



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**Département D'électrotechnique**

***Mémoire de fin d'étude***

**Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en  
génie électrique**

**Spécialité : ELECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE**

**Thème**

**Etude et compensation de la puissance réactive d'un réseau  
industriel basse tension**

**Réalisé par :**

- **FEZZOUA Messipsa**
- **OULEFKI Hicham**

**Encadré par :**

**M<sup>r</sup> : S.ATROUNE**

## *Remerciement*

*Tout d'abord, je remercie dieu le tout puissant de m' avoir donné tant de courage, de volonté, de patience et de santé durant toutes ces années d' études.*

*Je voudrai sincèrement exprimer mes vifs remerciements à*

*Mr : S. ATRONNE pour sa disponibilité durant toute la réalisation de ce travail, pour ces précieux conseils, orientations et critiques.*

*J' adresse mes chaleureux remerciements aux membres de jury, qui mon honorer d' accepter de juger mon travail.*

*Et enfin, à toutes personnes qui ont contribuées, de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail*

## **Dédicaces**

**En signe de respect et de reconnaissance, je dédie ce  
travail à :**

**Mes très chers parents**

**Mes frères et mes sœurs**

**Toute ma grande famille**

**Et à tous ceux qui m'ont aidé.**

**hicham**

# *Dédicace*

## *A mes chers parents*

*Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Sources de mes joies, secrets de ma force, Vous serez toujours le modèle.*

*Merci pour tous vos sacrifices pour que vos enfants Grandissent et prospèrent, Merci de trimer sans relâche, malgré les péripéties de la vie Au bien être de vos enfants, Merci d'être tout simplement mes parents, C'est à vous que je dois cette réussite, Et je suis fière de vous l'offrir, Que dieu vous procure bonne santé et longue vie.*

## *A mon cher frère et ma petite sœur*

*En témoignage de mon affection fraternelle, de ma profonde tendresse et reconnaissance, je vous souhaite une vie pleine de bonheur et de succès et que Dieu, le tout puissant, vous protège et vous garde.*

## *A toute ma grande famille*

*Paternelle et Maternelle, merci de m'encourager dans mes études depuis tout petit, je vous souhaite une longue vie et meilleur santé.*

## *A mon binôme*

*C'est un grand plaisir pour moi d'accomplir ce travail avec toi frère.*

## *A mes amis de toujours*

*Boukir Noureddine, Madagh Ghilas, Medjahed Ahmed, Ouamar Tahar,*

*En souvenir de notre sincère amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

## *A mes chers collègues de classe*

*En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passé ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.*

*Massi.*

## Liste des tableaux

<b>Tableau III.3.1</b>	facteur d'utilisation par récepteur NF EN 12193.
<b>Tableau III.3.2.1</b>	Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs.
<b>Tableau III.3.2.2</b>	Facteur de simultanéité pour les différents types de récepteur.
<b>Tableau III.4.2</b>	Donnée de notre installation électrique.
<b>Tableau III.4.3</b>	Calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs.
<b>Tableau III.4.3</b>	Calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs.
<b>Tableau III.4.4</b>	Calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires.
<b>Tableau III.4.5</b>	Calcul de bilan de puissance de la TGBT.
<b>Tableau III.5.1</b>	facteur correspondance entre $\text{Cos } \varphi$ et $\text{tan } \varphi$ mesuré et désiré.

---

---

## Liste des figures

- Figure 1**..... Niveau de tension normalisée.
- Figure 2**..... Exemple d'une partie d'un réseau de transport.
- Figure 3**..... Structure du réseau électrique national.
- Figure 4**..... Les différents éléments dans un poste.
- Figure 5**.....Distribution radiale.
- Figure 6**.....Distribution en peigne.
- Figure 7**.....Distribution en boucle.
- Figure 8**.....Diagramme vectorielle des courants.
- Figure 9**..... Influence de la puissance réactive.
- Figure 10**..... Principe de la compensation d'énergie réactive.
- Figure 11**..... Schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne.
- Figure 12**..... Profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation.
- Figure 13**..... Schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne.
- Figure 14**..... Compensation fixe.
- Figure 15**..... Principe de la compensation automatique d'une installation.

**Figure 16**..... Compensation globale.

**Figure 17**..... Compensation partielle.

**Figure 18**..... Compensation individuelle.

**Figure 19**..... Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs.

# **Sommaire**

# SOMMAIRE

Liste des figures

. Introduction générale ..... 1

## **CHAPITRE I : Généralités sur les réseaux électriques industriels**

I.1. introduction .....3

I.2 Les niveaux de tensions des réseaux.....3

I.3 Description des réseaux électrique.....4

    I.3.1 Le réseau de transport TH.....4

    I.3.2 Le réseau de répartition HT ..... 5

    I.3.3 Le réseau de distribution MT ..... 6

    I.3.4 Le réseau de livraison BT.....6

I.4 Les postes électriques.....7

    I.4.1 Types de postes.....7

    I.4.2 Les différents éléments de poste électrique.....8

I.5 Les mode de distribution d'énergie électrique.....9

    I.5.1 Distribution radiale.....9

        I.5.1.1 Les Avantages et inconvénients de la distribution radiale.....10

    I.5.2 Distribution en peigne.....11

        I.5.2.1 Les avantage et inconvénients de la distribution en peigne.....11

    I.5.3 Distribution en boucle.....12

        I.5.3.1 Les avantages et inconvénients de la distribution en boucle.....12

I.6 Conclusion.....13

## **Chapitre II : Étude de la compensation de la puissance réactive en**

### **BT**

II.1 Introduction.....14

II .2. Importance de la puissance réactive.....14

II.3 Définitions.....15

    II.3.1 Energie active.....15

    II.3.2 Energie réactive.....15

    II.3.3 Energie apparente.....15

II.4 Composante active et réactive du courant.....15

    II.4.1 Courant actif (Ia).....15

II.4.2 Courant réactif ( $I_r$ ).....	15
II.4.3 Courant apparent ( $I_t$ ).....	15
II.5 Composante active et réactive de la puissance.....	16
II.5.1 La puissance active.....	16
II.5.2 La puissance réactive.....	16
II.5.3 La puissance apparente.....	17
II.6 Facteur de puissance.....	17
II.6.1 La valeur $\tan \varphi$ .....	17
II.6.2 Amélioration du facteur de puissance.....	18
II.6.3 Avantages d'un bon facteur de puissance.....	18
II.5.4 Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance.....	18
II.7 Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs.....	19
II.7.1. Définition d'un condensateur.....	19
II.7.2. Rôle du condensateur de puissance .....	20
II.7.4 Constitution de la batterie de condensateurs.....	20
II.7.5 Principe de fonctionnement de la compensation avec batterie condensateur ...	21
II.8 Type d'installation des batteries condensateurs.....	22
II.8.1 Le condensateur à installation série.....	23
II.8.2 Le condensateur à installation shunt.....	24
II.9 Les différents types de compensation.....	24
II.9.1 Compensation fixe.....	24
II.9.2 Compensation de type automatique(ou en gradins).....	25
II.9.2.1 Les avantage de la compensation automatique.....	26
II.10 Choix de la localisation de compensation par batteries.....	26
II.10.1 Compensation globale.....	27
II.10.2 Compensation partielle ou par secteurs.....	27
II.10.3 Compensation individuelle.....	29
II.10.4 Compensation combinée.....	30
II.11. Les différents modes de couplage des condensateurs.....	31
II.11.1Couplage en triangle.....	31
II.11.2Couplage en étoile.....	31
II.11.3 Choix du couplage d'un condensateur.....	31
II.12. Conclusion.....	32

## **Chapitre III : Calcul du bilan de puissance et compensation de l'énergie réactive d'une installation**

III.1 Introduction.....	33
III.2 Détermination des puissances.....	33
III.2.1 Puissance installée.....	33
III.2.2 Puissance utilisée.....	33
III.3 Description des facteurs de correction.....	34
III.3.1 Facteur d'utilisation maximale : $K_u$ .....	34
III.3.2 Facteur de simultanéité : $K_s$ .....	34
III.3.3 Facteur d'extension : $K_e$ .....	35
III.4 Le calcul du bilan de puissance d'une installation électrique BT.....	35
III.4.1 le Schéma unifilaire de notre installation.....	35
III.4.2 Présentation des données de l'installation électrique.....	36
III.4.3 Méthode de calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs.....	36
III.4.4 Méthode de calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires.....	38
III.4.5 Méthode de calcul de bilan de puissance de la TGBT.....	38
III.5. Choix des batteries de condensateurs à installer.....	39
III.5.1 Détermination de la puissance des condensateurs $Q_c$ (kVAr).....	39
III.5.2 détermination de type de compensation.....	41
III.5.3 Détermination de la zone d'implantation.....	41
III.5.4 Détermination du type et montage des batteries des condensateurs.....	41
III.6 Conclusion.....	43

### **Conclusion générale**

Conclusion générale.....	44
--------------------------	----

# **Introduction générale**

## I. Introduction générale

Le 20<sup>ème</sup> siècle a vu peu à peu l'électricité s'imposer comme vecteur privilégié de l'énergie dans la quasi-totalité des domaines domestiques et industriels. Supports incontournables de cette énergie, les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique représentent aujourd'hui un enjeu économique et technologique considérable. Ils constituent une des composantes essentielles pour le développement et l'évolution des sociétés humaines que ce soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie que sur le développement des activités industrielles. Leur rôle est de fournir aux utilisateurs le produit électricité au moindre coût dans des conditions de qualité et de sécurité satisfaisantes. [1]

Les réseaux électriques des différents pays autour de la méditerranée (Europe, Maghreb et Asie) sont interconnectés en un seul et même système de transport d'énergie électrique, à la fois maillé et bouclé. La moindre défaillance de ce système vaste et complexe, exploité et asservi en temps réel pour toujours adapter la production à la demande d'énergie électrique, serait une catastrophe industrielle et socio-économique. L'exploitation d'un tel réseau est donc toujours un compromis entre des contraintes économiques, des contraintes techniques liées à la physique du système.

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

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.

De plus, du fait d'un courant appelé plus important, la circulation de l'énergie réactive sur le réseau de distribution entraîne des surcharges au niveau des transformateurs, de l'échauffement des câbles d'alimentation, des pertes en ligne supplémentaires et des chutes de tension considérables.[1]

Pour les raisons évoquées ci-dessus, il est nécessaire de produire de l'énergie réactive pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle « **la compensation de l'énergie réactive** ».

Pour ce faire nous avons subdivisé ce travail en trois chapitres. La première porte sur des généralités sur les réseaux électriques industriels. Le deuxième chapitre est réservé pour connaître le principe de compensation de l'énergie réactive dans une installation à basse tension ainsi que ces différentes méthodes de fonctionnement.

Le troisième chapitre est consacré pour l'élaboration du bilan de puissance qui va nous permettre de déterminer les différentes valeurs de puissances (active, réactive et apparente) réellement consommée et le facteur de puissance de notre installation, ensuite on détermine la valeur des batteries condensateurs à installer et aussi d'autre caractéristique tel le type de compensation, la zone d'implantation et type de montage.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

# Chapitre I

Généralités sur les réseaux  
électriques industriels

## I.1 Introduction

La production de l'énergie électrique à proximité des lieux d'utilisation n'est pas toujours possible. Généralement, cette énergie est produite par des groupes de production sous une moyenne tension (15,5 kV ; 12,5 kV ; 11 kV ; 5,5 kV) dans des lieux de plus au moins distants des centres de consommation. Elle sera ensuite transformée sous une haute tension (90 kV ; 150 kV ; 225 kV.....) par des transformateurs élévateurs installés à la sortie des générateurs.

La totalité de l'énergie produite ou le sur plus disponible, sera transporté par un ensemble de lignes électriques sous une haute tension, plusieurs dizaines ou centaines de kilomètres, jusqu'aux centres de consommation ; Elle sera de nouveau transformée par des transformateurs abaisseurs et distribuée sous une moyenne tension (30kV ; 10kV....) pour la mettre à la disposition des usagers [2].

Le réseau électrique est hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution.

Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs [2].

## I.2 Les niveaux de tensions des réseaux

### ® Les tensions normalisées selon la CEI :

La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit :

- HTB : pour une tension composée supérieure à 50 kV.
- HTA : pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV.
- BTB : pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV.
- BTA : pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V.
- TBT : pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V.[3]

DOMAINES DE TENSION		VALEUR DE LA TENSION en VOLTS	
		En courant alternatif	En courant continu
Très basse tension TBT		$U < 50$	$U \leq 120$
Basse tension BT	BTA	$50 < U \leq 500$	$120 < U \leq 750$
	BTB	$500 < U \leq 1000$	$750 < U \leq 1500$
Haute tension HT	HTA	$1000 < U \leq 50\ 000$	$1\ 500 < U \leq 75\ 000$
	HTB	$U > 50\ 000$	$U > 75\ 000$

**Figure 1.** Niveau de tension normalisée. [3]

Nous prendrons par convention dans ce qui suit :

- HTB désignera la Haute Tension HT.
- HTA désignera la Moyenne Tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la Basse Tension BT. [3]

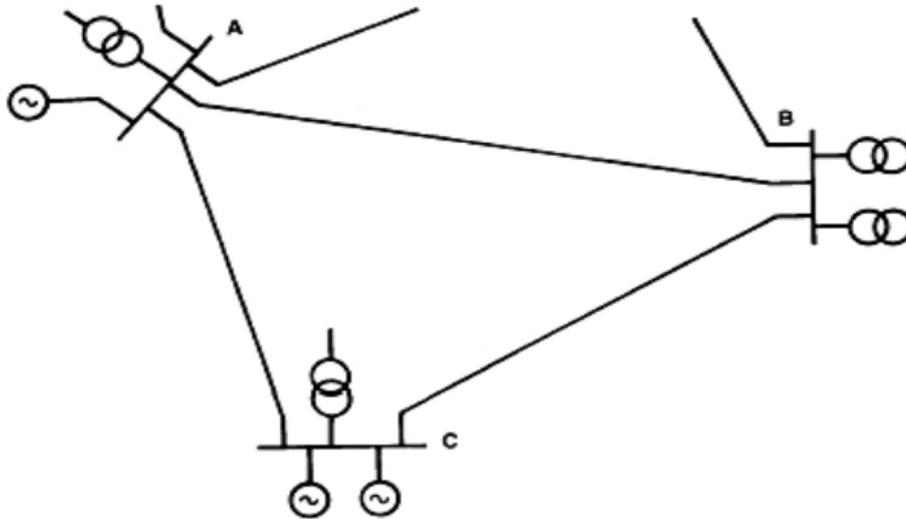
### I.3 Description des réseaux électriques

#### I.3.1 Le réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances (> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs). Chaque nœud A, B et C (Fig. I.3) constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en général constitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel se raccordent les lignes, au moyen d'appareils. [4]

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [4].



