

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



# **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**Pour l'obtention du diplôme de Master**

**Domaine : Sciences et Technologie**

**Filière : Génie Electrique**

**Spécialité : Réseaux Électriques et Haute Tension**

## **THÈME**

**Étude du rendement d'une ligne et  
amélioration du facteur de puissance par une  
maquette didactique**

**Préparé par : Mr.CHMAREKH Salah**  
**Mr.MEDJDOUB Charafeddine**

**Devant le Jury :**

<b>Nom et prénoms</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
<b>M.MODJAHED</b>	<b>PR</b>	<b>Président</b>
<b>A. BENAYADA</b>	<b>MAA</b>	<b>Examinateur</b>
<b>BEKKI Brahim</b>	<b>MAA</b>	<b>Examinateur</b>
<b>Mme K. BELHACEL</b>	<b>MAA</b>	<b>Encadreur</b>

**PROMOTION 2016 /2017**

## REMERCIEMENTS

Nous exprimons nos plus vifs remerciements et nos profonde gratitude à Madame **K. BELHACEL** pour sa disponibilité, son soutien constant, ses conseils, les moyens matériels qu'elle a mis à notre disposition pour la réalisation de ce travail, pour sa présence permanente au laboratoire des réseaux électriques et pour son soutien moral qui nous permettent de surmonter certaines difficultés au cours de ce travail.

Nous exprimons nos sincères remerciements à Monsieur, **M.MODJAHED** Professeur à l'Université de IBN-KHALDOUN-Département de Génie Électrique d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Nous voudrions remercier sincèrement Monsieur, Dr. **A. BENAYADA** et Monsieur, **MAA. BEKKI Brahim** de Département de Génie Électrique, qui ont accepté de participer à ce Jury, en tant qu'examineurs et qui ont pris la peine de lire ce manuscrit avec attention.

Nos remerciements vont aussi à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.

*« L'imagination est plus importante que le savoir »*

*« La théorie, c'est quand on sait tout et que rien ne fonctionne. La pratique, c'est quand tout fonctionne et que personne ne sait pourquoi »*

*Albert EINSTEIN*

*« On ne peut mieux vivre qu'en cherchant à devenir meilleur, ni plus agréablement qu'en ayant la pleine conscience de son amélioration. »*

*Socrate*

*« Rien ne vient au hasard..... »*

*MEDJDOUB.Ch*

Etude du rendement d'une ligne et amélioration du facteur de puissance par une maquette didactique.

### Résumé

Dans ce mémoire nous avons parlé de l'Etude du rendement d'une ligne et amélioration du facteur de puissance pour des raisons de stabilité et de qualité d'énergie c.-à-d. le réglage de la tension qui peut être dans une situation de surtension ou chute de tension due à différents états de la charge , vous allez trouver dans cet mémoire un aperçue sur la technique de compensation classique avec des inductances et des batteries de condensateur et leur principe de fonctionnement et le comportement de la ligne sans et avec la charge et leur rendement.

**Mots clés :** compensation, stabilité, chute de tension, surtension, ligne électrique, facteur de puissance, condensateurs, inductances, rendement.

دراسة مردود الخطوط الكهربائية وتحسين معامل الاستطاعة من خلال النموذج المخبري.

#### ملخص

في هذه المذكرة تحدثنا عن دراسة مردود الخطوط الكهربائية وتحسين معامل الاستطاعة من أجل استقرار ونوعية الطاقة ضبط التوتر الذي يمكن أن يكون في حالة من التوتر الزائد أو الهبوط في الجهد ناتج عن الحالات المختلفة للحمولة، أي وسوف تجد في هذه المذكرة لمحة حول تقنية التعويض التقليدية عن طريق الوشائع والمكثفات ومبدأ عملهم وسلوك و مردود الخط الكهربائي دون ومع الحمولة.

كلمات البحث: التعويض، الاستقرار، هبوط في التوتر، التوتر الزائد ، خط كهربائي، معامل الاستطاعة ، المكثفات، الوشائع، مردود.

## LISTE DES FIGURES

<b>Fig.I.1</b> : Ligne et Câble électrique haute tension dans un réseau d'électricité .....	3
<b>Fig.I.2</b> : Représentation simple du système de câble .....	4
<b>Fig.I.3</b> : structure d'un câble électrique .....	5
<b>Fig.I.4</b> : Section d'un conducteur Aluminium/Acier.....	7
<b>Fig.I.5</b> : Isolateurs rigides en verre.....	7
<b>Fig.I.6</b> : câbles de garde pour chaque ligne, avec chaîne d'isolation.....	8
<b>FigII.1</b> : le transport de l'électricité en courant continu haute tension .....	9
<b>FigII.2</b> : Câble HVDC extrudé.....	13
<b>FigII.3</b> : Coût d'une transmission en fonction de la longueur d'une ligne .....	14
<b>FigII.4</b> : Les liaisons HVDC pendent moins d'énergie sur la distance que leurs homologues HVDC.....	15
<b>Fig III.1</b> -Impédance ( $Z = R + jX$ . ) et admittance ( $Y = j/Xc$ ) par unité de longueur d'une ligne de transport monophasée.....	17
<b>Fig III.2</b> -Circuit équivalent de la ligne de transport de la figure III.1 .....	17
<b>Fig III.3</b> - Quadripôle défini par ses paramètres A, B, C et D .....	18
<b>Fig III.4</b> -Schéma équivalent d'une ligne aérienne.....	20
<b>Fig III.5</b> -Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteurs .....	21
<b>Fig III.6</b> -Circuit équivalent monophasé d'une ligne courte.....	23
<b>Fig III.7</b> -Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur courte.....	24
<b>Fig III.8</b> -Circuit monophasé représentant le réseau de la figure III.7.....	25
<b>Fig III.9</b> - Diagramme vectoriel d'une ligne courte avec un facteur de puissance à la réception en arrière.....	26
<b>Fig III.10</b> - Les valeurs des puissances paraissant dans le triangle des puissances.....	26
<b>Fig III.11</b> - Circuit équivalent monofilaire d'une ligne de longueur moyenne .....	28
<b>Fig III.12</b> - Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur moyenne.....	29
<b>Fig III.13</b> - Circuit monophasé représentant le réseau de la figure III.12 .....	30

