

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département d'Electrotechnique  
Laboratoire de Recherche en Electrotechnique



Projet de fin d'études en vue de l'obtention du diplôme  
d'ingénieur d'état en Electrotechnique

Présenté par  
**GHOZALI Nabil**  
**KADEM Karim**

Intitulé

# **Audit énergétique, amélioration de la consommation de l'énergie électrique**

Soutenu le 14 juin 2015 à l'ENP

Proposé par : Dr.R.TAHMI

**ENP 2015**

## Résumé

Notre monde ne peut se passer d'une alimentation électrique, énergie fort précieuse, qui doit être sûre et fiable. Or le courant fourni par le réseau n'est pas toujours l'onde parfaite sortie des centrales de production. Nous abordons dans ce projet la notion de la qualité de l'énergie électrique en accordant d'abord l'intérêt aux différentes perturbations qui peuvent survenir à cause de la présence d'éléments pollueurs, suivie de la présentation de quelques solutions pouvant être mises en place pour atténuer l'effet des perturbations. Ainsi et vu l'importance de la qualité d'énergie, que ce soit pour le producteur, le distributeur ou le consommateur, nous nous sommes rapproché de l'Aprue en vue de la réalisation d'un audit énergétique au sein de l'entreprise SCMi.

**Mots Clés :** Audit énergétique, Qualité d'énergie, énergie électrique, cimenterie.

### ملخص

عالمنا لا يمكن الاستغناء عن إمدادات الطاقة، والطاقة الثمينة قوية، والتي يجب أن تكون آمنة وموثوق بها. ولكن التيار التي تقدمه الشبكة ليس دائما مثالي لمحطات انتاج الطاقة الموجهة. اقتربنا بهذا المشروع لمفهوم الجودة من الطاقة الكهربائية إلى التركيز بالدرجة الأولى على الاضطرابات المختلفة التي قد تحدث بسبب وجود عناصر تخريبية، يليه عرض لبعض الحلول التي يمكن وضعها للتخفيف من تأثير الاضطرابات. وبالتالي، ونظرا لأهمية جودة الطاقة، سواء للمنتج أو الموزع أو المستهلك، تقربنا من EURPA لتحقيق عملية تدقيق الطاقة داخل شركة iMCS.

الكلمات المفتاحية: جودة الطاقة الكهربائية , صناعة الإسمنت

## Abstract

Our world can not get along without electric power, strong precious energy, which must be safe and reliable. But the current provided by the network isn't always in the shape of a perfect wave. We approach in this project the concept of quality of electric energy into focusing primarily on various disturbances that may occur due to the presence of disruptive elements, followed by the presentation of some solutions that can be put in order to mitigate the effect of disturbances. Thus, and given the importance of power quality, either for the producer, distributor or consumer, we got close to APRUE in order of the realization of an energy audit within the company SCMi.

**Key words :** Quality of energy, electric energy, cement factory.

## *Remerciements*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu le Tout Puissant, de nous avoir donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous remercions en premier lieu Monsieur R.TAHMI, notre promoteur, sans qui ce travail n'aurait pas été possible. Son aide, ses conseils et son appui moral durant toute la période du travail ont été précieux. Ses qualités humaines nous ont été d'un apport inestimable.*

*En second lieu, nous tenons à apporter nos sincères et chaleureux remerciements à Monsieur le Directeur Général de l'APRUE et Monsieur K.DALI ainsi que Monsieur M.ISSIAKHAM pour l'assistance et l'aide apportées pour la réalisation de ce travail et son dévouement exceptionnel.*

*Nous remercions également l'équipe de la SCMi, pour leur disponibilité et leur aide, tout particulièrement les ingénieurs du département méthodes, qui nous ont facilité le travail et la réalisation de ce projet en apportant une aide précieuse et de qualité sur le terrain.*

# Dédicaces

*Je dédie ce mémoire à :*

*· Mes parents :*

*Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. Qu'elle reçoive à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes meilleurs sentiments et de mon éternelle gratitude.*

*Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; je le remercie pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent.*

*Mes adorables frère et sœur pour leur patience.*

*À mes amis qui ont été ma deuxième famille durant ces longues années, Ce travail vous est dédié à vous, Nabil, Hafez, Nazim, ryad, Moncef, Rafik, Yamanda, Mahfoud, Farouk, Walid, Salem, Ouahab, Lyes, Mouhamed, Jugo, Selmane, Raouf, Amina et Khadidja, ainsi qu'à tous ceux que j'ai connus à Polytech, sans oublier Fella qui a toujours été A Mes coté.*

*Karim*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à mes parents qui m'ont soutenu et encouragé pour pouvoir achever mon cursus et sans lesquels absolument rien n'aurait été possible, qu'Allah me les garde, à mon frère et ma sœur ainsi qu'à Moummou qu'il vive le plus longtemps possible.*

*Mais surtout je tiens à dédier ce travail à vous mes chers camarades et frères, avec vous j'ai connu le bonheur et l'importance d'avoir des personnes hors paire comme compagnons pour traverser la route, pour le moins difficile, qui passe par Polytech vers le succès. Vous avez été là quand j'étais au plus bas, et vous serez toujours dans mon cœur, partout où la vie me mènera. Je ne vous oublierai jamais. Ce travail vous est dédié à vous, Karim Bouter, Hafez Lfez, Moncef bouter aussi, Rafiki, Yamanda, Mahfoud, Farouk, Walid, Salem, Bedrioui, Lyes wliidi, Mouh yaaakhou, Jugo li nsani, Selmane le blond, Raouf, Nazim, Amina et Khadidja, Alia et Amira, Zoubir ou tzoubir, Mouh youktaf, à Z qui a été là pour moi pendant tant d'années, ainsi qu'à tous ceux que j'ai connus à Polytech.*

*Nabil Gh*

# 1 Table des matières

Chapitre 1 : Les perturbations électriques affectant la qualité de l'énergie électrique .....	1
1 Introduction .....	2
2 Les perturbations électriques.....	3
2.1 Le creux de tension :.....	4
2.1.1 L'amplitude du creux de tension :.....	5
2.1.2 La durée du creux de tension :.....	5
2.1.3 La profondeur du creux de tension :.....	5
2.1.4 Origine du creux de tension : .....	5
2.2 Les coupures de tension :.....	6
2.2.1 Les effets des coupures de tension : .....	6
2.2.2 Solutions contre les creux de tension et les coupures brèves :.....	7
2.3 Fluctuation de tension et flicker : .....	8
2.3.1 Le flicker : .....	9
2.3.2 Les variations de tension par à-coups : .....	9
2.3.3 Origines :.....	9
2.3.4 Effets des Fluctuations de tension et des flickers :.....	9
2.4 Les surtensions : .....	10
2.4.1 Origine des surtensions : .....	11
2.4.2 Effets des surtensions : .....	12
2.4.3 Solutions contre les surtensions : .....	12
2.5 Perturbations affectant la fréquence : .....	13
2.6 Perturbations affectant le déséquilibre : .....	14
2.6.1 Origine du déséquilibre : .....	15
2.6.2 Solutions contre le déséquilibre : .....	15
2.7 Harmoniques :.....	16
2.7.1 Les différents générateurs de grandeurs électriques harmoniques :.....	18
2.7.2 Effets des harmoniques : .....	20
2.7.3 Normes : .....	22
2.7.4 Solutions contre les harmoniques :.....	24
2.8 Inter-harmoniques :.....	29
3 Conclusion.....	29
Chapitre 2 : Audit et diagnostic énergétique (Cas de la cimenterie de Meftah) .....	31
1 Introduction .....	32
2 Présentation de la cimenterie de Meftah .....	32

2.1	Procédé de fabrication du ciment :	33
2.1.1	Extraction et préparation des matières premières :	34
2.1.2	Séchage et broyage :	34
2.1.3	La cuisson :	34
2.1.4	Transformation du clinker en ciment :	35
2.1.5	Les expéditions :	36
3	Analyse de la Consommation d'Énergie Électrique de la SCMI	36
3.1	Alimentation et réseau électrique de distribution :	36
3.2	Poste principal :	38
3.3	Réseau et jeux de barres MT/5,5 KV (P1 à P19)	38
3.4	Équipements des ateliers :	39
4	Analyse des données de consommation	41
4.1	Campagne de mesures :	41
4.1.1	Réseau HT/60 KV :	43
4.1.2	Zone Cru :	45
4.1.3	Cuisson :	48
4.1.4	Ciment :	49
4.1.5	Expédition :	50
4.2	Consommation en fonction de la production :	51
4.2.1	Comparaison avec la consommation en Allemagne :	53
4.2.2	Répartition de la consommation électrique :	53
4.3	Pertes dans le transfo d'arrivée :	55
4.3.1	Évaluation des pertes :	55
4.3.2	Coûts des pertes :	56
5	Conclusion	57
Chapitre 3 : Étude du cas de l'atelier APS		58
1	Introduction	59
2	Critères de choix	59
2.1	Les moteurs électriques et leurs variateurs :	61
2.2	Résultats des mesures avec l'analyseur de réseau Qualistar C.A 8335:	62
2.2.1	Analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+) :	62
2.2.2	Les principales mesures réalisées sont :	62
2.2.3	Schéma du branchement de l'analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+) :	63
	Forme d'onde de la tension composée :	64
	Forme d'onde de la tension simple :	64
2.2.4	Forme d'onde du courant :	65
2.2.5	Harmoniques :	66

2.2.6	Taux de distorsion de courant par rang d'harmonique :.....	66
2.2.7	Puissances : .....	73
2.2.8	Interprétations : .....	74
3	Recommandations .....	75
3.1	Dimensionnement du filtre : .....	75
3.1.1	Rang 5 : .....	76
3.1.2	Rang 7 .....	76
4	Conclusion.....	77
Chapitre 4 : Analyse tarifaire .....		79
1	Introduction .....	80
2	Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie active.....	80
3	Répartition de la consommation d'énergie active .....	81
3.1	Poste horaire pointe: .....	82
3.2	Poste horaire pleines :.....	82
3.3	Poste horaire creuses : .....	82
4	Étalement de la consommation .....	83
4.1	Principe :.....	83
4.2	Intérêt de l'étalement : .....	83
5	Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie réactive .....	85
6	Choix de la PMD et utilisation de la PMA.....	87
7	Choix du tarif .....	89
7.1	Tarif 31 : .....	89
7.2	Tarif 32 : .....	90
7.3	Tarif 41 : .....	90
8	Conclusion.....	91
	Conclusion générale.....	92
	Références .....	93
	Annexes .....	95
	Factures 2014 .....	96
	Factures 2013 .....	97
	Factures 2012 .....	98
	C.A 8335 Qualistar + : .....	99
	FLIR T440 :.....	100

# Liste des Figures

Figure 1 : Creux de tension et coupure brève.....	5
Figure 2 : Fluctuation de la tension et Flicker .....	8
Figure 3 : Exemple de surtension .....	10
Figure 4 : Exemple de fluctuation de la fréquence.....	14
Figure 5 : Déséquilibre de tension.....	14
Figure 6 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage .....	16
Figure 7 : Illustration des harmoniques (harmonique d'ordre 3, fondamental et onde déformée).....	17
Figure 8 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz débitant un courant continu parfait sur charge très inductive .....	19
Figure 9 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz suivi d'un condensateur.....	19
Figure 10 : Spectre du courant alimentant un four à courant alternatif.....	20
Figure 11 : Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre.....	22
Figure 12 : Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables [14].....	23
Figure 13 : Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé) [14] .....	24
Figure 14 : Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible [14]..	24
Figure 15 : Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé [14] .....	25
Figure 16 : Transformateurs d'isolement triangle/étoile [13] .....	25
Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un filtre passif [14] .....	26
Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un filtre actif [14].....	27
Figure 19 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride [14] .....	28
Figure 20 : montages atténuant I5 et I7 .....	28
Figure 21 : Procédé de fabrication du ciment [16].....	33
Figure 22 : Four à calcination rotatif incliné [17] .....	35
Figure 23 : Schéma synoptique de la cimenterie de MEFTAH.....	37
Figure 24 : Sepam séries 20 – Schneider - .....	41
Figure 25 : Points de mesure .....	42
Figure 26 : Résultats campagne de mesure (arrivée).....	43
Figure 27 : Résultats campagne de mesure (THD V).....	43
Figure 28 : Résultats campagne de mesure (THD A).....	44
Figure 29 : Résultats campagne de mesure (concassage KHD) .....	45
Figure 30 : Résultats campagne de mesure (reprise/ajout).....	46
Figure 31 : Résultats campagne de mesure (APS) .....	46
Figure 32 : Résultats campagne de mesure (Broyeur cru).....	47
Figure 33 : Résultats campagne de mesure (Homogénéisation).....	48
Figure 34 : Résultats campagne de mesure (four rotatif) .....	48
Figure 35 : Résultats campagne de mesure (massif four).....	49
Figure 36 : Résultats campagne de mesure (refroidisseur).....	49
Figure 37 : Résultats campagne de mesure (BK1) .....	50
Figure 38 : Résultats campagne de mesure (expéditions) .....	50
Figure 39 : Charge électrique des sous stations en %.....	51
Figure 40 : Evolution de la consommation en Fonction de la production de farine.....	52
Figure 41 : Evolution de la consommation en Fonction de la production de clinker .....	52
Figure 42 : Evolution de la consommation en Fonction de la production de ciment .....	53
Figure 43 : Consommation spécifique (kWh/t) .....	54
Figure 44 : Répartition de la consommation électrique.....	54
Figure 45 : Représentation graphique des pertes d'un transformateur principal de la sous station principale de la cimenterie de Ain-Touta de puissance de 30 MVA [20] .....	56
Figure 46 : Fissures sur les câbles d'alimentation des variateurs .....	59
Figure 47 : Température élevée à l'intérieur du porte-fusible dans l'armoire Schunck du CDM APS..	60

Figure 48 : Image thermique du porte-fusible.....	60
Figure 49 : Photographies montrant l'incendie ayant eu lieu sur les batteries de condensateurs .....	61
Figure 50 : Schéma du branchement de l'analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+).....	63
Figure 51 : Point de mesure.....	63
Figure 52 : Forme d'onde de la tension composée des 3 phases.....	64
Figure 53 : Forme d'onde de la tension simple .....	64
Figure 54 : THD en tension.....	65
Figure 55 : Forme d'onde du courant sur les 3 phases suivie du THD en courant .....	65
Figure 57 : Taux de distorsion harmonique 3.....	66
Figure 58 : Taux de distorsion harmonique 5.....	67
Figure 59 : Taux de distorsion harmonique 7.....	67
Figure 60 : Taux de distorsion harmonique 9.....	68
Figure 61 : Taux de distorsion harmonique 11.....	68
Figure 62 : Taux de distorsion harmonique 13.....	69
Figure 63 : Taux de distorsion harmonique 15.....	69
Figure 64 : Taux de distorsion harmonique 17.....	70
Figure 65 : Taux de distorsion harmonique 19.....	70
Figure 66 : Taux de distorsion harmonique 21.....	71
Figure 67 : Taux de distorsion harmonique 23.....	71
Figure 68 : Taux de distorsion harmonique 25.....	72
Figure 69 : Puissance active, réactive, et apparente sur les 3 phases .....	73
Figure 70 : Total puissances active, réactive, apparente .....	73
Figure 71 : Facteur de puissance, $\cos(\phi)$ , $\tan(\phi)$ .....	74
Figure 72 : Comparaison des valeurs de courants après filtrage .....	77
Figure 73 : Évolution de l'énergie active et son coût durant les trois dernières années.....	81
Figure 74 : Évolution du coût de l'énergie active selon le poste horaire .....	81
Figure 75 : Comparaison entre la consommation et les coûts de l'énergie active selon les postes horaires durant les trois dernières années.....	83
Figure 76 : A : Evolution de l'énergie réactive et l'énergie active durant les trois dernières années ...	87
Figure 77 : B : Evolution du coût du bonus et de pénalité durant les trois dernières années .....	87
Figure 78 : Évolution de la PMA en fonction de la PMD durant les trois dernières années .....	88
Figure 79 : Comparaison des coûts de l'énergie consommée selon les tarifs .....	91

## Liste des Tableaux

Tableau 1 : Type de perturbation, origine, conséquences et solutions possibles .....	4
Tableau 3 : Effet des harmoniques sur les principaux appareils .....	21
Tableau 4 : Caractéristiques des transformateurs d'arrivée .....	38
Tableau 5 : Liste variateurs et moteurs atelier APS .....	61
Tableau 6 : Comparaison des résultats de mesure avec la norme .....	72
Tableau 7 : Effacement de la consommation en heures de pointe avec report sur les heures creuses et pleines.....	85
Tableau 8 : Tableau tarifs à partir du 1er décembre 2005 [22] .....	89
Tableau 9 : Facture électrique en utilisant le Tarif 31 .....	90
Tableau 10 : Simulation du tarif de l'énergie électrique en utilisant le Tarif 32 .....	90
Tableau 11 : Simulation du tarif de l'énergie électrique en utilisant le Tarif 41 .....	91

# Liste des Symboles

APRUE : Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.

SCMi : Société des Ciments de la Mitidja.

GICA : Groupe industriel des ciments d'Algérie.

CPJ45 : Ciment Portland composé avec ajouts.

CEI : Comité International de l'Electrotechnique.

EN : Norme Européenne.

TEP : Tonne équivalent pétrole.

APS : Atelier préchauffage.

BK1 : Broyeur de clinker n°1.

BK2 : Broyeur de clinker n°2.

BT : Basse tension.

MT : Moyenne tension.

HT : Haute tension.

$U_{ref}$  : Tension de référence

$f$  : Fréquence du réseau électrique 50 Hz ou 60 Hz.

$f_0$  : Fréquence fondamentale

$U_n$  : Tension nominale

$\Delta U_i$  : Degré du déséquilibre.

$V_i$  : Tension de la phase  $i$ .

$V_{moy}$  : Tension moyenne

$Z$  : Impédance électrique ( $\Omega$ )

$X$  : Réactance, Ohm ( $\Omega$ )

$L$  : Inductance, henry (H)

$\omega$  : Pulsation du signal du réseau, radians par seconde ( $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ )

$R$  : Résistance, Ohm ( $\Omega$ )

$n$  : Rang d'un harmonique

$f_n$  : Fréquence de l'harmonique de rang  $n$ .

$D_n$  : Taux individuel d'harmonique

$THD$  : Taux de distorsion harmonique global

$y_1$  : L'harmonique fondamental.

$y_n$  : Composante du signal  $y$  suivant le rang  $n$ .  
 $THD_i$  : Taux de distorsion harmonique en courant.  
 $THD_u$  : Taux de distorsion harmonique en tension.  
 $U_1$  : Tension du signal fondamental.  
 $U_n$  : Tension du signal de rang  $n$ .  
 $P$  : Puissance active, watt (W)  
 $\cos\varphi$  : Cosinus du déphasage entre le courant et la tension.  
 $FP$  : Facteur de puissance.  
 $I_1$  : Courant du signal fondamental. Ampère (A).  
 $I_{rms}$  : Valeur efficace (RMS, de l'anglais Root Mean Square) du courant.  
 $I_n$  : Courant du signal de rang  $n$ .  
 $S$  : Puissance apparente, (kVA).  
 $Q$  : Puissance réactive, (kVAR).  
 $T$  : Période d'un signal.  
 $C$  : Capacité électrique du condensateur, Farads (F).  
 $I_{har}$  : Courants harmoniques  
 $I_{act}$  : Courants issus du filtre actif.  
 $i_s$  : Courant sinusoïdale de ligne  
 $I_5$  : Courant de l'harmonique de rang 5  
 $I_7$  : Courant de l'harmonique de rang 7

La qualité de l'énergie électrique se voit attribuer, ces dernières années, un grand intérêt compte tenu de l'importance grandissante de l'électricité dans le monde aussi bien à la production qu'à la consommation. En effet, L'industrie, qui est un secteur d'activité grand consommateur d'énergie électrique fait l'objet d'une attention particulière dans ce domaine. Les usines sont largement dépendantes de cette ressource et toute perturbation ou interruption influe directement sur le côté économique. Ainsi si l'énergie électrique n'est pas d'une qualité acceptable, cela engendre d'une part, la dégradation de la production et d'autre part la diminution de la durée de vie des équipements, pour éviter un tel inconvénient la gestion de la qualité de l'énergie électrique a un rôle important à jouer.

Ceci étant dit, pour ce faire deux étapes sont à suivre, la première étant le monitoring, c'est-à-dire la détection des perturbations pouvant dégrader l'énergie électrique. Cette étape sert à recenser, localiser et ensuite identifier les problèmes, leur ampleur, et les effets qu'ils ont. Par la suite on passe à la résolution des problèmes que ce soit d'une manière préventive ou curative, cela est possible grâce aux solutions proposées pour atténuer, voire, éliminer ces perturbations. Comme les équipements électriques sont de plus en plus sophistiqués, d'un côté on tend à avoir de plus en plus de mal à gérer les perturbations engendrées par ceux-là. Mais aussi on se voit dans l'obligance de protéger des équipement coûteux et dont la maintenance est difficile et onéreuse, cela nous mène à un problème d'ordre technico-économique où l'on veut avoir la meilleure qualité de l'énergie électrique que possible avec une dépense minimale, donc notre rôle dans ce projet et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique tout en prenant compte de l'aspect économique de la chose.

Pour illustrer cette approche et tenter de l'appliquer sur des cas concrets, nous avons proposé le cas de la cimenterie de Meftah SCMi. Notre choix se justifie par le fait que ce type d'industrie est connu comme étant un grand consommateur d'énergie électrique et les équipements électriques que l'on trouve dans une cimenterie sont nombreux, chers et pour certains, énergivores, car l'on a plusieurs ateliers distincts chaque un ayant son rôle dans le procédé de fabrication du ciment, la combinaison de ces équipements implique des perturbations qui peuvent influencer sur la durée de vie de ces derniers, mais aussi sur la production. L'opportunité que l'usine ait bénéficié d'un grand programme de modernisation de ses équipements a aussi constitué un atout.

Afin de réaliser notre projet nous nous sommes approchés de l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie, à savoir l'APRUE, qui nous a orientés dans notre projet et qui a mis à notre disposition des instruments de mesure.

Le travail que nous avons mené consiste en un audit énergétique au sein de la cimenterie de Meftah SCMi, ainsi qu'à une étude des perturbations affectant l'énergie électrique, et une étude technico-économique en vue d'atténuer les pertes du côté équipements, production et argent, nous avons partagé notre travail en quatre chapitres, dans le premier chapitre nous verrons les perturbations électriques, cette partie étant importante dans le sens où les perturbations sont le problème auquel on doit remédier, nous détailleront ainsi les différentes perturbations qui affectent l'énergie électrique en les définissant, en donnant les origines qui peuvent les engendrer, en citant les effets qu'elles ont, et en proposant les solutions pouvant être prises contre ces dernières, nous dépendrons donc de cette partie, qui est théorique, pour effectuer la partie pratique qui constitue la suite de notre travail, on l'entame avec le deuxième chapitre où nous présenterons l'état des lieux et l'audit énergétique que nous avons effectué au sein de la cimenterie, on commencera ainsi par une présentation de la cimenterie et le procédé de fabrication du ciment, puis nous détaillerons la consommation et les équipements des différents ateliers, ainsi nous aurons une vue globale de la consommation de l'usine, cette partie nous sera fortement utile car nous avons eu une idée des différents composants électriques, de la consommation en énergie des différents ateliers et des perturbations les affectant, et de ce fait la focalisation de notre travail à l'atelier APS pour ce qu'il comporte comme anomalies, ce dernier fait d'ailleurs l'objet du troisième chapitre, où nous avons effectué une étude approfondie de l'atelier, nous citerons donc les mesures que nous avons faites grâce à l'agence APRUE et qui nous seront d'une importance capitale, nous citerons aussi les remarques que l'on a pu faire quant à l'atelier et aux mesures et par la suite, les solutions que nous proposons.

Dans le quatrième chapitre nous présenterons l'étude tarifaire que nous avons effectuée à la cimenterie et qui est du moins importante car nous avons pu proposer des solutions qui font économiser d'énormes sommes d'argent à la SCMi, nous verrons l'évolution de la consommation de l'énergie active et réactive aussi bien que la répartition de la consommation de l'énergie, nous proposerons des solutions pour diminuer le montant de la facture, et nous traiterons le choix de la PMD et le choix du tarif.

# **Chapitre 1 : Les perturbations électriques affectant la qualité de l'énergie électrique**

## 1 Introduction

La qualité de l'énergie électrique est définie comme étant l'aptitude à assurer une alimentation des systèmes ou équipements électriques de façon continue et satisfaisante. Celle-ci dépend d'une part des performances du réseau électrique, d'autre part de l'usage dont il est fait de l'énergie qui en est issue. La notion globale de la qualité de l'énergie électrique comprend deux axes :

- La continuité de la tension
- La qualité de la tension

### *Continuité de la tension :*

La continuité de l'alimentation en tension dépend des réseaux publics et industriels, de la qualité de leurs matériels et des bonnes pratiques de maintenance et d'exploitation. La continuité dépend à la fois des choix techniques et des investissements réalisés pour assurer l'alimentation d'un point particulier ou d'une zone donnée. C'est donc le résultat d'un compromis technico-économique. L'élément primordial de la qualité de l'énergie électrique est la continuité de l'alimentation, car la consommation d'un client dépend impérativement de l'alimentation avec la puissance et aux instants prévus par son contrat, car par exemple, couper l'alimentation en électricité à une usine c'est lui faire perdre de l'argent/production.

Pour mesurer la continuité de la tension on mesure les coupures de tension à un point donné, on parle simplement de coupure, par unité de temps.

### *Qualité de la tension :*

Dans la plupart des cas, les tensions d'un réseau électrique constituent un système alternatif triphasé, dont la fréquence de base est de 50 Hz dans notre pays. Celui-ci est caractérisé par les paramètres qui sont les suivants:

- La fréquence ;
- L'amplitude des trois tensions ;
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde ;
- La symétrie du système triphasé étant caractérisée par l'égalité ou non des modules des trois tensions et de leur déphasage relatif.

La qualité de la tension peut être affectée, soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux effets liés à l'exploitation du réseau, soit du fait de certains récepteurs. Ces défauts se manifestent sous forme de différentes perturbations affectant un ou plusieurs des quatre paramètres précédemment définis, lesquelles seront vues dans ce chapitre.

## 2 Les perturbations électriques

L'électricité fournie aux utilisateurs subit parfois des perturbations ou des interruptions momentanées appelées dégradation de la qualité de la tension. Pendant que l'énergie électrique est acheminée vers l'utilisateur, des agressions peuvent altérer les caractéristiques physiques de l'onde électrique: la constance de la fréquence et de l'amplitude, la pureté de la forme sinusoïdale de l'onde et sa symétrie. Le gestionnaire du réseau de transport et le producteur de l'énergie électrique ne sont pas les seuls tenus pour responsables des altérations de la qualité de la tension. Dans le cas idéal la tension électrique consommée présente, des alternances régulières selon une sinusoïde parfaite d'amplitude et de fréquence constantes.

Les réseaux électriques sont le plus souvent siège de phénomènes perturbateurs qui affectent, chacun un à sa façon, les caractéristiques de la tension. On peut classifier les perturbations électriques en quatre grandes familles :

### *Les perturbations électriques affectant l'amplitude :*

Affectant l'amplitude de la tension sous forme d'un défaut, elles se manifestent sous forme de creux, de surtension ou de coupures brèves de tension.

### *Les perturbations électriques affectant la fréquence :*

Celles-ci ne sont observées qu'en circonstances exceptionnelles, par exemple lors de certains défauts de grande ampleur au niveau de la production.

### *Les perturbations électriques affectant la symétrie :*

Dans un système triphasé, l'alimentation de certaines charges entraînent des déséquilibres entre les phases, ces charges sont généralement des charges monophasées.

### *Les perturbations électriques affectant la forme d'onde :*

L'onde n'est plus sinusoïdale et peut être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des harmoniques.

Type de perturbation	Origine	Conséquences	Solutions possibles
<b>Coupure longue</b>	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours, alimentation sans interruption (ASI)
<b>Creux de tension et coupure brève</b>	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
<b>Fluctuation rapide (flicker)</b>	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Installer une ASI, Modifier le perturbateur, Eloigner électriquement la charge Perturbatrice, Augmenter la puissance de court-circuit
<b>Harmonique</b>	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs), diélectriques (vieillessement d'isolant), instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique,
<b>Interharmonique</b>	Installations non linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence,	Papillotement de l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	Filtrage actif ou passif, conception de l'équipement sensible
<b>Déséquilibre</b>	Installations déséquilibrées	Echauffement des machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement des protections	Dispositif d'équilibrage,
<b>Surtension</b>	Court-circuit, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique,

Tableau 2-1 : Type de perturbation, origine, conséquences et solutions possibles

On traitera dans ce qui va suivre les différentes perturbations organisées, comme précédemment cité. On verra de ce fait leurs origines, leurs effets, leurs caractéristiques et les solutions pour y remédier.

## 2.1 Le creux de tension :

Un creux de tension est une baisse brutale, comprise entre 10% et 90% par rapport à la tension de référence ( $U_{ref}$ ), de la tension en un point du réseau électrique, qui se rétablira après un court laps de temps compris entre la demi-période fondamentale du réseau et une minute. La tension de référence ( $U_{ref}$ ) est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT. [1]

Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90% (IEEE1159) et de durée allant jusqu'à 1 minute.

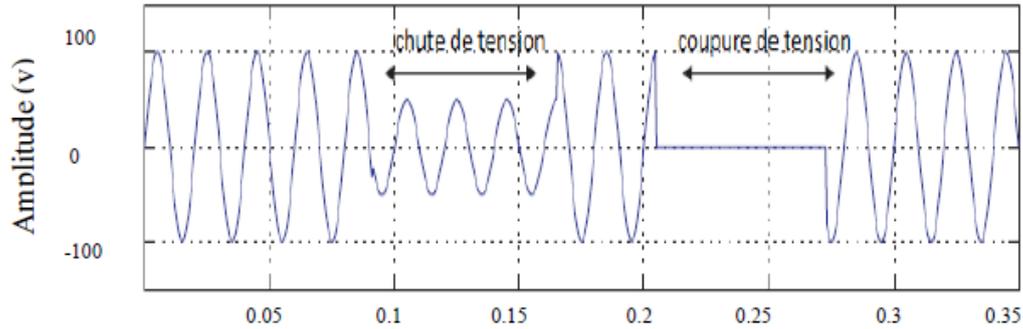


Figure 1 : Creux de tension et coupure brève

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité d'un grand nombre d'équipements présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes. [2]

Le creux de tension se caractérise par trois paramètres :

### 2.1.1 L'amplitude du creux de tension :

L'amplitude du creux de tension est façonnée par les paramètres du court-circuit (puissance et emplacement du court-circuit) mais aussi par la structure du réseau. [3]

### 2.1.2 La durée du creux de tension :

Celle-là est conditionnée par le temps de maintien du défaut. Cette durée dépend du temps de détection et de localisation du défaut, des temporisations éventuelles mises en œuvre quant à l'ouverture des disjoncteurs, [3]

### 2.1.3 La profondeur du creux de tension :

La profondeur d'un creux de tension est la différence entre la valeur efficace de l'amplitude du creux et celle de la tension de référence.

### 2.1.4 Origine du creux de tension :

#### *Les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées :*

Les courts-circuits sont la cause principale du creux de tension et des coupures brèves, ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension pouvant affecter une, deux ou trois phases. [1]

### *Le démarrage des moteurs de forte puissance :*

Les moteurs de forte puissance peuvent également être à l'origine des creux de tension. Une chute de tension est produite par la surintensité due au courant de démarrage des moteurs électriques qui atteint 5 à 8 fois le courant nominal.

### *Saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau :*

La saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau peuvent eux aussi engendrer des creux de tension. Cependant ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes. [1]

## **2.2 Les coupures de tension :**

Une coupure de tension est un cas particulier du creux de tension où la profondeur du creux est supérieure à 99% selon la norme CEI;

Selon leur durée, deux types de coupures peuvent être distingués :

- Coupures brèves de durée inférieure à 180 ms selon CENELEC et à 60 ms selon la CEI et IEEE;
- Coupures longues de durée supérieure à 180 ms selon CENELEC et à 60 ms selon la CEI et IEEE, [4].

Les coupures sont souvent causées par :

- L'enclenchement de protection ou leur ré-enclenchement consécutif à l'apparition de défauts dans le réseau ou chez les clients;
- Les permutations de transformateurs ou de lignes ;
- La commutation de charges de grande puissance comparée à la puissance de court-circuit telles que: moteurs asynchrones, fours à arc, machines à souder.

### **2.2.1 Les effets des coupures de tension :**

Les effets sont instantanés ou à court terme, se produisant principalement au niveau:

- Des contacteurs et relais thermiques : les creux de tension provoquent des manœuvres intempestives des contacteurs et relais ;
- Des convertisseurs: défauts de commutation des onduleurs ;
- Des systèmes électroniques analogiques ou numériques: défauts de fonctionnement ou erreurs d'exécution de calculs informatiques ;

D'autres effets, à action différée, principalement au niveau des moteurs. La remontée de tension qui constitue l'ultime séquence d'un creux de tension, peut provoquer une surintensité au niveau

des machines tournantes; ceci donne lieu à des sur-échauffements et des efforts électrodynamiques de brèves durées, pouvant engendrer la fatigue du matériel. [1]

Les conséquences des creux de tension et des coupures de tension peuvent aussi être d'ordre économique car ces perturbations peuvent engendrer:

- Une perte ou une altération de la production ;
- une détérioration de l'outil de production ;
- une perte de temps pour la remise en état et la remise en route de l'outil de production.

