

N° Ordre...../FHC/UMBB/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
**UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES**



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**  
**Mémoire de Fin d'Etudes**  
**En vue de l'obtention du diplôme :**

## **MASTER**

Présenté par

**DJENDLI OUSSAMA**  
**ZERD MOHAMMED TAHAR**

Filière : Hydrocarbures  
Option : Génie Electrique : Electricité Industrielle

### **Thème**

---

**Compensation de la puissance réactive dans les  
laboratoires de machines et entrainement électrique (FHC)**

---

**Devant le jury :**

TADJER Sid Ahmed	MCA	UMBB	Président
KIFOUCHE Rezki	MAA	UMBB	Examineur
KHELIFI Fateh	MAA	UMBB	Examineur
HABI Idir	Pr	UMBB	Encadreur

Année universitaire 2022/2023

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



**Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie**

Département : Automatisation et Electrification des procédés

Filière : Hydrocarbures

Option : Génie Electrique: Electricité Industrielle

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme :**

**MASTER**

***Thème***

---

**Compensation de la puissance réactive dans les  
laboratoires de machines et entrainement électrique (FHC)**

---

**Présenté par :**

DJENDLI OUSSAMA

ZERD MOHAMMED TAHAR

**Avis favorable de l'encadreur :**

**Signature**

**HABI IDIR**

**Avis favorable du Président du jury**

**Nom Prénom**

**Signature**

**Cachet et signature**

## **REMERCIEMENTS**

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu tout-puissant qui nous a donné la santé, le courage et la patience pour mener à bien ce modeste travail.

Nous exprimons toute notre profonde reconnaissance à notre encadreur, Pr. Habi Idir, pour le temps qu'il a consacré à nous écouter, nous orienter et nous corriger tout au long de notre projet.

Nous adressons nos remerciements à tous les membres du jury d'avoir accepté de juger ce modeste travail. Nous souhaitons également exprimer notre profonde gratitude à tous les enseignants qui nous ont formés dès la 1ère année jusqu'à la 5ème année à l'Université M'hamed Bougara - Boumerdes (Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie).

Vos enseignements et votre soutien ont joué un rôle crucial dans notre développement académique et professionnel. Votre expertise et votre dévouement nous ont permis de progresser et d'acquérir les compétences nécessaires pour réaliser ce travail avec succès.

Encore une fois, nous vous remercions chaleureusement, Pr. Habi Idir, ainsi que tous ceux qui ont contribué à notre formation et à l'aboutissement de ce projet.

## *Dédicaces*

*À ma chère mère Naaima, mon cher père Nour Eddin, ma sœur Ghada, mon frère Zinou, mes tantes Noura et Fadila, ainsi qu'à mon binôme Oussama, mes amis Ghani, Mustafa, Islam, Souhaib,*

*Je tiens à vous dédier ces quelques mots emplis de gratitude et d'amour. Vous êtes les piliers de ma vie, les êtres chers qui m'ont soutenu et encouragé à chaque étape de mon parcours.*

*À Naaima, tu es celle qui m'a donné la vie, qui m'a nourri de ton amour inconditionnel. Ta présence bienveillante et tes conseils avisés m'ont permis de grandir et de devenir la personne que je suis aujourd'hui.*

*Maman, je te remercie du fond du cœur pour tout ce que tu as fait pour moi. Ta patience infinie, tes sacrifices et ton amour inconditionnel sont des trésors inestimables. Je suis tellement reconnaissant d'avoir une mère aussi extraordinaire et aimante que toi.*

*Aujourd'hui, je veux te rappeler à quel point tu es précieuse pour moi. Je t'aime de tout mon cœur et je serai toujours là pour toi, comme tu l'as toujours été pour moi. Que notre lien spécial continue de grandir et de s'épanouir, car tu es le pilier de ma vie.*

*Tu es mon roc, ma confidente et ma meilleure amie. Chaque obstacle que j'ai rencontré, tu étais là pour me soutenir et me rappeler que je suis capable de surmonter tous les défis. Ta présence apaise mon cœur et me donne la force de continuer, peu importe les difficultés qui se présentent.*

*À mon père, tu es mon modèle de force et de sagesse. Ton soutien constant et ta volonté inébranlable m'ont inspiré à persévérer face aux défis de la vie. Je suis fier d'être ton enfant.*

*À ma sœur, Ghada, et mon frère, Zinou, vous êtes mes complices, mes amis et mes confidentes. Les moments que nous avons partagés, les rires et les épreuves traversées ensemble ont renforcé nos liens et fait de vous des personnes précieuses dans ma vie.*

*À mes tantes, Noura et Fadila, vous avez toujours été là pour moi, offrant votre soutien et votre affection. Votre présence a été un réconfort et une source d'inspiration.*

*À mon binôme Oussama, en cette occasion spéciale, je tiens à te dédier ces quelques mots empreints de gratitude et de reconnaissance. Notre partenariat a été une expérience exceptionnelle, et je suis reconnaissant d'avoir eu la chance de travailler à tes côtés.*

*À mes amis Ghani, Mustafa, Islam, Souhaib, vous êtes mes compagnons de route, mes partenaires dans les rires et les défis. Votre amitié sincère et votre soutien inébranlable m'ont donné la force et le courage de poursuivre mes rêves.*

*À vous tous, ma famille et mes amis, je dédie mes réussites et mes accomplissements. Votre amour, votre soutien et votre présence ont été des cadeaux précieux dans ma vie. Je suis reconnaissant de vous avoir à mes côtés, et je vous remercie du fond du cœur pour tout ce que vous avez apporté dans ma vie.*

*Avec tout mon amour et ma reconnaissance, Ramy*

*À ma chère mère Leila, mon cher père Abd Al Aziz, mon frère Youcef, mes sœurs Rania, Soumaia et Nesrin, mon grand-père Saleh, mon binôme Ramy, ainsi qu'à mes amis Marouan, Mustafa, Ghani, Souhaib et Islam,*

*Je souhaite vous dédier ces quelques mots empreints d'affection et de gratitude. Vous êtes les êtres chers qui illuminent ma vie et me soutiennent à chaque instant.*

*À ma mère, Leila, tu es le pilier de ma vie. Ta présence aimante, tes encouragements constants et ton soutien inébranlable m'ont aidé à surmonter les obstacles et à croire en moi-même. Je suis reconnaissant d'avoir une mère aussi aimante et attentionnée que toi.*

*À mon père, Abd Al Aziz, tu es un modèle de force, de sagesse et de persévérance. Ta bienveillance, tes conseils avisés et ta présence réconfortante ont été une source d'inspiration pour moi. Je te suis reconnaissant(e) pour tout ce que tu as fait et continues de faire pour moi.*

*À mon frère, Youcef, tu es mon compagnon de jeu, mon confident et mon meilleur ami. Les souvenirs partagés, les rires et les liens qui nous unissent sont inestimables. Je suis honoré(e) d'avoir un frère aussi spécial que toi.*

*À mes sœurs, Rania, Soumaia et Nesrin, vous êtes mes amies, mes confidentes. Nos moments passés ensemble, nos échanges sincères et notre soutien mutuel ont renforcé notre lien familial. Je vous remercie pour votre amour inconditionnel.*

*À mon grand-père, Saleh, ta sagesse et ton amour ont été une source d'inspiration pour moi. Tes conseils précieux et ton héritage ont façonné ma personnalité. Je suis honoré(e) de faire partie de ta lignée.*

*À mon binôme, Ramy, notre collaboration et notre amitié ont été précieuses. Ta présence, ton soutien et ton travail acharné ont été une véritable bénédiction. Je suis reconnaissant de t'avoir à mes côtés.*

*À mes amis, Marouan, Mustafa, Ghani, Souhaib et Islam, vous êtes mes compagnons de vie, mes alliés et mes confidents. Votre amitié sincère, vos rires partagés et votre soutien indéfectible ont enrichi ma vie d'une manière indescriptible. Je vous remercie d'être présents à chaque étape de ma vie.*

*À vous tous, ma famille et mes amis, je suis profondément reconnaissant(e) de vous avoir dans ma vie. Votre amour, votre soutien et votre présence précieuse sont des cadeaux inestimables. Je vous porte dans mon cœur et vous remercie du fond de mon âme.*

*Avec tout mon amour et ma gratitude, Oussama*

## **Résumé**

Dans ce projet on a réalisé La compensation de la puissance réactive dans la FHC (Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie) à l'aide d'une compensation automatique en gradins. Cette méthode permet de corriger le facteur de puissance de manière efficace et précise. Les gradins sont commutés par des convertisseurs statique et un system de command. Grâce à cette technique, les fluctuations de puissance réactive sont corrigées de manière proactive, assurant ainsi un fonctionnement optimal du système électrique. Cela se traduit par une meilleure efficacité énergétique, des économies de coûts et une réduction des perturbations sur le réseau de distribution, contribuant ainsi à la stabilité et à la fiabilité de l'installation.

## **Resume**

In this project, reactive power compensation was achieved in the FHC (Faculty of Hydrocarbons and Chemistry) using automatic compensation. This method allows for effective and precise power factor correction. The steps are switched by static converters and a control system. in this system of compensation, fluctuations in reactive power are proactively corrected, ensuring optimal operation of the electrical system. This results in improved energy efficiency, cost savings, and a reduction in network disturbances, thereby contributing to the stability and reliability of the electrical system.

# Sommaire

## Chapitre I :Généralité sur la compensation de la puissance réactive

<b>I.1 Introduction.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2 Les types des dipôles linéaires.....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.1 le dipôle purement résistif (résistance idéale).....</b>	<b>1</b>
<b>I.2.2 le dipôle purement inductif (bobine idéale).....</b>	<b>2</b>
<b>I.2.3 le dipôle purement capacitif (condensateur idéal).....</b>	<b>3</b>
<b>I.3 Composantes active et réactive du courant.....</b>	<b>4</b>
<b>I.4 La puissance en régime sinusoïdal.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.1 La puissance instantanée.....</b>	<b>5</b>
<b>I.4.2 Les trois types de puissance.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2.1 La puissance active consommée.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2.2 La puissance réactive consommée.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2.3 La puissance apparente.....</b>	<b>6</b>
<b>I.4.2.4 Triangle des puissances.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.3 Explication de l'écoulement des puissances dans les trois types des charges.....</b>	<b>7</b>
<b>I.4.4 Théorème de Boucherot.....</b>	<b>8</b>
<b>I.5 Les harmoniques.....</b>	<b>9</b>
<b>I.5.1 Définition .....</b>	<b>9</b>
<b>I.5.2 Origine des harmoniques.....</b>	<b>10</b>
<b>I.5.3 Les solutions pour atténuer les harmoniques.....</b>	<b>10</b>
<b>I.6 Facteur de puissance.....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.1 Définition.....</b>	<b>11</b>
<b>I.6.2 Les inconvénients des faibles valeurs de facteur de puissance .....</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2.1 Pertes joule.....</b>	<b>12</b>
<b>I.6.2.2 La chute de tension.....</b>	<b>13</b>

I.6.2.3 Augmentation de la section des câbles.....	14
I.6.2.4 Diminution de la puissance active fournie par le transformateur.....	15
I.6.2.5 Le surdimensionnement des équipements électriques.....	15
I.6.2.6 Augmentation de La tarification d'électricité.....	15
I.6.3 Amélioration du facteur de puissance.....	16
I.7. Conclusion.....	16

## **Chapitre II :Moyens de compensation de la puissance réactive**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Moyens de compensation de puissance réactive.....	17
II.2.1 Les compensateurs synchrones.....	17
II.2.1.1 Définition.....	17
II.2.1.2 Théorie sur le fonctionnement du compensateur synchrone.....	18
II.2.1.3 Avantages et Inconvénients de compensateurs synchrones.....	19
II.2.2 Condensateur ou batterie de compensation.....	19
II.2.2.1 définition.....	19
II.2.2.2 Choix du type de compensation.....	20
II.2.2.2.1 Les batteries de condensateurs de type fixe.....	20
II.2.2.2.2 Les batteries de condensateurs de type automatique en gradins.....	21
II.2.2.2.2.1 définition.....	21
II.2.2.2.2.2 Principe et intérêt de la compensation automatique.....	22
II.2.2.2.2.3Le régulateur varométrique.....	23
II.2.2.3 Choix du branchement des condensateurs.....	23
II.2.2.3.1 Montage triangle .....	23
II.2.2.3.2 Montage en étoile .....	24
II.2.2.4 Différentes possibilités d'implantation des batteries condensateurs.....	25
II.2.2.4.1 La compensation globale .....	25

II.2.2.4.2 La compensation locale (par secteurs).....	26
II.2.2.4.3 La compensation individuelle .....	26
II.2.2.5 Principe de compensation de la puissance réactive.....	27
II.2.2.6 Détermination de la puissance des condensateurs.....	28
II.2.2.7 Mise en œuvre batteries de condensateurs .....	30
II.2.2.7.1 Protection interne des batteries de condensateurs .....	30
II.2.2.7.2 Protection externe des batteries de condensateurs.....	30
II.2.2.7.3 Compensation de la puissance réactive en présence d’harmoniques.....	30
II.2.2.7.4 Phénomènes transitoires et perturbations.....	31
II.2.2.7.4.1 Régime transitoire d’enclenchement.....	31
II.2.2.7.4.2 Résonance.....	32
II.2.2.7.4.3 Auto excitation.....	34
II.2.3. Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission Systems).....	34
II.2.3.1 Technique et type des dispositifs FACTS .....	34
II.2.3.2 Types de dispositifs FACTS.....	34
II.2.3.2.1 FACTS en Parallèle.....	34
II.2.3.2.1.1 STATCOM (Static Synchronous Compensator) .....	34
II.2.3.2.1.2 SVC .....	36
II.2.3.2.2 FACTS en Série.....	38
II.2.3.2.2.1 TCSC.....	38
II.2.3.2.2.2 SSSC.....	38
II.2.3.2.3 Hybrides.....	39
II.2.3.2.3.1 UPFC.....	39
II.2.3.3 Avantages et Inconvénient des FACTS.....	39
II.3 Conclusion.....	40

# Chapitre III Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie

<b>III.1 Introduction.....</b>	<b>41</b>
<b>III.2 Présentation générale de la faculté.....</b>	<b>41</b>
<b>III.3 Description.....</b>	<b>42</b>
<b>III.4 Schéma électrique de l'installation.....</b>	<b>44</b>
<b>III.5 Détermination des puissances.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.1 Puissance installée.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.2 Puissance utilisée.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.3 Description du Program que nous avons créé pour simplifier nos calculs.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.3.1 Visual Studio Code.....</b>	<b>45</b>
<b>III.5.3.2 Le langage de la programmation « Python ».....</b>	<b>46</b>
<b>III.5.3.3 Tkinter.....</b>	<b>46</b>
<b>III.5.3.4 L'interface utilisateur du Program.....</b>	<b>48</b>
<b>III.5.3.5 explications de chaque section et fonction du Program.....</b>	<b>48</b>
<b>III.5.4 Le bilan des puissances actives et réactives de l'installation.....</b>	<b>52</b>
<b>III.6 Compensation de la puissance réactive.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6.1 Type de compensation.....</b>	<b>53</b>
<b>III.6.2 Déterminer la répartition en gradins.....</b>	<b>54</b>
<b>III.6.3 La commande des condensateurs.....</b>	<b>54</b>
<b>III.6.4 L'absorbeur.....</b>	<b>55</b>
<b>III.6.5 Choix des condensateurs.....</b>	<b>56</b>
<b>III.6.6 Principe de fonctionnement dans les zones.....</b>	<b>58</b>
<b>III.6.7 Courant d'enclenchement des condensateurs.....</b>	<b>61</b>
<b>III.7 Simulation.....</b>	<b>62</b>
<b>III.7.1 Matlab.....</b>	<b>62</b>
<b>III.7.2 Simulink.....</b>	<b>62</b>

<b>III.7.3 Schéma de l'installation.....</b>	<b>63</b>
<b>III.7.3.1 Sous-système.....</b>	<b>63</b>
<b>III.7.3.2 System d'interruption.....</b>	<b>64</b>
<b>III.7.3.3 Les allures du courant.....</b>	<b>64</b>
<b>III.7.3.4 Le bon moment pour la fermeture.....</b>	<b>65</b>
<b>III.7.3.5 Le schéma d'installation avec la commande de la batterie condensateurs.....</b>	<b>66</b>
<b>III.7.3.6 Les TRIACs.....</b>	<b>67</b>
<b>III.7.3.7 Le system de la commande.....</b>	<b>67</b>
<b>III.7.3.8 Les allures du courant après la correction.....</b>	<b>68</b>
<b>III.7 Conclusion.....</b>	<b>69</b>
<b>Conclusion general.....</b>	<b>70</b>
<b>Bibliographie</b>	

# La Liste des figures

## Chapitre I Généralité sur la puissance réactive et le facteur de puissance.

**Figure I.1** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'une résistance pure.

**Figure I.2** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'une bobine idéale.

**Figure I.3** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'un condensateur idéal.

**Figure I.4** composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.

**Figure I.5** La représentation vectorielle des puissances.

**Figure I.6** Puissance instantanée pour une charge purement résistive.

**Figure I.7** Puissance instantanée pour une charge purement inductive.

**Figure I.8** La représentation vectorielle du théorème de Boucherot.

**Figure I.9** La représentation des ondes de courant typiques pour des charges non linéaires monophasées (en haut) et triphasées (en bas).

**Figure I.10** un réseau triphasé symétrique.

**Figure I.11** le schéma équivalent d'une ligne de transmission.

**Figure I.12** Le diagramme vectoriel des tensions.

**Figure I.13** l'accroissement de la section des câbles.

## Chapitre II Moyens de compensation de la puissance réactive.

**Figure II.1** Schéma équivalent de la machine synchrone.

**Figure II.2** Condensateur constitué de 4 groupes en série, chaque groupe comportant 12 éléments en parallèle.

**Figure II.3** Principe de la compensation fixe.

**Figure II.4** Principe de la compensation automatique.

**Figure II.5** Schéma de raccordement des batteries en triangle.

**Figure II.6** Schéma de raccordement des batteries en étoile.

**Figure II.7** Compensation globale.

**Figure II.8** Compensation partielle.

**Figure II.9** Installation des batteries de condensateur.

**Figure II.10** Principe de la compensation d'énergie réactive.

**Figure II.11** Principe de la compensation d'énergie réactive.

**Figure II.12** Courant d'enclenchement.

**Figure II.13** Tension réseau à l'enclenchement.

**Figure II.14** Schéma simplifié d'une installation.

**Figure II.15** Circulation des courants harmoniques.

- Figure II.16** Compensation sans injection d'harmoniques.
- Figure II.17** Compensation avec injection d'harmoniques.
- Figure II.18** Schéma simplifié de Classification des dispositifs FACTS.
- Figure II.19** Schéma de principe d'un STATCOM.
- Figure II.20** Thyristor Switched Capacitor (TSC).
- Figure II.21** Thyristor Controlled Reactor (TCR).
- Figure II.22** Schéma conventionnel d'un SVC.
- Figure II.23** Schéma de base d'un TCSC.
- Figure II.24** Static Synchronous Series Compensator (SSSC).
- Figure II.25** Unified Power Flow Controller (UPFC).

### **Chapitre III** Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie.

- Figure III.1** la faculté des hydrocarbures et de la chimie.
- Figure III.2** Interface graphique du QElectroTech.
- Figure III.3** Le schéma électrique unifilaire.
- Figure III.4** une liste des widgets utilisable dans Tkinter (pour python 3).
- Figure III.5** L'interface utilisateur du Programme.
- Figure III.6** Section du moteur.
- Figure III.7** Section d'éclairage.
- Figure III.8** Section des chauffages.
- Figure III.9** le facteur de simultanéité pour cette zone.
- Figure III.10** Puissance totale.
- Figure III.11** le facteur de simultanéité pour l'installation.
- Figure III.12** Le facteur de puissance.
- Figure III.13** La puissance réactive fourni.
- Figure III.14** une nouvelle installation.
- Figure III.15** condensateur commuté par thyristors.
- Figure III.16** L'absorbeur.
- Figure III.17** Condensateur Schneider.
- Figure III.18** Condensateur STEN.
- Figure III.19** schéma électrique de la zone 1.
- Figure III.20** Compensation individuelle de moteur AS.
- Figure III.21** Schéma de l'installation en MATLAB.
- Figure III.22** le sous-système.
- Figure III.23** system d'interruption.
- Figure III.24** les allures du courant  $I_a, I_b, I_c$ .

**Figure III.25** le schéma d'installation avec la commande de la batterie condensateurs.

**Figure III.26** les Triacs.

**Figure III.27** le system de la commande.

**Figure III.28** Les allures du courant après la correction.

## **La Liste des tableaux**

**Tableau I.1** facteur de puissance des principaux récepteurs.

**Tableau II.1** le facteur K à appliquer à la puissance active P de l'installation.

**Tableau III.1** Description de différentes charges dans chaque zone.

**Tableau III.2** Le bilan des puissances actives et réactives de l'installation.

**Tableau III.3** le rapport entre  $Q_c$  et S.

## Listes des indices

### Chapitre I

$v(t)$  : la tension.

$i(t)$  : le courant.

$V_m$  : valeur max de la tension (V).

$I_m$  : valeur max du courant (A).

$\omega$  : la pulsation (rad/s).

$\underline{Z}$  : L'impédance complexe.

$R$  : la résistance ( $\Omega$ ).

$L$  : l'inductance (L).

$C$  : la capacité (F).

$I_t$  : courant apparent (A).

$I_a$  : courant actif (A).

$I_r$  : courant réactif (A).

$I_c$  : courant capacitive.

$I_L$  : courant inductive.

$\phi$  : déphasage entre le courant apparent et la tension.

$U$  : la tension composée (V).

$V$  : la tension simple (V).

$P$  : la puissance active (KW).

$Q$  : la puissance réactive (KVAR).

$S$  : la puissance apparente (KVA).

$\underline{S}$  : la puissance apparente complexe,  $\underline{S}=P+jQ$ .

FP : facteur de puissance.

DPF : facteur de déplacement.

### Chapitre II

$N$  : vitesse de rotation (tours/ minute).

$f$  : fréquence du réseau (Hertz).

P: nombre de paires de pôles.  
E : fém due à l'excitation du compensateur synchrone.  
V : tension du réseau.  
X : réactance de fuite du compensateur synchrone.  
I : courant échangé avec le réseau.  
Y : couplage en étoile.  
 $\Delta$ : couplage en triangle.  
CG : Compensation globale.  
CS : Compensation par secteur.  
CI : Compensation individuelle.  
M : Charge type moteur.  
THT : très haute tension.  
HT : haute tension.  
MT : moyenne tension.  
BT : basse tension.  
Sh : puissance apparente des récepteurs produisant des harmoniques.  
Sn : puissance apparente du transformateur de l'installation.

### **Chapitre III**

Pu : la Puissance active (utilisée) de chaque moteur.  
Qu : la Puissance réactive de chaque moteur.  
Su : la Puissance apparente de chaque appareil.  
Ku : facteur d'utilisation.  
Ks : facteur de simultanéité.  
Pt : la Puissance active totale.  
Qt : la Puissance réactive totale.  
St : la Puissance apparente totale.  
Qc : puissance de condensateur de compensation dans chaque zone.  
La : bobine d'inductance d'atténuation.



# Introduction générale

## Introduction générale

Les entreprises qui ont le plus grand besoin en électricité sont l'industrie du papier et du carton, l'industrie agroalimentaire, l'industrie du caoutchouc, le secteur des plastiques et des produits minéraux non métalliques, ainsi que la métallurgie et l'industrie chimique.