<b>Fig III.14</b> - Diagramme vectoriel d'une ligne de longueur moyenne avec un facteur de puissance à la réception en arrière.....	31
<b>Fig III.15</b> -Ligne terminée sur une impédance autre que son impédance caractéristique.....	33
<b>Fig III.16</b> - Ligne terminée sur son impédance caractéristique.....	34
<b>Fig III.17</b> -Ligne sans perte terminée sur sa résistance caractéristique.....	34
<b>Fig III.18</b> - Circuit équivalent en $\Pi$ d'une ligne longue .....	35
<b>Fig.VI-1</b> . Cause de l'effet ferranti.....	37
<b>Fig.VI-2</b> : Compensation d'énergie réactive au moyen de condensateurs parallèles et le diagramme vectoriel correspondant.....	40
<b>Fig.VI-3</b> : Facteur de puissance avec un fonctionnement sans compensation et partiellement compensé.....	41
<b>Fig.VI-4</b> : Compensation d'énergie réactive à l'aide de condensateur de série et le diagramme vectoriel correspondant.....	42
<b>Fig.VI-5</b> : Division de la chute de tension sur une ligne en un axe direct et une composante en quadrature-axe.....	43
<b>Fig.VI-6</b> : Schéma équivalent d'une ligne électrique en $\Pi$ .....	44
<b>Fig.VI.7</b> - Capacités présentes dans un système triphasé.....	45
<b>Fig.VI-8</b> : transformateur à prise réglable.....	45
<b>Fig.VI-9</b> : Circuit équivalent d'un essai en court-circuit.....	46
<b>Fig.VI-10</b> - Circuit équivalent d'une ligne à vide.....	46
<b>Fig VI.11</b> - Variation des tensions $U_1$ et $U_2$ en fonction de la longueur.....	47
<b>Fig VI.12</b> - Variation des puissances $P$ et $Q$ en fonction de la longueur.....	48
<b>Fig VI.13</b> - Schéma d'essais sur une ligne avec charge résistive $R$ .....	49
<b>Fig VI.14</b> - Variation des tensions $U_1$ et $U_2$ en fonction de résistance $R$ .....	49
<b>Fig VI.15</b> - Variation de courant $I$ en fonction de résistance $R$ .....	50
<b>Fig VI.16.a</b> - Variation des puissances $P$ en fonction de résistance $R$ .....	50
<b>Fig VI.16.b</b> - Variation des puissances $Q$ en fonction de résistance $R$ .....	51
<b>Fig VI.17</b> - Schéma d'essai en charge (résistive-inductive $R$ - $L$ ).....	51
<b>Fig VI.18</b> - Variation des tensions $U_1$ et $U_2$ en fonction de l'inductance $L$ .....	52

---

<b>Fig VI.19-</b> Variation de courant I en fonction de L.....	53
<b>Fig VI.20-</b> Variation des puissances P et Q en fonction de L.....	53
<b>Fig VI.21-</b> Schéma de compensation shunt.....	54
<b>Fig VI.22-</b> Variation des tensions $U_1$ et $U_2$ en fonction de capacitance C.....	55
<b>Fig VI.23-</b> Variation de courant I en fonction de capacitance C.....	56
<b>Fig VI.24</b> Variation des puissances P et Q en fonction de C.....	56
<b>Fig VI.25-</b> Schéma de compensation série.....	57
<b>Fig VI.26-</b> Variation des tensions $U_1$ et $U_2$ en fonction de C.....	58
<b>Fig VI.27-</b> Variation de courant I en fonction de C.....	59
<b>Fig VI.28-</b> Variation des puissances P et Q en fonction de C.....	59

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tab II.1</b> -Comparaison entre DC et AC .....	15
<b>Tab III.1</b> : Rayon équivalent de conducteurs en faisceau.....	22
<b>Tab-VI.1</b> : Caractéristiques de la ligne.....	44
<b>Tab-VI.2</b> : les résultats de mesure des prises du transformateur.....	45
<b>Tab VI-4</b> : Les résultats de mesures pour différentes types de lignes à vide.....	47
<b>Tab-VI.5</b> : Les résultats de mesures pour une charge résistive R.....	49
<b>Tab VI.6</b> : Les résultats de mesures pour une charge résistive-inductive R-L.....	52
<b>Tab VI.7</b> : Résultats obtenu avec la compensation shunt.....	54
<b>Tab VI.8</b> : Résultats de mesures pour une charge résistive-inductive RL avec condensateur série.....	57

# Liste des abréviations

---

HVDC: High Voltage Direct Current

HVAC: High Voltage Alternative Current

CCHT : Courant Continu Haute Tension

AC: Alternative Current

DC : Direct Current

CC : Courant continu

CA : Courant Alternatif

IGBT : Insulated Gate Bipolar Transistors

LCC : Line Commutated Converters

VSC : voltage synchronization compensator

MLI : modulation de largeur d'impulsion

PWM : Pulse With Modulation

FACTS : Flexibles Alternatif Current Transmission System

HVDC-MI : High Voltage Direct Current Mass-Impregnated

SCFF : Self-Contained Fluid Filled cables

PPL : papier-polypropylène

**DMG** : Distance géométrique moyenne entre deux groupes de conducteurs (en anglais : **Geometric Mean Distance**)

**GMR** : Rayon géométrique moyen (en anglais : **Geometric Mean Radius**)

THT : Très Haute Tension

HT : Haute Tension

CS : Semi-Conducteur

## Les symboles

$V_s$  : tension du source

$V_r$  : tension du récepteur

$R$  : résistance par unité de longueur

$X_L$  : réactance inductive par unité de longueur

$X_C$  : réactance capacitive par unité de longueur

$l_1$  : longueur de la ligne

$Z$  : impédances

$Y$  : admittances

$I_S$  : courant du source

$I_R$  : courant du récepteur

$r_0$  : résistance série de la ligne

$x_0$  : réactance série de la ligne

$b_0$  : susceptance shunt de la ligne

$g_0$  : conductance shunt de la ligne

$l$  : longueur de conducteur

$s$  : section de conducteur

$\rho$  : résistivité de conducteur

$\theta$  : la température

$L_0$  : l'inductance linéique

$r_e$  : Rayon équivalent du faisceau de conducteurs

$C_0$  : capacité linéique

$f$  : la fréquence du réseau

$\Delta P_c$  : Pertes de puissance active par effet couronne

$U_n$  : tension nominale de la ligne

$Z'$  : l'impédance effective longitudinale

$Y'$  : l' admittances effective transversale

$r$  : Rayon des conducteurs élémentaires

$n$  : Nombre de conducteurs élémentaires ;

