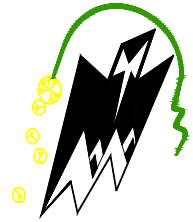


**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU
Faculté de Génie Electrique et Informatique
Département d'Electrotechnique**



**Mémoire de Fin d'Etudes
De MASTER ACADEMIQUE
Filière : Electrotechnique**



Spécialité : Electrotechnique Industrielle

**Présenté par :
FTENANE Mohamed
ABOUAHI Naima**

Thème :

***Amélioration du facteur de puissance
de la cimenterie de Meftah (Alger)***

Mémoire soutenu publiquement le 27/01/2021 devant le jury composé de :

Mr Slimane REZGUI
M.C.B, UMMTO, Président.

Mr Djaffar BOUGUEDAD
M.C.A, UMMTO, Encadreur.

Mr Sofiane NAIB
Ingénieur, Cimenterie de Meftah, Co-Encadreur.

Mr Farid NAMANI
M.A.A, UMMTO, Examineur

Remerciements

Nous remercions tout d'abord « DIEU » tout puissant de nous avoir donné la santé et le courage d'effectuer ce projet de fin d'étude, dans des conditions sévères dues à la crise sanitaire (Virus COVID-19).

Comme nous tenons à adresser toutes autres reconnaissances et notre gratitude à :

*Mr **Djaffar BOUGUEDAD** notre directeur de projet, de nous avoir encadrés, suivi et orienté tout au long de travail.*

*Notre Co-encadreur Mr **Naib Sofiane**, ingénieure au niveau du bureau d'études « Electrotechnique » en premier lieu pour son accueil chaleureux, ses conseils sa disponibilité et pour le temps qu'il nous a consacré tout au long de cette période de stage. On remercie **Djilali MELLAL**, ainsi que tous les membres de service personnel de la société des ciments de la Mitidja (SCMI). Nous remercions d'avance, les membres du jury d'accepter d'examiner notre travail.*

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

Sommaire

Plan : Schéma unifilaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre I : PRESENTATION GENERALE DE LA CIMENTERIE

Introduction	03
I.1 Présentation de la SCMI	03
I.1.1 Historique	03
I.1.2 Localisation	03
I.1.3 Activités et objectifs attendus	04
I.2 Processus et étapes de fabrication du ciment	04
I.2.1 Les constituants du ciment	04
I.2.2 Processus de fabrication du ciment	05
I.2.2.1 Zone de carrière	05
I.2.2.2 Zone crue	07
I.2.2.3 Zone cuisson	10
I.2.2.4 Zone ciment	11
I.2.2.5 Zone expédition	13
I.3 L'analyse du processus de fabrication du ciment	14
I.3.1 Zone Broyeur cru	14
I.3.2 Zone cuisson	15
I.4 Schéma général du processus	18
Conclusion	18

Chapitre II : BILAN DE PUISSANCE

Introduction	19
II.1 Détermination des puissances	19
II.1.1 Puissance instantanée	19
II.1.2 Puissance active	20
II.1.3 Puissance réactive	20
II.1.4 Puissance apparente	21
II.1.5 Facteur de puissance	21
II.1.6 Puissance installée	21
II.1.7 Puissance d'utilisation	22
II.2 Ordre de grandeur des coefficients K_u , K_s et K_e	23

II.3 Evaluation du bilan de puissance de la cimenterie	23
Conclusion	26

Chapitre III : COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE

Introduction	27
III.1 But de la Compensation de l'énergie réactive	27
III.2 Inconvénient d'un mauvais $\cos\varphi$	27
III.3 Coût de l'énergie à cause d'un mauvais $\cos\varphi$	29
III.4 Déterminer l'équipement de compensation	30
III.4.1 Puissance réactive à installer	30
III.4.2 Mode de compensation	30
III.4.2.1 Par batteries de condensateurs à régulation automatique	31
III.4.2.2 Par condensateurs fixes	31
III.4.2.2.a Compensation globale	31
III.4.2.2.b Compensation partielle	32
III.4.2.2.c Compensation local	33
III.4.3 Types d'équipement de compensation	33
III.5 Harmoniques	34
III.6 Calcul de la puissance réactive à compenser	35
III.7 Calcul de la capacité	36
III.8 Calcul du courant après compensation	37
Conclusion	38

Chapitre IV : DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Introduction	39
IV.1 Méthode du choix et de calcul des sections	39
IV.1.1 Courant fictif I_z	39
IV.1.2 Le facteur de correction K	40
IV.1.3 Dimensionnement du conducteur neutre	47
IV.1.4 Détermination de la chute de tension	47
IV.2 Choix et calcul des sections	50
IV.3 Choix des transformateurs	58
IV.3.1 Choix du diélectrique et de la technologie	58
IV.3.1.1 Transformateurs de type sec enrobé	58
IV.3.1.2 Transformateurs de type immergé	58

IV.3.2 Importance du dimensionnement	59
IV.3.3 Méthode de dimensionnement	60
IV.3.4 Choix final de la puissance du transformateur	61
IV.3.5 Prise en compte des surcharges	61
IV.3.6 Dimensionnement du transformateur	61
Conclusion	62
Conclusion générale	63
Références bibliographiques	

INTRODUCTION

GENERALE

INTRODUCTION

Le niveau de développement d'un pays se mesure par le degré de l'évolution de modernisation de son réseau électrique, il doit garantir une sûreté de fonctionnement pour assurer une continuité de service car l'énergie électrique constitue un élément primordial pour le secteur industriel.

Face à une consommation importante d'électricité et à des conditions d'environnement très contraignantes, les réseaux d'énergie électrique ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Le transit de cette puissance à travers les éléments du réseau produit non seulement des chutes de tension dans les conducteurs mais aussi des pertes actives par effets joule: Les pertes actives réduisent le rendement global des réseaux et les chutes de tension sont néfastes au maintien d'une bonne tension que doit le distributeur à ses clients.

La plupart des charges sont de type inductif telles que les machines électriques qui mettent en jeu deux formes d'énergie : L'énergie active qui se transforme intégralement en puissance mécanique (travail) et en chaleur (pertes) et l'énergie réactive qui sert essentiellement à l'alimentation des circuits magnétiques de ses dernières.

L'analyse des consommations en électricité pour chaque client par fournisseur. Lorsque la consommation de l'énergie réactive dépasse la moitié de l'énergie active, il est appliqué une pénalisation financière qui est proportionnelle à la quantité de l'énergie réactive consommée. Or dans le cas contraire, c'est une bonification, et cette fois ci, il s'agit d'un montant à déduire de la facture.

Pour étudier une installation, la connaissance de la norme est un préalable. Le mode de fonctionnement des récepteurs (régime normal, démarrage, simultanéité, etc.), et la localisation, sur le plan du ou des bâtiments, des puissances utilisées permettent de réaliser un bilan des puissances installées et utilisées, ainsi que, d'en déduire la puissance et le nombre des sources nécessaires au fonctionnement de l'installation.

L'énergie réactive est consommée par les récepteurs, tels que les transformateurs, les moteurs, les ballasts de tubes fluorescents, etc. Pour compenser celle-ci, il est nécessaire de fournir l'énergie réactive à la place du réseau de distribution par l'installation d'équipements de compensation. Les équipements de compensation permettent de diminuer cette consommation afin de limiter, voire d'annuler, les pénalités appliquées par le fournisseur d'énergie dès lors que le $\cos\varphi$ de l'installation est inférieur à 0,93.

INTRODUCTION GENERALE

Nous nous sommes intéressés au réseau industriel, et précisément à l'un des clients les plus consommateur d'énergie électrique. Ainsi, le thème de notre mémoire s'articule autour de l'amélioration du facteur de puissance pour la cimenterie de Meftah. Ce thème a l'avantage d'être un sujet d'actualité, dans la mesure où, il préoccupe les investisseurs dans le domaine industriel.

En premier chapitre, nous commencerons par une présentation générale de l'usine et de son activité principale.

Ensuite, nous aborderons le 2^{ème} chapitre qui sera consacré à l'établissement du bilan de puissance pour toutes les unités de l'usine, le résultat de ce bilan, serait la base de la suite de l'étude.

Les sujets ayant traités à la compensation de l'énergie réactive qui doit prendre en compte les normes liées aux moyens à utiliser, au choix de l'emplacement qui dépendra des résultats de certain paramètre et afin à l'aboutissement à une solution efficace et surtout économique, constituent des points qui seront traités au niveau du 3^{ème} chapitre.

Le 4^{ème} chapitre sera réservé au traitement du dimensionnement des sections des câbles et le choix du transformateur ou il faut tenir compte de la puissance apparente S (kVA) réelle consommée et prévenir toute éventuelle extension.

En fin, notre travail terminera par une conclusion où sont portées certaines recommandations intéressant notre sujet.

CHAPITRE I

Introduction

Le ciment est obtenu au terme d'un processus de fabrication précis, la majorité des cimenteries modernes utilisent le procédé dit « *en voie sèche* », considéré le plus économique en matière de consommation d'énergie. C'est le procédé que nous retiendrons pour la suite du travail.

Dans ce chapitre, nous allons présenter la société accueillante en l'occurrence la SCMI ainsi que les différentes étapes de la production de ciments.

I.1 Présentation de la SCMI

I.1.1 Historique

L'histoire de la création de la cimenterie de MEFTAH revient à des années avant l'indépendance d'où le nom d'une compagnie française (nord-africaine des matériaux de construction).

La SNMC a décidé de construire une nouvelle cimenterie à MEFTAH prévue pour une production de 1 million de tonnes de ciment par an. Le projet s'est inscrit dans le cadre du plan quadriennal 1970-1973. Elle a été individualisée par décision N°71-20 DI du mois de mars 1971.

Dans ce cadre, la formule de réalisation retenue est « du lot par lot ». Son coût s'est élevé à 680.000.000DA au lieu de 336.000.000 DA.

I.1.2 Localisation

La société du ciment de Mitidja (SCMI) est située à 27 km d'Alger, 20 km au sud Est de la ville d'Alger et à 2 km du village de MEFTAH. Elle renferme les gisements de calcaire et d'argile utilisés dans la fabrication du ciment, elle est localisée à proximité de la route nationale N°29, reliant la commune de MEFTAH à celle de KHEMIS-EL-KHECHNA à l'Est, et l'ARBAA à l'Ouest. Son début d'activité a été caractérisé par les étapes suivantes :

- Le 31 janvier 1975 constitue la date de mise en service de l'atelier cru, par démarrage ;
- Le 06 mai 1975 est la date de l'allumage du four ;
- En fin le 01 septembre 1975, la date réelle du début de l'opération de production du ciment.

La superficie de l'usine est de $429601 \text{ m}^2 = 43 \text{ hect}$, dont :

- Chaîne de fabrication : 40327 m^2 .
- Bâtiment administratif : 620 m^2 .
- Magasin : 1450 m^2 .
- Bâtiments sociaux : 1400 m^2 .



Figure I.1 : Vue générale de la SCMI

I.1.3 Activités et objectifs attendus

La société des ciments de la Mitidja (S.C.M.I) Comprend 647 salariés, dont la principale activité étant la production et la commercialisation des ciments.

La cimenterie de MEFTAH a été conçue pour produire 3.000 Tonnes de ciment par jour et 1 Million de Tonnes par an. Elle est chargée essentiellement des missions suivantes :

- Assurer la production du ciment selon les objectifs assignés.
- Gérer et maintenir les moyens de production.
- Gérer les ressources humaines.
- Informer et communiquer les informations comptables et les rapports périodiques d'activités à la direction.

I.2. Processus et étapes de fabrication du ciment

I.2.1 Les constituants du ciment

La fabrication du ciment exige la combinaison entre les matières premières nécessaires notamment, le calcaire, l'argile, le sable, le minerai de fer. Ces différentes matières premières sont broyées à l'aide d'un concasseur et sont transportées vers la cimenterie. L'homogénéisation de ce premier mélange se fait dans un broyeur à boulet pour être broyées et séchées. Il est ensuite envoyé vers un four rotatif où il est chauffé à 1450°C à fin d'obtenir le clinker. Les granulés de clinker sont

introduits dans le broyeur à boulet avec des ajouts (gypse, tuf) où ils sont broyés de nouveau et d'une manière très fine en vue de donner le produit final qui est le ciment.

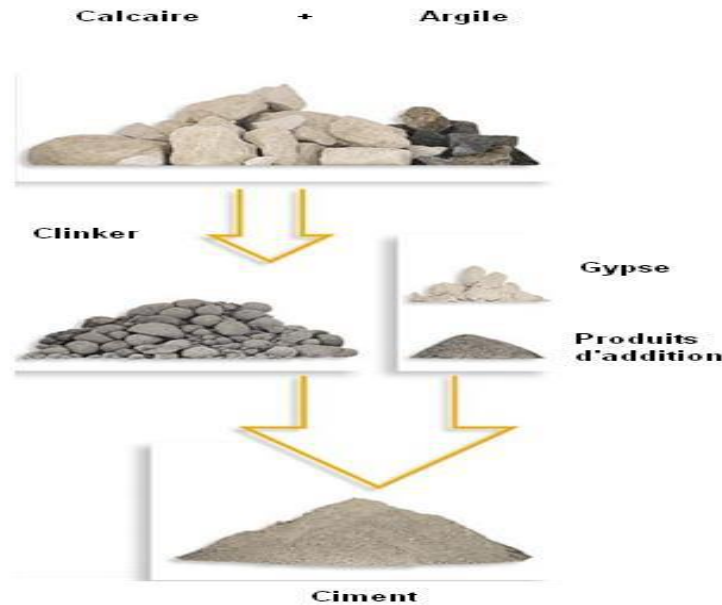


Figure I.2 : Les matières premières pour la fabrication du ciment.

I.2.2 Processus de fabrication du ciment

Avant d'arriver au produit fini, un mélange de matières premières va passer par différentes phases durant lesquelles il va subir une transformation chimique et cristalline importante. Le processus de la fabrication et de l'expédition du ciment comprend cinq zones principales qui peuvent être résumées dans ce qui suit :

I.2.2.1 Zone de carrière

Les matières premières (calcaire, Argile) qui entrent dans le cadre de l'opération fabrication du ciment sont extraites des gisements de carrières (à ciel ouvert), et cela en passant par deux étapes :

- **L'extraction des matières premières**

L'argile et le calcaire sont prélevés des parois rocheuses à la pelle mécanique, par abattage à l'explosif, les roches sont rassemblées par un bulldozer ensuite chargées dans des camions et transportées vers leurs trémies respectives.