L'exploitation du réseau électrique consiste à produire, transporter et distribuer l'énergie demandée par les entreprises. Cette énergie doit être fournie sous tension et fréquence dans de limites acceptables afin de garantir un bon fonctionnement des charges et des équipements du réseau.

L'énergie électrique produite et distribuée par le réseau sous forme de tensions triphasées sinusoïdales est utilisée pour fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs (entreprises). Selon la nature des charges, il existe deux types de la puissance: la puissance active et la puissance réactive.

La puissance réactive consommée par les consommateurs fait circuler du courant inutilement entre les réseaux et les consommateurs

Lorsque la consommation de la puissance réactive est importante, cela entraîne des pertes financières pour le consommateur, proportionnelles à la quantité de la puissance réactive consommée

De plus, en raison d'un courant appelé plus important, la circulation de la puissance réactive sur le réseau de distribution entraîne des surcharges au niveau des transformateurs, provoquant l'échauffement des câbles d'alimentation et des bobinages des moteurs, ainsi que des pertes en ligne supplémentaires et des chutes de tension considérables, ce qui peut causer de l'instabilité de la tension dans le réseau.

Il est donc nécessaire de produire de la puissance réactive pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau, ce processus étant appelé "compensation de la puissance réactive". Il est également important de contrôler la fourniture de cette puissance pour maintenir la stabilité du réseau électrique.

Pour mener à bien cette tâche, nous avons réparti notre travail en 3 parties (chapitres) :

Dans le premier chapitre on donne des généralités sur les notions de base sur la puissance en régime sinusoïdal, le facteur de puissance et aussi *la nécessité de* la compensation de la puissance réactive

Le deuxième chapitre, s'adresse aux techniques et moyens classiques et modernes de compensation de la puissance réactive, voir la compensation par batteries de condensateurs, par inductances, les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques.

Le troisième chapitre c'est un exemple pratique, on traite la consommation de la puissance électrique dans les laboratoires de la faculté des hydrocarbures et de la chimie, et la présentation du logiciel que nous avons développé pour simplifier les calculs.

# Chapitre I

## Généralité sur la puissance réactive et le facteur de puissance

### I.1 Introduction

Dans le monde industriel la nature de la tension et du courant la plus utilisée est alternatif triphasé, tous les récepteurs électriques sont destinés à transformer la puissance électrique en autre forme de la puissance (mécanique ou chaleur...etc.). Cette puissance est distinguée en deux formes de puissance:

La puissance active consommée  $P$  qui est responsable de la création du travail mécanique ou la chaleur ou l'éclairage.

La puissance réactive consommée  $Q$  qui est responsable de la création du champ magnétique dans les circuits magnétiques.

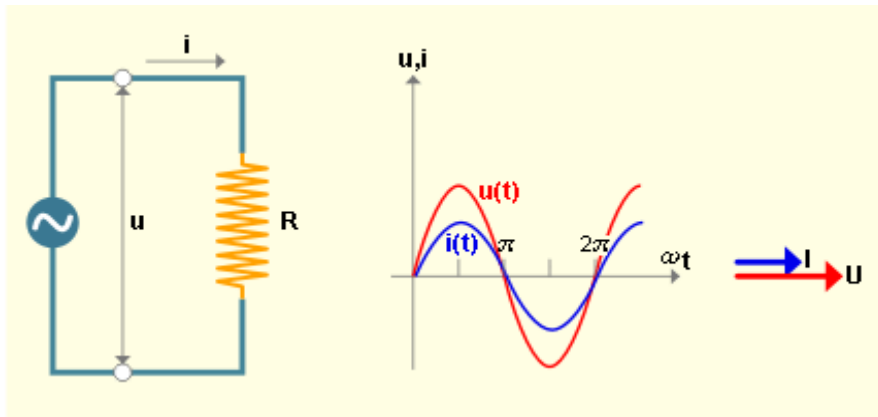
### I.2 Les types des dipôles linéaires

Lorsque l'on alimente une charge avec une tension alternative sinusoïdale, un courant est généré. On appelle une charge linéaire une charge qui ne génère pas d'harmoniques et consomme un courant sinusoïdal. Les charges linéaires constituent de dipôles linéaires, les charges linéaires peuvent être soit considérés comme des associations particulières de ces trois dipôles idéaux :

#### I.2.1 le dipôle purement résistif (résistance idéale)

Dans les résistances pures, toute l'énergie fournie par la source d'alimentation est convertie en chaleur. Ce phénomène est appelé effet Joule. La résistance agit comme un frein, s'opposant au passage du courant électrique. L'intensité de ce freinage est mesurée en ohms ( $\Omega$ ). Dans ce type de circuit, le courant qui circule à travers la résistance est toujours en phase avec la tension appliquée à celle-ci [1]. Cela est

représenté dans la figure I.1 sous forme de représentation temporelle et vectorielle du signal.



**Figure I.1** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'une résistance pure.

Dans le dipôle résistif nous mettons le courant comme référence:

$$i(t) = I_m \sin(\omega t) \quad (\text{I.1})$$

Alors que la tension est:

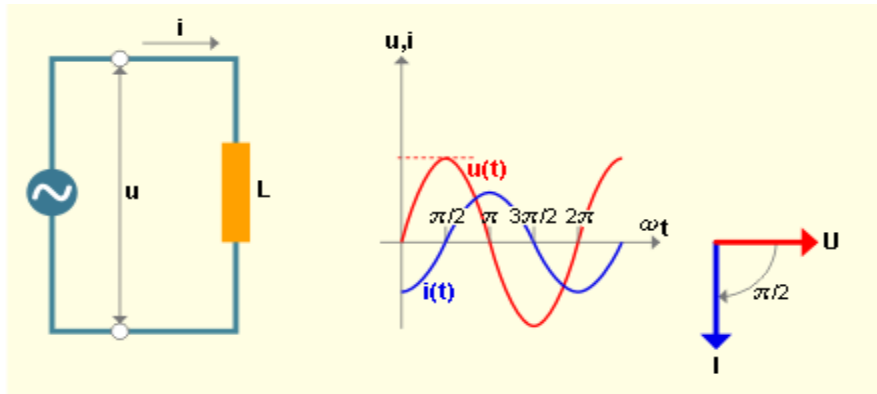
$$v(t) = R i(t) = R I_m \sin(\omega t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{I.2})$$

L'impédance complexe résistive est:

$$\underline{Z}_R = R \quad (\text{I.3})$$

### I.2.2 le dipôle purement inductif (bobine idéale)

Une bobine de fil conducteur est présente dans divers dispositifs tels que les moteurs électriques (dans les bobinages) et les transformateurs. Elle réagit constamment aux variations du courant qui la traverse en raison d'un phénomène magnétique. L'unité est l'inductance  $L$ , exprimée en Henry (H). Une bobine a un effet sur le courant en le retardant par rapport à la tension, ce qui signifie qu'elle déphase le courant. Ainsi, une inductance pure montrera un courant déphasé de 90 degrés en retard par rapport à la tension [1]. La figure I.2 représente la représentation temporelle et vectorielle de cette propriété.



**Figure I.2** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'une bobine idéale.

L'expression mathématique de la tension:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} \quad (\text{I.4})$$

On prend  $v(t)$  comme référence:

$$i(t) = I_m \sin \omega t - \frac{\pi}{2} \quad (\text{I.5})$$

L'expression de la tension à la borne d'une bobine est:

$$v(t) = L \omega I_m \sin(\omega t) = Z_l I_m \sin(\omega t) = V_m \sin(\omega t) \quad (\text{I.6})$$

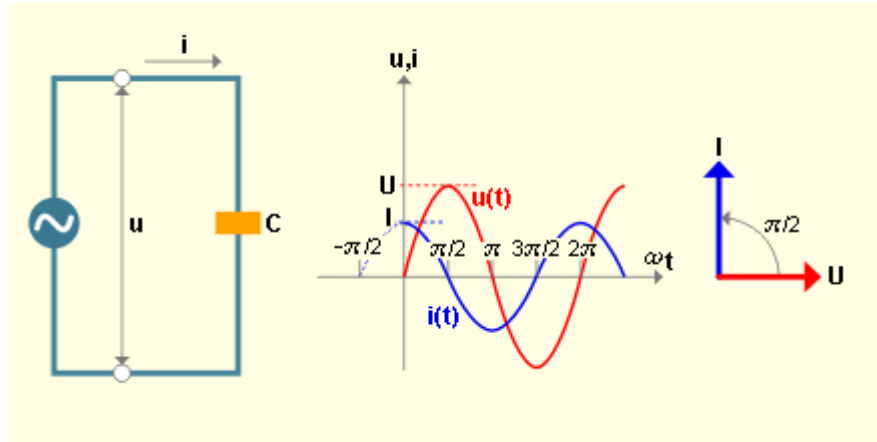
L'impédance complexe inductive est:

$$\underline{Z_l} = j L \omega \quad (\text{I.7})$$

### I.2.3 le dipôle purement capacitif (condensateur idéal)

Un condensateur est un composant électrique capable de stocker des charges électriques. L'unité est la capacité  $C$  est exprimée en Farad (F). Lorsqu'un condensateur est soumis à la tension d'une source d'alimentation, il accumule des charges électriques. Ces charges seront restituées au réseau lorsque la tension d'alimentation diminuera. Si la tension est alternative, le condensateur se chargera et se déchargera à la fréquence de la source alternative. Cela entraîne également un déphasage du courant par rapport à la tension, mais contrairement à un dipôle

inductif, le courant est déphasé en avance de  $90^\circ$  par rapport à la tension [1]. La figure I.3 représente la représentation vectorielle de cette propriété :



**Figure I.3** La représentation temporelle et vectorielle du signal d'un condensateur idéal.

L'expression mathématique du courant :

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} \quad (\text{I.8})$$

On prend la tension comme référence:

$$v(t) = V_m \sin \omega t \quad (\text{I.9})$$

$$i(t) = C \frac{dv(t)}{dt} = C V_m \omega \sin \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) \quad (\text{I.10})$$

Finalement l'expression de la tension à la borne d'un condensateur est:

$$v(t) = \frac{1}{C \cdot \omega} i(t) \quad (\text{I.11})$$

L'impédance complexe capacitive est:

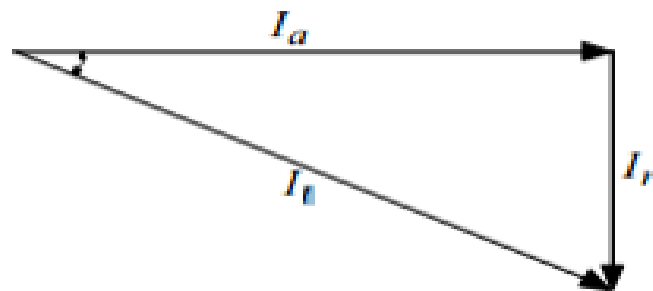
$$\underline{Z}_C = \frac{1}{j \cdot C \cdot \omega} = \frac{-j}{C \cdot \omega} \quad (\text{I.12})$$

### I.3 Composantes active et réactive du courant

A chacune des différentes formes de puissance électrique, à savoir la puissance active et la puissance réactive, correspond un courant spécifique. Le courant actif, noté  $I_a$ , est en phase avec la tension du réseau électrique et transporte la puissance active. En revanche, le courant réactif, noté  $I_r$ , est déphasé de 90 degrés par rapport au

courant actif, soit en arrière (pour un récepteur inductif) ou en avant (pour un récepteur capacitif). Il est responsable de la composante réactive de la charge. Le courant apparent est le courant total qui circule dans le câble électrique depuis la source jusqu'au récepteur. Ce courant est déphasé d'un angle  $\varphi$  par rapport au courant actif (ou par rapport à la tension) [2].

En l'absence de composantes harmoniques dans le courant, les courants se combinent vectoriellement en utilisant les valeurs efficaces, comme illustré sur la figure I.4.



**Figure I.4** composition vectorielle des courants actif, réactif et apparent.

Les courants actifs, réactif, apparent et le déphasage sont liés par les relations suivantes:

$$I_a = I_t \cos \varphi \quad (\text{I.13})$$

$$I_r = I_t \sin \varphi \quad (\text{I.14})$$

$$I_t = \sqrt{I_a^2 + I_r^2} \quad (\text{I.15})$$

### I.4 La puissance en régime sinusoïdal

#### I.4.1 La puissance instantanée

C'est le produit de la valeur instantanée de la tension par la valeur instantanée du courant [2]:

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (\text{I.16})$$

### I.4.2 Les trois types de puissance

On régime sinusoïdal on distingue 3 types de puissance :

#### I.4.2.1 La puissance active consommée

C'est la moyenne de la puissance instantanée, C'est une puissance réelle qui se transforme intégralement en puissance mécanique couple pour entraîner la charge dans les moteurs asynchrone, ou chaleur dans les fours ou les machine de soudage [2].

Son expression mathématique est:

$$P = \langle p(t) \rangle = V I \cos \varphi \quad (\text{I.17})$$

Dans un récepteur triphasé et équilibré:

$$P = \sqrt{3} U I \cos \varphi \quad (\text{I.18})$$

Avec:

$$U = \sqrt{3} V \quad (\text{I.19})$$

#### I.4.2.2 La puissance réactive consommée

C'est une puissance apparaît dans tous les machines utilisent les circuits magnétiques [2].

Son expression mathématique est:

$$Q = V I \sin \varphi \quad (\text{I.20})$$

Dans un récepteur triphasé et équilibré:

$$Q = \sqrt{3} U I \sin \varphi \quad (\text{I.21})$$

#### I.4.2.3 La puissance apparente

C'est la somme vectorielle de deux les puissances précédentes, cette puissance ne tient pas compte le déphasage entre la tension et le courant:

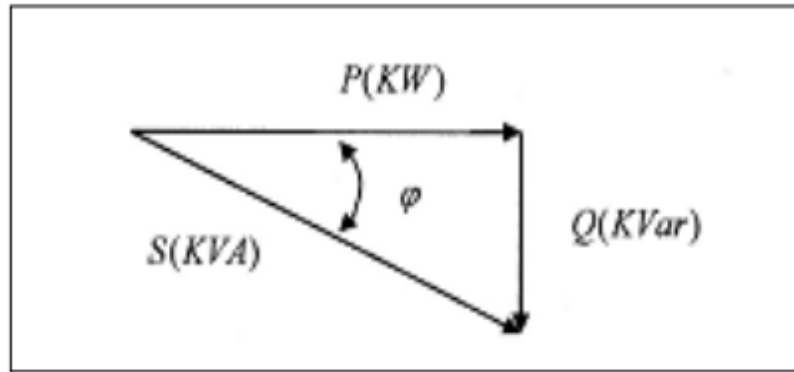
$$S = V I = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (\text{I.22})$$

Dans un récepteur triphasé et équilibré:

$$S = \sqrt{3} U I \quad (\text{I.23})$$

### I.4.2.4 Triangle des puissances

Ces puissances se composent vectoriellement comme représenté à La figure I.5 [2].



**Figure I.5** La représentation vectorielle des puissances.

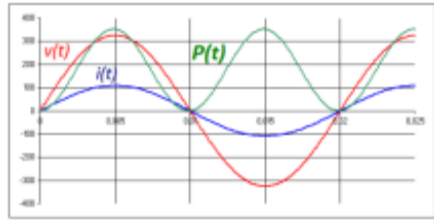
$$P = S \cos \varphi \quad (\text{I.24})$$

$$Q = S \sin \varphi \quad (\text{I.25})$$

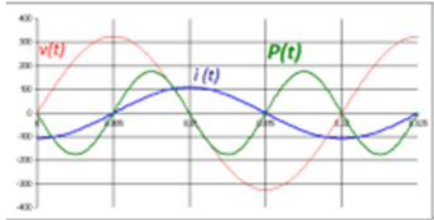
$$Q = P \operatorname{tg} \varphi \quad (\text{I.26})$$

### I.4.3 Explication de l'écoulement des puissances dans les trois types des dipôles

La puissance instantanée, reste toujours positive dans le cas d'une charge purement résistive. Cela signifie que la charge consomme de l'énergie en tout instant comme illustré dans la figure I.6. En revanche, dans le cas d'une charge purement inductive ou purement capacitive, la puissance instantanée est purement alternative, ce qui implique qu'elle a une valeur moyenne nulle et donc une puissance active égale à zéro. Selon les conventions choisies, lorsque la puissance instantanée est positive, la charge stocke de l'énergie, puis lorsqu'elle est négative, elle la déstocke comme illustré dans la figure I.7. En d'autres termes, ce type de charge, purement réactive, ne consomme pas d'énergie mais fait circuler du courant entre la source (réseau) et la charge [3].



**Figure I.6** Puissance instantanée pour une charge purement résistive.



**Figure I.7** Puissance instantanée pour une charge purement inductive.

#### I.4.4 Théorème de Boucherot

C'est méthode pour calculer la somme des puissances actives et réactives par un groupement des récepteurs sont respectivement égales à la somme des puissances actives et réactives absorbées par chaque récepteur du groupement mais la puissance apparente  $Stot$  de l'ensemble n'est pas la somme des puissances apparentes [8].

$$P_{tot} = P_1 + P_2 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} P_i \quad (I.27)$$

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + \dots = \sum_{i=1}^{i=n} Q_i \quad (I.28)$$

A partir de cette méthode on détermine la puissance apparente:

$$Stot = \sqrt{P_{tot}^2 + Q_{tot}^2} \quad (I.29)$$

Et le courant consommé par le groupement ou l'installation :

$$I_{tot} = \frac{Stot}{\sqrt{3} U} \quad (I.30)$$

La figure I.8 illustre la représentation vectorielle du théorème de Boucherot.

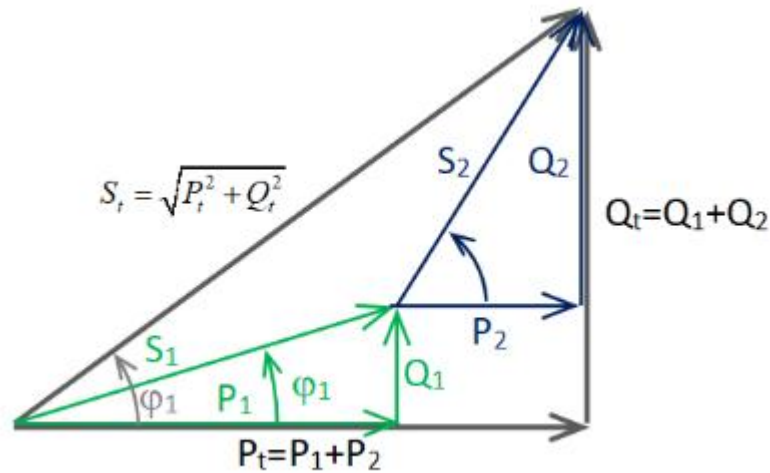


Figure I.8 la représentation vectorielle du théorème de Boucherot.

## I.5 Les harmoniques

### I.5.1 Définition

Si des harmoniques sont présents dans un système électrique, cela signifie que le courant et la tension ont des formes d'ondes qui ne sont pas sinusoïdales. Les courants harmoniques sont causés par des charges non linéaires qui sont connectées au réseau électrique. Ces charges sont considérées comme non linéaires car leur courant ne suit pas la même forme d'onde que la tension d'alimentation qui est sinusoïdale. Ensuite, la circulation des courants harmoniques dans les impédances du réseau crée des harmoniques de tension, qui déforment la tension d'alimentation [7].

La Figure I.9 représente des ondes de courant typiques pour des charges non linéaires monophasées (en haut) et triphasées (en bas).

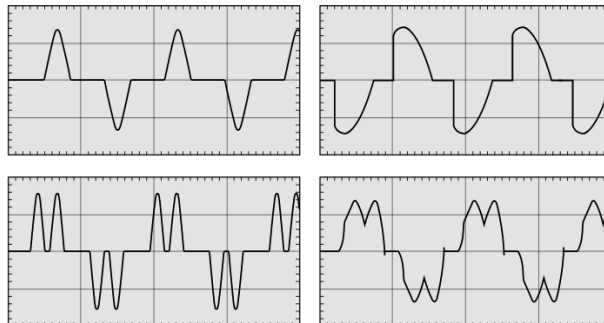


Figure I.9 représentation des ondes de courant typiques pour des charges non linéaires monophasées (en haut) et triphasées (en bas).

### I.5.2 Origine des harmoniques

Au cours des dernières années, l'utilisation croissante d'équipements électriques dotés de convertisseurs statiques a entraîné une augmentation notable de la pollution harmonique dans les réseaux électriques [9].

Exemples de charges non-linéaires :

- les équipements industriels (machines à souder, fours à arc, fours à induction, redresseurs).
- les variateurs de vitesse pour moteurs asynchrones ou moteurs à courant continu.
- les onduleurs.
- les appareils de bureautique (ordinateurs, photocopieurs, fax, etc.).
- les appareils domestiques (TV, fours micro-ondes, éclairage néon, etc.).
- certains équipements avec saturation magnétique (transformateurs) [7].

### I.5.3 Les solutions pour atténuer les harmoniques

Plusieurs solutions existent pour limiter la propagation et l'effet des harmoniques dans les réseaux électriques :

#### 1. adaptations de l'installation

Pour limiter la propagation des harmoniques dans le réseau, des Solutions peuvent être prises et sont à observer en particulier dans le cas d'une nouvelle installation :

- Regrouper les charges polluantes.
- Séparer les sources [7].

#### 2. Solution de filtrage

Si la première solution n'est pas suffisante, il est nécessaire d'équiper l'installation polluée d'un dispositif de filtrage. Il existe trois types de filtres :

##### a. les filtres passifs :

Qui utilisent des circuits électriques RLC pour modifier l'impédance du réseau localement afin de dévier les courants et éliminer les tensions harmoniques. Les éléments capacitifs et inductifs sont associés en parallèle avec l'impédance du réseau. Il est important de bien connaître les rangs harmoniques à filtrer et les atténuations

nécessaires pour choisir les éléments du filtre passif et les dimensionner. Les filtres passifs permettent également la compensation d'énergie réactive [9].

b. les filtres actifs :

Qui sont des convertisseurs de puissance utilisent des semi-conducteurs, comme les thyristors GTO et les transistors IGBT, ils apparaissent dans un réseau électrique basse tension, agissant comme des sources de courants ou de tensions harmoniques, injectant en série ou en parallèle des courants ou des tensions harmoniques en opposition par rapport aux perturbations existantes et aussi Contrôler la puissance réactive [9].

c. les filtres hybrides :

Combinent les deux types de dispositifs précédents, offrant ainsi les avantages des deux solutions et couvrant un large éventail de puissance et de performances [7].

## I.6 Facteur de puissance

### I.6.1 Définition

Le facteur de puissance est un indicateur de la qualité de la conception et de la gestion d'une installation électrique [5].

Pour un récepteur électrique alimenté en régime de courant sinusoïdal ou avec la présence des harmoniques, il est égal le rapport de la puissance active  $P$  sur la puissance apparente  $S$  Il est toujours compris entre 0 et 1:

$$FP = \frac{P}{S} \quad (I.31)$$

Si les courants et tensions sont des signaux parfaitement sinusoïdaux, le facteur de puissance est égal au facteur de déplacement ( $DPF = \cos \varphi$ ).