$R$  : Rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) ;

$D$  : Distance entre deux conducteurs consécutifs

$r_e$  : Rayon équivalent

$Q$  : la charge totale

$\epsilon_0$  : permittivité du vide

$E_{max}$  : champ maximal des conducteurs

$E_{min}$  : le champ minimal des conducteurs

$E_\theta$  : le champ varie autour du conducteur

$V_{RLL}$  : tension de ligne à ligne à la réception

$I_S$  : courant de ligne à la source

$I_R$  : courant de ligne à la réception

$P_{S3\phi}$  : puissance active triphasée à la source

$P_{R3\phi}$  : puissance active triphasée à la réception

$Q_{S3\phi}$  : puissance réactive triphasée à la source

$Q_{R3\phi}$  : puissance réactive triphasée à la réception

$\cos \Phi_S$  : facteur de puissance à la source ( $f_{SP}$ )

$\cos \Phi_R$  : facteur de puissance à la charge ( $f_{PR}$ )

$V_{RLL}$  : la tension ligne-ligne à la réception

$F_{PR}$  : facteur de puissance a la réception

$S$  : la puissance apparente

$P_S$  : la puissance active

$Q_S$  : la puissance réactive

$S_S$  : la puissance complexe monophasée à la source

$P_S$  : la puissance active monophasée à la source

$Q_S$  : la puissance réactive monophasée à la source

$P_{S3\phi}$  : la puissance active triphasée à la source

$P_{R3\phi}$  : la puissance active triphasée à la réception

$\Delta P_{L3\phi}$  : pertes par effet Joule

$Q_{S3\phi}$  : la puissance réactive triphasée à la source

$Q_{R3\phi}$  : la puissance réactive triphasée à la réception

$\Delta Q_{L3\phi}$  : la puissance réactive inductive absorbée par l'inductance de la ligne

$\eta$  : rendement de la ligne

# Sommaire

---

## Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralité sur les lignes de transport	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Les câbles électriques.....	3
I.2.1 Structure d'un câble électrique.....	4
I.2.2 Types d'isolants des câbles.....	5
I.2.3 Les accessoires des câbles.....	5
I.2.3.a Jonctions.....	6
I.2.3.b Extrémités.....	6
I.3 Composants du ligne THT.....	6
I.3.1 Pylônes.....	6
I.3.2 Conducteurs.....	6
I.3.3 Isolateurs.....	7
I.3.4 Câbles de garde.....	8
I.4 Conclusion.....	8
Chapitre II: Généralité sur le transport de l'électricité en courant continu	
II.1 Introduction.....	9
II.2 Pourquoi utiliser la haute tension.....	9
II.3 Technologies de câbles en CCHT.....	10
II.3.1 Câbles papier imprégné à isolation solide.....	10
II.3.2 Câbles papier imprégné à isolation fluide.....	10
...II.3.3 Câbles à isolation mixte papier-polypropylène.....	11
II.3.4 Câbles à isolant synthétique extrudés.....	11
II.4 Les avantages et les inconvénients.....	13
II.4.1 Les avantages.....	13
II.4.2 Les inconvénients.....	15
II.5 Conclusion.....	16
Chapitre III: Modélisation et étude des lignes de transport en régime permanent	
III.1 Introduction.....	17
III.2 Caractéristique générale sur d'un ligne électrique.....	18
III.2.1 La résistance.....	18

## Sommaire

---

III.2.2 La réactance.....	19
III.2.3 La susceptance.....	19
III.2.4 La conductance.....	19
III.3 Faisceau de conducteur.....	20
III.4 Lignes courtes.....	23
III.4.1 Circuit équivalent de la ligne.....	23
III.4.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne.....	24
III.4.3 Expressions des puissances aux extrémités de la ligne.....	26
III.4.4 Pertes de puissance dans la ligne.....	27
III.4.5 Rendement de la ligne.....	28
III.6 Lignes de longueur Moyenne.....	28
III.6.1 Circuit équivalent de la ligne.....	28
III.6.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne.....	29
III.6.3 Expressions des puissances de la ligne.....	31
III.7 Lignes longues.....	32
III.7.1 Impédance caractéristique d'une ligne.....	32
III.7.2 Signification physique.....	32
III.7.3 Puissance caractéristique d'une ligne.....	34
III.7.4 Circuit équivalent d'une ligne longue.....	35
III.8 Conclusion.....	36

### Chapitre IV: Amélioration du facteur de puissance

IV.1 Introduction.....	37
IV.2 L'effet Ferranti.....	37
IV.2.1 Détails.....	37
IV.3 Amélioration de $\cos \Phi$ .....	38
IV.3.1 Amélioration par utilisation de compensateurs spéciaux.....	38
IV.3.2 Amélioration sans utilisation de compensateurs spéciaux.....	38
IV.3.3 Amélioration par filtrage.....	39
IV.4 Avantages dus à l'amélioration du facteur de puissance.....	39
IV.5 Compensation d'énergie réactive par la méthode classique.....	39
IV.6. Les différents Moyens de compensation.....	39
IV.7. Les types de compensations par des condensateurs.....	40
IV.7.1. Compensation Parallèle.....	40

# Sommaire

---

IV.7.2. Compensation Séries.....	42
IV.8 Etude d'une ligne électrique haute tension par un Banc d'Essai.....	43
IV.8.1 Les essais expérimentaux.....	43
IV.8.1.1 Manipulation N°01.....	45
IV.8.1.2. Manipulation N°02.....	48
IV.8.2. Réglage de la tension par la méthode de compensation de l'énergie réactive à par d'un banc de condensateur.....	54
IV.8.2.1 Manipulation N°03.....	54
IV.9 Conclusion.....	60
Conclusion Générale.....	61
Référence	
Annexe-A	

# Introduction générale

### Introduction générale

Le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique. Ainsi, la plus grande partie de la production électrique est centrée autour de centrales à grande capacité de production (type centrales hydrauliques, thermiques, nucléaires.....etc.).[1]

La fonction principale d'un réseau électrique est d'acheminer l'énergie des centres de production jusqu'aux consommateurs, à travers un réseau de lignes aériennes et de câbles souterrain et des postes de transformation, souvent à des grandes distances et à des niveaux de tension plus au moins importants. [1]

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. De nouvelles lignes dites « HVDC » (High Voltage Direct Current ) permettent de transporter le courant continu avec moins de pertes sur de plus grandes distances, éventuellement sous l'eau. [2]

La fourniture d'électricité, en ce qui concerne la sûreté de disponibilité, et plus le réseau électrique augmente plus qu'il devient complexe et plus difficile à contrôler, ce système qui doit conduire de grandes quantités de l'énergie en l'absence de dispositifs de contrôle sophistiqués et adéquats beaucoup de problèmes peuvent survenir sur ce réseau tel que: le transit de puissance réactive excessif dans les lignes, les creux et les surtensions entre différentes parties du réseau...etc.