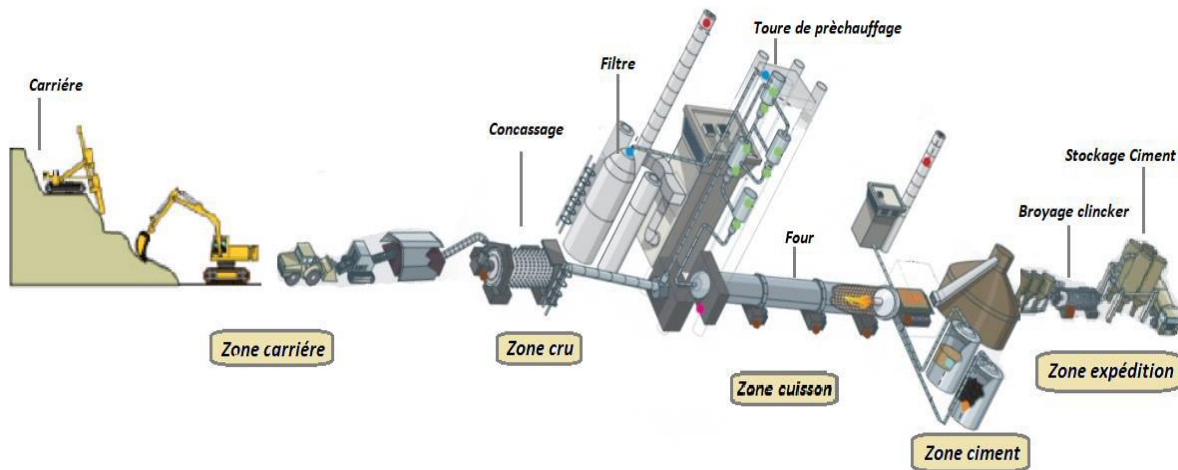


Figure I.3 : La ligne de production du ciment



Figure I.4 : Transport et décharge de calcaire et argile.

- **Concassage**

C'est une opération destinée à la réduction des blocs obtenus pendant l'extraction ; une fois que ces derniers soient déchargés, ils sont dirigés à l'aide d'un ATM1 vers deux concasseurs de type KHD 1000 T/h et FCB 450 T/h, comme on peut le constater dans la figure (I.5).

Après l'opération de concassage les matières premières sont transportées à l'usine par des tapis roulants pour être stockées dans deux halls sous forme de tas : hall calcaire et hall ajouts (Argiles, sable, fer).

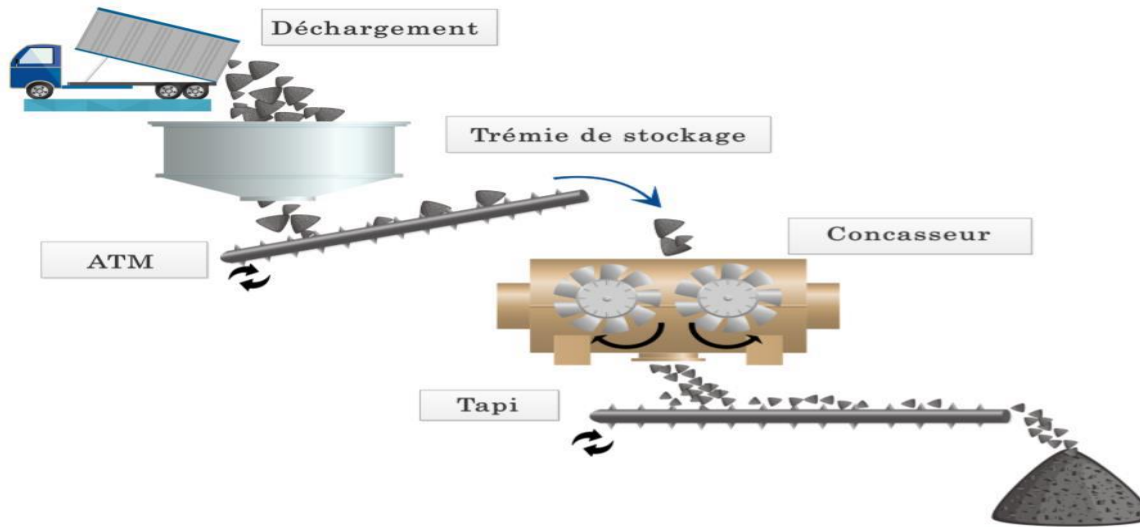


Figure I.5 : Schéma explicatif le déchargement et le concassage.

I.2.2.2 Zone crue

La zone crue reçoit les matières premières concassées en amont pour les transformer en farine, elle est destinée à l'alimentation du four.



Figure I.6 : Zone Cru

a. La pré-homogénéisation

En général, deux constituants sont utilisés pour la préparation du cru à savoir le calcaire et l'argile. Après le concassage de ces deux constituants de base, on obtient une granulométrie

inférieure à 25 mm. Ensuite, les deux composants sont acheminés vers l'usine par des transporteurs couverts, puis les matières premières sont stockées dans deux halls de pré homogénéisation.

- **Hall calcaire**

Le grateur portique (à palettes) sert à gratter le calcaire en se déplaçant en translation de tas en tas et jette la matière sur le tapis pour la transporter à la trémie calcaire.

- **Hall ajouts**

Il existe deux grateurs semi portiques (à palettes) qui servent à gratter les ajouts (argile, sable, fer), il déverse les produits sur les bandes transporteuses jusqu'aux trémies (les tapis T6, T7, T8, T9 et T11).

Il existe 4 trémies (calcaire, fer, argile, sable), le dosage de ces différents constituants du ciment est comme suit :

- Calcaire 80%
- Argile 20%
- Sable 2%
- Fer 1%

Le produit est acheminé par le transporteur (tapis T13) vers le broyeur à marteau qui sert à concasser la matière.

b. Pré-broyage et séchage (APS)

L'intérêt de l'Atelier de Pré-broyage et Séchage (APS) est la diminution du taux d'humidité des matières, surtout celui du calcaire et de l'argile (de 10% jusqu'à 7%), et ce grâce au « *circuit gaz* », qui permet de refouler l'air chaud du four dans la tour de conditionnement ainsi que le concasseur, de manière à chauffer la matière afin qu'elle puisse être broyée.

L'exception du sable, qui est versé directement dans le broyeur sans passer par l'APS, les trois autres matières sont versées par le biais des doseurs sur un tapis menant vers les trémies du concasseur à marteaux.

Le mélange est aspiré par des ventilateurs à air chaud vers le séparateur électrostatique qui a pour rôle de séparer la matière de différentes granulométries :

- Les grosses particules de refus sont dirigées vers le broyeur à boulets.
- Les fines particules sont envoyées vers le stockage (silos d'homogénéisation)

c. Broyage cru

Toutes les grosses particules de refus issues du séparateur statique, en plus du sable, passent dans le broyeur à boulets. L'élévateur à godets 2 transporte la matière broyée vers le séparateur dynamique où le produit tourne à vitesse continue sur un plateau dispersé, les grosses particules (rejet) tombent sur l'Aéroglossière 3 et redirigées vers le broyeur à boulets pour être broyées de nouveau, tandis que, les petites particules sont envoyées vers les silos de stockage. La figure (I.7) ci-dessous résume le fonctionnement de l'APS et le broyage cru.

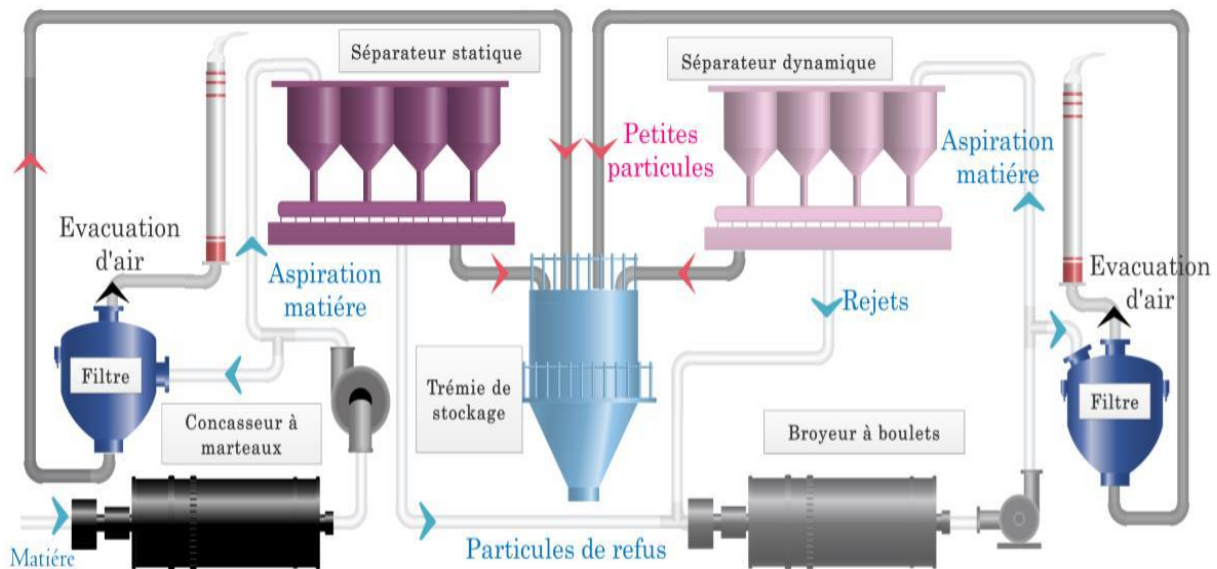


Figure I.7 : Schéma explicatif de l'APS et le broyage cru.

d. Homogénéisation

Le produit sera mélangé dans les silos H1, H2 pour être prêt au stockage. La capacité de stockage de chaque silo est de 10 000 T. Chaque silo est équipé de deux sorties latérales pouvant assurer la totalité du débit farines vers le four.



Figure I.8 : Atelier d'homogénéisation

I.2.2.3 Zone cuisson

Au cours du cycle de fabrication du ciment, la zone cuisson reçoit la farine en amont pour la transformer en clinker en aval, cela ne se fait qu'en passant par plusieurs étapes.



Figure I.9 : Zone cuisson

a. Préchauffage

La matière crue est introduite dans une tour de préchauffage à 800°C avant de rejoindre le four rotatif vertical où elle est portée à une température de 1450°C.

Le préchauffage se fait dans une série de cyclones, disposés, verticalement, sur plusieurs étages, appelée « préchauffeur ». La matière froide, introduite dans la partie supérieure, se réchauffe au

contact des gaz. D'étage en étage, elle arrive partiellement décarbonatée, jusqu'à l'étage inférieur, à la température d'environ 800°C.

b. *Le four rotatif*

La cuisson se produit dans le four, ce dernier est constitué de la zone de décarbonatation (900°C), la zone de transition (1050°C) et la zone de cuisson (1450°C) à cette température appelée température de clintélisation, des réactions physicochimiques se produisent et donnent lieu à la formation d'un produit qu'on appelle le clinker.

c. *Le refroidissement*

A la sortie du four, il y a le refroidisseur à grilles, dont chaque grille est constituée de deux (2) chambres une fixe et l'autre mobile, les grilles sont inclinées à 3 degrés et animées d'un mouvement de va et vient à l'aide d'un vérin à double effet.

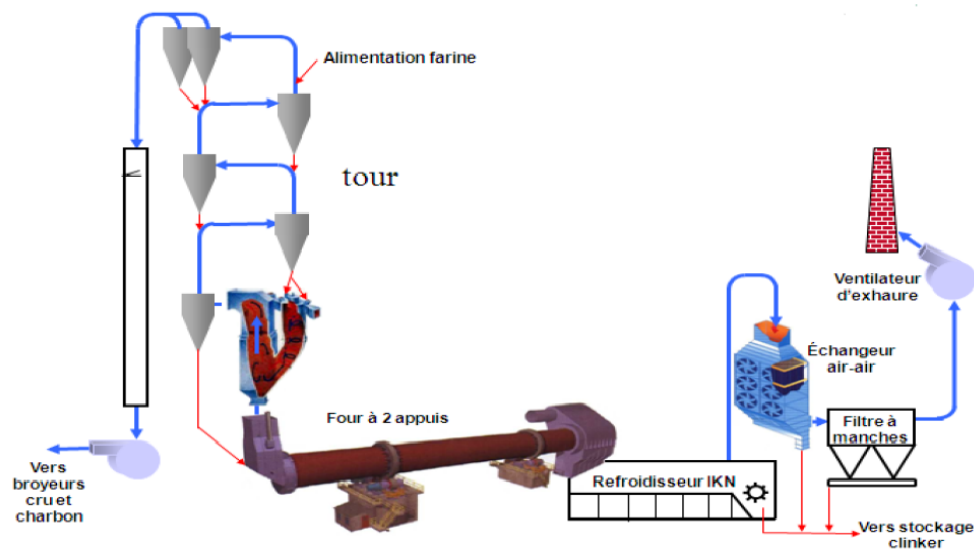


Figure I.10 : Schéma montrant les étapes de cuisson.

I.2.2.4 Zone ciment

Cet atelier est composé de deux lignes identiques **BK1** et **BK2** avec un débit de 180 t/h.



Figure I.11 : Zone ciment.

a. Remplissage en trémies

Le clinker, gypse et le tuf constituent des matières qui sont acheminées vers leurs trémies correspondantes, le remplissage de la trémie clinker se fait à travers le tapis T16 qui vient s'approvisionner de Clinker stocké dans les silos de stockage, puis vient l'élévateur à godets qui achemine le clinker pour remplir la trémie.



Figure I.12 : Silos de stockage du clinker, gypse et tuf.

b. Broyage du ciment

Les matières citées ci-dessus sont transportées sur un tapis vers le broyeur ciment, la matière broyée sera transportée par un élévateur à godets, ensuite elle sera déversée dans le séparateur

dynamique. Le séparateur sépare les éléments, suffisamment, fins des autres qui sont renvoyés au broyeur. Enfin le ciment est transporté vers les silos de stockage.