### **2.2.2 Solutions contre les creux de tension et les coupures brèves :**

Pour pouvoir remédier aux creux de tension et aux coupures brèves, différents types de solutions existent :

#### *Réduction du nombre de creux de tensions et de coupures :*

Pour réduire le nombre de creux de tension et de coupures brèves plusieurs dispositions peuvent être prises, on cite par exemple :

- La fiabilisation des ouvrages (maintenance préventive ciblée, renouvellement, mise en souterrain) ;
- La restructuration des réseaux (raccourcissement de la longueur des départs) ;
- Remplacer des disjoncteurs déclencheurs-réenclencheurs automatiques par des disjoncteurs shunt qui ont le grand avantage de ne pas provoquer de coupures sur le départ avarié en cas de défaut fugitif à la terre (réduction du nombre de coupures brèves).

#### *Réduction de la durée et de la profondeur des creux de tension :*

Pour réduire la durée et la profondeur des creux de tension on peut agir sur deux niveaux :

Au niveau du réseau :

- Augmentation des possibilités de bouclage (nouveaux postes source, interrupteur de bouclage).
- Amélioration du niveau de performance des protections électriques (sélectivité, automatisme de reprise d'alimentation, organes télécommandés en réseau, téléconduite, remplacement des éclateurs par des parafoudres...).
- Augmentation de la puissance de court-circuit du réseau.

Au niveau des équipements :

Diminution de la puissance absorbée par les charges de fortes puissances lors de leur mise sous tension avec des compensateurs automatiques en temps réel et des démarreurs progressifs qui limitent les pointes de courant (ainsi que les sollicitations mécaniques).

#### *Insensibilisation des installations industrielles :*

On veut compenser le manque d'énergie par un dispositif à réserve d'énergie intercalé entre le réseau et l'installation.

#### *Insensibilisation du contrôle-commande :*

Il est plus économique de désensibiliser uniquement le contrôle-commande et non pas l'alimentation en puissance des équipements car il est peu consommateur d'énergie.

Les solutions consistent à alimenter toutes les bobines des contacteurs par une source auxiliaire sûre, ou à utiliser un relais temporisé à la retombée.

### **2.3 Fluctuation de tension et flicker :**

Des variations de tension sont dues à la mise en service ou hors service d'appareils électriques et le fonctionnement de certaines charges à puissance variable, ces variations sont connues sous deux formes principales :

- Variations lentes de tension : ils se produisent à des intervalles de temps supérieurs à quelques secondes. Ne dépassent pas les  $\pm 10\%$  de la tension nominale. Le fonctionnement de la plupart des équipements électriques est insensible à ces variations.
- Des variations rapides de tension conduisant à une composition spectrale de fréquence dans la bande 0,5 et 25Hz. Ces fluctuations rapides sont particulièrement ressenties sur le flux lumineux des lampes car elles provoquent un papillotement de la lumière, connu aussi comme flicker et qui est fort désagréable pour les consommateurs. [2]

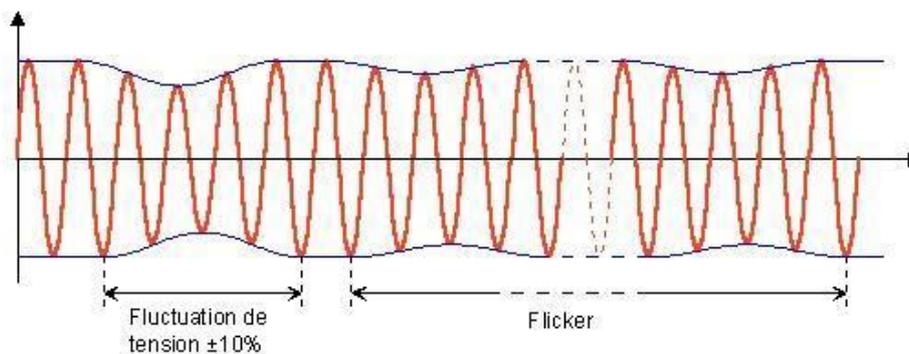


Figure 2 : Fluctuation de la tension et Flicker

Une tolérance : à  $\pm 10\%$  est fixée par la norme EN 50160, cette tolérance est pour les tensions nominales BT (Basse Tension :  $U_n < 1000\text{ V}$ ), de  $+6\%$  à  $-10\%$  spécifiquement pour les tensions BT 230/400 V.

### 2.3.1 Le flicker :

Le flicker correspond à des variations lumineuses, et est le résultat de faibles fluctuations de tension provoquées par des charges variables importantes : fours à arc, soudeuses, moteurs... Il provoque une fatigue physique et mentale pour les usagers de l'éclairage raccordés à proximité de la charge perturbatrice. Ces variations périodiques ont une décomposition spectrale dans une bande de 0,5 Hz à 25 Hz.

### 2.3.2 Les variations de tension par à-coups :

Les à-coups de tension sont produits de façon systématique (intervalles entre à-coups à quelques secondes). Ces variations sont dues à des mises en service de charges importantes (ex : démarrage moteur, manœuvre de batterie de compensation, ...).

### 2.3.3 Origines :

- **Le four à arc** : c'est le principal générateur de flicker, les fluctuations de tension que son fonctionnement normal fait naître sont d'autant plus ressenties lorsque la puissance des fours est élevée.
- **Machines à charges fluctuantes** : les moteurs puissants, ou groupes de moteurs, à démarrages et arrêts fréquents, ou à charge variable, (tels ceux des laminoirs), ainsi que les machines à couple résistant alternatif (compresseurs), peuvent être à l'origine de flickers.
- **Régulateurs de puissance à thyristors** : les thyristors à commande synchrone sont allumés pendant des périodes entières (régulation par train d'ondes entières), mais les temps de conduction sont très brefs, répétés à des fréquences de quelques Hz.
- **Les machines à souder** : on cite aussi les soudeuses à arc de faible puissance, même si elles sont peu gênantes (sauf utilisation intensive chez un abonné BT). Les cycles répétitifs des soudeuses par résistance, à des fréquences comprises entre 0.1 Hz et 1 Hz, sont par contre à l'origine de perturbations sous la forme d'à-coups de tension.

### 2.3.4 Effets des Fluctuations de tension et des flickers :

Etant donné que les fluctuations de tension ont une amplitude qui ne dépasse pas  $\pm 10\%$ , la plupart des appareils ne sont pas affectés par ce type de perturbation. Cependant le principal

désagrément que l'on peut attribuer se voit émaner du flicker, car l'inconfort qui en résulte dépend de l'amplitude des fluctuations, de leurs composantes fréquentielles, du taux de répétition et de la durée de la perturbation [5]

Mais encore, ces fluctuations peuvent, pour différents types d'éclairage, affecter le flux lumineux.

## 2.4 Les surtensions :

Phénomène affectant l'amplitude de la tension, ce sont des tensions qui, en se superposant à la tension nominale mènent à des valeurs importantes de la tension nominale, qui dépassent alors les limites habituellement admises par les normes techniques.

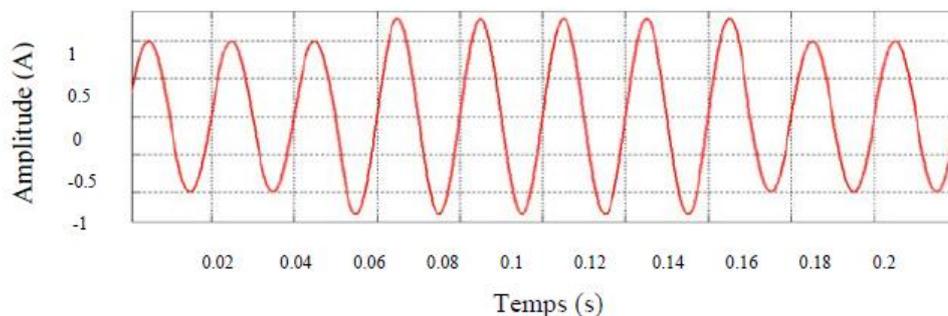


Figure 3 : Exemple de surtension

La norme EN50160 fixe les niveaux de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

- Réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser  $1,7 U_n$  ;
- Réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser  $2 U_n$

Trois natures de surtensions sont répertoriées :

- Surtension permanente de forme sinusoïdale (à fréquence industrielle), de longue durée (supérieure à 1 heure) ;
- Surtension temporaire de forme sinusoïdale (autour de la fréquence industrielle), de durée relativement longue (comprise entre 1,5 fois la période industrielle et 1 heure) ;
- Surtension transitoire de forme oscillatoire ou non et généralement vite amortie, de courte durée (inférieure à la période industrielle) ; cette catégorie regroupe les surtensions à front lent, à front rapide, à front très rapide.

Les surtensions sont caractérisées par :

- Leur durée ;
- Le coefficient de surtension ;

## Chapitre 1 : Les perturbations électriques affectant la qualité de l'énergie électrique

- Leur forme d'onde.
- Rapport de l'amplitude crête de la tension atteinte à la valeur efficace de la tension;

La sensibilité des réseaux électriques aux surtensions dépend de leur topologie, du niveau de tension, du type du matériel et du mode d'exploitation.

### *Surtensions à fréquence industrielle :*

Elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz) et sont causées par :

- Les défauts d'isolement;
- Rupture du conducteur de neutre;
- Défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge du transformateur ;
- Surcompensation de l'énergie réactive.

### *Surtensions de manœuvre :*

Elles sont dues à des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), On distingue particulièrement trois types:

- Surtensions de commutation en charge normale;
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs;
- Surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide).

### *Surtensions atmosphériques :*

Les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique visent principalement les réseaux aériens. La foudre qui est un phénomène naturel qui apparaît en cas d'orage en est la principale cause, on distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montées en potentiel de la terre), [6]

## **2.4.1 Origine des surtensions :**

### *Défauts d'isolement :*

Un défaut d'isolement (consécutif à la blessure d'un câble souterrain, mise à la terre d'un conducteur aérien par des branchages, défaut dans un équipement) a des chances de provoquer une surtension sur un réseau triphasé. Lors d'un défaut entre phase et terre, la phase en question sera directement mise au potentiel de la terre tandis que la tension des phases saines par rapport à la terre atteint la tension composée.

### *La Ferrorésonance :*

La Ferrorésonance est un phénomène oscillatoire non-linéaire rare et dangereux lié à la présence simultanée d'un condensateur et d'une inductance saturable (le cas d'un transformateur par exemple).

Les surtensions sont consécutives à des résonances particulières apparaissant lors de manœuvre d'ouverture ou de fermeture d'appareil dont les pôles sont séparés ou à fonctionnement non simultanés.

### **2.4.2 Effets des surtensions :**

Les effets des surtensions varient selon le temps d'application, l'amplitude, la répétitivité, le mode, la raideur du front de montée et la fréquence de l'onde de tension.

- La destruction ou la dégradation d'équipements peuvent être provoquées par des claquages.
- Des surtensions non destructrices mais répétitives induisent un vieillissement prématuré du matériel.
- Des dégradations importantes des lignes et des équipements, causées par les surtensions de manœuvres répétitives et les chocs de foudre;
- Des perturbations des circuits de contrôle-commande et de communication à courants faibles;

La propagation des ondes de chocs de foudre sur une ligne ou une structure métallique génèrent des surtensions susceptibles de créer un amorçage d'isolateurs, [5]

### **2.4.3 Solutions contre les surtensions :**

Plusieurs solutions existent pour atténuer l'effet des surtensions et assurer la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique, cependant, pour obtenir une bonne coordination d'isolement il est nécessaire :

- De connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau ;
- De choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes.

Les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées :

### *Surtensions temporaires :*

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge,
- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de Ferrorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène [7].

### *Surtensions de manœuvre :*

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs, par l'installation de self de choc, résistances de pré-insertion. Les compensateurs automatiques statiques qui permettent de maîtriser l'instant d'enclenchement sont particulièrement adaptés aux applications BT n'acceptant pas les surtensions transitoires (automates industriels, informatique).
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour limiter les effets des surtensions transitoires.

### *Surtensions atmosphériques :*

- **Protection primaire:** Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).
- **Protection secondaire:** Elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre. Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposé et à l'entrée des postes MT/BT [8]

En BT, ils sont installés à la fois le plus en amont possible de l'installation BT (afin de protéger le plus globalement possible) et le plus près possible des récepteurs électriques. La mise en cascade de parafoudres est parfois nécessaire : un, en tête d'installation, et un, au plus près des récepteurs [9]. Un parafoudre BT est toujours associé à un dispositif de déconnexion. D'autre part, l'utilisation d'un disjoncteur de branchement différentiel sélectif en BT évite que l'écoulement du courant à la terre par le parafoudre ne provoque de déclenchement intempestif du disjoncteur de tête incompatible avec certains récepteurs (congélateur, programmeur...).

## **2.5 Perturbations affectant la fréquence :**

La vitesse de rotation des alternateurs impose la fréquence du réseau, cette dernière dépend de l'équilibre dynamique entre la charge et la puissance, tout changement de ce point d'équilibre conduira à des variations de la fréquence.

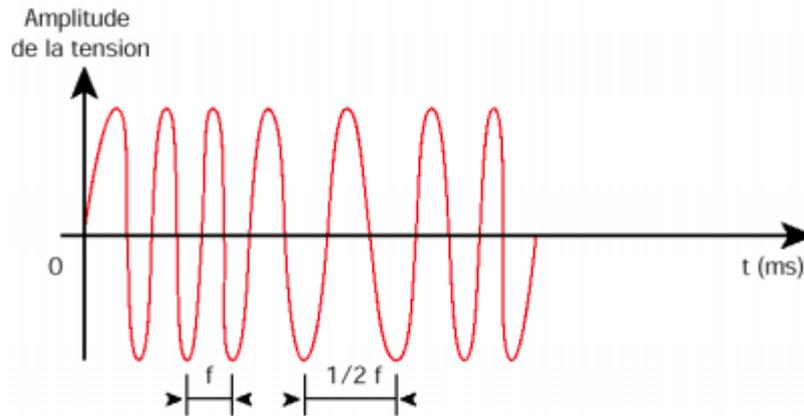


Figure 4 : Exemple de fluctuation de la fréquence

La fluctuation n'est généralement pas importante, dans la plupart des cas ne dépassant pas les (1%). Certains processus industriels nécessitent un réglage très précis de la vitesse des moteurs et peuvent subir des dysfonctionnements en cas d'alimentation par un groupe de secours mal conçu.

La norme EN50160 exige que l'écart de fréquence ne doit pas dépasser 1 Hz, ceci étant dit on peut tenir parfois compte des conditions extérieures la valeur de la fréquence peut être tolérée jusqu'à 2 Hz [10].

## 2.6 Perturbations affectant le déséquilibre :

Un système triphasé est dit équilibré lorsque les trois grandeurs le formant sont de mêmes nature, pulsation et amplitude, le tout avec un déphasage de  $\pm 120^\circ$ . Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase ou d'amplitude, on parle d'un système triphasé déséquilibré.

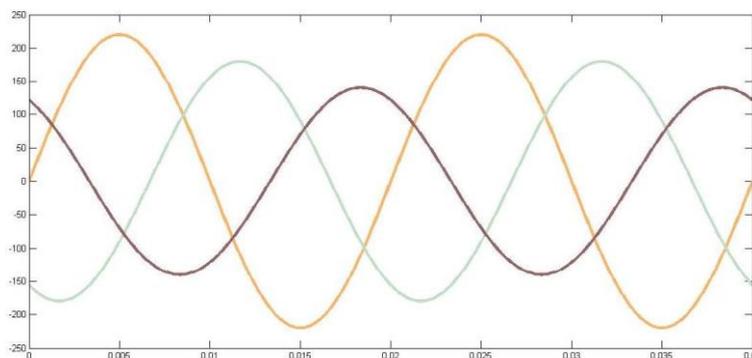


Figure 5 : Déséquilibre de tension

Les taux les plus élevés sont observés sur les réseaux BT alimentés par un transformateur de faible puissance avec une majorité de branchements monophasés... C'est le cas des postes haut de poteau qui alimentent en monophasé peu d'abonnés BT. [7]

Le taux de déséquilibre est défini, en utilisant la méthode des composantes symétriques. Les tensions inverses d'un réseau résultent de la circulation des courants inverses produits par des charges déséquilibrées. La formule approchée suivante peut être utilisée:

$$\Delta U_i = \max(V_i - V_{moy}) / V_{moy} \quad (I.1)$$

Avec :

$\Delta U_i$  : Degré du déséquilibre.

$V_i$  : Tension de la phase  $i$ .

$$V_{moy} = \frac{V_1 + V_2 + V_3}{3}$$

Lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace on parle alors d'un déséquilibre d'amplitude, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$ . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont.

Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors à commande de phase.

### 2.6.1 Origine du déséquilibre :

La nature des récepteurs influe fortement sur la symétrie de la tension. Les réseaux électriques sont généralement triphasés et alimentent des récepteurs triphasés d'une part, mais aussi beaucoup de récepteurs monophasés. Les courants déséquilibrés provoquent, par leur circulation dans les impédances du réseau, un déséquilibre de tension.

Dans les réseaux de transport, des charges monophasées peuvent être raccordées soit entre phases soit entre phase et neutre, la plupart des récepteurs monophasés sont des équipements BT mais des déséquilibres peuvent aussi provenir de niveaux de tension plus élevés. L'asymétrie des impédances des lignes du réseau est une cause permanente de déséquilibre de tension.

La propagation des tensions inverses d'un réseau à un réseau de niveau de tension supérieure se fait avec une forte atténuation. Si la propagation se fait d'un réseau vers un réseau de niveau de tension inférieur, l'atténuation dépend de la présence de machines tournantes triphasées qui ont un effet rééquilibrant [11].

### 2.6.2 Solutions contre le déséquilibre :

Pour atténuer les effets du déséquilibre, plusieurs mesures plus ou moins techniquement complexes peuvent être prises.

La première consiste à réorganiser et à redistribuer les charges afin de rééquilibrer le système. Pour pouvoir réduire l'influence des courants indirects, qui sont à l'origine de chutes de tension indirectes au niveau de la tension d'alimentation, l'impédance interne des sources doit être faible. On peut alors la réduire en connectant les charges déséquilibrées au niveau des points présentant le niveau de puissance de court-circuit le plus élevé.

On peut alors utiliser des transformateurs spéciaux, comme les suivants :

- Le transformateur 'Scott' : deux transformateurs monophasés le constituent, ils sont caractérisés par des rapports de transformation spéciaux, et raccordés à un système triphasé. Cette configuration, vue depuis le réseau, se comporte comme un système triphasé équilibré.
- Le transformateur 'Steinmetz' : c'est un transformateur triphasé avec une charge supplémentaire de puissance assurant l'équilibrage, la charge en question est constituée d'un condensateur et d'une bobine dont l'inductance est proportionnelle à la charge monophasée causant le déséquilibre. A noter que l'équilibre n'est parfait que pour les charges dont la puissance active est égale à la valeur utilisée pour dimensionner la source.

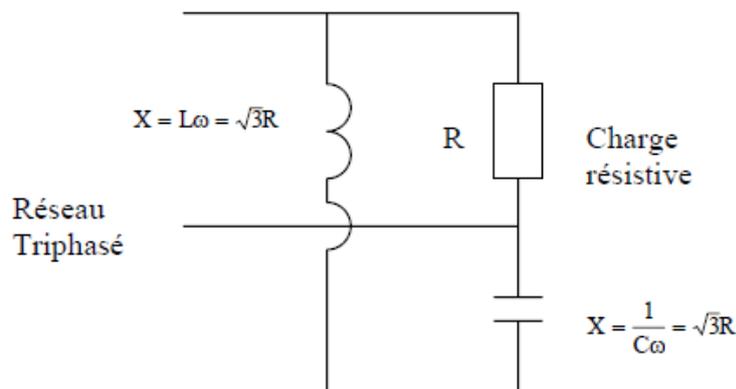


Figure 6 : Montage de Steinmetz pour le rééquilibrage

## 2.7 Harmoniques :

Tout signal peut se décomposer en plusieurs composantes sinusoïdales, une avec la fréquence fondamentale du signal, les autres de fréquences multiples de sa fréquence fondamentale. Les déformations de l'onde de tension des réseaux, dont l'analyse spectrale révèle des fréquences multiples de la fréquence fondamentale  $f_0$  sont appelés distorsions harmoniques. Les distorsions harmoniques sont souvent la résultante de perturbations issues d'appareils distincts et transmises par le réseau [2].

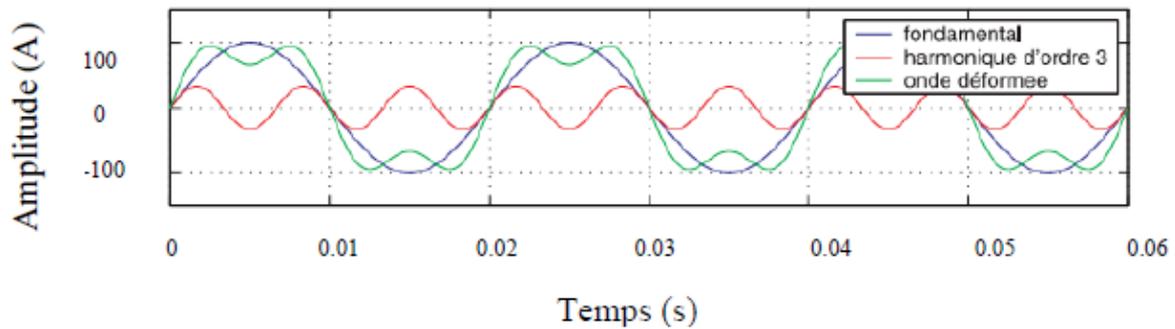


Figure 7 : Illustration des harmoniques (harmonique d'ordre 3, fondamental et onde déformée)

### Rang de l'harmonique :

Le rang d'une harmonique est défini comme :

$$n = \frac{f_n}{f_0} \quad (I.2)$$

Où  $f_n$  et  $f_0$  désignent la fréquence de l'harmonique et la fréquence fondamentale respectivement,  $n$  est le rang de l'harmonique.

### Taux individuel d'harmonique :

Il donne une mesure de l'importance de chaque harmonique par rapport au fondamental. Le taux individuel est donné par :

$$D_n = \frac{f_n}{f_0} * 100\% \quad (I.3)$$

Où  $D_n$  est le taux d'harmonique individuel, et est donné en pourcent.

### Taux de distorsion harmonique :

Le terme THD correspond à Total Harmonic Distortion (taux de distorsion harmonique global). Le taux de distorsion harmonique est une notion très utilisée pour définir l'importance du contenu harmonique d'un signal alternatif.

Pour un signal  $y$ , le taux de distorsion harmonique THD est défini par la formule :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} y_n^2}}{y_1} \quad (I.4)$$

Où  $y_1$  est l'harmonique fondamental.

Selon la norme sur les harmoniques, «  $n$  » peut être généralement limité à 50. Le taux de distorsion harmonique est habituellement exprimé en pourcentage.

### THD en courant :

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques de courant, l'expression devient :

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (I.5)$$

**THD en tension :**

Lorsqu'il s'agit d'harmoniques en tension, l'expression devient :

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \quad (I.6)$$

**Relation entre facteur de puissance et THD :**

Quand la tension est sinusoïdale ou pratiquement sinusoïdale, la puissance P a pour valeur :

$$P \approx P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (I.7)$$

D'où :

$$FP = \frac{P}{S} \approx \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1}{U_1 \cdot I_{rms}} \quad (I.8)$$

$$\frac{I_1}{I_{rms}} = \frac{1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (I.9)$$

$$FP \approx \frac{\cos\varphi_1}{\sqrt{1+THD_i^2}} \quad (I.10)$$

**2.7.1 Les différents générateurs de grandeurs électriques harmoniques :**

Les charges non-linéaires sont la principale cause des harmoniques. Les tensions / courants harmoniques sont produits en majorités par les charges domestiques et industrielles qui provoquent la plus grande proportion des courants harmoniques avec des niveaux de distorsion relativement élevés.

Actuellement, les équipements à base d'interrupteurs constituent la principale source de ces harmoniques. Ces appareils sont assimilables à des générateurs de courants harmoniques: appareils d'éclairage fluorescent, variateurs de vitesse, redresseurs, téléviseurs, ordinateurs, etc. [12]

**Les convertisseurs statiques sur les réseaux triphasés :**

On cite parmi les générateurs de courants harmoniques les ponts redresseurs et les convertisseurs statiques (diodes et thyristors). Ainsi, avec le pont de Graetz, le courant continu

parfait débité, impose un courant alternatif non sinusoïdal, composé de créneaux lorsque la charge est fortement inductive (Figure 8 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz débitant un courant continu parfait sur charge très inductive), ou de pointes lorsque le pont de diodes est suivi d'un condensateur comme c'est souvent le cas (Figure 9 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz suivi d'un condensateur).

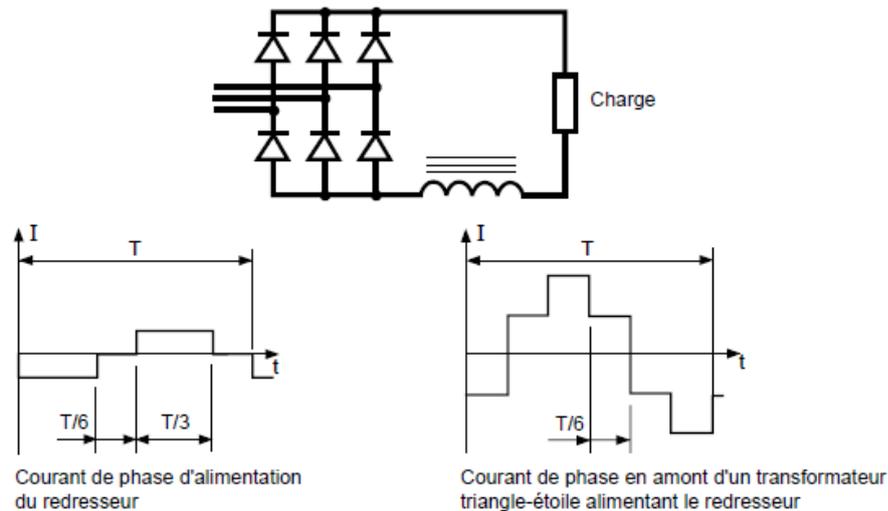


Figure 8 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz débitant un courant continu parfait sur charge très inductive

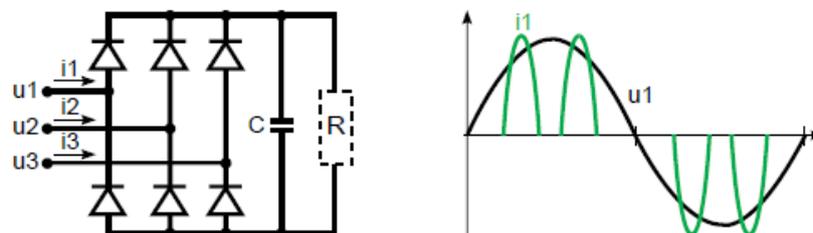


Figure 9 : Courant alternatif en amont d'un redresseur en pont de Graetz suivi d'un condensateur

Malgré leur forme différente, les deux courants ont les mêmes composantes harmoniques caractéristiques

### *Eclairage :*

L'éclairage, par lampes à décharge et tubes fluorescents, est générateur de courants harmoniques. Le taux individuel d'harmonique 3 peut même dépasser 100 % pour certaines lampes fluo-compactes modernes.

### *Four à arc à courant alternatif :*

L'arc étant non linéaire, dissymétrique et instable, va induire des spectres possédant des raies impaires et paires. Le niveau spectral est en fonction du type de four, de sa puissance, de la période de fonctionnement considérée.

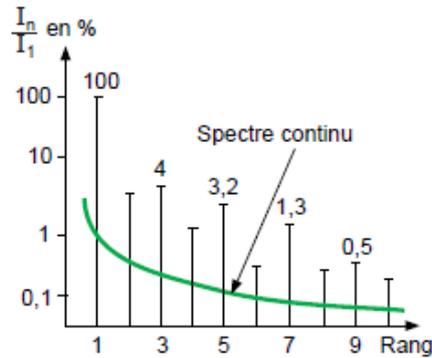


Figure 10 : Spectre du courant alimentant un four à courant alternatif

#### *Four à arc à courant continu :*

L'arc est alors alimenté par l'intermédiaire d'un redresseur. L'arc est plus stable qu'en courant alternatif. Le courant absorbé se décompose en :

- un spectre semblable à celui d'un redresseur,
- un spectre continu de niveau inférieur à celui d'un four à courant alternatif.

#### *Les inductances saturées :*

De telles inductances ont leur impédance en fonction de l'amplitude du courant qui les traverse, et de fait elles provoquent des déformations notables de ce courant.

#### *Les machines tournantes :*

Les machines tournantes donnent des harmoniques de denture de rangs élevés et d'amplitudes souvent négligeables. Les petites machines synchrones sont toutefois, génératrices de tensions harmoniques de rang 3. [12]

### **2.7.2 Effets des harmoniques :**

Les effets nuisibles des harmoniques sur les appareils sont instantanés ou à long terme.

#### *Effets instantanés :*

Ces effets concernent les défauts, les mauvais fonctionnements ou la diminution des performances subis par des dispositifs, dus au déplacement du passage par zéro de l'onde de tension. Les dispositifs de régulation, les appareils électroniques et les calculateurs y sont particulièrement sensibles.

De grandes amplitudes harmoniques peuvent provoquer un mauvais fonctionnement des récepteurs de télécommande centralisée et des relais de protection.

*Effets à long terme :*

Les effets à long terme sont essentiellement de nature thermique. Les pertes supplémentaires et les sur échauffements qui apparaissent dans les condensateurs, les machines tournantes, et les transformateurs peuvent diminuer la durée de vie de ces appareils et parfois même les endommager.

Le tableau suivant résume l'effet des harmoniques sur les principaux appareils :

Matériels	Les effets
Machines synchrones	Echauffements supplémentaires particulièrement dans les amortisseurs
Transformateurs	Pertes supplémentaires, risque de saturation en présence d'harmoniques pairs
Machines asynchrones	Echauffement supplémentaires notamment dans les cages doubles ou a encoches profondes, couples pulsatoires
Câbles	Pertes ohmiques et diélectriques supplémentaires
Ordinateurs	Troubles fonctionnels
Electronique industrielle, pont redresseurs	Troubles liés à la forme d'onde
Régulateurs volt-métriques de transformateurs	Mesure de tension faussée
Relais de télécommande	Déclanchement intempestif
Compteur d'énergie à induction	Dégradation de la classe de précision
Condensateur de puissance	Echauffement vieillissement rapide

Tableau 2-2 : Effet des harmoniques sur les principaux appareils

La plupart des effets gênants des harmoniques sont dus aux harmoniques de tension, mais les courants harmoniques peuvent également provoquer des effets directs on citera par exemple :

- La perturbation du réseau téléphonique.
- Surchauffe du neutre car dans un système à neutre, si les courants de phases s'annulent, les courants harmoniques eux ne le font pas. Ces courants qui sont les multiples impairs de la fréquence du courant de phase s'ajoutent au neutre. Cet effet est illustré sur la (Figure 11 : Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre) [13]. Sur cette figure, les courants de phase sont introduits avec un déphasage de 120°.

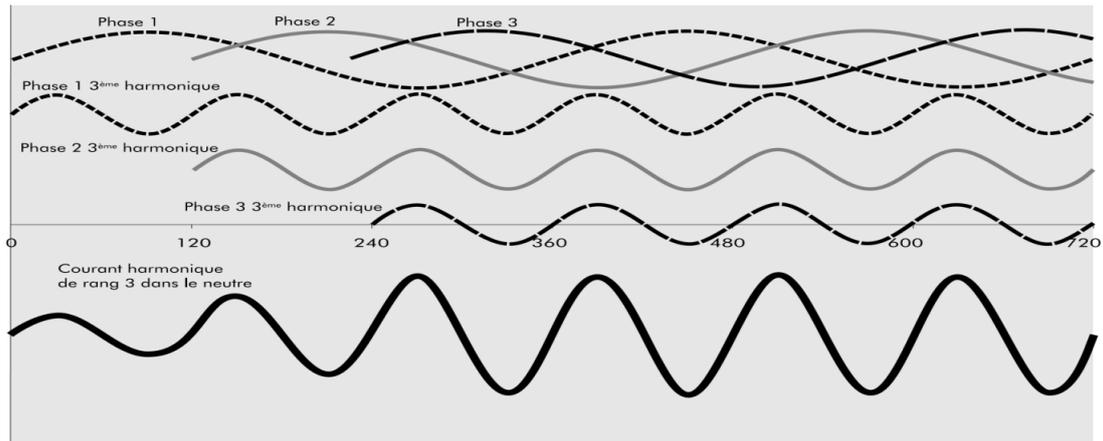


Figure 11 : Addition des courants harmoniques de rang trois dans le neutre

Le courant dû aux harmoniques dans le neutre est montré dans le bas du diagramme. Dans ce cas 70 % de courant harmonique par phase produira 210 % de courant harmonique au niveau du neutre.

- Effets sur les transformateurs où l'on a augmentation des pertes par courants de Foucault qui augmentent en fonction du carré du rang des harmoniques; [13]
- Déclenchement intempestif des coupes-circuits;
- Surcharge des condensateurs utilisés pour l'amélioration du facteur de puissance.

### 2.7.3 Normes :

Les émissions harmoniques sont soumises à différentes normes et règlements :

- normes de compatibilité adaptées aux réseaux,
- normes d'émission applicables aux produits générateurs d'harmoniques,
- recommandations des distributeurs d'énergie applicables aux installations.