**Figure 2.** Exemple d'une partie d'un réseau de transport. [4]

### I.3.2 Le réseau de répartition HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers Les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MV A) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,... [4]

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains). Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [4].

### I.3.3 Le réseau de distribution MT

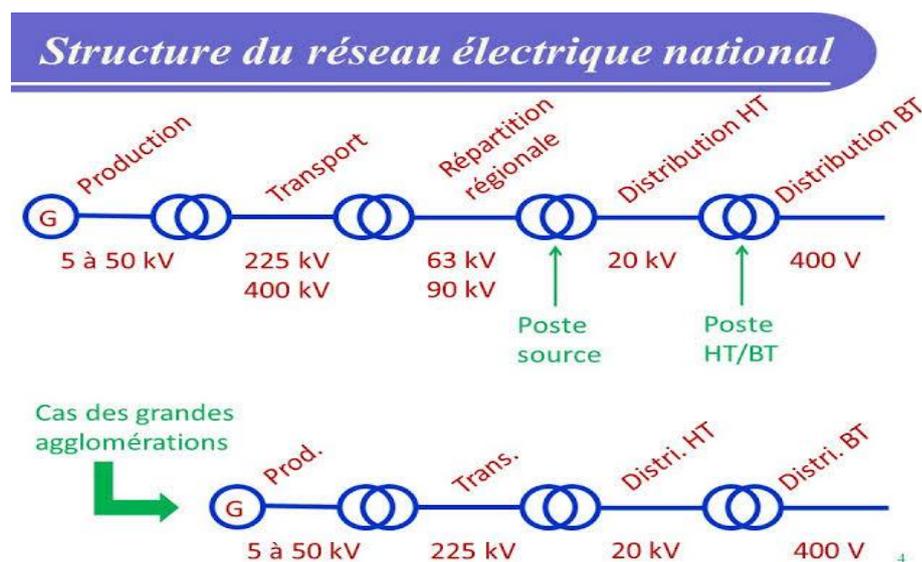
Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dans les villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir ; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements [4].

### I.3.4 Le réseau de livraison BT

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 400/230 V (380/220 V en Algérie). Nous le rencontrons dans nos maisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distribution MT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès aux abonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique [4].



**Figure 3.** Structure du réseau électrique national. [4]

## I.4 Les postes électriques

### I.4.1 Types de postes

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes : [5]

**1- Les postes à fonction d'interconnexion :** qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;

**2- Les postes de transformation :** dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs ;

**3- Les postes mixtes :** les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation. Les actions élémentaires inhérentes aux fonctions à remplir sont réalisées par l'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

- D'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs ;
- D'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit grâce aux sectionneurs ;
- De modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement) et agit sur l'appareillage à haute tension afin d'assurer les conditions d'exploitation pour lesquelles le réseau a été conçu. [5]

Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi que l'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule.

Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordés à ses jeux de barres.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu de barres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'un poste caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques. [5]

### I.4.2 Les différents éléments de poste électrique

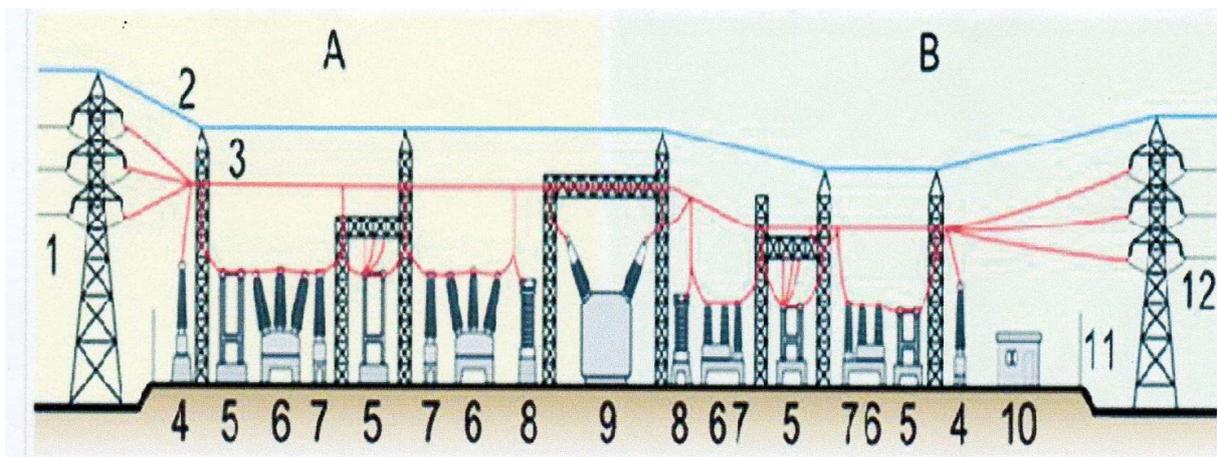
On distingue parfois les éléments d'un poste en "éléments primaires" (les équipements haute tension) et "éléments secondaires" (équipements basse tension)

Parmi les équipements primaires, on peut citer [5] :

- Transformateur électrique,
- Autotransformateur électrique,
- Disjoncteur à haute tension,
- Sectionneur,
- Sectionneur de mise à la terre
- Parafoudre,
- Transformateur de courant,
- Transformateur de tension,
- Combiné de mesure (courant + tension),
- jeux de barres.

Parmi les éléments secondaires on peut citer :

- relais de protection,
- équipements de surveillance,
- équipements de contrôle,
- système de télé conduite,
- équipements de télécommunication,
- comptage d'énergie



**Figure 4.** Les différents éléments dans un poste. [5]

A : Coté primaire

B : Coté secondaire

1. Ligne électrique

2. Câble de garde

3. Ligne électrique

4. Transformateur de tension

5. Sectionneur

6. Disjoncteur

7. Transformateur (de puissance)

8.

9.

10. Bâtiment secondaire

11. Collecteur

12. Ligne électrique secondaire

### **I.5 Les modes de distribution d'énergie électrique**

Le mode de distribution consiste à choisir un schéma convenable de l'installation pour canaliser l'énergie des différentes sources ou poste de transformation aux charges, il existe trois modes de distribution en basse tension :

- Distribution radiale
- Distribution en boucle
- Distribution en peigne.

#### **I.5.1 Distribution radiale**

La distribution radial est la plus employée et la plus conseillée dans toute installation industrielle basse tension car elle permet d'assurer une bonne continuité de service, une exploitation facile du matériels et sans oublier le facteur économique. [2]

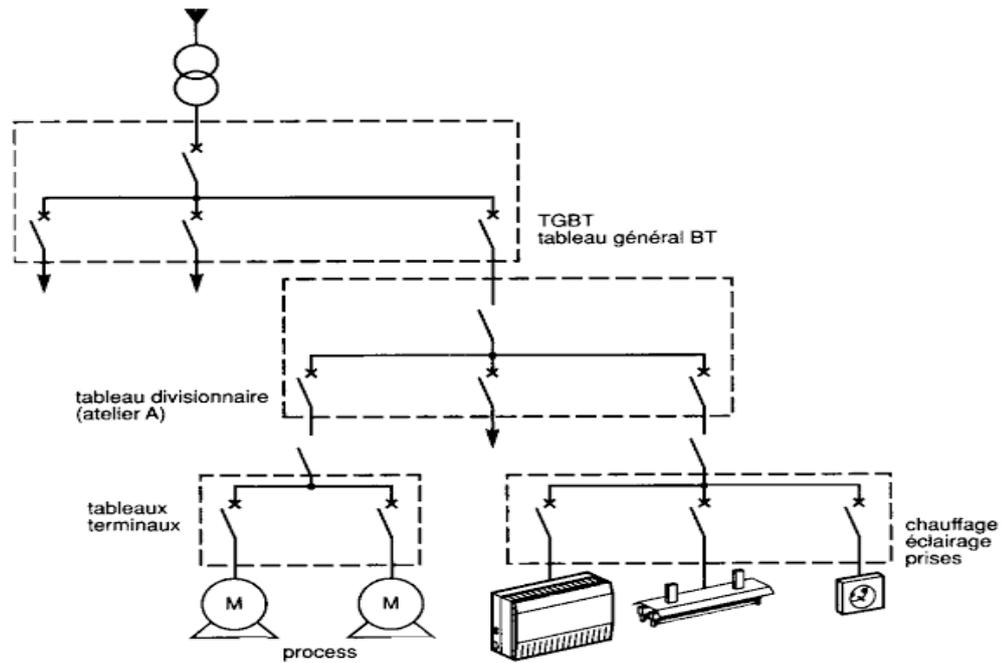


Figure 5. Distribution radiale. [2]

### I.5.1.1 Les Avantages et inconvénients de la distribution radiale

- **Les Avantages de la distribution radiale**

- Simplicité de réalisation.
- Localisation facile des défauts.
- Lors d'un défaut, seul le circuit concerné est mis hors service.
- Entretien facile.
- Moindre frais de réalisation.

- **1 Les Inconvénients de la distribution radiale**

- Lors d'un défaut enregistré en amont d'un circuit il affecte automatiquement les circuits en aval
- Continuité de service limitée.

### I.5.2 Distribution en peigne

Elle est surtout utilisée pour les installations peu étendu et de faible puissance. [2]

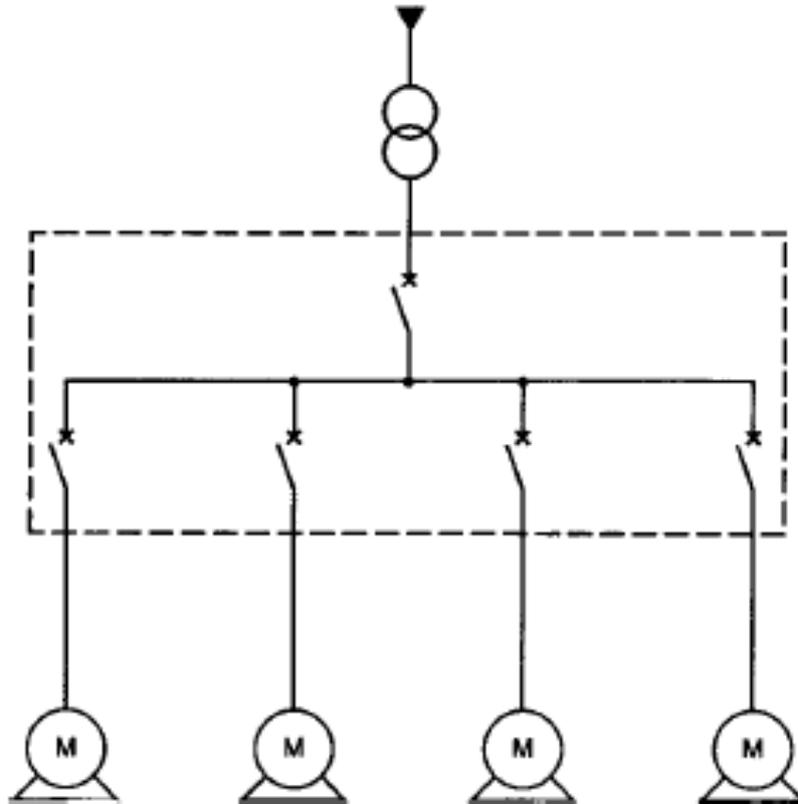


Figure 6. Distribution en peigne [2]

#### I.5.2.1 Les avantages et inconvénients de la distribution en peigne

- **Les avantages de la distribution en peigne**
  - Dans le cas d'un défaut autre que celui du câble principal, seul le circuit en défaut est coupé.
  
- **Les inconvénients de la distribution en peigne**
  - Il se compose d'un grand nombre de circuits séparés, donc de grandes longueurs de ligne et par conséquent, une surabondance de cuivre.
  - Les caractéristiques de l'appareillage de protection (niveau 2) doivent être surdimensionnées.