Figure I.13 : Broyeur du ciment.

I.2.2.5 Zone expédition

Le ciment est stocké dans les silos (08 silos de 5000 tonnes chacun) avant d'être livré en vrac dans des citernes ou conditionné en sac de 50 kg.

a. Expédition en vrac

Elle est réalisée par 02 postes vrac de 200 t/h chacun. Le remplissage se fait par un flexible branché au fond d'une trémie et qui est dirigé par l'opérateur pour le mettre à l'intérieur de la bouche de la cocotte des camions pour les remplir.



Figure I.14 : Expédition en vrac.

b. Expédition en sac

Elle est réalisée par 4 ensacheuses de 120 t/h chacune. Les sacs de 50 kg sont chargés sur des camions à bennes.

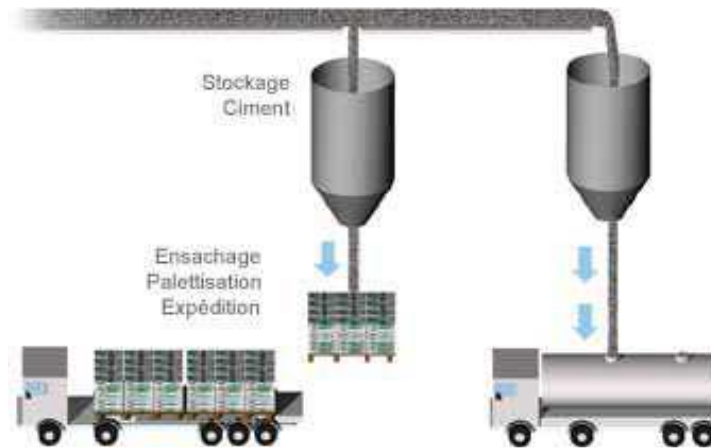


Figure I.15 : Stockage et expédition.

I.3 L'analyse du processus de fabrication du ciment

Dans cette partie il sera question d'aborder des ateliers de chaque zone tout en examinant leur fonctionnement.

I.3.1 Zone Broyeur cru

La zone broyage cru se compose de trois ateliers :

- Atelier APS.
- Atelier broyeur cru.
- Atelier homogénéisation.

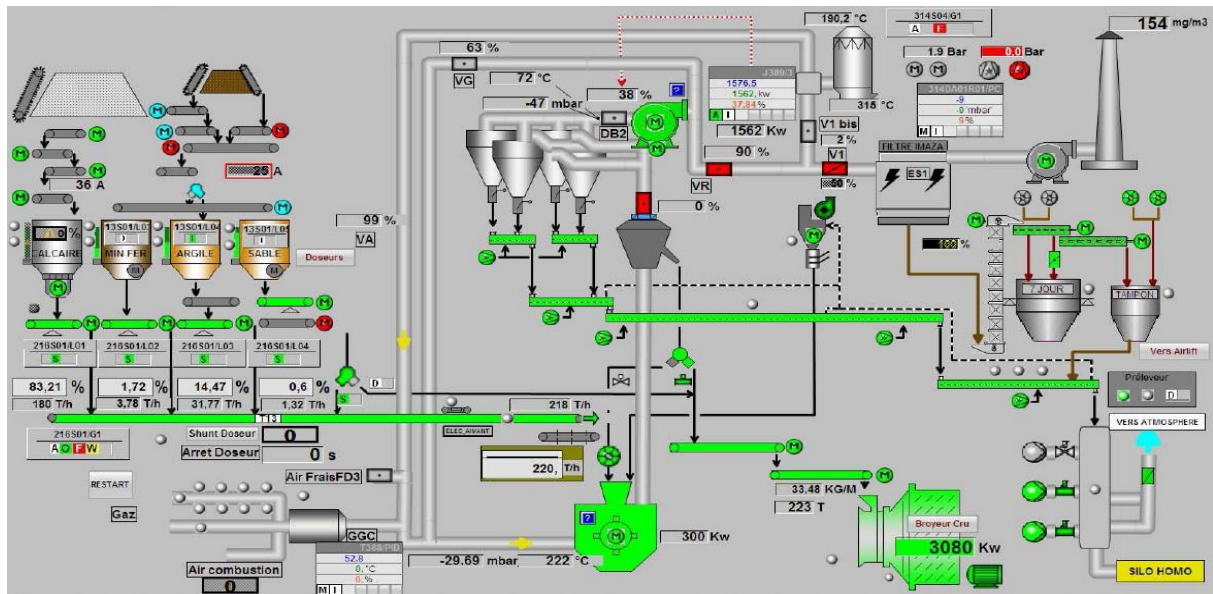


Figure I.16 : Vue synoptique de l'atelier APS.

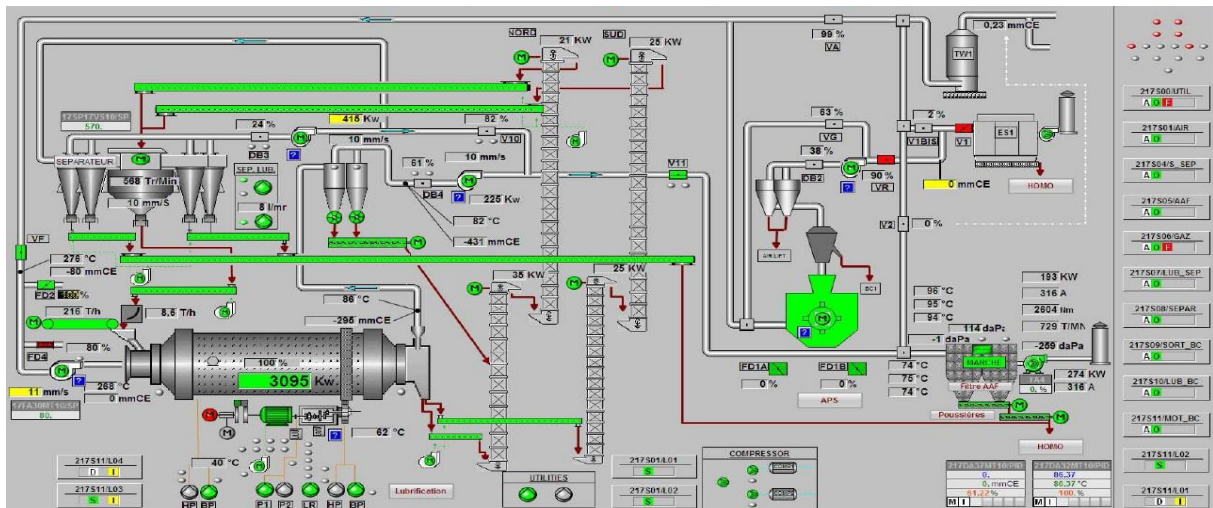


Figure I.17 : Vue synoptique de l'atelier broyeur cru.

I.3.2 Zone cuisson

La zone cuisson se compose de trois ateliers :

- Atelier préchauffage.
- Atelier four.
- Atelier refroidisseur.

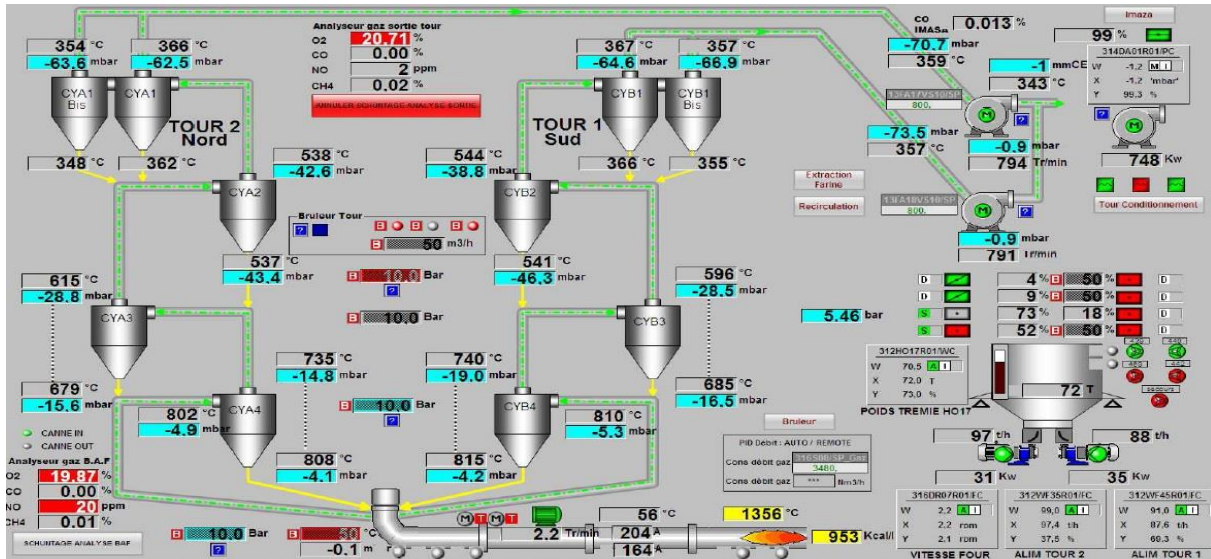


Figure I.18 : Vue synoptique des ateliers préchauffage et four rotatif.

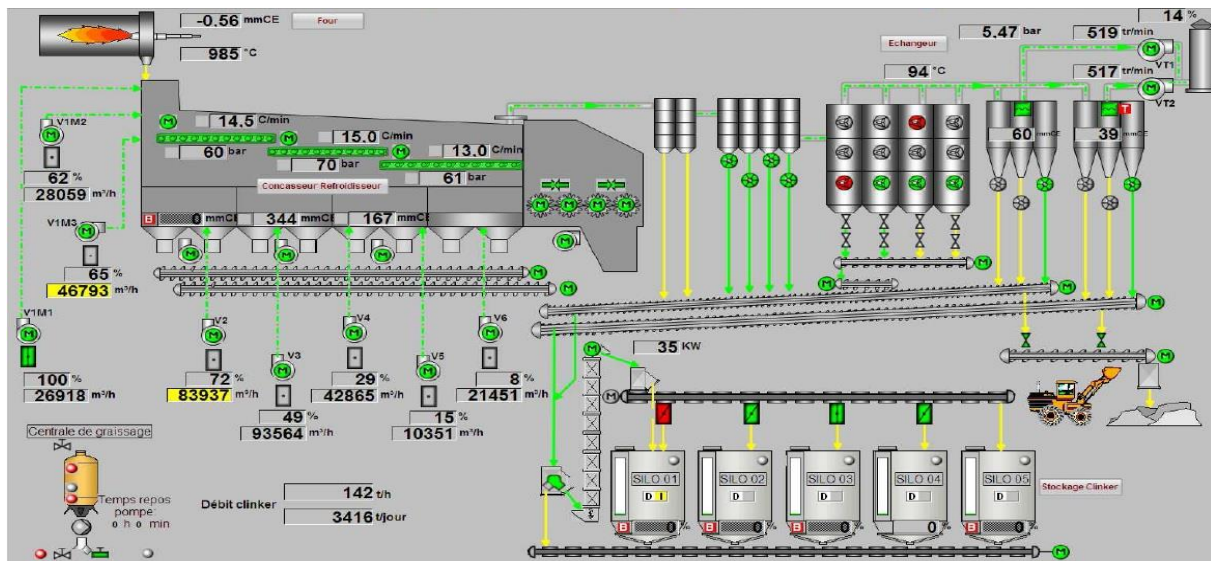


Figure I.19 : Vue synoptique de l'atelier refroidisseur.

a. Zone ciment

La zone ciment se compose de deux ateliers identiques :

- Atelier broyeur ciment 1.
- Atelier broyeur ciment 2.

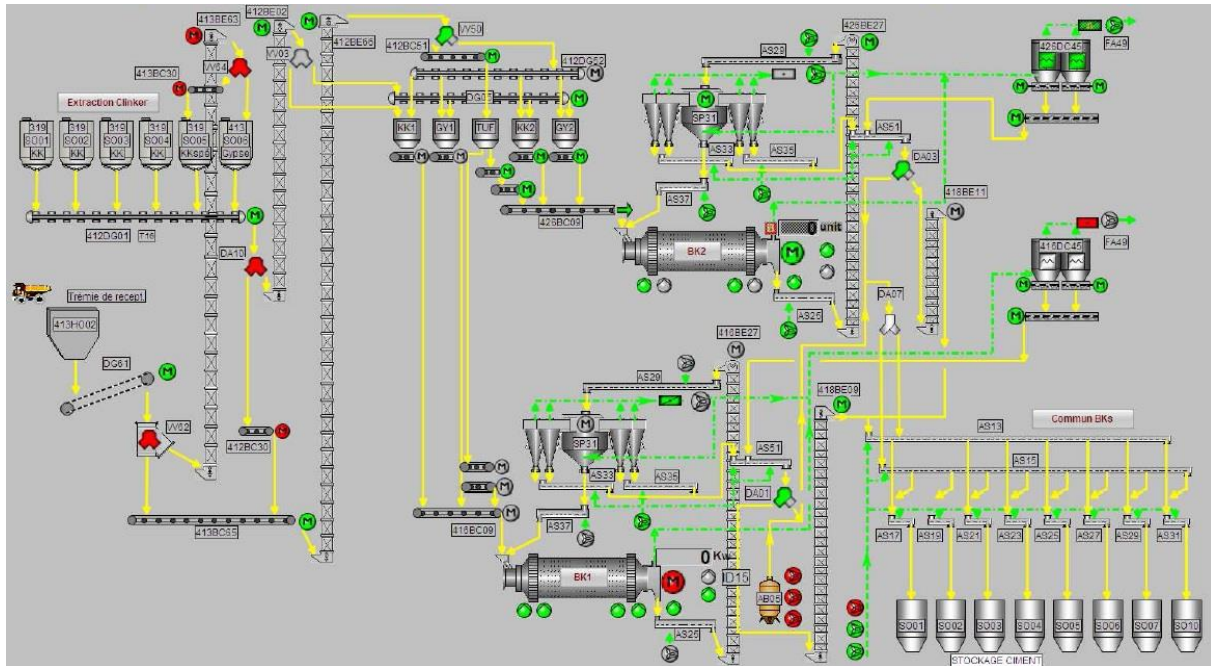


Figure I.20 : Vue synoptique de la zone cuisson.

b. Zone expédition

La zone expédition se compose de deux ateliers :

- Atelier expédition en vrac.
- Atelier expédition en sac.