Afin d'atténuer rapidement les effets de la pollution harmonique, un triple dispositif normatif et réglementaire est actuellement en vigueur, et se retrouve dans les éléments suivants :

#### *Normes de compatibilité entre réseaux électriques et produits :*

Ces normes donnent des directives pour la compatibilité entre les réseaux électriques et les produits :

- les harmoniques générés par un appareil ne doivent pas perturber le réseau au-delà de niveaux spécifiés ;
- chaque appareil doit pouvoir fonctionner normalement en présence des perturbations égales aux niveaux spécifiés par les normes :
  - CEI 61000-2-2 pour les réseaux publics à basse tension,

## Chapitre 1 : Les perturbations électriques affectant la qualité de l'énergie électrique

- CEI 61000-2-4 pour les installations industrielles à basse tension et moyenne tension.

### *Normes d'appareillage :*

- CEI 61000-3-2 ou EN 61000-3-2 pour les appareils basse tension raccordés au réseau public absorbant un courant inférieur ou égal à 16 A.
- CEI 61000-3-12 ou EN 61000-3-12 pour les appareils absorbant un courant supérieur à 16 A et inférieur ou égal à 75 A.

### *Valeurs maximales d'harmoniques acceptables :*

Des études internationales ont permis de rassembler des données dont l'analyse conduit à une estimation de valeurs typiques d'harmoniques pouvant être rencontrées dans les réseaux de fourniture d'énergie.

Le tableau suivant montre les niveaux qu'il est souhaitable ne pas dépasser en suivant les normes :

- Niveaux de compatibilité CEI 61000-2-2 pour les sources BT
- Niveaux de planification CEI 61000.3.6 pour les sources MT et HT :

Harmoniques impairs non multiples de 3				Harmoniques impairs multiples de 3				Harmoniques pairs			
Rang h	BT	MT	THT	Rang h	BT	MT	THT	Rang h	BT	MT	THT
5	6	5	2	3	5	4	2	2	2	1,6	1,5
7	5	4	2	9	1,5	1,2	1	4	1	1	1
11	3,5	3	1,5	15	0,3	0,3	0,3	6	0,5	0,5	0,5
13	3	2,5	1,5	21	0,2	0,2	0,2	8	0,5	0,4	0,4
17	2	1,6	1	> 21	0,2	0,2	0,2	10	0,5	0,4	0,4
19	1,5	1,2	1					12	0,2	0,2	0,2
23	1,5	1,2	0,7					> 12	0,2	0,2	0,2
25	1,5	1,2	0,7								
> 25	0,2 + 1,3x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)	0,2 + 0,5x(25/h)								

Figure 12 : Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables [14]

### *Normes de qualité des réseaux :*

La norme EN 50160 précise les caractéristiques de la tension fournie par les réseaux publics basse tension et moyenne tension. D'autre part, IEEE 519 est une approche conjointe entre le distributeur d'énergie et le client pour limiter l'impact des charges non-linéaires. Par ailleurs, les distributeurs d'énergie encouragent les actions de prévention afin de réduire les dégradations de la qualité de l'électricité, les échauffements et les altérations du facteur de puissance. Ils réfléchissent de plus en plus à la possibilité de taxer les clients pollueurs.

### 2.7.4 Solutions contre les harmoniques :

Les mesures permettant la réduction des courants harmoniques sont de trois natures différentes:

- Adaptations de l'installation.
- Utilisation de dispositifs particuliers dans l'alimentation,
- filtrage.

Chaque mesure prise présente ses avantages et inconvénients, ce n'est donc pas une seule et bonne solution, ce qui exige une étude approfondie qui permettra d'éviter la mise en œuvre de solutions inadéquates ainsi que des investissements inutiles.

#### *Positionner les charges polluantes en amont du réseau :*

La perturbation harmonique globale croît lorsque la puissance de court-circuit diminue. En dehors de toute considération économique, il est donc préférable de connecter les charges polluantes le plus en amont possible

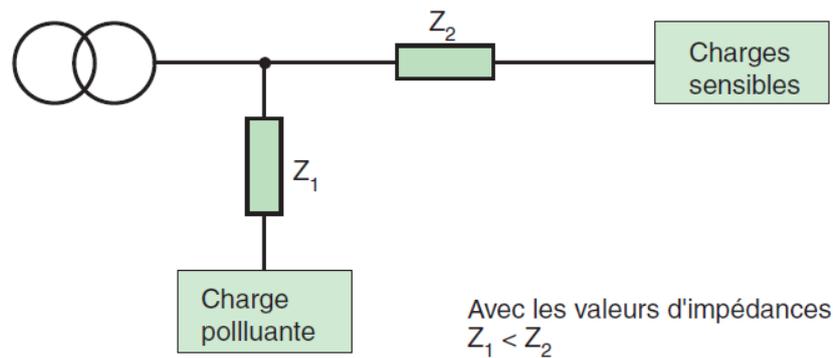


Figure 13 : Alimentation le plus en amont possible des charges non-linéaires (schéma conseillé) [14]

#### *Regrouper les charges polluantes :*

Pour établir un schéma unifilaire, il convient de séparer les équipements perturbateurs des autres voir Figure suivante : en pratique, alimenter les charges polluantes et non polluantes par des jeux de barres différents.

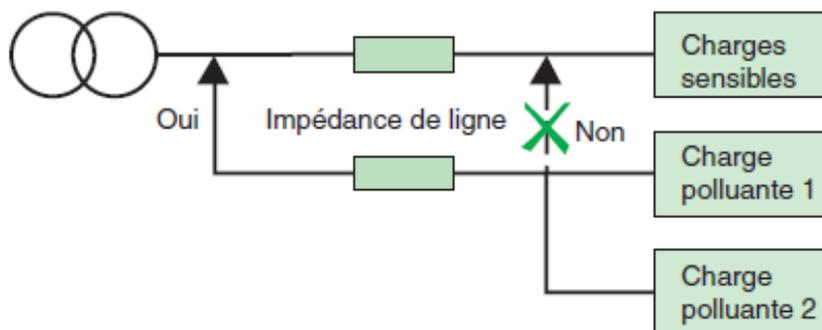


Figure 14 : Regroupement des charges non-linéaires et alimentation le plus en amont possible [14]

*Séparer les sources :*

Une amélioration supplémentaire est obtenue en réalisant une alimentation par transformateur séparé (voire figure suivante) :

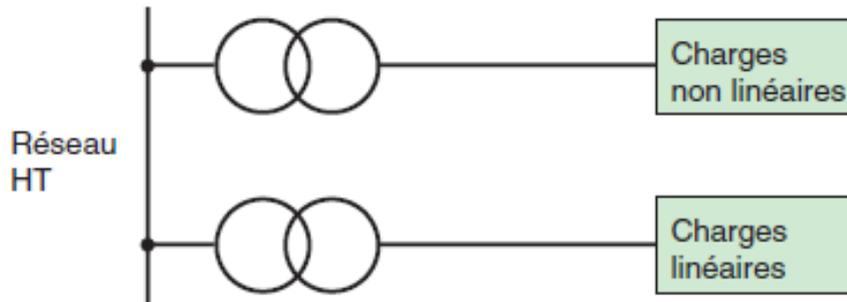


Figure 15 : Alimentation des charges polluantes par transformateur séparé [14]

Il est à noter que cette réalisation implique des couts supplémentaires.

*Utiliser des transformateurs à couplages particuliers :*

Comme cela a été expliqué précédemment les courants de rang trois circulent dans le circuit secondaire des transformateurs raccordés en triangle. L'effet du couplage des transformateurs permet donc la suppression de certains rangs d'harmoniques.

En fonction des types de couplages différents rangs d'harmoniques sont arrêtés :

- Un couplage Dy arrête les harmoniques de rang 3,
- Un couplage Dz arrête les harmoniques de rang 5.

À noter que ce qui est vrai pour la 3ème harmonique est vrai pour toutes les harmoniques multiples de 3 : 6, 9

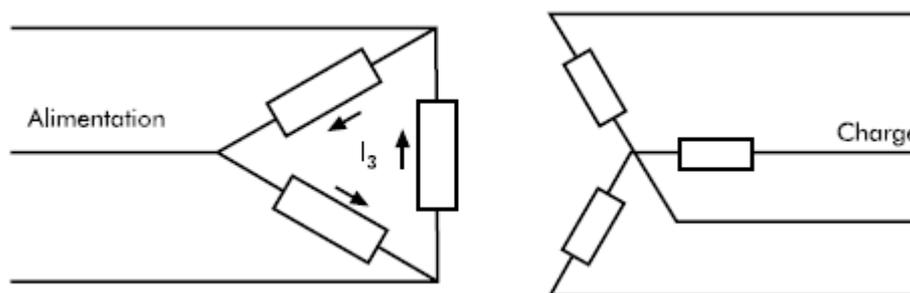


Figure 16 : Transformateurs d'isolement triangle/étoile [13]

*Filtre passif :*

Cette solution est recommandée pour les installations industrielles présentant :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Une nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Une nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Cette solution se présente comme un circuit LC accordé sur chaque fréquence d'harmonique à filtrer, et placé en parallèle sur le générateur d'harmoniques (voir Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un filtre passif).

Ce circuit de dérivation absorbe les harmoniques et évite que ceux-ci ne circulent dans l'alimentation. En général, le filtre passif est accordé sur un rang d'harmonique proche de l'harmonique à éliminer.

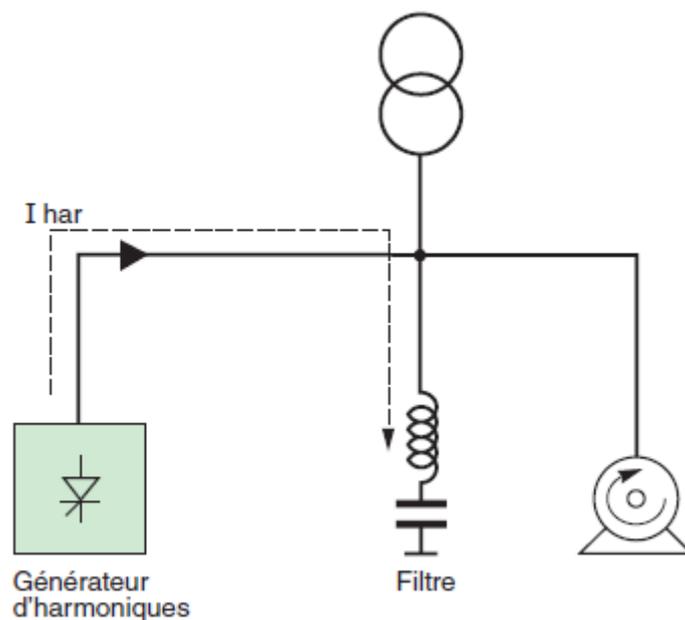


Figure 17 : Principe de fonctionnement d'un filtre passif [14]

$I_{har}$  : Courant harmonique

#### *Filtre actif (ou compensateur actif) :*

Ce filtre est préconisé pour :

- Une Installation tertiaire avec générateurs d'harmoniques de puissance totale inférieure à 200kVA (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions,...).
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Ce sont des systèmes électroniques de puissance installés en série ou en parallèle avec la charge non-linéaire, visant à compenser soit les tensions harmoniques, soit les courants harmoniques générés par la charge. La (Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un filtre actif donne un exemple de filtre actif parallèle compensant le courant harmonique ( $I_{har} = -I_{act}$ ). Le filtre actif réinjecte en opposition de phase les harmoniques présents sur l'alimentation de la charge, de telle sorte que le courant de ligne  $i_s$  soit sinusoïdal.

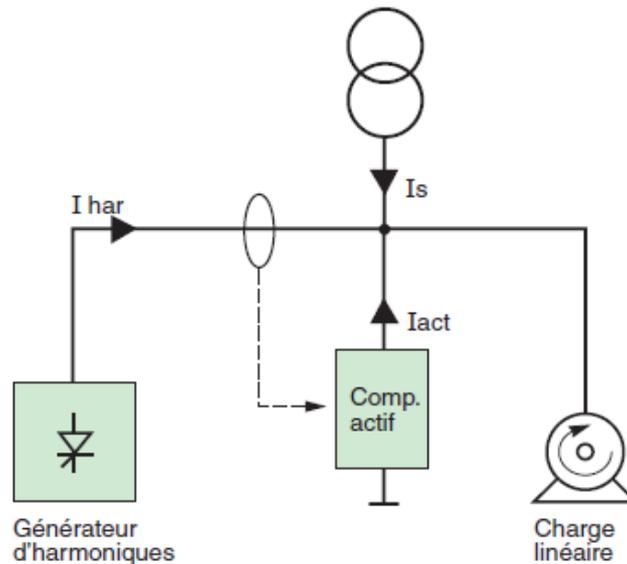


Figure 18 : Principe de fonctionnement d'un filtre actif [14]

- $i_s$  : Courant sinusoïdal de ligne  
 $I_{har}$  : Courant harmonique  
 $I_{act}$  : Courant de compensation actif

### Filtre hybride :

Applications typiques :

- Installations industrielles avec un ensemble de générateurs d'harmoniques de puissance totale supérieure à 200 kVA environ (variateurs de vitesse, alimentations sans interruptions, redresseurs...).
- Installation présentant un besoin de compensation d'énergie réactive.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en tension pour éviter la perturbation de récepteurs sensibles.
- Nécessité de réduction du taux de distorsion en courant pour éviter les surcharges.

Les deux types de dispositifs précédemment présentés peuvent être associés au sein d'un même équipement et constituer un filtre hybride (voir Figure 19 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride). Cette nouvelle solution de filtrage permet de cumuler les avantages des solutions existantes et de couvrir un large domaine de puissance et de performances.

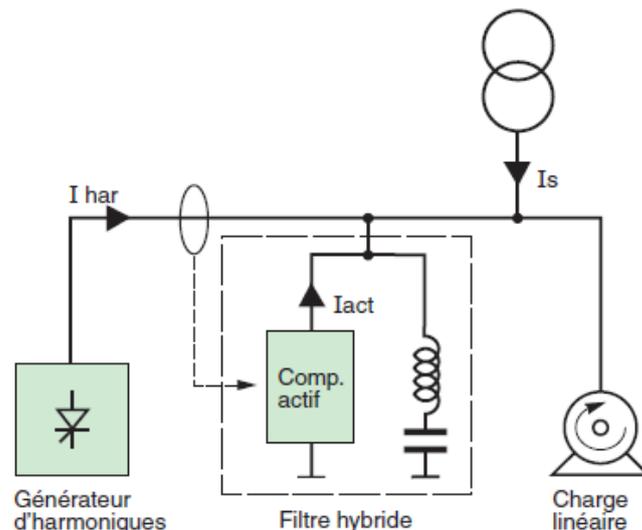


Figure 19 : Principe d'utilisation d'un filtre hybride [14]

$i_s$  : Courant sinusoïdale de ligne

$I_{har}$  : Courant harmonique

$I_{act}$  : Courant de compensation actif

Il est alors aisé de constater que les harmoniques  $I_5$  et  $I_7$  ont les amplitudes les plus grandes, et qu'ils peuvent être supprimés par l'utilisation du pont dodécaphasé ( $p = 12$ ).

Les courants harmoniques de plusieurs convertisseurs se combinent vectoriellement, au niveau du jeu de barres commun d'alimentation. Ce qui permet, avec deux ponts hexaphasés à diodes ayant des charges égales, d'atténuer les courants harmoniques de rang 5 et 7, si les deux transformateurs d'alimentation ont des couplages judicieusement choisis.

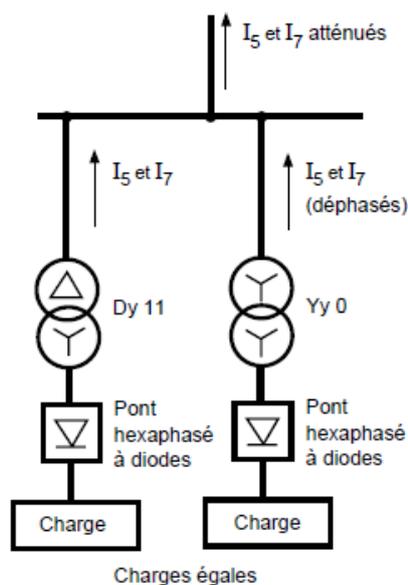


Figure 20 : montages atténuant  $I_5$  et  $I_7$

## 2.8 Inter-harmoniques :

Les inter-harmoniques n'ont pas une fréquence qui est un multiple entier de la fréquence fondamentale du réseau. L'apparition des inter-harmoniques ne cesse d'augmenter et leurs origines sont principalement les convertisseurs de fréquence, les variateurs de vitesse et d'autres équipements similaires de contrôle-commande.

Ceux-ci ont d'ordinaire une amplitude relativement réduite, mais peuvent être gênants s'ils provoquent des résonances. Ils peuvent également avoir des effets très néfastes lorsque leur fréquence se situe dans les plages de fréquence réservées pour les signaux de commande.

Nous pouvons citer comme origines des inter-harmoniques les points suivants :

- les imperfections du convertisseur et de sa commande (chutes de tension dans les thyristors, variation ou inégalité des angles de commutation, variation de l'impédance vue du côté continu du redresseur),
- l'association de plusieurs convertisseurs fonctionnant à des fréquences différentes : variateurs de vitesse des moteurs à courant alternatif
- les convertisseurs statiques de commande non périodique,
- les fours à arc.

## 3 Conclusion

Nous avons pu voir au cours de ce chapitre la notion de la qualité de l'énergie électrique, l'importance technique et économique que cela implique, les perturbations qui affectent la qualité de l'énergie électrique, ainsi que les normes les régissant et les différentes solutions qui peuvent être envisagées dans le but d'améliorer cette dernière.

La qualité de l'énergie électrique concerne à la fois le producteur l'électricité, le transporteur, et le consommateur. Les trois parties étant liées par des contrats assurant d'une part continuité et stabilité des paramètres de la tension électrique, et d'autre part paiement des factures et préservation du bon état du réseau électrique. Ceci implique donc un compromis technico-économique où l'on veut à la fois avoir la meilleure qualité d'énergie électrique possible avec un minimum d'incidence financière. Ceci étant posé, nous avons vu au cours de ce chapitre les différents phénomènes dégradant la qualité de l'énergie électrique, ce qui engendre indéniablement des inconvénients affectant d'une part le producteur d'électricité qui doit, en dépit des défauts et perturbations touchant le réseau électrique, assurer une alimentation continue et stable en électricité, d'autre part le client dont, dans les cas les plus importants,

## Chapitre 1 : Les perturbations électriques affectant la qualité de l'énergie électrique

l'activité économique dépend de l'alimentation en électricité, dans ce cas une coupure d'alimentation en électricité veut dire, pour le client, perte de production et d'argent, de plus les perturbations électriques affectent, comme suscité, les équipements en dégradant leur durée de vie, impliquant par la suite des dépenses additionnelles, l'enjeu est donc de taille, l'importance d'améliorer la qualité de l'énergie électrique, et de remédier aux perturbations électrique se fait sentir, car en faisant ainsi on économise de l'argent de part et d'autre. En partant de ce fait, nous avons choisi la cimenterie de Meftah (SCMi) pour effectuer notre étude, en effet, une cimenterie constitue le sujet parfait pour notre étude car c'est un grand consommateur d'énergie électrique, mais aussi pour les équipements qui s'y trouvent (transformateurs, moteurs, convertisseurs...). Ainsi nous traiterons dans les chapitres qui suivent la qualité de l'énergie électrique dans la cimenterie de Meftah (SCMi), nous commencerons par un état des lieux puis un audit énergétique de la cimenterie, ceci fera l'objet du chapitre suivant.

**Chapitre 2 : Audit  
et diagnostic  
énergétique (Cas de  
la cimenterie de  
Meftah)**

## 1 Introduction

La production mondiale de ciment s'élevait, en 2001, à 1 692 millions de tonnes. En Afrique (5 % de la production mondiale), les principaux producteurs sont localisés en Afrique du Nord (65 %). En Asie (62 % de la production mondiale), la Chine domine le marché de production. En fait, l'évolution du marché est liée au niveau d'industrialisation du pays [15].

Ainsi, le niveau de production de ciment dans les pays industrialisés s'est globalement stabilisé depuis une dizaine d'années, et les fluctuations observées dépendent seulement d'aléas conjoncturels.

En revanche, la production de ciment dans les pays en développement s'est accrue, et continue à progresser en fonction de leur évolution économique.

La nécessité de réaliser des diagnostics énergétiques dans l'industrie cimentière est poussée par plusieurs facteurs et ceci dans le but d'identifier les éventuelles défaillances de consommation et mettre en œuvre des mesures d'économies d'énergie

- L'industrie cimentière est fortement consommatrice en énergie calorifique et électrique ainsi les besoins mondiaux en énergie électrique pour la fabrication du ciment sont estimés à 200 TWh/an ce qui représente 30 à 40% du prix de revient du ciment (hors frais d'amortissement) [15].
- L'industrie cimentière coûte très cher, une usine dont la capacité de production s'élève à 1 million de tonnes par an de ciment représente un investissement de l'ordre de 150 millions de \$US [15]. Ceci incite à rechercher des solutions d'amélioration des unités de production existantes plutôt que de créer une nouvelle ligne.

Dans le cadre de notre PFE et en collaboration avec l'APRUE (Agence pour la Promotion et la Rationalisation de l'Énergie électrique) nous avons effectué une étude de la consommation de l'énergie électrique au niveau de la cimenterie de Meftah (SCMi)

## 2 Présentation de la cimenterie de Meftah

La cimenterie de MEFTAH (wilaya de BLIDA) possède des installations pour une production moyenne de 1 million de tonne de ciment/an. Cette cimenterie produit un ciment aux ajouts de classe CPJ45.

Nom de cimenterie : : SCMi MEFTAH  
Date de mise en service : 1975

Matière première utilisée : Calcaire, Argile, Mi-fer, sable  
 Nom de constructeur : Kawazaki et SNCana, 125 T/h, voie sèche

## 2.1 Procédé de fabrication du ciment :

Pour la production du clinker on utilise le calcaire, l'argile et le minerai de fer comme matières premières avec différents dosages (selon le produit). Le ciment est obtenu après le broyage du clinker, du gypse, calcaire... la figure suivante illustre le procédé de fabrication;

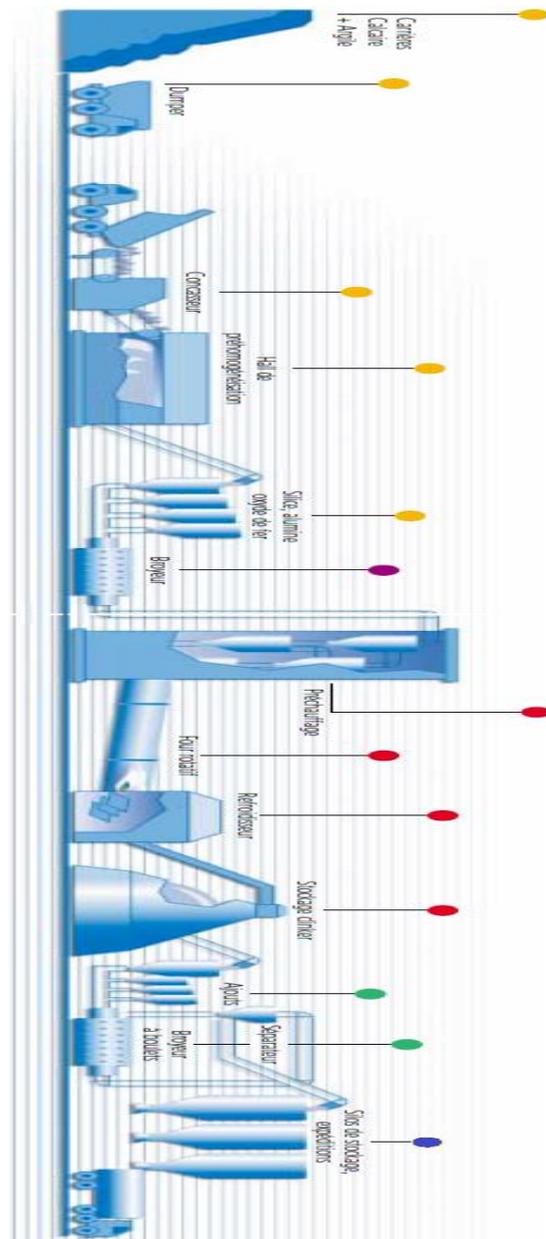


Figure 21 : Procédé de fabrication du ciment [16]

Légende :

- En jaune** : L'extraction et la préparation des matières premières
- En Violet** : Le séchage et le broyage
- En Rouge** : La cuisson
- En Vert** : Du clinker aux ciments
- En Bleu** : Les expéditions

### 2.1.1 Extraction et préparation des matières premières :

Les matières premières sont extraites des parois rocheuses d'une carrière à ciel ouvert par abattage à l'explosif ou à la pelle mécanique ou encore au bulldozer. La roche est reprise par des dumpers vers un atelier de concassage. Pour produire des ciments de qualités constantes, les matières premières doivent être très soigneusement échantillonnées, dosées et mélangées de façon à obtenir une composition parfaitement régulière dans le temps.

Mais si elle peut varier d'une cimenterie à l'autre en fonction de la qualité du gisement exploité, la composition du cru reste dans des proportions bien définies :

- Carbonate de calcium ( $\text{CaCO}_3$ ) : de 77 à 83 %
- Silice ( $\text{SiO}_2$ ) : de 13 à 14%
- Alumine ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) : de 2 à 4%
- Oxyde ferrique ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) : de 1,5 à 3 %

La roche est échantillonnée en continu pour déterminer la quantité des différents ajouts nécessaires (oxyde de fer, alumine et silice). Le mélange est ensuite réalisé dans un hall de pré-homogénéisation où la matière est disposée en couches horizontales superposées puis reprise verticalement [16].

### 2.1.2 Séchage et broyage :

Pour favoriser les réactions chimiques ultérieures, les matières premières doivent être séchées et broyées très finement (quelques microns) dans des broyeurs à boulets. Ensuite trois voies sont possibles : la voie humide, la voie sèche et la voie semi sèche. (La cimenterie de Meftah utilise la voie sèche) où les matières premières sont parfaitement homogénéisées et séchées lors de l'opération de broyage afin d'obtenir la farine. Celle-ci peut être introduite directement dans le four sous forme de pulvérulents.

### 2.1.3 La cuisson :

La cuisson se fait à une température voisine de  $1450^\circ\text{C}$  dans un four rotatif, long cylindre tournant et légèrement incliné.

La matière chemine lentement et se combine en venant à la rencontre de la source de chaleur,

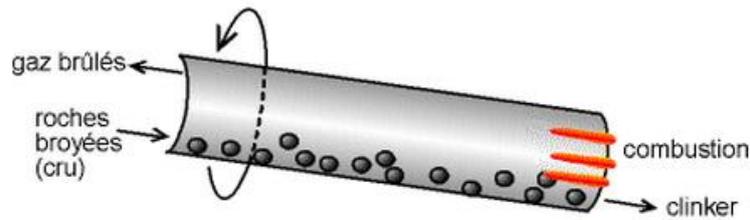


Figure 22 : Four à calcination rotatif incliné [17]

Pour améliorer le bilan thermique, on utilise en amont du four un échangeur thermique qui préchauffe le cru à environ 800°C.

Entre l'échangeur et le four, est quelquefois installé un brûleur supplémentaire assurant une « pré calcination », c'est à dire une décarbonatation partielle qui favorise les réactions ultérieures de clinkérisation et améliore la fiabilité de l'atelier de cuisson.

A la sortie du four, un refroidisseur à grille permet d'assurer la trempe des nodules incandescents et de les ramener à une température d'environ 100 degrés.

Tout au long de la cuisson, un ensemble de réactions physico-chimiques conduit à l'obtention du clinker :

- la décarbonatation du carbonate de calcium (calcaire) donne de la chaux vive,
- l'argile se scinde en ses constituants : silice et alumine qui se combinent à la chaux pour former des silicates et aluminates de chaux. Ce phénomène progressif constitue la clinkérisation [16].

#### 2.1.4 Transformation du clinker en ciment :

Pour obtenir un ciment aux propriétés hydrauliques actives, le clinker doit être à son tour broyé très finement. Ce broyage s'effectue dans des broyeurs à boulets. Les corps broyant sont constitués de boulets d'acier qui, par choc, font éclater les grains de clinker et amènent progressivement le ciment à l'état de fine farine, ne comportant que très peu de grains supérieurs à 40 microns [16].

A la sortie du broyeur, un ventilateur crée un cyclone qui sépare les éléments suffisamment fins des autres qui sont renvoyés à l'entrée du broyeur.

C'est également lors du broyage que l'on ajoute au clinker le gypse (3 à 5%).

### **2.1.5 Les expéditions :**

Acheminés vers les silos de stockage par transport mécanique, les ciments quittent l'usine en sacs ou en vrac.

Les sacs contiennent généralement 25 ou 50 kg de ciment et l'ensachage atteint fréquemment 100 tonnes par heure. Les sacs sont acheminés vers des palettiseurs qui constituent des palettes de 1500 kg transportées par camion. Le ciment livré en vrac constitue 70% de la production. Il est transporté par camion-citerne.

## **3 Analyse de la Consommation d'Énergie Electrique de la SCMI**

### **3.1 Alimentation et réseau électrique de distribution :**

La Société des ciments de la Mitidja « SCMI » est alimentée par deux lignes aériennes de 60kV de venant de deux postes différents. La première ligne vient directement à partir du poste de l'ARBAA, la deuxième ligne, de secours, arrive d'ARBAA EST.

La SCMI est Abonnée au fournisseur d'énergie électrique (Sonelgaz) avec un contrat d'abonnement au tarif 31 pour une PMD de 25 MW.

La puissance appelée par la cimenterie est délivrée par deux transformateurs, d'une puissance de 30 MVA et 26,6MVA et de tension 60KV/5,5KV. La moyenne tension 5,5 KV est acheminée vers les sous stations de distribution (au total il existe 14 départs) comme le montre la figure ci-dessous.

L'usine est composée de 4 zones :

- La zone cru
- La zone four
- La zone ciment
- La zone expédition

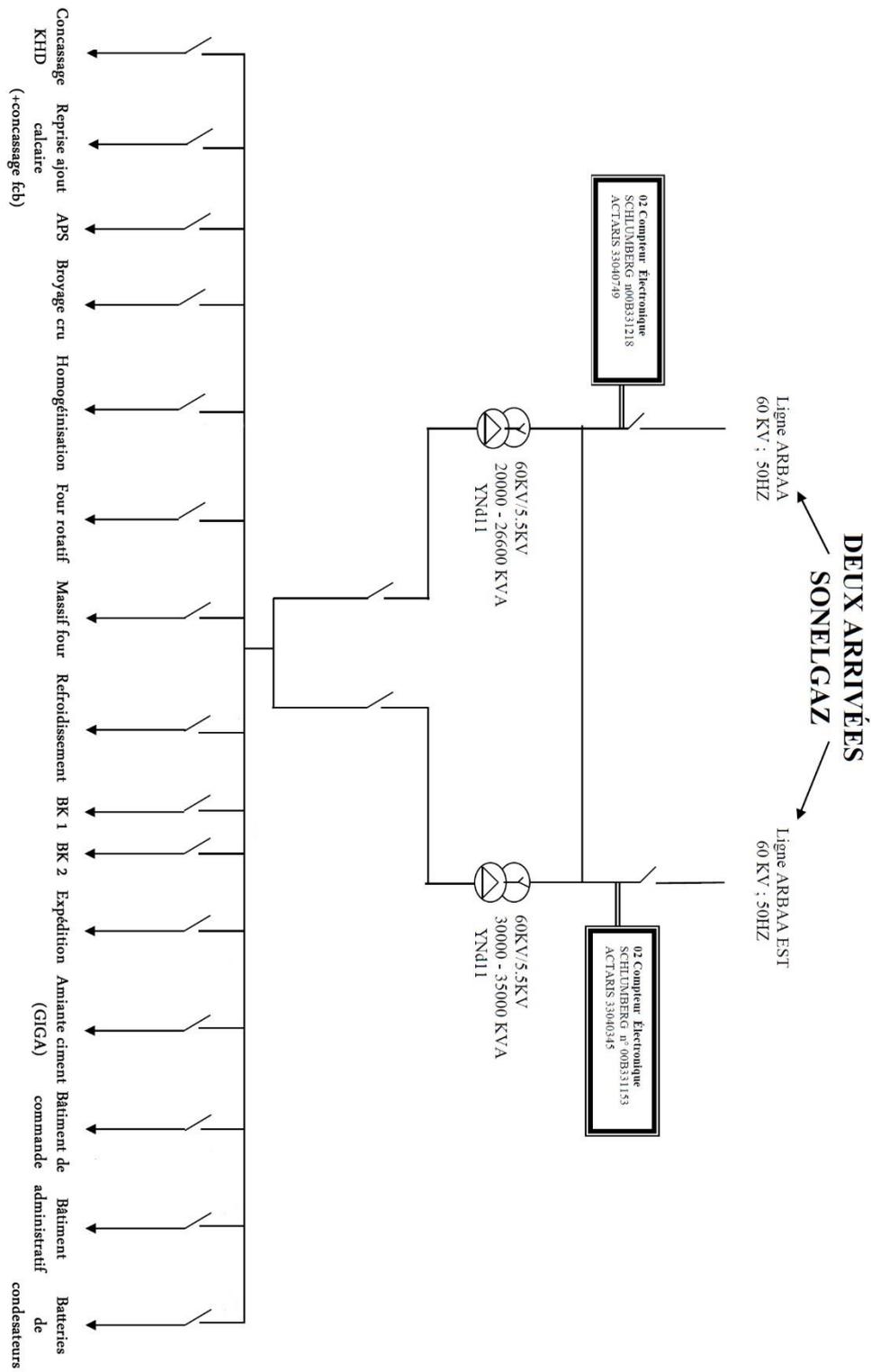


Figure 23 : Schéma synoptique de la cimenterie de MEFTA H

### 3.2 Poste principal :

Caractéristiques Techniques :

Marque	SIEMENS	France transfo
Puissance nominale	30 000 kVA	26600 kVA
Rapport de transformation	63 kV / 5,5 kV	60 kV / 5,5 kV
Couplage	YNd11	YNd11
Pertes à vide	16 000 W	
Pertes en court-circuit	174000 W	
Pertes Totales à 30 MVA	190 000 W	
Fréquence nominale	50 Hz	50 Hz

Tableau 3-1 : Caractéristiques des transformateurs d'arrivée

L'usine fonctionne avec les 2 transformateurs (principal et secours), cependant durant notre stage elle est alimentée uniquement avec le transformateur principal, le transformateur de secours de 30/35MVA est actuellement à l'arrêt (problème technique), le primaire (60KV) est alimenté le secondaire (5,5KV) est débranché.