On utilise également la variable  $\text{tg}\varphi$ . Dans les mêmes conditions, nous avons la relation:

$$\text{tg}\varphi = \frac{Q}{P} \quad (I.32)$$

Le tableau I.1 illustre le facteur de puissance des principaux récepteurs.

RECEPTEUR	COS $\varphi$	TG $\varphi$
	0 %	5,80
	25 %	1,52
<b>Moteurs asynchrones ordinaires chargés à</b>	50 %	0,94
	75 %	0,75
	100 %	0,62
<b>Lampes à incandescence</b>	approx. 1	approx. 0
<b>Lampes fluorescentes</b>	approx. 0,5	approx. 1,73
<b>Lampes à décharge</b>	0,4 to 0,6	approx. 2,29 to 1,33
<b>Fours à résistance</b>	approx. 1	approx. 0
<b>Fours à induction compensée</b>	approx. 0,85	approx. 0,62
<b>Fours diélectriques</b>	approx. 0,85	approx. 0,62
<b>Machines à soudage à résistance</b>	0,8 to 0,9	0,75 to 0,48
<b>Postes statiques monophasés de soudage à l'arc</b>	approx. 0,5	approx. 1,73
<b>Postes à soudage rotatifs</b>	0,7 to 0,9	1,02 to 0,48
<b>Transformateurs-redresseurs de soudage à l'arc</b>	0,7 to 0,8	1,02 to 0,75
<b>Fours à arc</b>	0,8	0,75
<b>Redresseurs de puissance à thyristors</b>	0,4 to 0,8	2,25 to 0,75

**Tableau I.1** facteur de puissance des principaux récepteurs.

## I.6.2 Les inconvénients des faibles valeurs de facteur de puissance

Dans une installation bien dimensionnée, un bon facteur de puissance est obtenu lorsque chaque machine consomme une puissance active proche de sa valeur nominale. Mais il reste toujours que cette installation consomme une certaine puissance réactive due au courant magnétisant des transformateurs et des moteurs asynchrones. Cette puissance est indépendante de puissance active consommée par l'élément de l'installation. Maintenant, le mauvais facteur de puissance est obtenu lorsque la puissance réactive absorbée est importante [6]. Un faible facteur de puissance engendre des Conséquences manifestées d'ordre économique et technique :

### I.6.2.1 Pertes joule

Les lignes du réseau sont considérées par des résistances R en série avec des inductances X [4].

Quand le facteur de puissance est faible le récepteur consomme un courant important et ce courant traverse les résistances R des lignes et son valeur efficace est :

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} U \cos\varphi} \quad (\text{I.33})$$

et la puissance absorbée par les résistances  $R$  est transformée en chaleur cette chaleur détruit l'isolement des câbles avec une diminution de la puissance active au borne de la charge. ces pertes sont d'expression:

$$P_j = 3 R I^2 \quad (\text{I.34})$$

Sur La figure I.10 on se propose un réseau triphasé symétrique.

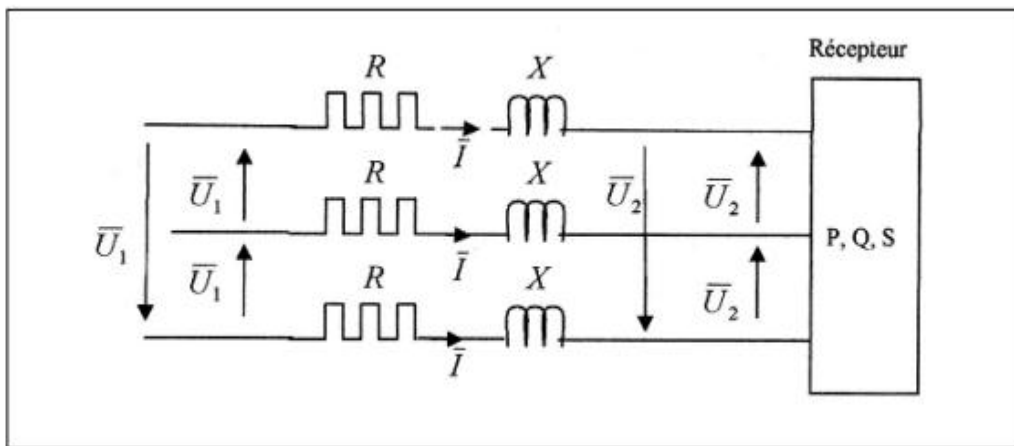


Figure I.10 réseau triphasé symétrique.

### I.6.2.2 La chute de tension

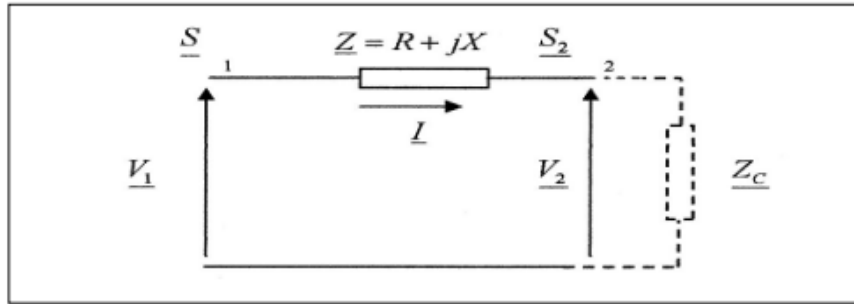
Lorsque la circulation du courant dans une ligne électrique est importante, cela provoque une baisse de la tension en bout de ligne par rapport à son origine. Plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la baisse de tension sera importante [2].

Considérant maintenant sur la figure I.11 le schéma équivalent d'une ligne de transmission.

L'impédance complexe:

$$\underline{z} = R + j.X \quad (\text{I.35})$$

Et destinée à alimenter la charge  $Z_c$ .



**Figure I.11** le schéma équivalent d'une ligne de transmission.

Les puissances complexes apparentes :

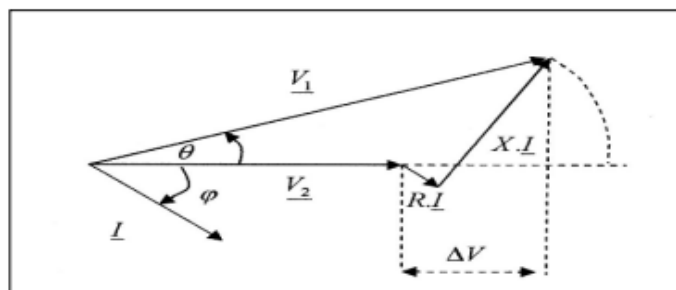
$$\underline{S}_1 = P_1 + jQ_1 \quad (\text{I.36})$$

$$\underline{S}_2 = P_2 + jQ_2 \quad (\text{I.37})$$

La relation qui relie les tensions est donnée par:

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_2 + R * \underline{I} + j * X * \underline{I} \quad (\text{I.38})$$

Le diagramme vectoriel des tensions est représenté sur La figure I.12.



**Figure I.12** Le diagramme vectoriel des tensions.

### I.6.2.3 Augmentation de la section des câbles

Quand le facteur de puissance est mauvais le récepteur consomme un courant important et ce courant traverse les résistances R des lignes ; la puissance absorbée par les résistances R est transformée en chaleur cette chaleur détruit les petits câbles alors il est obligatoire de augmenter la section des câbles des lignes [4].

La figure I.13 montre l'accroissement de la section des câbles pour un facteur de puissance diminuant de 1 à 0,4 pour la même énergie active fournie [6].

Facteur multiplicateur de la section des conducteurs (câbles)	1	1,25	1,67	2,5
cos $\varphi$	1	0,8	0,6	0,4

**Figure I.13** l'accroissement de la section des câbles.

### **I.6.2.4 Diminution de la puissance active fournie par le transformateur (l'efficacité énergétique)**

La puissance apparente  $S$  est le principal facteur du transformateur car chaque transformateur fourni une certaine puissance apparente souscrite.

La diminution du facteur de puissance d'une charge conduit une diminution dans la puissance active consommée, et la charge doit être consommée la puissance nominale sinon le rendement de cette charge diminue, donc la charge induit une augmentation du courant sachant que la tension reste constante ; le transformateur ne peut pas fournir ce courant [6].

### **I.6.2.5 Le surdimensionnement des équipements électriques**

Une mauvaise valeur de facteur de puissance induit une augmentation de la puissance apparente d'où nécessiter d'un surdimensionnement dans les alternateurs et les transformateurs et aussi avec l'augmentation du courant conduit un d'un surdimensionnement dans les lignes HT, dans les jeux de barres, et dans les appareils de protection comme les disjoncteurs, les fusibles, ce qui conduira à une augmentation dans le coût des investissements [4].

### **I.6.2.6 Augmentation de La tarification d'électricité**

Lorsque la consommation de l'énergie réactive par la charge (moteur asynchrone) est importante avec un faible facteur de puissance (moteur tourne presque à vide), l'entreprise doit payer la quantité de l'énergie réactive au fournisseur de l'électricité [4].

### I.6.3 Amélioration du facteur de puissance

On peut améliorer le facteur de puissance grâce à plusieurs méthodes, dont les deux suivantes :

La première méthode est la compensation de l'énergie réactive de la composante fondamentale et d'obtenir un  $\cos \varphi$  à peu près égal à 1 à partir les moyens de la compensation donc Il faudra donc calculer  $\cos \varphi$  (et non FP) pour déterminer la puissance réactive des condensateurs qu'il faut installer pour réduire ou supprimer la facture d'énergie réactive. La deuxième méthode est éliminée les courants harmoniques par le filtrage.

Dans le monde industriel réel les harmoniques ils sont toujours présents donc pour améliorer le facteur de puissance on utilise les deux méthodes pour obtenir un facteur de puissance à peu près égal à 1 [7].

### I.7. Conclusion

Dans la fin de ce chapitre nous avons vu les types des charges et les composantes de la puissance électrique dans le réseau alternative triphasé équilibré et qu'ce que ci l'énergie réactive et sa compensation pour améliorer le facteur de puissance afin d'obtenir des gains financiers et techniques dans notre installation.

Mais pour faire la technique de la compensation de l'énergie réactive, des moyens de compensation d'énergie réactive sont installés. C'est ce qu'on va voir dans le deuxième chapitre.

## Chapitre II

# Moyens de compensation de la puissance réactive

### II.1 Introduction

L'amélioration du facteur de puissance est un paramètre très important pour améliorer l'utilisation de l'énergie du point de vue technique et économique.

Ce chapitre examinera le principe de la compensation, ainsi que les différents types de compensateurs de puissance réactive.

### II.2 Moyens de compensation de la puissance réactive

Afin de répondre aux besoins en puissance réactive nécessaires au bon fonctionnement des récepteurs, des sources supplémentaires de puissance réactive peuvent être utilisées. Ces sources peuvent inclure :

- Les compensateurs synchrones.
- batterie de compensation.
- Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System) [12].

#### II.2.1 Les compensateurs synchrones

##### II.2.1.1 Définition

Les compensateurs synchrones sont des dispositifs utilisés pour réguler la puissance réactive dans un réseau électrique. Ils ont été largement utilisés dans les années 1950 et 1960 mais ont été progressivement remplacés par les condensateurs. Les compensateurs synchrones peuvent être assimilés à des moteurs synchrones fonctionnant à vide, avec un stator branché au réseau triphasé et un rotor sur lequel est enroulée une bobine d'excitation. L'excitation est réglée pour fournir ou absorber de la puissance réactive afin d'ajuster la tension en un point du réseau.

## Chapitre II. Moyens de compensation de la puissance réactive

Les compensateurs synchrones sont particulièrement adaptés aux pays disposant de lignes longues, car ils assurent le maintien de la stabilité dynamique. Leur régulation d'excitation est rapide.

La puissance réactive produite ou absorbée par un compensateur synchrone dépend du courant d'excitation. Si le courant d'excitation est augmenté, la tension augmente également, ce qui permet au compensateur de fournir plus de puissance réactive au réseau. Si le courant d'excitation est diminué, le compensateur absorbe de la puissance réactive.

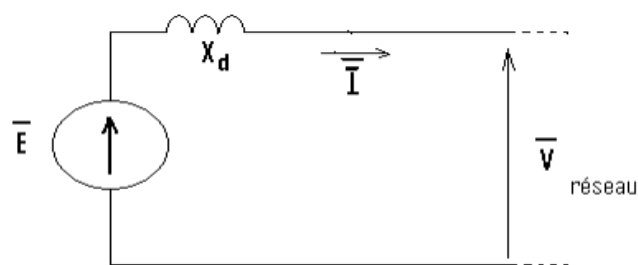
Les compensateurs synchrones sont souvent placés près des grands centres de distribution et leur puissance peut varier de 20 à 60 Mvar en fourniture et de 10 à 30 Mvar en absorption. Ils peuvent être nécessaires pour compenser l'élévation de tension créée par une longue ligne à vide [19].

Quel que soit le mode de fonctionnement, le rotor doit tourner à une vitesse constante en corrélation avec la fréquence du réseau, ce qui explique l'appellation synchrone de ce type de machines [13].

$$N = \frac{60f}{p} \quad (\text{II.1})$$

### II.2.1.2 Théorie sur le fonctionnement du compensateur synchrone

D'après la théorie simplifiée de Potier, il est possible de réduire le modèle de la machine synchrone à une source de tension  $E$  en série avec une inductance  $X$  (avec  $R \ll X_d$ ) [13]. Comme illustré sur la figure II.1



**Figure II.1** Schéma équivalent de la machine synchrone.

$$\underline{E} = \underline{V} + j\underline{X}\underline{I} \quad (\text{II.2})$$

- Si  $E - V > 0 \rightarrow E > V$ , le compensateur est dit capacitif. Il fonctionne en régime surexcite, donc il fournit de la puissance réactive.

## Chapitre II. Moyens de compensation de la puissance réactive

- Si  $E - V < 0 \rightarrow E < V$ , le compensateur est dit inductif, Il fonctionne en régime sous-excite, donc il absorbe de la puissance réactive [13].

### II.2.1.3 Avantages et Inconvénients de compensateurs synchrones

Les compensateurs synchrones offrent plusieurs avantages, notamment :

- Ils permettent une régulation de tension locale précise.
- Ils offrent une plage de variation de puissance réactive, ce qui réduit le nombre de manœuvres d'éléments shunt tels que les condensateurs ou les inductances.
- Ils peuvent être alimentés directement à des tensions élevées.

Les compensateurs synchrones ont également quelques inconvénients :

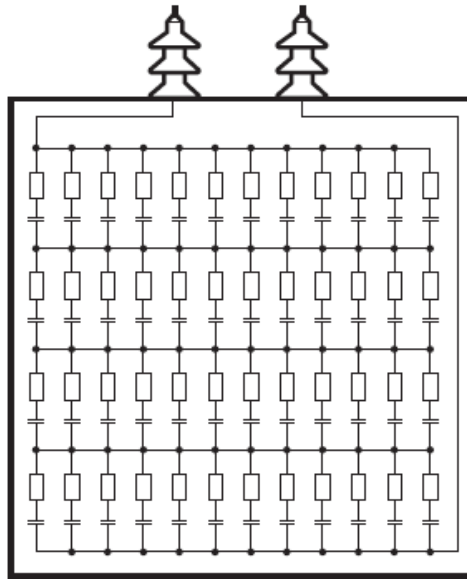
- Leur coût élevé.
- Ils nécessitent un générateur de courant continu pour leur excitation, ce qui augmente le coût du moteur.
- Le temps de réponse aux événements sévères, tels que les pertes d'un groupe ou les courts-circuits triphasés, est relativement lent [13].

## II.2.2 Condensateur ou batterie de compensation

### II.2.2.1 définition

Une batterie de condensateurs est un groupe de condensateurs reliés les uns aux autres pour former un condensateur de plus grande capacité. Elle permet de compenser la puissance réactive qui est principalement utilisée pour alimenter les circuits magnétiques des machines électriques, correspondant à la puissance réactive des récepteurs [15].

La figure II.2 illustre un Condensateur constitué de 4 groupes en série, chaque groupe comportant 12 éléments en parallèle.



**Figure II .2** Condensateur constitué de 4 groupes en série, chaque groupe comportant 12 éléments en parallèle.

### II.2.2.2 Choix du type de compensation

La mesure de l'avantage économique de la compensation consiste à évaluer les économies qu'elle permet de réaliser par rapport aux frais d'installation des batteries de condensateurs.

Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- la puissance installée, le niveau de tension.
- le fractionnement en gradins.
- le mode de commande.
- le niveau de qualité de la protection [18].

La compensation peut se faire en basse tension ou en haute tension en utilisant des condensateurs. En basse tension la compensation est réalisée avec deux familles de produits [16].

#### II.2.2.2.1 Les batteries de condensateurs de type fixe

La batterie de condensateurs à une puissance constante. Ces batteries sont utilisées de préférence :

- aux bornes des récepteurs.
- sur les jeux de barres dont la fluctuation de charge est faible.

La mise en œuvre de ces batteries peut être :

- Manuelle : commande par disjoncteur ou par interrupteur
- Semi-automatique : commande par contacteur directe [16].

Ce type de batteries est généralement utilisé dans les cas :

- D'installation électrique à charge constante fonctionnant 24h/24h.
- De compensation réactive interne des transformateurs.
- De compensation individuelle de moteurs [18].

Figure II.3 illustre le Principe de la compensation fixe.

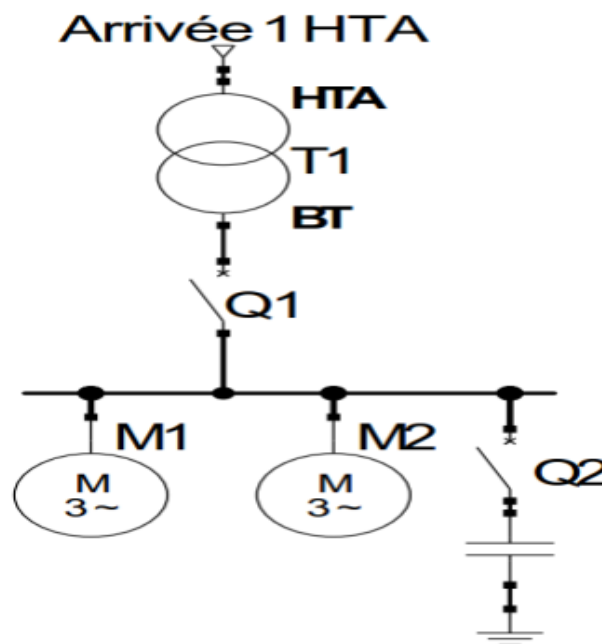


Figure II.3 Principe de la compensation fixe.

### II.2.2.2.2 Les batteries de condensateurs de type automatique en gradins

#### II.2.2.2.2.1 définition

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 de la puissance réactive de l'installation.

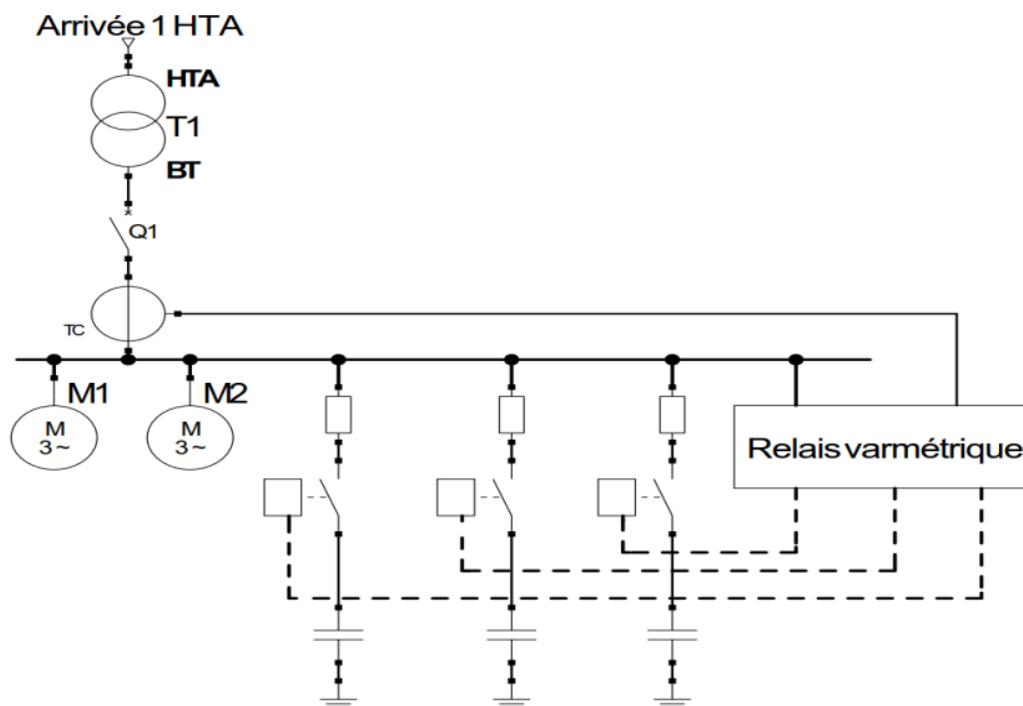
Ils permettent d'adapter automatiquement la puissance réactive fournie par les batteries de condensateurs. Un relais varmétrique détecte le  $\cos\varphi$  de l'installation et commande automatiquement l'enclenchement de gradins de condensateurs en fonction de la charge et du

$\cos\varphi$  désiré. Ce type d'équipements permettant d'éviter le renvoi d'énergie réactive sur le réseau et les surtensions dangereuses lors des marches à faible charge de l'installation.

Ces batteries sont également utilisées dans le cas :

- D'installation électrique à charge variable.
- D'installation d'une batterie dont la puissance est supérieure à 15 % de la puissance du transformateur [18].

Figure II.4 illustre le Principe de la compensation automatique.



**Figure II.4** Principe de la compensation automatique.

### II.2.2.2.2 Principe et intérêt de la compensation automatique

Une batterie de condensateurs à régulation automatique est divisée en plusieurs gradins. Chaque gradin est contrôlé par un contacteur électrique. L'activation du contacteur met le gradin en service en parallèle avec les autres gradins de l'installation, ce qui ajuste la capacité totale de la batterie de condensateurs en fonction des besoins en kvar. En revanche, la désactivation du contacteur met le gradin hors service.

Un relais varométrique mesure la valeur du facteur de puissance de l'installation et, en commandant l'ouverture ou la fermeture des contacteurs des gradins en fonction de la charge, règle la valeur du facteur de puissance de l'installation pour atteindre la valeur souhaitée.

La précision de la régulation dépend de la taille de chaque gradin. Le transformateur de courant TC associé au relais varométrique doit être installé sur l'une des phases de l'alimentation des charges à compenser.

Des batteries de condensateurs ont été développées, incluant un contacteur statique (à thyristors) à la place d'un contacteur électromécanique. La compensation statique est intéressante pour les installations comportant des équipements sujets à des variations rapides de charges et/ou sensibles aux surtensions transitoires.

Les avantages de la compensation automatique par contacteur statique sont les suivants :

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

En gérant la compensation au plus près des besoins de la charge, cette méthode permet d'éviter les risques de surtension pendant les périodes de faible charge [6].

### II.2.2.2.3 Le régulateur Var métrique

Les régulateurs de la puissance réactive sont capables de commander automatiquement la connexion et la déconnexion des condensateurs en fonction du facteur de puissance ( $\cos \phi$ ) du réseau électrique [11].

### II.2.2.3 Choix du branchement des condensateurs

Pour le branchement des batteries de condensateurs, on a le choix entre les montages triangle et étoile pour un même courant de ligne I [13].