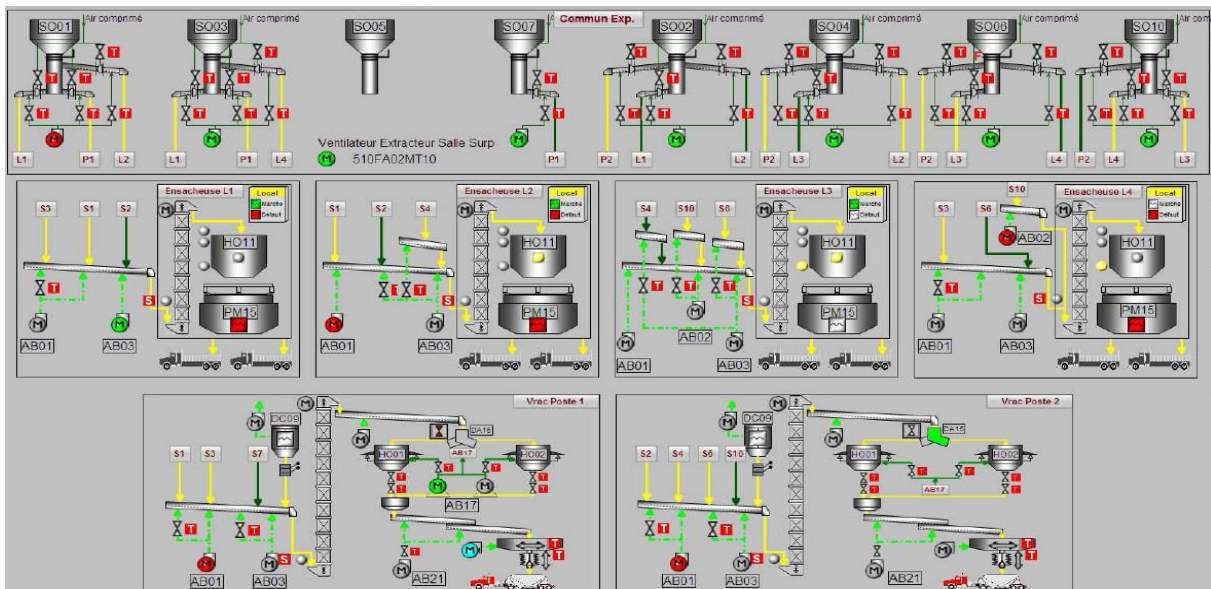


Figure I.21 : Vue synoptique de la zone expédition.

I.4 Schéma général du processus

On peut résumer toutes les étapes de la fabrication du ciment dans le schéma synoptique ci-dessous :

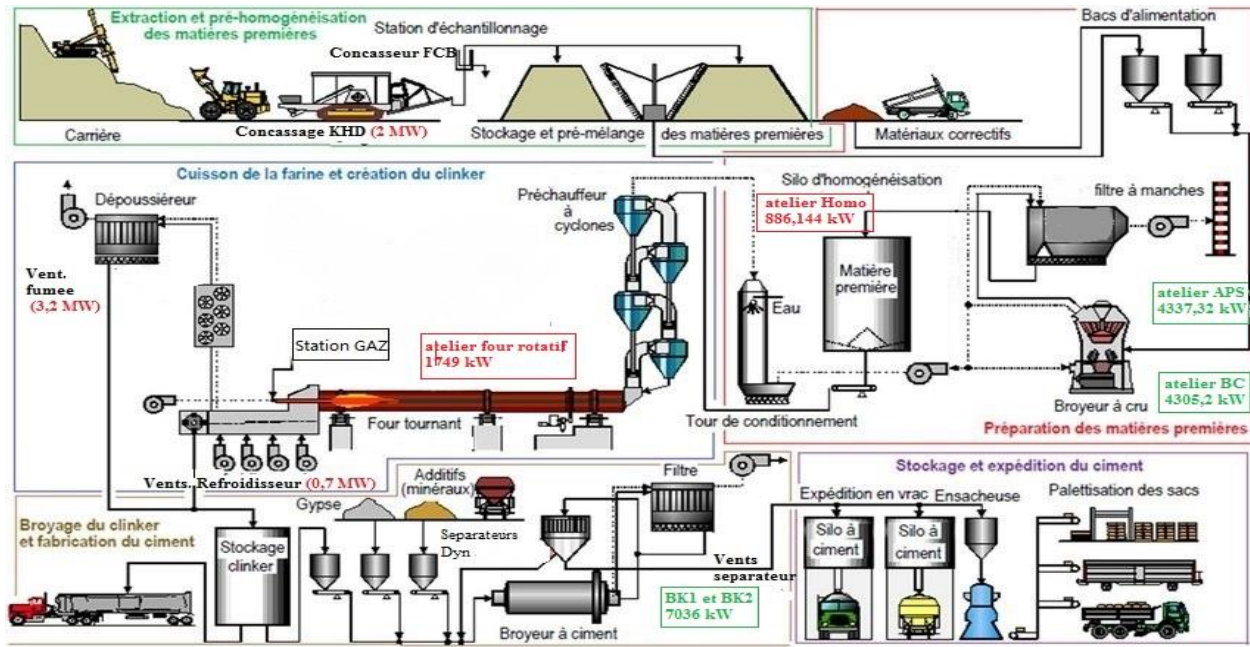


Figure I.18 : Schéma synoptique générale du processus.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons essayé de présenter l'environnement et le processus de fabrication et de production du ciment au sein de la société du ciment de la Mitidja (SCMI).

Ce faisant, il a été constaté que l'opération de fabrication du ciment passe par des différentes zones allant de l'extraction de la matière première jusqu'à l'expédition de la matière finale en l'occurrence le ciment.

CHAPITRE II

Introduction

L'énergie électrique présente deux particularités : elle n'est pratiquement pas disponible dans la nature et elle ne peut pas être stockée. Par conséquent le producteur distributeur doit dimensionner les systèmes de production, de transport et de distributeur de façon à pouvoir livrer en tout temps les puissances active et réactive demandées par l'ensemble des utilisateurs.

II.1 Détermination des puissances

Le bilan de puissance est en fait un bilan de courant car c'est la somme algébrique des courants et des puissances apparentes qui est consommée au niveau de chaque équipement jusqu'à la source. Cette méthode est approximative par rapport à un bilan de puissances effectué suivant la méthode de BOUCHEROT. Cette méthode qui consiste à comptabiliser, d'une part, les puissances actives et, d'autre part, les puissances réactives offre l'avantage de dimensionner l'installation par excès. Dans ce type de calcul la précision n'est pas recherchée puisqu'on affecte, aux circuits terminaux et principaux, des facteurs de correction (K_u , K_s et K_e) très approximatifs. Tout calcul fait en utilisant les deux méthodes, les écarts ne sont pas significatifs [1].

II.1.1 Puissance instantanée

Soit un dipôle linéaire soumis à une tension sinusoïdale $u(t)$ et parcouru par un courant sinusoïdal $i(t)$.

$$u(t) = U\sqrt{2} \sin(t) \quad (\text{II.1})$$

U : Tension max

$$i(t) = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi) \quad (\text{II.2})$$

I : Courant max

ω : Pulsation

φ : Déphasage

La puissance instantanée a donc pour expression :

$$P = u(t) \cdot i(t) \text{ [Watt]} \quad (\text{II.3})$$

II.1.2 Puissance active

La puissance active est la valeur moyenne de la puissance instantanée, c'est la puissance qui va provoquer le mouvement de la machine, on pourrait la qualifier « d'utile ». C'est la grandeur fondamentale matérialisant l'état énergétique des installations à courant alternatif, cette puissance s'exprime en watts (W) :

- Monophasé (1 phase et neutre) : $P = V.I.\cos\varphi$ (II.4)

- Biphasé (phase à phase) : $P = U.I.\cos\varphi$ (II.5)

- Triphasé (avec ou sans neutre) : $P = \sqrt{3} U.I. \cos\varphi$ ou $3.V.I.\cos\varphi$ (II.6)

V : Tension simple

U : Tension composé

Cos φ : Facteur de puissance

L'énergie « active » mesurée en kWh qui est transformée en énergie mécanique (travail), chaleur, lumière, etc,

II.1.3 Puissance réactive

Exprimée en (kVAR), elle sert en particulier à créer dans les bobinages des moteurs, transformateurs, le champ magnétique, sans lequel, le fonctionnement serait impossible. Cette puissance est dite « improductive » pour l'utilisateur. L'expression de la puissance réactive est :

- monophasé (1 phase et neutre) : $Q = V.I.\sin\varphi$ (II.7)

- biphasé (phase à phase) : $Q = U.I.\sin\varphi$ (II.8)

- triphasé (avec ou sans neutre) : $P = \sqrt{3} U.I. \sin\varphi$ ou $P = 3.V.I.\sin\varphi$ (II.9)

V : Tension simple

U : Tension composé

L'énergie « réactive » mesurée en kVarh qui prend 2 formes :

- L'une nécessaire et consommée par les circuits inductifs (transformateurs, moteurs, etc.)
- L'autre fournie par les circuits capacitifs (capacité des câbles, batteries de condensateurs, etc.).

II.1.4 Puissance apparente

Cette grandeur a peu de signification physique, elle n'exprime en aucune façon la puissance développée par un circuit alternatif, elle sert uniquement à dimensionner les machines, telle que les transformateurs, moteurs, alternateurs et elle s'exprime en Volt Ampère [VA].

En triphasé:
$$S = \sqrt{3} U.I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (II.10)$$

S : Puissance apparente (VA)

U : Tension composée (V)

I : Courant (A)

P : Puissance active

Q : Puissance réactive

On peut illustrer les différentes puissances par la représentation graphique suivante :

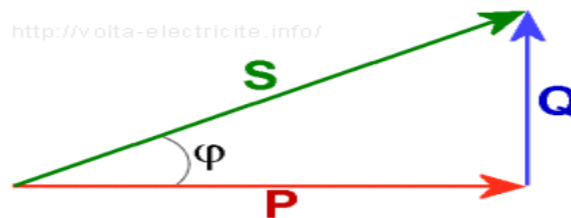


Figure II.1- Diagramme des puissances

II.1.5 Facteur de puissance

Le facteur de puissance appelé, également, $\cos \varphi$ est le déphasage angulaire entre la tension et l'intensité du courant dans un circuit alternatif.

$$\cos \varphi = P/S \quad (II.11)$$

$\cos \varphi$: Facteur de puissance

P : Puissance active

S : Puissance apparente

II.1.6 Puissance installée

La puissance installée (P_i) est la somme des puissances nominales de tous les récepteurs de l'installation. C'est la puissance totale de l'installation électrique. Cependant, tous les récepteurs ne fonctionnant pas forcément ni à pleine charge ni en même temps, des facteurs de correction sont affectés à la puissance installée, permettant de définir la puissance maximale d'utilisation.

II.1.7 Puissance d'utilisation

Dans une usine ou un atelier, elle est toujours inférieure à la puissance installée. Son estimation permet de déterminer:

- La puissance du transformateur HT/BT et son emplacement, la puissance réellement utilisée,
- Et d'évaluer les puissances qui transitent au niveau de chaque tableau de distribution.

Cette estimation demande en outre la connaissance et l'assimilation de trois facteurs:

a. Le facteur d'utilisation (K_u)

Le régime de fonctionnement d'un récepteur peut être, tel que la puissance utilisée, soit inférieure à la puissance nominale installée, d'où la notion de facteur d'utilisation affectée à chaque récepteur. Ce facteur peut varier de 0.3 à 1[2].

La détermination de ce facteur s'avère difficile, dans la mesure où, nous ne maîtrisons pas exactement le régime de fonctionnement des récepteurs.

Ainsi, comme le prévoit la norme, ce facteur correspondra au facteur de puissance pour les appareils à moteur ou en l'absence d'indications précises, nous prendrons un facteur d'utilisation K_u de 0.75 pour ces appareils.

Pour les appareils d'éclairage et de chauffage, le facteur d'utilisation K_u est toujours égal à 1[3].

b. Le facteur de simultanéité K_s

Tous les récepteurs installés ne fonctionnent pas simultanément. C'est pourquoi, il est permis d'appliquer aux différents ensembles de récepteurs ou de circuits des facteurs de simultanéité. La détermination de ces facteurs implique la connaissance détaillée des installations. Ceci étant, nous allons nous baser sur les informations recueillies sur place au niveau de chaque atelier, informations fournies par les responsables de chaque atelier. Cependant, en l'absence d'indications plus précises, la norme donne quelques indications et précisions sur ces facteurs.

Pour ce qui est des prises de courant, ce facteur est donné par la formule suivante:

$$K_s = 0.1 + 0.8 / N \quad (\text{II.12})$$

N : nombre de prises de courant alimentées par le même circuit [3].

c. Facteur d'extension (K_e)

Le rôle du facteur d'extension, également appelé facteur de réserve, est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée. Le coefficient varie de 1 à 1,3 [3].

- L'application de ce coefficient nécessite la connaissance parfaite du fonctionnement du ou des récepteurs.
- Ce facteur peut être différent, il peut être imposé par le maître d'ouvrage.
- Dans les installations industrielles, ce facteur peut être plus élevé.

II.2 Ordre de grandeur des coefficients K_u , K_s et K_e

Ces valeurs sont issues de quelques normes en vigueur, et sont données à titre indicatif. Elles sont le fruit de l'expérience, et peuvent être utilisées en l'absence de toute valeur plus précise [1].