### 3.3 Réseau et jeux de barres MT/5,5 KV (P1 à P19)

Le jeu de barres MT alimente les cellules P0 de départs vers les sous stations, à savoir :

- P1 : Concassage KHD
- P2 : Broyage cru
- P3 : Amiante ciment (GICA)
- P4 : Homogénéisation
- P5 : Broyage ciment (2)
- P6 : Expédition + Ensachage
- P7 : A.P.S precrushing
- P8 : Poste reprise ajout calcaire (+ concassage fcb)
- P9 : Four rotatif
- P10 : massif four
- P11 : zone bâtiment de commande
- P12 : Refroidisseur
- P13 : Broyeur ciment 1
- P14 : Bâtiment administratif
- P15 : 03 Batteries de compensation 3\*180 kVAR

La commande des disjoncteurs HT/MT est assurée par des batteries d'accumulateurs 110V branchées sur un chargeur secouru.

### 3.4 Equipements des ateliers :

#### **P1 concassage KHD :**

- Un transformateur MT/BT (5,5 kV/0,38 kV) de S=1000KVA (les caractéristiques et les équipements voir annexes)
- Un moteur « MT » pour le concasseur Sud de P = 1000KW
- Un moteur « MT » pour le concasseur Nord de P = 1000KW
- Une batterie de compensation MT de Q = 133KVAR pour le concasseur sud
- Une batterie de compensation MT de Q = 133KVAR pour le concasseur nord

#### **P2 Broyage cru :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1250KVA
- Un transformateur MT/BT de S= 630KVA
- Un moteur « MT » de P = 530KW
- Un moteur « MT » de P = 700KW
- Un moteur « MT » de P = 4000KW
- Un moteur « MT » de P = 320KW
- Quatre batteries de compensation (120 kVA et 200 kVA 2\*540)

#### **P3 Amiante ciment (GICA) :**

- Deux transformateurs MT/BT de S= 1250KVA chacun
- Un transformateur MT/BT de S= 6300KVA
- Un transformateur MT/BT de S= 500KVA

L'usine amiante ciment est à l'arrêt, ce poste alimente seulement le bloc (siège) du groupe GICA.

#### **P4 Homogénéisation :**

- Transformateur MT/BT de 1600kVA

#### **P5 Broyage ciment (2) :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1600KVA
- Un moteur MT de P = 400KW
- Un moteur MT de P = 3300KW
- Une batterie de compensation MT de Q = 900KVAR

#### **P6 Expédition + Ensachage :**

- Transformateur MT/BT de 1600kVA

#### **P7 A.P.S precrushing :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1600KVA
- Un moteur MT de P = 900KW
- Un moteur MT de P = 2000KW
- Une batterie de compensation MT de Q = 840KVAR
- Une batterie de compensation MT de Q = 250KVAR

#### **P8 Poste reprise ajout calcaire (+ concassage fcb) :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1600KVA
- Un transformateur MT/BT de S= 630KVA
- Deux moteur MT de P = 400KW chacun

**P9 Four rotatif :**

- Deux transformateurs MT/BT 1600kVA chaque un
- Un transformateur MT/BT 1000kVA

**P10 massif four :**

Ventilateur fumée :

- Deux transformateurs MT 2150KVA
- Deux moteurs (3,3) kV de 1600kW

Préchauffeur :

- Un transformateur MT/BT de 1600 kVA
- Un transformateur MT/BT (5,5V /0,69V) de 1000kVA
- Un moteur de 500 kW (0,69 kV)

Filtre IMASA « filtre électrostatique » :

- Un transformateur MT/BT de 1600kVA
- Un moteur de 650 kW (5,5 kV)
- Batterie de condensateur MT (290 kVAR)

**P11 Zone bâtiment de commande :**

- Deux transformateurs MT/BT (5,5V/0,4V) de 1600kVA
- Transformateur MT/BT (5,5V/0,69V) de 1000kVA

**P12 Refroidisseur :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1250 kVA
- Un transformateur MT/BT de S= 1600 kVA
- Deux moteur MT de P = 250 kW chacun
- Un moteur MT de P= 200 kW

**P13 Broyeur ciment 1 :**

- Un transformateur MT/BT de S= 1600KVA (diélectrique à ASKAREL)
- Un moteur MT de P = 3300KW chacun
- Un moteur MT de P = 400KW
- Une batterie de compensation MT de Q = 900KVAR

**P14 Bâtiment administratif :**

- Deux transformateurs MT/BT de 400kVA

**P15 Les alimentations de secours et groupes électrogènes :**

La cimenterie dispose actuellement de :

- Chargeurs et batteries d'accumulateurs 110V pour les manœuvres des disjoncteurs HT, MT
- Groupe électrogène de secours d'une puissance P=1580 KVA pour les installations sensibles ou vitales telles que le bâtiment de commande.

## 4 Analyse des données de consommation

### 4.1 Campagne de mesures :

La nécessité de connaître la quantité d'énergie électrique et la façon dont elle est consommée nous a poussés à faire une campagne de mesure électrique le 01 mars 2015 aux niveaux des différents départs de la SCMI (station P<sub>0</sub>).

Les paramètres mesurés sont la tension, le courant, la puissance active, puissance réactive, facteur de puissance. Et ceci plusieurs fois dans la journée pour ainsi connaître l'évolution suivant le temps de la consommation de l'énergie électrique sur la journée du 01 mars 2015.

Cela dit, comme la cimenterie reste en service 24h/24, nous avons voulu étendre nos mesures sur 24h pour ainsi juger la consommation de la cimenterie sur toute la journée, mais nous nous sommes trouvés dans l'impossibilité de faire cela à cause des restrictions quant à l'accès à la cimenterie dans les heures tardives.

Les relevés sont effectués à l'aide d'instruments de mesure et de surveillance « SEPAM – Schneider »



Figure 24 : Sepam séries 20 – Schneider -

Les points de mesure sont présentés sur la figure suivante :

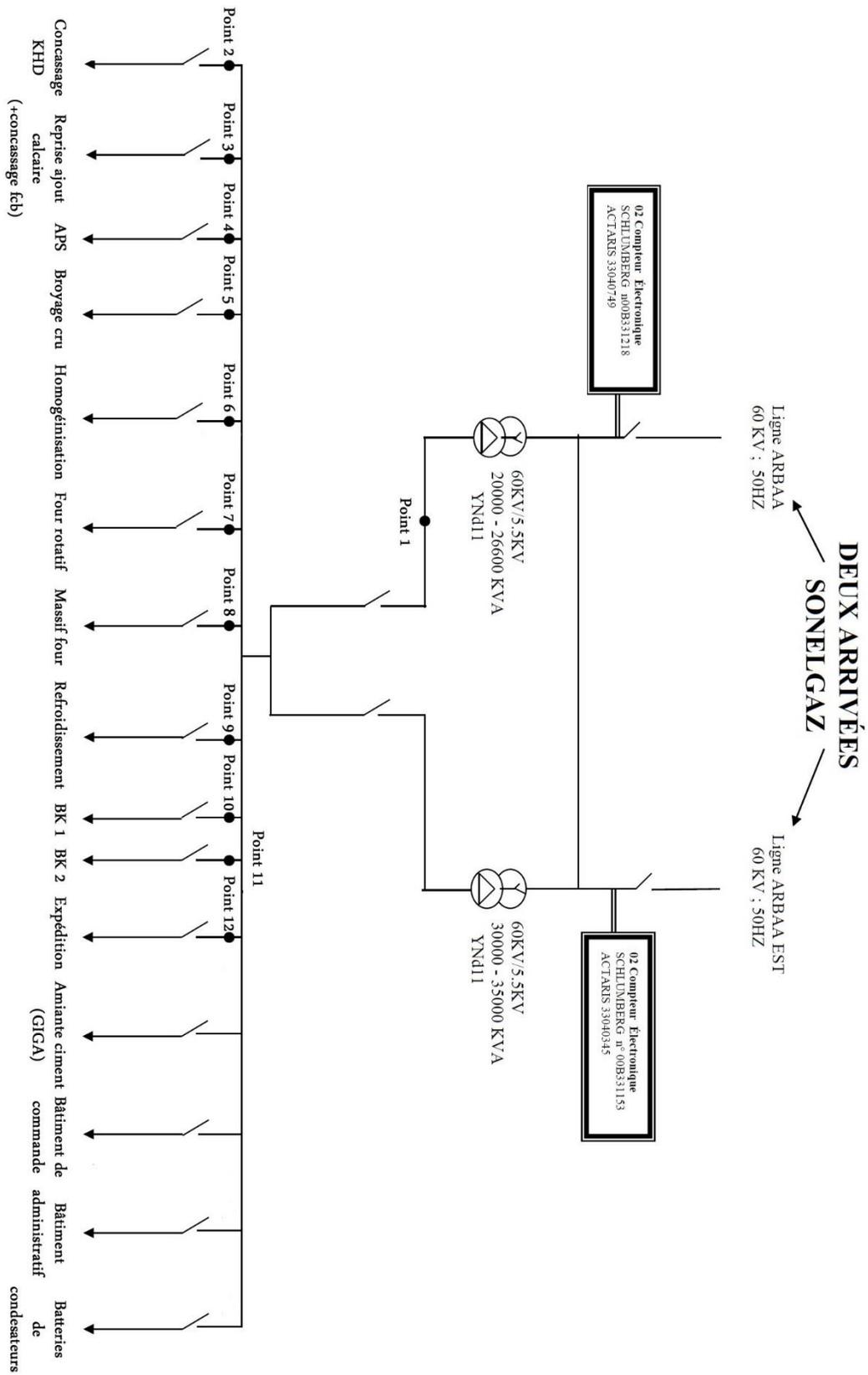


Figure 25 : Points de mesure

Les résultats des mesures sont présentés sur les figures ci-dessous,

#### 4.1.1 Réseau HT/60 KV :

Les mesures ont été effectuées au point 1 de la Figure 25, les résultats sont illustrés sur les graphiques suivants.

##### Arrivée TR2 depuis 811TF 02 :

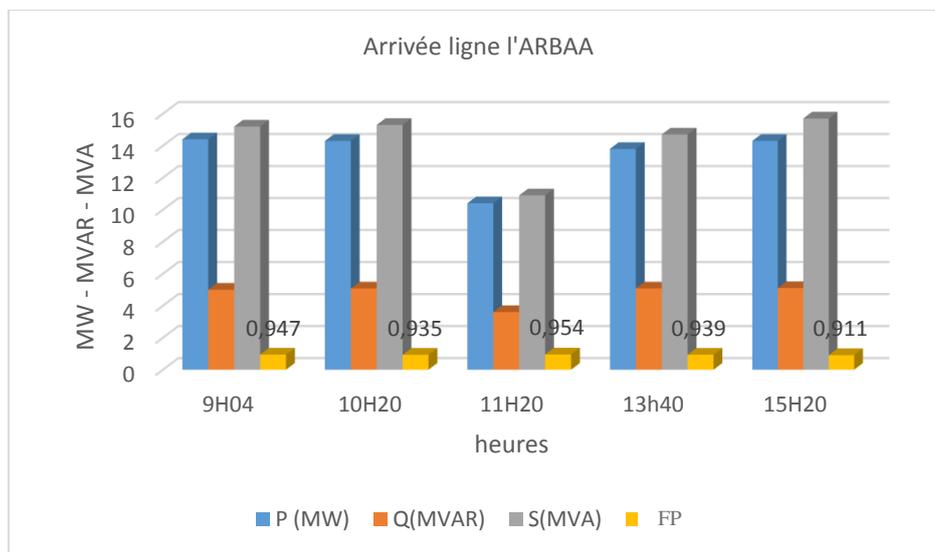


Figure 26 : Résultats campagne de mesure (arrivée)

Nous remarquons une variation (10,9 MW à 15,7 MW) de la puissance appelée par la cimenterie ainsi qu'un bon facteur de puissance.

##### Taux de distorsion Harmonique :

- En tension :

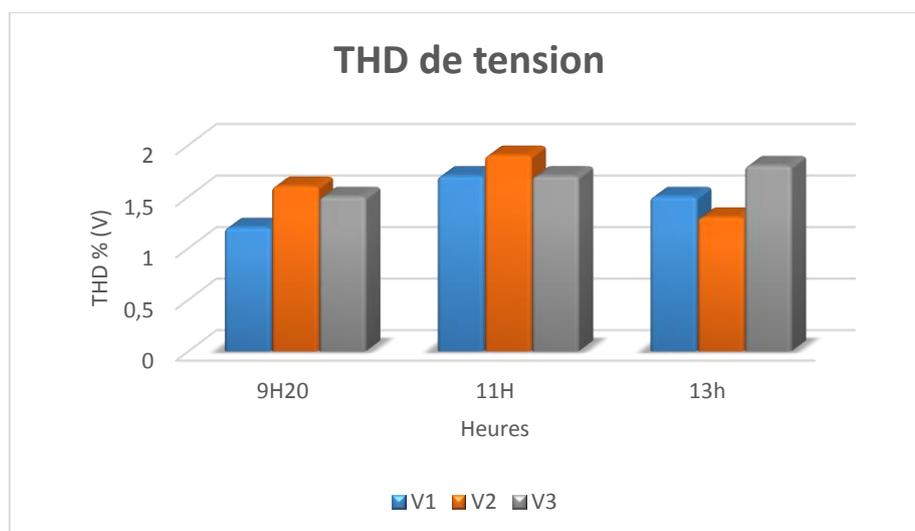


Figure 27 : Résultats campagne de mesure (THD V)

## Chapitre 2 : Audit et diagnostic énergétique d'une cimenterie (Cas de la cimenterie de Meftah)

Nous remarquons un taux de distorsion harmonique qui varie selon la phase, et selon l'heure de la mesure, ainsi pour la phase 1 le THD<sub>v</sub> était de 1,5% à 11h20, ce qui est le double de ce qu'il était à 9h20, cependant et sachant que le poste en question est le poste d'arrivée (60 kV) il est donc impossible d'effectuer des mesures approfondies en utilisant les instruments de mesure à notre disposition.

- En courant :

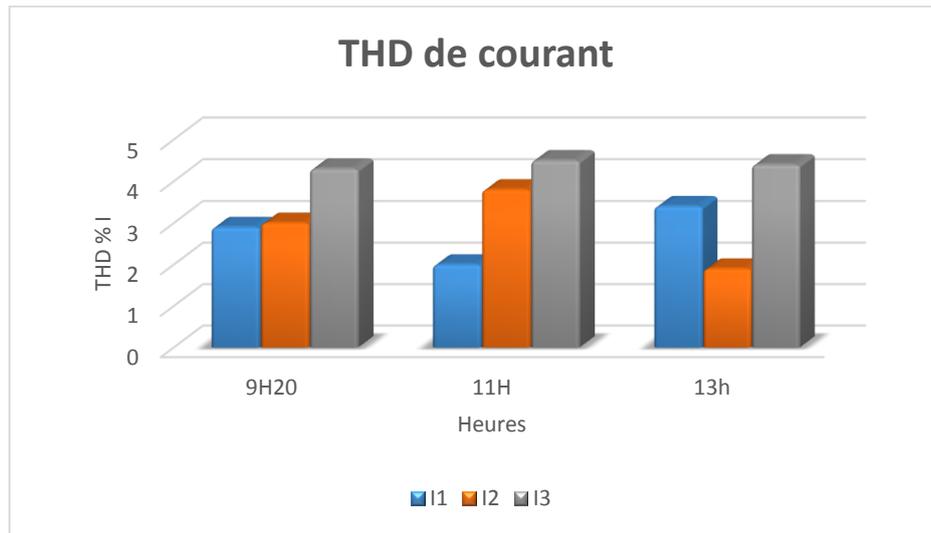


Figure 28 : Résultats campagne de mesure (THD A)

Pour le taux de distorsion harmonique en courant, nous remarquons une forte variation de ce taux entre chaque phase.

En l'absence d'instruments de mesure adéquats nous restons dans l'impossibilité d'effectuer des mesures approfondies.

#### 4.1.2 Zone Cru :

##### Concassage KHD :

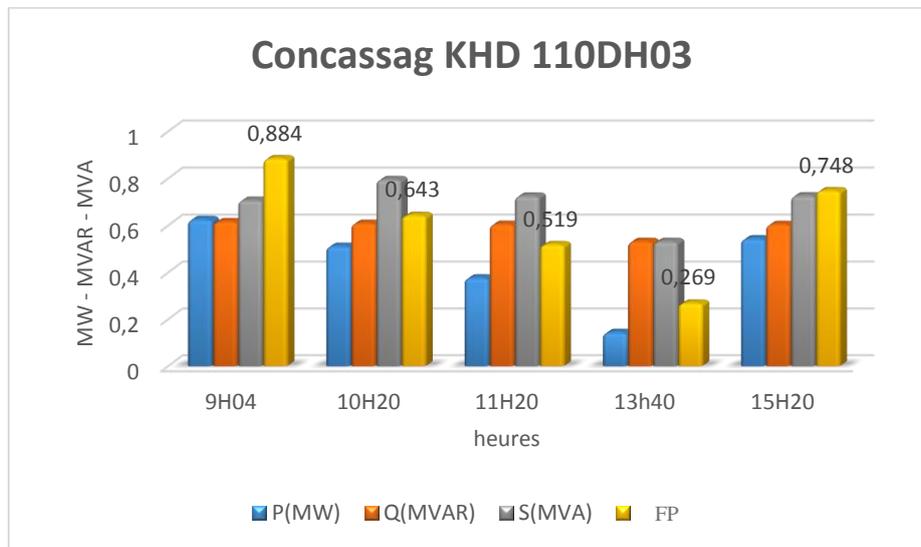


Figure 29 : Résultats campagne de mesure (concassage KHD)

Nous avons effectué ces mesures au point 2, nous avons remarqué une variation de la puissance apparente avec un pic à 10H20 de 795 kW ainsi qu'un faible facteur de puissance.

Nous remarquons aussi qu'à 13h40 la majeure partie de cette puissance est une puissance réactive.

Le faible facteur de puissance est dû en grande partie à l'absence de batteries de compensation. Nous expliquons qu'à 13h40 la majeure partie de la puissance apparente est une puissance réactive par le fait que les convoyeurs à bandes fonctionnent à vide.

*Ajout calcaire :*

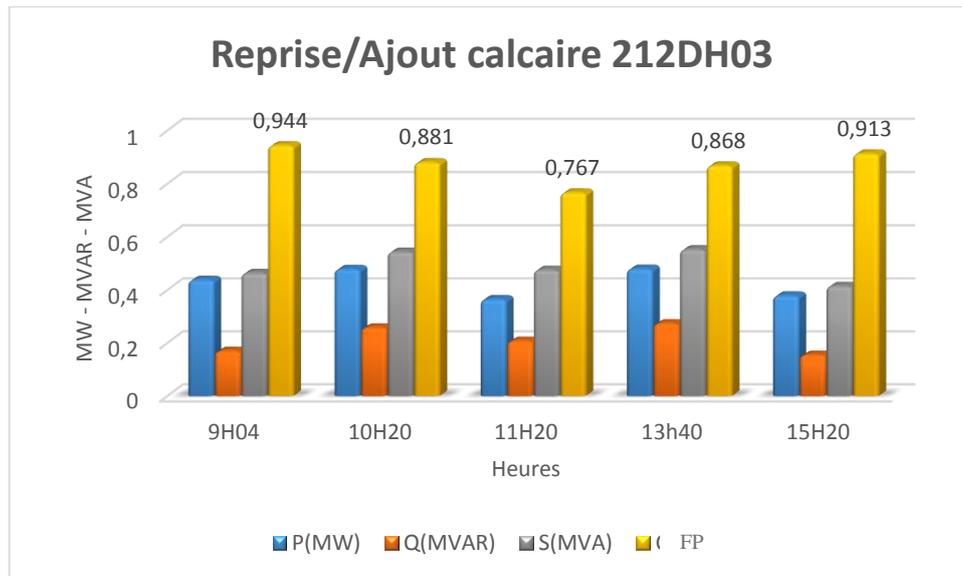


Figure 30 : Résultats campagne de mesure (reprise/ajout)

Ces mesures ont été effectuées au point 3, nous remarquons une consommation stable ainsi qu'un assez bon facteur de puissance.

Ce bon facteur de puissance est dû à la présence de batteries de compensation.

*APS Precrushing :*

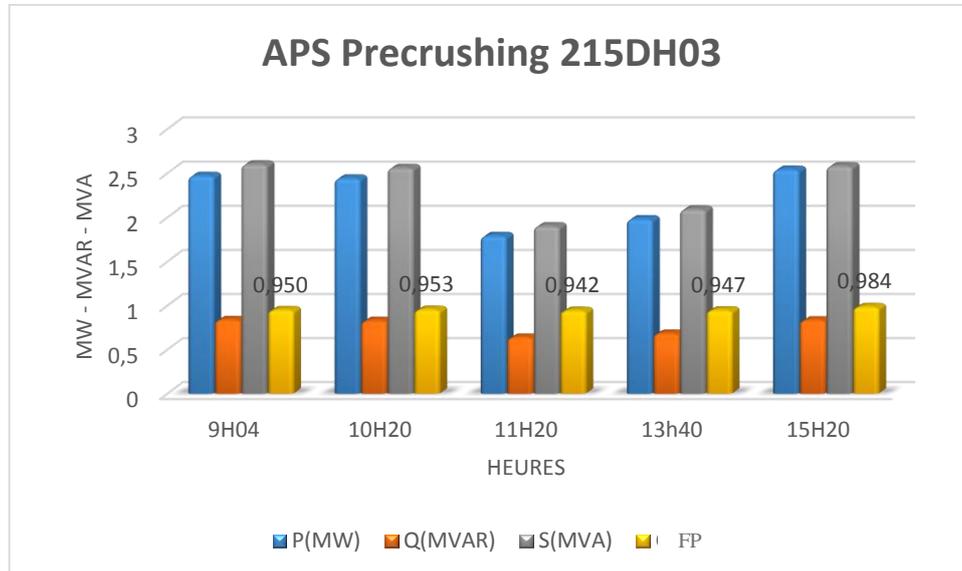


Figure 31 : Résultats campagne de mesure (APS)

Les mesures concernant cet atelier ont été faite au point 4, Ce dernier a donc une consommation autour de 1,8 MW à 2,5 MW avec un bon facteur de puissance.

Le bon facteur de puissance s'explique par l'existence de batteries de compensation

*Broyage cru :*

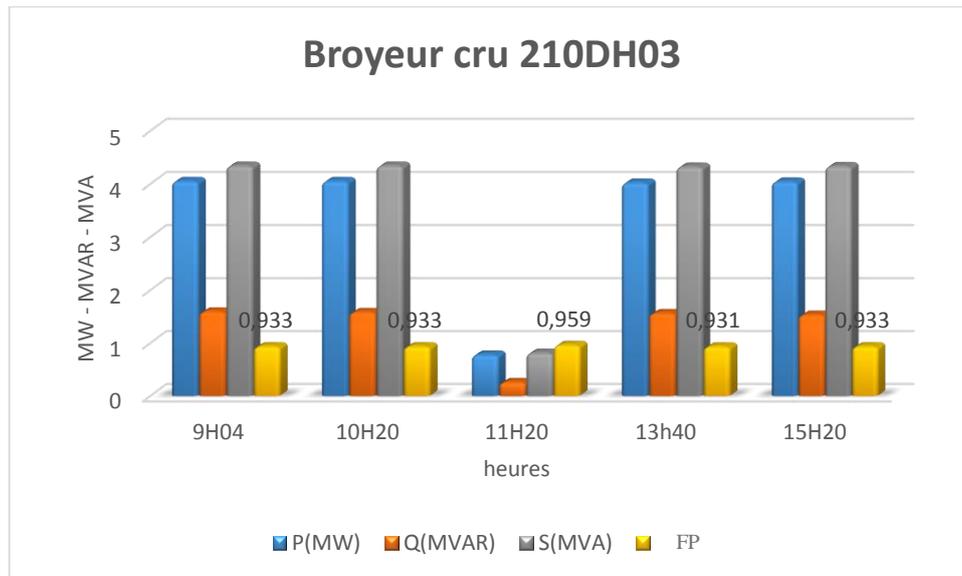


Figure 32 : Résultats campagne de mesure (Broyeur cru)

L'atelier du broyage cru représente un atelier énergivore (plus de 4 MW), les mesures concernant cet atelier ont eu lieu au point 5.

Comme pour l'atelier (Reprise/Ajout), l'atelier broyage cru a une consommation assez stable mis à part à 11H20 où nous remarquons une baisse significative de la consommation (de 4 MW à 800 kW).

Notons aussi le bon facteur de puissance de cet atelier.

La baisse de la consommation enregistrée à 11h20 est due à l'arrêt du broyeur qui est lui-même dû au remplissage du silo, tandis que le bon facteur de puissance revient à l'existence de batterie de compensation pour cet atelier.

*Homogénéisation :*

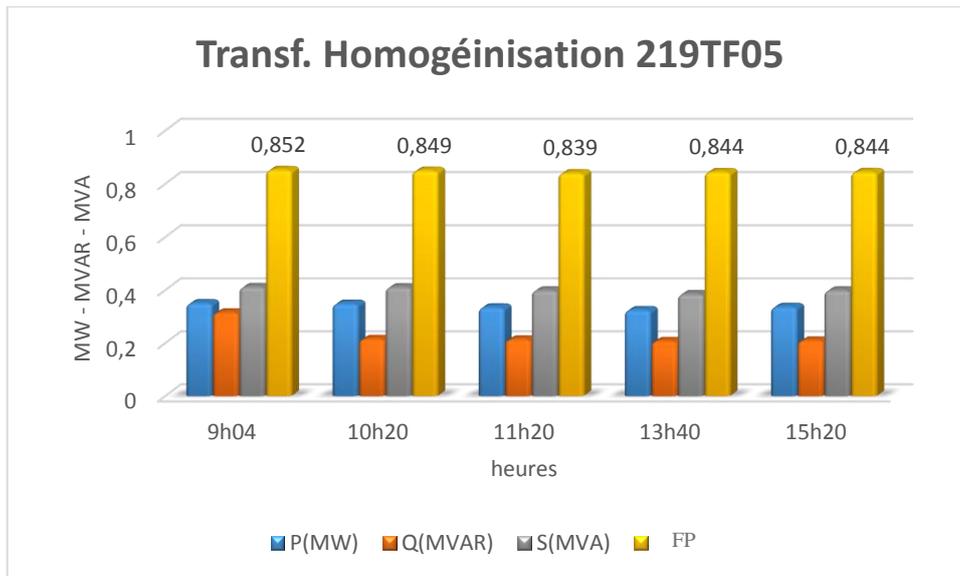


Figure 33 : Résultats campagne de mesure (Homogénéisation)

Au cours de nos mesures, nous avons pu constater que l'atelier Homogénéisation a une consommation constante d'énergie et un facteur de puissance stable. Notons que les mesures ont été effectuées au point 6.

**4.1.3 Cuisson :**

*Four rotatif :*

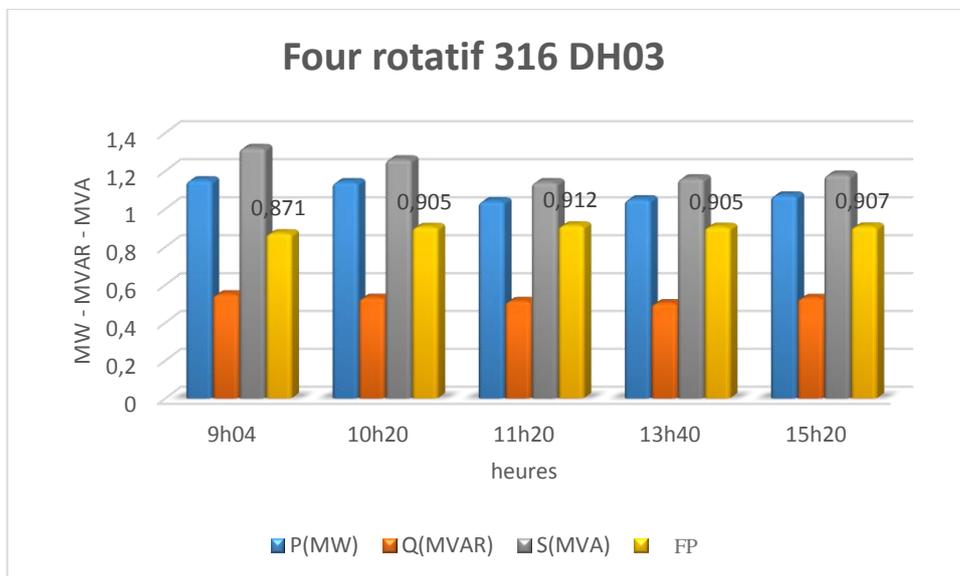


Figure 34 : Résultats campagne de mesure (four rotatif)

L'atelier du four rotatif est un gros consommateur d'énergie (autour de 1,2 MW), la mesure a eu lieu au point 7 et nous remarquons bien que le facteur de puissance est bon.

*Massif four :*

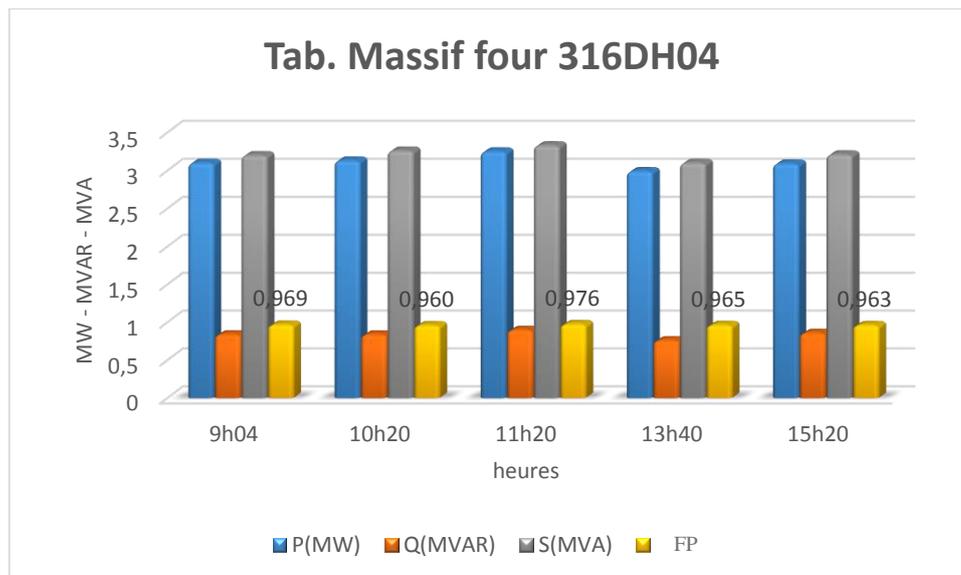


Figure 35 : Résultats campagne de mesure (massif four)

Cet atelier est le 2<sup>ème</sup> plus grand consommateur d'énergie électrique de l'usine avec une consommation avoisinant les 3MW, pour cet atelier le facteur de puissance est élevé.

*Refroidisseur :*

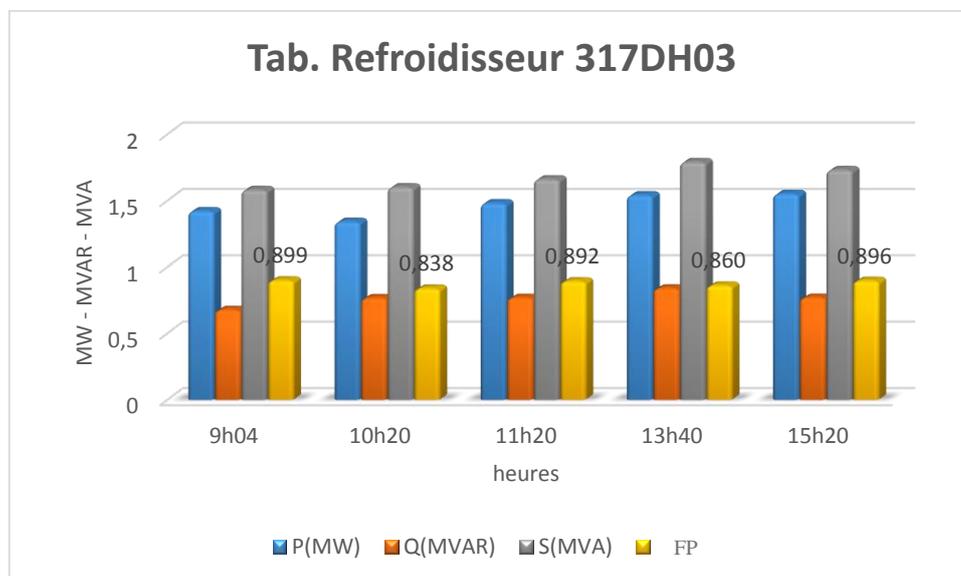


Figure 36 : Résultats campagne de mesure (refroidisseur)

Pour cet atelier la consommation varie de 1,58 MW à 1,79 MW, c'est donc une consommation assez constante, nous remarquons aussi un bon facteur de puissance.