### I.5.3 Distribution en boucle

La distribution en boucle n'est pratiquement pas utilisée mais elle est très fréquente en Angleterre par exemple, pour les installations domestique (desserte de prise de courant) [2]

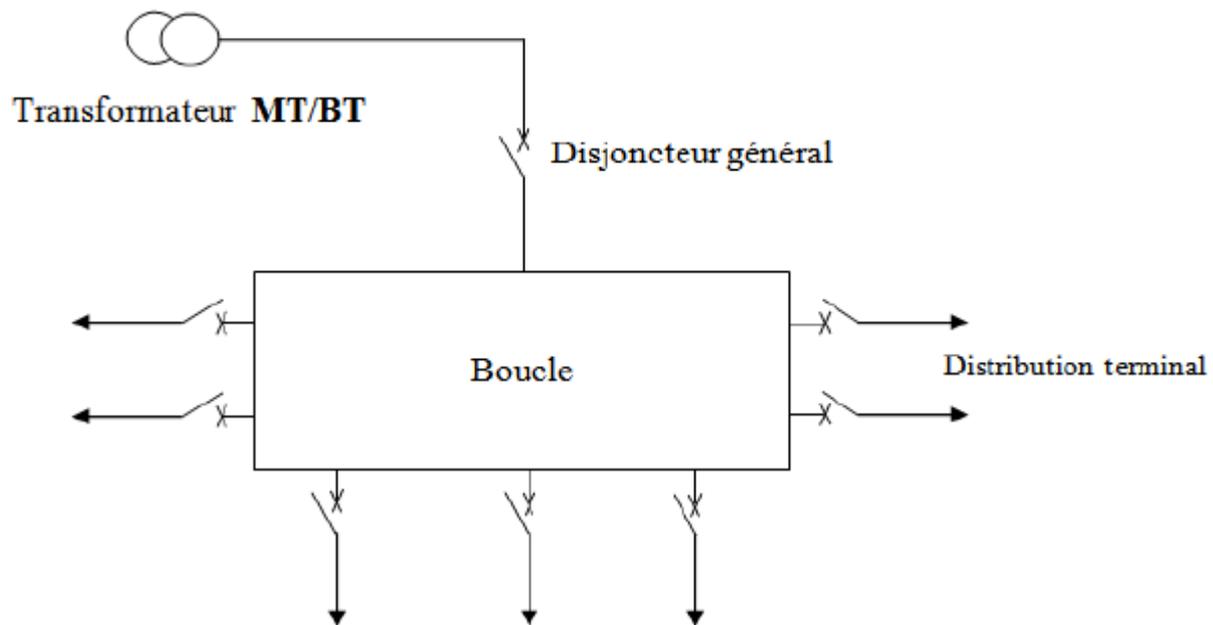


Figure 7. Distribution en boucle. [2]

#### I.5.3.1 Les avantages et inconvénients de la distribution en boucle

- **Les avantages de la distribution en boucle**

- Réduction des pertes joule.
- Un seul dispositif de protection par boucle, dans le cas d'un défaut le courant circule dans un autre sens

- **Les inconvénients de la distribution en boucle**

- Connexion spéciales aux dérives (ne pas couper la boucle)
- Chaque dérivation peut au maximum alimenter deux circuits d'utilisation.
- Répartition difficile des intensités.
- Difficulté de sélectivité de la protection.

## **I.6 Conclusion**

Dans ce premier chapitre, nous avons pu exposer en rappelant les différents réseaux électriques (transport, répartition, distribution livraison) ainsi les modes d'alimentations en énergie électrique des installations industrielles.

Ensuite, on a cité les différents types des postes électriques et les divers éléments qui les constituent.

Nous avons fait une description des différents modes de distributions d'énergie électrique tout en citant leurs avantages et inconvénients.

# **Chapitre II**

Etude de la compensation de la  
puissance réactive en BT

## **II.1 Introduction**

La demande de puissance active étant incompressible, la réduction des pertes de puissance ne peut être réalisée qu'en agissant sur la composante réactive du courant transitant dans les lignes de distribution. [6].

La compensation de l'énergie réactive est un élément important pour améliorer la qualité du réseau électrique.

Une installation électrique, en courant alternatif, comprenant des récepteurs tels que transformateurs, moteurs, ballastes de tubes fluorescents ou tout autres récepteurs dont l'intensité est déphasée par rapport à la tension, consomme de l'énergie réactive. Cette énergie réactive (exprimée en kilo var heure – kVAr/h ) est facturée au même titre que l'énergie active par les fournisseurs d'énergie [6].

L'énergie réactive fait donc consommer plus de puissance et contribue ainsi à alourdir la facture d'électricité. [6]

## **II .2. L'influence de la puissance réactive**

La puissance réactive est un facteur influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur ce résume dans les points suivants :

A) La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.

B) Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.

c) Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production [7].

## **II.3 Définitions des différentes formes d'énergie**

### **II.3.1 Energie active**

Elle résulte de la puissance active  $P$  (kW) et elle est utilisable après sa transformation par le récepteur sous forme de chaleur. Elle s'exprime en kilo watt heure (kW/h) [2].

### II.3.2 Energie réactive

Elle sert à la magnétisation des circuits magnétiques des machines (transformateurs et moteurs). De plus, les lignes et les câbles consomment ou produisent de la puissance réactive suivant leur charge. Elle s'exprime en kilo var heure (kVar/h). Elle correspond à la puissance réactive  $Q$  (kVar) des récepteurs [2].

### II.3.3 Energie apparente

L'énergie apparente (kVA/h) est la somme vectorielle des deux énergies précédentes. Elle correspond à la puissance apparente  $S$  (kVA) des récepteurs, somme vectorielle de  $P$  (kW) et  $Q$  (kVar).

## II.4 Composante active et réactive du courant

A chacune des énergies active et réactive, correspond un courant [2].

### II.4.1 Courant actif ( $I_a$ )

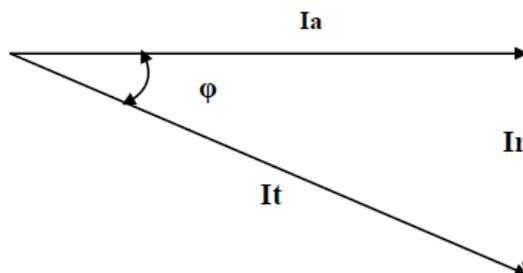
Le courant actif ( $I_a$ ) est en phase avec la tension du réseau. il engendre la puissance active.

### II.4.2 Courant réactif ( $I_r$ )

Le courant réactif ( $I_r$ ) est déphasé de  $90^\circ$  par rapport au courant actif, soit en retard (récepteur inductif), soit en avance (récepteur capacitif). Il est nécessaire pour l'excitation magnétique des récepteurs. [2]

### II.4.3 Courant apparent ( $I_t$ )

Le courant apparent ( $I_t$ ) est le courant résultant qui parcourt la ligne depuis la source jusqu'au récepteur. Si les courants sont parfaitement sinusoïdaux, on peut utiliser la représentation de Fresnel. [2]



**Figure 8.** Diagramme vectorielle des courants. [2]

Les courants actifs, réactifs et apparents sont liés par les relations suivantes :

$$I_t = \sqrt{(I_a)^2 + (I_r)^2} \quad (\text{II.1})$$

$$I_a = I_t \cos \varphi \quad (\text{II.2})$$

$$I_r = I_t \sin \varphi \quad (\text{II.3})$$

$\varphi$  Angle de déphasage entre les composantes active et les composantes apparentes

## II.5 Composante active et réactive de la puissance

Le diagramme précédent établi pour les courants est aussi valable pour les puissances, il suffit de multiplier chaque courant par la tension du réseau. On définit aussi :

### II.5.1 La puissance active

On appelle puissance active la puissance qui se transforme intégralement en énergie mécanique, thermique et lumineuse, etc.

La puissance active est le produit de la tension par la composante du courant en phase avec elle :

- En monophasé :  $P = VI \cos \varphi \quad (\text{II.4})$

- En triphasé :  $P = \sqrt{3} UI \cos \varphi \quad (\text{II.5})$

Elle se mesure en W (watts) ou en KW à l'échelle industrielle.

### II.5.2 La puissance réactive

On appelle puissance réactive la quantité Q fournie pour l'excitation magnétique des récepteurs. Elle est consommée par les circuits inductifs et fournie par les circuits capacitifs.

La puissance réactive est le produit de la tension par la composante du courant réactif, en quadrature avec elle :

- En monophasé :  $Q = VI \sin \varphi \quad (\text{II.6})$

- En triphasé :  $Q = \sqrt{3} UI \sin \varphi \quad (\text{II.7})$

Elle se mesure en VAR (Voltampères réactifs), ou en kVar à l'échelle industrielle.

### II.5.3 La puissance apparente

On appelle puissance apparente la quantité  $S$  fournie par le réseau au récepteur, qui est la résultante des deux puissances précédentes :

- $\underline{S} = \underline{P} + j\underline{Q}$  (II.8)

- En monophasé :  $S = VI$  (II.9)

- En triphasé :  $S = \sqrt{3} UI$  (II.10)

### II.6 Facteur de puissance

Le facteur de puissance est égale par définition à :

$$FP = \frac{P \text{ (puissance active)}}{S \text{ (puissance apparente)}} \quad (II.11)$$

Le facteur de puissance est le rapport de la puissance active à la puissance apparente ; c'est un nombre abstrait compris entre 0 et 1.

En l'absence d'harmoniques, le facteur de puissance est égal à  $\cos\varphi$ . Par contre, en présence d'harmoniques ces deux valeurs peuvent être très différentes :

$$FP = F_d * \cos\varphi \quad (II.12)$$

$F_d$  : facteur de déformation

#### II.6.1 La valeur $\tan\varphi$

Elle indique le rapport entre la puissance active et la puissance réactive circulant sur le réseau, c'est en compensant l'énergie réactive que la  $\tan\varphi$  pourra être baissée et amenée le plus proche de 0. [2]

On utilise souvent  $\tan\varphi$  au lieu de  $\cos$  .

En l'absence d'harmoniques, l'expression de  $\tan\varphi$  est la suivante :

$$\tan\varphi = \frac{Q \text{ (puissance réactive)}}{P \text{ (puissance apparente)}} \quad (II.13)$$

### II.6.2 Amélioration du facteur de puissance

L'installation de condensateurs permet de compenser l'énergie réactive de la composante fondamentale et d'obtenir un  $\cos \varphi$  à peu près égal à 1. Cependant, il faut noter que le distributeur d'énergie ne fait payer au client que l'énergie réactive due à la composante fondamentale. Il faudra donc calculer  $\cos \varphi_1$  (et non  $F_p$ ) pour déterminer la puissance réactive des condensateurs qu'il faut installer pour réduire ou supprimer la facture d'énergie réactive. [8]

### II.6.3 Avantages d'un bon facteur de puissance

Un bon facteur de puissance permet d'optimiser une installation électrique et apporte les avantages suivants :

- La suppression de la facturation de l'énergie réactive
- La diminution de la puissance souscrite en kVA.
- La limitation des pertes d'énergie active dans les câbles compte-tenu de la diminution de l'intensité véhiculée dans l'installation.
- L'amélioration du niveau de tension en bout de ligne.
- L'apport de puissance disponible supplémentaire au niveau des transformateurs de puissance si la compensation est effectuée au secondaire. [9]

Un bon facteur de puissance c'est :

- $\cos \varphi$  élevé, proche de 1.

Ou

- $\tan \varphi$  faible, proche de 0.

### II.6.4 Inconvénient d'un mauvais facteur de puissance

Un mauvais facteur de puissance dans une installation entraîne de nombreux inconvénients tel que :

- Intensité de courant en ligne trop élevée ce qui engendre l'augmentation des pertes d'énergie active dans les câbles.
- La facturation de l'énergie réactive.
- Augmentation de la puissance souscrite en kVA
- Saturation des transformateurs.
- Dégradation de la qualité de l'installation électrique [2]

## **II.7 Compensation de puissance réactive avec les batteries condensateurs**

Généralement, la puissance réactive régule le niveau de tension du système d'alimentation. Si la tension du système n'est pas suffisante, la puissance active essentielle ne peut pas être fournie. La puissance réactive est donc utilisée pour maintenir une tension suffisante pour que la puissance active fasse un travail utile [10].

Ainsi, des stratégies de compensation de puissance réactive dans les systèmes de distribution d'énergie sont nécessaires pour réduire les pertes de puissance résistive, pour maintenir les niveaux de tension du système et pour améliorer les facteurs de puissance.

Dans le réseau de distribution BT, la compensation de puissance réactive se fait en utilisant les batteries de condensateurs décentralisés. Mais l'utilisation de ces batteries de condensateurs de manière décentralisée pose certains problèmes. Ces problèmes peuvent être surmontés en utilisant la méthode de compensation de puissance réactive centralisée. En centralisant les batteries de condensateurs ensemble, il peut aider à maintenir les tensions de bus et les facteurs de puissance ainsi qu'à réduire les pertes des câbles d'alimentation [11].

Une batterie de condensateurs est un générateur de puissance réactive nécessaire pour alléger la puissance apparente des réseaux en amont des lieux de consommation. Ce composant passif du réseau est sollicité particulièrement pendant les périodes de forte consommation (période de pointe et de surcharge). Sa disponibilité sur le réseau pendant ces périodes est très souhaitable pour réduire les chutes de tensions et les pertes en réseau et donc pour optimiser le coût du kilowattheure. Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans ces installations industrielles aussi bien que dans le réseau public [11].

### **II.7.1. Définition d'un condensateur**

C'est un récepteur constitué de deux parties conductrices (électrodes) séparées par un isolant. Il a la propriété (lorsqu'il est soumis à une tension sinusoïdale), de déphaser son intensité, donc sa puissance (réactive capacitive) de  $90^\circ$  en avant sur la tension. La composition vectorielle de ces intensités ou puissances réactives (inductive et capacitive) conduit à une intensité ou puissance résultante réactive inférieure à celle existant avant l'installation de condensateurs. Pour simplifier ; on dit que les récepteurs inductifs (moteur, transformateur...) consomment de l'énergie réactive alors que les condensateurs (récepteurs capacitifs) produisent de l'énergie réactive [12].

