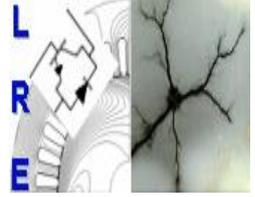


République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



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



Mémoire de
Master en Electrotechnique

Présenté par
KADEM Karim

Intitulé

**Amélioration du facteur de puissance et
harmoniques**

Soutenu le 17 juin 2015 à l'ENP

Membres du Jury d'examen

Président	K. Boughrara	Maître de Conférences à l'ENP
Rapporteur	R.TAHMI	Docteur à l'ENP
Examineurs	M.TEGUAR	Professeur à l'ENP
	A. HELLAL	Professeur à l'ENP

ENP 2015

Résumé :

Nous nous intéressons dans ce travail à l'installation et au dimensionnement des batteries de compensation de l'énergie réactive, à leurs types ainsi que les précautions devant être prise concernant les installations comportant des signaux harmoniques, pour finir nous avons effectué une étude de cas au niveau de l'atelier KHD de la cimenterie de Meftah se trouvant au niveau de la carrière.

Mots clés : Energie réactive, Batteries de compensation, facteur de puissance.

ملخص :

نتطرق في هذا العمل إلى دراسة تركيب و تحديد أبعاد البطاريات المستعملة في تعويض الطاقة الالفاعلة ابتداءً بدراسة نوع البطاريات وجميع أنواع طرق التركيب والأخطار الناجمة عنها، ثم قمنا بدراسة حالة الطاقة الالفاعلة في مصنع " IMCS " كما أجرينا جملة من التقييمات التي أدت إلى إيجاد البطارية المثلى المواتية لهذا المصنع

الكلمات المفتاحية : الطاقة الالفاعلة، البطاريات، معامل الاستطاعة

Abstract

In this work we were interested in the installation of the batteries and their dimensions for the compensation of reactive energy beginning by studying the types of batteries also the types of the installation and the precaution which should be taken.

Key words: Reactive

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

Table des matières

1	Introduction générale.....	1
2	Puissance apparente, active, réactive et facteur de puissance	1
2.1	Puissance Apparente :.....	1
2.2	Puissance active :.....	1
2.3	Puissance réactive :.....	2
2.4	Facteur de puissance	2
	Conséquence d'un mauvais facteur de puissance	3
2.5	Amélioration du facteur de puissance	3
2.6	Types de Compensation.....	4
2.6.1	Compensation globale :.....	4
2.6.2	Compensation partielle :.....	5
2.6.3	Compensation individuelle :.....	6
3	Précautions à prendre en présence d'harmoniques :	7
4	Etude de cas (Compensation de l'atelier KHD) :.....	10
4.1	Batteries de condensateurs nécessaires pour augmenter le $\cos\phi$ à 0,91 :.....	11
5	Compensation et présence d'harmoniques :.....	12
6	Conclusion générale :.....	14
7	Bibliographie.....	15

Liste des figures

Figure 1 : Principe de compensation de la puissance réactive.	3
Figure 2: Compensation globale d'une installation électrique	4
Figure 3 : Compensation partielle d'une installation électrique	5
Figure 4 : Compensation individuelle d'une installation électrique	6
Figure 5 : Forme d'onde en présence d'harmoniques	7
Figure 6: Schéma réel d'une installation [3].....	9
Figure 7 : Schéma équivalent de l'installation [3]	9
Figure 8: filtre passif	10
Figure 9: Concasseur KHD	10
Figure 10: valeur de l'impédance avec et sans filtres passifs [2].....	13

Liste des tableaux

Tableau 4-1 : bilan de puissance de l'atelier KHD	12
Tableau 5-1:Les paramètres des filtres passifs [2]	13

1 Introduction générale

Les trois quantités élémentaires, puissances apparente, active et réactive, sont les principales énergies dans les réseaux électriques. Elles définissent ce qui est créé, transmis, distribués et vendus par les compagnies d'électricité et achetés par les utilisateurs

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

La puissance consommée est composée d'une partie active et d'une partie réactive qui sont les quantités élémentaires de cette puissance :