**4.1.4 Ciment :**

**BK1 :**

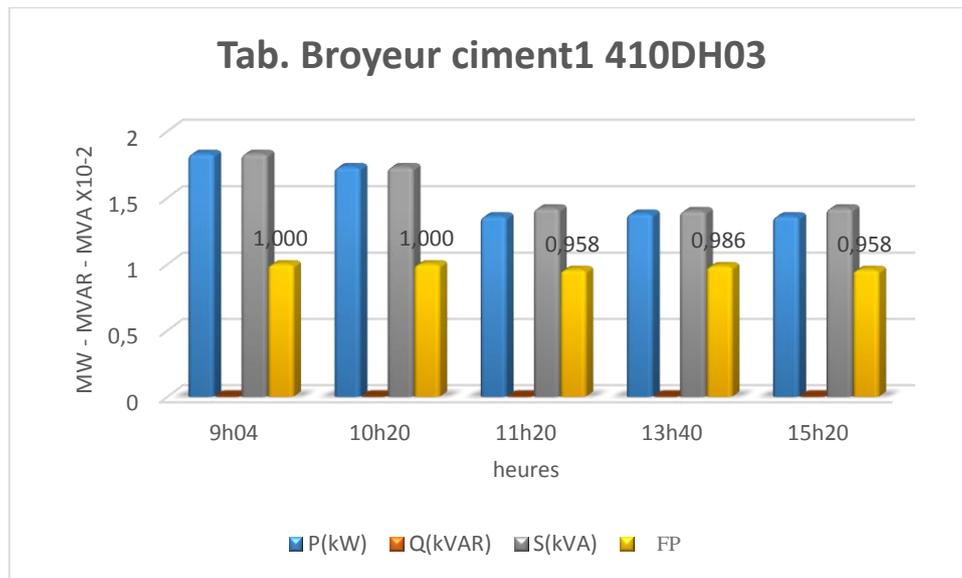


Figure 37 : Résultats campagne de mesure (BK1)

Nous remarquons pour l'atelier broyeur ciment 1 une consommation relativement faible et un facteur de puissance presque égal à 1 et ceci car le moteur du broyeur était à l'arrêt.

**BK2 :**

Le broyeur ciment BK2 était à l'arrêt.

**4.1.5 Expédition :**

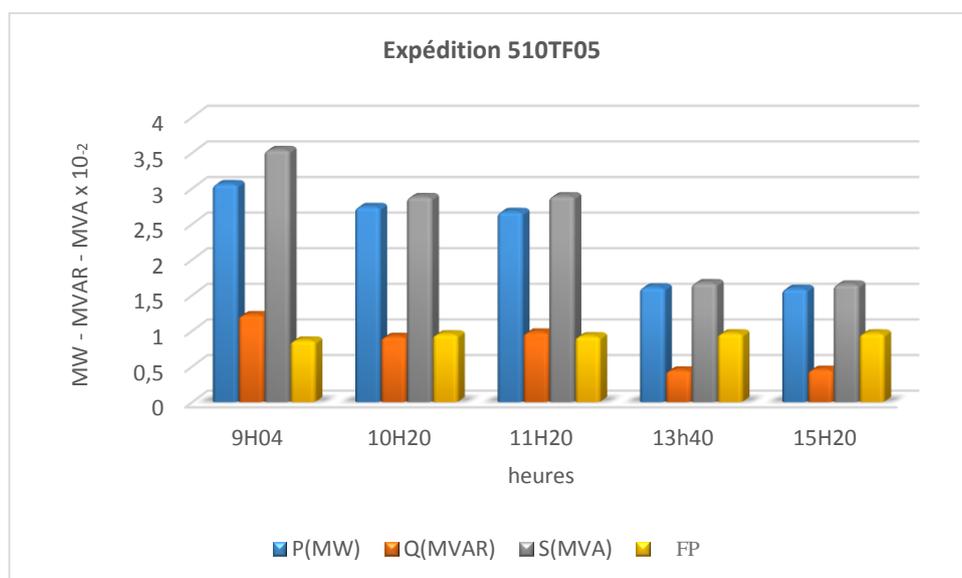


Figure 38 : Résultats campagne de mesure (expéditions)

Concernant l'atelier expédition on remarque une forte variation de la charge électrique, ce qui est normal car la charge électrique dépend de la fréquence d'ensachage ainsi que de l'approvisionnement en ciment pour les clients « semi-remorques ».

D'après les mesures effectuées au niveau de la cimenterie, les charges électriques des sous stations « ateliers » se répartissent comme suit :

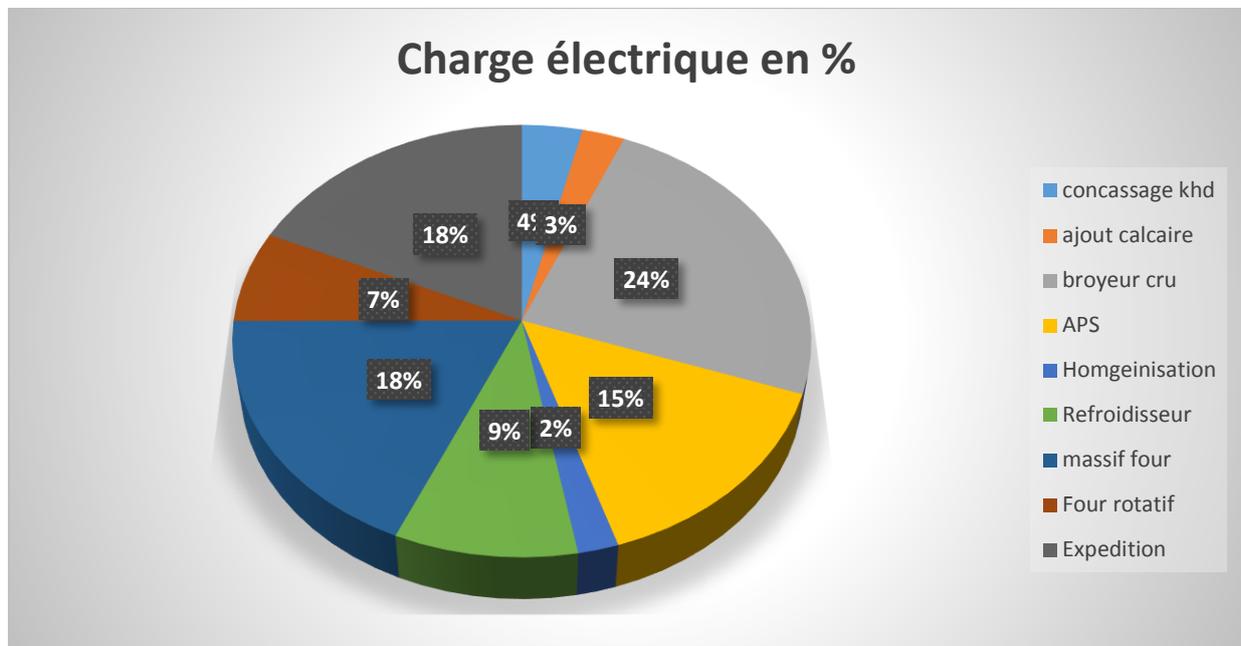


Figure 39 : Charge électrique des sous stations en %

#### 4.2 Consommation en fonction de la production :

Dans cette partie nous abordons la consommation de l'énergie électrique en fonction de la production, il y'aura donc la consommation en fonction de la farine « produit de la zone cru » en fonction du clinker « produit de la zone cuisson » et en fonction du ciment « produit de la zone ciment ».

Cette analyse sur les trois dernières années, à savoir 2012 2013 et 2014, est schématisée sur les figures suivantes :

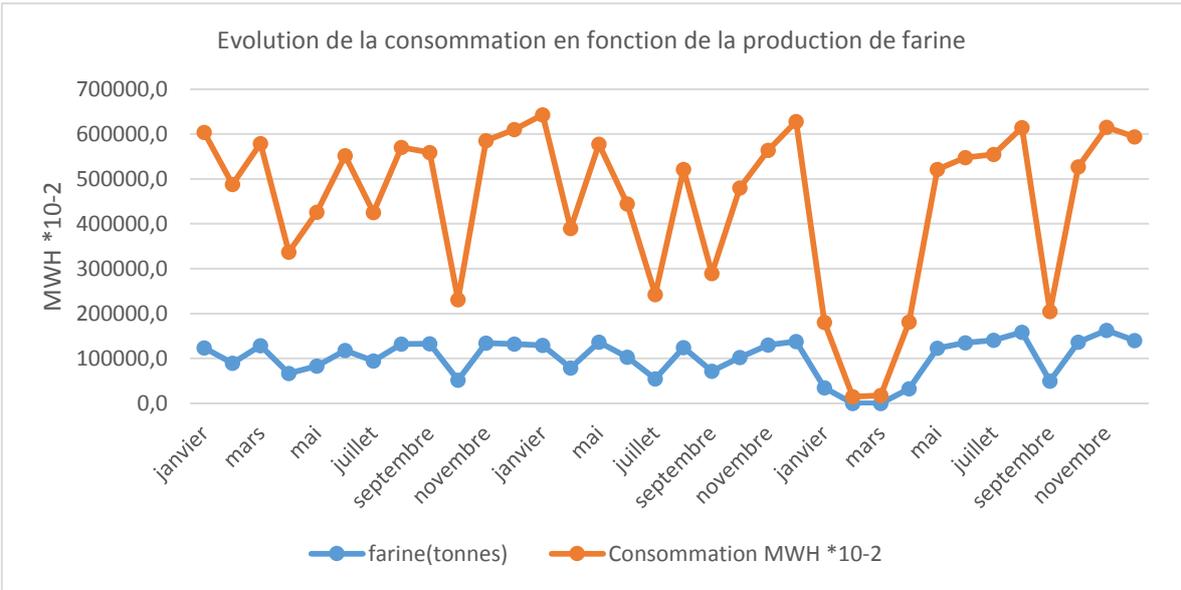


Figure 40 : Evolution de la consommation en fonction de la production de farine

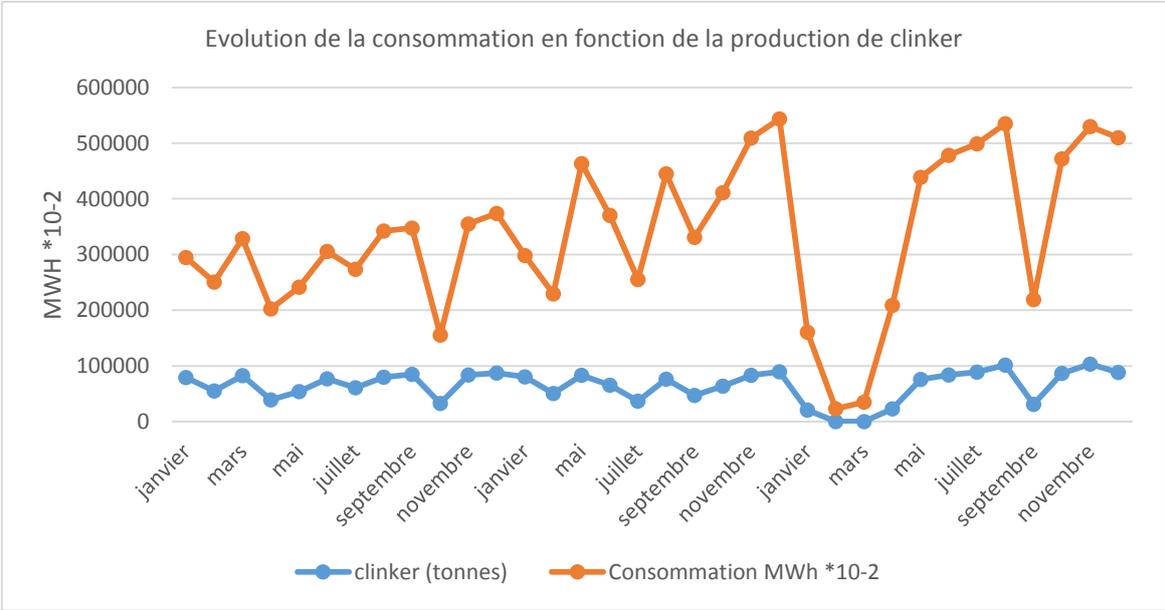


Figure 41 : Evolution de la consommation en fonction de la production de clinker

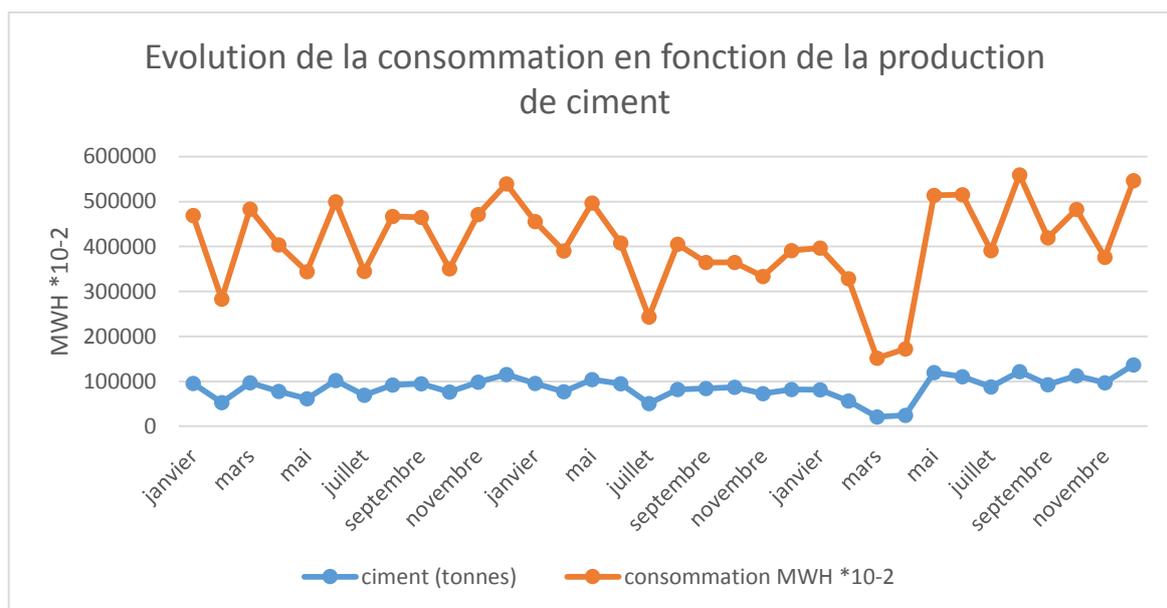


Figure 42 : Evolution de la consommation en fonction de la production de ciment

En analysant ces données on remarque bien que d'une part la consommation d'énergie électrique varie fortement sur ces trois dernières années mais d'autre part cette consommation suit la courbe de la production et ceci pour les trois produits « farine-clinker-ciment ».

Cependant ce qui est frappant c'est que même lorsque l'atelier est à l'arrêt, il subsiste une consommation d'énergie électrique, ce fut le cas pour le mois de mars 2014 où on a une production de farine et de clinker nulle alors que leurs consommations sont respectivement de 175MWh et 348MWh.

#### 4.2.1 Répartition de la consommation électrique :

Théoriquement la consommation électrique des cimenteries se repartie comme suit :

- Préparation de la matière 30% (concassage – broyage cru).
- Production de clinker 30% (four-appareils annexes).
- Production du ciment 40% (broyage ciment). [19]

Dans le cas de notre étude de la cimenterie de Meftah et en prenant comme exemple l'année 2014 nous avons constaté une consommation repartie comme suit :

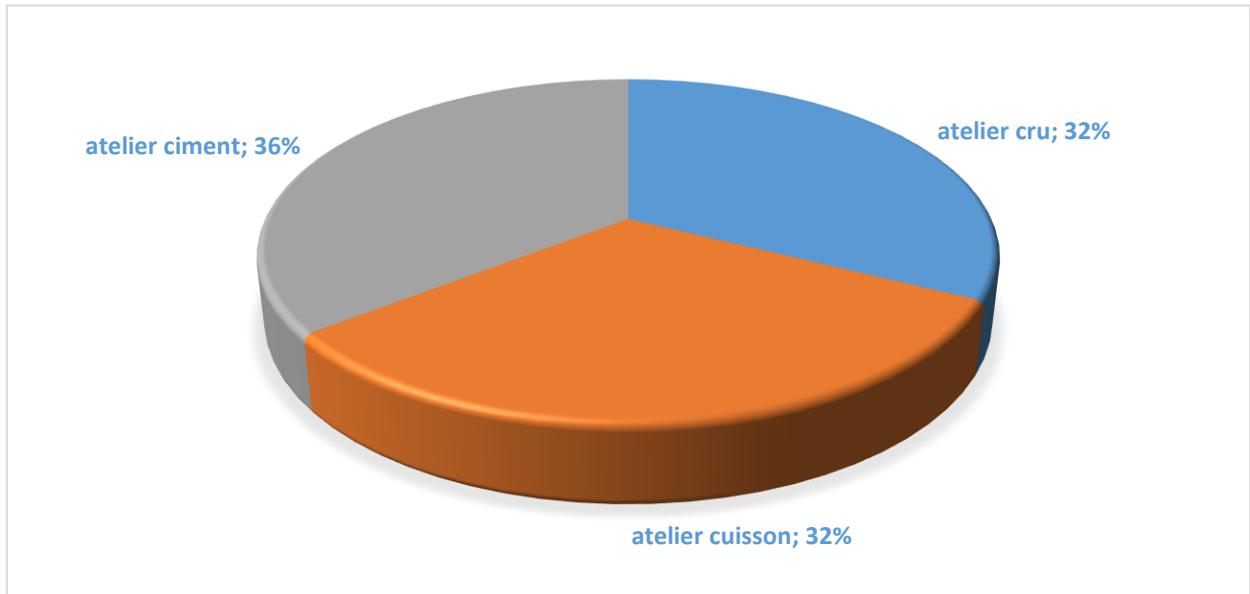


Figure 43 : Répartition de la consommation électrique

Nous remarquons :

- 32 % de la consommation pour l'unité « atelier cru » (préparation de la matière) ce qui est légèrement au-dessus de la moyenne nationale.
- 32 % pour l'unité « cuisson » (Production de clinker) ce qui est également légèrement au-dessus de la moyenne nationale.
- 36 % pour l'unité « ciment » (Production du ciment) ce qui est inférieur à la moyenne nationale.

#### 4.2.2 Comparaison avec la consommation en Allemagne :

En prenant comme exemple l'année 2014 nous obtenons une consommation moyenne de 126,62 kWh/tonne de ciment produit, ce qui est supérieur à la consommation spécifique. (110kWh/tonne produite) de ciment en Allemagne [18].

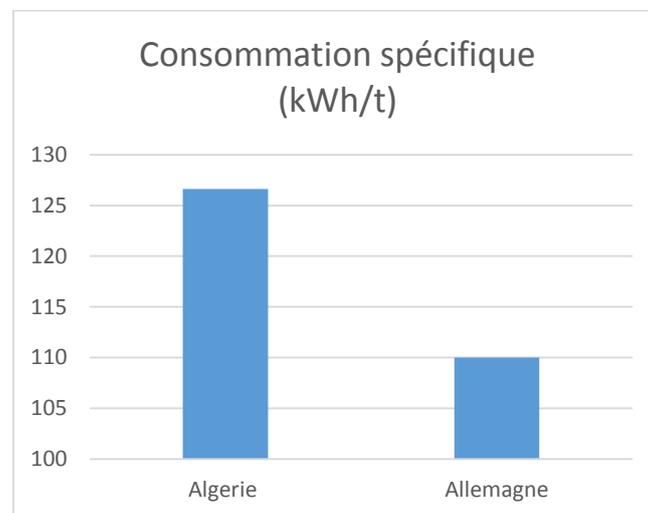


Figure 44 : Consommation spécifique (kWh/t)

En sachant que la production de ciment durant l'année 2014 a atteint 1063312,51 tonnes on peut estimer qu'il y a un dépassement de consommation de :

- 17677,62MWh (13% de la consommation globale) ;
- Ceci représente près de : 1520 tep « tonne équivalent pétrole ».

Sachant qu'en Algérie la consommation moyenne d'électricité par habitant est de 1091 kWh (2011) [20], le dépassement de consommation de la cimenterie par rapport aux cimenteries Allemandes pourrait alimenter :

- 16203 habitants ;
- 3240 habitations approximativement (en prenant 5 personnes par habitation).

Nous recommandons donc une étude des différents ateliers dans le but de prendre des mesures d'économie d'énergie et de rejoindre ainsi la consommation moyenne de l'industrie du ciment en Allemagne.

### 4.3 Pertes dans le transfo d'arrivée :

Comme cité plus haut, durant notre stage à la cimenterie (qui a duré quatre mois), on a constaté que la cimenterie était alimentée avec un seul transformateur « France transfo 26600 kVA » et ceci à cause d'un dysfonctionnement sur le disjoncteur du deuxième transformateur « siemens 30000 kVA», cependant ce dernier transformateur « siemens » n'était pas complètement déconnecté « primaire connecté et secondaire déconnecté » ceci implique des pertes.

#### 4.3.1 Evaluation des pertes :

Les pertes totales d'un transformateur sont égales à la somme des pertes dues à la charge ( $w$ ) et des pertes à vide ( $P_v$ ).

Le graphique ci-dessous représente les pertes théoriques d'un transformateur alimentant la sous station principale de la Cimenterie de Ain-Touta d'une puissance nominale  $S_N = 30$  MVA. Notons qu'on a choisi ce transformateur parce qu'il est de même puissance que le transfo de la cimenterie de Meftah.

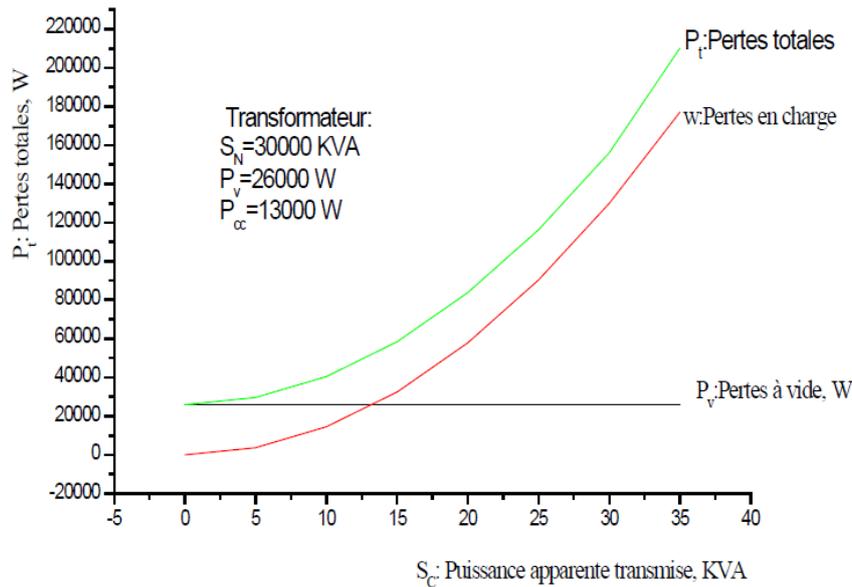


Figure 45: Représentation graphique des pertes d'un transformateur principal de la sous station principale de la cimenterie de Ain-Touta de puissance de 30 MVA [20]

Selon la plaque signalétique, les pertes à vide du transfo sont de :

$P_v = 16000 \text{ W}$  et comme le transfo fonctionne 24h/24h 7j/7j donc ça nous donne

$W_{vt/j} = 16000 * 24 = 384000 \text{ Wh}$

$W_{vt} = W_{vt/j} * \text{Nombre de jours} = 384000 * 120 = 46080 \text{ kWh}$

$P_v$  : Pertes à vide du transfo en kW

$W_{vt/j}$  : Pertes à vide du transfo sur une journée kWh

$W_{vt}$  : Pertes à vide du transfo sur la période de : 01/02/2015 jusqu'à 31/05/2015

### 4.3.2 Coûts des pertes :

Comme la cimenterie est abonnée au tarif 31 on aura donc le coût moyen du kWh au prix « Décembre 2005 » :

$$C_{moy} = \frac{113,85 (12,5) + 550,71 (4) + 49,19 (7,5)}{24 * 100} \quad (\text{II.1})$$

$$C_{moy} = 1,66 \text{ DA/KWh}$$

Donc ces pertes auront comme coûts :

$$C = W_{vt} * C_{moy} \quad (\text{II.2})$$

$$C = 76\,492,8 \text{ DA}$$

D'autre part ces pertes représentent  $W_{Tep} = 3.96 \text{ tep}$ , en sachant que : 1 tep = 11 630 kWh.

Nous précisons que La tonne d'équivalent pétrole (symbole tep) est une unité de mesure de l'énergie. Elle est notamment utilisée dans l'industrie et l'économie. Elle vaut, selon les conventions, 41,868 GJ parfois arrondie à 42 GJ, ce qui correspond au pouvoir calorifique d'une tonne de pétrole "moyenne". Cette unité a remplacé, de fait, la tonne équivalent charbon. Elle ne fait pas partie du système international d'unités où l'énergie s'exprime en joule, cependant cette unité nous intéresse car elle nous permet de voir la quantité de gaz qu'aurait pu économiser la SONELGAZ et donc des économies directes sur les réserves de pétrole/gaz du pays.

## 5 Conclusion

Nous avons détaillé dans ce chapitre l'état des lieux et l'audit énergétique que l'on a effectués à la cimenterie de Meftah, on peut ainsi constater que notre choix a été judicieux compte tenu de ce qu'on a pu relever comme remarques concernant la consommation en énergie électrique, et la multitude d'équipements électriques qui s'y trouvent. Cependant, nous notons que l'usine a bénéficié d'une rénovation de quelques équipements, ce qui a engendré une hausse de production et une meilleure gestion, mais ceci n'exclue pas le fait qu'il y ait des anomalies quant à l'énergie électrique au sein de la cimenterie, nous faisons remarquer aussi que la consommation en énergie électrique varie au cours de la journée, mais aussi au cours de l'année, ceci est dû au débit de production de ciment et aux arrêts techniques de l'usine, la gestion de l'énergie dans l'usine est plutôt satisfaisante, et le choix des équipements n'en est pas moins satisfaisant, ceci étant dit, l'étude effectuée dans ce chapitre s'est révélée être très enrichissante par rapport au projet, car on a pu relever plusieurs remarques, lesquelles on a citées plus haut dans ce chapitre, concernant les transformateurs d'arrivée notamment, mais aussi nous avons eu la possibilité de détailler la consommation en énergie et détecter les anomalies des différents ateliers, nous aurions voulu étendre notre étude sur l'ensemble des ateliers de la cimenterie, mais pour des contraintes de temps et, en l'absence d'équipement nous permettant de faire nos relevés à la moyenne tension, on n'a pu se consacrer qu'à l'atelier APS, nous avons donc choisi l'atelier APS par contrainte d'équipements de mesure, mais surtout parce que l'on a remarqué nombre de problèmes quant à cet atelier, de plus, l'atelier en question comporte des équipements qui sont source de perturbations électriques, harmoniques principalement, qui ne sont autres que les variateurs de vitesse, et les moteurs électriques, dans le chapitre suivant, nous présenterons l'étude que nous avons portée à l'atelier APS, les résultats des mesures, ainsi que les remarques que l'on aura faites.

# **Chapitre 3 :**

# **Etude de l'atelier**

# **APS**

## 1 Introduction

Après avoir visité et étudié pour chaque atelier de la cimenterie l'installation et son alimentation, nous avons procédé à une sélection du lieu d'intervention. Nous allons présenter dans le chapitre qui suit les critères de choix de cet atelier, les résultats de l'étude effectuée ainsi que l'interprétation et l'analyse de l'ensemble de ces résultats dans le but de proposer des solutions à d'éventuelles anomalies.

## 2 Critères de choix

Notre choix s'est porté sur l'atelier APS car cet atelier comprend plusieurs variateurs de vitesse « pour 4 machines asynchrone et une machine à courant continu » aussi car ces variateurs sont des variateurs basse tension, ce qui nous permet d'utiliser les instruments à notre disposition.

Aussi nous avons constaté plusieurs anomalies « isolation des câbles en mauvais état, fusible en surchauffe, batteries de compensation avec une durée de vie réduite et qui prennent feu ».

Les photos suivantes illustrent quelques anomalies que nous avons observées lors de notre stage de PFE à la cimenterie :

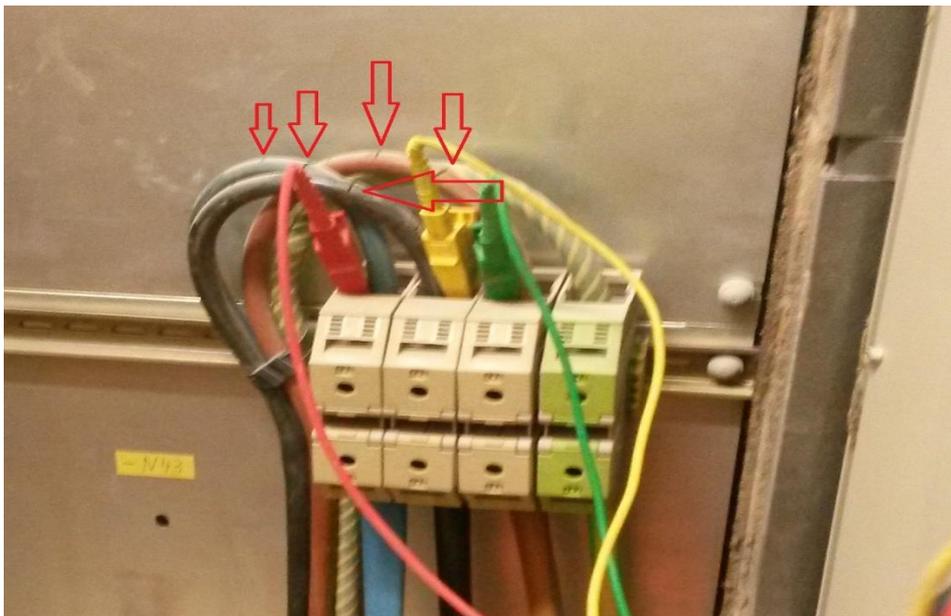
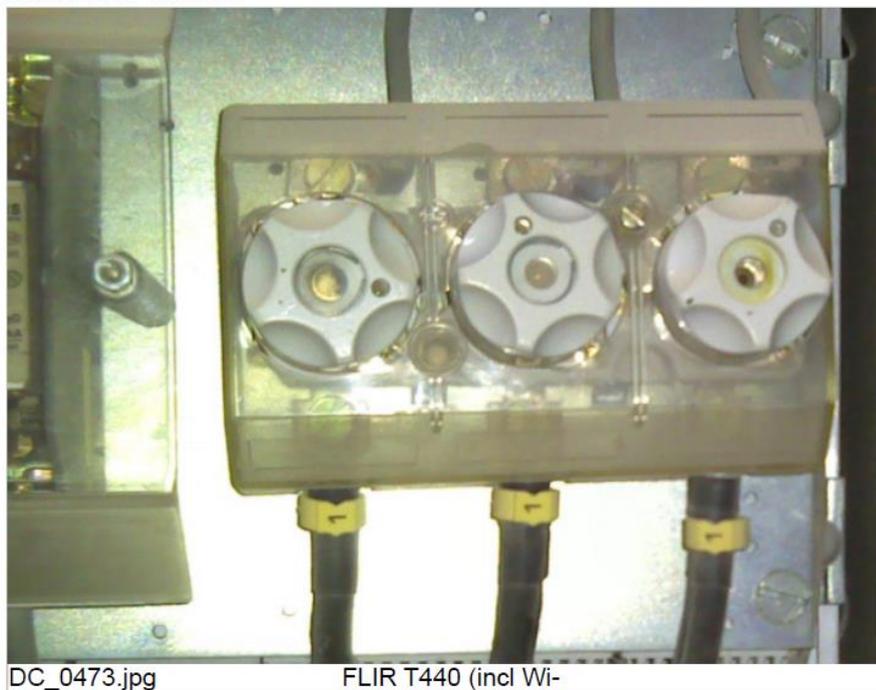


Figure 46 : Fissures sur les câbles d'alimentation des variateurs

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

Nous remarquons sur cette photo que des fissures sont apparues sur le matériau isolant recouvrant les conducteurs alimentant les variateurs de vitesses des moteurs, ceci est dû à un échauffement anormal des conducteurs.

07/04/2015 10:12:48



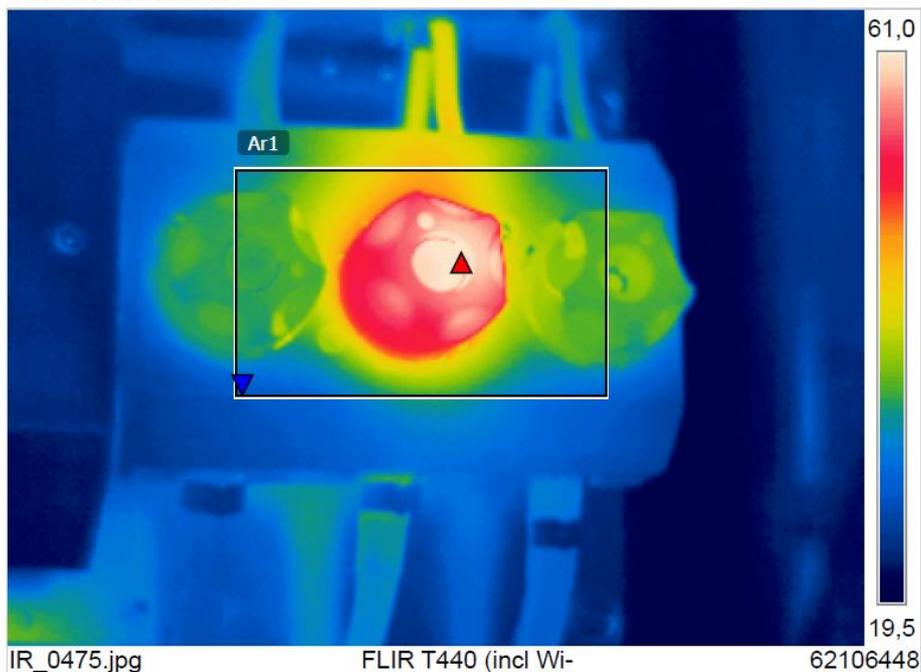
DC\_0473.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

**Figure 47 : Température élevée à l'intérieur du porte-fusible dans l'armoire Schunk du CDM APS**

La photo (Figure 47 : Température élevée à l'intérieur du porte-fusible dans l'armoire Schunk du CDM APS) présente le fusible où nous avons constaté une augmentation anormale de la température.