### **II.7.2. Rôle du condensateur de puissance**

Le rôle de base des condensateurs de puissance est la compensation de la puissance réactive dans les réseaux électriques et le filtrage des harmoniques. Ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle.

Le nombre de condensateurs connectés dépend de la puissance réactive totale nécessaire et de la puissance unitaire. La puissance réactive des condensateurs à mettre en œuvre, doit être déterminée en fonction de la puissance de l'installation, du  $\cos \varphi$  d'origine et du  $\cos \varphi$  requis à l'arrivée. [13]

Les avantages des batteries de condensateurs sont :

- Absence d'usures mécaniques.
- Entretien réduit.
- Pertes faibles.
- Elles occupent un faible volume.
- Installation facile.

Les désavantages sont :

- La quantité de la puissance réactive produite par les batteries ne peut être contrôlée qu'en pas discrets,
- Les condensateurs sont très sensibles aux surtensions et aux surcharges, Ce qui peut provoquer leur vieillissement prématuré et parfois en claquage de l'isolant.
- Si les batteries des condensateurs sont branchées au réseau via un disjoncteur, ce disjoncteur introduit son propre bruit dans le réseau,
- Les batteries des condensateurs n'ont pas la possibilité de la réponse rapide aux phénomènes transitoires dans le réseau [13].

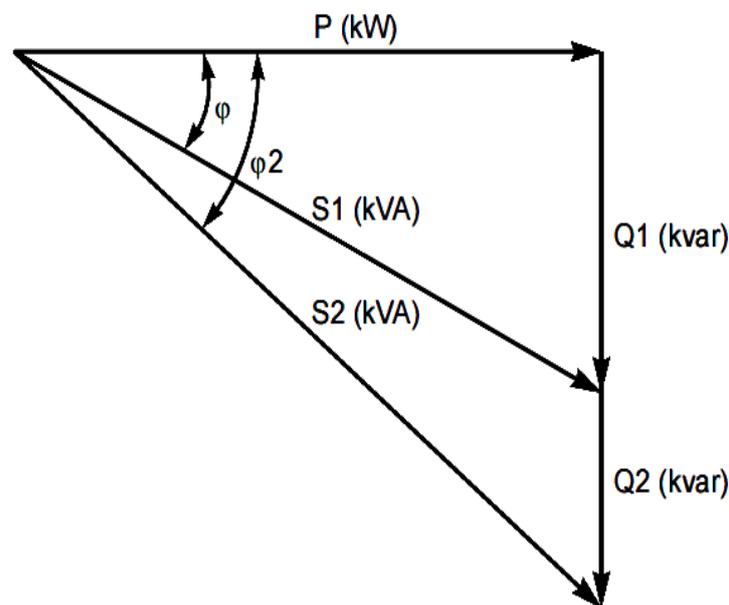
### **II.7.4 Constitution de la batterie de condensateurs**

Chaque élément est formé de feuilles d'aluminium entre lesquelles est inséré un ensemble de trois ou quatre feuilles d'un papier spécial imprégné d'huile minérale, le tout est plié en accordéon ou enroulé. Dans le premier cas, l'élément est parallélépipédique, dans le second il est cylindrique.

Ces éléments sont disposés en séries puis en parallèle et sont placés dans une cuve métallique remplie d'huile susceptible d'assurer le refroidissement. Cela constitue une unité, ces unités peuvent aussi être associées en série, en parallèle, en triangle ou en étoile. [13]

### II.7.5 Principe de fonctionnement de la compensation avec batterie condensateur

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active  $P$ , la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante. [14]



**Figure 9.** Influence de la puissance réactive. [14]

$Q_1$  : énergie réactive pour un angle de déphasage  $\varphi$

$Q_2$  ; énergie réactive pour un angle de déphasage  $\varphi_2$

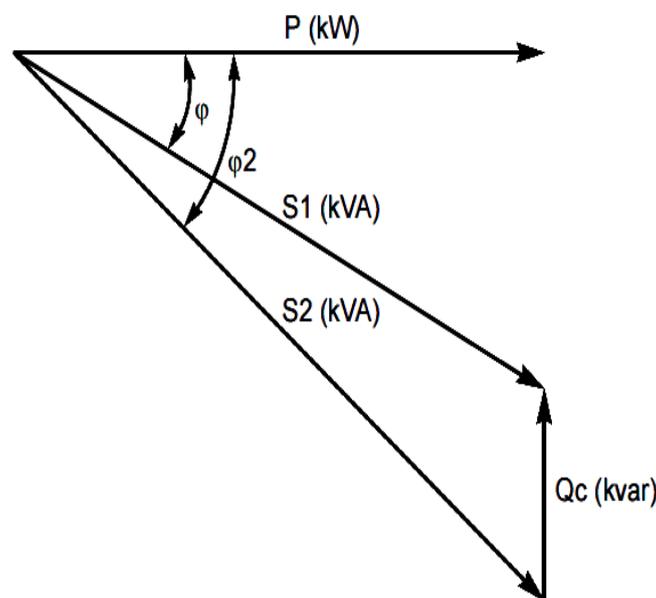
Ainsi, la circulation de l'énergie réactive sur les réseaux de distribution entraîne, du fait d'un courant appelé plus important :

- Des surcharges au niveau des transformateurs,
- l'échauffement des câbles d'alimentation,
- Des pertes supplémentaires,
- Des chutes de tension importantes.

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau. C'est ce qu'on appelle "compensation de l'énergie réactive". [14]

Pour inciter à cela et éviter de sur calibrer son réseau, le distributeur d'énergie pénalise financièrement les consommateurs d'énergie réactive au-delà d'un certain seuil.

On utilise des condensateurs pour fournir l'énergie réactive aux récepteurs inductifs. Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur  $S_2$  à la valeur  $S_1$ , on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive  $Q_c$  [14].



**Figure 10.** Principe de la compensation d'énergie réactive [14]

$P$  : Puissance active

$S_1$  et  $S_2$  : puissances apparentes (avant et après compensation)

$Q_c$  : puissance réactive du condensateur

$\varphi$  : Angle de déphasage après la compensation

$\varphi_2$  : Angle déphasage avant la compensation

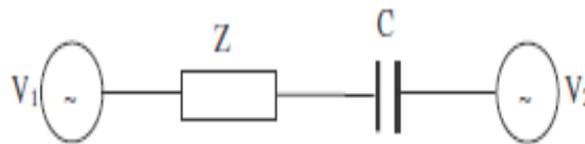
### II.8 Type d'installation des batteries condensateurs

Les batteries de condensateurs sont introduites dans les réseaux de transport et de distribution soit par une installation série ou shunt. Dans ce qui suit, nous allons donner ces deux types d'installation.

### II.8.1 Le condensateur à installation série

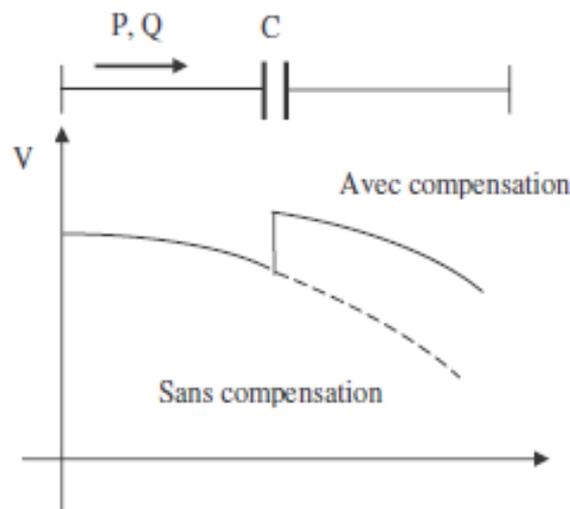
La compensation série permet d'ajouter une chute de tension capacitive qui s'oppose à la chute de tension inductive de la ligne. En aval du condensateur, la tension de la ligne est supérieure à la tension en amont.

Pour une puissance transitée donnée, le courant sera donc plus faible et les pertes par effet Joule réduites. [15]



**Figure 11.** Schéma d'un condensateur monté en série sur une ligne. [15]

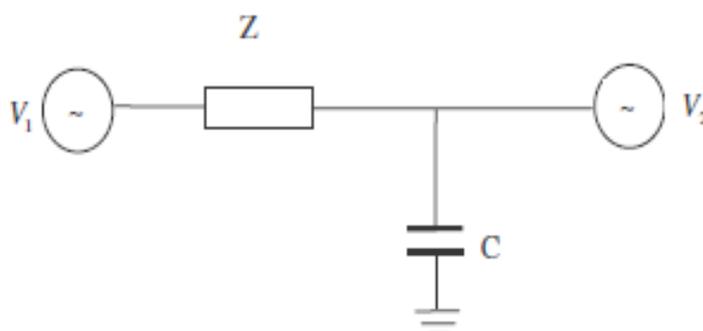
Les condensateurs série peuvent être placés à différents endroits de la ligne (milieu, tiers, postes d'extrémité, . . .). La figure suivante montre par exemple le profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation en son centre. On voit que la compensation réduit la chute de tension.



**Figure 12.** Profil de tension le long d'une ligne avec et sans compensation. [15]

### II.8.2 Le condensateur à installation shunt

Il permet de compenser les énergies réactives consommées par les clients et d'optimiser le courant en amont de la charge. Il est possible de faire transiter une puissance active plus importante sur une même installation. [15]



**Figure 13.** Schéma d'un condensateur monté en parallèle sur une ligne. [15]

### II.9 Les différents types de compensation

La compensation peut être réalisée avec deux familles de produits :

- les condensateurs de valeurs fixes ou batterie fixe
- les batteries de condensateurs en gradins avec régulateur (ou batteries automatiques)

qui permettent d'ajuster la compensation aux variations de consommation de l'installation. [16]

#### II.9.1 Compensation fixe

Les batteries de condensateurs fournissent une puissance réactive constante quelque soient les variations des charges des récepteurs.

La mise en service de ces batteries peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur) commandé à distance.

Ce type de compensation est utilisé lorsque la puissance réactive est faible, (<15% de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable.

Elles sont utilisées de préférence :

- Aux bornes des récepteurs
- Sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible

Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :

- D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24/24 h.

- De compensation individuelle de moteurs.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est inférieure ou égale à 15 % de la puissance du transformateur. [16]

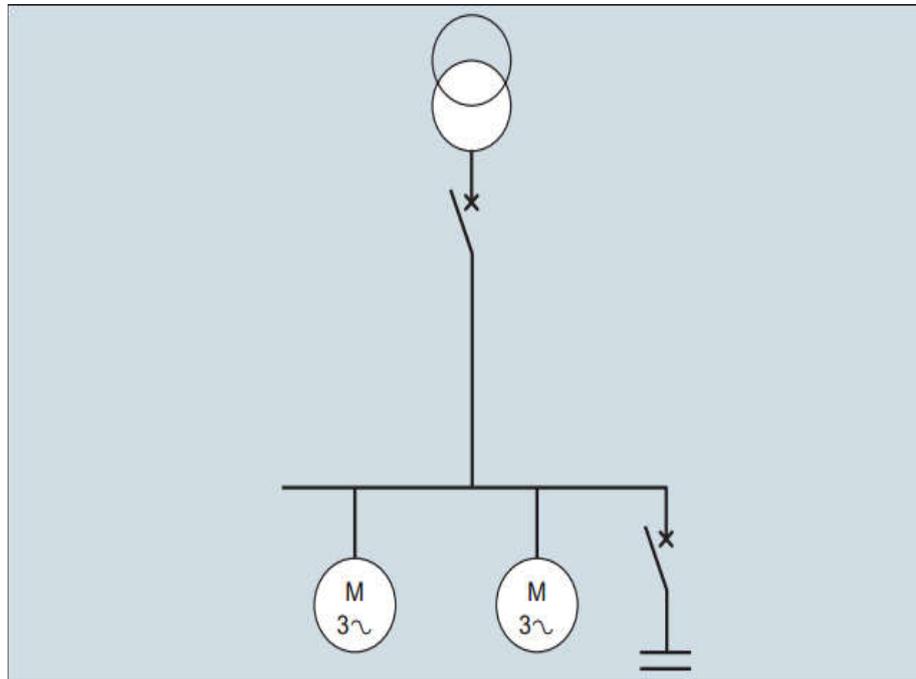


Figure 14. Compensation fixe. [16]

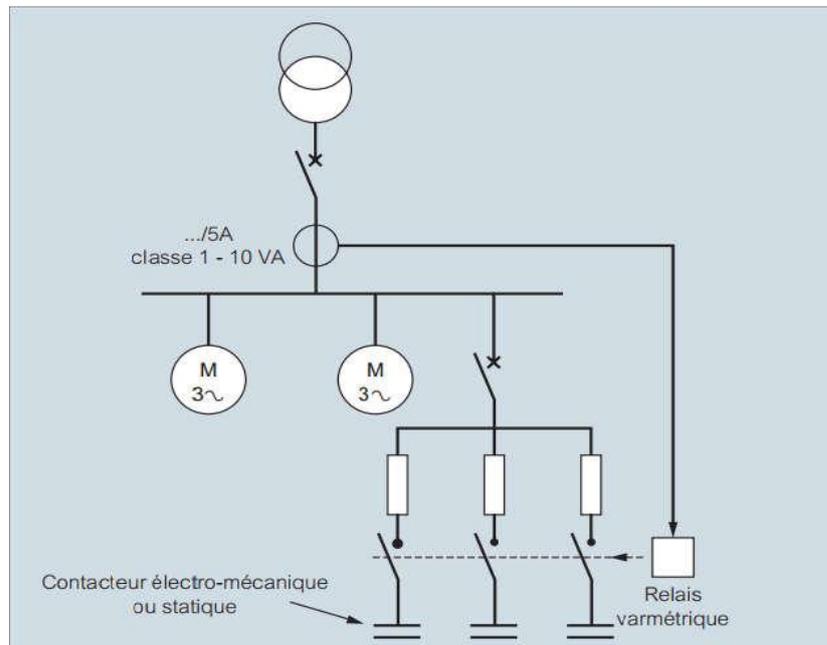
### II.9.2 Compensation de type automatique(ou en gradins)

La puissance réactive fournie par la batterie est modulable en fonction des variations du facteur de puissance et de la charge des récepteurs, donc de la consommation d'énergie réactive de l'installation. [16]

Ces batteries sont composées d'une association en parallèle de gradins condensateurs (gradin = condensateur + contacteur). La mise en ou hors service de tout ou partie de la batterie étant asservie à un régulateur varométrique intégré.