Facteurs d'utilisation		Facteurs de simultanéité				Facteur d'extension	
Guide pratique UTE C 15-105		Norme NFC 63-410		Norme NFC 14-100/1			
Utilisations	K _u	Nombre de circuits	K _s	Nombre de circuits	K _s	K _e	
Force Motrice	0,75 à 1	2 et 3	0,9	4 ≤	1	1,1 à 1,3	
Eclairage	1	4 et 5	0,8	5 à 9	0,75		
Chauffage	1	6 à 9	0,7	10 à 14	0,56		
PC	0,1 à 0,2	> 10	0,6	15 à 19	0,48		
Ventilation	1			20 à 24	0,43		
Climatisation	1			25 à 29	0,40		
Froid	1			30 à 34	0,38		
Ascenseurs et Monte charges	Moteur le + puissant	1			35 à 39		0,37
	Moteur suivant	0,75			40 à 49		0,36
	Autres moteurs	0,6			> 50	0,34	

Tableau II-1. Valeurs des différents coefficients [1].

II.3 Evaluation du bilan de puissance de la cimenterie

Les tableaux qui suivent résument les calculs des puissances actives, réactives et apparentes ainsi que le facteur de puissance total de chaque atelier et transformateurs sans compensation.

Exemple de calcul pour tableau atelier four rotatif (316DH03)

$$S_a = S_i \cdot K_u \cdot K_s \cdot R$$

$$P_a = S_a \cdot \cos(\varphi)$$

R : Rendement

$$P_a = 1320.20 \cdot 0.86$$

$$S_a = 2050 \cdot 0.7 \cdot 1 \cdot 0.92$$

$$P_a = 1135.37 \text{ KW}$$

$$S_a = 1320.20 \text{ KVA}$$

Item	Désignation	Si (kVA)	Ku	Ks	Rendement	Pa (kW)	Cos(φ)	Sa (kVA)
316DH03DH10	Tableau Atelier Four Rotatif (316DH03)	2050	0,7	1	0,92	1135,37	0,86	1320,20
316DH04DH10	Tableau Atelier Massif Four (316DH04)	6420	0,7	1	0,92	3555,78	0,86	4134,63
840TF15DH10	Transformateur Eclairage (840TF15)	1600	0,7	1	0,92	1030,40	1	1030,40
317DH03DH10	Tableau Atelier Refroidisseur (410DH03)	2322	0,7	1	0,92	1285,88	0,86	1495,21
410DH03DH10	Tableau Broyeur Ciment 1 (410DH03)	3809	0,7	1	0,92	2109,79	0,86	2453,24
750DH03DH10	Tableau Bâtiment Administratifs & Ateliers	800	0,7	1	0,92	515,20	1	515,20

Tableau II-2. Bilan de puissance des ateliers alimenté par le transformateur 821TF02

Puissance Transformateur 821TF02 (60kV/5,5kV)	MVA	30,00
Puissance Apparente Utilisée	MVA	10,95
Puissance Active	MW	9,63
Facteur de Puissance Cos(φ)	/	0,88
Puissance Réactive	MVAR	5,21

Tableau II-3. Bilan de puissance total du transformateur 821TF02

Item	Désignation	Si (kVA)	Ku	Ks	Rendement	Pa (kW)	Cos(φ)	Sa (kVA)
110DH03 DH10	Tableau Concasseur K.H.D (110DH03)	2200	0,7	1	0,92	1218,45	0,86	1416,80
210DH03 DH10	Tableau Broyeur Cru (210DH03)	5404	0,7	1	0,92	2992,95	0,86	3480,18
219TF05D H10	Transformateur Atelier Homo (219TF05)	1600	0,7	1	0,92	886,14	0,86	1030,40
420DH03 DH10	Tableau Broyeur Ciment 2 (410DH03)	3844	0,7	1	0,92	2129,21	0,86	2475,83
510TF05D H10	Transformateur Atelier Expéditions (510TF05)	996	0,7	1	0,92	551,41	0,86	641,18
215DH03 DH10	Tableau A.P.S (215DH03)	3458	0,7	1	0,92	1915,22	0,86	2227,00
212DH03 DH10	Tableau Reprise Ajouts/Concassage FCB (212DH03)	1757	0,7	1	0,92	973,10	0,86	1131,51
821DH03 DH60	Amiante/Gica	478	0,7	1	0,92	308,00	1	308,00

Tableau II-4. Bilan de puissance des ateliers alimenté par le transformateur 821TF03

Puissance Transformateur 821TF03 (60kV/5,5kV)	MVA	26,00
Puissance Apparente Utilisée	MVA	12,71
Puissance Active	MW	10,97
Facteur de Puissance Cos(φ)	/	0,86
Puissance Réactive	MVAR	6,41

Tableau II-3. Bilan de puissance total du transformateur 821TF03Le courant total

Transformateur 821TF02 : $I_T = S_T / (\sqrt{3} * U) = 10.95 * 10^3 / (\sqrt{3} * 5.5)$

$I_T = 1149.45 \text{ A}$

Transformateur 821TF03 : $I_T = S_T / (\sqrt{3} * U) = 12.71 * 10^3 / (\sqrt{3} * 5.5)$

$I_T = 1334.20 \text{ A}$

Conclusion

Nous avons pu présenter dans ce chapitre les calculs des puissances actives, réactives et apparentes ainsi que le facteur de puissance de chaque atelier et de chaque transformateur. L'amélioration du facteur de puissance et les courants absorbés par les deux transformateurs fera l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

Introduction

L'énergie réactive est consommée par les récepteurs, tels que les transformateurs, les moteurs, les ballasts de tubes fluorescents, etc. Pour compenser celle-ci, il est nécessaire de fournir l'énergie réactive à la place du réseau de distribution par l'installation d'équipements de compensation. Les équipements de compensation permettent de diminuer cette consommation afin de limiter, voire d'annuler, les pénalités appliquées par le fournisseur d'énergie dès lors que le $\cos\varphi$ de l'installation est inférieur à 0,93 [4].

III.1 But de la Compensation de l'énergie réactive

La Compensation de l'énergie réactive permet :

- Une économie sur les équipements électriques, par une diminution de la puissance appelée ;
- Une augmentation de la puissance disponible au secondaire des transformateurs ;
- Une diminution des chutes de tension et des pertes Joule dans les câbles ;
- Une économie sur les factures d'électricité, en supprimant les consommations excessives d'énergie réactive.

III.2 Inconvénient d'un mauvais $\cos\varphi$

Plus l'installation consomme de l'énergie réactive, plus le $\cos\varphi$ devient faible, et la situation moins favorable. Ainsi, pour une même puissance consommée, plus le $\cos\varphi$ sera faible, plus la puissance apparente sera élevée, donc plus le courant absorbé sera grand.

- Avec un $\cos\varphi$ de 0,5 le courant appelé est le double du courant utile.
- Avec un $\cos\varphi$ de 0,9 le courant est 10% plus élevé.

Pour une même puissance, il faut donc transporter dans tous les circuits électriques une intensité d'autant plus grande que le $\cos\varphi$ est mauvais. Cela entraîne une surcharge des câbles et des transformateurs de distribution et une augmentation des pertes (fonction du carré du courant I^2), aussi bien, dans l'installation intérieure qu'entre la centrale de production d'énergie et l'arrivée au poste de comptage [5].

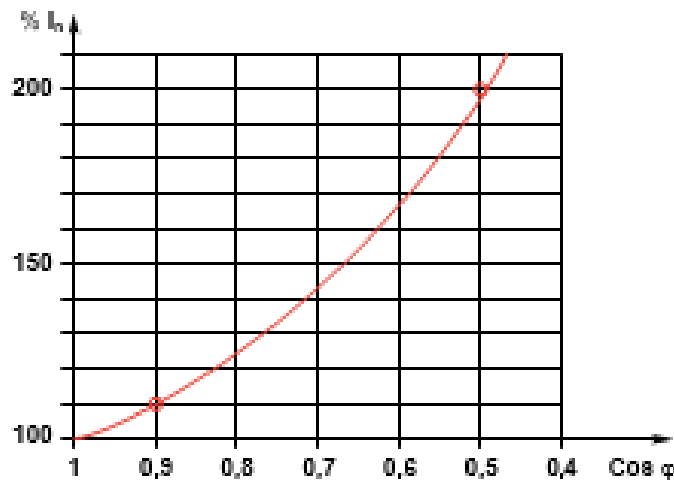


Figure III.1 : Le courant nominal est affecté par le $\cos \varphi$ [5].

Nous venons de voir l'influence énorme du facteur de puissance sur la valeur du courant appelé. Cette augmentation inutile du courant engendre pour l'utilisateur industriel plusieurs inconvénients qui, tous, ont des répercussions financières. Ces inconvénients ne sont pas gratuits. Ils peuvent se classer en quatre catégories.

➤ **Une augmentation des pertes thermiques**

Ces pertes sont à l'ordre du carré du courant. On les trouve dans tous les conducteurs, c'est à dire :

- Les câbles entre le poste de comptage et l'utilisateur.
- Les enroulements du ou des transformateurs de distribution.
- Les appareillages de coupure et de protection.

➤ **Une augmentation de la chute de tension**

Elle se traduit par une sous-alimentation des récepteurs (moteur, éclairage...). Il en résulte pour ces récepteurs une réduction de leur capacité et de leur rendement. Cette chute de tension supplémentaire est créée :

- Dans les enroulements du ou des transformateurs de distribution.
- Dans les câbles d'alimentation.
- Dans les systèmes de commande et de protection.

➤ **Une sous-utilisation des installations**

Cette sous-utilisation va engendrer un coût d'amortissement plus lourd. Ceci est particulièrement important pour le(s) transformateur(s) de distribution. Les inconvénients que nous venons

d'énumérer existent également pour le producteur et le distributeur d'énergie électrique. Il est donc normal que celui-ci pénalise "le mauvais" utilisateur en lui faisant payer plus cher sa consommation électrique [5].

III.3 Coût de l'énergie à cause d'un mauvais $\cos\varphi$

En plus de véhiculer (fournir) l'énergie réactive dans les lignes et les transformateurs haute tension, les fabricants doivent également générer dans la machine cette énergie réactive. Ceci conduit soit à sur dimensionner les machines de production, soit à installer des batteries de condensateurs. C'est pour cela que les sociétés de distribution font payer les consommations d'autant plus cher que le $\cos\varphi$ est mauvais. Certains pays se réfèrent à la valeur du $\cos\varphi$, pour pénaliser la facture si le $\cos\varphi$, est inférieur à une certaine valeur. Parfois un bonus est accordé pour un $\cos\varphi$ supérieur à une certaine valeur.

Afin de déterminer le $\cos\varphi$, il est nécessaire de connaître pendant combien de temps l'usine fonctionne. Pour une même consommation (kWh), la puissance apparente est d'autant plus grande que le $\cos\varphi$ est faible. Par le biais de la puissance consommée, on taxe le kWh d'autant plus fort que le $\cos\varphi$ est faible. Ceci revient à faire payer à l'utilisateur, le prix du kWh consommé d'autant plus cher, que le facteur de puissance est faible.

Le graphique ci-dessous nous montre pour une puissance unitaire (par exemple 1 kW) l'évolution des puissances apparentes (kVA) et réactives (kVar) en fonction du $\cos\varphi$. Ceci illustre très bien qu'un mauvais facteur de puissance entraîne une forte augmentation des puissances apparentes et réactives. D'où les conséquences financières [5].

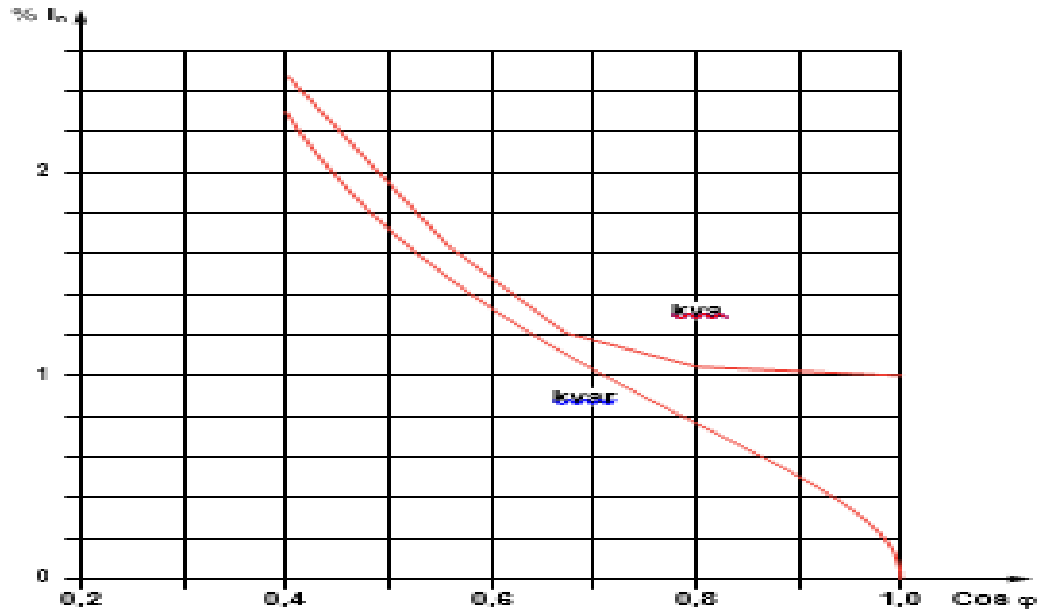


Figure III.2 : Evolution des puissances apparentes et réactives en fonction du $\cos \varphi$ [5].

III.4 Déterminer l'équipement de compensation

Le choix d'un équipement de compensation s'effectue selon les paramètres suivants :

III.4.1 Puissance réactive à installer

La puissance de l'équipement Q_c (kVar) se calcule de deux façons :

- À partir de l'énergie réactive facturée : facture mensuelle et feuillet de gestion
- À partir de la puissance active P et du facteur de puissance de l'installation :

$$Q_c \text{ (kVar)} = P \text{ (kW)} \times (\tan \varphi - \tan \varphi')$$
(III.1)

Note :

$\tan \varphi$ correspond au $\cos \varphi$ de l'installation avant compensation et $\tan \varphi'$ au $\cos \varphi'$ souhaité avec compensation.

III.4.2 Mode de compensation

Dans le cas de la compensation globale ou par ateliers, le critère de Q_c / S_{nc} permet de choisir entre un équipement de compensation fixe ou automatique.

