180	La cuisson se poursuit
17:30	149	150	
17:40	159	141	
17:50	169	140	
18:00	179	140	
18:10	189	140	
18:20	199	140	
18:30	209	140	
18:40	219	140	

D'où le profil de température suivant :

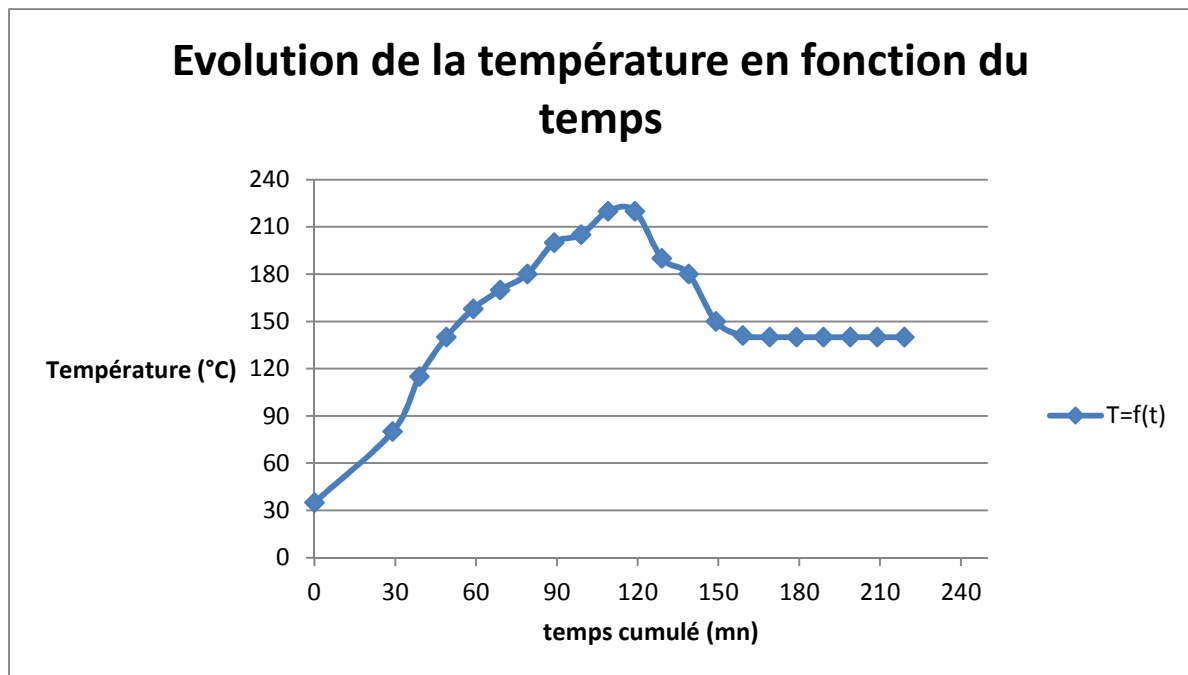


Figure 9: Evolution de la température en fonction du temps

- C. à la sortie du four, certains biscuits, notamment ceux sur l'un des bords, sont tantôt brûlés (donc présence de rebus dans la production), tantôt cuits à point ;
- D. la coque du four chauffe énormément et l'air ambiant (dans le local) est très chaud ;

1.) Interprétations :

- Les observations **A** et **C** font penser à un système déséquilibré, du fait que le technicien a fait des adaptations. Mais compte tenu de la vétusté de l'équipement lui-même il se peut que les ampèremètres intégrés soient eux aussi mal calibrés. Nous procédons à d'autres mesures avec un autre équipement dont nous avons l'assurance du bon fonctionnement pour vérifier les différentes grandeurs.
- D'autre part, l'observation **B** nous montre déjà qu'aujourd'hui la température maximale que ce four peut atteindre est de 220°C, tandis qu'à l'origine il pouvait produire des températures allant jusqu'à 400°C. Aussi, lorsqu'on introduit la patte à l'intérieur de la chambre de cuisson, la température subit une chute puis se stabilise à 140°C jusqu'à la fin de la production ;
- L'observation **D** nous fait penser qu'une partie de la chaleur produite par les résistances sert à chauffer le local ; c'est-à-dire qu'il y a des pertes considérables.

II- Matériels et méthodes :

1.) Les paramètres électriques :

Pour vérifier les paramètres électriques actuels du four à biscuits, nous avons utilisé un analyseur de données de réseau électrique.

Nous avons programmé l'analyseur pour relever : les courants de lignes (A1, A2, A3), le facteur de puissance (PF), la tension de service (V) et l'intensité globale (A).

- Dans un premier temps, on a réglé l'intervalle de mesures à 10 secondes (prise en compte des résistances et du moteur d'entraînement). L'opérateur a démarré le moteur seul (suite à notre demande). Le but étant d'avoir une série de valeurs relatives à sa consommation ;
- Puis, au bout de trois (03) minutes environ, l'opérateur a enclenché les résistances chauffantes. Nous avons alors reconfiguré l'intervalle de mesures à dix (10) minutes jusqu'à l'arrêt complet de la machine (prise en compte des résistances et du moteur d'entraînement).

Nous avons recherché les informations suivantes :

- Calculer la puissance active instantanée $P = \sqrt{3}UI\cos\varphi$;
- Déduire l'énergie (en kWh) consommée $E = P \times t_f$;
- Déduire la puissance moyenne P_{moy} à prendre en compte de l'installation ;

2.) La température à l'intérieur du four :

Par manque de thermomètre à infra-rouge, pouvant atteindre des températures de l'ordre de 300°C, disponibles aux laboratoires du 2iE, nous n'avons pas pu effectuer des mesures complémentaires. Nous avons donc supposé que la température lue sur le panneau de commande correspond à ce qui est réellement.

3.) Le temps de séjour (t_s) des biscuits dans le four :

Pour évaluer ce temps, nous avons marqué des biscuits à l'entrée du four. Puis nous avons lancé le chronomètre jusqu'à ce que ceux marqués sortent du four. On a réitéré au moins deux fois, puis on a fait la moyenne arithmétique pour avoir la valeur à considérer.

4.) Quantité de biscuits produits en une portée (pendant le t_s)

On a réitéré l'expérience, cette fois-ci en marquant les biscuits (à la sortie et à l'entrée du four). Puis nous avons recueillis la quantité marquée dans un récipient à part entière de masse m_r connue à l'avance. Ensuite on a pesé l'ensemble (récipient + biscuits marqués) pour déduire enfin la quantité de biscuits $m_b = m_t - m_r$

5.) La consommation spécifique

A l'instar de toute machine, les fours électriques sont caractérisés par un rendement énergétique $\eta = \frac{Q-Q_p}{Q} = \frac{Q_u}{Q}$ et/ou un rendement de combustion. Mais ceux-ci sont des rendements instantanés sur une période de temps limitée. Ils sont utilisés pour déterminer les performances d'une installation dans des conditions bien définies. En exploitation industrielle les conditions d'exploitation sont variables :

- Le four n'est pas utilisé en permanence à sa production maximale ;
- certaines installations fonctionnent de façon intermittente.

Cela entraîne une consommation énergétique qui peut être sensiblement supérieure à celle obtenue lors d'un essai limité dans le temps. On utilise alors la notion de consommation spécifique C_s qui est le rapport de l'énergie totale utilisée pendant une période donnée (par exemple le temps de séjour) à la quantité de produit traité durant la même période :

$$C_s = \frac{P_{moy} \times t_s}{m_b}$$

III- Résultats : analyses et discussion

1.) Les paramètres électriques

Les résultats des mesures sont consignés en annexe 4.