#### II.2.2.3.1 Montage triangle

La puissance réactive  $Q_c$  fournie par une batterie de condensateurs de capacité C et soumise à une tension U est donnée par :

$$Q_{\Delta} = 3 \cdot C_{\Delta} \cdot \omega U^2 \quad (\text{II.3})$$

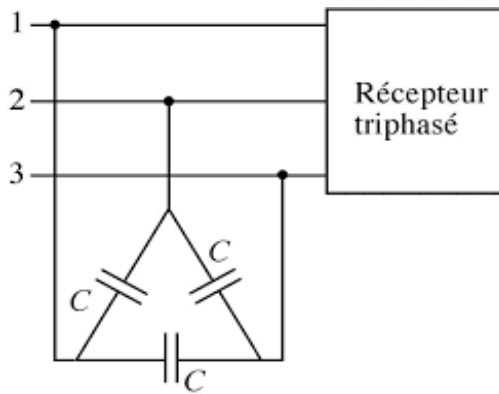


Figure II-5 Schéma de raccordement des batteries en triangle.

### II.2.2.3.2 Montage en étoile

La puissance réactive fournie est :

$$QY = CY \cdot \omega \cdot U^2 \quad (II.4)$$

Et Puisque :

$$QY = Q\Delta \quad (II.5)$$

Donc :

$$CY = 3 \cdot C\Delta \quad (II.6)$$

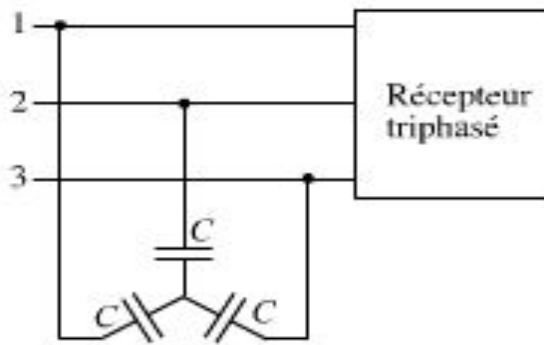


Figure II.6 Schéma de raccordement des batteries en étoile.

Pour une même puissance réactive en étoile, nous devons utiliser une capacité 3 fois plus grande qu'en triangle. Il est donc plus économique de brancher une batterie de condensateurs en triangle qu'en étoile [13].

### II.2.2.4 Différentes possibilités d'implantation des batteries condensateurs :

Les batteries de condensateurs (basse tension) sont installées chez les clients, principalement les consommateurs industriels, après le compteur électrique. Actuellement, les condensateurs (basse tension) utilisés sont des modèles secs qui se régénèrent automatiquement.

Trois types de compensation peuvent être identifiés, en fonction des différentes situations qui peuvent se produire sur le réseau de distribution de l'utilisateur [10].

#### II.2.2.4.1 La compensation globale

Consiste à installer une batterie de compensation en tête d'installation pour compenser l'ensemble des charges. Cette méthode est adaptée lorsque l'objectif principal est de supprimer les pénalités et de soulager le poste de transformation [18].

Les bénéfices de cette méthode de compensation sont les suivants :

- La batterie est généralement mieux exploitée.
- Les opérations de commutation de la batterie sont encore plus simples [10].

Les désavantages sont les suivants :

- Moins coûteuse que la compensation individuelle.
- Un entretien périodique doit être effectué [10].

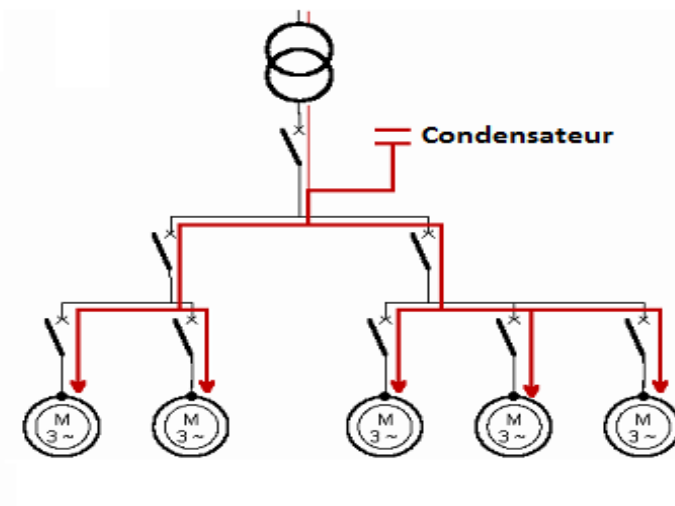


Figure II.7 Compensation globale.

### II.2.2.4.2 La compensation locale (par secteurs)

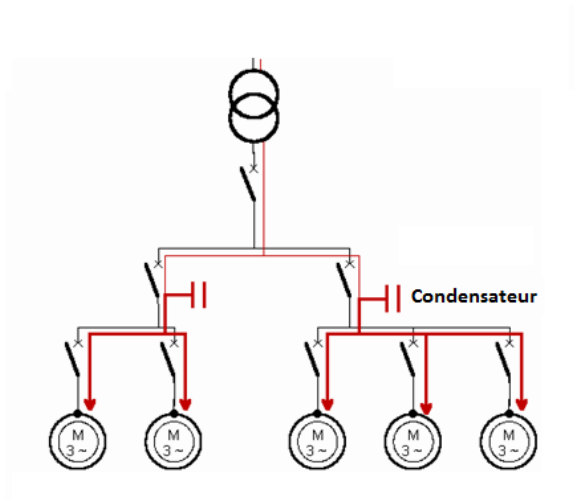
Elle est utilisée lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers avec des régimes de charge différents. Dans ce cas, la batterie est installée en tête du secteur d'installation à compenser [18].

Les avantages de ce type de compensation sont les suivants :

- Le coût d'investissement est réduit par rapport à la compensation individuelle

Les désavantages de ce système sont les suivants :

- Une protection des condensateurs de la batterie (fusibles, disjoncteur, etc.) doit être mise en place pour des raisons de sécurité, ce qui entraîne un coût supplémentaire pour la batterie.
- La batterie nécessite une maintenance périodique [10].



**Figure II.8** Compensation partielle.

### II.2.2.4.3 La compensation individuelle

Consiste à raccorder directement la batterie de condensateurs aux bornes de chaque récepteur inductif (comme un moteur) pour produire de la puissance réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Cette méthode est idéale lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite [18].

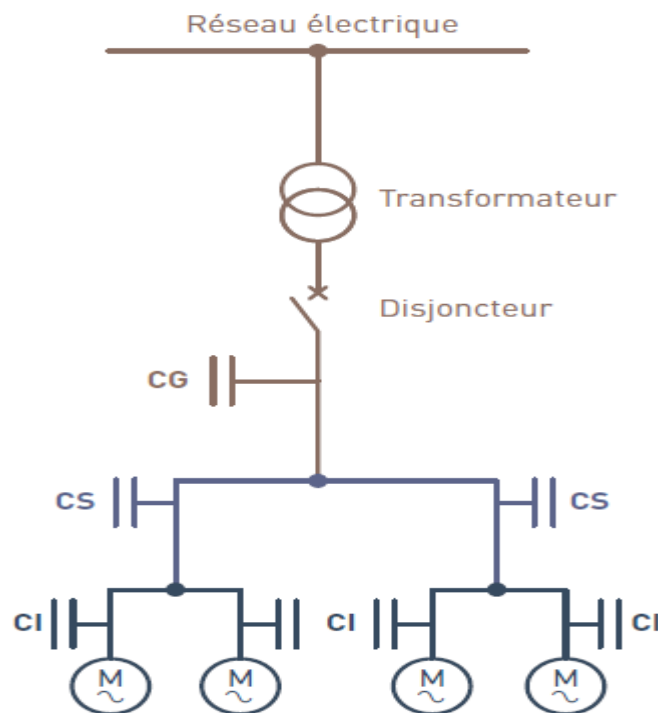
## Chapitre II. Moyens de compensation de la puissance réactive

Les bénéfices de ce type de compensation sont les suivants :

- La production d'énergie réactive se fait directement à l'endroit où elle est consommée.
- Dans de nombreux cas, il n'est pas nécessaire d'installer un interrupteur spécifique pour les condensateurs, ni des fusibles, ni des dispositifs de décharge spéciaux. Ceux déjà présents sur le récepteur peuvent être utilisés à cette fin [10].

Les désavantages de ce type de compensation sont les suivants :

- La compensation individuelle ne permet pas d'utiliser la puissance des condensateurs installés lorsque les récepteurs sont rarement alimentés.
- La compensation individuelle est relativement coûteuse pour les petits récepteurs [10].



**Figure II.9** Installation des batteries de condensateur.

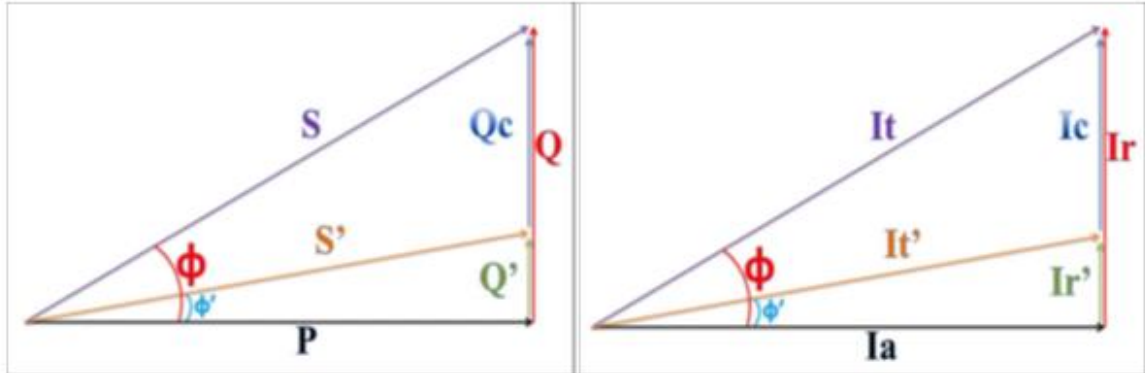
### II.2.2.5 Principe de compensation de la puissance réactive

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active  $P$ , la figure II-11 montre qu'il faut

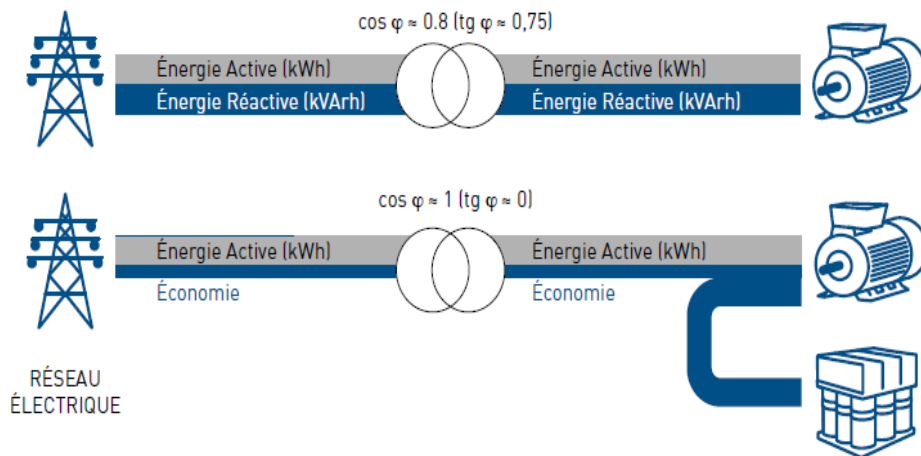
## Chapitre II. Moyens de compensation de la puissance réactive

fournir d'autant plus de puissance apparente  $S$ , et donc de courant, que la puissance réactive  $Q$  est importante [11] [14].

La figure II.10 et la figure II.11 illustre le principe de la compensation d'énergie réactive.



**Figure II.10** Principe de la compensation d'énergie réactive.



**Figure II.11** Principe de la compensation d'énergie réactive.

### II.2.2.6 Détermination de la puissance des condensateurs

La quantité de puissance réactive  $Q_c$  requise pour la compensation est calculée à partir de la puissance active mesurée  $P$  et de la tangente de l'angle de déphasage mesurée de l'installation [22].

$$Q_c = P \times (\text{tg mesurée} - \text{tg souhaitée}) = P \times K \quad (\text{II.7})$$

Le tableau II.1 indique le facteur  $K$  à appliquer à la puissance active  $P$  de l'installation pour calculer la puissance réactive  $Q_c$  de la batterie de condensateurs à installer. Il donne également la correspondance entre  $\tan$  et  $\cos \varphi$  [14] [22].

## Chapitre II. Moyens de compensation de la puissance réactive

Facteur de puissance initial		Puissance du condensateur à installer, en kVAr par kW de charge pour relever le facteur de puissance à $\cos \varphi_2$ :											
$\cos \varphi_1$	$\text{tg } \varphi_1$	$\cos \varphi_2$ :											
		0,90	0,91	0,92	0,93	0,94	0,95	0,96	0,97	0,98	0,99	1	
		$\text{tg } \varphi_2$ :											
0,40	2,29	1,805	1,832	1,861	1,895	1,924	1,959	1,998	2,037	2,086	2,146	2,288	
0,41	2,22	1,742	1,769	1,798	1,831	1,840	1,896	1,935	1,973	2,021	2,082	2,225	
0,42	2,16	1,681	1,709	1,738	1,771	1,800	1,836	1,874	1,913	1,961	2,002	2,164	
0,43	2,10	1,624	1,651	1,680	1,713	1,742	1,778	1,816	1,855	1,903	1,964	2,107	
0,44	2,04	1,568	1,595	1,614	1,647	1,677	1,712	1,751	1,790	1,837	1,890	2,041	
0,45	1,98	1,501	1,532	1,561	1,592	1,626	1,659	1,695	1,737	1,784	1,846	1,988	
0,46	1,93	1,446	1,473	1,502	1,533	1,567	1,600	1,636	1,677	1,725	1,786	1,929	
0,47	1,88	1,397	1,425	1,454	1,485	1,519	1,532	1,588	1,629	1,677	1,758	1,881	
0,48	1,83	1,343	1,370	1,400	1,430	1,464	1,467	1,534	1,575	1,623	1,684	1,826	
0,49	1,78	1,297	1,326	1,355	1,386	1,420	1,453	1,489	1,530	1,578	1,639	1,782	
0,50	1,73	1,248	1,276	1,303	1,337	1,369	1,403	1,441	1,481	1,529	1,590	1,732	
0,51	1,69	1,202	1,230	1,257	1,291	1,323	1,357	1,395	1,435	1,483	1,544	1,686	
0,52	1,64	1,160	1,188	1,215	1,249	1,281	1,315	1,353	1,393	1,441	1,502	1,644	
0,53	1,60	1,116	1,144	1,171	1,205	1,237	1,271	1,309	1,349	1,397	1,458	1,600	
0,54	1,56	1,075	1,103	1,130	1,164	1,196	1,230	1,268	1,308	1,356	1,417	1,559	
0,55	1,52	1,035	1,063	1,090	1,124	1,156	1,190	1,228	1,268	1,316	1,377	1,519	
0,56	1,48	0,996	1,024	1,051	1,085	1,117	1,151	1,189	1,229	1,277	1,338	1,480	
0,57	1,44	0,958	0,986	1,013	1,047	1,079	1,113	1,151	1,191	1,239	1,300	1,442	
0,58	1,40	0,921	0,949	0,976	1,010	1,042	1,073	1,114	1,154	1,202	1,263	1,405	
0,59	1,37	0,884	0,912	0,939	0,973	1,005	1,039	1,077	1,117	1,165	1,226	1,368	
0,60	1,33	0,849	0,878	0,905	0,939	0,971	1,005	1,043	1,083	1,131	1,192	1,334	
0,61	1,30	0,815	0,843	0,870	0,904	0,936	0,970	1,008	1,048	1,096	1,157	1,299	
0,62	1,27	0,781	0,809	0,836	0,870	0,902	0,936	0,974	1,014	1,062	1,123	1,265	
0,63	1,23	0,749	0,777	0,804	0,838	0,870	0,904	0,942	0,982	1,030	1,091	1,233	
0,64	1,20	0,716	0,744	0,771	0,805	0,837	0,871	0,909	0,949	0,997	1,058	1,200	
0,65	1,17	0,685	0,713	0,740	0,774	0,806	0,840	0,878	0,918	0,966	1,027	1,169	
0,66	1,14	0,654	0,682	0,709	0,743	0,775	0,809	0,847	0,887	0,935	0,996	1,138	
0,67	1,11	0,624	0,652	0,679	0,713	0,745	0,779	0,817	0,857	0,905	0,966	1,108	
0,68	1,08	0,595	0,623	0,650	0,684	0,716	0,750	0,788	0,828	0,876	0,937	1,079	
0,69	1,05	0,565	0,593	0,620	0,654	0,686	0,720	0,758	0,798	0,840	0,907	1,049	
0,70	1,02	0,538	0,564	0,591	0,625	0,657	0,691	0,729	0,769	0,811	0,878	1,020	
0,71	0,99	0,508	0,536	0,563	0,597	0,629	0,663	0,701	0,741	0,783	0,850	0,992	
0,72	0,96	0,479	0,507	0,534	0,568	0,600	0,634	0,672	0,721	0,754	0,821	0,963	
0,73	0,94	0,452	0,480	0,507	0,541	0,573	0,607	0,645	0,685	0,727	0,794	0,936	
0,74	0,91	0,425	0,453	0,480	0,514	0,546	0,580	0,618	0,658	0,700	0,767	0,909	
0,75	0,88	0,398	0,426	0,453	0,487	0,519	0,553	0,591	0,631	0,673	0,740	0,882	
0,76	0,86	0,371	0,399	0,426	0,460	0,492	0,526	0,564	0,604	0,652	0,713	0,855	
0,77	0,83	0,345	0,373	0,400	0,434	0,466	0,500	0,538	0,578	0,620	0,687	0,829	
0,78	0,80	0,319	0,347	0,374	0,408	0,440	0,474	0,512	0,552	0,594	0,661	0,803	
0,79	0,78	0,292	0,320	0,347	0,381	0,413	0,447	0,485	0,525	0,567	0,634	0,776	
0,80	0,75	0,266	0,294	0,321	0,355	0,387	0,421	0,459	0,499	0,541	0,608	0,750	
0,81	0,72	0,240	0,268	0,295	0,329	0,361	0,395	0,433	0,473	0,515	0,582	0,724	
0,82	0,70	0,214	0,242	0,269	0,303	0,335	0,369	0,407	0,447	0,489	0,556	0,698	
0,83	0,67	0,188	0,216	0,243	0,277	0,309	0,343	0,381	0,421	0,463	0,530	0,672	
0,84	0,65	0,162	0,190	0,217	0,251	0,283	0,317	0,355	0,395	0,437	0,504	0,645	
0,85	0,62	0,136	0,164	0,191	0,225	0,257	0,291	0,329	0,369	0,417	0,478	0,602	
0,86	0,59	0,109	0,140	0,167	0,198	0,230	0,264	0,301	0,343	0,390	0,450	0,593	
0,87	0,57	0,083	0,114	0,141	0,172	0,204	0,238	0,275	0,317	0,364	0,424	0,567	
0,88	0,54	0,054	0,085	0,112	0,143	0,175	0,209	0,246	0,288	0,335	0,395	0,538	
0,89	0,51	0,028	0,059	0,086	0,117	0,149	0,183	0,230	0,262	0,309	0,369	0,512	
0,90	0,48		0,031	0,058	0,089	0,121	0,155	0,192	0,234	0,281	0,341	0,484	

Le tableau II.1 le facteur K à appliquer à la puissance active P de l'installation.

### Exemple :

Puissance active de l'installation:  $P = 614 \text{ kW}$

Cos  $\varphi$  mesuré de l'installation :  $\text{Cos } \varphi = 0,68$  soit  $\text{Tan } \varphi = 1,08$

Cos  $\varphi$  désiré après compensation :  $\text{Cos } \varphi = 0,93$  soit  $\text{Tan } \varphi = 0,40$

Le tableau donne le coefficient :  $K = 0,684$

Puissance réactive à compenser :  $Q_c = 614 \times 0,684 = 420 \text{ kVAr}$

### II.2.2.7 Mise en œuvre des batteries de condensateurs

#### II.2.2.7.1 Protection interne des batteries de condensateurs

En général, un condensateur moyenne tension est constitué d'un boîtier métallique équipé de bornes, qui contient un ensemble de capacités élémentaires câblées en groupes série-parallèle. Cette configuration permet d'obtenir des éléments unitaires de forte puissance adaptés aux tensions de réseau élevées. Il existe deux types de condensateurs : ceux avec fusibles internes, qui sont monophasés, et ceux sans fusibles internes.

Chaque élément ou capacité élémentaire est équipé d'un fusible individuel. Si un élément venait à claquer, il serait automatiquement déconnecté et isolé grâce à ce fusible [18].

#### II.2.2.7.2 Protection externe des batteries de condensateurs

Les condensateurs doivent être associés à des dispositifs de protection contre les surcharges (fusibles, ou disjoncteur), afin de limiter les conséquences de surintensités. Ceci peut se produire en cas de court-circuit ou surintensités ou de forte distorsion harmonique [18].

#### II.2.2.7.3 Compensation de la puissance réactive en présence d'harmoniques

Les condensateurs sont particulièrement vulnérables à ces perturbations car leur impédance diminue proportionnellement au rang des harmoniques présents dans le réseau.

Il peut arriver dans certaines situations que des phénomènes de résonance se produisent, ce qui peut causer une importante distorsion de tension et entraîner une surcharge des condensateurs [18].

Selon la puissance des générateurs d'harmoniques présents, il est nécessaire de choisir différents types de condensateurs :

$Sh / Sn < 15 \%$  : type standard (tension 400 V).

$Sh / Sn = 15 \text{ à } 25 \%$  : type H (tension renforcée 440 V ou 500 V).

$Sh / Sn > 25 \%$  : type SAH (tension renforcée + self anti-harmonique).

Sh : puissance apparente (kVA) des récepteurs produisant des harmoniques (moteurs à vitesse variable, électronique de puissance, etc.)

Sn : puissance apparente du transformateur de l'installation, en kVA.

Quatre “types de condensateurs” sont proposés en fonction de la valeur du degré de pollution harmonique ( $Sh / S_n$ ) :

- Type Standard : tension 400 V.
- Type H : tension renforcée 440 V ou 500 V.
- Type SAH : tension renforcée plus une self anti harmonique [22].

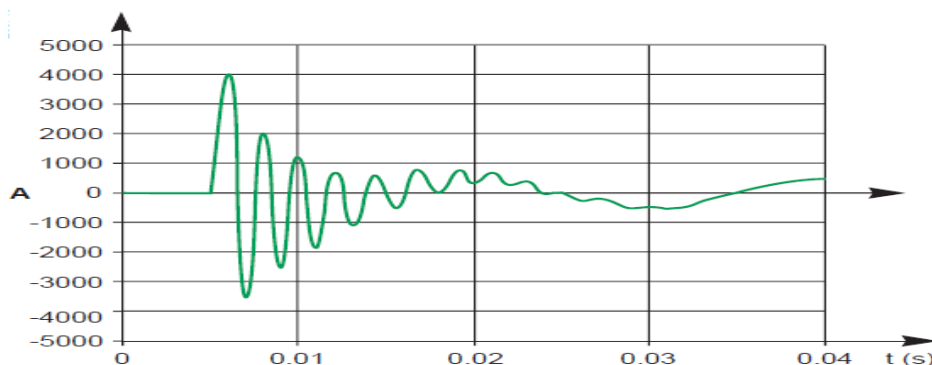
Quand les générateurs d'harmoniques possèdent une puissance considérable, il est généralement indispensable de prendre des mesures pour gérer ces harmoniques. Le dispositif approprié pour cela est un filtre d'harmoniques, qui remplit simultanément les rôles de compensation de la puissance réactive et de filtrage des harmoniques [18].