- La partie "active", qui sera transformée en énergie mécanique (mouvements) ou en chaleur (cas des pertes)
- la partie "réactive" utilisée pour la création des champs magnétiques

L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie "active" ; la partie "réactive" ne peut pas être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

2 Puissance apparente, active, réactive et facteur de puissance

2.1 Puissance Apparente :

C'est la puissance totale fournie à la charge. Elle se mesure en voltampères (VA) et correspond à la somme vectorielle de la puissance active et de la puissance réactive du circuit. L'équation suivante traduit cet énoncé :

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

2.2 Puissance active :

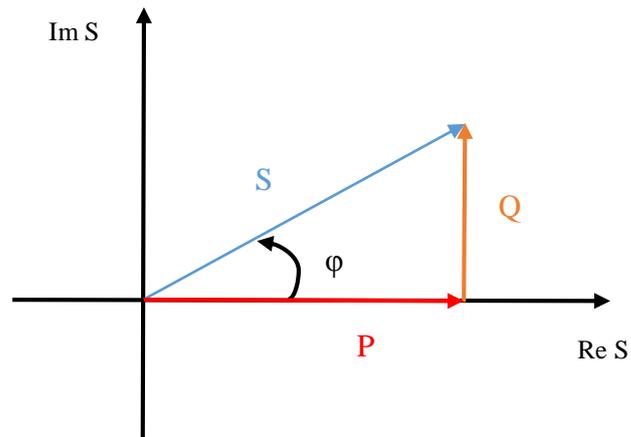
La puissance active correspond à la réalité du travail ou de la chaleur fournie par la charge en tenant compte du déphasage existant entre tension et courant est calculé à partir de la formule suivante et a pour unité le WATT(W)

$$P = V * I * \cos \phi$$

2.3 Puissance réactive :

La puissance réactive est la puissance nécessaire à l'excitation des machines son unité de mesure est le VAR dans le cas des installations mal compensé l'énergie réactive oblige les industrielle a surdimensionné leur installation. Elle est calculée à partir de la formule suivante:

$$Q = V * I * \sin \phi$$



2.4 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est le rapport entre la puissance active et la puissance apparente.

$$Fp = \frac{P}{S}$$

Le facteur de puissance est appelé $\cos \phi$, pour des grandeurs sinusoïdales.

Si le signal n'est pas parfaitement sinusoïdal nous avons alors :

$$Fp = \frac{P}{S} = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}}$$

Avec :

D : puissance déformante qui est généralement due à la présence d'harmoniques à cause de la présence de charges non linéaires.

Il est usage de dire que, 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 [1]

Conséquence d'un mauvais facteur de puissance

Les conséquences d'un mauvais facteur de puissance sont :

- Pénalités financières due a la valeur du facteur de puissance
- Importante pertes en ligne
- Chutes de tensions
- Fort appel de puissance non justifié

2.5 Amélioration du facteur de puissance

L'amélioration du facteur de puissance peut se faire de différentes façons l'important étant de rapprocher la valeur du facteur de puissance le plus possible de un.

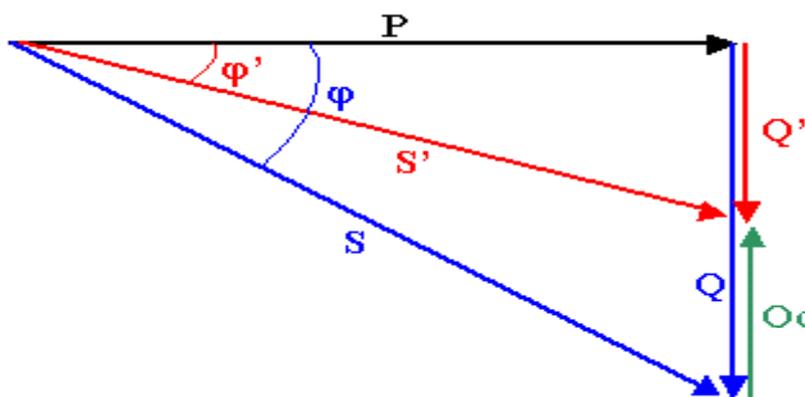


Figure 1 : Principe de compensation de la puissance réactive.