La compensation d'énergie réactive peut se faire :

III.4.2.1 Par batteries de condensateurs à régulation automatique

Si la puissance des condensateurs est supérieure à 15% de la puissance du transformateur, qui permettent l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge et évite ainsi le renvoi d'énergie réactive sur le réseau et les surtensions sur les circuits d'éclairage en marche à faible charge [4].

III.4.2.2 Par condensateurs fixes

Si la puissance des condensateurs est inférieure à 15% de la puissance du transformateur, cette compensation peut être [4] :

III.4.2.2.a Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure une compensation pour l'ensemble de l'installation. Elle reste en service de façon permanente pendant la marche normale de l'usine. Elle a comme intérêt de dimensionnement faible de la batterie, un amortissement rapide, supprime les pénalités, diminue la puissance apparente en l'ajustant aux besoins réels et en fin, soulage le poste de transformation [4].

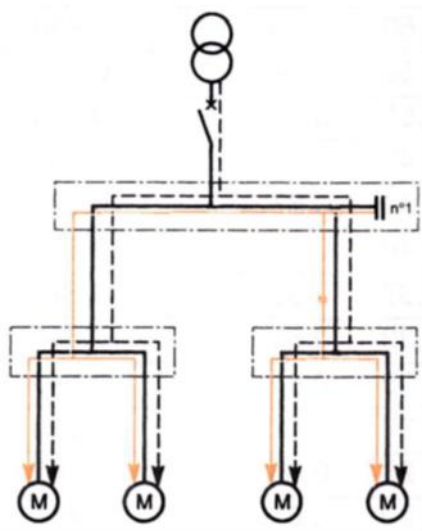


Figure III.3 : compensation globale [4].

Remarques

- Le courant réactif est présent au niveau 1 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet joule dans les câbles situés en aval et leur dimensionnement ne sont pas de ce fait diminués.
- Lorsque la charge est stable et continue, une compensation globale convient.

III.4.2.2.b Compensation partielle

La batterie est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive par atelier à un groupe de récepteurs. Une grande partie de l'installation est soulagée, en particulier les câbles d'alimentation de chaque atelier.

Elle a comme intérêt de supprimer les pénalités, soulage le poste de transformation et optimise une partie du réseau (le courant réactif n'étant pas véhiculé entre les niveaux 1 et 2) [4].

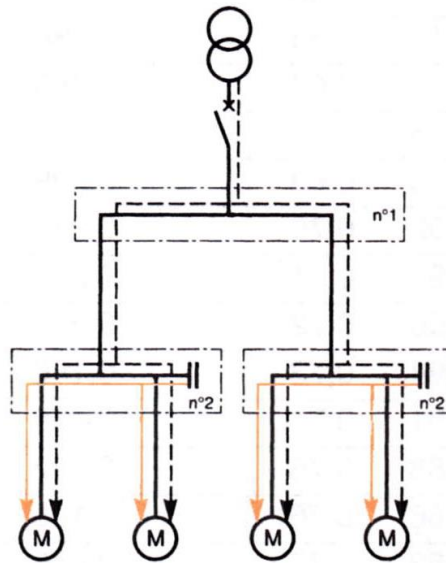


Figure III.4 : Compensation partielle [4].

Remarques

- Le courant réactif est présent du niveau 2 jusqu'aux récepteurs.
- Les pertes par effet joule dans les câbles sont ainsi diminuées.
- Risque de surcompensation par suite des variations de charge importantes.
- Solution conseillée lorsque l'installation est étendue et comporte des régimes de charge différents dans les ateliers.

III.4.2.2.c Compensation local

La batterie est raccordée directement à chaque récepteur de type inductif et la puissance de la batterie est $\sim 25\%$ de la puissance du moteur. Un complément en tête de l'installation n'est pas à exclure (transformateur).

Elle a comme intérêt de supprimer les pénalités, de soulager le poste de transformation, diminuer le dimensionnement des câbles et en fin, réduit les pertes par effet joule [4].

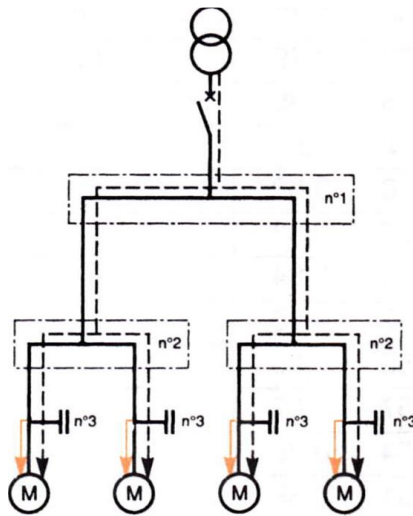


Figure III.5 : compensation local [4].

Remarques

- Le courant réactif n'est plus présent dans les câbles de l'installation.
- Solution conseillée lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance totale.
- C'est la solution qui présente le plus d'avantages.

III.4.3 Types d'équipement de compensation

Les équipements de compensation existent en trois types adaptés au niveau de pollution harmonique du réseau [4] :

- Réseau non pollué
- Réseau faiblement pollué
- Réseau pollué

III.5 Harmoniques

Certains récepteurs, tels que les moteurs à vitesse variable, les convertisseurs statiques, les machines à souder, les fours à arc, les tubes fluorescents, etc injectent des harmoniques qui surchargent les condensateurs. Les harmoniques les plus fréquemment rencontrés sur le réseau (HT/BT) sont de rang 3 (150 Hz), 5 (250 Hz), 7 (350 Hz). Il est fortement conseillé de prendre en compte les harmoniques de rangs supérieurs, toutes aussi pénalisantes que les premières. Ces harmoniques en tension ou courant se propagent sur l'ensemble du réseau de distribution et perturbent fortement l'ensemble de l'installation.

Les harmoniques mesurées sur le réseau sont données sous forme de taux de distorsion harmonique [5]. Voici synthétiquement l'impact des différents niveaux de taux de distorsion sur l'installation [5] :

Taux de distorsion en tension	Conséquences d'une exposition à long terme
$TDH \leq 5 \%$	Réseau propre : Problèmes inexistant dans la plus part des cas
$5 \% < TDH \leq 7\%$	Réseau faiblement pollué : Des problèmes peuvent survenir sur des matériels sensibles.
$7 \% < TDH \leq 10 \%$	Réseau pollué : Des problèmes commencent à apparaître sur des appareils robustes
$TDH > 10 \%$	Réseau fortement pollué : Des effets destructeurs sont à long terme pratiquement certains.

Tableau III.1 : Impact des différents niveaux de taux de distorsion sur l'installation.

La présence d'harmoniques se traduit [4]:

- Par une majoration du courant dans le condensateur qui provoque son échauffement et son vieillissement prématuré,
- Par des résonances qui provoquent le claquage par surtension.

Pour neutraliser ces phénomènes, on utilise des selfs anti-harmoniques mises en série et on sur dimensionne les condensateurs en tension [4].

III.6 Calcul de la puissance réactive à compenser

Le but de ce calcul consiste à déterminer la capacité des batteries de condensateurs nécessaires pour relever le facteur de puissance à une valeur désirée, tout en gardant la puissance active constante.

Dans notre étude, nous avons opté pour le mode de compensation globale.

- **Sans compensation**

Le tableau suivant résume les calculs des puissances actifs, réactif et apparente ainsi le facteur de puissance total de chaque des deux transformateurs sans compensation.

Désignation	Puissance Active Totale (MW)	Puissance Réactive Totale (MVAR)	Puissance Apparente Totale (MVA)	Facteur de Puissance Total Cos(φ)
Transformateur 821TF02 (60kV/5,5kV)	9,63	5,21	10,95	0,88
Transformateur 821TF03 (60kV/5,5kV)	10,97	6,41	12,71	0,86

Tableau III-2 Bilan de puissance sans compensation.

Exemple de calcul pour le transformateur (821TF02)

$$Q_T = P_{aT} * \tan(\varphi)$$

$$Q_T = 9.63 * 0.54$$

$$Q_T = 5.21 \text{ MVAR}$$

- Avec compensation

Le tableau suivant résume les calculs des puissances actives, réactives et apparentes ainsi le facteur de puissance total de chaque transformateur sans compensation et avec compensation.

	Avant				Après			
Désignation	P ₁ (MW)	Q ₁ (MVAR)	S ₁ (MVA)	Cos(φ ₁)	Cos(φ ₂)	Q _c (MVAR)	Q ₂ (MVAR)	S ₂ (MVA)
Transformateur 821TF02 (60kV/5,5kV)	9,63	5,21	10,95	0,88	0,95	2,03	3,18	10,14
Transformateur 821TF03 (60kV/5,5kV)	10,97	6,41	12,71	0,86	0,95	2,90	3,51	11,52

Tableau III-3 Bilan de puissance sans et avec compensation.

Exemple de calcul pour le transformateur (821TF02)

$$Q_1 = Q_c + Q_2$$

$$Q_2 = P_1 * \tan(\varphi_2) = 9.63 * 0.33 = 3.18 \text{ MVAR}$$

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = 5.21 - 3.18 = 2.03 \text{ MVAR}$$

$$S_2 = P_1 / \cos(\varphi_2) = 9.63 / 0.95 = 10.14 \text{ MVA}$$

III.7 Calcul de la capacité

A partir du tableau III-3 on calculera la capacité nécessaire des condensateurs de compensation pour chaque transformateur.

- **Transformateur 821TF02**

$$C = \frac{Q}{U^2 * \omega} \quad (\text{III.2})$$

$$C = 2.03 * 10^6 / ((5.5 * 10^3)^2 * 314)$$

$$C = 213.72 \mu\text{F}$$

- **Transformateur 821TF03**

$$C = \frac{Q}{U^2 * \omega} \quad (\text{III.3})$$

$$C = 2.90 * 10^6 / ((5.5 * 10^3)^2 * 314)$$

$$C = 305.31 \mu\text{F}$$

III.8 Calcul du courant après compensation

Le courant de chacun des deux transformateurs devient :

- **Transformateur 821TF02**

$$I_T = S_T / (\sqrt{3} * U) = 10.14 * 10^3 / (\sqrt{3} * 5.5)$$

$$I_T = 1064.42 \text{ A}$$

- **Transformateur 821TF03**

$$I_T = S_T / (\sqrt{3} * U) = 11.52 * 10^3 / (\sqrt{3} * 5.5)$$

$$I_T = 1209.28 \text{ A}$$

Conclusion

Compte tenu de ce qui précède, nous pouvons noter que les courants qui valaient $I_T = 1149.45$ A du transformateur 821TF02 et $I_T = 1334.20$ A du transformateur 821TF03 avant la compensation, prennent les valeurs $I_T = 1064.42$ A du transformateur 821TF02 et $I_T = 1209.28$ A du transformateur 821TF03 après compensation. Cette situation implique de faibles chutes de tension et des sections des conducteurs plus petites. Ceci fera l'objet d'un examen au niveau du chapitre suivant.

CHAPITRE IV

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Introduction

Pour le dimensionnement des sections des câbles et le choix du transformateur, il y a lieu de tenir compte de la puissance apparente S (en kVA) réelle consommée et des prévisions éventuelles d'extension. Les considérations citées ci-dessous doivent être observées rigoureusement :

- sur-dimensionner un transformateur entraîne un investissement excessif et des pertes à vide inutiles.
- sous-dimensionner le transformateur entraîne un fonctionnement quasi permanent à pleine charge et souvent en surcharge avec de graves conséquences (échauffement excessif, usure prématurée ...).

Les sections des câbles sont calculées et choisies d'une manière à répondre aux conditions suivantes [3] :

- véhiculer le courant maximal d'emploi et ses pointes transitoires normales.
- ne pas générer des chutes de tension supérieures aux valeurs admissibles.

IV.1. Méthode du choix et de calcul des sections

La procédure à suivre pour déterminer la section des conducteurs de phase se fait de la manière suivante [3]:

- le choix de la canalisation (enterrée ou non enterrée).
- détermination de la lettre de sélection du mode de pose.
- détermination des différents facteurs de correction : mode de pose, température ambiante, groupement, etc,
- détermination du courant I_z et de la section de la canalisation.
- vérification de la chute de tension par rapport au norme.

IV.1.1. Courant fictif I_z

C'est le courant admissible maximal que pourra véhiculer un conducteur sans échauffement et il dépendra du courant nominal I_n et du coefficient dépendant du dispositif de protection K .

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

$$I_z = I_n / K \quad (\text{IV.1})$$

Le coefficient K dépend de :

- canalisation non enterrée : $K = K1 * K2 * K3$ (IV.2)

- canalisation enterrée : $K = K4 * K5 * K6 * K7$ (IV.3)

IV.1.2. Le facteur de correction K

Des facteurs de correction ont été définis pour prendre en compte les conditions spéciales d'installation ou d'environnement.

Les tableaux (IV.1, IV.2, IV.3, IV.4) ci-dessous permettent de déterminer la section des conducteurs de phase d'un circuit pour des canalisations non enterrées.

Type d'éléments conducteurs	Mode de pose	Lettre de sélection
Conducteurs et câbles multiconducteurs	Sous conduit, profité ou goulotte, en apparent ou encastré. Sous vide de construction. Faux plafond. Sous caniveau. Moulures. Plinthes. Chambranles.	B
	En apparent contre mur ou plafond. Sur chemin de câbles ou tablettes non perforées.	C
Câbles multiconducteurs	Sur échelles. Corbeaux. Chemin de câbles perforés. Fixes en apparent. Espacé de la paroi. Câblés suspendus.	E
Câbles mono conducteurs	Sur échelles. Corbeaux. Chemin de câbles perforés. Fixes en apparent. Espacé de la paroi. Câblés suspendus.	F

Tableau IV.1 : Détermination de la lettre de sélection [3]

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Le facteur K1 mesure l'influence du mode de pose.

Lettre de sélection	Cas d'installation	K1
B	- Câbles dans des produits encastrés directement dans des matériaux thermiquement isolants.	0.70
	- Conduits encastrés dans des matériaux thermiquement isolants.	0.77
	- Câbles multiconducteurs.	0.90
	- Vides de construction et caniveaux.	0.95
C	- Pose sous plafond.	0.95
B.C.E.F	- Autres cas.	1

Tableau IV.2 : Facteur de correction K1 [3].