### II.2.2.7.4 Phénomènes transitoires et perturbations

#### II.2.2.7.4.1 Régime transitoire d'enclenchement

Lorsqu'une batterie de condensateurs est mise en marche, cela entraîne un régime transitoire en courant et en tension. Cela provoque l'apparition d'une surintensité et d'une surtension, dont l'amplitude et la fréquence dépendent des caractéristiques du réseau en amont et du nombre de batteries de condensateurs [18].

La figure II.12 illustre le courant d'enclenchement.



**Figure II.12** Courant d'enclenchement.

La figure II.13 illustre la surtension de réseau au moment d'enclenchement.

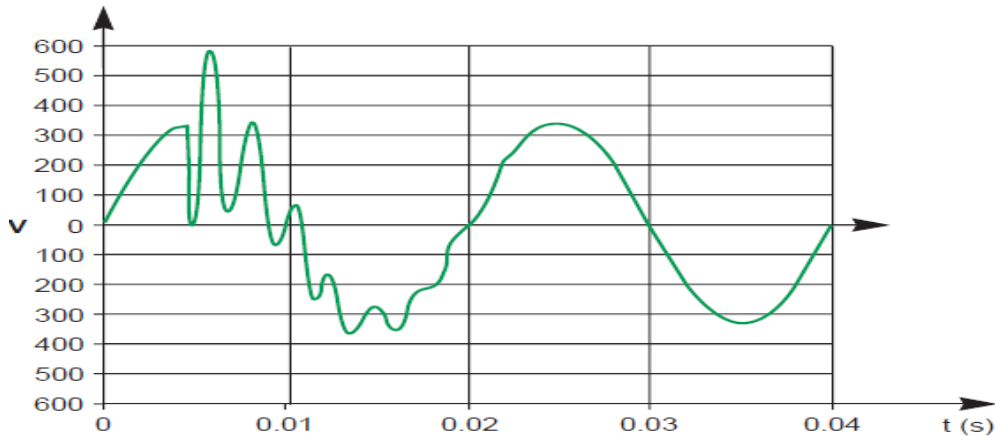


Figure II.13 Tension réseau à l'enclenchement.

#### II.2.2.7.4.2 Résonance

Le phénomène de résonance est la principale cause des distorsions harmoniques les plus importantes dans les réseaux de distribution, et est également la cause principale des surcharges des condensateurs de compensation.

L'installation de batteries de condensateurs dans une installation électrique peut conduire à l'amplification des harmoniques existantes, c'est-à-dire à une augmentation des taux de distorsion harmonique en tension et en courant. Cette amplification est due à une résonance électrique entre la capacité de la batterie et les inductances des lignes et de la source [18].

La figure II.14 décrit le type "résonance parallèle"

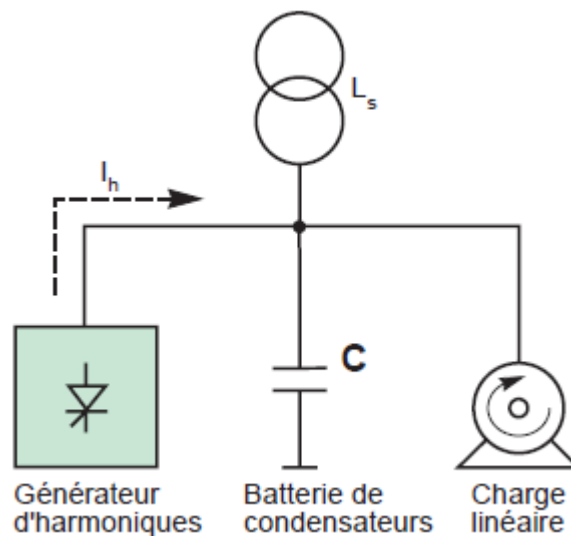
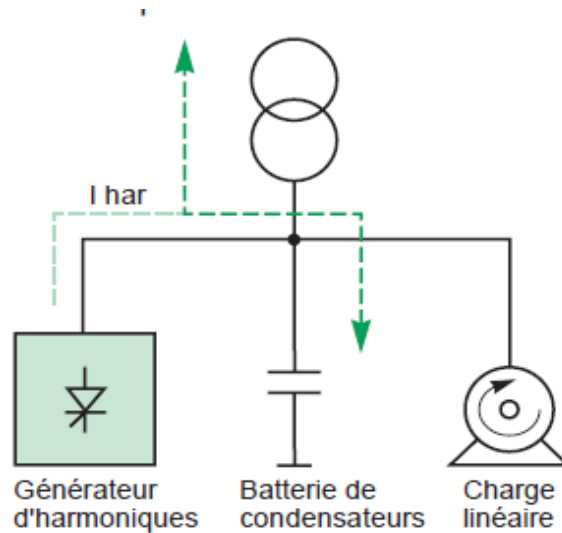


Figure II.14 Schéma simplifié d'une installation.

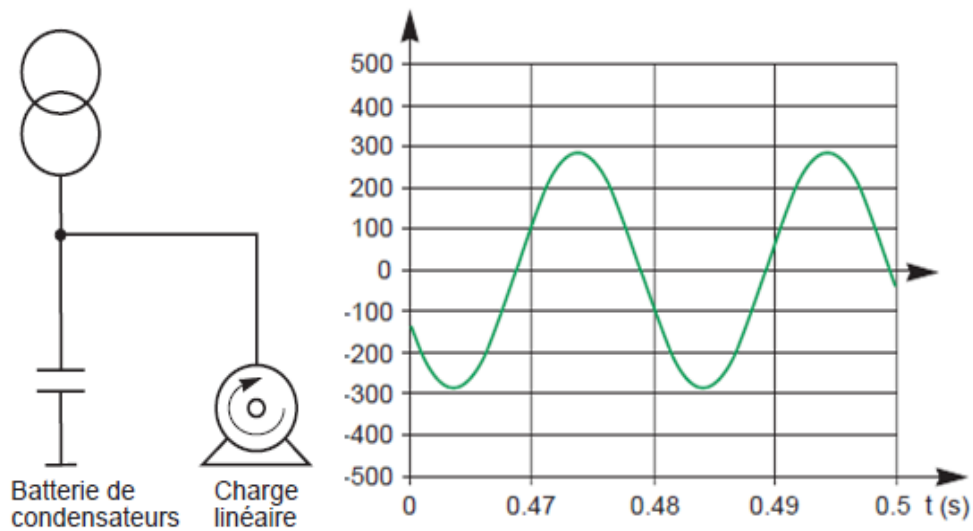
La figure II.15 montre les éléments du circuit affectés par les courants harmoniques :



**Figure II.15** Circulation des courants harmoniques.

Le réseau d'alimentation ainsi que les condensateurs de compensation sont soumis à des courants harmoniques importants et donc à des risques de surcharge [18].

La Figure II.16 représente le Courant dans les condensateurs, sans injection d'harmoniques :



**Figure II.16** Compensation sans injection d'harmoniques.

La figure II.17 représente le Courant dans les condensateurs, avec injection d'harmoniques :

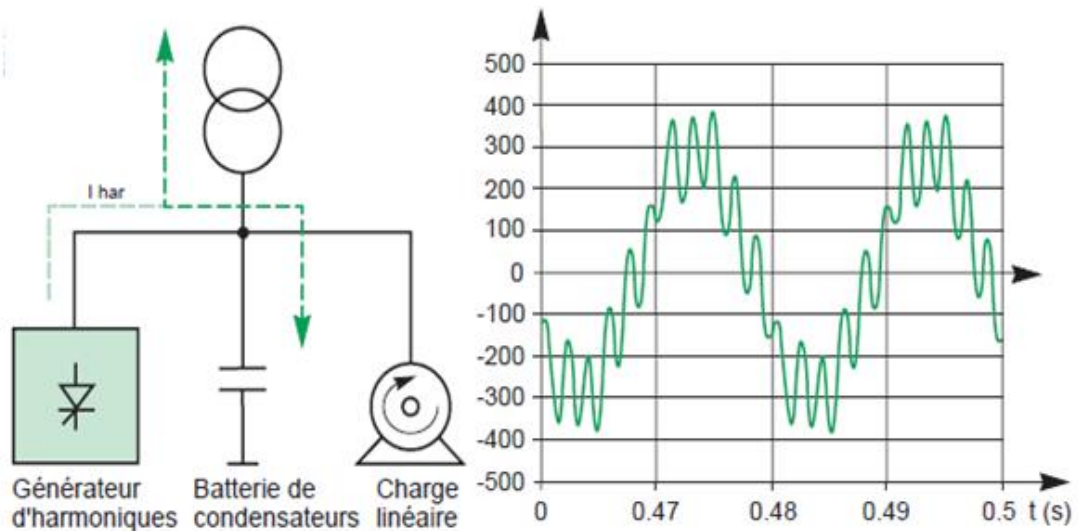


Figure II.17 Compensation avec injection d'harmoniques.

### II.2.2.7.4.3 Auto excitation

Il est important de prendre des mesures pour prévenir les risques d'auto-excitation lors de la compensation du moteur, car cela peut causer des surtensions. La capacité de la batterie de condensateurs doit être inférieure à la puissance requise pour l'auto-excitation du moteur. Si ce n'est pas le cas, il est nécessaire d'incorporer une fonction de coupure dans l'appareillage de commande des condensateurs pour éviter cette auto-excitation [11].

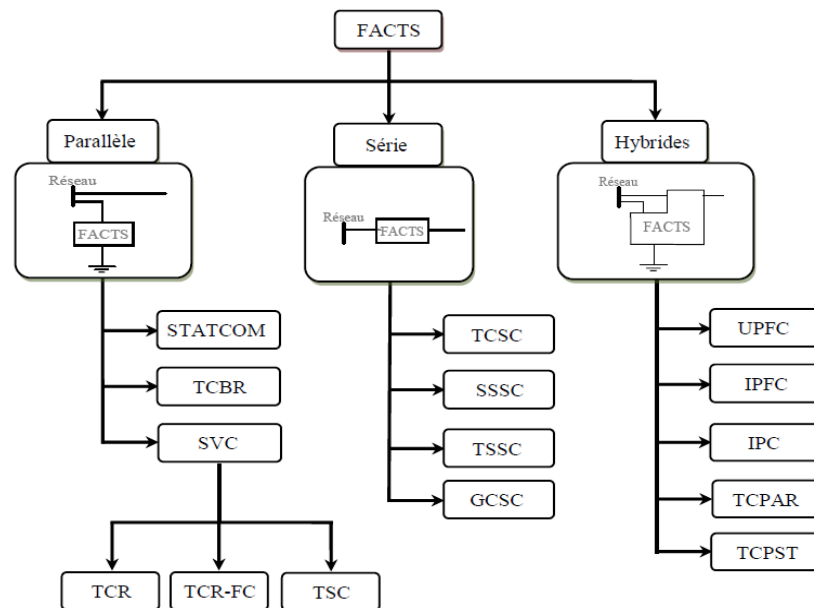
## II.2.3. Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System)

### II.2.3.1 Technique et type des dispositifs FACTS

FACTS, ou « Flexible Alternative Currents Transmission Systems », se traduit en français par « Systèmes flexibles de transmission à courant alternatif ». Il s'agit d'un projet lancé en 1988 par l'EPRI (Electric Power Research Institute), un consortium dédié à la recherche dans le domaine de l'exploitation et du développement de l'énergie, regroupant plusieurs entreprises.

Ces systèmes comprennent des contrôleurs basés sur l'électronique de puissance ainsi que d'autres contrôleurs statiques visant à améliorer la contrôlabilité des réseaux et la capacité de transmission des lignes. La technologie FACTS ne se limite pas à un seul appareil, mais regroupe plutôt une série d'appareils intégrés dans le réseau afin de mieux contrôler le flux de puissance et d'augmenter la capacité de transit de leurs lignes.

Grâce à une action de contrôle rapide sur l'ensemble des paramètres du réseau tels que la tension, l'impédance, le déphasage, etc., ces systèmes permettent d'améliorer les marges de stabilité et d'assurer une meilleure flexibilité dans le transfert d'énergie [17].



**Figure II.18** Schéma simplifié de Classification des dispositifs FACTS.

### II.2.3.2 Types de dispositifs FACTS

Il existe plusieurs types de dispositifs FACTS, chacun ayant ses propres caractéristiques et avantages. En voici quelques exemples :

#### II.2.3.2.1 FACTS en Parallèle

##### II.2.3.2.1.1 STATCOM (Static Synchronous Compensator)

Le STATCOM (ou SSC) est compensateur de la puissance réactive dans un système AC connecté en parallèle. Il est capable de générer ou d'absorber de la puissance réactive. Le fonctionnement du STATCOM est basé sur un processus simple. Il utilise une source de tension continue (condensateur) et un onduleur pour produire des tensions triphasées en phase avec celles présentes sur une ligne de transport d'énergie électrique. Le contrôle de l'échange d'énergie entre la ligne et le STATCOM est assuré par l'amplitude de la tension de sortie du compensateur, qui est générée par l'onduleur [13].

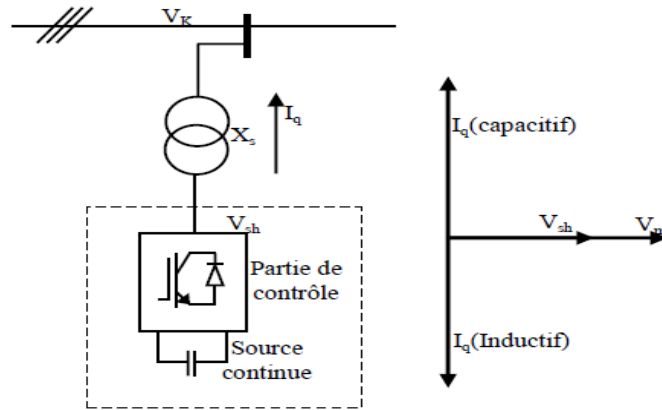


Figure II.19 Schéma de principe d'un STATCOM.

### II.2.3.2.1.2 Le SVC (Compensateur Statique de Puissance Réactive)

Est un dispositif électronique de compensation de puissance réactive qui utilise des thyristors pour contrôler la réactance et la capacité.

Le principe de fonctionnement du SVC consiste à associer une réactance commandée par thyristors (TCR) et un condensateur commuté par thyristors (TSC).

L'ensemble est connecté à un point d'injection de puissance réactive sur le réseau électrique via un transformateur [13] [21].

#### a. TSC (Thyristor Switched Capacitor)

Il est constitué d'un condensateur commandé par thyristor fonctionnant en plein onde.

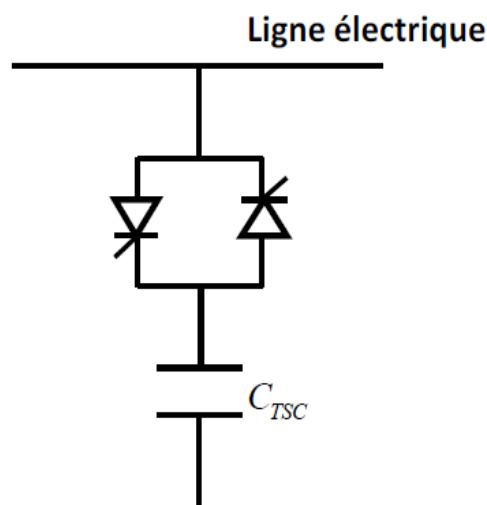
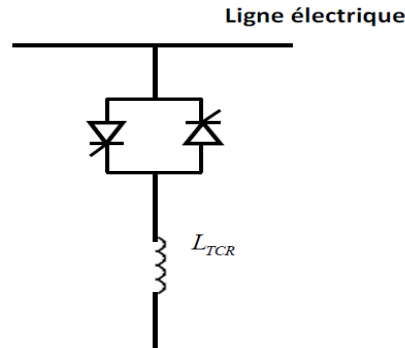


Figure II.20 Thyristor Switched Capacitor (TSC).

**b. TCR (Thyristor Controlled Reactor)**

Il est constitué d'une réactance en série avec un gradateur où la valeur de cette réactance est modifiée selon l'angle d'amorçage des thyristors [21].

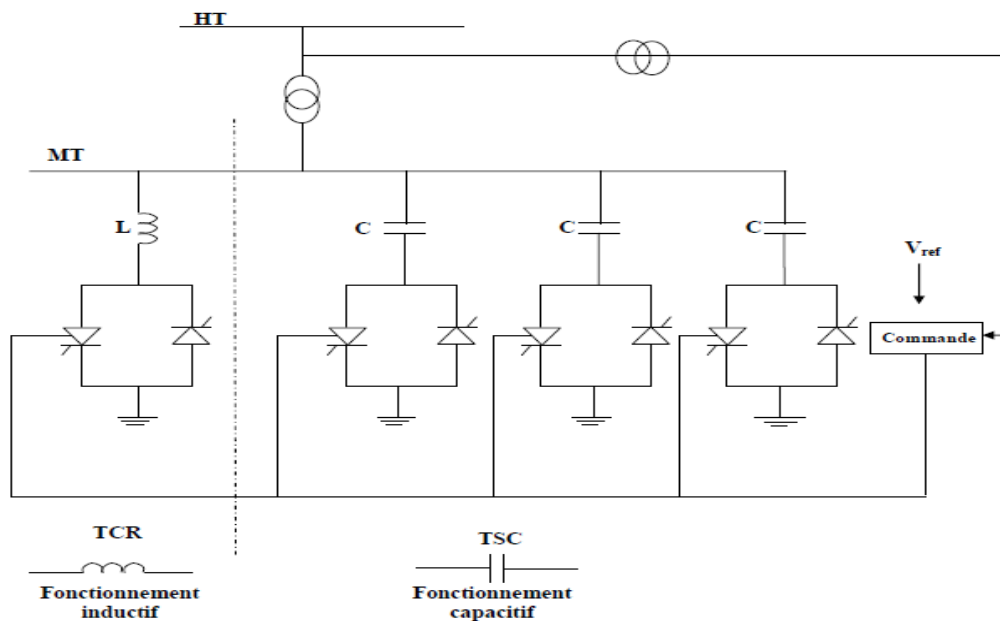


**Figure II.21** Thyristor Controlled Reactor (TCR).

La réactance commandée par thyristors (TCR) permet de contrôler la puissance réactive absorbée par le SVC.

Le condensateur commuté par thyristors (TSC) permet de fournir rapidement de la puissance réactive en fonction des besoins du réseau électrique.

Le SVC est capable de répondre rapidement aux variations de charge et de maintenir la tension du réseau électrique dans des limites acceptables. Il est utilisé pour corriger les problèmes de tension et de stabilité du réseau [13].



**Figure II.22** Schéma conventionnel d'un SVC.

### II.2.3.2.2 FACTS en Série

#### II.2.3.2.2.1 TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Les configurations TCSC consistent en des inductances contrôlées par thyristors, qui sont connectées en parallèle avec des sections d'un banc de condensateurs. Cette combinaison permet une régulation en douceur sur une large plage de la réactance (réactance variable) [13].

La figure II.23 illustre Schéma de base d'un TCSC.

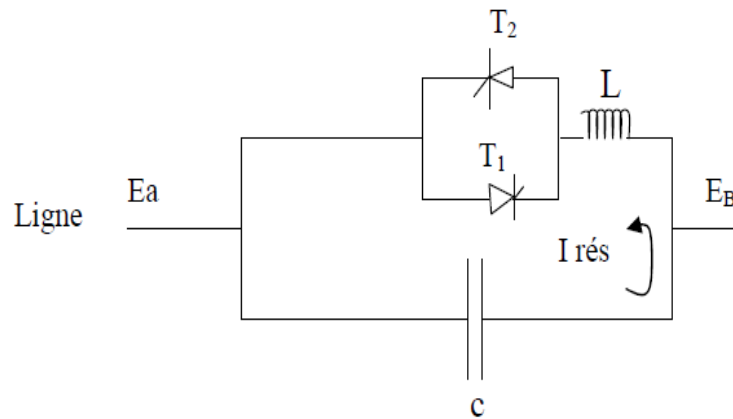


Figure II.23 Schéma de base d'un TCSC.

#### II.2.3.2.2.2 Le SSSC (Compensateur Synchrone Statique en Série)

Est composé d'un convertisseur statique alimenté par une source d'énergie continu, qui est connecté en série avec la ligne de transmission via un transformateur de tension.

Le SSSC est utilisé pour contrôler la réactance de la ligne [21].

La figure II.24 illustre un Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

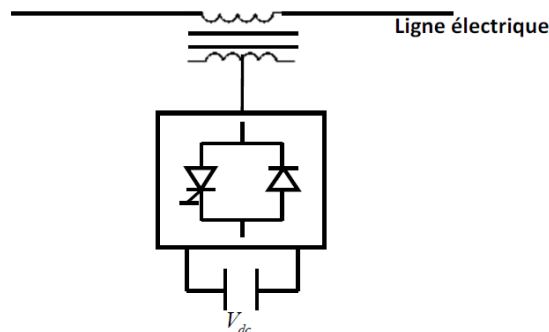


Figure II.24 Static Synchronous Series Compensator (SSSC).

### II.2.3.2.3 Hybrids

#### II.2.3.2.3.1 UPFC (Unified Power Flow Controller)

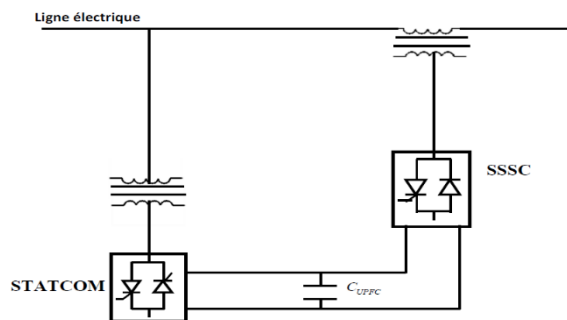
Il est composé de deux FACTS (SSSC, STATCOM) ayant en commun un condensateur de stockage à leurs côtés continus.

Le contrôleur de puissance unifié UPFC est constitué de deux onduleurs interconnectés par une liaison continue.

La figure II.25 représente un UPFC.

Le premier onduleur est connecté en parallèle sur le réseau et le second insère une tension en série sur la ligne [21].

Le grand avantage de l'UPFC est bien sûr la flexibilité qui permet de contrôler tension, angle de transmission et impédance de ligne dans un seul appareil [17].



**Figure II.25** Unified Power Flow Controller (UPFC).

### II.2.3.3 Avantages et Inconvénient des FACTS

Les contrôleurs FACTS offrent plusieurs avantages au système énergétique, notamment :

- Contrôle du flux de puissance, qui constitue la principale fonction des dispositifs FACTS. Ce contrôle est effectué conformément à un ensemble de spécifications prédéfinies afin de répondre aux besoins des consommateurs.
- Amélioration de la stabilité dynamique et transitoire du système.
- Contrôle de la puissance réactive pour augmenter la puissance active transportée et réduire les pertes.

Outre les avantages techniques offerts par les équipements FACTS, il est également essentiel de prendre en compte des critères liés aux coûts lors de la décision d'installer un dispositif. Du point de vue économique, une norme couramment utilisée pour évaluer les

avantages des équipements FACTS est que l'augmentation des revenus générée doit dépasser les coûts d'exploitation, de maintenance et d'amortissement de l'installation [17].