Ces batteries sont également utilisées dans le cas :

- De compensation de tableaux généraux (TGBT) ou gros départ.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15% de la puissance du transformateur. [16]



**Figure 15.** Principe de la compensation automatique d'une installation. [16]

### II.9.2.1 Les avantages de la compensation automatique par contacteur statique

- Réponse immédiate à toute variation du facteur de puissance (le temps de réponse est de 2 ms à 40 ms selon l'option de régulation).
- Nombre illimité d'opérations.
- Élimination des phénomènes transitoires liés à la fermeture/ouverture des contacteurs sur les condensateurs.
- Fonctionnement totalement silencieux.

En gérant la compensation au plus près des besoins de la charge, les risques de produire des surtensions durant les périodes de faible charge sont évités ainsi que, en empêchant l'établissement de surtension, les dégradations probables des appareils et des équipements. [17]

### 11.10 Choix de la localisation de compensation par batteries

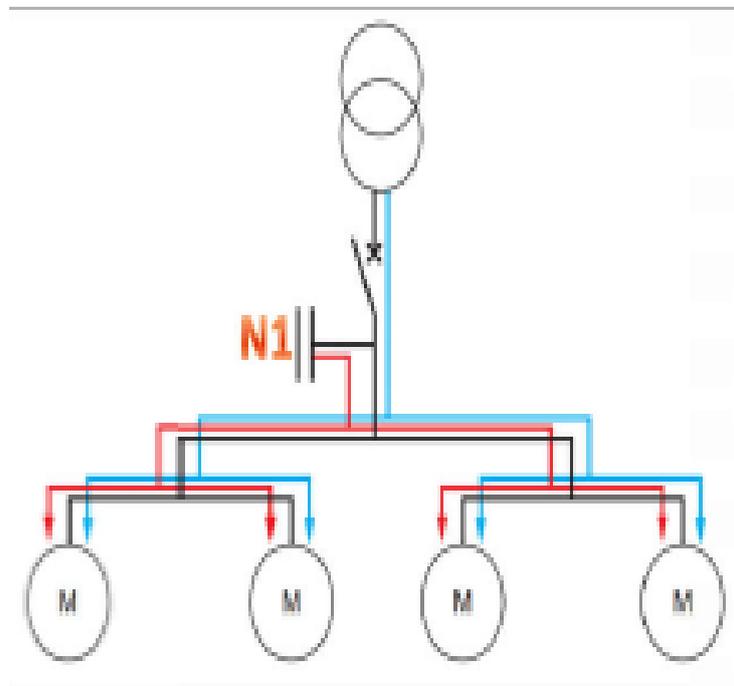
La compensation peut être globale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est-elle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico- économique. [17]

### II.10.1 Compensation globale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation. [17]

Ce type de compensation :

- Supprime les facturations complémentaires pour consommation excessive d'énergie réactive (exemple : tarif vert).
- Diminue la puissance apparente (ou appelée) en l'ajustant au besoin réel en kW de l'installation (exemple : tarif jaune).
- Soulage le poste de transformation (puissance disponible en KW)



**Figure 16.** Compensation globale. [17]

Le courant réactif est présent dans l'installation du niveau 1 jusqu'aux récepteurs.

Les pertes par effet Joule (kWh) dans les câbles situés en aval et leur dimensionnement ne sont de ce fait pas diminuées. [17]

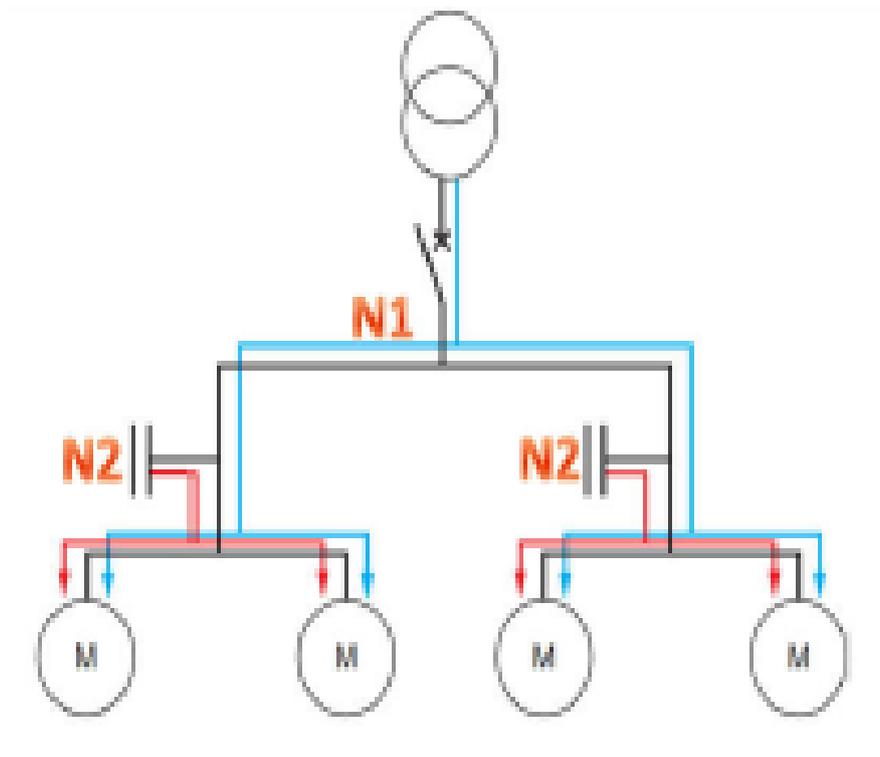
### II.10.2 Compensation partielle ou par secteurs

La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distribution intermédiaire pour lequel la compensation doit être réalisée.

Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment au niveau du dimensionnement des câbles d'arrivée du ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée. [18]

**Avantages :** La compensation partielle de l'installation :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- Réduit la puissance apparente d'utilisation (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées.
- Soulage le transformateur d'alimentation, ce qui permet d'alimenter des charges supplémentaires si nécessaire.
- Permet de réduire la section des câbles d'arrivée du tableau de distribution intermédiaire, ou d'ajouter des charges supplémentaires.
- Réduit les pertes en ligne dans ces mêmes câbles. [18]



**Figure 17.** Compensation partielle. [18]

Les courants réactifs circulent toujours dans les départs du tableau jusqu'aux charges.

Pour les raisons citées ci avant, la compensation partielle n'améliore ni le dimensionnement ni pertes en ligne de ces départs.

Si de larges variations de charges se produisent, un risque de surcompensation et, par conséquent de surtension est toujours à considérer. [18]

### II.10.3 Compensation individuelle

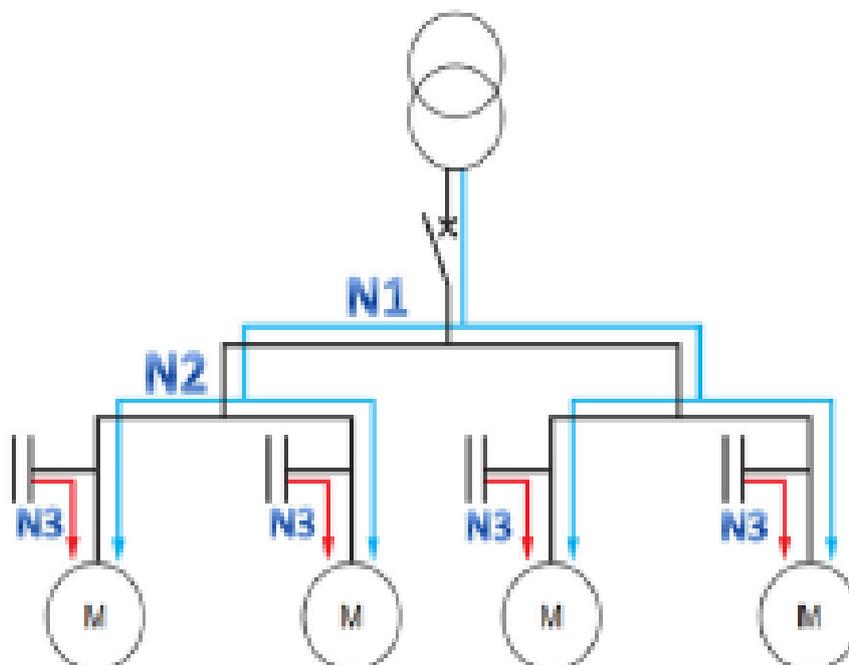
La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur).

La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du moteur est significative par rapport à la puissance souscrite à l'installation.

Le dimensionnement en kVAr de la batterie de condensateurs est de l'ordre de nominale (kW) du 25% de la puissance du moteur. Une compensation complémentaire en tête de l'installation (transformateur) peut être aussi économiquement intéressante. [18]

**Avantages :** La compensation individuelle réduit :

- Les pénalités tarifaires dues à une consommation excessive d'énergie réactive.
- La puissance apparente consommée (en kVA).
- La section des câbles et les pertes en ligne.



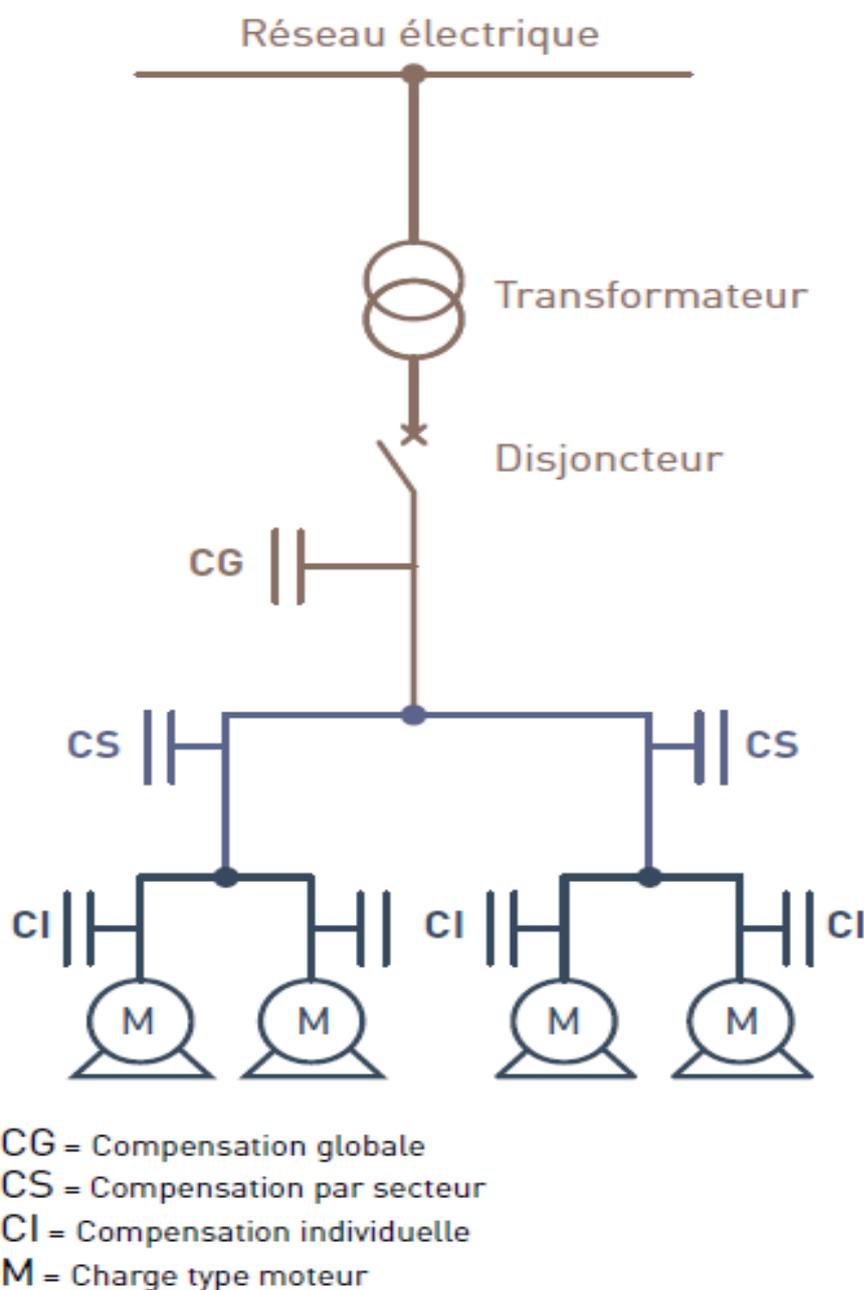
**Figure 18.** Compensation individuelle. [18]

Les courants réactifs de l'installation sont significativement réduits ou éliminés

### II.10.4 Compensation combinée

Ce mode de compensation est utilisé dans le cas où l'installation comporte de petits et de gros appareils électrique. Une compensation individuelle est réalisé pour les appareils fonctionnant pendant de longue durée et une compensation par secteur ou globale pour les autres récepteurs.