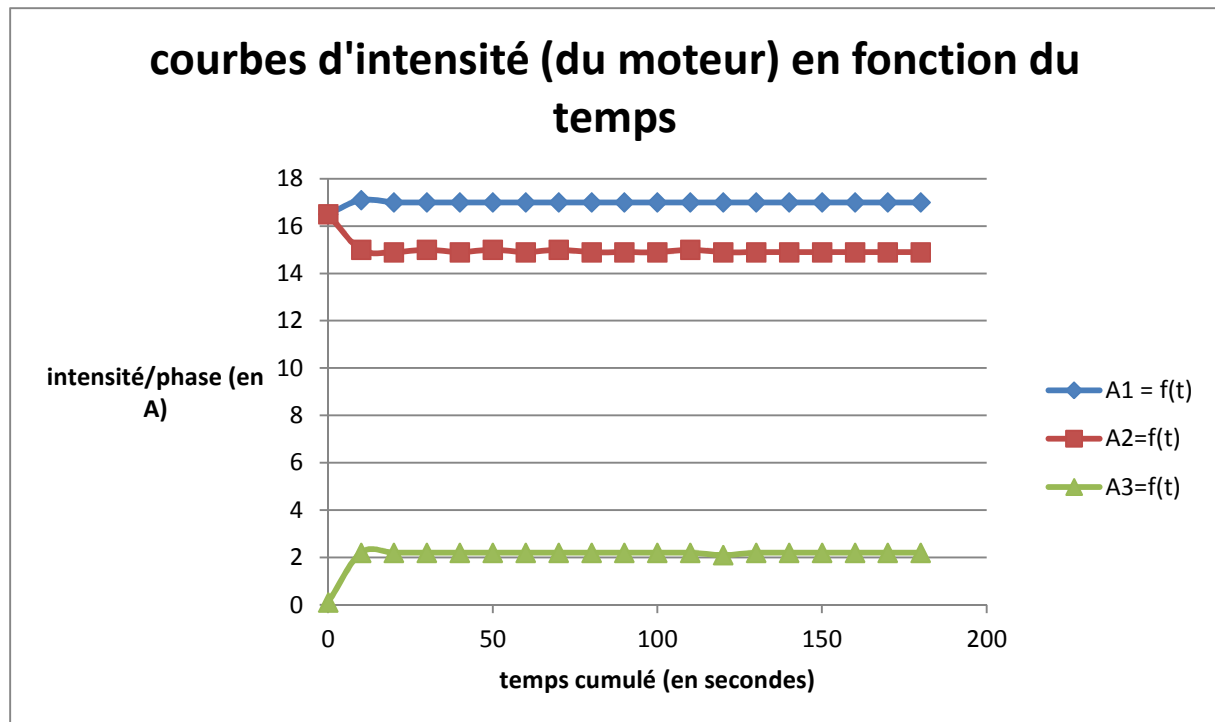


Figure 10: Courbes d'intensité du moteur en fonction du temps

Les mesures électriques au niveau du moteur montrent qu'il y a un déséquilibre notoire entre ses trois (03) phases. Deux d'entre-elles étant plus ou moins proches tandis que la troisième a un écart considérable par rapport aux autres. Cela est généralement dû aux problèmes de rembobinage des enroulements du stator. Mais le technicien en charge de la maintenance affirme n'avoir jamais intervenu sur ce dernier mis à part pour certaines opérations de graissage de l'arbre moteur (pour entraîner le tambour). Dans ce cas, beaucoup de scénarios sont encore envisageables à savoir :

- La vétusté du moteur qui fait qu'il ne répond plus aux normes et aux attentes ;
- Les surtensions aux bornes des enroulements : Il s'agit du fait que ce moteur a été conçu pour une tension nominal de 380V tandis que depuis longtemps maintenant il fonctionne à une tension de service de 400V qui de plus est très instable. La figure 12 présentant l'évolution de la tension en fonction du temps illustre clairement qu'il arrive que le moteur soit soumis à une surtension, plus ou moins permanente, de 24V (c'est-à-dire une tension aux bornes d'environ 405V).

En effet, d'après la loi d'ohm $U = Z.I$ on déduit que $I = \frac{U}{Z}$ Ce qui implique que pour une même impédance (constante) l'intensité augmente proportionnellement à l'accroissement

de tension. Il s'en suit donc un échauffement supérieur à celui prévu. Appliqué en moyen ou long terme, l'isolation (généralement de vernis) des enroulements pourrait se dégrader. Dès lors, un court-circuit est possible entre une phase et la masse ou le neutre : c'est un court-circuit.

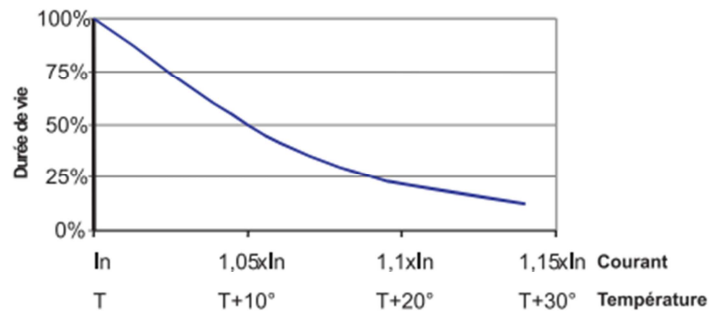


Figure 11: Durée de vie des moteurs en fonction de leur température de fonctionnement ou du courant consommé. source: 4Démarrage et protection des moteurs, Schneider electric

Malheureusement, force est de constater que tous les moteurs de la SODEPAL ont des tensions nominales de 380V, sauf celui de l'extrudeur (qui a une tension nominal de 420V). **Nous recommandons, par la même, de songer à les remplacer.**

- Le déséquilibre et surtout l'instabilité du réseau SONABEL peut avoir endommagé les enroulements du moteur, laissant ainsi l'un d'entre eux le moins garni possible. En effet, les enroulements sont, pour les moteurs, les parties les plus vulnérables aux défauts électriques et aux incidents d'exploitation. Par exemple une surcharge (à cause du tapis remplacé dernièrement qui était trop lourd).

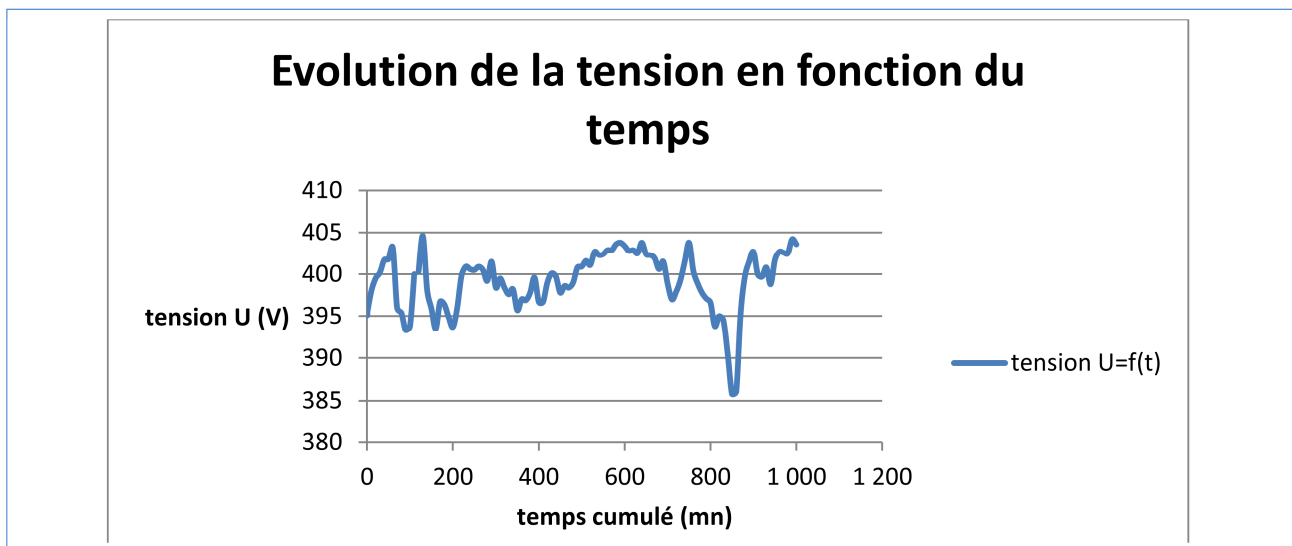


Figure 12: Evolution de la tension en fonction du temps

Evolution des courants de ligne en fonction du temps

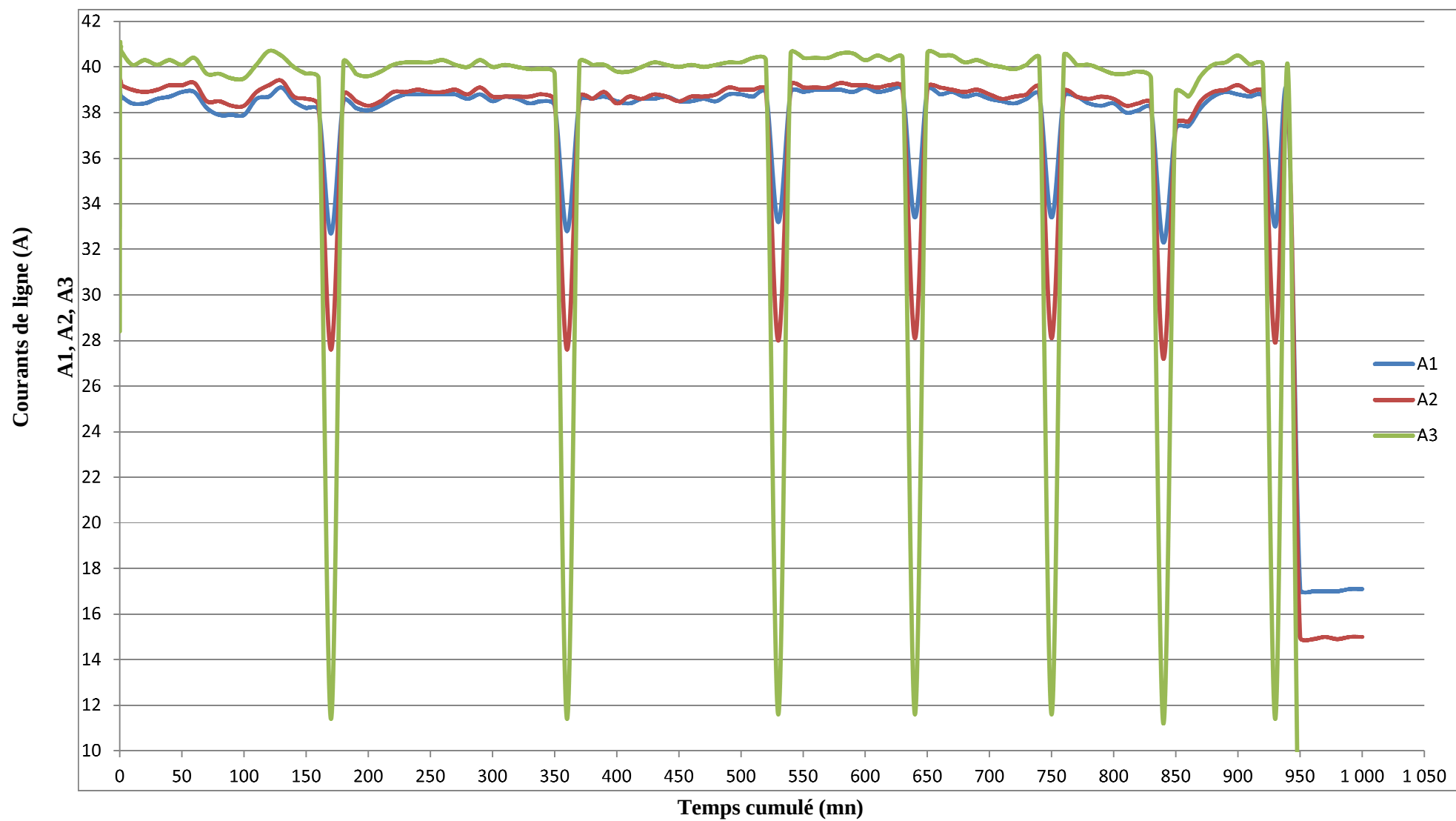


Figure 13: Evolution des courants de ligne du four (moteur + résistances) en fonction du temps