07/04/2015 10:13:35



IR\_0475.jpg

FLIR T440 (incl Wi-

62106448

**Figure 48 : Image thermique du porte-fusible**

La photo thermique à l'aide de la caméra thermique FLIR T440 nous confirme bel et bien que la température est anormalement élevée sur le porte-fusible (la température a atteint 60°C).

Ceci pourrait être dû à un mauvais contact, ce dernier induirait une chute de tension importante qui se présente sous forme de pertes thermiques, pouvant provoquer un départ d'incendie, Donc nous recommandons vivement le remplacement de ce fusible.



Figure 49 : Photographies montrant l'incendie ayant eu lieu sur les batteries de condensateurs

Il est à noter aussi qu'après avoir effectué la campagne de mesures « présentée dans le chapitre précédent » que l'atelier APS représente près de 15% de la charge électrique de l'usine.

## 2.1 Les moteurs électriques et leurs variateurs :

variateur			moteur			
Code équipement	type	fonction	marque	P(kW)	I(A)	V(tr/min)
216WF10MT10	ACS401001132	Doseur calcaire	SEW B3	7,5	15,5	1500
216AF12MT10	DCS401.0045 REV.A.1	ATM argile	WINKZLMZNN	14,3	39	1450-2800
216WF13MT10	ACS401001132	Doseur argile	SEW B3	7,5	15	1500
216WF14MT10	ACS 143-2K7-3	Doseur sable	SEW	0,75	2,1	1400
216WF11MT10	ACS 143-2K7-3	Doseur fer	SIEMENS	0,75	1,09/1,88	1395

Tableau 2-1 : Liste variateurs et moteurs de l'atelier APS

## 2.2 Résultats des mesures avec l'analyseur de réseau Qualistar C.A 8335:

Une bonne connaissance des paramètres de marche de ces équipements (Tableau 2-1 : Liste variateurs et moteurs de l'atelier APS) dans un régime de fonctionnement normal de l'atelier est nécessaire.

Pour répondre à ce besoin et malgré le manque d'une instrumentation au niveau de l'entreprise, une campagne de mesure a été réalisée au sein de cet atelier pour déterminer les besoins réels des installations de production.

La nécessité d'effectuer la mesure de courant avec un ampèremètre intégrant les rangs d'harmoniques (valeur efficace) conditionne le choix des instruments de mesure.

Pendant cette campagne, les mesures ont été effectuées à l'aide d'un appareil de mesure spécifique (analyseur de puissance triphasée spécifique programmable) Qualistar « voir annexes », des sondes de tension triphasées, des pinces ampérométriques de courant. Les résultats sont ensuite exploités à l'aide d'un logiciel adapté via la voie RS232 de l'ordinateur.

### 2.2.1 Analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+) :

Le C.A 8335 (Qualistar+) est un analyseur de réseau triphasé AC+DC 1000 Vrms catégorie III ou 600 Vrms catégorie IV (IEC61010-1) à affichage graphique.

Il permet :

- De mesurer des valeurs efficaces, puissances et perturbations des réseaux de distribution d'électricité.
- D'obtenir une image instantanée des principales caractéristiques d'un réseau triphasé.

L'appareil est compact et résistant aux chocs. L'ergonomie et la simplicité de son interface utilisateur le rendent agréable et utilisable de façon intuitive.

### 2.2.2 Les principales mesures réalisées sont :

- Mesure des valeurs efficaces des tensions alternatives jusqu'à 1000 V entre bornes. Au travers de ratio, l'appareil peut atteindre des centaines de Giga Volt.
- Mesure des valeurs efficaces des courants alternatifs jusqu'à 6500 A (neutre compris). Au travers de ratio, l'appareil peut atteindre des centaines de kilo Ampères.
- Mesure de la valeur continue des tensions et des courants (neutre compris).
- Mesure des valeurs efficaces,

- Mesure de la fréquence des réseaux 50 Hz, 60 Hz.
- Calcul du facteur K (KF) (application aux transformateurs en présence de courants harmoniques).
- Mesure du facteur de distorsion (DF) des courants et des tensions (hors neutre).
- Mesure des puissances actives, réactives et apparentes par phase et cumulées (hors neutre).
- Mesure des facteurs de puissance (PF).
- Mesure des énergies actives, réactives (capacitive et inductive) et apparentes.

### 2.2.3 Schéma du branchement de l'analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+) :

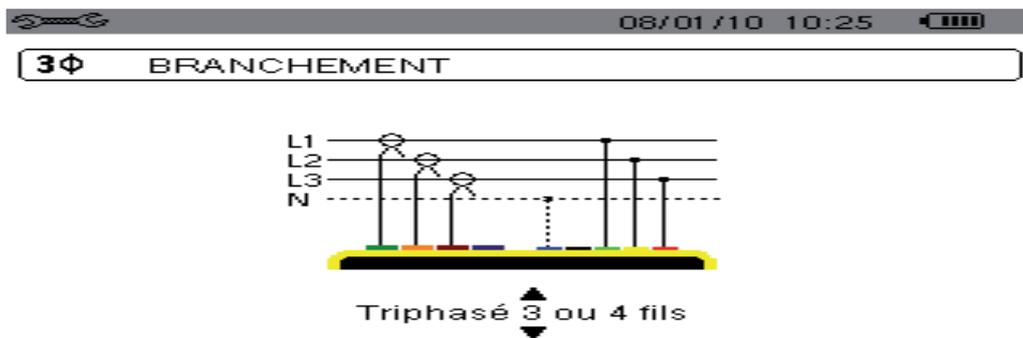


Figure 50 : Schéma du branchement de l'analyseur d'énergie C.A 8335 (Qualistar+)

Une campagne de mesures électrique a été réalisée le 15 Avril 2015 au niveau du départ disjoncteur vers les variateurs de vitesse de l'atelier APS de la SCMI comme illustré sur la figure suivante.

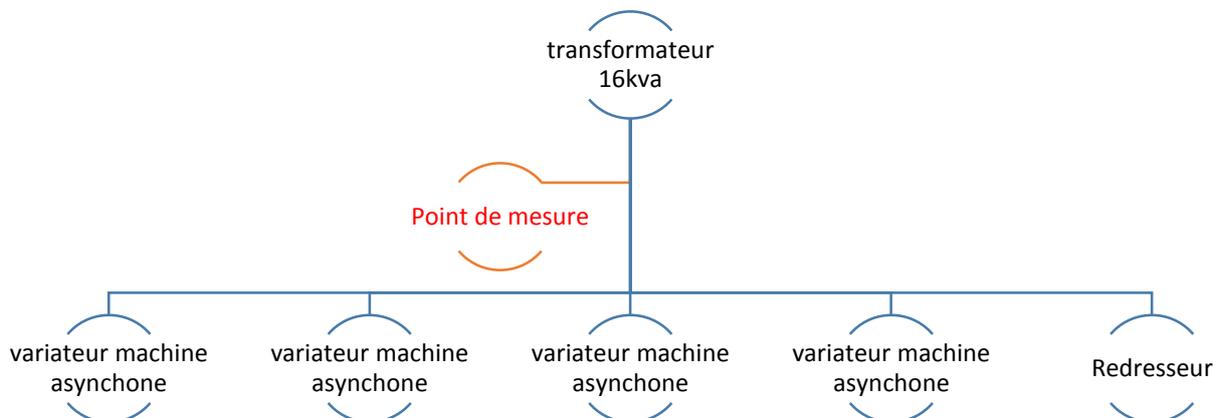


Figure 51 : Point de mesure

Les résultats des mesures basses tensions sont présentés sur les figures ci-dessous, les paramètres mesurés sont la tension, le courant, la puissance active, puissance réactive, facteur de puissance, harmonique.

### Forme d'onde de la tension composée :

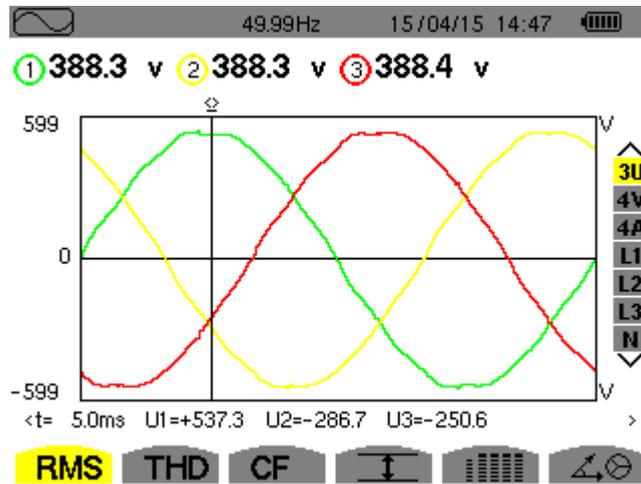


Figure 52 : Forme d'onde de la tension composée des 3 phases

Nous remarquons que les tensions sont équilibrées et ont une forme sinusoïdale non déformée.

### Forme d'onde de la tension simple :

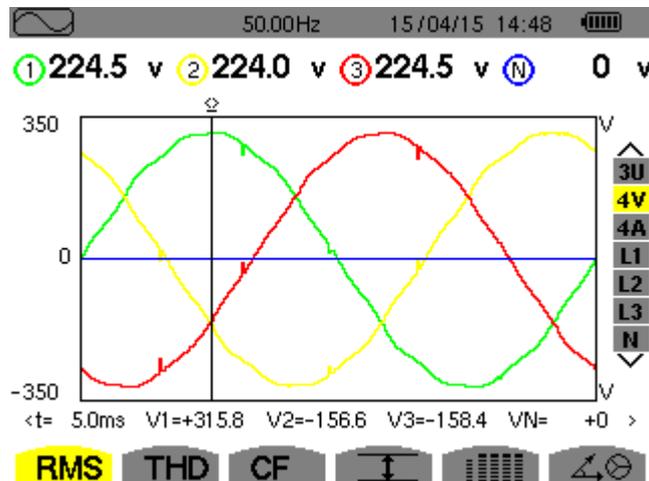


Figure 53 : Forme d'onde de la tension simple

Nous remarquons sur cette figure que les 3 phases sont équilibrées néanmoins nous signalons une légère déformation très rapide de la tension.

Nos connaissances théoriques poussent notre intuition à dire que ces interférences ont comme origine les variateurs de vitesse installés en amont, ceci ne peut être confirmé que par la connaissance des interrupteurs utilisés pour la construction de ces variateurs.

*THD en tension :*

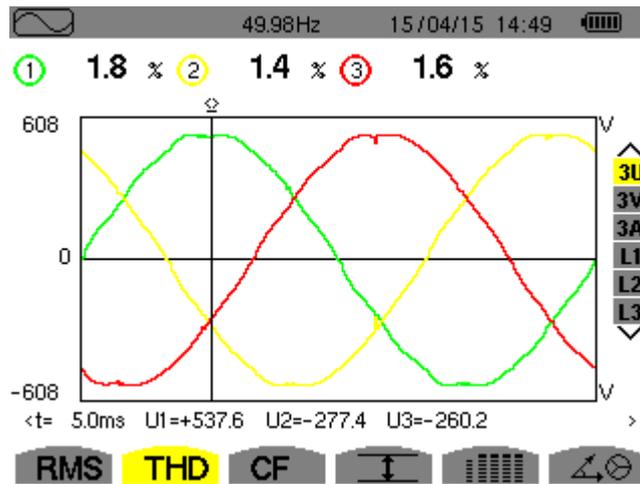


Figure 54 : THD en tension

Dans les installations industrielles, les tensions harmoniques dont le THD est inférieur à 5% ne produisent pas d'effet notable. Entre 5% et 7% on commence à observer des effets, et pour plus de 10% les effets sont quasi certains.

La norme EN 50160 fixe les niveaux de tensions harmoniques jusqu'au 25<sup>ème</sup> rang et indique que le taux global de distorsion harmonique ne doit pas dépasser 8 % [10].

Les taux de distorsion des tensions relevées sont inférieurs à 1,8% et donc inférieurs aux normes citées.

**2.2.4 Forme d'onde du courant :**

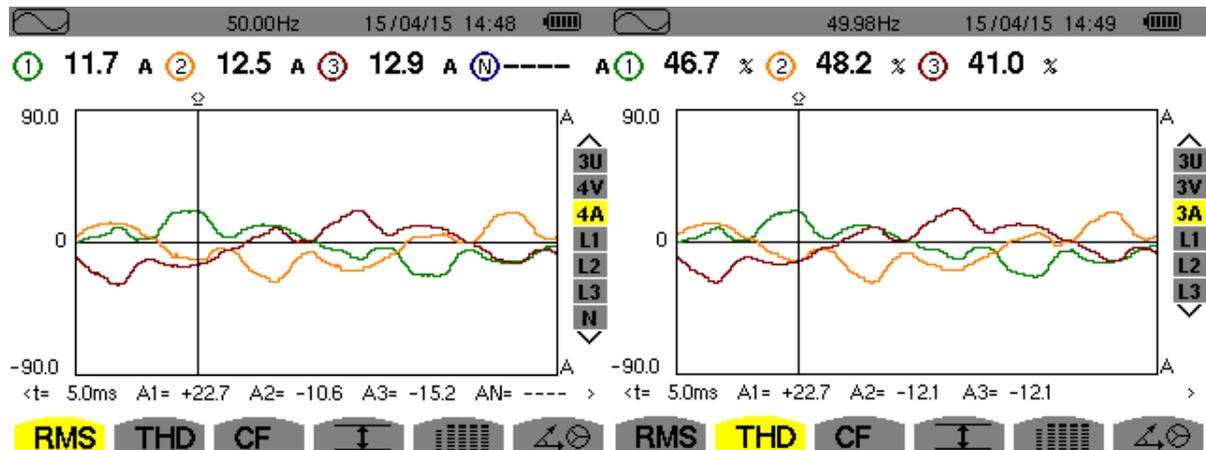


Figure 55 : Forme d'onde du courant sur les 3 phases suivie du THD en courant

Nous remarquons sur les figures ci-dessus :

- Un déséquilibre de courant entre les trois phases
- Une déformation assez importante de la forme d'onde,
- Un taux de distorsion harmonique qui varie pour les 3 phases

Le déséquilibre a pour origine l'installation non équilibrée d'équipements (automates, instruments de mesure...).

La déformation de l'onde est due à la présence de signaux harmonique produit par les charges non linéaire se trouvant en amont du point de mesure, cet aspect sera étudié sur les figures ci-dessous (Figure 56 : Taux de distorsion harmonique 3 jusqu'à la Figure 67 : Taux de distorsion harmonique 25).

Il est à noter aussi que la variation du  $THD_i$  est elle aussi liée au déséquilibre.

### 2.2.5 Harmoniques :

#### 2.2.6 Taux de distorsion de courant par rang d'harmonique :

Les figures ci-dessous représentent le spectre des courants de ligne fournis par l'alimentation. Nous signalons le taux élevé de l'harmonique de rang 5 et le déséquilibre entre les courants de ligne.

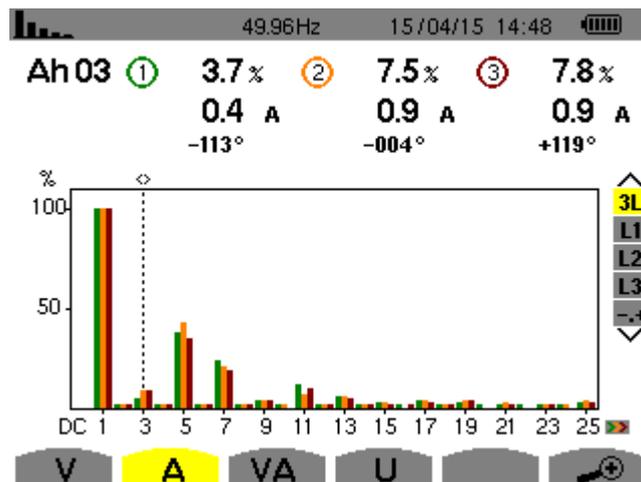


Figure 56 : Taux de distorsion harmonique 3

- Nous remarquons un taux de l'harmonique de rang 3 qui varie fortement suivant la phase avec un minimum de 3,7% pour la phase 1 et un maximum de 7,8 % pour la phase 3.
- Il est à noter aussi que le taux de l'harmonique de rang 3 dépasse les normes citées dans la Figure 12 : Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables et ce pour les phases 2 et 3 (7,5% et 7,8%) alors que la norme BT indique qu'il ne faut pas dépasser les 5%.
- Cependant le taux de l'harmonique 3 de la phase 1 est inférieur aux exigences.

Cette forte variation du taux de l'harmonique 3 est due au déséquilibre qu'il y a entre les 3 phases (présence d'équipements pollueurs sur la phase 2 et 3).

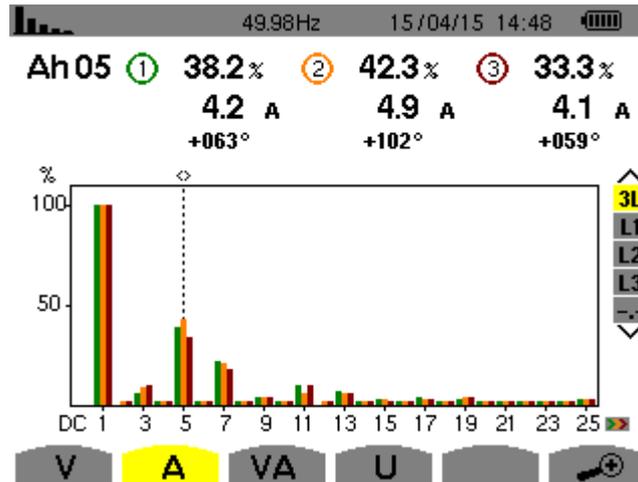


Figure 57 : Taux de distorsion harmonique 5

Nous remarquons un taux de l'harmonique de rang 5 qui varie suivant la phase avec un minimum de 33,3% pour la phase 3 et un maximum de 42,3 % pour la phase 2.

On note un dépassement important de la norme citée dans Figure 12 : Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables qui stipule que le taux de l'harmonique 5 ne doit pas dépasser les 6%.

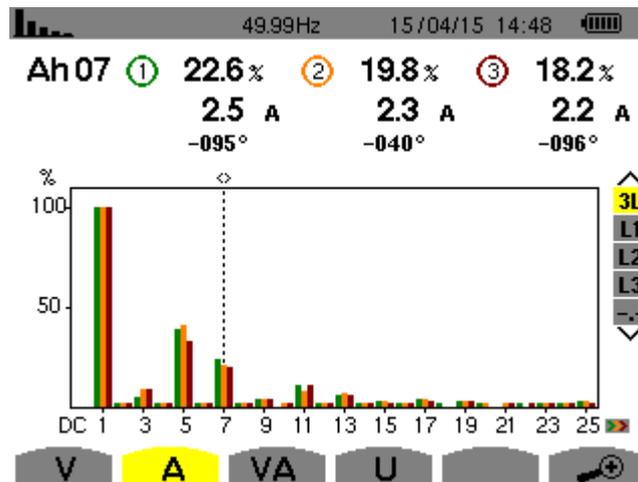


Figure 58 : Taux de distorsion harmonique 7

Pour l'harmonique de rang 7 on remarque aussi un taux qui diffère selon la phase, mais aussi que ce taux dépasse la norme qui stipule qu'on ne doit pas dépasser 5% pour le taux de l'harmonique 7 alors que dans notre cas le taux varie de 18,2% à 22,6%.

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

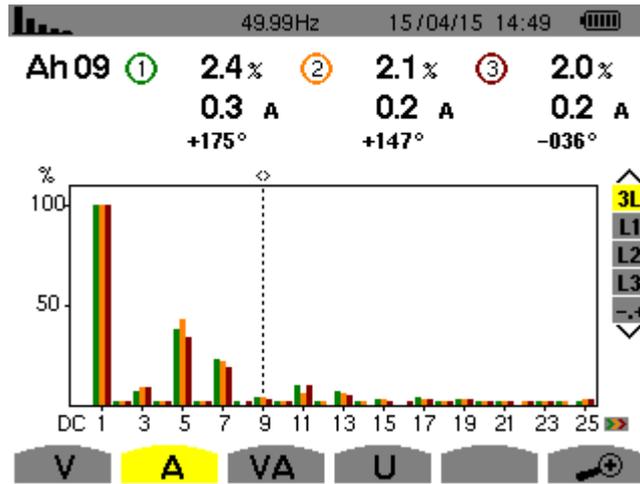


Figure 59 : Taux de distorsion harmonique 9

Nous remarquons cette fois-ci que le taux de l'harmonique est relativement faible par rapport aux autres rangs d'harmonique, mais ce dernier reste tout de même légèrement supérieur aux normes exigées qui recommandent de ne pas dépasser 1,5%.

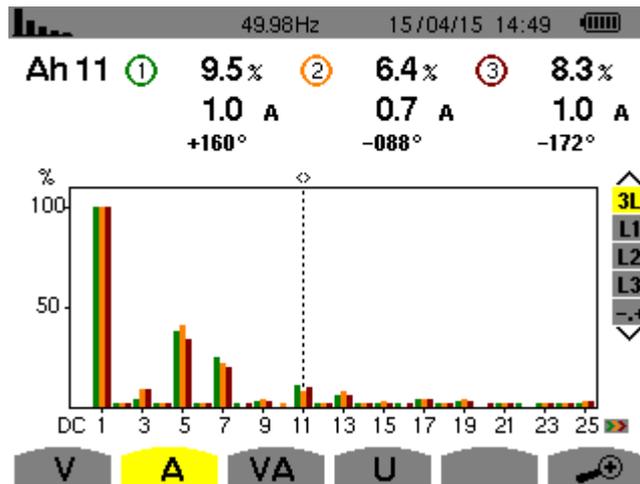


Figure 60 : Taux de distorsion harmonique 11

Pour l'harmonique de rang 11 même constatation, avec un taux qui diffère d'une phase à l'autre et varie de 6,4% à 9,5% et qui dépasse de loin la norme (3,5%).

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

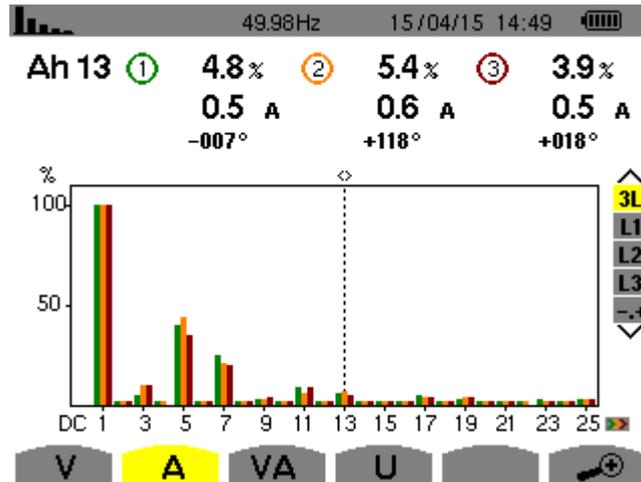


Figure 61 : Taux de distorsion harmonique 13

Avec un taux de distorsion harmonique variant de 3,9% à 5,4% l'harmonique de rang 13 est au-delà de la norme (3%).

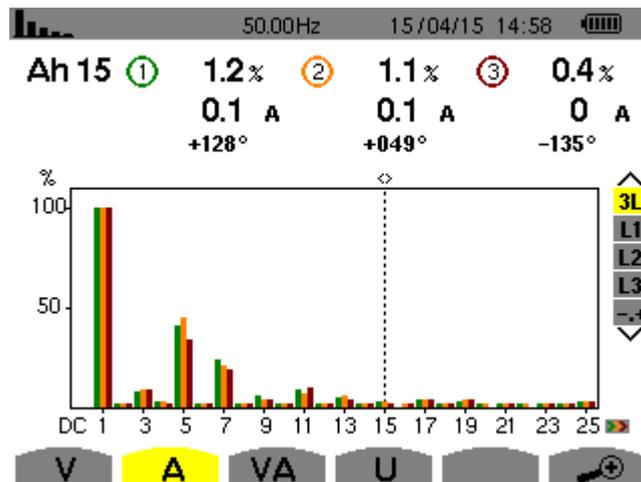


Figure 62 : Taux de distorsion harmonique 15

Pour la phase 3 nous remarquons une valeur du taux d'harmonique de 0,4% qui est proche de la norme (0,3%), par contre cette norme est largement dépassée en ce qui concerne la phase 1 et 2 avec comme taux de distorsion (1,2% et 1,1% respectivement).

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

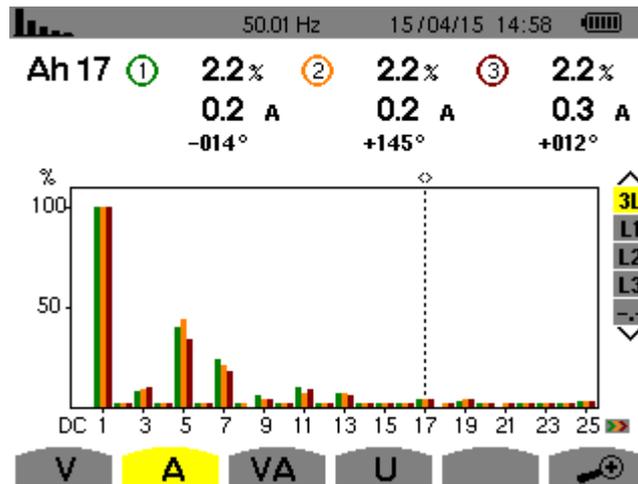


Figure 63 : Taux de distorsion harmonique 17

Toutes les valeurs des taux de distorsion de chaque phase sont presque égales à la norme (2%).

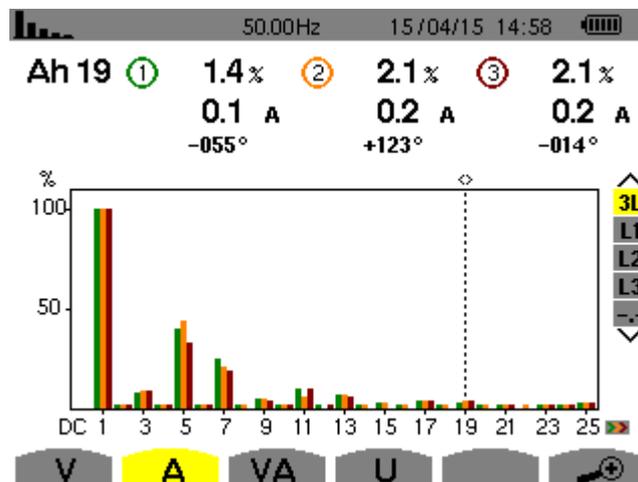


Figure 64 : Taux de distorsion harmonique 19

Pour l'harmonique de rang 19 sur la phase 1, le taux est inférieur à la norme et est légèrement supérieur en ce qui concerne les 2 autres phases.

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

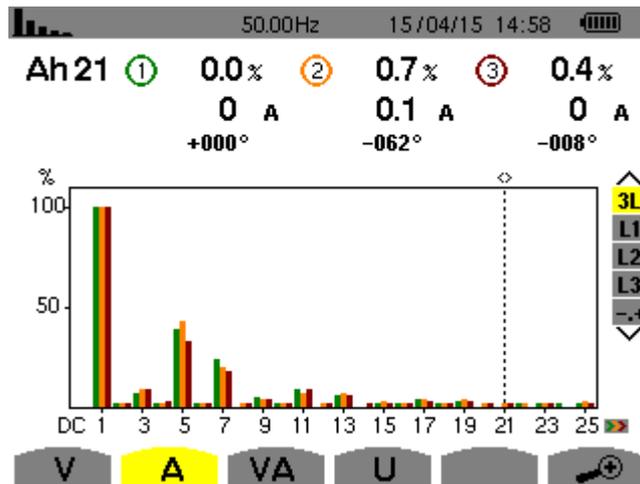


Figure 65 : Taux de distorsion harmonique 21

Nous remarquons un taux nul pour la phase 1, alors que sur les deux autres phases ce taux est de deux fois plus important que celui de la norme.

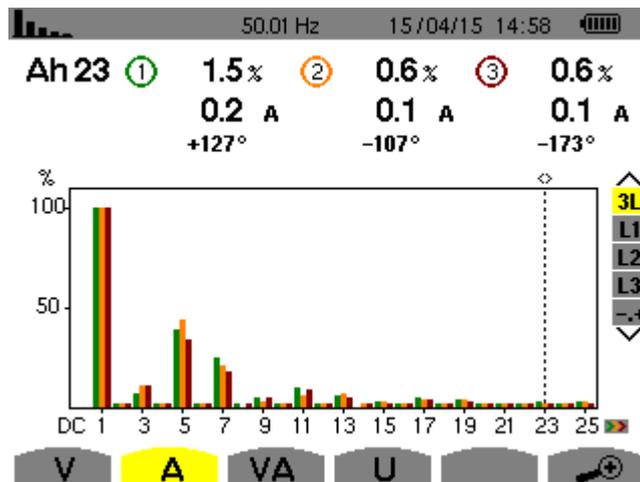


Figure 66 : Taux de distorsion harmonique 23

Pour l'harmonique 23 le taux de distorsion harmonique des 3 phases est en dessous de la norme.

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

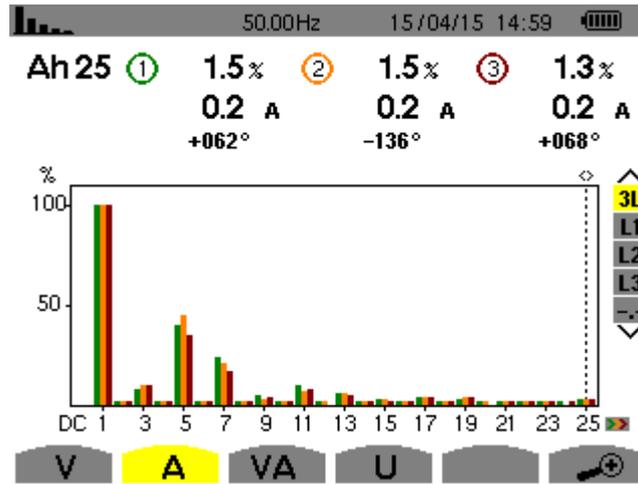


Figure 67 : Taux de distorsion harmonique 25

De même que pour l'harmonique de rang 23, l'harmonique de rang 25 présente un taux de distorsion inférieur à la norme et ce sur les 3 phases.

Nous présentons dans le tableau suivant un récapitulatif de la présence des harmoniques et nous comparerons ces résultats avec les normes citées dans la (Figure 12 : Valeurs maximales des taux d'harmoniques acceptables) :

Rang	THDi Mesuré (%)			Norme (%)	Dépassement en (%)		
	Phase 1	Phase 2	Phase 3		Phase 1	Phase 2	Phase 3
3	3,7	7,5	7,8	5	-26,00%	50,00%	56,00%
5	38,2	42,3	33,3	6	536,67%	605,00%	455,00%
7	22,6	19,8	18,2	5	352,00%	296,00%	264,00%
9	2,4	2,1	2	1,5	60,00%	40,00%	33,33%
11	9,5	6,4	8,3	3,5	171,43%	82,86%	137,14%
13	4,8	5,4	3,9	3	60,00%	80,00%	30,00%
15	1,2	1,1	0,4	0,3	300,00%	266,67%	33,33%
17	2,2	2,2	2,2	2	10,00%	10,00%	10,00%
19	1,4	2,1	2,1	0,2	600,00%	950,00%	950,00%
21	0	0,7	0,4	1,5	-100,00%	-53,33%	-73,33%
23	1,5	0,6	0,6	1,5	0,00%	-60,00%	-60,00%
25	1,5	1,5	1,3	1,5	0,00%	0,00%	-13,33%

Tableau 2-2 : Comparaison des résultats de mesure avec la norme

Comme expliqué plus haut, nous remarquons qu'il y a un fort dépassement des valeurs recommandées qui peut atteindre 950% pour le rang de l'harmonique 19 sur la deuxième phase. Comme illustré sur le tableau, nous observons qu'il y a un fort dépassement des normes et ceci pour presque tous les rangs d'harmoniques, cela nous pousse à recommander une étude plus

approfondie des autres ateliers de la SCMi en vue de vérifier si ceux-ci ne sont pas sujets aux mêmes perturbations que nous notons dans le cas de l'atelier APS.

Dans le cas où l'on rencontre les mêmes perturbations au sein des autres ateliers nous recommandons de prendre des précautions citées dans le chapitre 1 en vue de la suppression de ces problèmes.