L'avantage de ce type de compensation est que chaque ensemble d'appareils électrique est compensé de la manière la plus adaptée. [2]



**Figure 19.** Différentes zones d'implantation des batteries de condensateurs. [2]

### II.11. Les différents modes de couplage des condensateurs

Deux modes de couplages sont réalisables en basse tension : [2]

#### II.11.1 Couplage en triangle

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = 3 \cdot C \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{II.13})$$

Avec  $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan\phi - \tan\phi')}{3 \cdot U^2 \omega} \quad (\text{II.14})$$

#### II.11.2 Couplage en étoile

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = C \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{II.15})$$

La valeur de la capacité de chaque condensateur est :

$$C_{\Delta} = \frac{P(\tan\phi - \tan\phi')}{U^2 \omega} \quad (\text{II.16})$$

On remarque que :

$$C_y = 3 \cdot C_{\Delta} \quad (\text{II.17})$$

#### II.11.3 Choix du couplage d'un condensateur

Pour constituer des batteries de puissance importante, il existe plusieurs possibilités de câblage ou connexion par association de condensateurs unitaires, soit : [2]

- Couplage en triangle : condensateurs triphasés (sans fusible interne). Couplés en parallèle,
- Couplage en double étoile de condensateurs monophasés (avec ou sans fusible interne),
- Couplage en H.

Le choix du mode de couplage dépend :

- Des caractéristiques, tension de réseau et puissance de la batterie,
- Du type de compensation, fixe ou automatique (en gradin),

- Du type de protection :
  - Condensateur avec ou sans fusible interne,
  - Différentielle (de déséquilibre) ou avec fusibles MT,
- Des impératifs économiques

## **II.12. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté, le principe de la compensation de la puissance réactive par des batteries de condensateurs dans les installations industrielles en basse tensions.

Nous avons met en évidence, les différents modes de compensations toute en citant pour chaque modes leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons terminez, en développant les différents choix nécessaires à apprendre pour la localisation de la compensation de la puissance réactive soit : global, partielle, individuelle et combinée.

# Chapitre III

Calcul du bilan de puissance et  
compensation de l'énergie  
réactive d'une installation

### III.1 Introduction

Ce chapitre comprend les calculs et la méthode aboutissant au bilan de puissance. La détermination du bilan de puissance, ce fait à partir des caractéristiques des récepteurs et aboutit à la déduction de la puissance apparente ainsi que le facteur de puissance.

La détermination de ce facteur de puissance nous guidera pour entamer son amélioration en compensant l'énergie réactive par des batteries de condensateurs.

Par ailleurs, la première étape essentielle d'une étude de conception d'un réseau électrique est l'élaboration du schéma unifilaire.

### III.2 Détermination des puissances

La puissance d'une installation n'est pas la somme arithmétique de celle des récepteurs. Sa détermination nécessite de connaître la puissance et la localisation des récepteurs pour accéder à la puissance d'utilisation et à la détermination de la puissance apparente. [2]

#### III.2.1 Puissance installée

La puissance installée (kW) est la somme des puissances nominales de tous les récepteurs de l'installation. L'indication de la puissance nominale ( $P_n$ ) est marquée sur la plupart des appareils et équipements électriques. [2]

La puissance installée (kW) est la donnée significative pour le choix et le dimensionnement d'un groupe électrogène ou de batteries et quand des exigences de fonctionnement uni horaire sont à considérer.

#### III.2.2 Puissance utilisée

La puissance d'utilisation  $P_u$  (kW) est la somme arithmétique de ces puissances valorisées. La puissance d'utilisation  $P_u$  est la donnée significative pour la souscription d'un contrat de fourniture en énergie électrique à partir d'un réseau publique BT ou HTA.

De ce fait les récepteurs ne fonctionnent pas tous ni en même temps ni à pleine charge : des facteurs de simultanéité ( $k_s$ ) et d'utilisation ( $k_u$ ) permettant de pondérer la puissance apparente maximale réellement absorbée par chaque récepteur et groupes de récepteurs. [2]

### III.3 Description des facteurs de correction

#### III.3.1 Facteur d'utilisation maximale : $K_u$

Le régime de fonctionnement normal d'un récepteur peut être tel que sa puissance utilisée soit inférieure à sa puissance nominale installée, d'où la notion de facteur d'utilisation [19].

Le facteur d'utilisation s'applique individuellement à chaque récepteur. Ceci se vérifie pour des équipements comportant des moteurs susceptibles de fonctionner en dessous de leur pleine charge.

Dans une installation industrielle, ce facteur peut être estimé en moyenne à 0,75 pour les moteurs. Pour l'éclairage et le chauffage, il sera toujours égal à 1. [19]

Type du récepteur	$K_u$
Chauffage ou éclairage	1
Prises de courant (hors indication particulière)	1
Moteurs électriques	0.75

**Tableau III.3.1** facteur d'utilisation par récepteur NF EN 12193 [19].

#### III.3.2 Facteur de simultanéité : $K_s$

Les récepteurs d'une installation ne fonctionnent pas simultanément. C'est pourquoi il est permis d'appliquer aux différents ensembles de récepteurs (ou de circuit) des facteurs de simultanéité. La détermination des facteurs de simultanéité nécessite la connaissance détaillée de l'installation considérée et l'expérience des conditions d'exploitation, notamment pour les moteurs et les prises de courant. On ne peut donc pas donner des valeurs précises applicables à tous les cas.

Les normes NF C 14-100, NF C 63-410 et le guide UTEC 15-105 donnent cependant des indications sur ce facteur selon le nombre de récepteurs (**Tableau III.3.2.1**) et selon l'utilisation (**Tableau III.3.2.2**). [9]

Nombre de récepteurs	Facteur de simultanéité $K_s$
1 à 3	0.9
4 à 5	0.8
5 à 9	0.7
10 et plus	0.6

**Tableau III.3.2.1** Facteur de simultanéité selon le nombre de récepteurs. [9]

Type de récepteurs	Facteur de simultanéité $K_s$
Eclairage, conditionnement d'air	1
Chauffage électrique, chauffe d'eau	1
Prise de courant (n : nombre de prise de courant alimenté par le même circuit)	$0.1 + (9/n) \dots \dots \dots$ Si : $n < 6$ $0.6 + \dots \dots \dots$ Si : $n > 6$
Moteur électrique	0.75

**Tableau III.3.2.2** Facteur de simultanéité pour les différents types de récepteur. [9]

### III.3.3 Facteur d'extension $K_e$

Appelé aussi facteur de réserve, son rôle est de prévoir une augmentation de la puissance absorbée par l'entreprise dans le futur qui ne doit pas d'après les différentes normes dépasser 20% de la puissance apparente totale, Le coefficient varie de 1 à 1,5. [9]

## III.4 Le calcul du bilan de puissance d'une installation électrique BT

### III.4.1 le Schéma unifilaire de notre installation

(Représenté dans les annexes)

### III.4.2 Présentation des données de l'installation électrique

Les Tableaux distribution secondaires	Les récepteurs	La tension U (v)	Le rendement $\eta$	Cos $\varphi$	Tan $\varphi$	La Puissance utile Pu (KW)
Atelier TDSA	4 Moteurs M1 M2 M3 M4	400	0.93	0.8	0.75	90
	2 Prise de courant 3*16A L1 L2	400	1	1	0	22
Atelier TDSB	3 Chauffage L3 L4 L5	400	1	1	0	20
	3 Moteurs M5 M6 M7	400	0.93	0.71	0.99	75
	2 Prise de courant 2*16A L6 L7	400	1	1	0	12.8
Atelier TDSC	L'éclairage E1 E2 E3 E4	400	1	1	0	10
	3 Moteurs M8 M9 M10	400	0.94	0.79	0.776	110

Tableau III.4.2 Donnée de notre installation électrique.

### III.4.3 Méthode de calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs

On doit d'abord calculer la puissance active absorbé selon le facteur d'utilisation de chaque élément, ensuite calculer la puissance réactive et apparente de l'élément concerné.

- $P_a \text{ (kW)} = \frac{P_u}{\eta} * K_u$  (III.1)

- $Q \text{ (kVAR)} = P_a * \text{Tan } \varphi$  (III.2)

- $S \text{ (kVA)} = \sqrt{P_a^2 + Q^2}$  (III.3)

**Pa** : puissance absorbé par récepteur

**Pu** : puissance utile de récepteur

**$\eta$**  : le rendement

**Ku** : facteur d'utilisation

**Q** : puissance réactive du récepteur

**S** : puissance apparente du récepteur

TDS	Les récepteurs	Pu (KW)	$\eta$	Ku	Pa (kW)	Cos $\varphi$	Tan $\varphi$	Q (kVAr)	S (Kva°)
Atelier TDSA	4 Moteurs M1 M2 M3 M4	90	0.93	0.75	72.58	0.8	0.75	54.435	90.725
	2 Prise de courant 3* 16A L1 L2	22	1	1	22	1	0	0	22
Atelier TDSB	3 Chauffage L3 L4 L5	20	1	1	20	1	0	0	20
	3 Moteurs M5 M6 M7	75	0.93	0.75	60.48	0.71	0.99	59.986	85.183
	2 Prise de courant 2*16A L6 L7	12.8	1	1	12.8	1	0	0	12.8
Atelier TDSC	L'éclairage E1 E2 E3 E4	10	1	1	10	1	0	0	10
	3 Moteurs M8 M9 M10	110	0.94	0.75	87.766	0.79	0.776	68.11	111.09

**Tableau III.4.3** Calcul de la puissance d'utilisation des récepteurs.

### III.4.4 Méthode de calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires

Pour le calcul des puissances dans les tableaux secondaires on doit multiplier la puissance absorbé total foi le facteur de simultanéité qui correspond à chaque tableau.

- $P_{tot} = \sum P_a * K_s$  (III.4)

- $Q_{tot} = \sum Q * K_s$  (III.5)

- $S_{tot} = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2}$  (III.6)

**P<sub>tot</sub>** : puissance active totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TDS.

**Q<sub>tot</sub>** : puissance réactive totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TDS.

**S<sub>tot</sub>** : puissance apparente totale en tenant compte de facteur de simultanéité de la TDS.

TDS Tableau Distribution Secondaire.	P <sub>a tot</sub> (kW)	K <sub>s</sub> TDS	P <sub>tot</sub> (kW)	Q <sub>tot</sub> (kVAr)	S <sub>tot</sub> (kVA)	Cos φ TDS	Tan φ TDS
Atelier TDSA	94.508	0.7	66.206	38.104	76.388	0.866	0.577
Atelier TDSB	93.28	0.7	65.296	41.99	77.63	0.84	0.645
Atelier TDSC	97.767	0.7	68.4362	47.677	83.406	0.82	0.698

**Tableau III.4.4** Calcul de bilan de puissance des tableaux secondaires.

### III.4.5 Méthode de calcul de bilan de puissance de la TGBT

Pour le calcul des puissances dans la TGBT on doit multiplier la puissance total obtenue au niveau des tableaux de distributions secondaires foi le facteur de simultanéité qui correspond à notre tableau général, après on ajoute aussi la valeur de facteur d'extension Ke.

- $P_{tot}' = P_{tot} * K_s * K_e$  (III.7)

- $Q_{tot}' = Q_{tot} * K_s * K_e$  (III.8)

$$\bullet \text{ Stot}' = \text{Stot} * \text{Ks} \quad \text{(III.9)}$$

**Ptot'** : puissance active totale en tenant compte de facteurs de simultanéité et d'extension de la TGBT.

**Qtot'** : puissance réactive totale en tenant compte de facteurs de simultanéité et d'extension de la TGBT.

**Stot'** : puissance apparente totale en tenant compte de facteurs de simultanéité et d'extension de la TGBT.

TGBT	Ptot (kW)	Qtot (kVAr)	Ks TGBT	Ke TGBT	Ptot' (kW)	Qtot' (kVAr)	Stot' (kVA)	Cos $\varphi$ TGBT	Tan $\varphi$ TGBT
Tableau Générale Basse tension	199.93	127.771	0.9	1.2	215.924	137.992	256.252	0.842	0.639

Tableau III.4.5 Calcul de bilan de puissance de la TGBT.

### III.5. Choix des batteries de condensateurs à installer

Dans une installation électrique, la détermination de la solution de compensation de l'énergie réactive nécessite plusieurs étapes :

#### III.5.1 Détermination de la puissance des condensateurs Qc (kVAr)

La puissance réactive Qc nécessaire à la compensation se calcule à partir de la puissance active mesurée P tot et du tan  $\varphi$  mesurée de l'installation.

On veut améliorer le facteur de puissance calculé de notre installation qui est de cos  $\varphi = 0.84$  et l'améliorer pour obtenir un facteur de puissance désiré de cos  $\varphi' = 0.93$ .

La puissance réactive des condensateurs set donnée par la relation :

$$\bullet \text{ Qc} = \text{P} \times (\tan \varphi - \tan \varphi') \quad \text{(III.10)}$$

Ou bien :

$$\bullet \text{ Qc} = \text{P} \times \text{K} \quad \text{(III.11)}$$

$Q_c$  : puissance réactive de compensation.

$P$  : puissance active totale de l'installation.