Par ailleurs, les mesures faites pour l'ensemble (moteur + résistances) montrent encore un autre déséquilibre. En effet, la phase 3 qui était la moins chargée (avant la mise en marche des résistances) se trouve être la plus chargée, avec une forte demande. Cela s'explique par le fait qu'en plus du moteur déséquilibré, les résistances elles-mêmes sont mal réparties sur les trois phases. Ce qui est justifié car elles n'ont pas toutes la même puissance et ne fonctionnent pas toutes.

2.) Le temps de séjour :

Au cours de trois essais, le chronomètre a affiché les valeurs suivantes :

Tableau 3: Valeurs de mesure du temps de séjour des biscuits dans le four

	1^{er} essai	2^{ème} essai	3^{ème} essai
ts (mn)	7,35	7,37	7,37

Soit une moyenne de 7mn et 36 secondes. Donc le temps de séjour vaut : $t_s \cong 8mn$. Ce temps se justifie par le fait que la température à l'intérieur est relativement faible par rapport à celle recommandée, et elle est très mal répartie. Ce qui fait qu'il faut plus de temps pour la cuisson.

3.) La quantité produite pendant le temps de séjour

$m_r = 1,550kg$; La masse totale vaut $m_t = 6,5kg$. On en déduit donc la masse de biscuits $m_b = 4,95kg$.

La quantité produite en une portée a très peu de chances de varier car c'est un four à cuisson continue : il est toujours rempli et les biscuits ont la même forme (taille et poids).

4.) La consommation spécifique :

$$C_s = \frac{P_{moy} \times t_s}{m_b} = \frac{27 \times (8/60)}{4,95} = 0,73kWh/kg$$

Ce four tunnel consomme environ 0,7273kWh pour produire 1 kg de biscuits (c'est la consommation spécifique ou l'efficacité énergétique, cela dépend de la nature du biscuit ou de sa recette de production). De façon générale, aucune norme ne définit d'ores et déjà les consommations spécifiques d'un four à biscuits pour évaluer son efficacité car, en fonction de certains paramètres tels que la nature de la source d'énergie à l'entrée, la nature de la substance qui va séjourner dans le four, cela peut changer. En revanche les normes sont

claires que pour la cuisson d'un aliment (ou préparation / fabrication d'un produit) il faut une température précise pendant un temps bien déterminé afin d'avoir un optimum de qualité du produit et de consommation énergétique. C'est dans cet élan que nous avons jugé de l'efficacité de ce four.

En effet, la norme recommande de faire cuire les biscuits (en ce qui concerne la recette utilisée à la SODEPAL) à une température de 220°C pendant trois minutes $\Rightarrow t_s = 3mn$.

Cependant, quelle était la puissance électrique développée pour produire une température de 220°C ? $\sqrt{3}UI \times t = mC\Delta T$, aux pertes près.

Le four ne possède aucun système de régulation, mis à part quatre (04) commutateurs pour établir ou interrompre l'alimentation d'un ensemble de résistances. Les résistances étaient identiques (600W/220V), au nombre de 72 pour une température maximale possible de 400°C.

On en déduit que (à priori) la température évoluerait proportionnellement au nombre de résistances alimentées. Ce qui nous conduit à considérer (suite à une règle de 3) que chaque résistance alimentée avait un apport de 5,56°C. Par conséquent, pour atteindre une température de 220°C il aurait fallu alimenter 40 résistances. D'où une puissance électrique

$$P = ((P_i/1000) \times \text{Nbre de résistances actives}) + P_{\text{moteur}} = 31kW$$

Tableau 4: Calcul de la consommation spécifique du four

	Pmoy (kW)	T (°C)	ts (mn)	ts (h)	Qté (kg)	Cs (kWh/kg)
Etat actuel	27	140	8	0,133	4,95	0,73
Etat ancien	31	222,24	3	0,05	4,95	0,31

Le rapport des deux ratios de consommation est de $\approx 2,3$. Ce qui signifie qu'aujourd'hui, pour produire une certaine quantité de biscuits en un jour, on consomme à peu près deux (02) fois plus d'énergie qu'à l'époque. On peut aussi le traduire par le fait qu'on passe beaucoup plus de temps (environ 3 fois plus) qu'il n'en faudrait pour une production d'une même quantité.

Aussi, l'analyse de la production sur la base des fiches de suivi (année 2011) que nous avons reçu nous a permis de faire ressortir les informations suivantes :

Tableau 5: Informations relatives à la production de biscuits (vitaline & vitacasui)

Qté (kg / j)	301
Rebus (kg / j)	2
temps (h / j)	8
Cprod. (kg/h)	37,247
fréquence (j /mois)	12

IV- Conclusions et Recommandation :

Compte tenu du fait que :

- ✓ Le moteur est déséquilibré, l'ensemble des résistances est déséquilibré ; le tout formant un système déséquilibré ;
- ✓ La température de cuisson est très faible par rapport à la norme ;
- ✓ La consommation spécifique a doublé depuis le début.
- ✓ Il n'y a pas d'homogénéité de température à l'intérieur de la chambre de cuisson ;
- ✓ Les pertes de chaleur sont importantes, de même que les pertes de production (environ 24kg/mois de rebus, soit ~ 288kg/an) ;
- ✓ La technologie est dépassée et très imprécise ;

Nous recommandons de le changer, car il ne favorise pas l'essor de l'entreprise.

V- Choix d'un nouveau four :

Pour le choisir, nous avons tenu compte des paramètres suivants :

- Les besoins de l'entreprise (assurer une cuisson continue de ses biscuits) ⇒ un **"four de type tunnel"** ;
- La température maximale qu'il peut atteindre ⇒ **température désirée nominale de 220°C** ;
- La nature de la source d'énergie, ⇒ **gaz naturel, courant électrique ou encore énergie renouvelable** ;
- La capacité de production ou la quantité de biscuits produits en une portée ;
- La consommation spécifique : **elle doit être proche de celle qu'on avait au début, voire plus petite** ;

- L'encombrement du four : **il faut que le local** (de dimensions $L \times l \times h = 18,20 \times 5,90 \times 2,5$) **actuel de l'usine de la SODEPAL puisse le contenir.**

L'auscultation des catalogues disponibles, a porté notre attention sur le « Four de traitement au four » de marque KQ de la compagnie Ku&Qi (Shangai) Food Machinery Co.ltd.

- ✚ **Spécifications :** Haute qualité de four tunnel de pain/biscuit. Pour le fonctionnement au gaz, il y a une conception spéciale de contrôle de température. Appuis complet & technique de services après-vente.

FEATURES:

This machine uses natural gas as the fuel, rapid heating up and energy saving. 2. The oven is controlled by different heating zones, and each of heating zone temperature is adjustable or presetting. Meanwhile, It is displayed by digital form.3.Through the connection of the structure within the heating zones, allow the oven expanding.4. Adopt high-qualified thermal materials, good insulation, and high thermal efficiency.5. Steelwork, ducts and chambers are all painted with anti-high temperature aluminum powder paint which can resist 400°C.6. Full-automatic PID temperature control and automatic constant temperature.7. Great control flexibility end prefect safety precautions.8. It can fit the technological requirements for production of different biscuits.

- ✚ **Portée de traitement au four :** Pain, et biscuits
- ✚ **Catégories de produit :** Selon les exigences de clients, nous pouvons offrir le type électrique, le type de gaz naturel et le type diesel. La longueur peut également être adaptée aux besoins du client.

Tableau 6: Fiche technique du four KQ

Modèle	Dimensions (mm)	Spécifications	Tension (V)	Puissance (kW)	Consommation (kg/h)	Capacité de production (kg/h)	Poids (kg)
KQ	16000x1200x1500	Electrique	400/230	55	-	100	2 400
		Gaz naturel	400/230	Très faible	15	100	

1.) Avantages de ce four :

Les avantages sont nombreux. On peut citer entre autres :

- Une bonne régulation et répartition de la température à l'intérieur, améliorant ainsi la cuisson ; donc un produit de qualité encore meilleure pour les clients ;
- La réduction du temps de production (pour la même quantité moyenne actuelle de biscuits produits : 300kg/jour en moyenne pendant 8h). On peut donc faire toute la production seulement aux heures pleines (**dans l'éventualité où on prend celui de type électrique**). Ce qui réduit considérablement le montant de la facture mensuelle.
- Ou alors on augmente la quantité produite par jour, pour la même durée de production ;
- Des économies possibles sur la prime fixe (si on prend le four de type à gaz) : voir tableau suivant.