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, de la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisé pour limiter ce transport de puissance réactive. Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou FACTS. [3]

L'objectif de ce travail est d'illustrer la technique de la compensation de l'énergie réactive (amélioration de facteur de puissance) avec des banc de condensateurs pour contrôlée le rendement d'une ligne de transport d'énergie électrique.

Notre mémoire est composée de quatre chapitres, dans le premier chapitre nous avons présenté une étude bibliographique relative aux constructions des lignes de transport d'électricité. Le deuxième chapitre est consacré à la présentation de transport de l'électricité en courant continu. Quant au troisième chapitre, nous avons Modélisée les lignes de transport en régime permanent. Il existe trois types de lignes aux quelles La détermination de la puissance maximale qu'une ligne peut transporter est complexe. Elle doit prendre en compte par exemple la stabilité du réseau, les limites thermiques de la ligne, les limites de chute de tension.

Dans le quatrième chapitre nous avons effectué des différents essais sur la ligne électrique et nous avons essayé de voir son comportement sur le réseau électrique, ces essais a été réalisé au sein du laboratoire de « réseau électrique » de l'université IBN KHALDOUN.

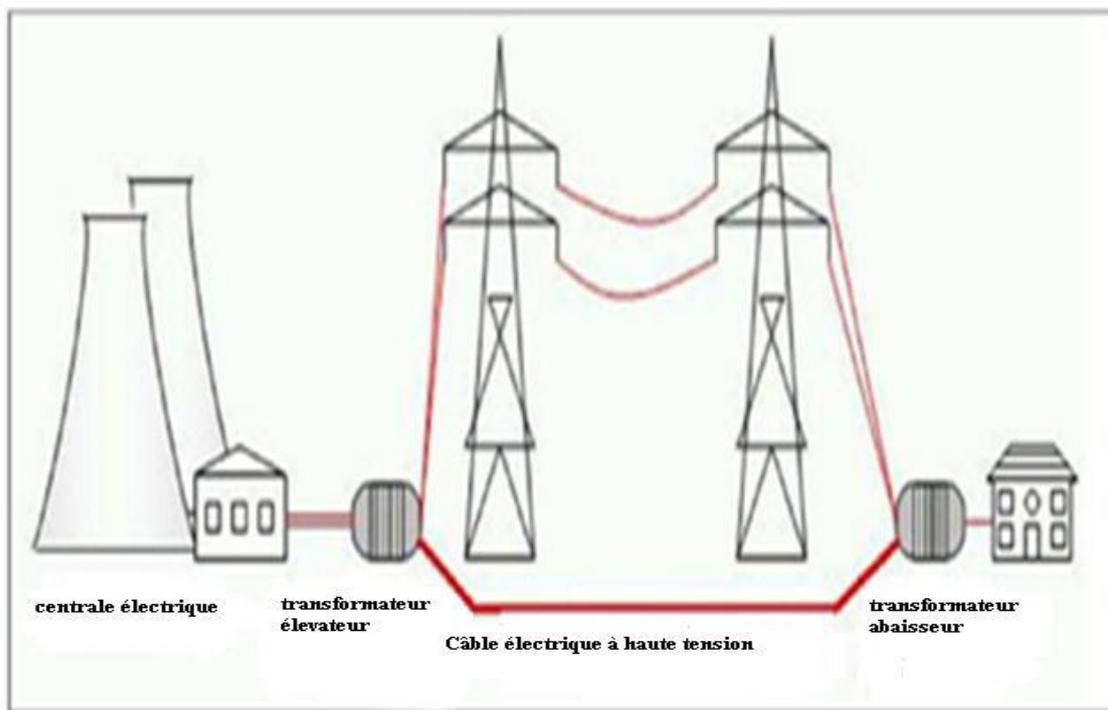
# Chapitre I

## Généralité sur les lignes de transport

## I.1 Introduction

La ligne à haute tension est le composant principal des grands réseaux de transport d'électricité. Elle transporte l'énergie par l'intermédiaire de l'électricité de la centrale électrique aux consommateurs. Ces lignes sont aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt ce terme aux liaisons aériennes. Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes. Ces supports peuvent être faits de métal.[4]

L'énergie électrique peut être transmise par les lignes aériennes ou les câbles souterrains. Le début de la technologie du câble électrique avait vu le jour aux années 1880, lorsque le besoin des câbles de distribution d'énergie est devenu pressant, suite à l'introduction de l'éclairage à incandescence. Avec la croissance urbaine et pour des considérations techniques et esthétiques, il est devenu de plus en plus d'ailleurs nécessaire de remplacer certaines lignes aériennes de transmission de puissance et distribution par les câbles souterrains.