$K$  : facteur de correspondance entre  $\cos \varphi$  et  $\tan \varphi$

Pour les valeurs		Facteur "k" pour le calcul de la puissance des condensateurs												
tg $\varphi_1$	cos $\varphi_1$	cos $\varphi_2$												
		0.70	0.75	0.80	0.82	0.84	0.86	0.88	0.90	0.92	0.94	0.96	0.98	1.00
4.90	0.20	3.88	4.02	4.15	4.20	4.26	4.31	4.36	4.42	4.48	4.54	4.61	4.70	4.80
3.88	0.25	2.88	2.99	3.13	3.18	3.23	3.28	3.33	3.39	3.45	3.51	3.58	3.67	3.88
3.18	0.30	2.16	2.30	2.42	2.48	2.53	2.59	2.65	2.70	2.76	2.82	2.89	2.98	3.18
2.68	0.35	1.68	1.80	1.93	1.98	2.03	2.08	2.14	2.19	2.25	2.31	2.38	2.47	2.68
2.29	0.40	1.27	1.41	1.54	1.60	1.65	1.70	1.76	1.81	1.87	1.93	2.00	2.09	2.29
1.98	0.45	0.97	1.11	1.24	1.29	1.34	1.40	1.45	1.50	1.56	1.62	1.69	1.78	1.98
1.73	0.50	0.71	0.85	0.98	1.04	1.09	1.14	1.20	1.25	1.31	1.37	1.44	1.53	1.73
1.64	0.52	0.62	0.76	0.89	0.95	1.00	1.05	1.11	1.16	1.22	1.28	1.35	1.44	1.64
1.56	0.54	0.54	0.68	0.81	0.86	0.92	0.97	1.02	1.08	1.14	1.20	1.27	1.36	1.56
1.48	0.56	0.46	0.60	0.73	0.78	0.84	0.89	0.94	1.00	1.05	1.12	1.19	1.28	1.48
1.41	0.58	0.39	0.52	0.66	0.71	0.76	0.81	0.87	0.92	0.98	1.04	1.11	1.20	1.41
1.33	0.60	0.31	0.45	0.58	0.64	0.69	0.74	0.80	0.85	0.91	0.97	1.04	1.13	1.33
1.27	0.62	0.25	0.39	0.52	0.57	0.62	0.67	0.73	0.78	0.84	0.90	0.97	1.06	1.27
1.20	0.64	0.18	0.32	0.45	0.51	0.56	0.61	0.67	0.72	0.78	0.84	0.91	1.00	1.20
1.14	0.66	0.12	0.26	0.39	0.45	0.49	0.55	0.60	0.66	0.71	0.78	0.85	0.94	1.14
1.08	0.68	0.06	0.20	0.33	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.65	0.72	0.79	0.88	1.08
1.02	0.70		0.14	0.27	0.33	0.38	0.43	0.49	0.54	0.60	0.66	0.73	0.82	1.02
0.96	0.72		0.08	0.22	0.27	0.32	0.37	0.43	0.48	0.54	0.60	0.67	0.76	0.96
0.91	0.74		0.03	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.43	0.48	0.55	0.62	0.71	0.91
0.86	0.76			0.11	0.16	0.21	0.26	0.32	0.37	0.43	0.50	0.56	0.65	0.86
0.80	0.78			0.05	0.11	0.16	0.21	0.27	0.32	0.38	0.44	0.51	0.60	0.80
0.75	0.80				0.05	0.10	0.16	0.21	0.27	0.33	0.39	0.46	0.55	0.75
0.70	0.82					0.05	0.10	0.16	0.22	0.27	0.33	0.40	0.49	0.70
0.65	0.84						0.05	0.11	0.16	0.22	0.28	0.35	0.44	0.65
0.59	0.86							0.06	0.11	0.17	0.23	0.30	0.39	0.59
0.54	0.88								0.06	0.11	0.17	0.25	0.33	0.54
0.48	0.90									0.06	0.12	0.19	0.28	0.48
0.43	0.92										0.06	0.13	0.22	0.43
0.36	0.94											0.07	0.16	0.36

Tableau III.5.1 facteur correspondance entre  $\cos \varphi$  et  $\tan \varphi$  mesuré et désiré. [18]

**Application numérique**

$$Q_c = 215.924 \times (0.639 - 0.395)$$

$$Q_c = 215.941 \times 0.243$$

$$Q_c = 52.469 \text{ kVAr}$$

### III.5.2 détermination de type de compensation

Pour le choix du système de compensation on calcule le rapport  $Q_c/S_n$

$S_n$  : la puissance apparente totale

#### Application numérique

$$Q_c / S_n = 52.469 / 250$$

$$Q_c / S_n = 0.2098$$

$$Q_c / S_n = 20.98\%$$

On a le rapport  $Q_c / S_n = 20.98\% > 15\%$ , Donc la compensation automatique (gradins) et la mieux adapter dans notre cas.

### III.5.3 Détermination de la zone d'implantation

Suivant les résultats obtenu avant on ce que concerne le type de compensation (automatique) et on se basant sur les valeurs des facteurs de puissance des ateliers dont leur valeurs n'est pas vraiment déférent (0.866, 0.84, 0.82), Alors la zone d'implantation la plus convenable est : **La compensation globale.**

L'utilisation de la compensation globale nous permettra de :

- Réduit les pénalités tarifaires dues à une consommation excessives d'énergie réactive,
- Réduit la puissance apparente d'utilisation totale (en kVA), calculée habituellement à partir des charges installées,
- Solution la plus économique.

### III.5.4 Détermination du type de montage des batteries des condensateurs

Le choix de mode de couplage dépend de la capacité de condensateur a installé pour la compensation dans les montages triangle et étoile :

- **Montage triangle**

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs on montage triangle est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = 3 \cdot C \Delta \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{III.12})$$

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c}{3 \cdot U^2 \omega} \quad (\text{III.13})$$

$C_{\Delta}$  : la valeur de la capacité de condensateur en montage triangle.

- **Montage étoile :**

La puissance réactive fournie par l'ensemble des condensateurs en montage étoile est donnée par la relation suivante :

$$Q_c = C \cdot \omega \cdot U^2 \quad (\text{III.14})$$

$$C_y = \frac{Q_c}{U^2 \cdot \omega} \quad (\text{III.15})$$

$C_y$  : la valeur de la capacité de condensateur en montage étoile.

### Application numérique

Pour  $Q_c = 52.469$  et  $\omega = 314$

On obtient :

$$C_{\Delta} = 348.12 \mu\text{F}$$

$$C_y = 1044.36 \mu\text{F}$$

On voit que la valeur de la capacité en montage triangle est trois fois moins élevée que celle de montage étoile.

$$C_y = 3 \times C_{\Delta}$$

Le couplage triangle revient moins cher car les condensateurs seront de capacité plus faible.

Pour le type des batteries condensateurs, suivant le type de compensation (gradins) et le type de montage (triangle), on choisit 3 gradins (condensateur + contacteur) de 20kVAr chacun pour avoir la valeur  $Q_c$  voulu.

### III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons élaboré le bilan de puissance qui nous a permis de connaître le niveau de consommation en puissance électrique, Nous avons déterminé les puissances utiles des différents récepteurs, ainsi que la puissance globale afin de déduire le facteur de puissance.

Pour cela, on a établi la méthode des deux coefficients : le coefficient d'utilisation et celui de coefficient de simultanéité.

D'après les résultats obtenus après les calculs, on constate que l'installation électrique présente un facteur de puissance moyen dont on peut apporter son amélioration. Pour cela, on a utilisé la compensation par batterie condensateurs. Elle nous a permis de limiter les impacts économiques, en diminuant la facture énergétique d'une part et d'obtenir une exploitation optimale du réseau industriel.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

La compensation de la puissance réactive, est une opération indispensable qui engendre non seulement des bénéfices techniques mais aussi, des gains économiques aux seins d'une industrie à basse tension.

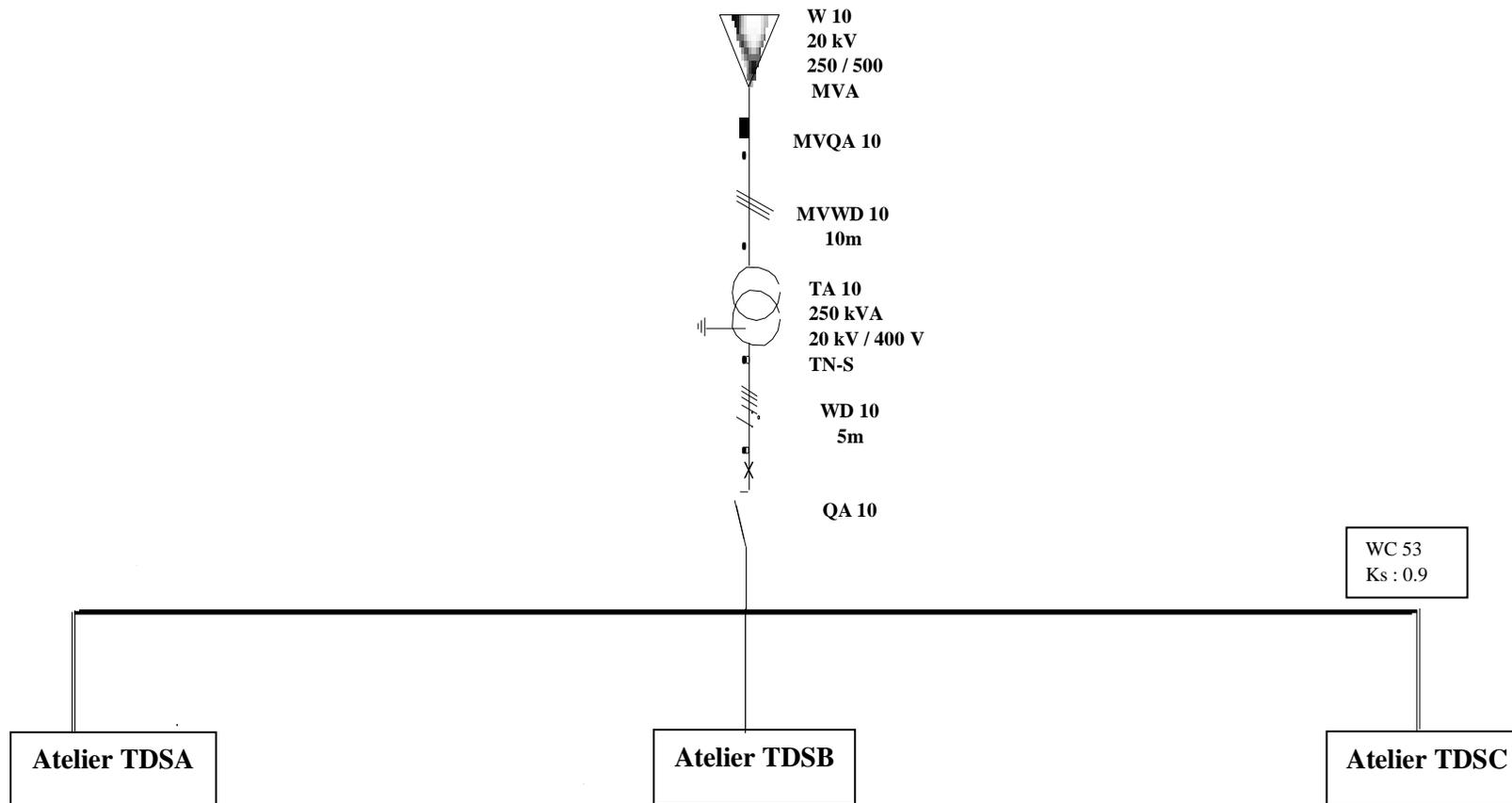
Ce travail a été consacré à l'étude de la compensation de l'énergie réactive d'une installation électrique industrielle BT (Basse tension).

Dans ce cadre nous avons initié notre travail par quelques généralités sur les réseaux électriques on citant les différents modes d'alimentation en énergie électrique des installations industrielles par rapport à leurs rôles d'utilisations. Par la suite nous avons présenté le principe de la compensation de la puissance réactive avec des batteries de condensateurs dans les installations industrielles à basse tensions.