Tableau 7: Détermination du gain économique sur la prime fixe

	puissance souscrite (kW)	type de tarif	Tarif (CFA/kW/an)	Prime fixe (CFA)
puissance souscrite actuelle	45	E2 Industriel	64 387	241 451
puissance souscrite recommandée	20	D2 Industriel	28 818	48 030
économie réalisée (CFA / mois)			193 421	
économie réalisée (CFA / an)			2 321 052	

2.) Justification économique de cet investissement :

Nous allons procéder par une étude comparative entre les deux types de four (à gaz et électrique) afin de motiver l'entreprise vers un choix judicieux. En effet, il est clair que les deux types sont déjà meilleurs (mieux) que l'actuel four, mais par contre une ambiguïté demeure entre les avantages de choisir un type plutôt qu'un autre. C'est pourquoi nous allons les comparer en termes de coût d'exploitation relatif, le temps de retour sur investissement, etc.

a- Coût d'acquisition jusqu'au Burkina Faso :

Tableau 8: Coûts d'acquisition des deux types de four

Type de four	V.O (\$)	taux de change (CFA/\$)	V.O (CFA)	Transport (CFA)	Frais d'installation (CFA)	Investissement I0 (CFA)
Electrique	9 600	500	4 800 000	1 000 000	200 000	6 000 000
A Gaz	32 000		16 000 000	1 000 000	500 000	17 500 000

Nous avons fait les hypothèses que les frais d'installation du :

- ✓ Four électrique font 200 000 CFA. Pour l'achat de câbles, l'assemblage et d'autres accessoires éventuels ;
- ✓ Four à gaz font 500 000CFA. En effet, compte tenu que la quantité prévisionnelle de gaz consommé par jour est de 45kg, nous avons fait le choix d'installer un réservoir (une cuve, ou un tank) de gaz et de se faire livrer "in situ". Au Burkina Faso, la seule société de distribution de gaz à posséder cette technologie (à l'heure actuelle) est la Société de Distribution de Gaz (SODIGAZ).

Pour cela, il faut envoyer une correspondance à la SODIGAZ qui enverra ses agents faire un devis. Ensuite une facture pro-forma sera envoyée au client.

Néanmoins il faut préciser que la SODIGAZ facture seulement le coût d'installation du réseau de distribution de gaz (partant du réservoir jusqu'à l'équipement terminal) et que le réservoir est prêté. Aussi, nous nous-sommes assurés que ce réseau aura les éléments suivants :

- Un débitmètre à la sortie du réservoir et à l'entrée du four ;
- Une vanne à la sortie du réservoir et à l'entrée du four ;
- Un appareil de contrôle du niveau de gaz dans le réservoir.

b- Coûts d'exploitation :

Nous avons simulé les coûts qu'engendrerait la production par mois de la quantité moyenne actuelle, ainsi que les gains attendus par rapport au four actuellement utilisé.

Il faut noter que le gaz est subventionné au Burkina Faso de telle sorte que les prix soient les suivants :

- De 1 à 6 kg, le coût vaut 250 CFA/kg ;
- De 6 à 12kg, le coût vaut 320 CFA/kg ;
- Plus de 12kg, le coût vaut 500 CFA/kg.

Tableau 9: Coût relatif à l'exploitation des fours

	actuel four (ancien)	nouveau four proposé	
	Electrique	Electrique	Gaz
P (kW)	27	55	faible
Qté (kg/mois)	3 612	3 636	3 636
t (h)	96,0	36,12	36,12
Energie	2 592 kWh	1 987 kWh	542 kg
type de tarif	E2 Industriel	E2 Industriel	D2 Industriel
Tarif (CFA/kW/an)	64 387	64 387	28 818
puissance souscrite (kW)	45	45	20
prime fixe (CFA / mois)	241 451	241 451	48 030
tarif moyen (CFA / kWh)	86	86	107,5
Gaz (CFA / kg)	500	500	500
Coût énergie (CFA / mois)	222 912	170 848	270 900
Total exploitation (CFA/mois)	464 363	412 299	318 930
Entretien (CFA / an)	5 000 000	2 000 000	500 000
Exploitation (CFA / an)	10 572 359	6 947 586	4 327 160
prise en charge par le groupe (25kVA)	non	non	oui
Récupération de chaleur	pas possible	pas possible	possible
compétence particulière pour l'exploitation	non	non	non
Compétence particulière pour la maintenance			régulation, électronique,
économie réalisée / mois			
		Electrique	Gaz
		52 064	145 433

c- Calcul de la VAN et du temps de retour sur investissement :

Nous avons fait les calculs avec les hypothèses suivantes :

Tableau 10: Hypothèses de calculs de la VAN

Durée de vie N (ans)	5
Type d'amortissement	linéaire
Taux d'amortissement	20%
Taux d'impôt	30%
Taux d'actualisation (t_a)	12%
Valeur résiduelle (VR)	10% l_0
Taux de croissance CA	1,05
Taux de croissance de CE	1,03

$$EBE = CAHT - CE ; \quad RE = EBE - Amort. ; \quad Impots = \text{taux d'impots} \times RE$$

$$RN = RE - Impots ; \quad CF_i = RN + Amort. + VR$$

$$\text{Par conséquent : } VAN = I_0 + \sum_1^N (CF_i \times (1 - t_a)^{-i})$$

✓ **Tableau 11: Calcul de la VAN du four à gaz**

Années	0	1	2	3	4	5
chiffres d'affaires HT (CAHT)		40 000 000	42 000 000	44 100 000	46 305 000	48 620 250
charges d'exploitations (CE)		4 327 160	4 456 975	4 590 684	4 728 405	4 870 257
Excédent Brut d'Exploitation (EBE)		35 672 840	37 543 025	39 509 316	41 576 595	43 749 993
Amortissements (Amort.)		3 500 000	3 500 000	3 500 000	3 500 000	3 500 000
Résultats d'exploitations (RE)		32 172 840	34 043 025	36 009 316	38 076 595	40 249 993
Impôts		9 651 852	10 212 908	10 802 795	11 422 979	12 074 998
Résultats Nets (RN)		22 520 988	23 830 118	25 206 521	26 653 617	28 174 995
Amortissements		3 500 000	3 500 000	3 500 000	3 500 000	3 500 000
Valeur Résiduelle						1 750 000
Cash Flows (CF)	17 500 000	26 020 988	27 330 118	28 706 521	30 153 617	33 424 995
VAN	86 082 571	projet rentable				
DRCI	10 semaines					

✓ **Tableau 12: Calcul de la VAN du four électrique**

Années	0	1	2	3	4	5
chiffres d'affaires HT		40 000 000	42 000 000	44 100 000	46 305 000	48 620 250
charges d'exploitations		6 947 586	7 156 014	7 370 694	7 591 815	7 819 569
Excédent Brut d'Exploitation		33 052 414	34 843 986	36 729 306	38 713 185	40 800 681
Amortissements		1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000
Résultats d'exploitations		31 852 414	33 643 986	35 529 306	37 513 185	39 600 681
Impôts		9 555 724	10 093 196	10 658 792	11 253 955	11 880 204
Résultats Nets		22 296 690	23 550 790	24 870 514	26 259 229	27 720 476
Amortissements		1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000	1 200 000
Valeur Résiduelle						600 000
Cash Flows	6 000 000	23 496 690	24 750 790	26 070 514	27 459 229	29 520 476

VAN	87 468 391
DRCI	13 semaines

projet rentable

Conclusion :

Les deux projets sont rentables avec une VAN de 86 082 571 millions pour le four à gaz contre 87 468 391 millions pour le four électrique. Mais ne perdons pas de vue que les cash-flows annuels du four à gaz sont toujours plus élevés que ceux du four électrique. Il en est de même pour les délais de récupération du capital investi (DRCI), et cela, malgré le fait qu'on investit plus pour l'acquisition de la technologie à gaz.

De plus, le prix du gaz en vrac peut toujours être renégocié au près du distributeur de gaz, contrairement au prix du kWh qui ne peut être négocié.

C'est pourquoi nous portons notre choix sur le Four à Gaz.

3.) Impact environnemental de l'utilisation du four à Gaz

Les principaux produits de la combustion du gaz naturel sont le dioxyde de carbone et la vapeur d'eau, les mêmes composés que nous rejetons lorsque nous respirons. C'est donc un combustible propre.

Partie 4 : Evaluation technologique du four de la pâtisserie :

I- Description du four :

Il s'agit d'un four de marque STRASBOURG de dimensions 3x2,28x1,75 à deux chambres de cuisson, comme on en voit dans la plupart des boulangeries. Le gaz-oil est la principale source d'énergie de ce four avec une température maximale de 300°C. Mais elle absorbe néanmoins une puissance électrique faible (environ 2,5kW) pour l'alimentation du bruleur. Ici on a une technologie de chauffage indirecte.

II- Fonctionnement actuel du four et Diagnostic :

La production par ce four se fait 24h/24 avec trois (03) équipes qui se relayent l'une après l'autre.