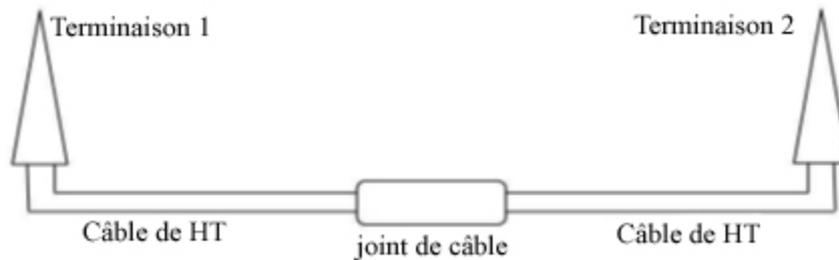


**Fig.I.1** : Lignes et Câbles électrique haute tension dans un réseau d'électricité.[5]

## I.2 Les câbles électriques

Le système du câble de puissance se compose essentiellement de câbles à haute tension nécessaires au transport de l'énergie (généralement trois, un par phase), et de leurs accessoires ; les jonctions de raccordement entre les différents tronçons de câbles,

et les terminales ou «têtes de câble» pour le raccordement de la liaison aux installations du poste à haute tension. Comme la montre la figure.I.2.[5]



**Fig.I.2** : Représentation simple du système de câble [5].

### I.2.1 Structure d'un câble électrique

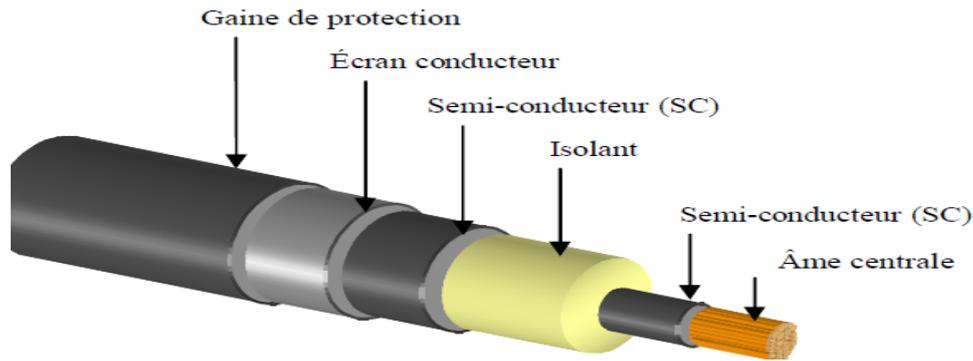
La structure de base d'un câble est représentée dans la figureI.3.

Les composants de base du câble sont :

- Le conducteur ;
- L'isolant électrique (diélectrique). ;
- Le blindage.

Le conducteur est principalement en cuivre ou en aluminium. Le cuivre a une meilleure conductivité, en particulier les grandes sections. Le conducteur est recouvert d'un écran de semi-conducteur qui unifie la surface du conducteur et diminue également les crêtes d'intensité du champ. L'écran permet également de réduire la contrainte thermique trouvée à l'isolation dans les régions de défaut. Sur l'écran conducteur, on trouve l'isolation du câble. Son but est de fournir une rigidité diélectrique suffisante pour le câble et de transférer la chaleur produite dans le conducteur. L'isolant à son tour est recouvert d'un écran de semi-conducteur. Au-dessus de l'écran semi-conducteur, on trouve la couche de blindage du câble.

Le blindage fonctionne comme une couche de protection contre les courants de défaut, il forme une protection mécanique. La structure du blindage dépend du type du câble et de l'objectif de l'utilisation. Le blindage peut être partagé ou individuel pour chaque phase. La dernière couche du câble est la gaine extérieure. Elle peut être en métal, en plastique ou en caoutchouc. [6]



**Fig.I.3** : structure d'un câble électrique [7].

### ❖ Le type de pose et l'écart entre les trois conducteurs du câble

Influencent également la façon dont sera dissipée cette chaleur. Elle dépendra notamment de l'intensité du courant et du niveau de tension.

Les principaux types de pose sont :

- la pose en trèfle (conducteurs rapprochés comme les feuilles d'un trèfle) ;
- la pose en nappe (conducteurs écartés les uns des autres pour permettre une bonne dissipation de la chaleur).

### I.2.2 Types d'isolants de câble

Les types d'isolants les plus connus utilisés dans les câbles sont en papier imprégné (PILC), polyéthylène (PE), polyéthylène réticulé chimiquement (XLPE), regardeur d'arborescence (TR- XLPE), Caoutchouc éthylène-propylène (EPR), et en polychlorure de vinyle (PVC).

### I.2.3 Les accessoires de câble

#### ❖ Importance de l'étude des accessoires de câble

Les accessoires tels que les terminaisons et les jonctions sont une partie importante dans le système du câble électrique. Bien que le câble soit beaucoup plus cher que les accessoires, ces accessoires affectent souvent la fiabilité du système de câble. Ils présentent des éléments essentiels à étudier pour plusieurs raisons :

- Ils sont soumis à des contraintes thermiques, électriques, mécaniques plus élevées ;
- La distribution du champ électrique sera complètement différente de la distribution du champ cylindrique électrique normal dans le câble ;

- La présence de l'interface entre l'isolant des câbles et celui des accessoires ;
- Il est beaucoup plus difficile ou plus coûteux de soumettre les accessoires à une procédure d'essai fiable que le câble lui-même.

Les accessoires doivent être installés sur le site où de nombreux facteurs externes peuvent influencer le processus d'installation.

### **I.2.3.a Jonctions**

L'ouvrage étant généralement composé de plusieurs longueurs de câbles, ces derniers doivent être reliés entre eux par des jonctions de puissance.

### **I.2.3.b Extrémités**

Les extrémités doivent raccorder les câbles isolés à des pièces nues dans un fluide isolant, soit dans les postes, soit sur les câbles de lignes aériennes, soit directement sur une traversée de transformateur.[8]

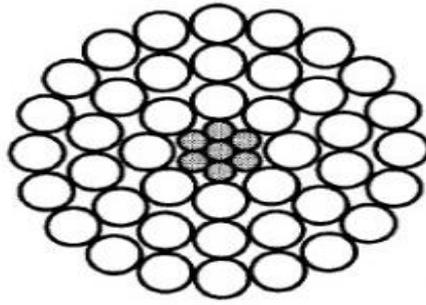
## **I.3 Composants du ligne THT**

### **I.3.1 Pylônes [2]**

Le pylône supportant deux lignes: trois paires de conducteurs et une paire de câbles de garde pour chaque ligne, avec chaînes d'isolation à 19 éléments. Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le coût. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager).

### **I.3.2 Conducteurs [9]**

Le courant électrique est transporté dans des conducteurs, généralement sous forme triphasée, avec au moins trois conducteurs par ligne. Pour une phase, on peut aussi trouver un faisceau de conducteurs (de deux à quatre) à la place d'un simple conducteur afin de limiter les pertes par effet couronne et d'augmenter la puissance pouvant transiter. Les conducteurs en cuivre sont de moins en moins utilisés. On utilise en général des conducteurs en alliage d'aluminium, ou en combinaison aluminium-acier pour les câbles plus anciens ; ce sont des conducteurs composés d'une âme centrale en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les conducteurs sont nus, c'est-à-dire non revêtus d'un isolant.