### II.3 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a examiné différents moyens de compensation de la puissance réactive. Il est clair que la puissance réactive est un aspect essentiel de la gestion de l'énergie électrique, car elle contribue à l'efficacité du système et à la qualité de l'alimentation électrique. Les méthodes de compensation de la puissance réactive, telles que l'utilisation de condensateurs, les machines synchrones et de dispositifs électroniques avancés tels que les STATCOM et les SVC, offrent des solutions efficaces pour atténuer les problèmes de puissance réactive. Chacune de ces méthodes présente des avantages et des inconvénients, et le choix de la méthode appropriée dépend des caractéristiques du système et des besoins spécifiques de l'application. Il est essentiel de comprendre les concepts de puissance réactive et les différentes méthodes de compensation afin de garantir un fonctionnement stable et efficace du système électrique. La prise en compte de la compensation de la puissance réactive dans la conception et la gestion des réseaux électriques est donc cruciale pour améliorer l'efficacité énergétique, réduire les pertes et maintenir une alimentation électrique de haute qualité.

## Chapitre III

# Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie

### III.1 Introduction

Dans le troisième chapitre, nous traitons la consommation de la puissance électrique dans les laboratoires de TP de la faculté des hydrocarbures et de la chimie donc premièrement nous faisons une description de l'installation concernée (Situation, Schéma électrique, description des appareils, Faire le bilan des puissances actives et réactives).

A partir les calculs des puissances nous déduisons le facteur de puissance actuel, Nous choisissons le mode de compensation et les moyens de compensation.

Nous avons écrit un programme qui automatise la procédure de calcul des puissances et le facteur de puissance. Nous avons simulé le courant d'enclenchement de condensateur.

### III.2 Présentation générale de la faculté

En 1968 l'Institut national des hydrocarbures et de la chimie (INH) est devenu, sous tutelle pédagogique du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique. Par décret n°98-395 du 2 décembre 1998 la Faculté des hydrocarbures et de la chimie a remplacé l'INH qui fait partie depuis de l'Université M'Hamed-Bougara de Boumerdes. La faculté est spécialisé dans l'étude des hydrocarbures et dans le domaine sciences et technologie. La figure III.1 illustre la faculté des hydrocarbures et de la chimie.



**Figure III.1** la faculté des hydrocarbures et de la chimie.

### III.3 Description

Tout d'abord, le FHC est divisé en des départements. Dans chaque département il y a des laboratoires, mais nous allons compenser la puissance réactive seulement dans les laboratoires du département de l'automatisation et Electrification des procédés, il y a 3 zones dans chaque zone, nous avons différents types de charges, tels que des moteurs et de l'éclairage, des prises. Le tableau III.1 décrit Les charges de chaque zone (le réseau de l'installation est (220/380V).

Notre mission est de compenser la puissance réactive dans les laboratoires. Les travaux pratiques de la formation en électricité industrielle sont réalisés en utilisant des moteurs. Ces moteurs fonctionnent presque à vide, ce qui entraîne une baisse du facteur de puissance, cela entraîne une surcharge sur notre fournisseur d'électricité (SONELGAZ).

Les valeurs indiquées dans le tableau précédent sont des valeurs nominales. Comme mentionné auparavant, lors des manipulations, les moteurs fonctionnent généralement sans charge ou à vide la plupart du temps. Les facteurs de puissance peuvent varier entre 0,17 et 0,55, avec une moyenne de 0,36. Maintenant, le tableau suivant est rempli avec le calcul des différentes puissances de chaque charge, en tenant compte d'un facteur de puissance des moteurs égal à 0,36( $\tan=2.6$ ) et d'un rendement de  $\eta=0,843$ .

## Chapitre III Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie

	Récepteurs	Nbre	Tension En (v)	Puissance <b>Pn</b> En (kw)	Cos $\varphi$	Courant en (A)
Zone1	Moteur AS Rot Bobiné	1	220	3.3	0.8	16.5
	Moteur AS cage	1	220	2.8	0.84	10.5
	Moteur cage	1	220	2.8	0.88	10.0
	Moteur AS	1	220	1.5	0.8	6.4
	Moteur AS	1	380	1.1	0.72	3
	Moteurs AS	2	380	1	0.83	2.5
	Moteur AS	1	220	1.7	0.8	10
	Eclairage	12	220	0.120	led	
	Prise de courant					
	Chauffage	1	220	1	1	
	Zone2	Moteur	1	230	3	0.79
moteurs		2	230	0.25	0.71	1.7
moteurs		2	380	0.12	0.76	0.4
Prise de courant		6	220		1	20
Prise de courant		12	220		1	16
Eclairage		6	220	0.120	1	
Chauffage		1	220	2	1	
Zone 3	moteur	1	220	0.6	0.76	2.8
	moteur	1	380	1.7	0.76	4.5

**Tableau III.1** Description de différentes charges dans chaque zone.

### III.4 Schéma électrique de l'installation

Le schéma électrique suivant dans la figure III.3 est un schéma unifilaire simplifié de notre installation. Ce schéma est réalisé à partir le logiciel Qelectro Tech.

QElectro Tech est un logiciel Open Source destiné à réaliser des schémas électriques. Utilisable pour de simples schémas indépendants. Le logiciel s'utilise essentiellement par glisser/déposer et dispose de nombreux outils servant aux liaisons, au paramétrage des éléments ou encore à la purge des éléments inutiles [26]. La figure III.2 illustre Interface graphique du QElectroTech.

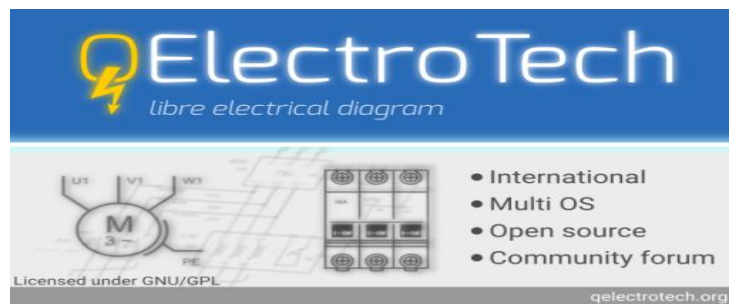


Figure III.2 Interface graphique du QElectroTech.

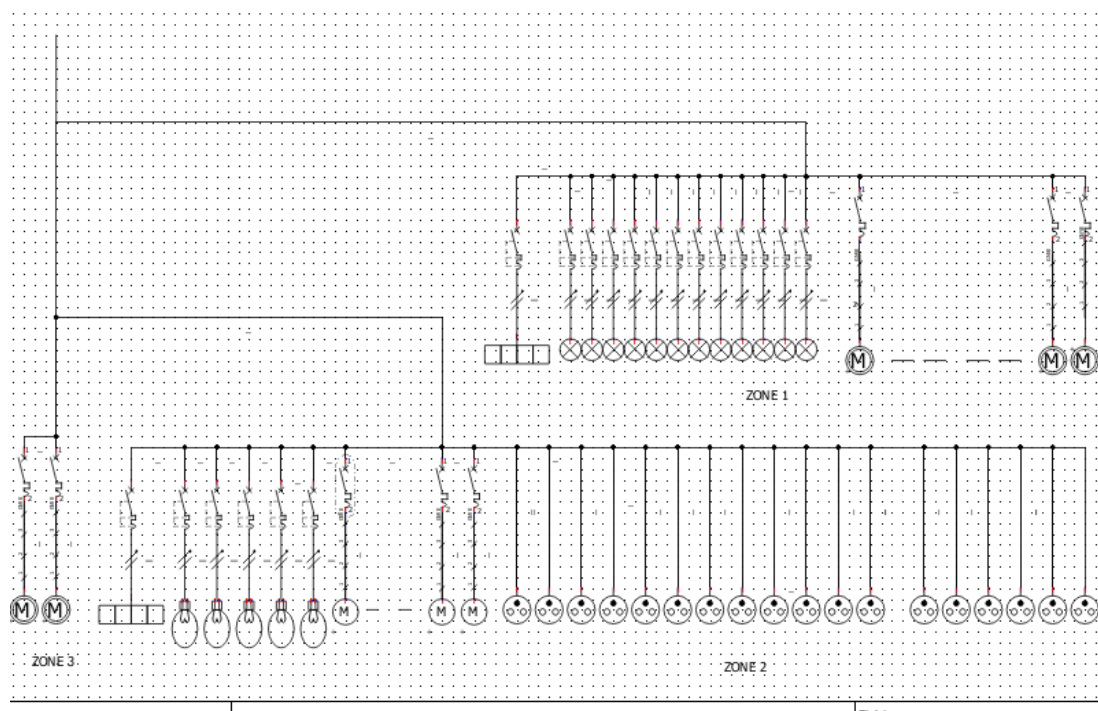


Figure III.3 Le schéma électrique unifilaire.

### III.5 Détermination des puissances

#### III.5.1 Puissance installée

La puissance installée est la somme des puissances nominales de tous les récepteurs. L'indication de la puissance nominale et le facteur de puissance sont indiqués sur tous les appareils électriques [23].

#### III.5.2 Puissance utilisée

Les récepteurs ne fonctionnent jamais tous en même temps ni à pleine charge. On utilise alors les facteurs de simultanéité et d'utilisation pour estimer la puissance apparente réellement absorbée par les récepteurs [23].

Pour les calculs en utilise ces formules :

Calcul des puissances en tenant compte du facteur d'utilisation  $K_u$  :

$$P_u = (P_n / \eta) K_u \quad (\text{III.1})$$

$$Q_u = P_u * \tan \varphi \quad (\text{III.2})$$

$$S_u = \sqrt{P_u^2 + Q_u^2} \quad (\text{III.3})$$

Bilan des puissances en tenant compte du facteur de simultanéité  $K_s$  :

$$P_t = \Sigma (P_u * K_s) \quad (\text{III.4})$$

$$Q_t = \Sigma (Q_u * K_s) \quad (\text{III.5})$$

$$S_t = \sqrt{P_t^2 + Q_t^2} \quad (\text{III.6})$$

#### III.5.3 Description du Program que nous avons créé pour simplifier nos calculs

##### III.5.3.1 Visual Studio Code

Visual Studio Code est un éditeur de code extensible développé par Microsoft pour Windows, Linux et macOS. Il offre des fonctionnalités telles que le débogage, la coloration syntaxique, l'auto-complétion du code intelligente (IntelliSense), les extraits de code, la refactorisation du code et l'intégration avec Git. Les utilisateurs

peuvent personnaliser le thème, les raccourcis clavier, les préférences, et installer des extensions pour ajouter des fonctionnalités supplémentaires.

Le code source de Visual Studio Code provient du projet open source de Microsoft appelé VS Code, publié sous la licence MIT permissive. Cependant, les binaires compilés sont distribués en tant que logiciel gratuit propriétaire, ce qui signifie qu'ils sont gratuits pour une utilisation, mais la propriété de Microsoft.

Dans un sondage réalisé en 2021 par Stack Overflow auprès des développeurs, Visual Studio Code a été classé comme l'outil d'environnement de développement le plus populaire, avec 71,06 % des 82 277 répondants déclarant l'utiliser [25].

### III.5.3.2 Le langage de la programmation « Python »

Python est un langage de programmation qui peut être utilisé dans de nombreux contextes et s'adapter à tout type d'utilisation grâce à des bibliothèques spécialisées. Cependant, il est particulièrement utilisé comme langage de script pour automatiser des tâches simples mais fastidieuses, telles qu'un script qui récupère des informations météorologiques sur Internet ou s'intègre à des logiciels de conception assistée par ordinateur pour automatiser des actions répétitives (voir la section Adoption). Il est également utilisé comme langage de prototypage lorsqu'une application fonctionnelle est nécessaire avant de l'optimiser avec un langage de plus bas niveau. Python est particulièrement répandu dans le monde scientifique et dispose de nombreuses bibliothèques optimisées pour le calcul numérique [26].

### III.5.3.3 Tkinter

Tkinter (de l'anglais Tool kit interface) est la bibliothèque graphique libre d'origine pour le langage Python, permettant la création d'interfaces graphiques. Elle vient d'une adaptation de la bibliothèque graphique Tk écrite pour Tcl [27]. La figure III.4 illustre une liste des widgets utilisables dans Tkinter (pour python 3).

Nom	Code
Frame	<pre> 1 from tkinter import * 2 app=Tk() 3 frame=Frame(app) 4 frame.pack() 5 app.mainloop() </pre>
Bouton	<pre> 1 from tkinter import * 2 app=Tk() 3 Bouton=Button(app,text="Bouton") 4 Bouton.pack() 5 app.mainloop() </pre>
Entrée de texte	<pre> 1 from tkinter import * 2 app=Tk() 3 Entree_de_texte=Entry(app,width=50) 4 Entree_de_texte.pack() 5 app.mainloop() </pre>
Zone de texte	<pre> 1 from tkinter import* 2 app=Tk() 3 Zone_de_texte=Text(app,width=50,height=50) 4 Zone_de_texte.pack() 5 app.mainloop() </pre>

**Figure III.4** une liste des widgets utilisable dans Tkinter (pour python 3).

### III.5.3.4 L'interface utilisateur du Programme

La figure III.5 représente L'interface utilisateur du Programme.

The screenshot displays a software interface for calculating power compensation. It is divided into three main input sections: 'Moteurs' (Motors), 'Eclairage' (Lighting), and 'Chauffages' (Heating). Each section contains fields for nominal power (W), voltage (V), current (A), and power factor (cosφ), along with a 'Nombre dans l'installation' (Number in installation) field and an 'Ajouter' (Add) button. Below these sections, there are fields for 'Facteur de simultanéité(zone)(%)' (Zone diversity factor) and 'Facteur de simultanéité (installation)' (Installation diversity factor), with 'Zone' and 'Entré' buttons. The bottom section shows calculated results: 'Puisance total' (Total power), 'La puissance active total (W)' (Total active power), 'La puissance réactive total (VAr)' (Total reactive power), 'cosφ Total' (Total power factor), and 'cosφ désiré' (Desired power factor). A 'Calculer' (Calculate) button is positioned between the desired power factor and the reactive power (Qc) field. A 'Nouvel installation' (New installation) button is located at the bottom right.

Figure III.5 L'interface utilisateur du Program.

### III.5.3.5 explication de chaque section et fonction du Program

➤ Section du moteur

Dans cette section, nous allons saisir les informations des moteurs qui se trouvent dans cette zone.

Tension (V) est la tension composée du réseau.

Courant (I) est le courant électrique absorbé par le moteur (courant de la ligne).

## Chapitre III Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie

$\cos\phi$  : facteur de la puissance du moteur. La figure III.6 représente la section du moteur.

ChargInfo  
Moteurs

V (V)=

I (A)=

cosφ=

Nombre dans l'installaion:

Facteur d'utilisation (%):

Facteur de simultanéité (%):

Ajouter

Figure III.6 Section du moteur.

### ➤ Section d'éclairage

Dans cette section, nous allons remplir les informations concernant la source lumineuse. Si la source lumineuse a un facteur de puissance de 1, nous cocherons simplement le bouton en haut et entrerons la puissance active consommée ainsi que le nombre dans cette zone. La figure III.7 représente le section d'éclairage.

Eclairage

cosφ=1

Puissance nominal (W):

V (V)=

I (A)=

cosφ=

Nombre dans l'installation:

Ajouter

Figure III.7 Section d'éclairage.

### ➤ Section des chauffages :

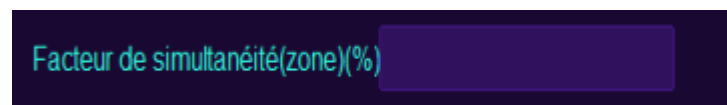
Dans cette section, nous saisissons les informations relatives aux chauffages, à savoir la puissance active consommée et le nombre. La figure III.8 représente le section des chauffages.



**Figure III.8** Section des chauffages.

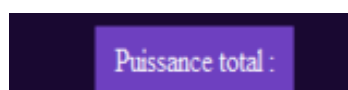
Pour chaque section, nous avons le bouton "Ajouter" pour ajouter les informations de charge à la zone sur laquelle nous travaillons.

Une fois que nous avons terminé d'entrer les informations sur les charges, nous devons saisir le facteur de simultanéité pour cette zone. La figure III.9 représente le facteur de simultanéité pour cette zone.



**Figure III.9** facteur de simultanéité pour cette zone.

Le bouton "Puissance totale" calculera la puissance active et réactive totale pour cette zone. La figure III.10 représente le bouton puissance totale.



**Figure III.10** Puissance totale.

Après avoir cliqué sur le bouton "Zone", cela signifie que nous avons terminé de travailler avec la première zone et que nous pouvons commencer à saisir les informations de charge pour les zones suivantes.

Après avoir effectué le même travail pour les autres zones, nous entrons maintenant le facteur de simultanéité pour l'installation, et appuyez sur "Entrée" pour

## Chapitre III Compensation de la puissance réactive dans la faculté des hydrocarbures et de la chimie

calculer le facteur de puissance correspondant à l'installation. La figure III.11 représente le facteur de simultanéité pour l'installation.

**Figure III.11** facteur de simultanéité pour l'installation.

La figure III.12 représente le facteur de puissance.

**Figure III.12** Le facteur de puissance.

Maintenant, nous saisissons le facteur de puissance souhaité, puis appuyons sur le bouton "Calculer" pour calculer la puissance réactive que nous devons compenser pour obtenir le facteur de puissance désiré. La figure III.13 représente la puissance réactive fournie.

**Figure III.13** puissance réactive fournie.

Le dernier bouton "Nouvelle Installation" permet de commencer à travailler sur une nouvelle installation. La figure III.14 représente une nouvelle installation.

**Figure III.14** une nouvelle installation.

En plus, ce Programme fonctionne si nous avons simplement besoin de calculer la puissance active et réactive d'un moteur, le facteur de puissance d'un groupe de moteurs, le facteur de puissance d'une seule zone ou de plusieurs zones, la puissance réactive que nous devons compenser si nous disposons uniquement de la puissance active et réactive de la zone, etc..

**III.5.4 Le bilan des puissances actives et réactives de l'installation**

	Récepteurs	Puissance réactive	Puissance apparente	Puissance active
Zone 1	Moteur AS	7.633452	8.178591	2.93594306
	Moteur AS	6.4768683	6.9394105	2.4911032
	Moteur	6.4768683	6.9394105	2.4911032
	Moteur AS	3.4697509	3.7175414	1.33451957
	Moteur AS	2.544484	2.726197	0.97864769
	Moteurs AS	7.8647687	8.4264271	3.02491103
	Moteur AS	3.9323843	4.2132135	1.51245552
	Eclairage	0	0.24	0.24
	Prise	0	0	0
	Chauffage	0	1	1
Zone 2	Moteur AS	6.9395018	7.4350827	2.66903915
	Moteurs	1.1565836	1.2391805	0.44483986
	Moteurs	0.5551601	0.5948066	0.21352313
	Prise	0	0	0
	Prise	0	0.5	0.5
	Eclairage	0	0.45	0.45
	Chauffage	0	1	1
Zone 3	Moteur AS	1.3879004	1.4870165	0.53380783
	Moteur AS	39.323843	42.132135	15.1245552

**Tableau III.2** Le bilan des puissances actives et réactives de l'installation.

Le tableau III.2 représente le bilan des puissances actives et réactives de l'installation

### III.6 Compensation de la puissance réactive

#### III.6.1 Type de compensation

Il est important de noter que le choix du type de compensation de la puissance réactive peut varier en fonction des besoins spécifiques de chaque système électrique. Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte les caractéristiques et les exigences individuelles lors de la sélection du bon type de compensation [6].

On calcule le rapport entre  $Q_c$  et  $S$  comme illustré dans le tableau III.3 pour définir le type de compensation.

	P	Q	S	$\cos \varphi$	$Q_c$	$Q_c/S_n$	$C_r$	$C_\Delta$
Zone 1	16.00868 32	38.39857 6	41.60202 66	0.384805 37	32.05684 55	0.746522 41	0.002043 53	0.0006849 5
Zone 2	5.277402 13	8.651245 5	11.21906 97	0.470395 69	7.230040 92	0.644442 10	0.000475 73	0.0001594 5
Zone 3	15.65836 29	40.71174 38	43.61915 1	0.358979 07	36.17081 85	0.829241 67	0.002380 03	0.0007977 4

**Tableau III.3** le rapport entre  $Q_c$  et  $S$ .

La première zone :

$$Q_{c1} = 31.0568455.$$

$$S_1 = 41.6020266.$$

$$Q_{c1}/S_1 = 0.74.$$

La deuxième zone :

$$Q_{c2} = 7.23004092.$$

$$S_2 = 11.2190697.$$

$$Q_{c2}/S_2 = 0.64.$$

Le rapport entre  $Q_c$  et  $S$  dans la première et la deuxième zones est  $>0.15$  donc la compensation en gradins est recommandée [6].

La troisième zone :

Dans la troisième zone, nous installerons des condensateurs en parallèle avec chaque moteur (compensation individuelle).

### III.6.2 Déterminer la répartition en gradins

Dans la première et la deuxième zone, les charges sont légèrement variables en fonction des besoins du TP, nous utiliserons donc des condensateurs en gradins avec un absorbeur.

#### ➤ La première zone

Dans la première zone, une puissance réactive de 30 KVAR sera fournie. Cette valeur est répartie en trois gradins égaux, où chaque gradin de condensateur fournit 10 KVAR.

#### ➤ La deuxième zone

Dans la deuxième zone, une puissance réactive de 7 KVAR sera fournie. Cette valeur est répartie en deux gradins, où l'un fournit 5 KVAR et l'autre fournit 2 KVAR.

#### ➤ La troisième zone

Dans la troisième zone, nous installerons des condensateurs en parallèle avec chaque moteur (compensation individuelle).

Ainsi, 1KVAR de puissance réactive sera compensée à l'aide d'un condensateur de 1KVAR dans le premier moteur, tandis qu'un condensateur de 30 KVAR sera utilisé pour fournir la puissance réactive dans le deuxième moteur.

### III.6.3 La commande des condensateurs

Le condensateur commuté par thyristors est constitué des condensateurs fixe "C" montés en étoile ou triangle connecté en série avec des bobines d'inductance d'atténuation "La" et un gradateur triphasé, comme illustré dans la figure III.15. Le condensateur n'est pas commandé en phase, mais simplement enclenché ou déclenché. L'inductance d'atténuation est utilisée pour limiter le courant en cas de fonctionnement anormal et éviter la résonance avec le réseau à certaines fréquences spécifiques [19].

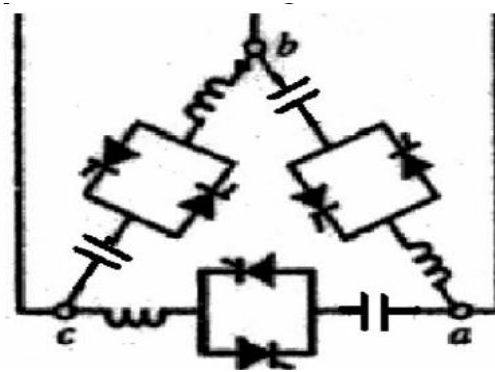


Figure III.15 condensateur commuté par thyristors.