1.) Observations :

Lors de notre visite pour constater l'état actuel du four, nous avons relevé un certain nombre de faits à savoir :

- a) Tout comme le four tunnel de la biscuiterie, le four en question ne possède pas de système de régulation de la température. Ainsi, lorsqu'on veut diminuer la température interne (du four) on se contente d'arrêter le bruleur et d'attendre. Or le fait est que nous avons remarqué aussi que lorsqu'on arrête le bruleur, la température à l'intérieur continue de s'élever pendant un certain temps (pouvant créer des écarts de 10 à 20°C en plus, après l'arrêt des bruleurs), se stabilise puis commence à s'abaisser progressivement. Ce qui pourrait altérer la cuisson. Heureusement que l'expérience des opérateurs fait que cela n'arrive presque pas.
- b) Dans le local de production, il fait plus ou moins bon vivre ; c'est-à-dire que la température est presque la même que celle qui y règne à l'extérieur ;
- c) Les parois (externes) du four sont à peine chaudes, mais il subsiste tout de même des endroits assez chauds ;
- d) Pendant la cuisson du pain, pour humidifier le pain et aussi créer de la vapeur dans le four, l'opérateur ouvre les vannes d'arrivée d'eau froide, pendant un certain temps puis referme.

- e) Le four n'est quasiment pas chargé à bloc pendant son exploitation, sauf pendant la cuisson du pain.

2.) Analyse et interprétation

La première observation montre qu'il n'y a pas de régulation automatique de la température, ce qui fait qu'il y a une forte probabilité qu'on consomme du carburant sans pourtant produire un aliment de qualité. La solution, pour une gestion rationnelle du carburant serait d'avoir un système automatique de contrôle de l'alimentation du brûleur.

Les observations (b) et (c) quant à elles nous indiquent que le four est assez bien isolé thermiquement.

En revanche, le constat (d) laisse un peu à désirer, car compte tenu de la chaleur latente de vaporisation de l'eau qui vaut $\sim 2500 \text{ kJ/kg}$, on se rend aisément compte qu'en amont il faut que la source de chaleur (le brûleur injectant le gasoil dans la chambre de combustion) soit capable de débiter une grande quantité de chaleur. Si de plus on envoie une quantité d'eau nettement supérieure à ce qu'il n'en faut, on perd encore plus en quantité de carburant. Il faut donc installer un débitmètre avant la vanne afin de quantifier la masse d'eau arrosée et n'envoyer que la quantité nécessaire.

Aussi, l'énergie qu'il faut pour vaporiser de l'eau (pris à 30°C) est nettement supérieure à celle qu'il faut pour vaporiser de l'eau (pris à une température un peu au-dessus). On doit donc connecter le circuit d'eau du four à un circuit d'eau chaude.

Un autre aspect qui peut sembler négligeable, mais dans le fond important, est que la "porte" du four ne se ferme pas correctement ; c'est-à-dire que lorsqu'elle est fermée il y a encore des espacements relativement importants qui permettent l'infiltration de l'air ambiant dans le four et, selon la taille des ouvertures d'infiltration, cela peut jouer énormément sur la quantité de carburant consommé.

III- Les recommandations :

En principe il nous faut d'abord s'assurer de l'efficacité plus ou moins bonne du four avant de faire des propositions. Pour cela, la première des choses serait de déterminer sa consommation spécifique ; ce qui n'est pas évident puisqu'il n'y a pas de fiches de suivi de la production et de la consommation du carburant. Ensuite la mesure de certains paramètres

comme la température interne, l'humidité de l'air contenu dans le four serait de véritables indicateurs pour une recommandation justifiée. Malheureusement nous avons manqué d'outils capables d'atteindre de telles températures. Néanmoins, nous faisons les recommandations suivantes :

- ❖ Etablissement de fiches de suivi de la production et de la consommation de carburant
- ❖ Installer un débitmètre à l'entrée du four afin de contrôler dorénavant la quantité d'eau envoyée pendant la cuisson du pain ;

Récapitulatif des différentes recommandations :

1.) A propos du four tunnel de la biscuiterie :

- ✓ Faire l'acquisition d'un four tunnel à Gaz dans les plus brefs délais. Les critères de choix étant la capacité de production / heure ainsi que la consommation de gaz / heure de fonctionnement en plus de tous les autres énumérés au point V du chapitre 2 du présent document

2.) Sur la facture électrique :

- ✓ Dans l'immédiat, passer à la tarification BT Double tarif de type D2 Industriel mais garder la puissance souscrite à 45kW ; cela permettra de réaliser une économie de 800 986 CFA /an ;
- ✓ Réduire la puissance des batteries de compensation à 3kVAr, sinon tout au plus 5kVAr afin d'éviter toute surtension éventuelle ;

Ensuite après acquisition du four à Gaz que nous avons proposé (ou du moins ayant les mêmes caractéristiques techniques),

- ✓ Réduire la puissance souscrite à 20kW, toujours avec la tarification de type D2 Industriel ;
- ✓ Réaliser un suivi de la qualité des fumées d'échappement et faire une étude technique de faisabilité pour la mise en place d'un récupérateur de chaleur (utile pour préchauffer l'eau avec laquelle on arrose le four de la boulangerie pendant la cuisson du pain. Ce qui permettra de réduire plus ou moins la consommation de gas-oil du dit four)
- ✓ Réaliser un suivi de la consommation de gaz, la fréquence et/ou quantité approvisionnée, etc, à toute fin utile.

3.) Pour d'autres équipements :

- ✓ Dans la mesure du possible, s'équiper de moteurs (ou autre appareil triphasé) ayant une tension nominale de 400V.
- ✓ Songer à équiper les principaux équipements de régulateur de tension, afin d'optimiser la durée de vie et le bon fonctionnement de l'équipement en question.

Conclusions & perspectives

Somme toute, ce travail s'est révélé être une expérience enrichissante car nous avons appris à mieux maîtriser la facturation et toute la méthodologie d'optimisation des factures. Nous avons aussi élargi nos connaissances sur les différentes technologies des fours et les principaux postes de leur possible optimisation. En effet, actuellement la facture électrique mensuelle est élevée et, cela est dû en grande partie à la prime fixe. C'est pourquoi nous proposons de passer à la tarification de type D2 industriel qui permettra d'économiser environ 800 milles CFA / an pour un investissement de 635 488 CFA (correspondant aux frais d'abonnement).

Aussi, le four tunnel de la SODEPAL doit être changé dans les plus brefs délais afin d'améliorer sa compétitivité sur le marché. Pour cela, nous avons proposé le four KQ de la compagnie Ku&Qi Food Machinery ayant une capacité de production de 100kg biscuits / heures. Son acquisition nécessite un investissement de 17,5 millions de CFA récupérable en dix (10) semaines.

Cependant, il serait aussi intéressant d'accorder une attention particulière à d'autres aspects afin de réduire davantage les coûts de production mais aussi et surtout dans le but d'accroître le niveau de sécurité des installations. En effet, pendant notre séjour dans leurs locaux, nous avons constaté que l'installation électrique (la distribution et le câblage) ne semble pas concorder avec les normes en vigueur. Pour éviter tout incident éventuel, il sied dès à présent de l'auditer. Par exemple :

- Nous avons remarqué que le TGBT, situé dans une salle d'équipement (où travaillent certains agents), est juste recouvert par un contreplaqué avec une grande ouverture en plein milieu. Il serait plutôt judicieux de faire mettre une porte fermée à clef pour éviter tout accident. ;
- Tous les locaux administratifs ainsi que la boutique sont commandés par un seul et même disjoncteur ; cela veut dire qu'en cas de défaut dans un local, toutes les autres pièces sont aussi délestées.

Aussi, réduire sa consommation énergétique est bien mais disposer d'une source autonome et gratuite est encore mieux. Une fois que toutes les mesures d'économie énoncées seront

effectives, la puissance électrique de l'installation ne sera plus si grande que ça. SODEPAL pourra envisager la mise en place d'un générateur photovoltaïque pour son alimentation.

BIBLIOGRAPHIE :

- + **Dr – Ingénieur Désiré COMPAORE.** 18 Décembre 2007. Suivi et contrôle des factures d'électricité dans *La Maitrise des Dépenses énergétiques ...dans les Entreprises privées....* Pages 9 à 37
- + **Isidore JACUBOWIEZ,** « Fours industriels » ©Techniques de l'Ingénieur, traité Génie énergétique BE 8 842, Pages 2 à 3 ;
- + **Nicolas CHAUMIER.** Mai 2003. Réduction des pertes d'énergie électrique dans *Cahier Technique Schneider Electric n° 206 : les économies d'énergie dans le bâtiment.* Page 16.
- + **Averti.** 10 juin 2010 © CERTIA 2010. Deuxième session : Les procédés industriels de chauffage, de cuisson et de séchage (Isabelle GOULLIEUX) dans *Efficacité Energétique dans les Industries agroalimentaires «Forum régional pour l'optimisation de l'utilisation des fluides dans les procédés de fabrication de l'industrie agroalimentaire » SYNTHÈSE* pages 14 à 18.
- + Chapitre 4 : Démarrage et protection des moteurs dans *Cahier Technique Schneider Electric n° : Page 80 à 83.*
- + http://french.alibaba.com/gs-suppliers_shkuqi

ANNEXES

Annexe1 : Analyse et calcul des factures (janvier 2010 – décembre 2010) avant optimisation.....	44
Annexe 2 : Etude de la puissance souscrite et du cos_phi.....	45
Annexe 3 : calcul des factures après optimisation, 1^{ère} possibilité	46
Annexe 4 : calcul des factures après optimisation, 2^{ème} possibilité	47
Annexe 4 : Relevé des paramètres électriques du four.....	48
Annexe 5 : inventaire des principaux équipements de la SODEPAL et puissances mesurées	51
Annexe 6 : caractéristiques de l'analyseur de réseau	52
Annexe 7 : Images du four à gaz KQ	53
Annexe 8 : feuille de calcul pour l'optimisation de la facture.	54