**Fig.I.4 :** Section d'un conducteur Aluminium/Acier. [9]

Les conducteurs utilisés en hautes tensions sont aériens ou souterrains. Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques, température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transmission, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique. [9]

### I.3.3 Isolateurs

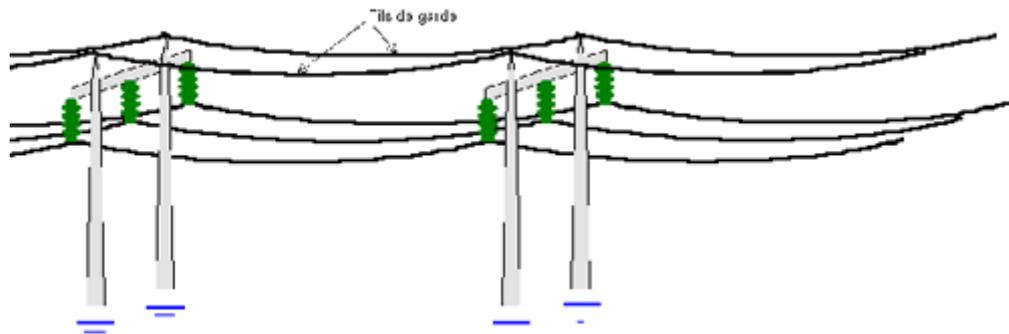


**Fig.I.5 :** Isolateurs rigides en verre.

La fixation et l'isolation entre les conducteurs et les pylônes sont assurées par des isolateurs, ils ont un rôle à la fois mécanique et électrique. Ceux-ci sont réalisés en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'un empilement d'assiettes. Il en existe deux types : les isolateurs rigides et les éléments de chaîne. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'assiettes est important.

### I.3.4 Câbles de garde

Les câbles de garde ne transportent pas le courant en état normale. Ils sont situés au-dessus des conducteurs. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre pour éviter une éventuelle surtension au niveau des conducteurs. Ils sont en général réalisés en alu-méc-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble en fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde. [2]



**Fig.I.6 :** câbles de garde pour chaque ligne, avec chaîne d'isolation.[2]

### I.4 Conclusion

Nous avons présenté les composants principaux des grands réseaux de transport d'électricité et les différents structure des câbles et lignes de transport d'énergie électrique.

# Chapitre II

## Généralité sur le transport de l'électricité en courant continu

## II.1 Introduction

Le transport de l'électricité en courant continu haute tension. Son utilisation est minoritaire par rapport au transport électrique à courant alternatif (AC) traditionnel de nos réseaux électriques. Son principal intérêt est de permettre le transport d'électricité sur de longues distances.



**FigII.1:** le transport de l'électricité en courant continu haute tension. [10]

Le transport se fait souvent sur deux conducteurs. Des fils de terre sont placés au sommet des pylônes de polarité inversée. Le retour se fait par des électrodes plongées dans l'eau salée pour les câbles sous-marins. [11]

## II.2 Pourquoi utiliser la haute tension

Tout transfert d'énergie impose d'utiliser un système de liaisons associant une grandeur de flux et une grandeur d'effort. Pour le transfert d'énergie par l'électricité, la grandeur d'effort est la tension et la grandeur de flux est l'intensité du courant. La plus grande partie de l'énergie perdue lors de ce transfert dépend de la grandeur de flux, responsable des pertes liées au déplacement. Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne et, également, d'améliorer la stabilité des réseaux. [2]

Les pertes en ligne sont principalement dues à l'effet Joule, qui ne dépend que de deux paramètres : la résistance et l'intensité du courant ( $P = R.I^2$ ). [2]

### II.3 Technologies de câbles en CCHT [12]

Comme dans le cas HVAC, les liaisons HVDC peuvent être aériennes ou enfouies. Les liaisons 'grande distance' et 'très haute tension' restent aujourd'hui en liaison aérienne pour des raisons techniques et économiques. Dans ce qui suit, nous présentons brièvement les différentes technologies de câble CCHT.

#### II.3.1 Câbles papier imprégné à isolation solide

Les câbles à papier imprégné (MI pour mass-impregnated), mis en œuvre à partir de papier isolant imprégné d'huile de viscosité élevée, ont été utilisés dans le projet Gotland HVDC en 1954. Le câble HVDC-MI reste à ce jour le câble le plus utilisé dans le domaine du HVDC principalement en raison de sa fiabilité. Ce type de câble est aujourd'hui disponible pour des tensions allant jusqu'à 500 kV et des courants jusqu'à 1600 A correspondant à une capacité maximale en termes de puissance de 800 MW pour une liaison unipolaire et 1600 MW pour une liaison bipolaire. La dimension des conducteurs est de l'ordre de  $2500 \text{ mm}^2$  (pour une transmission de 2 GW en configuration bipolaire). Ce type de câble a été récemment employé pour la réalisation de l'interconnexion sous-marine en courant continu entre l'Italie et la Grèce du projet Grita (connexion à 400kV, 500 MVA et longueur sous-marine de 160 km). Toutefois, les câbles MI subissent des phénomènes de contraction-dilatation sous l'effet des cycles d'échauffement et refroidissement dus à une grande différence de coefficient de dilatation des matériaux qui le constituent. Ces variations de volume ne sont pas compensées par une circulation de la matière d'imprégnation qui reste essentiellement immobile. Ces contraintes amènent à limiter la température maximale de fonctionnement des câbles à environ  $55^\circ\text{C}$  au conducteur, ce qui limite la capacité de transmission des câbles en comparaison à d'autres solutions.