### 2.2.7 Puissances :

Les puissances par phases sont représentées sur la figure qui suit :

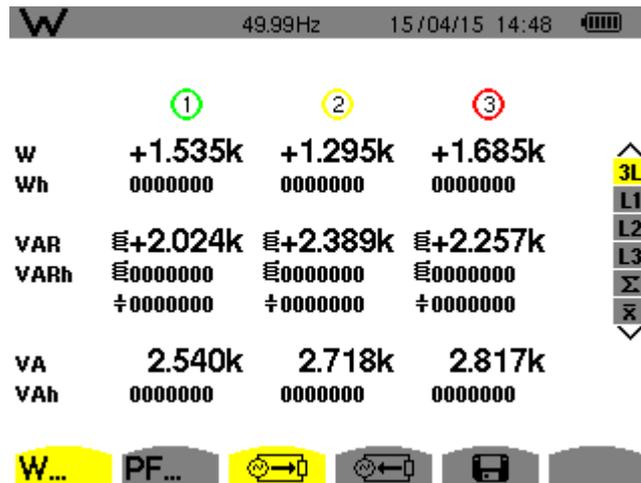


Figure 68 : Puissance active, réactive, et apparente sur les 3 phases

Nous remarquons que la puissance active n'est pas équilibrée sur les 3 phases, de même pour la puissance réactive et donc apparente. Et comme cité plus haut ceci est dû à l'installation non équilibrée d'équipements sur chacune des phases.



Figure 69 : Total puissances active, réactive, apparente

Nous notons que :

- La puissance active est de 4640 W
- La puissance réactive est de 7002 VAR

- La puissance apparente est de 8418 VA

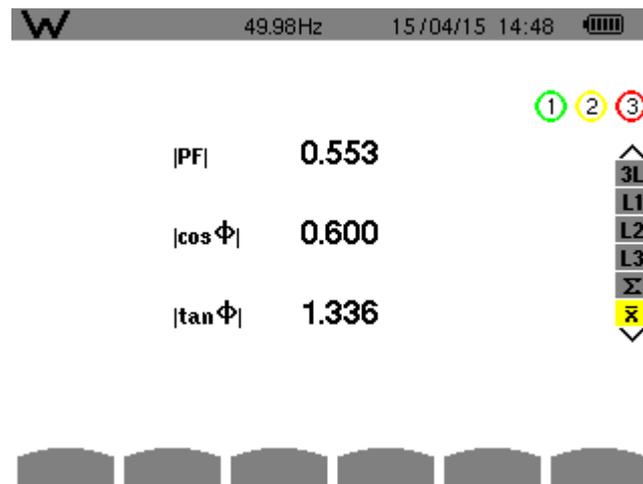


Figure 70 : Facteur de puissance,  $\cos(\phi)$ ,  $\tan(\phi)$

Nous remarquons que le  $\cos(\phi)$  mesuré (0,6) est inférieur au  $\cos(\phi)$  de tout l'atelier APS (0,95) donc celui-ci n'engendre pas des pénalités financières sur les factures d'électricité, mais la consommation excessive d'énergie réactive provoque la diminution du rendement énergétique des installations et des pertes d'énergie dans les réseaux.

### 2.2.8 Interprétations :

Les résultats obtenus par l'analyseur de réseau nous ont permis de faire les constatations et interprétations suivantes :

- Nous avons remarqué lors de notre mesure que le taux de distorsion harmonique présent sur les 3 phases était important (presque la moitié du courant était des courants harmoniques)
- On remarque que tous les rangs d'harmonique (de 3 à 19) sont supérieurs à la norme.
- Par contre les harmoniques de rang 23 et 25 sont inférieurs à la norme.
- L'étude du taux d'harmonique a montré que les harmoniques les plus importants sont ceux du rang 5 et 7 dont les valeurs avoisinent respectivement les 38% et 20%. Ceci pourrait être dû à la présence de redresseurs.
- Concernant les formes d'ondes de la tension nous remarquons tout d'abord l'absence de déséquilibre cependant leur forme est quelque peu altérée probablement à cause de la présence d'harmoniques.
- Concernant les formes d'ondes du courant nous remarquons un déséquilibre entre les 3 phases ainsi qu'une déformation significative de leur forme et ceci à cause de la présence d'harmoniques.

- En ce qui concerne les puissances nous constatons une forte consommation d'énergie réactive et un faible facteur de puissance dont la valeur est de 0.553 ceci est dû à l'absence de compensations de la puissance réactive «débranchées pour cause d'incendie»

### 3 Recommandations

Suivant les résultats obtenus lors de notre étude au sein de SCMi de Meftah nous avons plusieurs recommandations à faire :

- Éviter les démarrages simultanés des charges à fortes puissances (moteurs) afin de diminuer le courant d'appel.
- Éviter le fonctionnement des moteurs et transformateurs à vide et à charge réduite.
- Débrancher du réseau les primaires des transformateurs non utilisés.
- Concernant les gros consommateurs d'énergie, surtout les moteurs MT et particulièrement les moteurs des broyeurs, il faut :
  - Toujours éviter les démarrages simultanés pour ne pas atteindre des PMA pénalisantes
  - Observer au minimum 10 minutes d'attente entre deux tentatives de démarrage successives.
- L'installation d'un filtre passif pour réduire les harmoniques de rang 5 et 7 :

#### 3.1 Dimensionnement du filtre :

L'idée du filtre passif est de prendre un piège à harmonique qui consiste à prendre un filtre LC série qui possède une impédance nulle à la fréquence de résonance que l'on choisit alors à  $5*50\text{Hz}$  pour l'harmonique de rang 5, et  $7* 50 \text{ Hz}$  pour l'harmonique de rang 7.

L'impédance nulle du filtre à cette fréquence a pour effet de court-circuiter l'harmonique du courant :

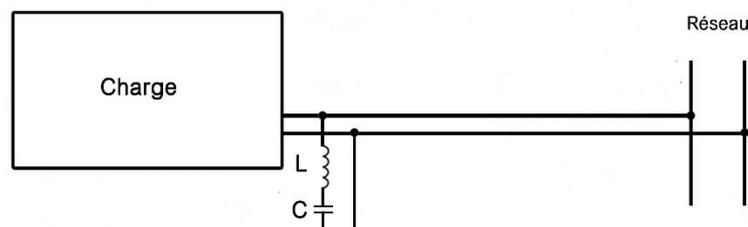


Figure 71 : Filtre passif

A la résonance nous avons :

$$jL\omega + \frac{1}{jC\omega} = 0 \quad (\text{III.1})$$

De cette équation on peut tirer :

$$L * C * \omega^2 = 1 \quad (\text{III.2})$$

Donc le dimensionnement de L et C diffère suivant le rang de l'harmonique que l'on veut atténuer, cependant nous devons éviter que l'impédance du filtre soit faible à 50 Hz.

### 3.1.1 Rang 5 :

$$L_5 * C_5 * \omega_5^2 = 1$$

Avec  $\omega_5 = 5 * \omega$  tel que  $\omega = 50 \text{ Hz}$

De ce fait  $L_5$  et  $C_5$  doivent assurer la relation suivante :

$$L_5 * C_5 = \frac{1}{(5*\omega)^2} = \frac{1}{(250)^2} = 1,6 * 10^{-5}$$

Une infinité de valeurs est possible pour le choix de :  $L_5$  et  $C_5$ ,

L'impédance du filtre à 50 Hz est donnée par la relation :

$$Z = \left| \frac{L_5 C_5 \omega^2 - 1}{C_5 * \omega} \right| \quad (\text{III.3})$$

Donc la valeur de Z doit être « grande » à 50 Hz, ce qui signifie que la valeur de C doit être la plus petite possible.

Nous prenons donc :  $C_5 = 1,1 \mu\text{F}$

Nous aurons donc :  $L_5 = 14,5 \text{ H}$

### 3.1.2 Rang 7

A la résonance nous avons  $L_7 * C_7 * \omega_7^2 = 1$

Avec  $\omega_7 = 7 * \omega$  tel que  $\omega = 50 \text{ Hz}$

De ce fait  $L_7, C_7$  doivent assurer la relation suivante :

$$L_7 * C_7 = \frac{1}{(7*\omega)^2} = \frac{1}{(350)^2}$$

Une infinité de valeurs est possible pour le choix de  $L_7$  et  $C_7$ , l'impédance du filtre à 50 Hz est donnée par la relation :

$$Z = \left| \frac{L_7 C_7 \omega^2 - 1}{C_7 * \omega} \right| \quad (\text{III.4})$$

Pour assurer Z élevée à 50 Hz (le filtre ne doit pas court-circuiter le courant fondamental) il devient nécessaire de prendre  $C_7$  aussi faible que possible, nous pouvons choisir les valeurs suivantes :

Nous prenons donc :  $C_7 = 1,1 \mu\text{F}$

Nous aurons donc :  $L_7 = 7,42 \text{ H}$

Cependant l'impédance du filtre  $Z$  ne doit pas être supérieure à celle du réseau, car dans ce cas, le courant harmonique que l'on veut atténuer ne passera pas par le filtre et de ce fait il ne sera pas piégé.

L'utilisation d'un filtre actif est la plus adaptée vu la présence d'un nombre important de rangs d'harmoniques, cependant, la puissance des équipements où l'on a effectué les mesures n'est pas importante, de ce fait l'utilisation d'un filtre actif reviendrait inadaptée sur le plan financier. Nous recommandons une étude de tout l'atelier APS s'il s'avère que cet atelier comporte des résultats similaires aux nôtres (concernant les harmoniques) on peut envisager l'installation d'un filtre actif.

Supposons que l'installation de ce filtre nous permette de réduire le taux de l'harmonique 5 à 6% et l'harmonique 7 à 5%.

Ceci équivaut à dire que les courants de fréquence 250Hz (rang 5) et 350Hz (rang7) deviendront :

		Anciennes valeurs			Nouvelles valeurs		
		Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 1	Phase 2	Phase 3
Rang 5	%	32,8	42,3	33,3	6	6	6
	I (A)	4,2	4,9	4,1	0,768	0,695	0,738
Rang 7	%	22,6	19,8	18,2	5	5	5
	I (A)	2,5	2,3	2,2	0,553	0,580	0,604

Tableau 3-1: Comparaison des valeurs de courants après filtrage

Nous remarquons que le courant de rang 5 est presque six fois moins important que le courant d'avant filtrage, alors que le courant de rang 7 est inférieur de près de 4 fois de celui qu'on avait avant filtrage.

Cette diminution des courants impliquera la diminution des pertes par effet joule, ainsi que la diminution des risques de perturbation des automates programmables et autres dispositifs électroniques.

## 4 Conclusion

Nous nous sommes intéressés dans ce chapitre, à l'atelier APS, où nous avons détaillé les causes ayant conduit au choix de cet atelier pour effectuer nos mesures, nous avons aussi détaillé les résultats de ces mesures, où on retient particulièrement le déséquilibre entre les trois

### Chapitre 3 : Etude du cas de l'atelier APS

phases, ainsi qu'une forte consommation d'énergie réactive, celle-ci est due à l'absence de batteries de compensation.

Aussi, nous avons noté la présence d'harmoniques avec un fort taux global de distorsion que nous pensons pouvoir atténuer en utilisant des filtres passifs, cependant nous préconisons une étude plus approfondie de la totalité de l'atelier APS afin de déterminer toutes les anomalies, pour pouvoir par la suite prendre des démarches visant à les éliminer.

L'étude de l'atelier APS nous a permis de voir et de comprendre les différentes perturbations électriques citées dans le chapitre 1 ainsi que leurs effets sur les équipements industriels.

# Chapitre 4 :

# Analyse

# tarifaire

## 1 Introduction

L'analyse tarifaire a pour but principal d'expliquer comment s'effectue la consommation de l'énergie électrique et aussi à quel prix le consommateur la paye aux différents moments de la journée, ceci pour pouvoir par la suite permettre aux managers de la société de mieux gérer cette consommation et d'opter pour la meilleure tarification permettant ainsi de minimiser le coût de production et d'optimiser la marge bénéficiaire de l'entreprise.

La gestion d'énergie a pris un nouvel essor avec l'apparition des compteurs électroniques dans les années 80, qui disposent d'une « interface client », permettant à l'abonné de récupérer les informations stockées (consommations, appel de puissance, dépassements,...). Dans le but de vérifier que le choix du tarif est judicieux.

Dans ce chapitre nous allons présenter l'analyse tarifaire de la SCMi qui est liée à la Sonelgaz par un seul contrat de facturation, avec le tarif 31 et une P.M.D de 25MW.

Cette analyse des factures d'énergie sera faite pour la période couvrant les trois dernières années « 2012, 2013 et 2014 ».

## 2 Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie active

Comme premier constat résultant de notre analyse qui a couvert une période de trois années (2012, 2013 et 2014), nous avons remarqué que la consommation d'énergie active n'est pas stable comme l'indique la figure ci-dessous, elle fluctue entre la valeur maximale 14851,4MWh enregistrée durant le mois de Mai 2013 et une valeur minimale 2216,14MWh pour le mois de Mars 2013.

De même pour les coûts de l'énergie active, ces derniers varient entre une valeur maximale de 31 338 400,77 DA et une valeur minimale de 6 581 256,98 DA pour les mêmes périodes suscitées.

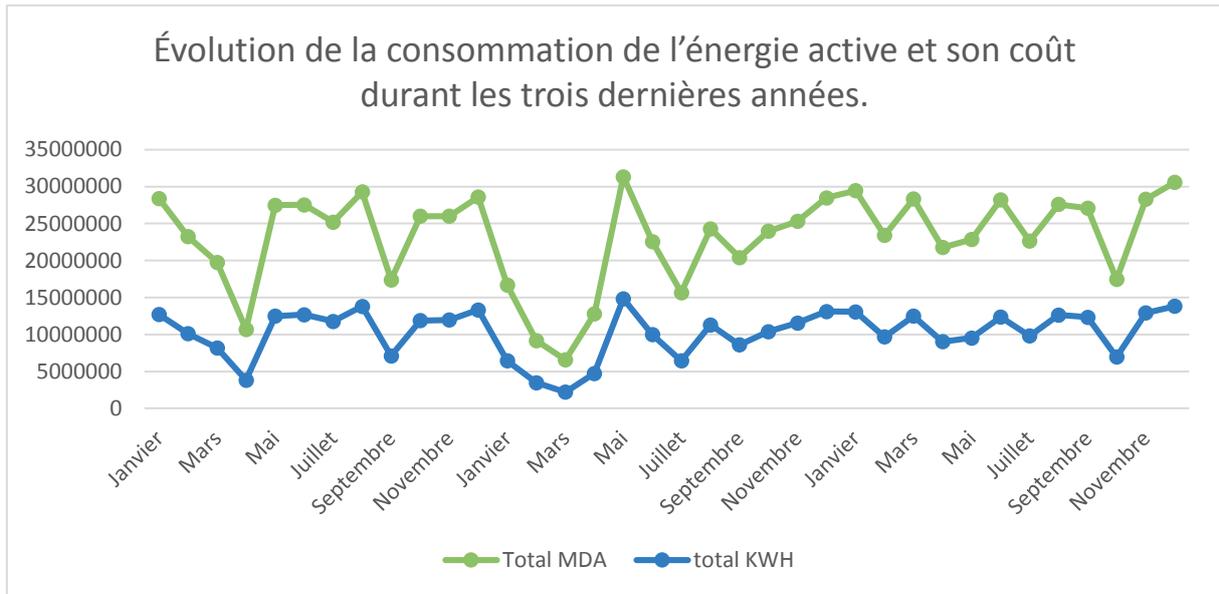


Figure 72 : Évolution de l'énergie active et son coût durant les trois dernières années

### 3 Répartition de la consommation d'énergie active

Le prix de l'énergie active dépend de la période de sa consommation, pour le tarif 31 l'électricité en pointe coûte plus de 5 fois plus cher qu'aux heures pleines et de 11 fois plus cher que l'électricité en heures creuses.

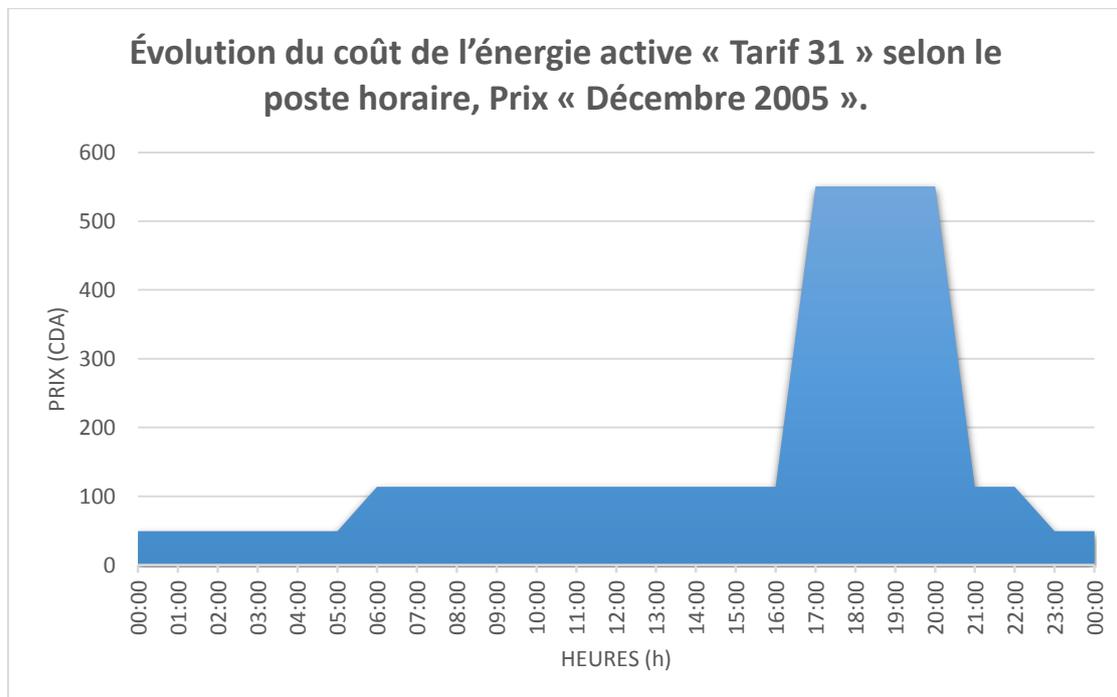


Figure 73 : Évolution du coût de l'énergie active selon le poste horaire

### 3.1 Poste horaire pointe:

Ce poste est valable tous les jours de l'année, il a une courte durée de quatre heures qui commence de 17h00 et s'arrête à 21h00, ce poste correspond aux heures les plus chargées.

### 3.2 Poste horaire pleines :

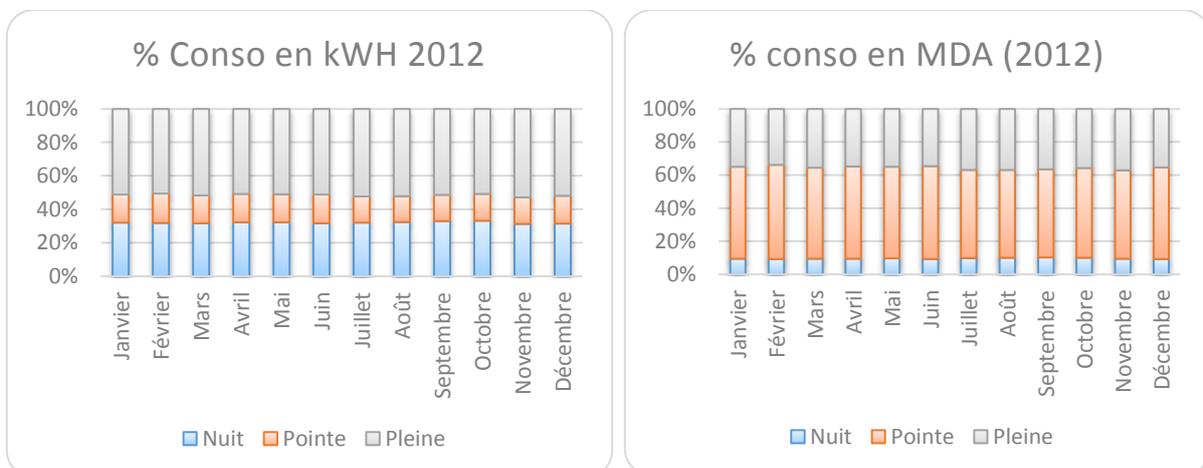
Il est valable tous les jours de l'année, correspond aux heures moyennement chargées, il a une durée de 12 heures et 30 minutes, commence de 6h00 et s'arrête à 17h00 et de 21h00 à 22h30.

### 3.3 Poste horaire creuses :

Valable aussi tous les jours de l'année, correspond aux heures plus faiblement chargées, il a une durée de 7 heures et 30 minutes qui commence de 22h30 et s'arrête à 6h00.

L'analyse des consommations et coûts effectuée suivant les trois tranches horaires, d'après les factures des trois dernières années, (voir le graphe suivant) montre que :

- Les consommations d'énergie en période « creuse » représentent entre 30% et 35 % de l'énergie totale, ces consommations constituent environ 10 % du coût total de l'énergie active ;
- Les consommations d'énergie en période «de pointe» représentent environ 15 % de l'énergie totale, ces consommations atteignent presque 54 % du coût total de l'énergie active ;
- Les consommations d'énergie en période « pleine » représentent entre 50% et 55 % de l'énergie totale, ces consommations constituent entre 30 % et 40 % du coût total de l'énergie active.



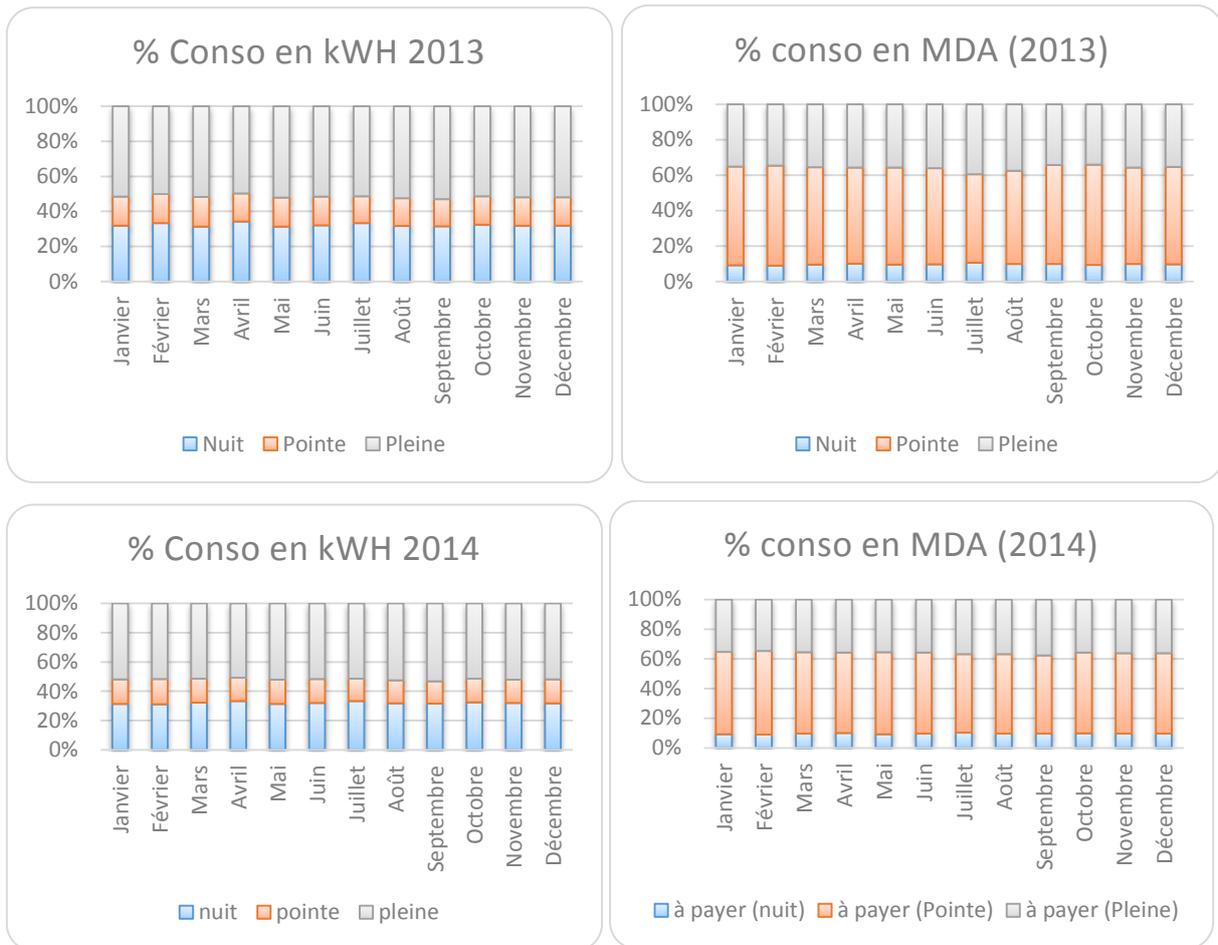


Figure 74 : Comparaison entre la consommation et les coûts de l'énergie active selon les postes horaires durant les trois dernières années

## 4 Étalement de la consommation

### 4.1 Principe :

C'est un transfert d'une partie de la consommation en heures de pointe vers les autres postes horaires, soit heures creuses et heures pleines.

### 4.2 Intérêt de l'étalement :

- Une réduction de la facture d'électricité.
- Une meilleure gestion de la consommation d'électricité sans pour autant affecter le programme de production.
- Une optimisation du fonctionnement des équipements.

En rappel, le prix unitaire de l'énergie active en régime de pointe est :

- plus de **11** fois celui appliqué au poste " heures creuses "
- et avoisine **5** fois celui des " heures pleines "

## Chapitre 4 : Analyse tarifaire

Ce qui signifie que le coût de l'énergie active consommée pendant cette période de 4 heures représente environ :

- **55 %** du coût de l'énergie active totale consommée pendant 24 heures
- **40 %** de la facture globale.

Il est recommandé de diminuer cette consommation en la décalant vers les heures creuses ou les heures pleines, c'est à dire, un effort d'effacement en heures de pointe permet de diminuer la demande en pointe et l'augmentation en heures creuses ou heures pleines. Surtout si on connaît que le coût d'énergie active en heures de pointe est cher par rapport au coût moyen qui est de 1,66 DA/KWh.

Nous évaluons le coût total de l'électricité si un effacement de 10% puis 20% de la consommation des heures de pointe est établi aux heures pleines puis aux heures creuses, et ce afin de ne pas perturber la production journalière de l'unité.

Le tableau ci-dessous, présente une simulation de la facture électrique (Année 2014) dans le cas de report aux heures pleines ou creuses et donne un aperçu des gains financiers probables.

Supposons que :

- La SCMI fasse un étalement de 20% de sa consommation électrique du poste horaire pointe vers le poste pleine ou creuse.
- Pendant les autres postes horaires la SCMI peut appeler des puissances jusqu'à concurrence de la puissance mise à sa disposition « 25MW ».

Année	unité	coût total	Heures creuses		Heures pleines	
			10%	20%	10%	20%
2014		DA				
<b>Consommation</b>						
<i>H. creuses</i>	KWh	41796853	43897516	45998179	41796853	41796853
<i>H. de pointe</i>	KWh	21006630	18905967	13782634	18905967	13782634
<i>H. pleines</i>	KWh	67094540	67094540	67094540	69195203	71295866
<i>Total active</i>	KWh	129898023	129898023	129898023	129898023	129898023
<b>Coût</b>						
<i>H. creuses</i>	DA	20559872	21593188	22626504	20559872	20559872
<i>H. de pointe</i>	DA	115685612	104117050	92548489	104117050	92548489
<i>H. pleines</i>	DA	76387133	76387133	76387133	78778738	81170343
<i>Total active</i>	DA	212632618	202097373	191562127	203455661	194278705

<i>Facture(avec taxe)</i>	DA	227516901	216244188	204971476	217697557	207878214
<i>Gain</i>	DA		<b>11272712</b>	<b>22545424</b>	<b>9819343</b>	<b>19638686</b>

Tableau 4-1 : Effacement de la consommation en heures de pointe avec report sur les heures creuses et pleines

- Le gain en cas de l'étalement de la consommation des heures de pointe aux heures pleines sera évalué comme suit :

Pour un étalement de 10% de la consommation, le gain est de l'ordre de : **9819343DA**

Pour un étalement de 20% de la consommation, le gain est de l'ordre de : **19638686DA**

- Le gain en cas de l'étalement de la consommation des heures pointe aux heures creuses sera évalué comme suit :

Pour un étalement de 10% de la consommation, le gain est de l'ordre de: **11272712DA**

Pour un étalement de 20% de la consommation, le gain est de l'ordre de: **22545424DA**

Ce qui est frappant c'est le coût réduit de l'énergie pendant les heures creuses (nuit) et les heures pleines (jours) alors que pendant les heures de pointe le coût de l'énergie est très élevé ; pour faire des économies importantes, il est intéressant de programmer toutes les grandes opérations consommatrices d'énergie durant le poste heures creuses (07 heures et 30 minutes) ou pleines (12 heures et 30 minutes).

D'autre part et lorsque les impératifs de production le permettent, il est vivement conseillé de veiller à ce que les opérations de maintenance préventive ou curative se fassent durant les heures pointe (17h00 à 21h00).

## 5 Analyse de l'évolution de la consommation d'énergie réactive

L'énergie active fournie par la SONELGAZ est accompagnée d'une quantité d'énergie réactive pouvant aller jusqu'au 50% de l'énergie active.

L'excédent est facturé à l'abonné selon le tarif en vigueur appliqué. Une consommation d'énergie réactive inférieure au seuil de 50% donne lieu à une bonification (**1/5** du coût du KVARh) [21]; par contre une consommation supérieure entraîne une pénalité.

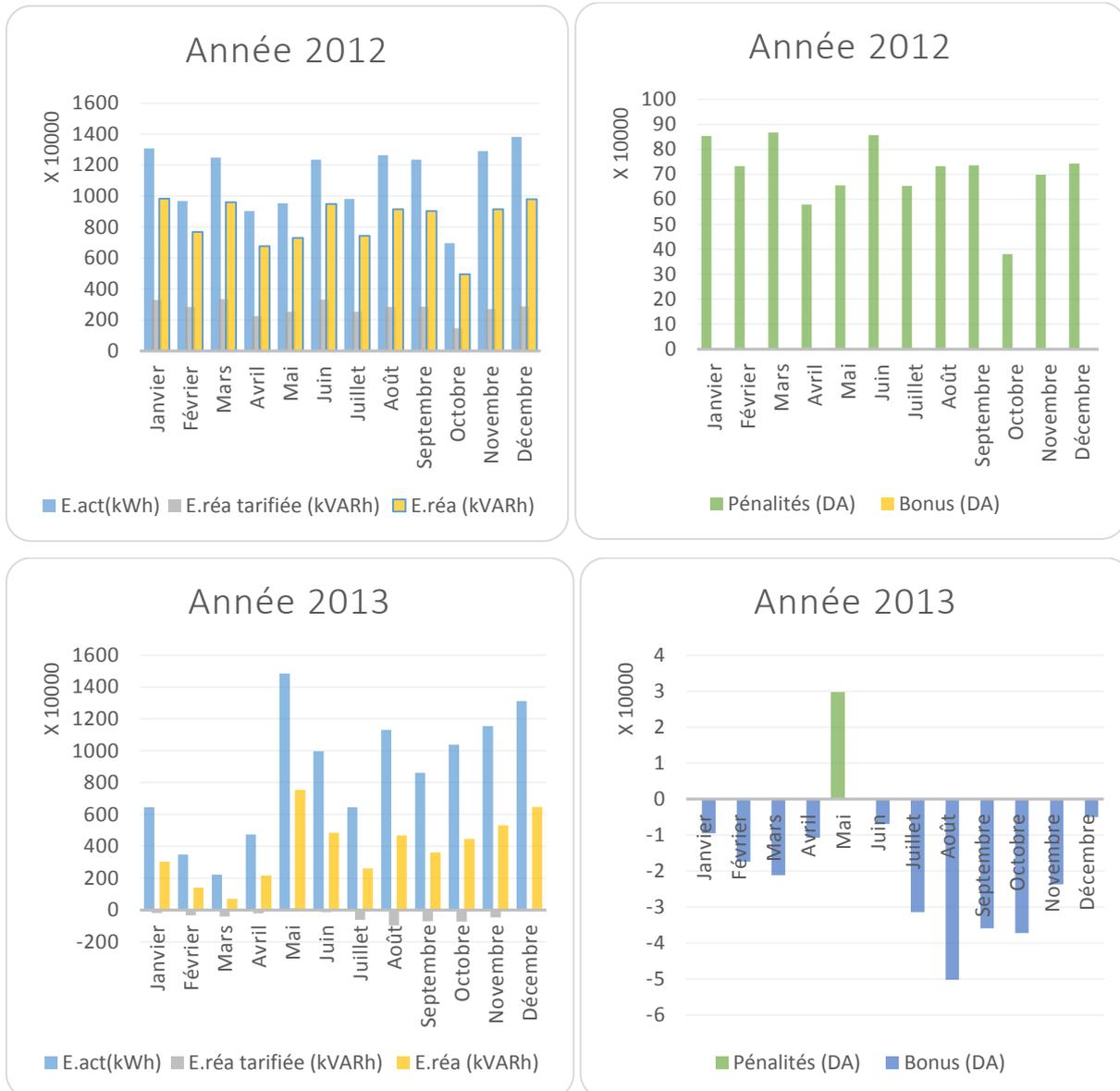
Cet excès de consommation d'énergie réactive est essentiellement dû aux :

- Moteurs mal employés;

## Chapitre 4 : Analyse tarifaire

- Moteur fonctionnant souvent à vide ou moteurs trop puissants fonctionnant à faible charge;
- Éclairage fluorescent non compensé.

La consommation excessive d'énergie réactive engendre non seulement des pénalités financières mais aussi elle provoque la diminution du rendement énergétique des installations et des pertes d'énergie dans les réseaux.