**Annexe1 : Analyse et calcul des factures (janvier 2010 – décembre 2010)
avant optimisation**

Mois1	Prime fixe	Taxes+ redev	Hpleine	Hpointe	P. Dépassement	P. COS phi	Bonification	Facture
Mois2	241 451	124 216	161 957	140 042	0	0	19 316	648 350
Mois3	241 451	202 405	265 291	357 054	7080	0	19 316	1 053 965
Mois4	241 451	131 803	123 952	215 057	7080	0	19 316	700 027
Mois5	241 451	144 271	195 491	182 815	7080	0	19 316	751 792
Mois6	241 451	111 639	153 305	90 863	0	0	11 348	585 910
Mois7	241 451	122 840	182 822	108 034	0	0	18 833	636 314
Mois8	241 451	118 532	168 018	107 149	0	0	19 316	615 834
Mois9	241 451	132 431	177 010	158 280	0	0	19 316	689 856
Mois10	241 451	126 179	175 271	132 443	0	0	19 316	656 028
Mois11	241 451	150 606	255 802	142 648	0	0	19 316	771 191
Mois12	241 451	125 293	173 284	130 923	0	0	19 316	651 635
Moyenne	241 451	48 380	-	-	0	0	19 316	270 515

Annexe 2 : Etude de la puissance souscrite et du cos_phi

	P max atteinte	P souscrite	P souscrite recommandee	cos_phi	P (kW)	Q (kVAr)
Mois1	44	45	35	1,00	5,19	-
Mois2	47	45	35	1,00	15,66	-
Mois3	47	45	35	1,00	6,16	-
Mois4	47	45	35	1,00	2,22	-
Mois5	37	45	35	0,98	-	-
Mois6	41	45	35	1,00	-	-
Mois7	43	45	35	1,00	20,32	-
Mois8	40	45	35	1,00	5,99	-
Mois9	40	45	35	1,00	5,71	-
Mois10	41	45	35	1,00	8,11	-
Mois11	40	45	35	1,00	5,64	-
Mois12	0	45	35	1,00	-	-
MOYENNE				1,00	8,33	-
Cos_phi moyen				1,00		
cos_phi désiré				0,95		
Q aj (kVAr)				-2,74		
Q tot (kVAr)				7,26		

Annexe 3 : calcul des factures après optimisation, 1^{ère} possibilité

	Prime fixe	Taxes+ redev	Hpleine	Hpointe	P. Dépassement	P. COS phi	tan phi	m	1+m	Bonification	Après opti.	Avant opti.	Bénéfice
Mois1	187 795	121 065	161 957	140 042	31860	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	627 696	648 350	20 654
Mois2	187 795	199 892	265 291	357 054	42480	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	1 037 489	1 053 965	16 476
Mois3	187 795	129 289	123 952	215 057	42480	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	683 550	700 027	16 477
Mois4	187 795	141 758	195 491	182 815	42480	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	735 315	751 792	16 477
Mois5	187 795	103 709	153 305	90 863	7080	0	0,197	0,047	0,95	8 826,385	533 927	585 910	51 983
Mois6	187 795	117 668	182 623	107 917	21240	0	0,008	0,079	0,92	14 835,838	602 408	636 314	33 906
Mois7	187 795	114 744	168 018	107 149	28320	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	591 002	615 834	24 832
Mois8	187 795	126 732	177 010	158 280	17700	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	652 494	689 856	37 362
Mois9	187 795	120 480	175 271	132 443	17700	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	618 666	656 028	37 362
Mois10	187 795	145 544	255 802	142 648	21240	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	738 006	771 191	33 185
Mois11	187 795	119 594	173 284	130 923	17700	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	614 273	651 635	37 362
Mois12	187 795	39 495	-	-	0	0	0,000	0,080	0,92	15 023,633	212 266	270 515	58 249
Moyenne	187 795,42	123 330,80	169 333,65	147 099,36	24 190,00	-				14 491,55	637 257,67		32 027
												Economie / an	384 325

Annexe 4 : calcul des factures après optimisation, 2^{ème} possibilité

	Prime fixe	Taxes+ redev	Hpleine	Hpointe	P. Dépassement	P. COS phi	Bonification	Après opti.	Avant opti.	Bénéfice
Mois1	108 068	110 975	207 345	153 143	0	0	8 645	570 885	648 350	77 465
Mois2	108 068	204 185	354 522	407 652	8400	0	8 645	1 074 181	1 053 965	- 20 216
Mois3	108 068	119 103	160 287	237 636	8400	0	8 645	624 848	700 027	75 179
Mois4	108 068	124 032	228 321	182 381	8400	0	8 645	642 556	751 792	109 236
Mois5	108 068	101 126	208 916	105 824	0	0	5 187	518 747	585 910	67 163
Mois6	108 068	115 535	249 424	125 982	0	0	8 429	590 579	636 314	45 735
Mois7	108 068	108 960	225 630	122 875	0	0	8 645	556 887	615 834	58 947
Mois8	108 068	120 914	228 597	174 653	0	0	8 645	623 586	689 856	66 270
Mois9	108 068	113 933	225 768	145 673	0	0	8 645	584 796	656 028	71 232
Mois10	108 068	144 159	335 202	159 712	0	0	8 645	738 495	771 191	32 696
Mois11	108 068	112 857	223 008	143 870	0	0	8 645	579 157	651 635	72 478
Mois12	108 068	26 292	-	-	0	0	8 645	125 714	270 515	144 801
Moyenne / mois	108 067,50	116 839,25	220 585,04	163 283,40	2 100,00	-	8339,20875	602 535,92		66 748,83
									Economie / an	800 986

Annexe 4 : Relevé des paramètres électriques du four

✓ Pour le moteur seul :

HH : MM	cumulé (s)	V	A1	A2	A3	PF	A	P (kW)
16:57	0	379,7	16,5	16,5	0,1	-0,18	11	1,302
16:58	10	397,2	17,1	15	2,2	-0,767	11,4	6,015
16:58	20	397,2	17	14,9	2,2	-0,768	11,4	6,023
16:58	30	397,4	17	15	2,2	-0,769	11,4	6,034
16:58	40	397,4	17	14,9	2,2	-0,768	11,4	6,026
16:58	50	397,3	17	15	2,2	-0,768	11,4	6,025
16:58	60	397,2	17	14,9	2,2	-0,769	11,4	6,031
16:59	70	397,2	17	15	2,2	-0,768	11,4	6,023
16:59	80	397,3	17	14,9	2,2	-0,769	11,4	6,033
16:59	90	397,7	17	14,9	2,2	-0,768	11,3	5,978
16:59	100	397,4	17	14,9	2,2	-0,768	11,4	6,026
16:59	110	397,4	17	15	2,2	-0,769	11,4	6,034
16:59	120	397,4	17	14,9	2,1	-0,768	11,4	6,026
17:00	130	397,4	17	14,9	2,2	-0,769	11,4	6,034
17:00	140	397,4	17	14,9	2,2	-0,768	11,3	5,973
17:00	150	397,5	17	14,9	2,2	-0,768	11,3	5,975
17:00	160	397,6	17	14,9	2,2	-0,767	11,4	6,022
17:00	170	397,6	17	14,9	2,2	-0,768	11,3	5,976
17:00	180	397,8	17	14,9	2,2	-0,768	11,4	6,032
moyenne								5,768

✓ Pour le four entier (moteur + résistances) :

HH : MM	temps cumulé (mn)	V	A1	A2	A3	PF	A	P (kW)	E (kw.mn)	E (kWh)
17:01	0	395,7	33	32,9	28,4	0,914	31,4	19,670	0,00	0,00
17:01	0,16	395,2	39	39,5	41,1	0,995	39,9	27,175	4,35	0,07
17:01	0,33	395,1	38,8	39,4	41,1	0,995	39,7	27,032	8,92	0,15
17:01	0,50	395,1	38,8	39,3	40,9	0,995	39,7	27,032	13,52	0,23
17:01	0,66	395,2	38,7	39,4	40,9	0,995	39,7	27,039	17,85	0,30
17:01	0,83	395,4	38,7	39,3	40,9	0,995	39,6	26,985	22,40	0,37
17:02	1	395,5	38,6	39,3	40,9	0,995	39,6	26,991	26,99	0,45
17:02	1,16	395,6	38,7	39,2	40,7	0,995	39,5	26,930	31,24	0,52
17:10	10	398	38,4	39	40,1	0,995	39,2	26,888	268,88	4,48
17:20	20	399,5	38,4	38,9	40,3	0,995	39,2	26,989	539,78	9,00
17:30	30	400,2	38,6	39	40,1	0,995	39,2	27,036	811,09	13,52
17:40	40	401,7	38,7	39,2	40,3	0,995	39,4	27,276	1 091,04	18,18
17:50	50	401,8	38,9	39,2	40,1	0,995	39,4	27,283	1 364,14	22,74
18:00	60	403,2	38,9	39,3	40,4	0,995	39,5	27,447	1 646,84	27,45
18:10	70	396	38,2	38,5	39,7	0,995	38,8	26,480	1 853,57	30,89
18:20	80	395,4	37,9	38,5	39,7	0,995	38,7	26,371	2 109,70	35,16
18:30	90	393,3	37,9	38,3	39,5	0,995	38,5	26,096	2 348,61	39,14
18:40	100	393,8	37,9	38,3	39,5	0,995	38,6	26,197	2 619,67	43,66
18:50	110	400	38,6	38,9	40,1	0,995	39,2	27,023	2 972,50	49,54
19:00		coupure d'électricité						0,000	0,00	0,00
19:10								0,000	0,00	0,00
19:20								0,000	0,00	0,00
19:30								0,000	0,00	0,00