La figure ci-dessus illustre le principe de compensation de la puissance réactive Q d'une installation à une valeur plus faible Q' par la mise en œuvre d'une batterie de condensateurs de puissance Q_c , dans le même temps la puissance apparente passe de S à S' .

$$Q_c = P * (tg\varphi - tg\varphi')$$

Avec :

Q_c : Puissance de la batterie de condensateurs en KVAR ;

P : Puissance active de la charge en KW

$tg\varphi$: Tangente de l'angle de déphasage de l'installation avant compensation ;

$tg\varphi'$: Tangente de l'angle de déphasage après compensation

2.6 Types de Compensation

2.6.1 Compensation globale :

La compensation globale de l'énergie réactive consiste au raccordement de la batterie de condensateur en amont (en tête) de l'installation elle assurera la compensation pour l'ensemble des charges ce type de compensation est généralement appliqué pour une installation simple de moyenne puissance Elle convient lorsqu'on cherche essentiellement à supprimer les pénalités et soulager le poste de transformation, [2].

Avantage :

- Supprimer les pénalités pour consommation excessive d'énergie réactive.
- Ajuster le besoin réel de l'installation et diminuer puissance apparente mise a disposition.
- Soulager le poste de transformation (une partie de l'énergie réactive est fournie par les condensateurs).

Inconvénient :

- Ce mode de compensation ne soulage pas les installations en aval car la totalité du courant réactif est présente dans les câbles jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet joule dans les câbles ne sont pas diminuer.

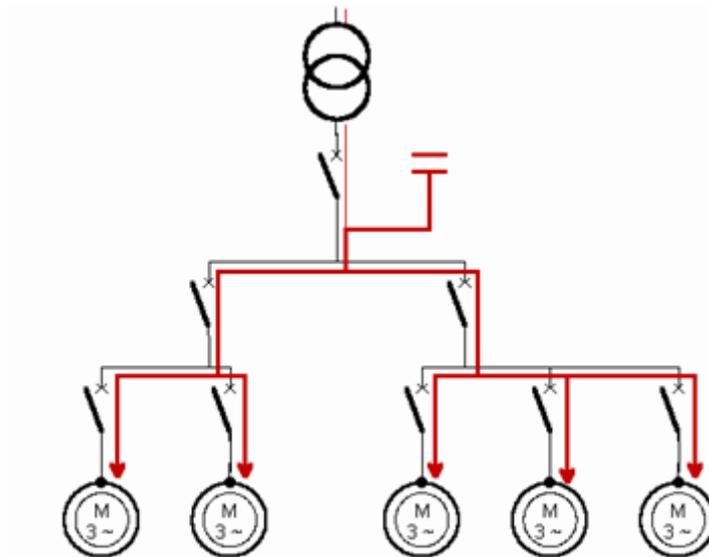


Figure 2: Compensation globale d'une installation électrique

2.6.2 Compensation partielle :

La compensation partielle de l'énergie réactive est réalisée en connectant la batterie de condensateur au niveau du tableau de distribution intermédiaire (ou au niveau de chaque départ de l'atelier) elle fournit ainsi l'énergie réactive nécessaire par atelier ou par groupe de récepteur. Ce mode de compensation est préconisé pour des installations étendues comportant des ateliers dont les régimes de charge sont différents, [2].

Avantage :

- Soulage les câbles alimentant les différents ateliers à partir du transformateur et permet une réduction de leur section.
- Soulage le poste de transformateur.
- Permet un meilleur dimensionnement que la compensation globale et est adapter pour des ateliers fonctionnent a des régimes de charges différents.
- Réduit la puissance apparente de l'installation par rapport a celle correspondante aux charges installées

Inconvénient :

- Prix plus élevé que pour la compensation globale, nécessite un plus grand investissement.
- Présence de courant réactif en aval du tableau de distribution.