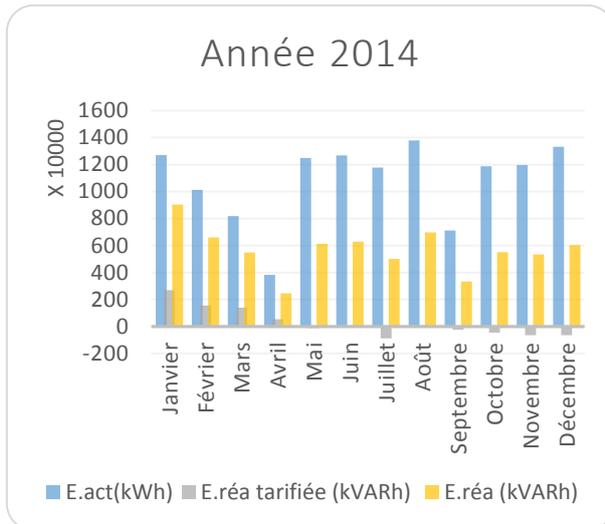


Figure A

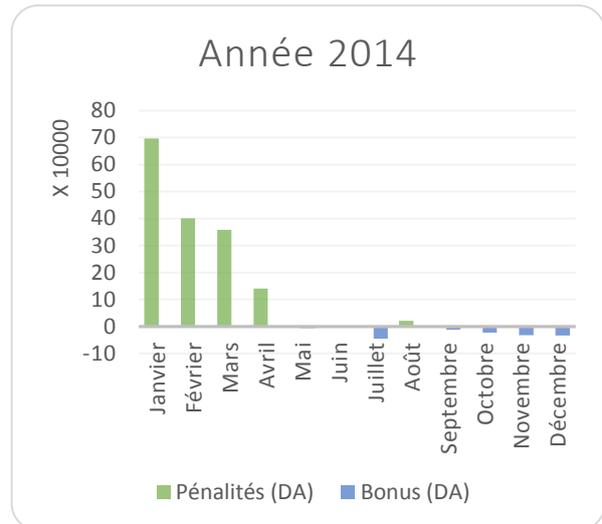


Figure B

Figure 75 : A : Evolution de l'énergie réactive et l'énergie active durant les trois dernières années

Figure 76 : B : Evolution du coût du bonus et de pénalité durant les trois dernières années

Nous remarquons la présence de pénalités sur tous les mois de l'année 2012 et ceci parce que les batteries de compensation n'étaient pas encore installées ce qui a été effectué pendant la rénovation (ICER 2012),

Nous remarquons aussi des pénalités sur plusieurs mois des années 2013 et 2014, celles-ci pouvant être dues au débranchement des batteries de compensation, afin d'éviter ces pénalités il conviendra de prendre certaines dispositions telles que la vérification du fonctionnement des batteries de compensation ainsi que leur bon dimensionnement.

## 6 Choix de la PMD et utilisation de la PMA

La puissance mise à disposition ou PMD est la puissance réservée par Sonelgaz en vertu d'un accord avec l'abonné et que ce dernier peut appeler selon ses besoins. Cette puissance est choisie par l'abonné parmi les valeurs normalisées.

La PMA est la puissance maximale absorbée (appelée) par l'abonné durant un mois et qui est mesurée par un appareil indicateur de puissance. Elle doit être toujours inférieure ou au maximum égale à la PMD.

La puissance mise à disposition (PMD) de 25000KW est la puissance souscrite par la SCMI auprès de la Sonelgaz.

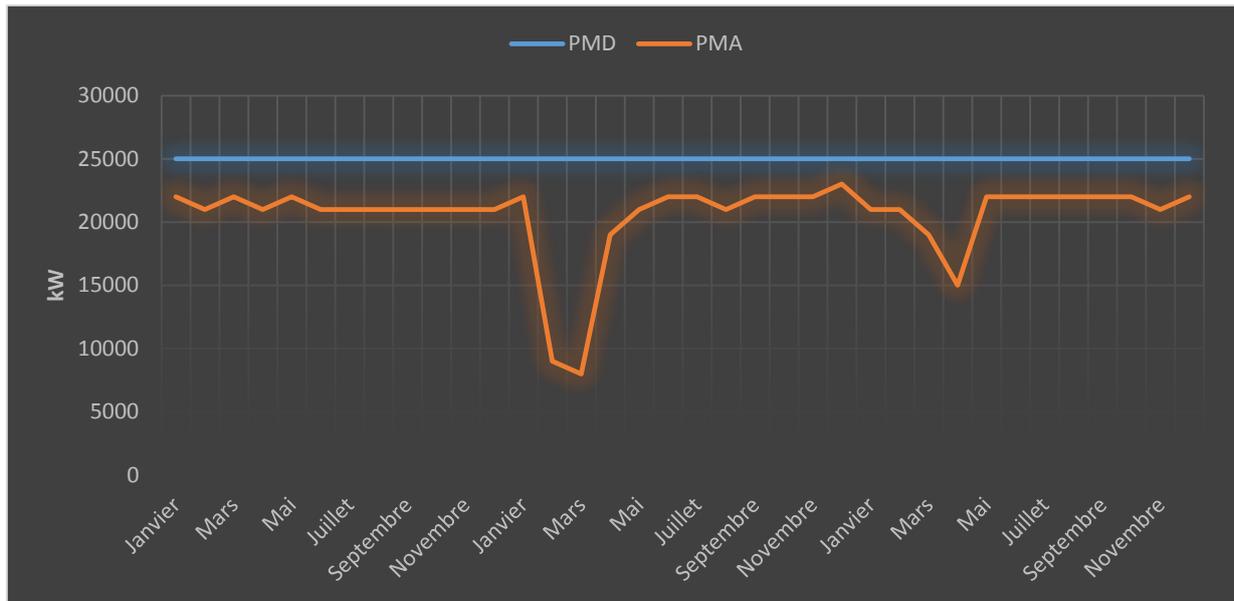


Figure 77 : Évolution de la PMA en fonction de la PMD durant les trois dernières années

En analysant le graphique de la Figure 77 : Évolution de la PMA en fonction de la PMD durant les trois dernières années, de l'évolution de la PMA en fonction de la PMD, nous constatons que la valeur maximale appelée durant ces trois dernières années n'a jamais atteint la puissance mise à disposition.

Durant ces 3 dernières années, le pic a été atteint en décembre 2013 avec 23 000 KW et le minimum en Mars 2013 avec 8 000 KW.

Au premier dépassement de la PMD (25 MW), le client est averti officiellement par Sonelgaz, si un second dépassement est constaté au cours de la période de 12 mois qui suit, la Sonelgaz se réserve le droit de réajuster la PMD à la valeur normalisée supérieure, à savoir 30 MW.

La diminution de la PMD de 25MW à 20MW (valeur normalisée de la PMD) n'est pas envisageable car la PMA dépasse cette valeur.

En comparant les coûts de la PMD et la PMA, on constate que le coût de la PMA est **05** fois plus élevé que le coût de la PMD. Donc il faut que la SCMi évite les pics de consommation ; pour cela il faut éviter le démarrage des gros consommateurs d'énergie en même temps qui peuvent engendrer un fort appel de courant. Il est recommandé, de procéder à des démarrages progressifs et de laisser entre le premier démarrage et le second un minimum de temps de 10 minutes.

## 7 Choix du tarif

Le tarif est un message économique qui s'adresse aux clients. Sa forme doit être adaptée aux besoins de la clientèle. Le souci de donner une signification économique au tarif se traduit par la construction d'une structure tarifaire faisant apparaître des prix de fourniture d'énergie selon le niveau de tension du réseau, selon les divers postes horaires retenus et selon les puissances appelées.

Il s'agit de vérifier dans cette partie, que le tarif 31 qui avait été choisi correspond toujours à l'obtention d'une facture la moins élevée.

La SCMI étant un client Haute tension, des simulations des tarifs 32 et 41 ont été établies afin de les comparer avec le tarif 31 et ceci dans le but d'obtenir le tarif optimal donnant le coût le plus économique et le mieux adapté au mode de consommation actuel de l'usine.

Code tarif	Redevance fixe DA/Mois	Prix de la puissance DA/KW/Mois		Prix de l'énergie active cDA/KWh						Prix de l'énergie réactive cDA/kVarh
		Mise à disposition	Absorbée	Pointe	Pleine	Nuit	Hors Pointe	Jour	Poste Unique	
31	421 177,73	31,61	157,88	550,71	113,85	49,19	-	-	-	25,84
32	421 177,73	84,12	421,15	-	-	-	-	-	114,12	25,84
41	32 227,79	21,54	96,79	726,68	161,47	85,33	-	-	-	25,84
42	429,71	32,25	150,48	726,68	-	-	150,53	-	-	25,84
43	429,71	32,25	128,80	-	-	85,33	-	356,92	-	25,84
44	429,71	32,25	150,48	-	-	-	-	-	313,02	25,84
51	286,44	29,85	-	716,32	191,07	106,37	-	-	-	-
52	66,40	29,85	-	716,32	-	-	157,19	-	-	-
53	66,40	14,81	-	-	-	106,37	-	429,88	-	-
54-1	-	4,37	-	-	-	-	-	-	177,87	-
54-2	-	4,37	-	-	-	-	-	-	417,89	-

Tableau 7-1 : Tarifs à partir du 1er décembre 2005 [22]

Les tableaux suivants représentent : Le coût de l'énergie consommée pour les trois dernières années simulé avec les tarifs 31, 32 et 41.

### 7.1 Tarif 31 :

Pour ce type de tarif, le prix de l'énergie active consommée durant les heures de pointe est dans le rapport de :

- 1 à 5 par rapport à celui du poste heures pleines.
- 1 à 11 par rapport à celui du poste heures creuses.

Ce type de tarif est recommandé aux clients dont la consommation en pointe est inférieure à 10 % (environ) de la consommation totale [22].

	2012	2013	2014
--	------	------	------

## Chapitre 4 : Analyse tarifaire

<b>Horaire</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>
<b>H. creuses (22<sup>h</sup>30 à 06<sup>h</sup>00)</b>	21225308,9	16458814,6	20559872
<b>H. de pointe (17<sup>h</sup>00 à 21<sup>h</sup>00)</b>	121490806	91949983,5	115685612
<b>H. pleines (06<sup>h</sup>00 à 17<sup>h</sup>00) et (21<sup>h</sup>00 à 22<sup>h</sup>30)</b>	79047875,46	60319379,69	76387133,79
<b>Redevance fixe</b>	421177,73	421177,73	421177,73
<b>PMD</b>	9483000	9483000	9483000
<b>PMA</b>	3315480	36786040	39627880
<b>Montant total</b>	<b>234983648</b>	<b>215418396</b>	<b>262164676</b>

Tableau 7-2 : Facture électrique en utilisant le Tarif 31

### 7.2 Tarif 32 :

Ce type de tarif est recommandé aux clients qui ont une très longue durée d'utilisation de la PMD (Sup à 5 000 heures environ) est qui n'opèrent pas d'effacement en pointe [22].

	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
<b>Horaire</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>
<b>Redevance fixe</b>	421177,73	421177,73	421177,73
<b>Poste unique ( 24<sup>h</sup>/24<sup>h</sup> )</b>	153653450,4	117700800	148239623,8
<b>PMD</b>	25236000	25236000	25236000
<b>PMA</b>	107393250	98127950	105708650
<b>Montant total</b>	<b>286703878</b>	<b>241485928</b>	<b>279605452</b>

Tableau 7-3 : Simulation du tarif de l'énergie électrique en utilisant le Tarif 32

### 7.3 Tarif 41 :

Recommandé aux clients importants du secteur industriel, ayant une forte consommation d'électricité durant les heures pleines et les heures creuses [22].

	<b>2012</b>	<b>2013</b>	<b>2014</b>
<b>Horaire</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>	<b>Coût [DA]</b>
<b>Redevance fixe</b>	32227,79	32227,79	32227,79
<b>H. creuses (22<sup>h</sup>30 à 06<sup>h</sup>00)</b>	36819589,5	28551141,5	35665254,7
<b>H. de pointe (17<sup>h</sup>00 à 21<sup>h</sup>00)</b>	160311123,5	121331034,6	152650978,9

<b>H. pleines (06<sup>h</sup>00 à 17<sup>h</sup>00) et (21<sup>h</sup>00 à 22<sup>h</sup>30)</b>	112111203	85549145,7	108337554
<b>PMD</b>	6462000	6462000	6462000
<b>PMA</b>	24681450	22552070	24294290
<b>Montant total</b>	<b>340417594</b>	<b>264477620</b>	<b>327442305</b>

Tableau 7-4 : Simulation du tarif de l'énergie électrique en utilisant le Tarif 41

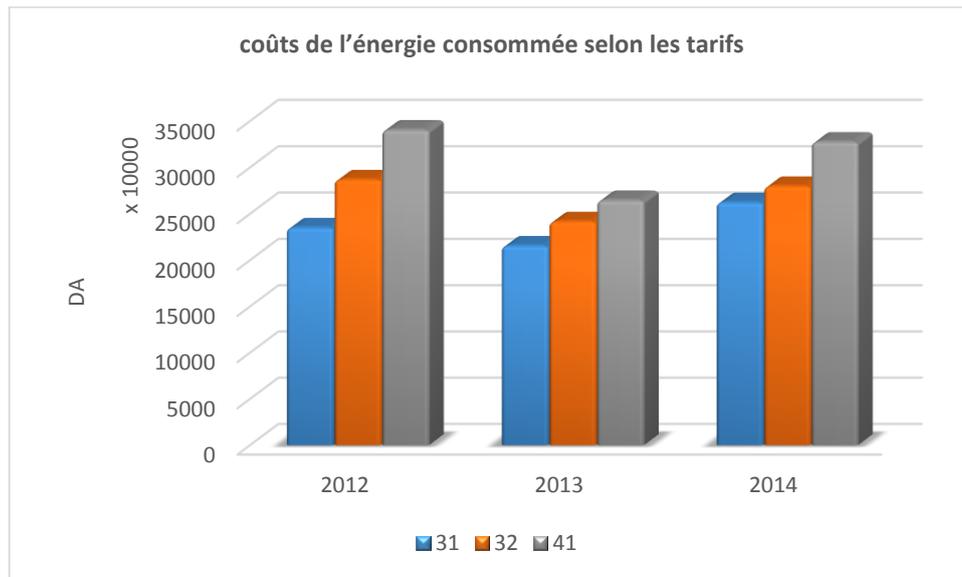


Figure 78 : Comparaison des coûts de l'énergie consommée selon les tarifs

Nous constatons que la facture suivant le tarif 31 est la moins chère, suivie de celle du tarif 32 et pour finir celle suivant le tarif 41.

## 8 Conclusion

Dans ce chapitre nous nous sommes penchés sur la tarification de l'énergie électrique et comme on peut le constater ce volet est très important sur le plan économique nous avons par exemple prouvé les gains importants pouvant être générés en mettant en place un étalement de la consommation électrique vers les plages horaires « creuse et pleine ».

Cette étude nous a permis aussi de constater l'importance de la compensation de l'énergie réactive pour éviter des dépenses supplémentaires dues au malus.

Pour finir nous avons confirmé d'après les résultats de la simulation de plusieurs tarifications « 31 – 32 – 41 », que le tarif 31 est le plus indiqué et le plus économique pour le mode de fonctionnement actuel de la SCMi.

## Conclusion Générale

Dans notre projet de fin d'études nous avons étudié le cas de la cimenterie de Meftah dans le cadre de l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique chez le consommateur, notre choix quant à réaliser l'étude au sein de la cimenterie s'est avéré être juste car nous avons pu déceler plusieurs anomalies à la suite de l'audit énergétique, la multitude d'équipements et le fait qu'il y ait des équipements énergivores accentue la justesse de notre choix car nous avons détecté des harmoniques produits par les variateurs de vitesse à l'atelier APS qui ont engendré plusieurs effets indésirables, mais aussi car on a pu proposer des solutions qui économisent une grande somme d'argent (qui peut atteindre 20 millions de dinars) et d'énergie au pays (1520 tep).

Cela dit, nous aurions voulu prolonger notre étude sur tous les ateliers de l'usine, mais faute de temps et de matériel nous n'avons pas pu le faire, car comme suscité nous n'avons pas pu effectuer des prélèvements sur toute la journée à cause de l'impossibilité d'accès dans les heures tardives aux cellules des ateliers, mais aussi, à cause de l'analyseur de réseau mis à notre disposition par l'agence APRUE qui ne peut effectuer des mesures que sur la basse tension, alors que la plupart des équipements électriques de la cimenterie sont en moyenne tensions 5,5kV, cependant, les mesures et prélèvements que l'on a effectués sont suffisants à notre étude, principalement pour l'atelier où nous avons focalisé notre travail, à savoir l'atelier APS.

Nous avons donc consacré une grande partie de notre travail dans l'atelier APS où l'on a proposé les solutions quant à l'atténuation des harmoniques qui sont en grande partie responsables des différents inconvénients rencontrés dans l'atelier APS et que l'on a cités plus haut, de plus nous avons proposé plusieurs solutions préventives pour éviter la dégradation et le dysfonctionnement des équipements électriques de la cimenterie, ainsi que des simulations appliquant les idées que nous avons proposées pour diminuer de la facture d'électricité d'après laquelle la cimenterie peut économiser des sommes colossales d'argent.

Pour finir ce projet de fin d'études nous a permis de comprendre l'importance de la qualité de l'énergie électrique dans le domaine industriel où nous avons mettre en œuvre nos connaissances tant théoriques que pratiques.

## Références

- [1] G. BOULAARES, «Magister en électrotechnique (METHODES D'ANALYSE DES PERTURBATIONS ELECTRIQUES DANS LA QUALITE DE L'ENERGIE ELECTRIQUE EN UTILISANT DES NOUVELLES TECHNIQUES POUR L'APPLICATION AUX CREUX DE TENSION),» Université de Batna, Batna, 2012.
- [2] V. Ignatova, *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique*, Université JOSEPH FOURIER, 2006.
- [3] I. EL-Baaklini, *OUTIL DE SIMULATION DE PROPAGATION DES CREUX DE TENSION DANS LES RESEAUX INDUSTRIELS*, Institut National Polytechnique de Grenoble, 2001.
- [4] L. L. KHEDER Nazim, *Amélioration de la Qualité d'Energie Electrique*, Alger: Ecole nationale polytechnique, 2013.
- [5] P. Meynaud, *Qualité de la tension dans les réseaux électriques : creux de tension, flicker et harmonique*, technique de l'ingénieur D4 620.
- [6] Jacques Courault - Guillaume de Preville et Jean - louis Sanhet, *Fluctuation de tension et flicker évaluation et atténuation*, technique de l'ingénieur.
- [7] P. Ferracci, *Cahier technique n° 199 : La qualité de l'énergie électrique*, Schneider Electric, 2001.
- [8] D. Fulchiron, *surtensions et coordination de l'isolement*, Cahier Technique Merlin Gerin n° 151, 1992.
- [9] C. SÉRAUDIE, *surtensions et parafoudres en BT -coordination de l'isolement en BT-*, Cahier Technique Merlin Gerin n° 179, 1995.
- [10] H. SALIM, *COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE PAR CONVERTISSEUR STATIQUE.*, ANNABA: Université BADJI-MOKHTAR, 2006.
- [11] CEI, *CEI 61000 2-1 Description de l'environnement Environnement électromagnétique pour les perturbations conduites basse fréquence et la transmission de signaux sur les réseaux publics d'alimentation*, CEI.

- [12] C. C. -. J. L. -. J. Schonek, *Cahier technique n° 152 : Perturbations harmoniques dans les*, Schneider Electric, 1999.
- [13] D. Chapman, *Harmoniques, Causes et Effets*, Copper Development Association, 2002.
- [14] Schneider Electric, *Guide de l'installation électrique*, Schneider Electric, 2010.
- [15] L'Institut de l'énergie et de l'environnement de la Francophonie (AIF)., *Le diagnostic énergétique d'une cimenterie*, Communications Science-Impact.
- [16] Ciments Calcia, «<http://www.ciments-calcia.fr>,» 2015. [En ligne]. Available: <http://www.ciments-calcia.fr/NR/rdonlyres/3EF9953C-F427-4ABF-BB7C-68BB398FE0C5/0/FABRICATIONDUCIMENTDEF.pdf>.
- [17] wikipedia, «<http://fr.wikipedia.org>,» 19 04 2005. [En ligne]. Available: <http://fr.wikipedia.org/wiki/Ciment>. [Accès le 01 04 2015].
- [18] T.benyahiya, «note trimestriel d'information du centre d'étude et de services technologique de l'industrie des matériaux de construction,» p. 4, octobre 2001.
- [19] Emmanuel Fages, *Compétitivité des industriels*, Roland berger, 2014.
- [20] statistiques-mondiales.com, «Algérie,» Avril 2015. [En ligne]. Available: <http://www.statistiques-mondiales.com/algerie.htm>.
- [21] K. MOHAMMED, *Optimisation de la consommation de l'énergie électrique dans les éléments du system d'alimentation*, Annaba: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2007.
- [22] APRUE, *Tarifcation de l'électricité*, Alger: APRUE, 2014.
- [23] SONELGAZ, «BAREMES DES PRIX EN HORS TAXES ABONNES MOYENNE ET HAUTE TENSION,» DIRECTION GENERALE DEVELOPPEMENTS ET SYSTEMES, 2005.
- [24] R. Wierda, *cahiers technique Schneider ct176 : flicker ou scintillement des sources lumineuses*, Schneider Electric, 1995.

# Annexes

# Factures 2014

Décembre	Novembre	Octobre	Septembre	Août	Juillet	Juin	Mai	Avril	Mars	Février	Janvier	
4253498	3827651	3862466	2248556	4389206	3933118	4073702	3907958	1310506	2563574	3380731	4045887	Nuit
2151188	1927705	1920408	1095241	2182721	1792997	2065011	2080289	617028	1394790	1665562	2111690	Pointe
6923454	6224654	6105686	3777883	7230963	6053335	6538187	6500813	1901586	4226526	5068316	6545137	Plaine
6023760	5356430	5500860	3329740	6984600	5069000	6294150	6132880	2460358	5480439	6607243	9047095	Energie réactive
6413110	633575	442420	231100	-83155	880725	44500	111650	2460358	5480439	1549938	2695738	Bonification
25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	PMD
22000	21000	22000	22000	22000	22000	22000	22000	15000	19000	21000	21000	PMA
2092295,666	1882821,527	1899947,025	1106064,696	2159050,431	1934700,744	2003854,014	1922324,54	644637,9014	1261022,051	1662981,579	1990171,815	à payer (nuit)
1187821,63	10616064,21	10575878,9	6031601,711	12020462,82	9874213,779	11372222,08	11456359,55	3398034,899	7681248,009	9172416,49	11629288	à payer (Pointe)
7882352,379	7086768,579	6949046,511	4301119,796	8232451,376	6891721,898	7443725,9	7401175,601	2164955,661	4811899,851	5770277,766	7451638,475	à payer (Plaine)
33142,9	32743,16	22864,27	11943,25	-21487,25	45515,87	2289,42	5770,07	-141034,2	-358657,65	-400503,98	-696578,7	à Payer/Déduire
790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	à payer (PM)
3473360	3315480	3473360	3473360	3473360	3473360	3473360	3473360	2368200	2999720	3315480	3315480	à payer (PMA)
421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	fixe
26517257,4	24112562	24109660,2	16123573,9	27096752,4	23385424,2	25504589,7	25464647,4	9787256,19	17966317,6	21132583,6	25598006	Hors taxes
1856208,019	1687879,343	1687676,211	1128650,175	189672,665	1636979,691	1785321,28	1782525,32	685107,9334	1257572,235	1479280,85	1791860,421	Taxes
26602,8	239600,2	237731,2	142433,6	276057,8	235589	253538	249781,2	76882,4	163697,8	202292,18	254054,28	Taxe sur consommation
28604605,3	26005006,4	26010602,8	17381878,4	29292574,2	25209290,9	27540999,3	27490779,97	10699853,1	19770351,4	23242695,9	28389259,9	Total

# Factures 2013

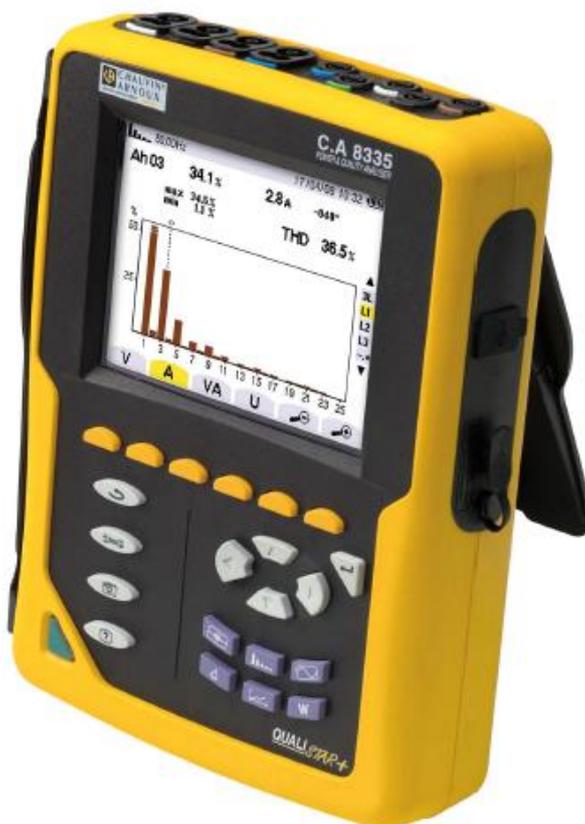
Décembre	Novembre	Octobre	Septembre	Août	Juillet	Juin	Mai	Avril	Mars	Février	Janvier	
4285506	3791093	3328010	2871098	3644949	2135073	3248390	4755496	1579526	712360	1084174	2024001	Nuit
2144278	1852321	1806960	1444983	1718667	892581	1595580	2431118	754958	364750	602415	10888014	Pointe
6687756	5905326	5249040	4295139	5943974	3424426	5133560	7664786	2403176	1139030	1796721	3338515	Plaine
6462410	5315990	4472660	3610960	4683500	2618630	4855730	7540730	2162230	699910	1406480	3041380	Energie réactive
96360	458380	719345	694650	970295	607410	133035	115030	206600	408160	335175	183885	Bonificatio
25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	PMD
23000	22000	22000	22000	21000	22000	22000	21000	19000	8000	9000	22000	PMA
2108040,401	1864838,647	1637048,119	1412293,106	1792950,413	1050242,409	1597883,041	2339228,482	776968,8394	350409,884	533305,1906	995606,0919	à payer (nuit)
11808753,37	10200916,98	9951109,416	7957665,879	9464871,036	4915532,825	8787018,618	13388409,94	4157629,202	2008714,725	3317559,647	5991801,899	à payer (Pointe)
7614010,206	6723213,651	5976032,04	4890015,752	6767214,399	3898709,001	5844558,06	8726358,861	2736015,876	1296785,655	2045566,859	3800899,328	à payer (Plaine)
4979,88	23689,08	37175,75	35899,51	50144,85	31390,95	6875,25	-29723,75	10677,09	21093,71	17321,84	9503,18	à Payer/Dédu
790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	à payer (PMD)
3631240	3473360	3473360	3473360	3315480	3473360	3473360	3315480	2999720	1263040	1420920	3473360	à payer (PMA)
421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	fixe
26373471,7	23473757	22248977,3	18944762,5	22551943,6	14549272	20914247,4	28980905	11881761,6	6130377,99	8528779,43	15473095	Hors taxes
1846143,02	1643162,99	1557428,41	1326133,37	1578636,05	1018449,04	1463997,32	2028663,35	831723,315	429126,46	597014,56	1083116,65	Taxes
262350,8	230974,8	207680,2	172224,4	226151,8	129041,6	199550,6	297028	94753,2	44322,8	69666,2	129010,6	Taxe sur consommation
28476637,1	2532547,5	23974307,9	20404707,8	24303076,4	15663174,3	22570438,9	31338400,77	12796813,7	6581256,98	9176925,82	16675053,9	Total

## Factures 2012

Novembre	Octobre	Septembre	Août	Juillet	Jun	Mai	Avril	Mars	Février	Janvier	
4042394	2314324	4074379	4100543	3148117	3907400	3077226	2912840	3959608	3086144	4185600	Nuit
2034728	1110595	1922819	1959170	1525439	2115105	1594672	1525298	2070180	1697279	2190837	Pointe
6831878	3537081	6347802	6576287	5135444	6327495	4864102	4594862	6454212	4896577	6696563	Pléine
9156000	4953000	9024000	9154000	7436000	9492000	7307000	6757000	9601000	7675000	9839000	Energie réactive
2701500	1472000	2851500	2836000	2531500	3317000	2539000	2240500	3359000	2835000	3302500	Bonification
25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	25000	PMD
21000	21000	21000	21000	21000	21000	22000	21000	22000	21000	22000	PMA
1988453,61	1138415,98	2004187,03	2017057,1	1548558,75	1922050,06	1513687,47	1432826	1947731,18	1518074,23	2058896,64	à payer (nuit)
11205450,6	6116157,72	10589156,5	10789345,1	8400745,12	11648094,7	8782018,17	8399968,62	11400688,3	9347085,18	12065158,4	à payer (Pointe)
7778093,1	4026966,72	7226972,58	7487102,75	5846702,99	7203853,06	5537780,13	5231250,39	7348120,36	5574752,91	7624036,98	à payer (Pléine)
-698067,6	-380364,8	-736827,6	-732822,4	-654139,6	-857112,8	-656077,6	-578945,2	-867965,6	-732564	-853366	à Payer/Déduire
790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	790250	à payer (PM)
3315480	3315480	3315480	3315480	3315480	3315480	3473360	3315480	3473360	3315480	3473360	à payer (PMA)
421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	421177,73	fixe
25498905	15808448,1	24347223,9	24820412,7	20322914,6	25300905,6	20518273,5	19590952,7	25381327,5	20966820,1	26432879,8	Hors taxes
1784923,35	1106591,37	1704305,67	1737428,89	1422604,02	1771063,39	1436279,14	1371366,69	1776692,93	1467677,4	1850301,59	Taxes
258180	139240	246900	252720	196180	247000	190720	180660	249680	193600	261460	Taxe sur consommation
28288940,7	17461269,9	27086835,1	27594681,5	22641628	28236079,7	22847275,67	21762450,8	28336423,7	23411940,9	29457743	Total

Décembre	4341067	2314637	7169296	9789000	2876500	25000	21000	2135370,86	12746937,4	8162243,5	-743287,6	790250	3315480	421177,73	27571459,5	1930002,17	276500	30573279,4
----------	---------	---------	---------	---------	---------	-------	-------	------------	------------	-----------	-----------	--------	---------	-----------	------------	------------	--------	------------

## C.A 8335 QUALISTAR PLUS :



Le C.A 8335 (Qualistar+) est un analyseur de réseau triphasé AC+DC 1000 VRMS catégorie III ou 600 VRMS catégorie IV (IEC 61010-1) à affichage graphique.

Son rôle est triple. Il permet :

De mesurer des valeurs efficaces, puissances et perturbations des réseaux de distribution d'électricité.

D'obtenir une image instantanée des principales caractéristiques d'un réseau triphasé.

De suivre les variations des différents paramètres dans le temps.

L'incertitude de mesure du C.A 8335 est meilleure que 1 % (erreur due aux capteurs de courant non comprise). A cela s'ajoute une grande flexibilité due au choix des différents capteurs pour des mesures de quelques centaines de milliampères (MN93A) à plusieurs kilo ampères (Amp**FLEX**<sup>TM</sup>).

L'appareil est compact et résistant aux chocs. L'ergonomie et la simplicité de son interface utilisateur le rendent agréable et utilisable de façon intuitive.

Le C.A 8335 est destiné aux techniciens et ingénieurs des équipes de contrôle et de maintenance des installations et réseaux électriques.

Les principales mesures réalisées sont :

Mesure des valeurs efficaces des tensions alternatives jusqu'à 1000 V entre bornes.

Mesure des valeurs efficaces des courants alternatifs jusqu'à 6500 A (neutre compris).

Mesure de la valeur continue des tensions et des courants (neutre compris).

Mesure des valeurs efficaces sur demi-période minimale et maximale en tension et courant (hors neutre).

Mesure des valeurs crêtes pour les tensions et les courants (neutre compris).

Mesure de la fréquence des réseaux 50 Hz, 60 Hz.

Mesure du facteur de crête en courant et en tension (hors neutre).

Calcul du facteur K (KF) (application aux transformateurs en présence de courants harmoniques).

Mesure du facteur de distorsion (DF) des courants et des tensions (hors neutre).

Mesure du taux d'harmoniques global (THD) pour les courants et les tensions (hors neutre).

Mesure des puissances actives, réactives (capacitive et inductive) et apparentes par phase et cumulées (hors neutre).

Mesure des facteurs de puissance (PF) et des facteurs de déplacement (DPF) (hors neutre).

Mesure du Flicker court terme des tensions (PST) (hors neutre).

Mesure des énergies actives, réactives (capacitive et inductive) et apparentes (hors neutre).

Mesure des harmoniques pour les courants et les tensions (hors neutre) jusqu'au rang 50 : valeur RMS, pourcentages par rapport au fondamental, minimum et maximum et séquences des harmoniques.

Mesure des harmoniques pour les puissances apparentes (hors neutre) jusqu'au rang 50 : valeur, pourcentage par rapport au fondamental, minimum et maximum.

Mesure des courants de démarrage moteur.

## FLIR T440 :



FLIR T440

T440 est une caméra infrarouge haute performances de la marque FLIR, développée pour les applications électriques et industrielles et intégrant, un écran tactile et la connectivité Wifi, avec des mesures exactes de température (exactitude de  $\pm 2$  °C ou  $\pm 2$  % de la valeur mesurée). Pour une plage de température jusqu'à 1200 °C.