19:40	120	400,3	38,7	39,2	40,7	0,995	39,6	27,319	3 278,28	54,64
19:50	130	404,6	39,1	39,4	40,5	0,995	39,7	27,682	3 598,68	59,98
20:00	140	398,1	38,5	38,7	40	0,995	39	26,757	3 746,01	62,43
20:10	150	395,9	38,2	38,6	39,7	0,995	38,8	26,473	3 970,93	66,18
20:20	160	393,5	38,1	38,3	39,5	0,995	38,6	26,177	4 188,28	69,80
20:30	170	396,7	32,7	27,6	11,4	-0,919	23,9	15,092	2 565,58	42,76
20:40	180	396,4	38,5	38,8	40,2	0,995	39,2	26,780	4 820,32	80,34
20:50	190	394,9	38,2	38,5	39,7	0,995	38,8	26,406	5 017,14	83,62
21:00	200	393,7	38,1	38,3	39,6	0,995	38,7	26,258	5 251,58	87,53
21:10	210	396	38,3	38,5	39,8	0,995	38,9	26,548	5 575,04	92,92
21:20	220	399,8	38,6	38,9	40,1	0,995	39,2	27,009	5 942,04	99,03
21:30	230	400,9	38,8	38,9	40,2	0,995	39,3	27,153	6 245,11	104,09
21:40	240	400,6	38,8	39	40,2	0,995	39,3	27,132	6 511,76	108,53
21:50	250	400,5	38,8	38,9	40,2	0,995	39,3	27,126	6 781,39	113,02
22:00	260	400,9	38,8	38,9	40,3	0,995	39,3	27,153	7 059,69	117,66
22:10	270	400,5	38,8	39	40,1	0,995	39,3	27,126	7 323,90	122,07
22:20	280	399,2	38,6	38,8	40	0,995	39,1	26,900	7 531,98	125,53
22:30	290	401,5	38,8	39,1	40,3	0,995	39,4	27,262	7 906,12	131,77
22:40	300	398,4	38,5	38,7	40	0,995	39,1	26,846	8 053,80	134,23
22:50	310	399,5	38,7	38,7	40,1	0,995	39,2	26,989	8 366,59	139,44
23:00	320	398,4	38,6	38,7	40	0,995	39,1	26,846	8 590,72	143,18
23:10	330	397,6	38,4	38,7	39,9	0,995	39	26,724	8 818,78	146,98
23:20	340	398,2	38,5	38,8	39,9	0,995	39,1	26,833	9 123,06	152,05
23:30	350	395,7	38,3	38,5	39,7	0,995	38,8	26,459	9 260,82	154,35
23:40	360	397	32,8	27,6	11,4	0,919	24	15,166	5 459,85	91,00
23:50	370	396,9	38,5	38,7	40,2	0,995	39,1	26,745	9 895,63	164,93
00:00	380	397,8	38,6	38,6	40,1	0,995	39,1	26,806	10 186,12	169,77
00:10	390	399,6	38,7	38,9	40,1	0,995	39,2	26,996	10 528,34	175,47
00:20	400	396,7	38,5	38,4	39,8	0,995	38,9	26,595	10 637,89	177,30
00:30	410	396,7	38,4	38,7	39,8	0,995	38,9	26,595	10 903,84	181,73
00:40	420	399	38,6	38,6	40	0,995	39,2	26,955	11 321,19	188,69
00:50	430	400,1	38,6	38,8	40,2	0,995	39,3	27,098	11 652,34	194,21
01:00	440	399,7	38,7	38,7	40,1	0,995	39,2	27,002	11 881,10	198,02
01:10	450	397,8	38,5	38,5	40	0,995	39	26,737	12 031,66	200,53
01:20	460	398,6	38,5	38,7	40,1	0,995	39,1	26,859	12 355,37	205,92
01:30	470	398,4	38,6	38,7	40	0,995	39,1	26,846	12 617,63	210,29
01:40	480	399	38,5	38,8	40,1	0,995	39,1	26,886	12 905,49	215,09
01:50	490	400,8	38,8	39,1	40,2	0,995	39,3	27,146	13 301,48	221,69
02:00	500	400,9	38,8	39	40,2	0,995	39,4	27,222	13 610,87	226,85
02:10	510	401,6	38,7	39	40,4	0,995	39,4	27,269	13 907,33	231,79
02:20	520	401,1	38,9	39	40,3	0,995	39,4	27,235	14 162,37	236,04
02:30	530	402,7	33,2	28	11,6	-0,919	24,3	15,576	8 255,43	137,59
02:40	540	402,3	38,9	39,2	40,6	0,995	39,6	27,455	14 825,96	247,10
02:50	550	402,4	38,9	39,1	40,4	0,995	39,5	27,393	15 066,12	251,10
03:00	560	402,9	39	39,1	40,4	0,995	39,5	27,427	15 359,11	255,99
03:10	570	402,9	39	39,1	40,4	0,995	39,5	27,427	15 633,38	260,56
03:20	580	403,6	39	39,3	40,6	0,995	39,6	27,544	15 975,63	266,26
03:30	590	403,8	38,9	39,2	40,6	0,995	39,6	27,558	16 259,13	270,99
03:40	600	403,4	39,1	39,2	40,3	0,995	39,5	27,461	16 476,61	274,61
03:50	610	402,8	38,9	39,1	40,5	0,995	39,5	27,420	16 726,31	278,77
04:00	620	402,9	39	39,2	40,3	0,995	39,5	27,427	17 004,73	283,41
04:10	630	402,5	39	39,1	40,4	0,995	39,5	27,400	17 261,85	287,70
04:20	640	403,8	33,4	28,1	11,6	0,92	24,4	15,700	10 048,11	167,47
04:30	650	402,4	39	39,1	40,6	0,995	39,6	27,462	17 850,49	297,51
04:40	660	402,3	38,8	39,1	40,5	0,995	39,5	27,386	18 074,85	301,25
04:50	670	401,9	38,9	39	40,5	0,995	39,4	27,290	18 284,06	304,73
05:00	680	400,6	38,7	38,9	40,2	0,995	39,3	27,132	18 449,99	307,50
05:10	690	401,5	38,8	39	40,3	0,995	39,4	27,262	18 811,12	313,52
05:20	700	398,9	38,6	38,8	40,1	0,995	39,1	26,880	18 815,79	313,60
05:30	710	397	38,5	38,6	40	0,995	39	26,683	18 945,11	315,75
05:40	720	397,9	38,4	38,7	39,9	0,995	39	26,744	19 255,50	320,92
05:50	730	399,3	38,6	38,8	40,1	0,995	39,1	26,907	19 641,86	327,36

Audit Energétique et évaluation technologique des fours industriels de la SODEPAL

06:00	740	401,5	38,8	39,1	40,4	0,995	39,4	27,262	20 174,24	336,24
06:10	750	403,8	33,4	28,1	11,6	-0,919	24,4	15,683	11 762,33	196,04
06:20	760	400,4	38,7	38,9	40,5	0,995	39,4	27,188	20 662,72	344,38
06:30	770	398,9	38,7	38,7	40,1	0,995	39,1	26,880	20 697,37	344,96
06:40	780	397,8	38,4	38,6	40,1	0,995	39	26,737	20 854,88	347,58
06:50	790	397,1	38,3	38,7	39,9	0,995	39	26,690	21 085,08	351,42
07:00	800	396,6	38,4	38,6	39,7	0,995	38,9	26,588	21 270,42	354,51
07:10	810	393,8	38	38,3	39,7	0,995	38,7	26,265	21 274,31	354,57
07:20	820	395	38,1	38,4	39,8	0,996	38,8	26,439	21 680,17	361,34
07:30	830	394,5	38,2	38,4	39,5	0,995	38,7	26,311	21 838,35	363,97
07:40	840	390,5	32,3	27,2	11,2	-0,919	23,5	14,607	12 269,99	204,50
07:50	850	385,8	37,3	37,5	38,9	0,995	37,9	25,199	21 419,24	356,99
08:00	860	386,1	37,4	37,6	38,7	0,995	37,9	25,219	21 688,08	361,47
08:10	870	395,2	38,2	38,5	39,6	0,995	38,8	26,426	22 990,67	383,18
08:20	880	399,7	38,7	38,9	40,1	0,995	39,2	27,002	23 762,20	396,04
08:30	890	401,5	38,9	39	40,2	0,995	39,4	27,262	24 263,61	404,39
08:40	900	402,7	38,8	39,2	40,5	0,995	39,5	27,413	24 672,03	411,20
08:50	910	400	38,7	38,9	40,1	0,995	39,2	27,023	24 590,72	409,85
09:00	920	399,7	38,7	38,9	40,1	0,995	39,2	27,002	24 842,30	414,04
09:10	930	400,8	33	27,9	11,4	-0,92	24,1	15,392	14 314,50	238,57
09:20	940	398,8	38,6	38,8	40,1	0,995	39,2	26,942	25 325,19	422,09
09:30	950	401,7	17,1	15	2,2	-0,769	11,4	6,099	5 794,52	96,58
09:40	960	402,7	17	14,9	2,2	-0,769	11,4	6,115	5 870,09	97,83
09:50	970	402,6	17	15	2,2	-0,769	11,4	6,113	5 929,76	98,83
10:00	980	402,5	17	14,9	2,2	-0,768	11,4	6,104	5 981,62	99,69
10:10	990	404,2	17,1	15	2,2	-0,769	11,4	6,137	6 076,08	101,27
10:20	1 000	403,6	17,1	15	2,2	-0,769	11,4	6,128	6 128,34	102,14
MOYENNE		398,9306	36,975	36,74444	36,06574		36,59537	24,062	10 614,97	176,9162