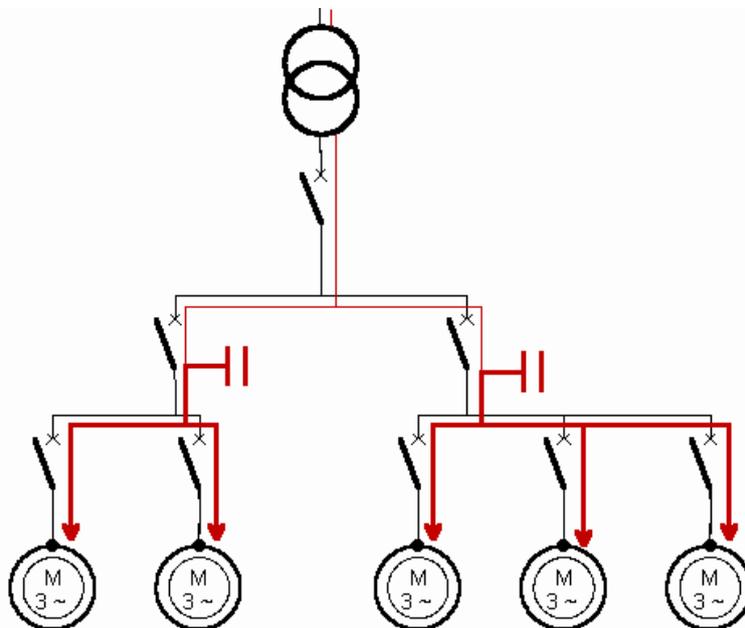


Figure 3 : Compensation partielle d'une installation électrique

2.6.3 Compensation individuelle :

La batterie de condensateurs est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur inductif, et particulièrement des moteurs. Elle convient lorsque la puissance de certains récepteurs est très importante par rapport à la puissance totale, ce type de compensation introduit l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée, [2].

Avantage :

- Réduction des pénalités due à la consommation réactive.
- Réduction de la puissance apparente, économie en terme de choix de la PMD.
- Elimination des pertes joules et réduction des sections des câbles.
- Le courant réactif est pratiquement éliminé des câbles de l'installation.
- Optimisation du réseau électrique car l'énergie réactive est fournie à l'endroit de sa consommation.

Inconvénient :

- Le nombre des batteries nécessaire pour la réalisation de cette compensation étant élevé cette installation nécessite un très grand investissement financier.

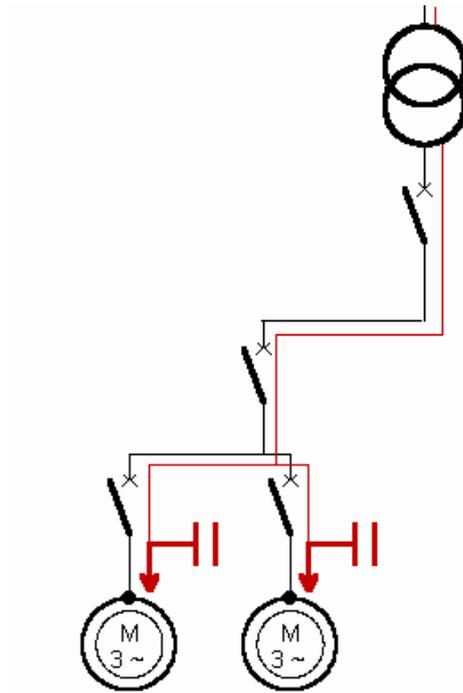


Figure 4 : Compensation individuelle d'une installation électrique

3 Précautions à prendre en présence d'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

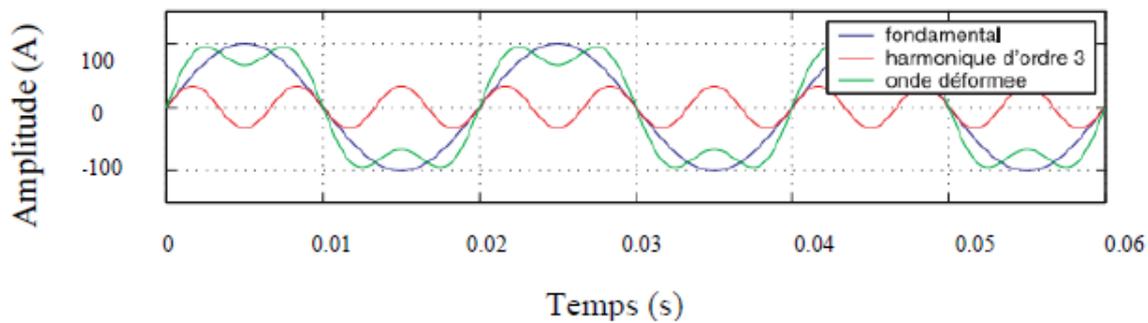


Figure 5 : Forme d'onde en présence d'harmoniques

3.1.1.1 Rang de l'harmonique :

Le rang d'une harmonique est défini comme :