#### II.3.2 Câbles papier imprégné à isolation fluide

Une alternative aux câbles MI est constituée par les câbles à isolation huile fluide (Self-Contained Fluid Filled cables - SCFF) utilisant du papier isolant imprégné d'huile synthétique à basse viscosité qui est maintenue constamment sous pression dans un conduit pratiqué dans le centre du conducteur. Ces câbles peuvent fonctionner à une température plus élevée, de  $85$  à  $90^\circ\text{C}$  et permettent ainsi de transporter une puissance plus importante. Evidemment, la présence d'un fluide en circulation impose l'adoption de circuits hydrauliques et de postes de pompage aux extrémités. La possibilité de refroidir le conducteur constitue le principal avantage du câble à huile fluide car cela permet de tripler sa capacité de transmission. La première utilisation du câble à huile fluide date de 1952. La Suède et la France ont été les premiers pays à adopter ce type de câble qui fonctionnait initialement à une tension de 400 kV (HVAC). La puissance transportée peut atteindre 10 MW sous une tension de 600 kV. La transmission de puissance est faite sur une distance de l'ordre de la centaine de km. En 2000, des

câbles sous-marins ont été installés au Japon avec une capacité de transmission de 2.8 GW, une tension de 500 kV et une longueur de 48,9 km. Ce type de câble fait l'objet aujourd'hui d'étude pour des tensions extra élevées supérieures à 1400 kV et des puissances de 3000 MW. Toutefois, des pannes ont été recensées sur les câbles à isolation papier liées à l'infiltration d'eau au niveau de la gaine de plomb due à des fissures ou à de la corrosion. L'isolation papier est également devenue aujourd'hui moins populaire en raison des problèmes environnementaux liés à l'utilisation de la gaine de plomb et des risques de fuite d'huile. Il ne fait pas de doute que l'utilisation des câbles à isolation papier jusqu'à la moitié du 20<sup>e</sup> siècle était liée au manque de matériaux extrudés de qualité satisfaisante et compétitifs.

### **II.3.3 Câbles à isolation mixte papier-polypropylène**

D'un développement plus récent, les câbles à isolation mixte papier-polypropylène (PPL) sont des câbles dont le système d'isolation est constitué de papier à haute densité imprégné d'un mélange visqueux, mais dont les couches de papier sont séparées par des films de polypropylène; cette solution de développement récent conjugue les performances des deux technologies précédentes. Le câble PPL a démontré la capacité à fonctionner pour un système de tension jusqu'à 600 kV et une température de 85°C.

### **II.3.4 Câbles à isolant synthétique extrudés**

La demande en isolations plus respectueuses de l'environnement et capables de fonctionner à température élevée a suscité le développement des câbles HVDC extrudés. L'extrusion est une technique permettant de déposer une couche uniforme et compacte d'isolant polymère autour du conducteur, prise en sandwich entre deux écrans semi-conducteurs. L'isolation de câbles à haute tension est obtenue par un procédé de Co-extrusion de l'isolant et des semi-conducteurs internes et externes, suivi, éventuellement, d'une phase de réticulation de l'isolant afin de lui conférer des propriétés thermomécaniques appropriées, comme dans le cas du polyéthylène réticulé (XLPE). Les câbles à isolant synthétique extrudés offrent des avantages significatifs par rapport aux câbles à isolation papier traditionnels, par exemple :

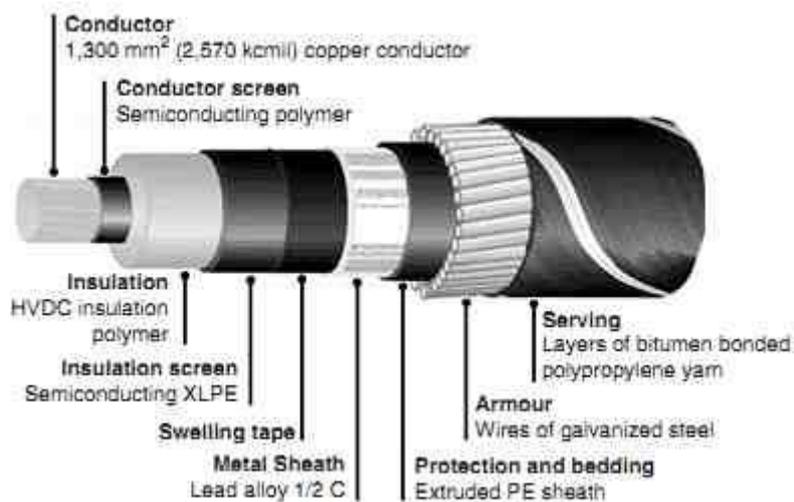
- La température du conducteur est plus élevée, ce qui donne un câble plus compact pour une même puissance transportée ;
- La barrière à l'humidité est plus compacte, donnant un câble plus léger;
- L'assemblage de câbles extrudés est beaucoup plus simple et nécessite moins de compétences ;
- L'utilisation des câbles extrudés évite les risques environnementaux importants à long terme associés à des fuites d'huile.

Le développement de ce type de câble, pour du transport en HVAC, s'amorça dans les années 1950 et a connu un essor important dans les années 1960 aux Etats-Unis, au Japon et dans les pays scandinaves. Dans les années 1970, les tests à long terme en tension DC ont été réalisés au Japon pour déterminer si les câbles XLPE, utilisés pour la transmission de courant alternatif (HVAC), pouvaient également être utilisés pour le transport HVDC. Les phénomènes d'accumulation de charge d'espace et l'inversion du champ électrique en présence de gradient de température constituaient les principaux obstacles à l'adaptation des câbles HVAC-XLPE au transport HVDC. L'étude des additifs destinés à améliorer la tenue en tension continue des isolations polymères a réellement débuté en 1984. Les composants comprennent un ensemble de retardateurs d'arborescence d'eau et des antioxydants. Les projets pour le développement de câbles HVDC à base de XLPE ont effectivement débuté en 1988 pour la tension de 250 kV et en 1993 pour la tension de 500 kV. En 1995, un test de qualification a été réalisé sur un câble 250 kV. En 2001, un autre essai de qualification a été réalisé sur des câbles XLPE de 500 kV pour vérifier leurs performances.

Le premier système de transmission HVDC au monde utilisant des câbles à isolant synthétique extrudé a été installé sur l'île de Gotland(en Suède) en 1999. Cette installation utilise des convertisseurs à source de tension (VSC). Cette solution évite le recours aux inversions de polarité (pour l'inversion du flux de puissance) limitant ainsi le risque de rupture de l'isolation du câble. Au cours des années 2001 à 2005, les câbles extrudés sont devenus le type de câble DC le plus utilisé pour les liaisons enfouies pour des tensions inférieures à 220 kV. Ainsi, à la fin de l'année 2005, les câbles polymères représentaient environ 59% de l'ensemble des câbles DC en service. Les efforts entrepris en recherche et développement ont permis d'améliorer grandement la fiabilité des câbles HVDC extrudés.