### III.6.4 L'absorbeur

L'absorbeur est constituée d'une bobine d'inductance fixe "L" triphasée montée en triangle en générale, commandé par un gradateur triphasé, montée en parallèle avec les condensateurs. Pour absorber la puissance réactive durant le fonctionnement faible de la première et deuxième zone, pour éviter la surcompensation. Comme illustré dans la figure III.16. Cette configuration permet un contrôle plus précis de la puissance réactive à partir l'angle d'amorçage de thyristors [19].

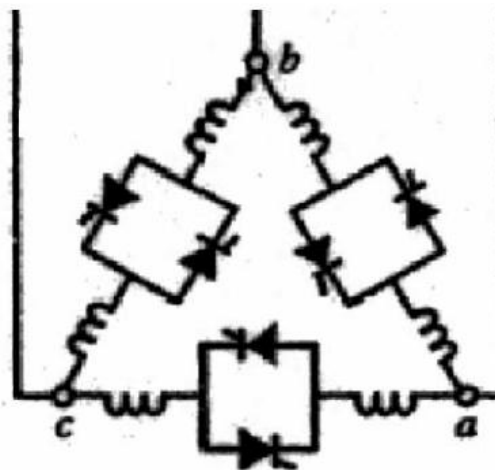


Figure III.16 L'absorbeur.

### III.6.5 Choix des condensateurs

Lorsqu'il s'agit de choisir les condensateurs, il est crucial de trouver un équilibre entre la qualité et le coût des condensateurs. Opter pour des condensateurs de qualité supérieure peut garantir une performance optimale et une durée de vie prolongée, réduisant ainsi les coûts de maintenance à long terme. Cependant, cela peut impliquer un investissement initial plus élevé. D'un autre côté, choisir des condensateurs moins chers peut sembler attrayant du point de vue budgétaire, mais cela peut entraîner des compromis en termes de fiabilité et de durabilité. Il est donc crucial d'évaluer soigneusement les besoins technologiques spécifiques, le budget disponible et les options disponibles sur le marché afin de prendre une décision éclairée quant à l'achat des condensateurs.

Pour choisir les condensateurs de 10 KVAR de la première zone. On prend l'exemple suivant, supposons que nous traitons avec deux compagnies, La première compagnie est Schneider Electric et la deuxième compagnie est STEN. Donc le choix de condensateurs dépend de la performance que nous voulons réaliser et dépend du budget de la FHC.

#### Schneider Electric

- Alimentation : Triphasé.
- Tolérance sur la capacité: - 5 % à 10 %
- Fréquence Nominale : 50 Hz - 60 Hz.
- Paramètres électriques :
- 9,4 Kvar 380V 50 Hz.
- 11,3 Kvar 380V 60 Hz.
- 10,4 Kvar 400V 50 Hz.
- 12,5 Kvar 400V 60 Hz.
- 11,2 Kvar 415V 50 Hz.
- 13,5 kvar 415V 60 Hz.
- 9,4 Kvar 380V 50 Hz.
- Tension nominale : 380...415 V.
- Max valeur de tension :  $1,1 \times U_n$  (8 heures sur 24 heures).
- Courant d'enclenchement :  $250 \times I_n$ .

- Diélectrique: Film polypropylène métallisé avec alliage Zn/Al.
- Prix : 365,45 EUR.
- Garantie 18 mois.

La figure III.17 illustre ce condensateur



**Figure III.17** Condensateur Schneider.

#### **STEN**

- Alimentation : Triphasé.
- Tolérance sur la capacité: - 5 % à 10 %
- Fréquence Nominale : 50 Hz - 60 Hz.
- 10 Kvar 380V 50 Hz.
- Tension nominale : 380 V.
- Diélectrique: Film polypropylène.
- Prix : 12.30 \$US.
- Garantie 18 mois.

La figure III.18 illustre ce condensateur.



Figure III.18 Condensateur STEN.

### III.6.6 Principe de fonctionnement dans les zones

#### ➤ La première zone

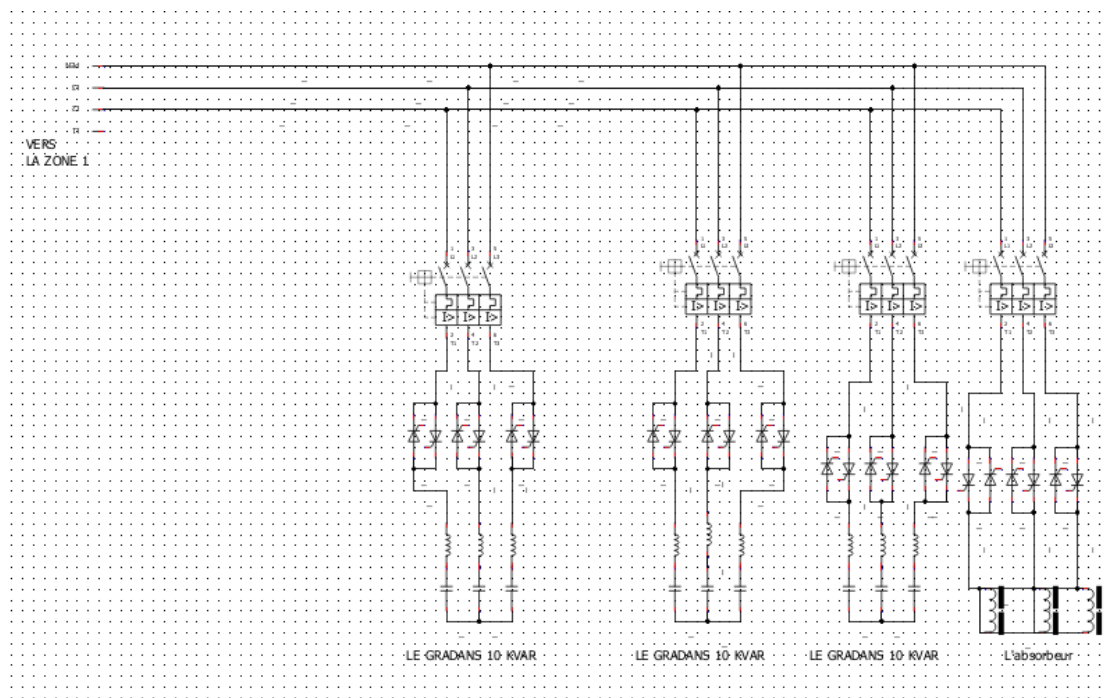
Dans la première zone, les 8 moteurs de TP fonctionnent à des régimes variables en fonction des besoins de TP. Par conséquent, la consommation de puissance réactive n'est pas constante et peut varier rapidement, ce qui donne lieu à 3 cas de fonctionnement.

Le premier cas se produit lorsque les 8 moteurs de TP fonctionnent simultanément avec un facteur de simultanéité de 0,75. Les gradins sont connectés à la zone 1 et l'absorbeur est déconnecté. Les condensateurs fournissent une puissance réactive totale de 30 KVAR. Le facteur de puissance sera 0.88.

Dans le deuxième cas, les 8 moteurs de TP fonctionnent également, mais cette fois avec un facteur de simultanéité inférieur à 0,75. En fonction du cos phi et de la puissance réactive à compenser, Un ou deux condensateurs peuvent être activés, ou

tous les condensateurs peuvent rester activés pour fournir la puissance réactive. Avec la activation de l'absorbeur (30kvar) pour absorber l'excès de puissance réactive afin d'atteindre le facteur de puissance souhaité et d'éviter la surcompensation. La puissance réactive absorbée par l'absorbeur est contrôlée par l'angle de déclenchement des thyristors.

Dans le troisième cas, lorsque les 8 moteurs de TP sont hors service, les condensateurs et l'absorbeur sont déconnectés car il n'y a pas de consommation de puissance réactive. La figure III.19 illustre un schéma électrique des condensateurs en gradin commutés par thyristors et un absorbeur (la zone 1).



**Figure III.19** schéma électrique de la zone 1.

### ➤ La deuxième zone

Dans la deuxième zone, les 5 moteurs de TP fonctionnent à des régimes variables en fonction des besoins de TP. Par conséquent, la consommation de puissance réactive n'est pas constante et peut varier rapidement, ce qui donne lieu à 3 cas de fonctionnement.

Le premier cas se produit lorsque les 5 moteurs de TP fonctionnent simultanément avec un facteur de simultanéité de 0,75. Les gradins sont connectés à la zone 1 et l'absorbeur est déconnecté. Les condensateurs fournissent une puissance réactive totale de 7 KVAR. Le facteur de puissance sera 0.95.

Dans le deuxième cas, les 5 moteurs de TP fonctionnent également, mais cette fois avec un facteur de simultanéité inférieur à 0,75. En fonction du  $\cos \phi$  et de la puissance réactive à compenser, Un des condensateurs peuvent être désactivé, ou tous les condensateurs peuvent rester activés pour fournir la puissance réactive. Et l'absorbeur (7kvar) est connecté et absorbe l'excès de puissance réactive afin d'atteindre le facteur de puissance souhaité et d'éviter la surcompensation. La puissance réactive absorbée par l'absorbeur est contrôlée par l'angle de déclenchement des thyristors.

Dans le troisième cas, lorsque les 5 moteurs de TP sont hors service, les condensateurs et l'absorbeur sont déconnectés car il n'y a pas de consommation de puissance réactive.

### ➤ **La troisième zone**

Dans la troisième zone, les deux moteurs maintiennent une consommation constante de puissance réactive. Nous prévoyons d'installer des condensateurs en parallèle avec chaque moteur pour effectuer une compensation individuelle. Par conséquent, un condensateur de 1 KVAR sera utilisé pour compenser la puissance réactive dans le premier moteur. Le facteur de puissance sera 0.93, tandis qu'un condensateur de 30 KVAR sera utilisé pour fournir la puissance réactive nécessaire au deuxième moteur. Le facteur de puissance sera 0.85.

Lorsque les moteurs sont mis en service, les condensateurs sont enclenchés à l'aide des thyristors et déclenché lorsque les moteurs sont hors service. La figure III.20 illustre un schéma électrique de condensateur triphasé de 30 KVAR commuté par thyristors (la zone 3) pour la compensation individuelle du deuxième moteur.

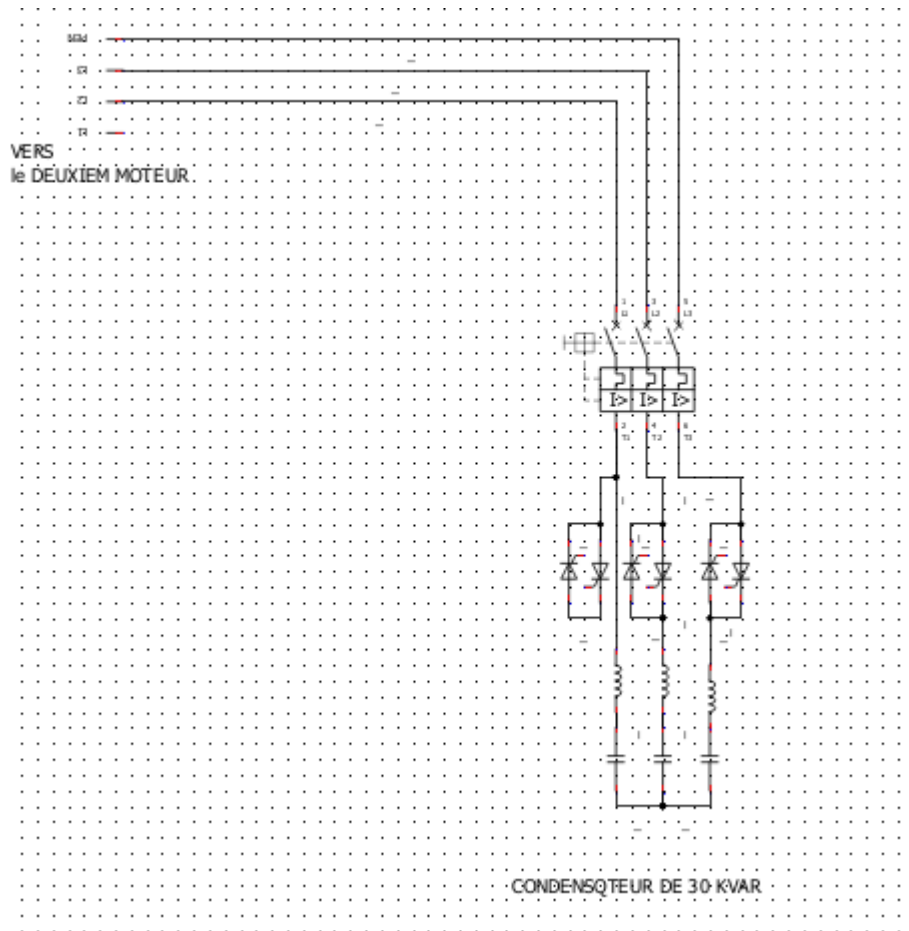


Figure III.20 Compensation individuelle de moteur AS.

### III.6.7 Courant d'enclenchement des condensateurs

Dans le but de minimiser le Courant d'enclenchement des condensateurs, les thyristors sont allumés (état "on") au moment où la tension  $U_c$  du condensateur et la tension  $U_{rés}$  du réseau ont la même valeur. Pour garantir une commutation statique sans problème des batteries de condensateurs en gradins, il est important de prendre des précautions pour assurer que les condensateurs qui vont être activés soient complètement déchargés. Habituellement, une résistance de décharge est incorporée dans le boîtier des condensateurs.

Si nécessaire, on peut réduire le temps de décharge en utilisant des résistances de décharge externes d'une valeur de résistance plus faible [6].

## **III.7 Simulation**

### **III.7.1 Matlab**

MATLAB (« laboratoire de matrices ») est un langage de script émulé par un environnement de développement portant le même nom. Il est utilisé pour le calcul numérique. Développé par The MathWorks, MATLAB permet la manipulation de matrices, l'affichage de courbes et de données, l'implémentation d'algorithmes, la création d'interfaces utilisateurs, et peut s'interfacer avec d'autres langages tels que C, C++, Java et Fortran.

Les utilisateurs de MATLAB (environ 4 millions en 2019) proviennent de milieux variés tels que l'ingénierie, les sciences et l'économie, dans des contextes industriels et de recherche [28].

### **III.7.2 Simulink**

Simulink est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation de systèmes dynamiques. Elle offre un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent la conception, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal. Simulink est intégré à MATLAB, offrant ainsi un accès immédiat aux nombreux outils de développement d'algorithmes, de visualisation et d'analyse de données de MATLAB [29].

### III.7.3 Schéma de l'installation

La figure III.21 représente le schéma de l'installation en MATLAB.

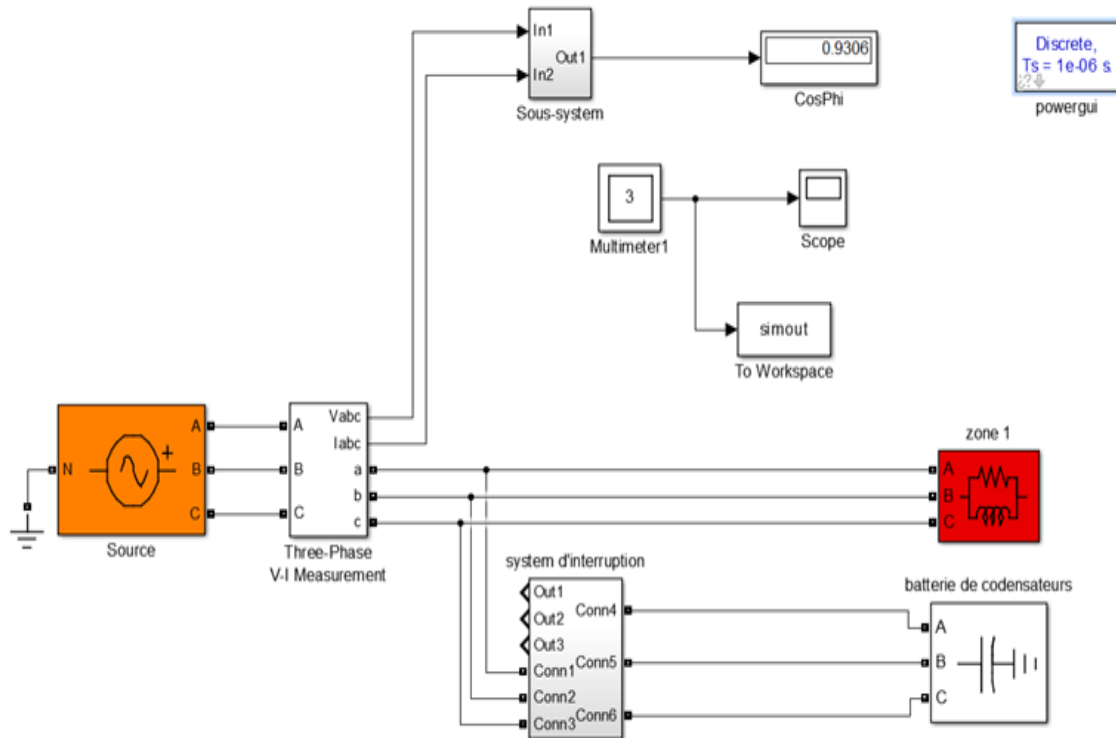


Figure III.21 Schéma de l'installation en MATLAB.

#### III.7.3.1 Sous-système

Dans ce sous-système, nous avons installé un circuit qui calcule le facteur de puissance de la charge. Nous avons utilisé les opérations mathématiques de base fournies par Simulink. Nous avons également installé un écran d'affichage en sortie de ce sous-système pour afficher en temps réel le facteur de puissance. La figure III.22 représente le sous-système.

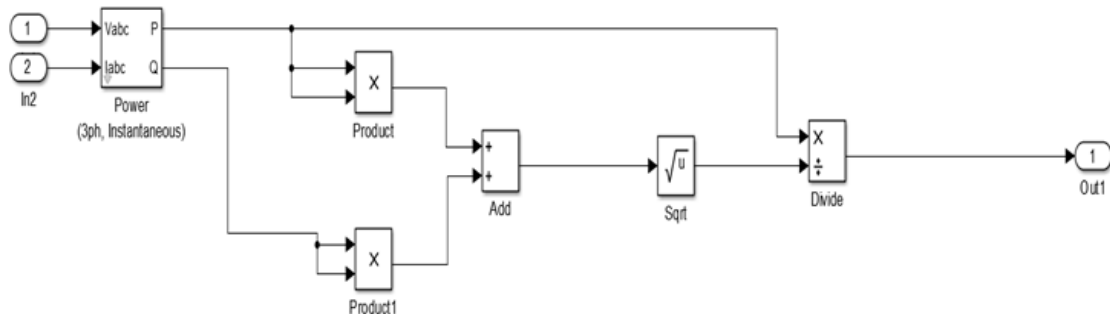


Figure III.22 le sous-système.

### III.7.3.2 System d'interruption

Dans ce système, nous avons créé un circuit de commutation simple qui démarre la simulation après un certain laps de temps. La figure III.23 représente le system d'interruption.

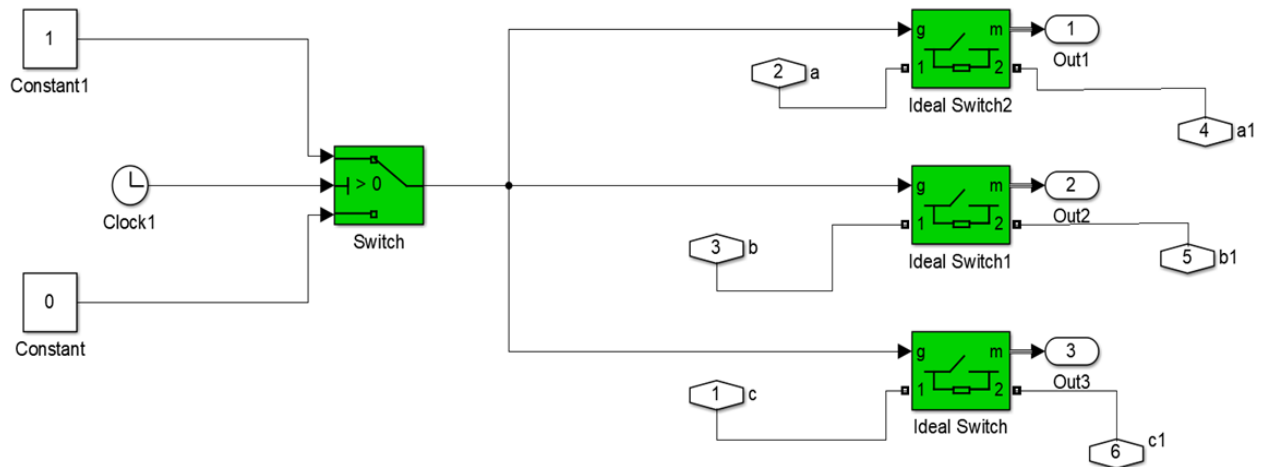


Figure III.23 system d'interruption.

Pour la simulation, nous avons utilisé la première zone comme charge, puis nous avons installé le banc de condensateurs nécessaire pour obtenir un facteur de puissance de 0,88. Tout d'abord, nous avons simulé seulement 0,1 seconde. Lorsque nous avons exécuté la simulation, l'interrupteur est resté ouvert jusqu'à X seconde, moment où il s'est fermé, ce qui nous a permis d'observer les différences de présentation du courant.

### III.7.3.3 Les allures du courant

Les courants  $I_a$ ,  $I_b$  et  $I_c$  représentent les courants des condensateurs configurés en connexion étoile (Y), ce qui signifie le courant de chacun des condensateurs qui composent ce banc de condensateurs. La figure III.24 représente les allures du courant  $I_a, I_b, I_c$ .