$$n = \frac{f_n}{f_0}$$

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

3.1.1.2 Taux individuel d'harmonique :

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

$$D_n = \frac{f_n}{f_0} * 100\%$$

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

3.1.1.3 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 :

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} y_n^2}}{y_1}$$

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.

3.1.1.4 THD en courant :

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

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}$$

3.1.1.5 THD en tension :

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

$$THD_u = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1}$$

L'association sur les réseaux d'éléments capacitifs et inductifs entraîne l'apparition de phénomènes de résonance. Ceux-ci se manifestent par des valeurs extrêmement élevées ou extrêmement faibles des impédances. Ces variations d'impédance vont modifier les courants et tensions présents sur le réseau.

Considérons le schéma simplifié suivant (voir Figure 6: Schéma réel d'une installation), représentant une installation comprenant :

- un transformateur d'alimentation,
- des charges linéaires,
- des charges non-linéaires génératrices de courants harmoniques,
- des condensateurs de compensation.

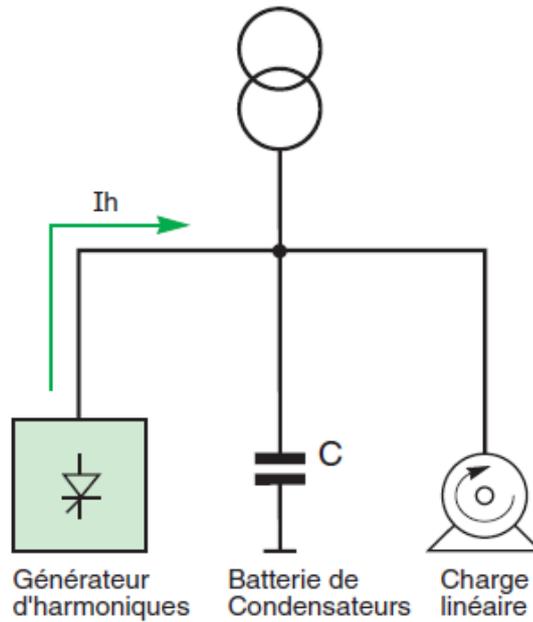


Figure 6: Schéma réel d'une installation [3]

Le schéma équivalent est le suivant :

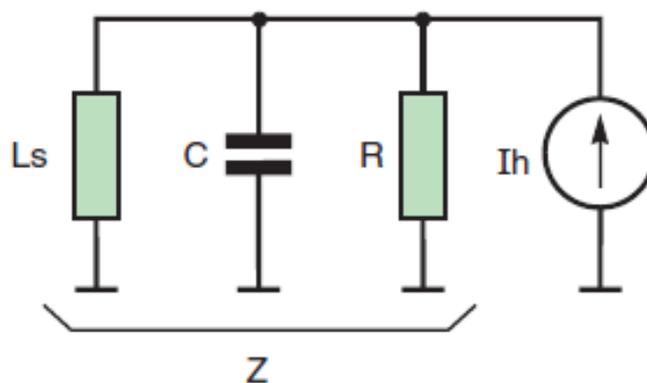


Figure 7 : Schéma équivalent de l'installation [3]

Avec :

L_s = Inductance de l'alimentation (transformateur + ligne)

C = Capacité des condensateurs de compensation

R = Résistance des charges linéaires

I_h = Courant harmonique de rang h

Pour une analyse harmonique, l'impédance Z du schéma équivalent, en négligeant R vaut :

$$Z = \frac{jL\omega}{1 - LC\omega^2}$$

Il y a résonance lorsque le dénominateur $1 - LC\omega^2$ tend vers zéro. La fréquence correspondante est alors appelée fréquence de résonance du circuit. A cette fréquence, l'impédance aura sa valeur maximale. Il y a donc une apparition de tensions harmoniques importantes et donc une

forte distorsion de tension. Ces distorsions de tensions s'accompagnent de circulations de courants harmoniques dans le circuit L + C.