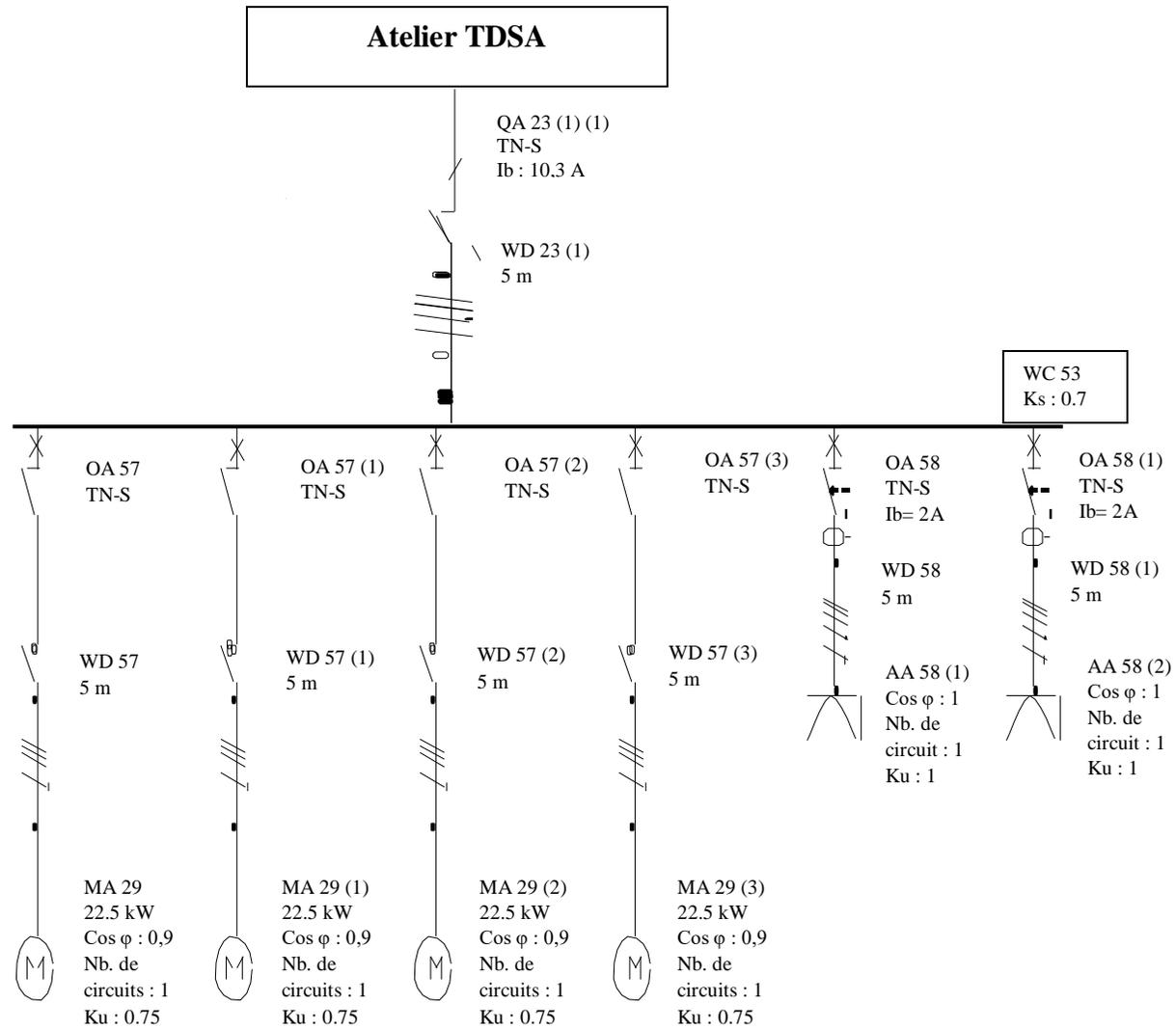
A la fin de notre travail, nous avons pu calculer le bilan de puissance d'une installation électrique a basse tension. Ensuite, il a été décidé d'installer un système de compensation d'énergie électrique en tenant en compte des différentes contraintes rencontrées dans le réseau.

# **ANEXXE**

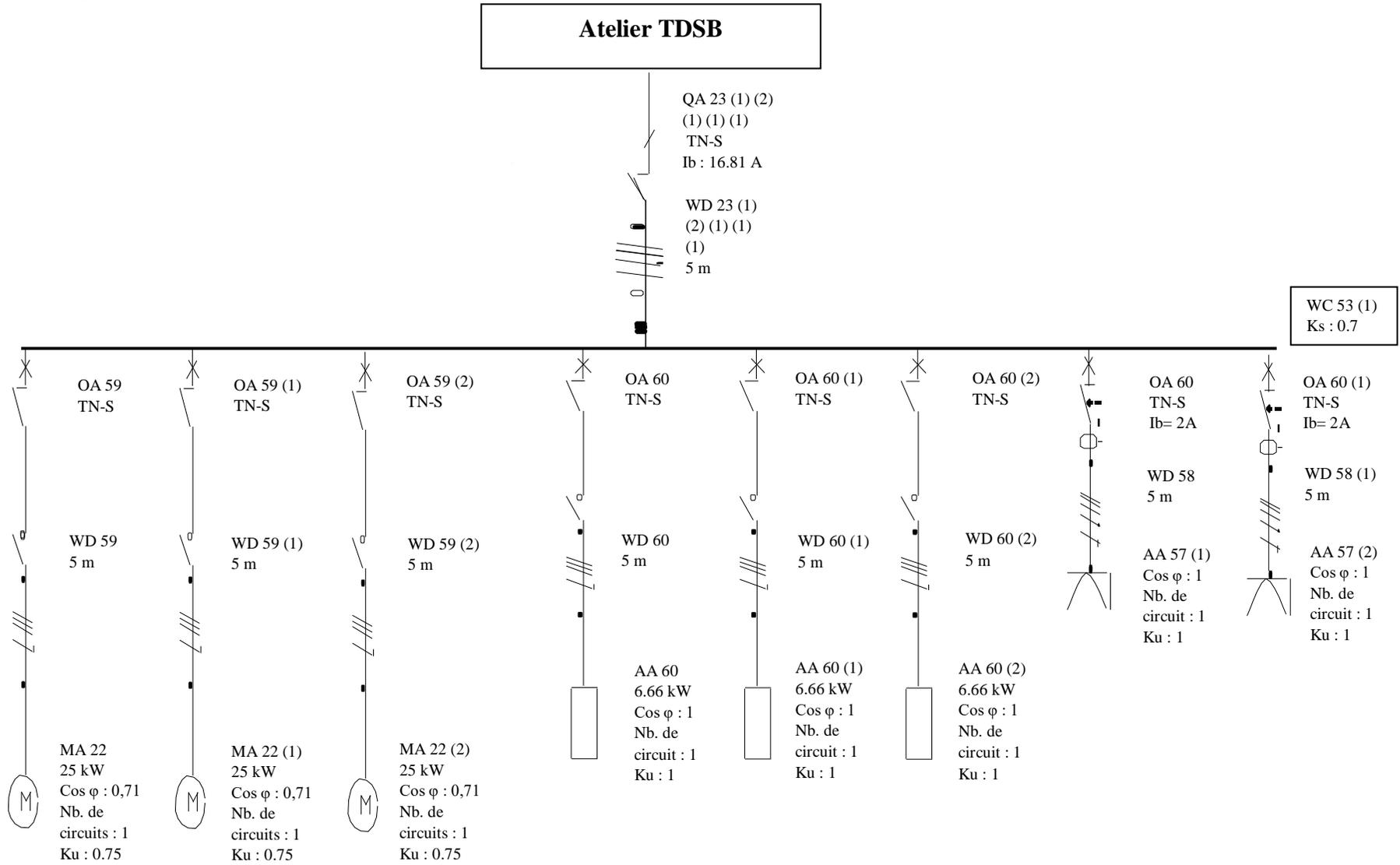
ANNEXE 01



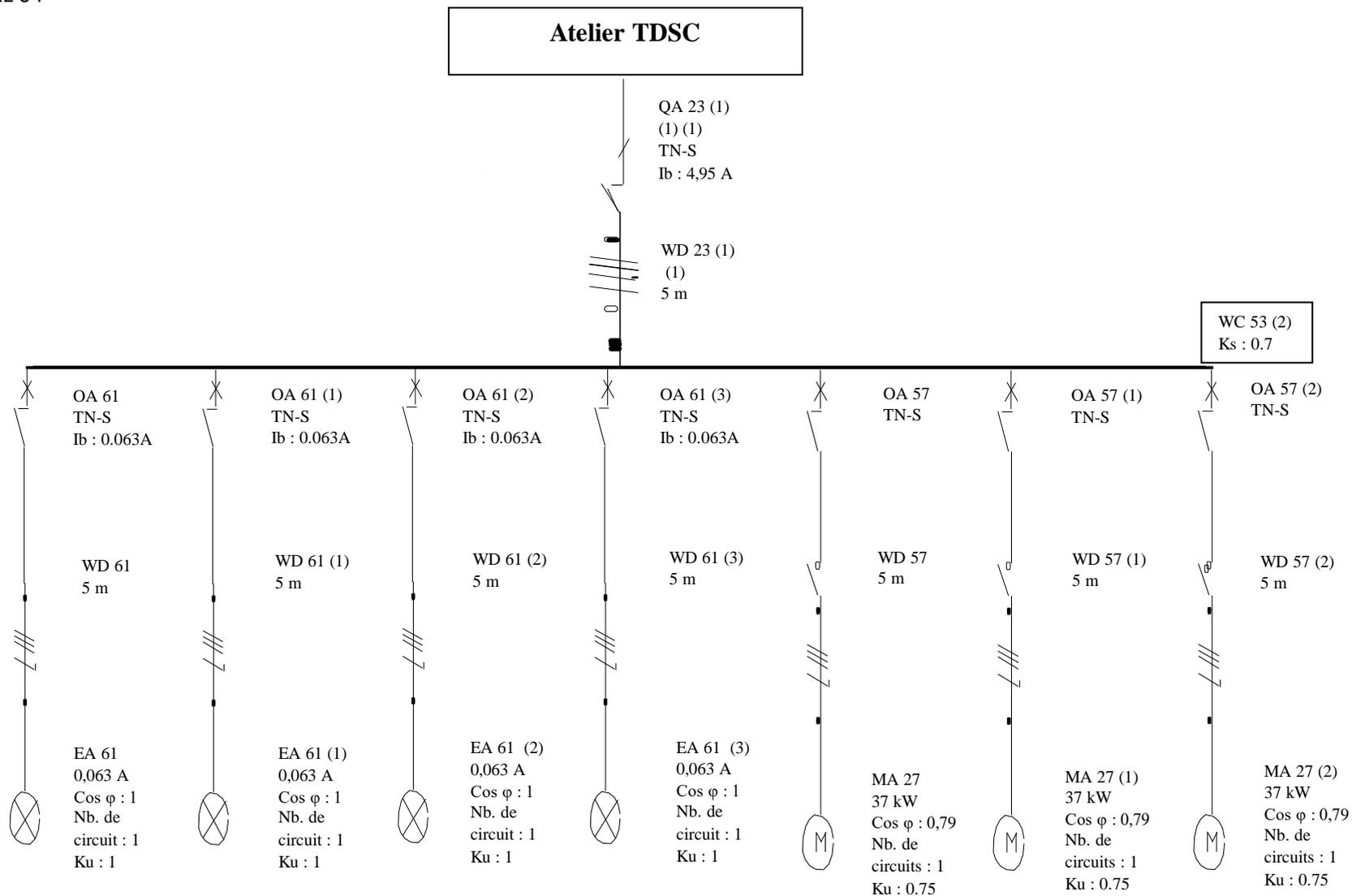
ANNEXE 02



ANNEXE 03



ANNEXE 04



# **Bibliographie**

## **Bibliographies**

- [1] A.Bouzidi «Modélisation et simulation des réseaux électriques», cour M1, département de génie électrique, Université de Bejaia, 2008.
  
- [2] A. Amina « Dimensionnement de batterie de compensation de l'énergie réactive pour la station de pompage des hydrocarbures de Beni Mansour », Mémoire de fin d'étude, département de Génie électrique, Université de Bejaia, 2015.
  
- [3] « Présentation et dimensionnement des installations courants forts (CFO) et courants faibles (CFA)», cour L3, département de génie civil, Université d'Artois, 2008.
  
- [4] S.Loubna et D.Chaima « Etude d'un réseau de transport d'énergie à haute tension 90KV», Mémoire de fin d'étude, département de génie électrique, université d'Annaba, 2017
  
- [5] B. Nadia « étude de la stabilité par les systèmes multi agents », Thèse doctorat, Université d'Annaba, 2011
  
- [6] « compensation d'énergie réactive et maîtrise de la qualité des infrastructures électriques», catalogue LEGRAND, page 76, a les GLAISINS, 2016
  
- [7] Abdelaziz Chaghi « documents pédagogiques et didactiques» université de Batna 2000/2001.
  
- [8] H.Semaoui, « Compensation de l'energie reactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB)», Mémoire de magister, Université M'sila, 2016.
  
- [9] C.Bouchebouba et H.Benattia, «Etude et dimensionnement électrique du nouveau site de la câblerie algérienne», Mémoire de magister département d'électromécanique, Université de Mostaganem, 2019.
  
- [10] SX Chen, YS Foo. Eddy, HB Gooi, MQ Wang, SF Lu, «Un système centralisé de compensation de puissance réactive pour les réseaux de distribution BT, "Phil IEEE Transaction Power System, Vol.30, N ° 1, janvier-2015.

- [11] SS Kanojia, Suketu Rajyaguru, « Compensation de puissance réactive pour BT Réseau de distribution », International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE), avril 2019
- [12] Sidi Salah Mokhtar, « Etude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive », Mémoire de magister, Université Badji mokhtar-Annaba, 2017.
- [13] G.Breuer, « Flexible AC Transmission Systems Technology for the Future » Proceeding of 20th Annual Electrical /Electronic Insulation Boston, MA, October.
- [14] Schneider Electric, « La conception des réseaux industriels en haute tension », ct 169, 10/1993.
- [15] S.Imadouchene et Y.Houcini, « Base de fonctionnement des dispositifs FACTS -Application d'un STATCOM pour la régulation de la tension- », Mémoire de magister, Université Tizi Ouazou, 2010.
- [16] Legrand Catalogue, « Compensation d'énergie réactive et contrôle de la qualité des réseaux électriques », P0910ALPESFR- EX210027 - MARS 2010.
- [17] Legrand Electric Algérie, « Batteries de condensateurs automatiques Alpimatic », EX210027 -ALG 018 - JUIN 2011.
- [18] Schneider Electric, « Compensation de l'énergie réactive et filtrage des harmoniques », Guide de l'installation électrique 2010, GIE\_chap\_L-2010.indb 26, 22/01/2010.
- [19] M.Lafria « Etude technique et conception de l'installation électrique d'une nouvelle unité industrielle de production des armoires électriques », Mémoire de magister, Université sidi mouhamed ben abdellah, Fés, 2014.