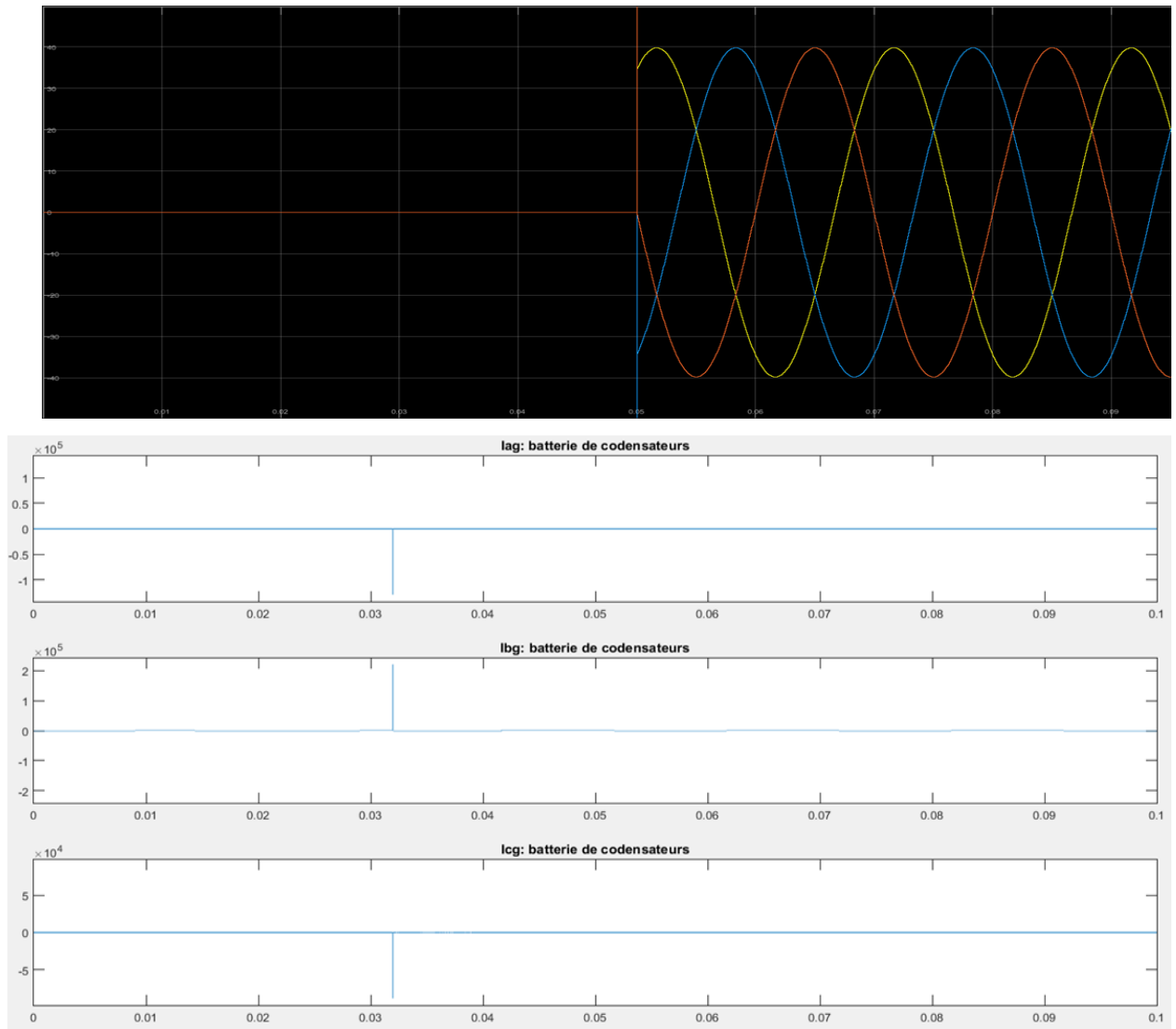


Figure III.24 les allures du courant  $I_a, I_b, I_c$ .

Nous observons que l'ouverture du circuit ou la connexion directe du banc de condensateurs au réseau provoque une surintensité qui peut entraîner de graves dommages à l'installation.

En raison de cela, nous recommandons d'installer un circuit de commande pour contrôler le moment précis de la connexion des bancs de condensateurs au réseau.

#### III.7.3.4 Le bon moment pour la fermeture

Dans notre simulation, nous avons utilisé la configuration Y pour installer les condensateurs, ce qui signifie que le déphasage de tension entre les phases est de 120 degrés. Dans notre cas, si nous obtenons correctement le bon moment de connexion,

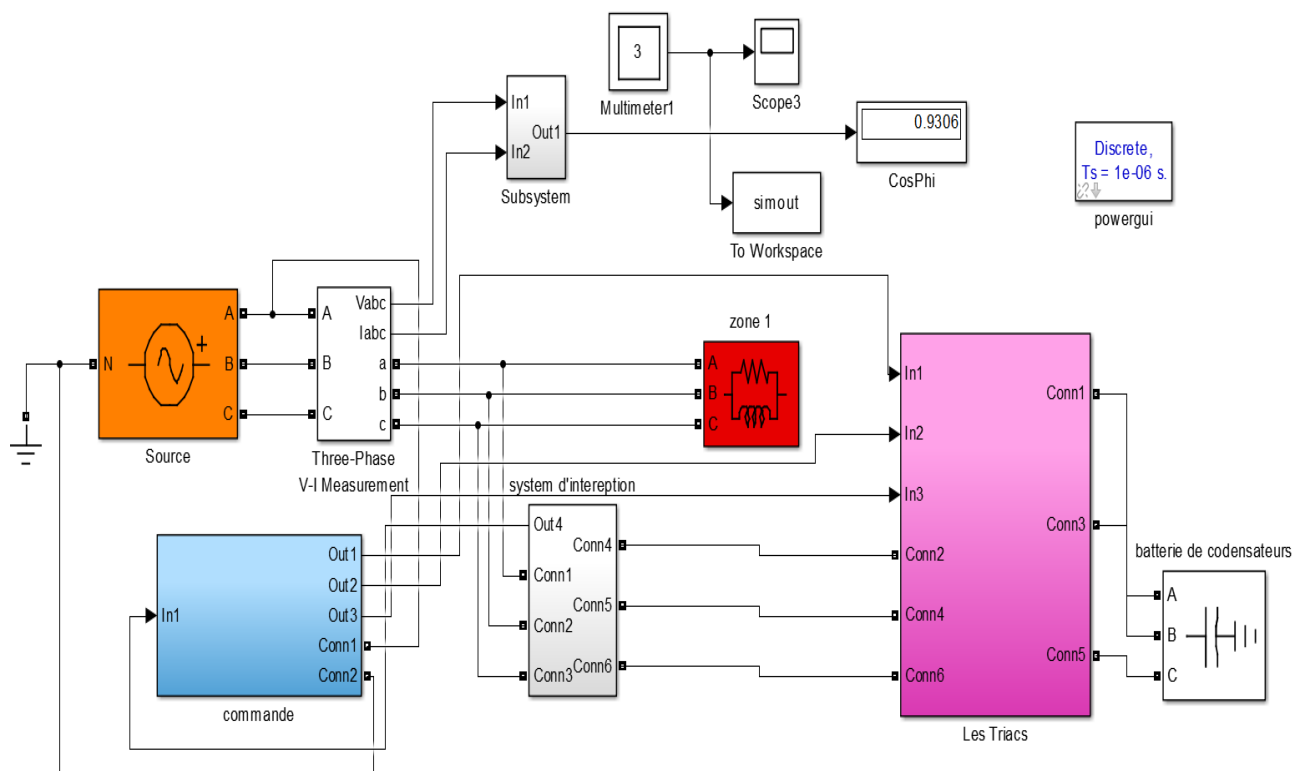
nous pouvons facilement composer le circuit de commande qui contrôle l'ensemble du banc de condensateurs. La phase (A) du réseau est la phase de référence.

Les condensateurs que nous avons utilisés presque sont vides au début en raison du circuit de décharge que nous avons installé.

Lorsque  $V_{ca} = V_a = 0$ , nous pouvons dire que c'est un bon moment pour connecter les bancs de condensateurs au réseau car les condensateurs sont déjà déchargés. Nous devons ajouter un délai temporel aux autres phases égal à 120 degrés. Pour ce faire, nous allons installer un "triac" qui calculera le bon moment pour fermer le circuit.

### III.7.3.5 Le schéma d'installation avec la commande de la batterie condensateurs

Figure III.25 représente le schéma d'installation avec la commande de la batterie condensateurs.



**Figure III.25** le schéma d'installation avec la commande de la batterie condensateurs.

### III.7.3.6 Les Triacs

La figure III.26 représente les Triacs.

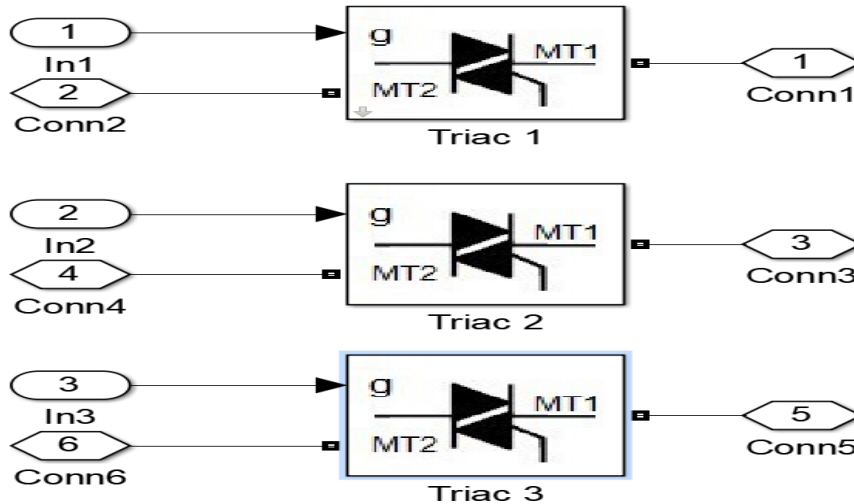


Figure III.26 les Triacs

Chacun de ces gradateurs est connecté entre le condensateur et le système d'interruption. L'ordre de déclenchement de ces thyristors provient du système de détection du passage par zéro dans le système de commande.

### III.7.3.7 Le system de la commande

La figure III.27 représente le system de la commande.

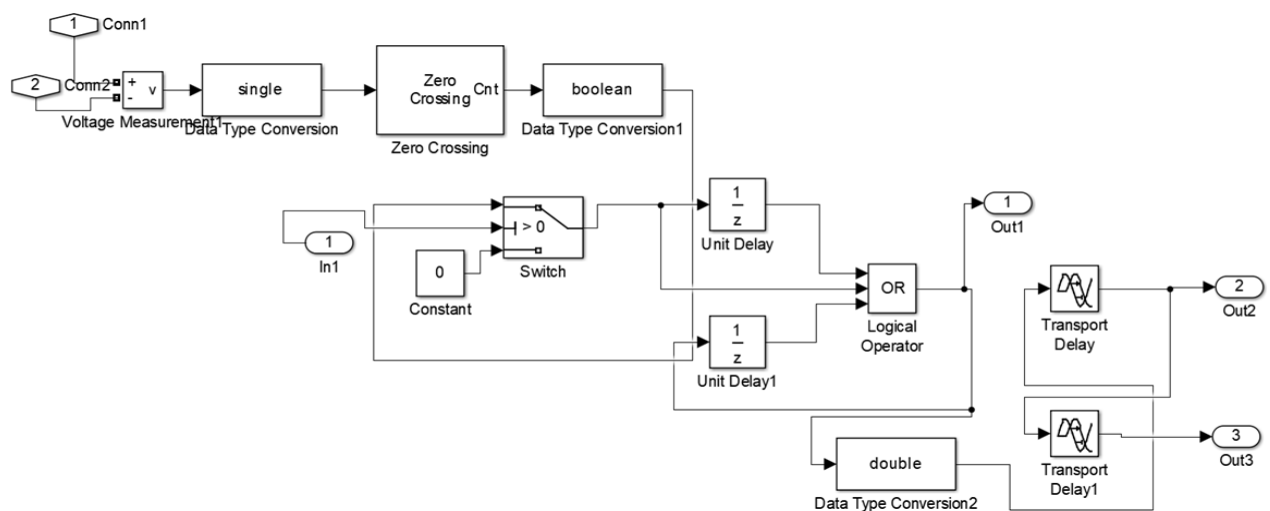
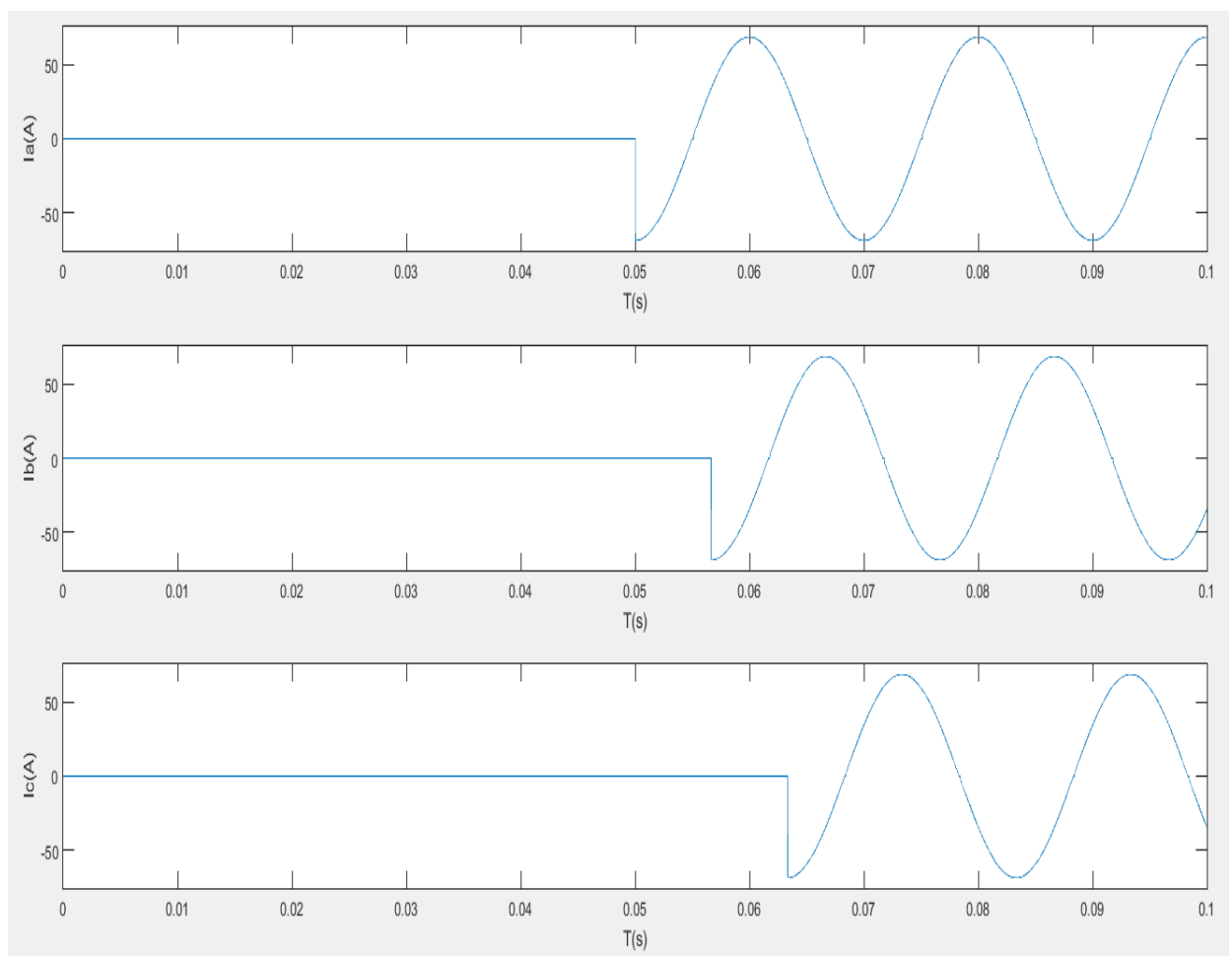


Figure III.27 le system de la commande.

Après avoir fermé les interrupteurs à un moment aléatoire, les condensateurs ne seront pas directement connectés au réseau. En réalité, le système de commande retiendra le passage du courant jusqu'à ce que la condition  $V_a = 0$  soit remplie. Une fois que la condition est vérifiée, le triac qui connecte le condensateur à la phase (A) sera déclenché. Le déclenchement du premier gradateur provoquera le déclenchement du deuxième et du troisième avec un délai de temps de  $0,02/3$  ( $120^\circ$ ) pour le deuxième et de  $0,02*2/3$  ( $240^\circ$ ) pour le troisième. Ainsi, l'ensemble du système de compensation sera correctement connecté au réseau avec des courants d'enclenchement transitoires dans les 3 phases presque éliminés

### III.7.3.8 Les allures du courant après la correction

La figure III.28 représente les allures du courant après la correction.



**Figure III.28** Les allures du courant après la correction.

### **Observation**

Nous avons mis le système en marche à 0,046 seconde (un temps aléatoire), et nous avons remarqué que les courants ne commencent à circuler qu'à 0,05 seconde ( $V_a=0$ ). Ainsi, l'ensemble du système de compensation sera correctement connecté au réseau avec des courants d'enclenchement transitoires dans les 3 phases presque éliminés

### **.III.7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons réalisé une analyse approfondie de l'installation (les zones) pour évaluer sa puissance et établir un bilan de puissance. Notre objectif principal était de compenser la puissance réactive, ce qui nous a conduits à développer un programme afin de simplifier les calculs nécessaires. Ensuite, nous avons pris des décisions concernant les dispositifs de compensation et leur mode de fonctionnement. Nous avons également expliqué en détail le principe de notre système de compensation de la puissance réactive. A la fin, nous avons effectué une simulation du courant d'enclenchement de la batterie de condensateurs afin de mieux comprendre ses caractéristiques et de trouver une solution pour limiter les courants transitoires. Cette approche nous a permis d'optimiser le fonctionnement de la batterie et de garantir une transition en douceur lors de son enclenchement, tout en préservant la stabilité du système électrique dans son ensemble.

## Conclusion générale

De nos jours, tout a un prix, la bonne utilisation et l'exploitation de l'électricité est un aspect essentiel dans le côté économique, notamment pour les grands consommateurs d'électricité comme l'industrie et le secteur commercial, le secteur des services. L'une des méthodes pour optimiser l'utilisation de l'énergie électrique et améliorer l'efficacité est la compensation de la puissance réactive (La correction du facteur de puissance).

La correction du facteur de puissance est qu'elle offre plusieurs avantages tant pour les consommateurs que pour les fournisseurs d'énergie. réduit les pertes d'énergie dans les systèmes électriques, ce qui se traduit par des factures d'électricité plus faibles pour les consommateurs. Contribue à améliorer la stabilité de la tension, ce qui renforce la fiabilité globale du système électrique, prolongeant ainsi leur durée de vie et réduisant les coûts de maintenance.

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude de l'amélioration du facteur de puissance dans les laboratoires de la faculté des hydrocarbures et de la chimie. Dans ce travail, une solution a été expliquée pour améliorer le facteur de puissance et cette solution est : Compensation de l'énergie réactive. Premièrement nous avons commencé par une description générale sur les charges linéaires et l'énergie électrique et leurs différentes puissances (active, réactive, apparent) et aussi les harmonique (définition, l'origine, la solution), ainsi que nous avons expliqué l'importance de bon facteur de puissance. À la fin de ce chapitre, nous avons conclu l'objectif principal de la compensation est : l'amélioration du facteur de puissance.

Le deuxième chapitre examine différents moyens et méthodes de compensation de la puissance réactive, telles que l'utilisation de condensateurs, les machines synchrones et de dispositifs électroniques avancés FACT tels que le STATCOM et le SSSC, le SVC, offrent des solutions efficaces pour atténuer les problèmes de puissance réactive. Chacune de ces méthodes présentent des avantages et des inconvénients, et le choix de la méthode appropriée dépend des caractéristiques du système et des besoins spécifiques de l'application.

Dans le troisième chapitre, on a traité la consommation de la puissance électrique dans les laboratoires de TP de la faculté des hydrocarbures et de la chimie donc

premièrement on a fait une description de l'installation concernée (Situation, Schéma électrique, description des appareils, Faire le bilan des puissances actives et réactives).

A partir les calculs des puissances on a déduit le facteur de puissance actuel, Nous avons choisi le mode de compensation et les moyens de compensation, Nous avons choisi des dispositifs de contrôle et de protection. On a écrit un programme qui automatise la procédure de calcul des puissances et le facteur de puissance. A la fin de chapitre nous avons simulé le courant d'enclenchement d'un condensateur.

A la fin, les avancées dans les technologies de l'électronique de puissance offrent de nouvelles opportunités pour la correction du facteur de puissance. L'intégration de techniques de correction du facteur de puissance peut permettre une surveillance et un contrôle en temps réel du facteur de puissance, ce qui permet une gestion plus efficace de la distribution et de la consommation d'électricité.

# Bibliographie

- [1] Wallonie énergie SPW. Circuit électrique : notions de base. *Article, Université catholique de Louvain (Belgique)*, 2007.
- [2] Nabil MESSAD. *ETUDE DE LA COMPENSATION DE LA PUISSANCE REACTIVE DANS UN RESEAU DE TRANSMISSION D'ENERGIE ELECTRIQUE*. Mémoire de Magister en Génie Electrique, Université de TIZI-OUZOU, 2014.
- [3] Association Négawatt. Courant alternatif, puissances active et réactive, facteur de puissance, harmoniques. *Fiche technique*, 2017.
- [4] A.MIMOUNI. *COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE DANS LES INSTALLATIONS INDUSTRIELLES*. Projet de fin d'étude en électricité, Université de ALGER, 1979.
- [5] M. Rachid BESSAAD. *COMPENSATION DE L'ENERGIE REACTIVE*. *Cours Département TMI SONATRACH*.
- [6] WIKI installation électrique proposé par Schneider Electric. La compensation de l'énergie réactive. *Le Guide de l'Installation Electrique chapitre L*, 2020.
- [7] WIKI installation électrique proposé par Schneider Electric. Les harmoniques, *Le Guide de l'Installation Electrique chapitre M*, 2020.
- [8] Le BTS Electrotechnique proposé par Free SAS, Théorème de Boucherot. *Cours*, 2021.
- [9] Sidi Salah Mokhtar. *Etude comparative entre les moyens de compensation de l'énergie réactive*. Mémoire de Magister en Electromécanique, Université d'ANNABA, 2017.
- [10] Charles HANTOUCHE. Condensateurs de puissance. *La Direction des Études et Recherches d'Électricité, D 4 710*, France.

- [11] Semaoui Hammou. *Compensation de l'énergie réactive d'une Installation industrielle MT/BT (HTA/BTB)*. Mémoire de Magister en génie électrique, Université de M'SILA, 2016.
- [12] HADDAD Salim. *Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique*. Mémoire de magister département d'électromécanique, Université d'Annaba, 2006.
- [13]:Toufik.SI AHMED. *Etude comparative des différents moyens de compensation de l'énergie réactive*. Mémoire de fin d'étude en électrotechnique, Université de Tizou Ouzou, 2010.
- [14] Alpes Technologies. *Compensation d'énergie réactive et maîtrise de la qualité des infrastructures électriques. Document AT216001*, Juin 2016.
- [15] DURELEC Transfo. *Batterie de condensateurs et coffret de sécurité. Article*, France, 2011.
- [16] Mlle.Oumaima Abdallaoui Maane, Mlle. Hala Naoui Khir. *Amélioration des performances du réseau Basse Tension*. Mémoire de licence en génie électrique, 2018.
- [17]. Djebir Thamer, Mahmoud Djallil. *Etude de la Compensation de la puissance réactive par un compensateur statique dans un réseau électrique*. Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme Master en électricité industrielle. Faculté des Hydrocarbures et de la Chimie, Université de Boumerdas, 2022.
- [18] Schneider Electric Industries SA. *Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques. Document DBTP155GUI/FR*, France, 2001.
- [19] KAIDI NOUR EDDINE MESADI MOHAMMED OUSSAMA, *Compensateur statique d'énergie réactive (SVC)*. Mémoire de magister en électrotechnique, Université d'Adrar, 2020.
- [20] Mr.Bougouffa Lazhar, *Effets des Systèmes de Compensation FACTS sur la Protection à Maximum de Courant dans les Réseaux Électriques*. Thèse de Doctorat en Électrotechnique, Université de Batna, Avril 2016.
- [21] Jugurta Krouchi, Hocine Khati. *Modélisation et Commande d'une Interconnexion THT Equipée d'un SSSC*. Mémoire de magister, Université de Tizou Ouzou, 2015.

[22] Chauvin Arnoux. Compensation d'énergie réactive Condensateurs et armoires de rephasage. *Document*.

[23] WIKI installation électrique proposé par Schneider Electric. Règles générales de conception d'une installation électrique. *Le Guide de l'Installation Electrique chapitre L*, 2020.

[24] Wikipedia. QElectro Tech. *Article*.

[25] Wikipédia. Studio visual code. *Article*.

[26] Wikipedia. Python. *Article*.

[27] Wikipédia.MATLAB. *Article*.

[28] Wikipédia. Simulink. *Article*.