Pour éviter le phénomène de résonance, la solution consiste à ajouter des bobines anti-harmoniques en série avec les condensateurs.

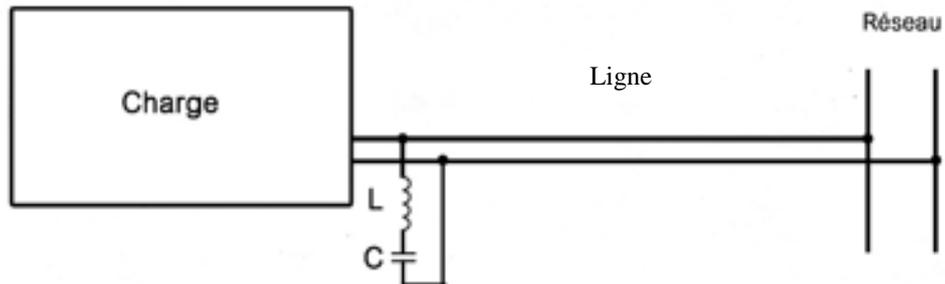


Figure 8: filtre passif

4 Etude de cas (Compensation de l'atelier KHD) :

L'atelier KHD se situe au niveau de la carrière de Meftah, son rôle est le concassage des matières premières issues de la carrière.



Figure 9: Concasseur KHD

L'énergie fournie par Sonelgaz est normalement accompagnée d'une quantité d'énergie réactive pouvant aller jusqu'au 50% de l'énergie active. L'excédent de consommation est facturé à l'abonné selon le tarif en vigueur appliqué.

La SONELGAZ applique un bonus qui correspond au 1/5 du coût du kVArh.

Lors d'une campagne de mesure effectuée au sein de la cimenterie de Meftah nous avons obtenu ce graphique :

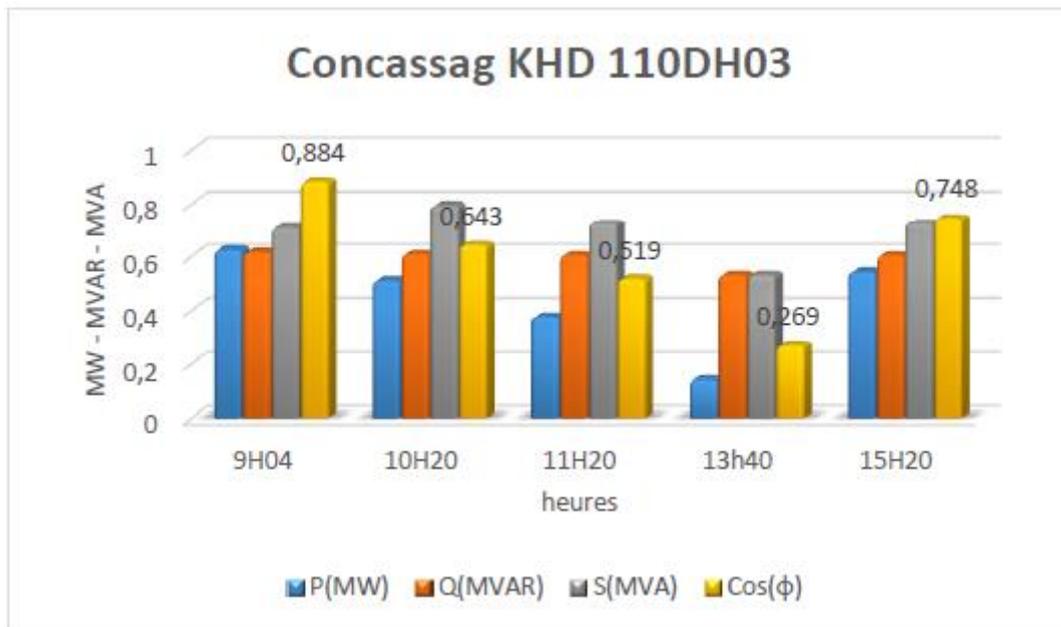


Figure 10 : Résultats campagne de mesure (concassage KHD)