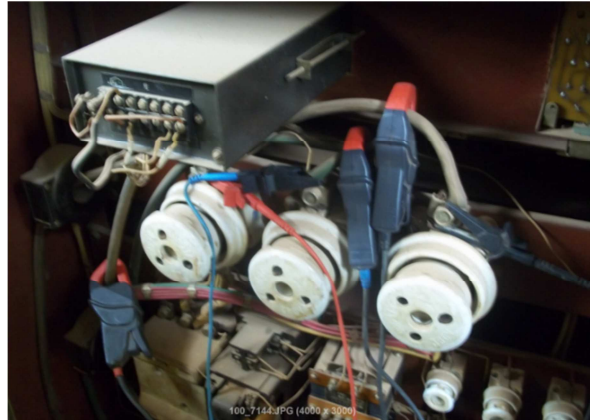
Annexe 5 : inventaire des principaux équipements de la SODEPAL et puissances mesurées

équipement	plaque signalétique					mesure	observation
	P (kW)	Qté	U _n (V)	cos_phi	Ptotal (kW)	P (kW)	
four tunnel	50	1	380	0,995	50	27	Fonctionne
Extrudeur	11	1	420	0,84	11	8	Fonctionne
broyeur super-fine	8,57	1	380	0,88	8,57	5	Fonctionne
autres	12,00	1			12,00	5	Fonctionne
Décortiqueuse	19,5	1	380		19,5		Fonctionne rarement
TOTAL					81,57	45	

La cellule « autres » désigne l'ensemble des équipements qui fonctionnent presque à tout moment de la journée. Il s'agit ::

- Du four de la boulangerie ;
- Des congélateurs ;
- De l'éclairage (boutique, bureaux, ateliers de production) ;
- Des soudes-sachets,
- Equipements de bureautiques.

Annexe 6 : caractéristiques de l'analyseur de réseau



Marque : CHAUVIN ARNOUX

Type : C. A 8310 Power Harmonics Analyser

Cet appareil a l'avantage de mesurer instantanément toutes les valeurs possibles d'une installation électrique. Lorsqu'on veut garder des archives des mesures effectuées, on peut le programmer pour qu'il imprime les valeurs des paramètres désirés à un intervalle de temps choisi. Il est donc très précis, performant et, pour celui que nous avons utilisé, en bon état.

Annexe 7 : Images du four à gaz KQ



Annexe 8 : feuille de calcul pour l'optimisation de la facture.

Cette feuille cherche à vérifier la facturation de la SODEPAL, en se basant sur les mêmes formules utilisées pour la facturation en RE.

N	Type Abonné	N Abonné	Nom prénom et Adresse	N Compte bancaire	Code Tarif	Code zone	Nbre mois	Période	Date limite de paiement	Date de prépaiement
225V	2017	EV002100	SOXOPAL OUAGA SECTEUR D	0	22216		1	mar-10		

Puissance transformateur	Puissance souscrite	Puissance condensateurs	Coef de comptage consommation	Coef de comptage horaire	Coef pertes actives consommées	Coef pertes actives horaires	Coef pertes réactives consommées (Qd)	Coef pertes réactives horaires (Qh)
100	45	10	1	1	0.06	0.32	0.04	2.5

I. Récapitulatif des consommations lues aux compteurs

	Heures pleines	Heures pointes	Total Actif (kWh)	Pasifif (kWh)	Nbre d'heures
Nouvel Index	226353	76435		95053	44473
Ancien Index	226370	76450		95050	43744

II. Calcul des pertes

Maximum enregistré	Puissance souscrite	Déplacement
47	45	2

III. Calcul des pertes

(I) Pertes actives Ma	308 kWh
(II) Pertes réactives Ma	1010 kWh

IV. Energie réactive condensateur

(III) Consommation réactive: $W_r = M_r \times$	1010	kWh
(IV) A déduire énergie réactive produite par les condensateurs $P_c \times h$	7270	kWh
(V) Consommation Réactive à prendre en compte pour la facturation: $R_r = (III - IV)$	0	kWh

REMARQUE: (I) Non compris les pertes imputées aux transformateurs pour les abonnés décomptés en basse tension. (II) Les pertes actives sont réparties proportionnellement aux tranches.

V. Migration ou innovation (n): $P = \frac{a}{\text{max} \times \text{max}}$ = 0.00 % Pour consommation moyen: 100 au = 0.000 TDE = 8.962

VI. Facturation

	Puissance souscrite	Tarifs	Tris	Total
al prime fixe	45	64.367	0.32	222.135

al Consommation:

	Consommation Abonné (S)	Pertes actives (S)	Totale à facturer (S) = (S) + (S)
Heures pleines	2323	172	2495
Heures de pointe	1045	136	1181

al prime fixe: $P = \frac{a}{\text{max} \times \text{max}}$ = 0.00 % Pour consommation moyen: 100 au = 0.000 TDE = 8.962

al Consommation:

	Consommation Abonné (S)	Pertes actives (S)	Totale à facturer (S) = (S) + (S)
Heures pleines	2323	172	2495
Heures de pointe	1045	136	1181

al Location - compteurs: 5.530
al Extension - compteurs: 15.25
al Location - Poste: -
al TSAAC: 8.962
al Déplacement: -

facturation BT double tarif

	Puissance souscrite	Puissance condensateurs	Coef de comptage	Coef de comptage
	45	10	1	1

V. Migration ou innovation (n): $P = \frac{a}{\text{max} \times \text{max}}$ = 0.00 % Pour consommation moyen: 100 au = 0.000 TDE = 8.936

VI. Facturation

	Puissance souscrite	Tarifs	Tris	Total
al prime fixe	45	200.81	0.32	99.432

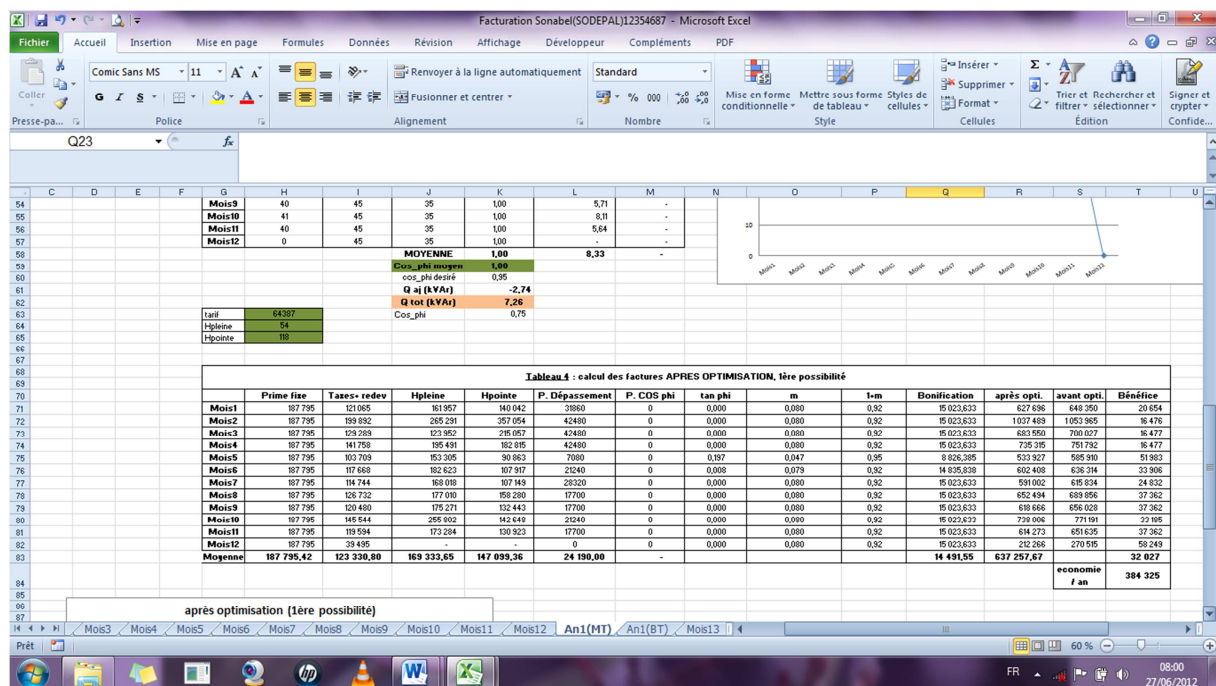
al Consommation:

	Consommation Abonné (S)	Pertes actives (S)	Totale à facturer (S) = (S) + (S)
Heures pleines	2323	75	2398
Heures de pointe	1045	140	1185

al Location - compteurs: 5.530
al Extension - compteurs: 15.25
al Location - Poste: -
al TSAAC: 8.936
al Déplacement: -

Montant due + Tris: 539.776
Total: 624.948
Témoins: 75.073

- Analyse et optimisation de la facture (pour une tarification MT)



- Analyse et optimisation de la facture (pour une tarification BT)