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Le facteur K2 mesure l'influence mutuelle des circuits placés côte à côte. Une pose est jointive lorsque la distance entre 2 conducteurs est inférieure au double du diamètre d'un conducteur.

Lettre de sélection	Disposition des câbles jointifs	Facteur de correction K2									
		Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	12
B .C	Encastres ou noyés dans les parois	1.00	0.80	0.70	0.65	0.60	0.57	0.54	0.52	0.50	0.45
C	Simple couche sur les murs ou les planchers ou tablettes non perforées	1.00	0.85	0.79	0.75	0.73	0.72	0.72	0.71	0.70	0.70
	Simple couche au plafond	0.95	0.81	0.72	0.68	0.66	0.64	0.63	0.62	0.61	0.61
E.F	Simple couche sur des tablettes horizontales perforées ou tablettes verticales sur des tablettes	1.00	0.88	0.82	0.77	0.75	0.73	0.73	0.72	0.72	0.72
	Simple couche sur des échelles à câble, corbeaux etc.	1.00	0.87	0.82	0.80	0.80	0.79	0.79	0.78	0.78	0.78

Tableau IV.3 : Facteur de correction K2 [3].

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Le facteur de correction K3 prend en compte la température ambiante et la nature de l'isolant.

Températures (°C)	Isolation		
	Elastomère (caoutchouc)	Polychlorure de vinyle (PVC)	Polyéthylène réticule (PR) butyle, Ethylène, propylène (EPR)
10	1.29	1.22	1.15
15	1.22	1.17	1.12
20	1.15	1.12	1.08
25	1.07	1.07	1.04
30	1.00	1.00	1.00
35	0.93	0.93	0.96
40	0.82	0.87	0.91
45	0.71	0.79	0.87
50	0.58	0.71	0.82
55	-	0.61	0.76
60	-	0.50	0.71

Tableau IV.4 : Facteur de correction K3[3].

Les tableaux ci-dessous permettent de déterminer la section des conducteurs de phase d'un circuit pour des canalisations enterrées.

La lettre de sélection D concerne uniquement les câbles enterrés.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Le facteur de correction K4 prend en compte le mode de pose.

Lettre de sélection	Mode de pose	K4	Numéro de référence de mode de pose
D	Pose sous fourreaux, conduits ou profilés	0.80	61
	Autre cas	1	62 - 63

Tableau IV.5 : Facteur de correction K4 [3].

Le facteur K5 prend en compte l'influence mutuelle des circuits placés côte à côte.

Influence mutuelle des circuits dans un même conduit	Disposition des câbles jointifs	Nombre de circuits ou de câbles multiconducteurs											
	Enterrés	1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	16	
		1	0.71	0.58	0.5	0.45	0.41	0.38	0.35	0.33	0.29	0.25	

Tableau IV.6 : Facteur de correction K5 [3].

Le facteur de correction K6 prend en compte l'influence de la nature du sol.

Nature du sol	K6
terrain très humide	1.21
humide	1.13
normal	1.05
Sec	1
très sec	0.86

Tableau IV.7 : Facteur de correction K6 [3].

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Le facteur K7 prend en compte la température ambiante et la nature de l'isolant.

Température du sol (C°)	Isolation	
	Polychlorure de vinyle PVC	Polyéthylène réticulé Éthylène, propylène
10	1,10	1,07
15	1,05	1,04
20	1,00	1,00
25	0,95	0,96
30	0,89	0,93
35	0,84	0,89
40	0,77	0,85
45	0,71	0,80
50	0,63	0,76
55	0,55	0,71
60	0,45	0,65

Tableau IV.8 : Facteur de correction K7 [3].

La section de la canalisation est indiquée dans le tableau IV.9 par lecture directe :

- Le choix de la colonne est réalisé à partir du mode de pose (lettre de sélection) et des caractéristiques de la canalisation (isolant, nombre de conducteurs chargés) ;
- Le choix de la ligne est réalisé à partir de la valeur $\geq I_z$ dans la colonne du tableau correspondant à la nature de l'âme du conducteur (cuivre ou aluminium).

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Lettre de sélection	Isolant et nombre de conducteurs chargés (3 ou 2)													
	B	PVC3	PVC2		PR3		PR2							
	C		PVC3		PVC2	PR3		PR2						
	D										PVC3	PVC2	PR3	PR2
	E			PVC3		PVC2	PR3		PR2					
	F				PVC3		PVC2	PR3		PR2				
Section cuivre (mm ²)	1,5	15,5	17,5	18,5	19,5	22	23	24	26		26	32	31	37
	2,5	21	24	25	27	30	31	33	36		34	42	41	48
	4	28	32	34	36	40	42	45	49		44	54	53	63
	6	36	41	43	48	51	54	58	63		56	67	66	80
	10	50	57	60	63	70	75	80	86		74	90	87	104
	16	68	76	80	85	94	100	107	115		96	116	113	136
	25	89	96	101	112	119	127	138	149	161	123	148	144	173
	35	110	119	126	138	147	158	169	185	200	147	178	174	208
	50	134	144	153	168	179	192	207	225	242	174	211	206	247
	70	171	184	196	213	229	246	268	289	310	216	261	254	304
	95	207	223	238	258	278	298	328	352	377	256	308	301	360
	120	239	259	276	299	322	346	382	410	437	290	351	343	410
	150		299	319	344	371	395	441	473	504	328	397	387	463
	185		341	364	392	424	450	506	542	575	367	445	434	518
	240		403	430	461	500	538	599	641	679	424	514	501	598
	300		464	497	530	576	621	693	741	783	480	581	565	677
	400					656	754	825		940				
	500					749	868	946		1 083				
	630					855	1 005	1 088		1 254				
Section aluminium (mm ²)	2,5	16,5	18,5	19,5	21	23	25	26	28					
	4	22	25	26	28	31	33	35	38					
	6	28	32	33	36	39	43	45	49					
	10	39	44	46	49	54	58	62	67		57	68	67	80
	16	53	59	61	66	73	77	84	91		74	88	87	104
	25	70	73	78	83	90	97	101	108	121	94	114	111	133
	35	86	90	96	103	112	120	126	135	150	114	137	134	160
	50	104	110	117	125	136	146	154	164	184	134	161	160	188
	70	133	140	150	160	174	187	198	211	237	167	200	197	233
	95	161	170	183	195	211	227	241	257	289	197	237	234	275
	120	186	197	212	226	245	263	280	300	337	224	270	266	314
	150		227	245	261	283	304	324	346	389	254	304	300	359
	185		259	280	298	323	347	371	397	447	285	343	337	398
	240		305	330	352	382	409	439	470	530	328	396	388	458
	300		351	381	406	440	471	508	543	613	371	447	440	520
	400					526	600	663		740				
	500					610	694	770		856				
	630					711	808	899		996				

Tableau IV.9 : Courant I_z en (A) par les canalisations dans les conditions standard d'installation [3].

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

IV.1.3. Dimensionnement du conducteur neutre

Le conducteur neutre ne représente qu'une faible circulation de courant harmonique de rang 3 dans le réseau [3].

- Dans les circuits monophasés et dans les circuits triphasés dont les conducteurs de phase ont une section au plus égale à 16 mm^2 en cuivre ou 25 mm^2 en aluminium, le conducteur neutre éventuel doit avoir la même section que les conducteurs de phase.
- Dans les circuits triphasés dont les conducteurs de phase ont une section supérieure à 16 mm^2 en cuivre ou 25 mm^2 en aluminium, le conducteur neutre peut avoir :
 - soit la même section que les conducteurs de phase,
 - soit une section inférieure à celle des conducteurs de phase si les conditions suivantes sont simultanément remplies :
 - le courant maximal, y compris les harmoniques éventuels, susceptibles de parcourir le conducteur neutre en service normal, n'est pas supérieur au courant admissible I_z correspondant à la section réduite du conducteur neutre. Pour cela, il suffit que la charge alimentée par le circuit en service normal soit pratiquement équilibrée entre les phases.
 - le conducteur neutre est protégé contre les surintensités.
 - la section du conducteur neutre est au moins égale à 16 mm^2 en cuivre ou 25 mm^2 en aluminium.

IV.1.4. Détermination de la chute de tension

La chute de tension entre l'origine de l'installation BT et tout point d'utilisation n'excède pas les valeurs suivantes :

	Eclairage	Autres usages (forces motrices)
Alimentation par le réseau BT de distribution publique	3 %	5%
Alimentation par poste privé HT/BT	6%	8%

Tableau IV.10 : Détermination de la chute de tension [3]

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Cette chute de tension s'entend en service normal (en dehors des appels de courant au démarrage des moteurs par exemple) et lorsque les appareils susceptibles de fonctionner simultanément sont alimentés [3]. Lorsque la chute de tension est supérieure aux valeurs du tableau IV.10, il sera nécessaire d'augmenter la section de certains circuits jusqu'à ce que l'on arrive à des valeurs inférieures à ces limites [3].

Le tableau ci-dessous donne la chute de tension par km de câbles pour un courant de 1A en fonction :

- du type d'utilisation : force motrice avec $\cos \varphi$ voisin de 0,8 ou éclairage avec $\cos \varphi$ voisin de 1.
- du type de câble monophasé ou triphasé.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Section (mm ²)		Circuit monophasé			Circuit triphasé équilibré		
		Force motrice		Eclairage	Force motrice		Eclairage
Cuivre	Aluminium	Service normal cosφ=0.8	Démarrage cosφ=0.35	Cosφ=1	Service normal cosφ=0.80	Démarrage cosφ=0.35	Cosφ=1
1.5	-	24	10.6	30	20	9.4	25
2.5	-	14.4	6.4	18	12	5.7	15
4	-	9.1	4.1	11.2	8	3.6	9.5
6	10	6.1	2.9	7.5	5.3	2.5	6.2
10	16	3.7	1.7	4.5	3.2	1.5	3.6
16	25	2.36	1.15	2.8	2.05	1	2.4
25	35	1.5	0.75	1.8	1.3	0.65	1.5
35	50	1.15	0.6	1.29	1	0.52	1.1
50	70	0.86	0.47	0.95	0.75	0.41	0.77
70	120	0.64	0.37	0.64	0.56	0.32	0.55
95	150	0.48	0.3	0.47	0.42	0.26	0.4
120	185	0.39	0.26	0.37	0.34	0.23	0.31
150	240	0.33	0.24	0.3	0.29	0.21	0.27
185	300	0.29	0.22	0.24	0.25	0.19	0.2
240	400	0.24	0.2	0.19	0.21	0.17	0.16
300	500	0.21	0.19	0.15	0.18	0.16	0.13

Tableau IV.11 : Chute de tension ΔU en volts par ampère et par km dans un circuit [3]

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

La chute de tension dans un circuit s'écrit alors :

$$\Delta U \text{ (volts)} = B \times I_n \times L \quad (\text{IV.4})$$

$$\Delta U\% = 100 \frac{\Delta U}{U} \quad (\text{IV.5})$$

avec : B : Donné par le tableau IV.11.

I_n : Courant d'emploi en A.

L : Longueur du câble en km.

U : La tension nominal en V

IV.2. Choix et calcul des sections

Avant de faire les calculs nécessaires, nous avons commencé par déterminer la lettre de sélection du tableau (IV.1) et les facteurs de correction à partir des tableaux (IV.2, IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8).

Dans notre cas on a des câbles mono conducteur non enterrés.

- Lettre de sélection : F.
- Mesure l'influence du mode de pose : $K_1 = 1$.
- Mesure l'influence mutuelle des circuits : $K_2 = 0.82$.
- La température ambiante et la nature de l'isolant : $K_3 = 0.96$.
- Les autres facteurs de correction ne sont pas pris en considération car notre installation est non enterrée.

Le tableau IV.12 résume les calculs des sections des câbles en cuivre et en aluminium entre les transformateurs principaux et le jeu de barre.

Le tableau IV.13 résume les calculs des sections des câbles en cuivre et en aluminium entre les disjoncteurs principaux et les ateliers.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Item	Désignation	S (MVA)	In (A)	Ke	K1	K2	K3	K	Iz (A)	S _{cu} (mm ²)	S _{al} (mm ²)
811DH03DH20	Transformateur 02 (821TF02)	23,66	2483,66	1,3	1	0,82	0,96	0,79	4101,57	8 * 300	10 * 300
811DH03DH30	Transformateur 03 (821TF03)	23,66	2483,66	1,3	1	0,82	0,96	0,79	4101,57	8 * 300	10 * 300

Tableau IV.12 : Calculs des sections des câbles en cuivre et en aluminium entre les transformateurs principaux et le jeu de barre.

Item	Désignation	S (kVA)	In (A)	Ke	K1	K2	K3	K	Iz (A)	S _{cu} (mm ²)	S _{al} (mm ²)
316DH03DH10	Tableau Atelier Four Rotatif (316DH03)	1320,20	138,59	1,3	1	0,82	0,96	0,79	228,86	70	95
316DH04DH10	Tableau Atelier Massif Four (316DH04)	4134,63	434,02	1,3	1	0,82	0,96	0,79	716,76	3 * 150	3 * 185
840TF15DH10	Transformateur Eclairage (840TF15)	1030,40	108,16	1,3	1	0,82	0,96	0,79	178,62	50	70
317DH03DH10	Tableau Atelier Refroidisseur (410DH03)	1495,21	156,96	1,3	1	0,82	0,96	0,79	259,20	70	120

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

410DH03DH10	Tableau Broyeur Ciment 1 (410DH03)	2453,24	257,52	1,3	1	0,82	0,96	0,79	425,28	150	240
750DH03DH10	Tableau Bâtiment Administratifs & Ateliers	515,20	54,08	1,3	1	0,82	0,96	0,79	89,31	16	25
110DH03DH10	Tableau Concasseur K.H.D (110DH03)	1416,80	148,73	1,3	1	0,82	0,96	0,79	245,61	70	120
210DH03DH10	Tableau Broyeur Cru (210DH03)	3480,18	365,32	1,3	1	0,82	0,96	0,79	603,30	2 * 150	3 * 150
219TF05DH10	Transformateur Atelier Homo (219TF05)	1030,40	108,16	1,3	1	0,82	0,96	0,79	178,62	50	70
420DH03DH10	Tableau Broyeur Ciment 2 (410DH03)	2475,83	259,89	1,3	1	0,82	0,96	0,79	429,20	150	240
510TF05DH10	Transformateur Atelier Expéditions (510TF05)	641,18	67,31	1,3	1	0,82	0,96	0,79	111,15	25	35
215DH03DH10	Tableau A.P.S (215DH03)	2227,00	233,77	1,3	1	0,82	0,96	0,79	386,06	150	240

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

212DH03DH10	Tableau Reprise Ajouts/Concassage FCB (212DH03)	1131,51	118,78	1,3	1	0,82	0,96	0,79	196,15	50	70
821DH03DH60	Amiante/Gica	308,00	32,33	1,3	1	0,82	0,96	0,79	53,39	6	10

Tableau IV.13 : Calculs des sections des câbles en cuivre et en aluminium entre les disjoncteurs principaux et les ateliers.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Une fois les sections des câbles sont déterminées on passe à la vérification de la chute de tension par rapport à la norme.