4.1 Batteries de condensateurs nécessaires pour augmenter le Cosφ à 0,91 :

Le calcul de la puissance des batteries de condensateurs sera effectué comme suit :

$$Q_C = P_a [\text{tg}\varphi_1 - \text{tg}\varphi_2]$$

Le tableau suivant illustre les équipements basse tension présents dans l'atelier KHD, ces équipements sont alimentés par un transformateur MT/BT de 1000 kVA.

	tag	P (W)	S (VA)	cos(φ)
Pont roulant	130-01S	18,6	21,8823529	0,85
moteur ventilateur dépoussiéreur	127-03	45	52,9411765	0,85
moteur sas dépoussiéreur	127-03	0,37	0,42045455	0,88
moteur compresseur ER22 air filter		5,5	6,32183908	0,87
Moteur Transporteur T1bis	125-01m	30	34,4827586	0,87
Moteur pompe réfrigérant réducteur1		1,5	1,74418605	0,86
Moteur pompe réfrigérant réducteur1		1,5	1,74418605	0,86
Moteur Transporteur T0bis	123-01m	37	43,5294118	0,85
Moteur 1 racleur T0bis	123-03mr	1,1	1,26436782	0,87
Moteur 1 racleur T0bis	123-02mr	1,1	1,26436782	0,87
TOTAL KHD		141,67	165,595101	0,855

Tableau 4-1 : bilan de puissance de l'atelier KHD

Nous avons donc :

$$Q_c = 21,2 \text{ kVar}$$

Et sachant que

$$Q_c = 3 \cdot U^2 \cdot C \cdot \omega$$

Nous obtenons donc :

$$C = 0,8 \text{ mF}$$

En plus de ces équipements l'atelier concassage comporte d'autres équipements fonctionnant en moyenne tension (5,5 kV) :

- 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

5 Compensation et présence d'harmoniques :

Le tableau suivant donne des valeurs typiques d'un système utilisant des filtres passifs pour l'élimination du 5ème, 7ème, 11ème, 13ème harmoniques et un filtre passe haut à partir de la fréquence 850 Hz [4].

Nous avons choisi ce tableau car nous sommes dans l'incapacité de calculer la valeur de l'impédance de l'atelier KHD « données manquantes »

	L(mH)	C(μ F)	R(m Ω)	kVAR
Système	2.8	-	-	
Filtre du 5 ^{ème} harmonique	$9.80 \pm 2\%$	$42.8 \pm 3\%$	760	13800
Filtre du 7 ^{ème} harmonique	$5.85 \pm 2\%$	$36.4 \pm 3\%$	630	10200
Filtre du 11 ^{ème} harmonique	$3.07 \pm 2\%$	$27.8 \pm 3\%$	520	7800
Filtre du 13 ^{ème} harmonique	$2.19 \pm 2\%$	$27.8 \pm 3\%$	440	7800
Filtre passe haut (17 ^{ème} harmonique)	$1.28 \pm 2\%$	$27.8 \pm 3\%$	25000	7800

Tableau 5-1: Les paramètres des filtres passifs [4]

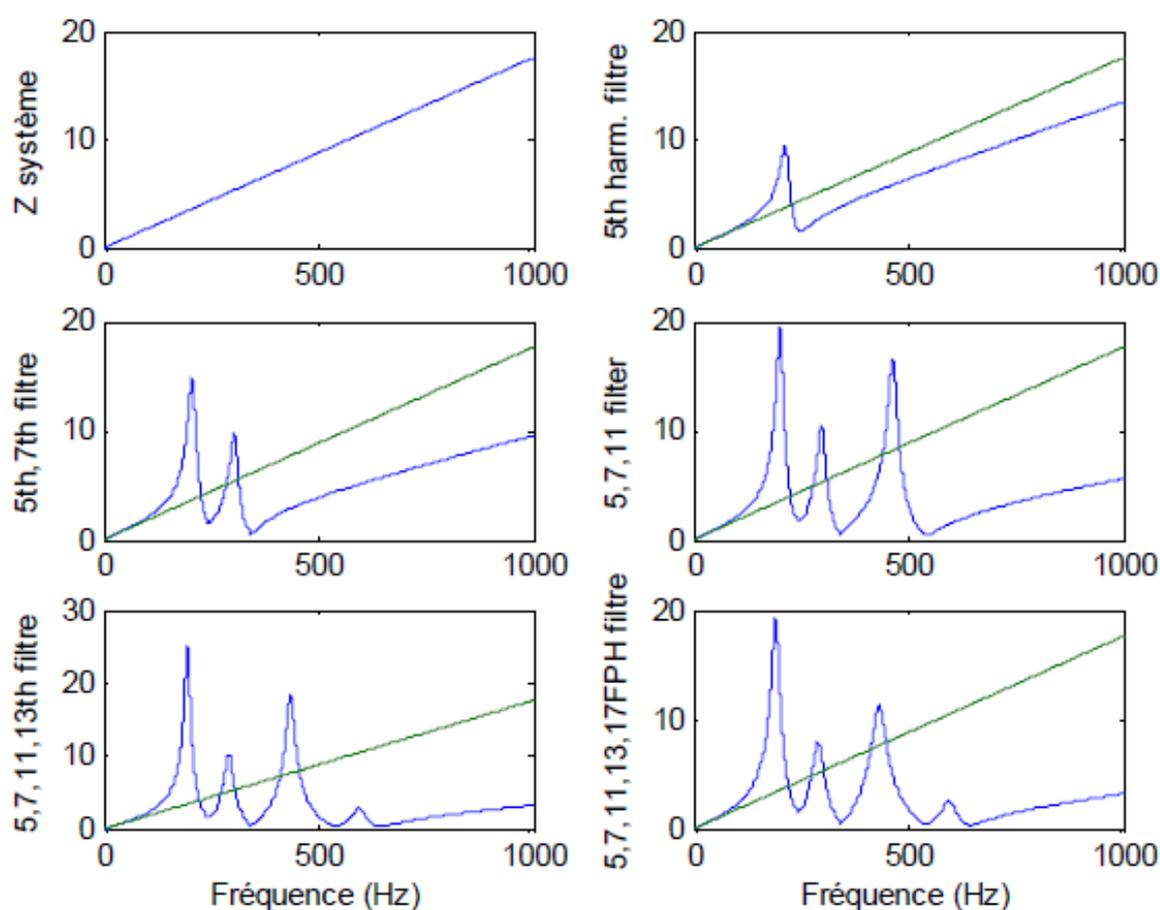


Figure 11: valeur de l'impédance avec et sans filtres passifs [4]

6 Conclusion générale :

Lors de ce travail nous nous sommes intéressés à la puissance réactive et à l'impact d'une surconsommation de celle-ci.

Puis nous nous sommes dirigés vers la réduction de cette consommation par l'installation de batteries de condensateurs, les types d'installations ainsi que les précautions à prendre en présence d'harmoniques.

Pour finir nous avons effectué une étude de cas au sein de l'atelier KHD de la cimenterie de Meftah et nous avons proposé une compensation de l'énergie réactive qui permettra d'avoir un $\cos \varphi = 0.91$.

Grace à cette étude nous avons pu juger l'importance qu'occupe le facteur de puissance au sein des industries

7 Bibliographie

- [1] H. SALIM, *COMPENSATION D'ENERGIE REACTIVE PAR CONVERTISSEUR STATIQUE.*, ANNABA: Université BADJI-MOKHTAR, 2006.
- [2] Schneider Electric, *Guide de l'installation électrique*, Schneider Electric, 2010.
- [3] P. Ferracci, *Cahier technique n° 199 : La qualité de l'énergie électrique*, Schneider Electric, 2001.
- [4] K. ABDELLAH, *MEMOIRE de Magister "COMPENSATION ACTIVE DES PERTURBATIONS DANS UN RESEAU BASSE TENSION"*, Boumerdes, 2004.