Les tableaux IV.14 et IV.15 résument les calculs de la chute de tension sur le cuivre et l'aluminium des sections des câbles choisis.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Item	Désignation	S _{cu} (mm ²)	S _{al} (mm ²)	B _{cu}	B _{al}	L (km)	In (A)	ΔU _{cu} %	ΔU _{al} %
811DH03DH20	Transformateur 02 (821TF02)	8 * 300	10 * 300	1,44	2,5	0,025	3228,76	2,11	3,67
811DH03DH30	Transformateur 03 (821TF03)	8 * 300	10 * 300	1,44	2,5	0,025	3228,76	2,11	3,67

Tableau IV.14 : Calculs de la chute de tension en cuivre et en aluminium entre les transformateurs principaux et le jeu de barre.

Item	Désignation	S _{cu} (mm ²)	S _{al} (mm ²)	B _{cu}	B _{al}	L (km)	In (A)	ΔU _{cu} %	ΔU _{al} %
316DH03DH10	Tableau Atelier Four Rotatif (316DH03)	70	95	0,56	0,75	0,030	180,16	0,06	0,07
316DH04DH10	Tableau Atelier Massif Four (316DH04)	3 * 150	3 * 185	0,87	1,02	0,160	564,23	1,43	1,67
840TF15DH10	Transformateur Eclairage (840TF15)	50	70	0,77	0,77	0,030	140,61	0,06	0,06
317DH03DH10	Tableau Atelier Refroidisseur (410DH03)	70	120	0,56	0,56	0,029	204,04	0,06	0,06

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

410DH03DH10	Tableau Broyeur Ciment 1 (410DH03)	150	240	0,29	0,29	0,350	334,78	0,62	0,62
750DH03DH10	Tableau Bâtiment Administratifs & Ateliers	16	25	2,4	2,4	0,400	70,31	1,23	1,23
110DH03DH10	Tableau Concasseur K.H.D (110DH03)	70	120	0,56	0,56	1,300	193,34	2,56	2,56
210DH03DH10	Tableau Broyeur Cru (210DH03)	2 * 150	3 * 150	0,58	1,26	0,200	474,92	1,00	2,18
219TF05DH10	Transformateur Atelier Homo (219TF05)	50	70	0,75	0,75	0,200	140,61	0,38	0,38
420DH03DH10	Tableau Broyeur Ciment 2 (410DH03)	150	240	0,29	0,29	0,350	337,86	0,62	0,62
510TF05DH10	Transformateur Atelier Expéditions (510TF05)	25	35	1,3	1,3	0,450	87,50	0,93	0,93
215DH03DH10	Tableau A.P.S (215DH03)	150	240	0,29	0,29	0,300	303,91	0,48	0,48

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

212DH03DH10	Tableau Reprise Ajouts/Concassage FCB (212DH03)	50	70	0,75	0,75	0,550	154,41	1,16	1,16
821DH03DH60	Amiante/Gica	6	10	6,2	6,2	1,000	42,03	4,74	4,74

Tableau IV.15 : Calcul de la chute de tension en cuivre et en aluminium entre les disjoncteurs principaux et les ateliers.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Après les vérifications effectuées, nous avons obtenu des chutes de tension conformes aux normes.

IV.3. Choix des transformateurs

Un transformateur comporte généralement deux enroulements :

- primaire, de tension U_1 et parcouru par un courant I_1
- secondaire, de tension U_2 et parcouru par un courant I_2 .

Ces deux enroulements sont galvaniquement séparés et parcourus par des courants I_1 et I_2 conventionnellement de sens inverse.

IV.3.1. Choix du diélectrique et de la technologie

Dans le choix du diélectrique de refroidissement, plusieurs paramètres sont à prendre en considération, notamment [6] :

- la sécurité des personnes, au niveau du transformateur ou à son voisinage (environnement), sécurité qui fait l'objet d'une réglementation et de recommandations officielles.
- le bilan économique, compte tenu des avantages de chaque technique et de la gamme du matériel existant.

IV.3.1.1. Transformateurs de type sec enrobé

Le principe de ce transformateur est à refroidissement par l'air ambiant [6]. L'isolation des enroulements des transformateurs de type sec enrobé (ou encapsulé) est réalisée par des isolants secs (ex : résine époxy). Le refroidissement est donc assuré par l'air ambiant sans liquide intermédiaire.

Par exemple, les transformateurs secs enrobés de type Trihal sont réalisés à l'aide de systèmes brevetés et exclusifs de bobinage et d'enrobage par moulage sous vide de l'enroulement HTA

IV.3.1.2. Transformateurs de type immergé

Le principe de ce transformateur est à refroidissement par diélectrique liquide [6]. Le liquide utilisé comme diélectrique dans les transformateurs immergés est :

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

- soit de l'huile minérale, tirée du pétrole (transformateur Minera).
- soit de l'huile végétale, extraite des plantes (transformateur Végéta).

Ces liquides étant inflammables, voire très inflammables dans le cas de l'huile minérale, il est recommandé de prendre des mesures de sécurité, obligatoires dans la plupart des cas dont la plus simple est le relais de protection type DMCR ou DGPT2. En cas d'anomalie, il donne l'ordre de mise hors service du transformateur avant que la situation ne devienne dangereuse. L'huile minérale est difficilement biodégradable, même sur le long terme, alors que l'huile végétale est biodégradable à 99 % en 43 jours. Elle constitue une alternative écologique, apportant de plus des performances optimisées.

Le diélectrique liquide sert aussi à évacuer les calories. Il se dilate en fonction de la charge et de la température ambiante. La conception des transformateurs leur permet d'absorber les variations de volume correspondantes.

IV.3.2. Importance du dimensionnement

Il est important de déterminer la puissance optimale d'un transformateur car :

- surdimensionné entraîne un investissement excessif et des pertes à vide inutiles, mais la réduction des pertes en charge peut être très importante.
- sous-dimensionner entraîne un fonctionnement quasi permanent à pleine charge et souvent en surcharge avec des conséquences en chaîne :
 - rendement inférieur (c'est de 50 à 70 % de sa charge nominale qu'un transformateur a le meilleur rendement).
 - échauffement des enroulements, entraînant l'ouverture des appareils de protection et l'arrêt plus ou moins prolongé de l'installation.
 - vieillissement prématuré des isolants pouvant aller jusqu'à la mise hors service du transformateur. La CEI 60354 [7] signale qu'un dépassement permanent de la température maximale du diélectrique de 6°C réduit de moitié la durée de vie des transformateurs immergés[6].

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Pour définir la puissance optimale d'un transformateur, il faut connaître le cycle de fonctionnement de l'installation alimentée : puissance appelée simultanément ou alternativement par les récepteurs dont les facteurs de puissance peuvent varier de façon importante d'un récepteur à l'autre et selon l'utilisation.

IV.3.3. Méthode de dimensionnement

❖ Première partie

On établit un bilan des puissances pour déterminer la puissance appelée sur le réseau. On calcule successivement [6]:

- la puissance installée P_i , somme des puissances actives en kW des récepteurs de l'installation.
- la puissance utilisée P_u , c'est-à-dire la partie de cette puissance réellement utilisée en tenant compte des coefficients :
 - d'utilisation maximale des récepteurs (car ils ne sont pas en général utilisés à pleine puissance)
 - de simultanéité par groupes de récepteurs (car ils ne fonctionnent pas en général tous ensemble)
- la puissance appelée S_a correspondant à P_u (car la puissance assignée des transformateurs est une puissance apparente en kVA) en tenant compte :
 - des facteurs de puissance
 - des rendements.

❖ Deuxième partie

On détermine, pour la journée la plus chargée de l'année, la valeur P_c (kW) du pic de puissance maximale consommée et sa durée et la puissance apparente correspondante S_c (kVA).

❖ Choix final

La comparaison entre S_a et S_c et les aspects économiques décident de la puissance à retenir.

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

IV.3.4. Choix final de la puissance du transformateur

Le choix final des transformateurs doit prendre en compte les éléments suivants [6]:

- sûreté de fonctionnement : si l'installation ne comprend qu'un seul transformateur, il peut être prudent de sur calibrer la puissance S_a de l'ordre de 25 %.
- influence de la température.
- extension ultérieure : si elle est prévue, en tenir compte dans la détermination de la puissance S_a .
- facteur de puissance : il doit être ramené à 0,928 pour éviter les pénalités appliquées par le distributeur d'énergie :

$$S \text{ (kVA)} = \frac{P \text{ (kW)}}{0.928} \quad (\text{IV.6})$$

IV.3.5. Prise en compte des surcharges

Pour ne pas provoquer un vieillissement prématuré du transformateur les surcharges brèves ou prolongées que l'on peut admettre doivent être compensées par une charge « habituelle » plus faible [6].

IV.3.6. Dimensionnement du transformateur

La détermination de la puissance appelée sur le réseau S_u , elle est déjà calculée dans le chapitre II :

$$S_u = S_{uTF02} + S_{uTF03}$$

$$S_u = 10.95 + 12.71$$

$$S_u = 23.66 \text{ MVA}$$

Dans notre cas, les transformateurs installés sont de puissance :

$$\text{Transformateur 02} = 26 \text{ MVA}$$

$$\text{Transformateur 03} = 30 \text{ MVA}$$

Chapitre IV DIMENSIONNEMENT DES SECTIONS DES CABLES ET CHOIX DU TRANSFORMATEUR

Les transformateurs peuvent satisfaire le besoin énergétique de l'installation, puisque la puissance totale disponible représente 56 MVA, ce qui représente environ 2 fois l'énergie nécessaire pour usine.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons abordé les calculs des sections des différents câbles de liaisons MT à partir des sorties des transformateurs jusqu'aux ateliers de production d'une part, ainsi que les vérifications des chutes de tensions de ses derniers, afin de faire un bon choix des sections de ses câbles qui garantira un minimum de pertes possible d'autre part.

L'accent a été mis également sur les différents critères du choix des transformateurs pour assurer l'alimentation de toute la charge sans surcharge ni échauffement de ses derniers.

CONCLUSION

GENERALE

CONCLUSION

Le travail que nous avons effectué nous a permis non seulement de tester les connaissances acquises durant notre formation, mais aussi les approfondir, notamment, pour ce qui est de la distribution de l'énergie électrique. L'étude technique et le développement des dispositifs de compensation de l'énergie réactive et de tenu de la tension ainsi que les canalisations pour une meilleure exploitation de l'énergie électrique.

Pour améliorer le facteur de puissance, il est nécessaire de faire appel aux moyens de compensation. L'emploi des batteries de condensateurs est le moyen le plus efficace et le plus économique de production de l'énergie réactive dans les installations industrielles.

L'étude ainsi menée nous a permis d'émettre certaines propositions tendant à améliorer le processus existant et que l'on pourrait citer dans ce qui suit :

- Une étude estimative du cout de l'installation ;
- Une étude de la protection ;
- Analyse du cout de consommation d'énergie avant la compensation et après compensation ;
- Optimiser au maximum les coûts et charges de manière à garantir principe de la rentabilité et l'amortissement des biens d'équipement et autres installations électriques réalisées ;
- Envisager la rénovation des installations existants en fonction du développement de la science dans le domaine énergétique.

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.M. BEAUSSY, « Bilan de puissance », Forum Electrotechnique, Edition 16/01/2014.
- [2] C. PRÉVÉ, R. JEANNOT, « Guide de conception des réseaux électriques industriels », Schneider Electric, n° : 6 883 427/A, Edition Février 1997.
- [3] Schneider Electric, « Guide d'installation électrique », Edition 2010.
- [4] R. BOURGEOIS, D. COGNIEL, « Électrotechnique », Mémotech plus, Edition CASTEILLA.
- [5] ABB, « Guide technique installations B.T», Edition FRENT015405FR.
- [6] Schneider Electric, « Guide de la distribution électrique basse tension et HTA », Edition 2009.
- [7] CEI 60354, « Guide de charge pour transformateurs de puissance immergés dans l'huile », Edition 1991.

Résumé :

Le facteur de puissance est un excellent indicateur de qualité d'une conception ainsi qu'un outil de gestion utile d'une installation électrique. Ce projet est consacré à l'étude et à l'amélioration de ce facteur au sein d'une installation industrielle considéré comme l'un des plus importants consommateurs d'énergie électrique en Algérie, à savoir : la Cimenterie de Meftah (Alger). A cet effet, un bilan de puissance a été effectué suivi d'une étude technique des canalisations électriques, ainsi que le choix idéal pour le mode et le type de compensation pour une bonne sécurité d'exploitation de l'énergie électrique.

Mots clés :

Facteur de puissance –sections – compensation – énergie électrique – facteurs de correction

Summary:

The power factor is an excellent quality indicator of a design as well as a useful management tool of an electrical installation. This project is devoted to the study and improvement of this quality indicator within an industrial utility which is considered as one of the largest consumers of electrical energy in Algeria namely: Cimenterie de Meftah (Alger). For this purpose a power balance analysis was carried out for the redesign of the electrical pipes, as well as the choice for the optimum compensation scheme of the reactive energy.

Key words :

Power factor - sections - compensation - electrical energy - correction factors