On dénombre aujourd'hui plusieurs installations ayant recours au câble HVDC à isolation synthétique (Figure II.7). A ce sujet, nous pouvons citer la liaison Murray Link en Australie mesurant 180 km de long et constituant à ce jour l'installation la plus longue au monde utilisant des câbles extrudés souterrains. Le système de transmission sous-marin Trans Bay Cable de San Francisco ou encore les liaisons souterraines et sous-marines (East West Interconnector) entre la Grande Bretagne et l'Irlande en sont également des exemples.

Le système de câble HVDC extrudé utilisant la technique VSC permet aujourd'hui d'atteindre une tension supérieure à 300 kV et une puissance de transmission de l'ordre du GW.



FigII.2 : Câble HVDC extrudé.

## II.4 Les avantages et les inconvénients [13]

### II.4.1 Les avantages

#### ❖ Alimenter et stabiliser un réseau à courant alternatif

La commande de la puissance à C.C peut se faire beaucoup plus rapidement. Par exemple, on peut en moins d'une seconde inverser des puissances de plusieurs centaines de mégawatts. La rapidité des systèmes de commande permet aussi de limiter les courants de court-circuit à des valeurs bien inférieures à celles rencontrées sur un réseau à CA. Enfin, cette réponse rapide permet d'utiliser une ligne à C.C pour alimenter et stabiliser un réseau à courant alternatif. Lorsque le réseau à C.A est sur le point de devenir instable suite à une perturbation, on peut moduler la puissance à C.C de façon à amortir les oscillations.

#### ❖ Transporter l'énergie sur des grandes distances

La capacitance des câbles limite le transport à CA à des distances de quelques dizaines de kilomètres. Au-delà de cette limite, la puissance réactive générée par les câbles excède même sa propre capacité. Comme la capacitance n'intervient pas lorsque la tension est continue, il n'existe, en théorie, aucune limite à la longueur des lignes et des câbles transportant l'énergie en CC. En particulier, on peut utiliser un câble souterrain pour transporter l'énergie à l'intérieur des grandes villes. Contrairement aux lignes aériennes, les câbles souterrains sont invisibles et à l'abri de la pollution, de plus ils permettent d'éviter le problème des droits de passage.

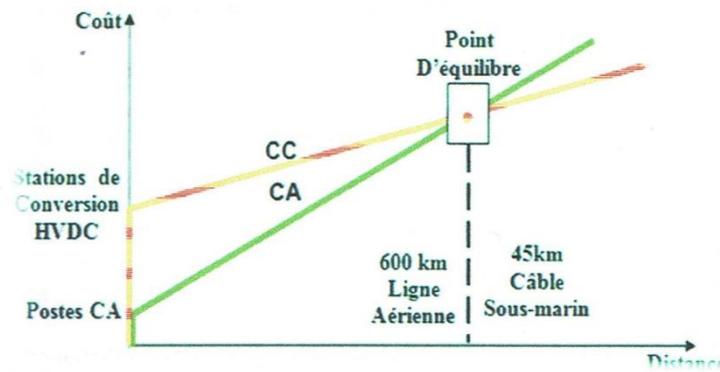
#### ❖ L'interconnexion asynchrone de deux systèmes d'alimentation

On ne peut relier deux réseaux que s'ils fonctionnent à la même fréquence. De plus, l'échange de puissance dans le transport CA est imposé par la réactance de la

ligne et le déphasage des tensions entre les deux extrémités. Par contre, la fréquence, la réactance et le déphasage n'interviennent pas dans le transport à C.C seule la résistance de la ligne et la différence des tensions entre les deux extrémités détermine la puissance transitée.

### ❖ Évaluation des coûts de la transmission

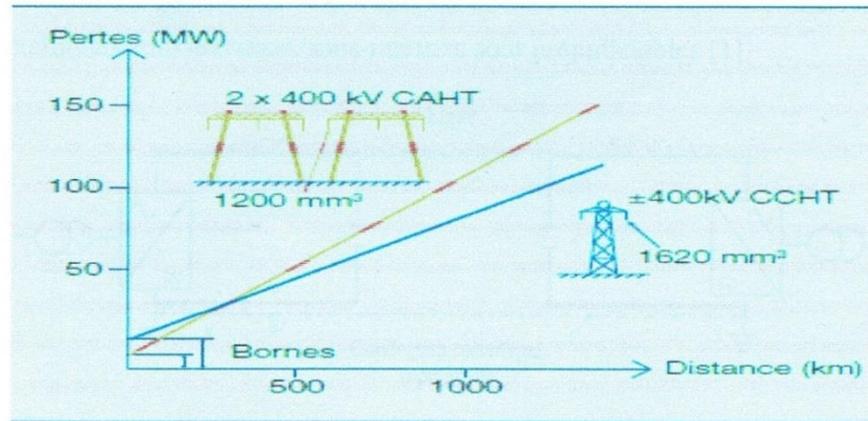
Lorsque les deux types de transmissions sont envisageables, la décision finale est prise en fonction du coût total des deux alternatives. Ce coût inclut entre autres celui des lignes (conducteurs, isolateurs, pylône) et celui de l'exploitation. Dans les conditions indiquées par T. La figure II.8 montre que le coût d'une transmission **CCHT** est plus faible que celui d'une transmission **CA** pour des distances supérieures à 500 km.



**FigII.3** : Coût d'une transmission en fonction de la longueur d'une ligne. [13]

### ❖ Pertes minimales

Les pertes d'un système HVDC apparaissent deux niveaux : en ligne et aux bornes des convertisseurs AC-DC. Ces dernières représentent environ 1 à 1.5% de l'énergie transitée, ce qui est peut comparativement aux pertes en ligne, qui sont fonction de la résistance des conducteurs et de l'intensité du courant. Sachant qu'il n'y pas de transfert de puissance réactive sur les liaisons continues, les pertes en ligne du HVDC sont inférieures à celles du AC. Dans la quasi-totalité des cas, les pertes totales en régime continu sont à transit de puissance égal ou inférieures à celles de l'alternatif.



**FigII.4** : Les liaisons HVDC perdent moins d'énergie sur la distance que leurs homologues HVDC. [13]

### II.4.2 Les inconvénients

La demande de transmission d'énergie CCHT est limitée par des facteurs tels que:

- a) Haut coût de l'équipement de conversion ;
- b) Incapacité d'utiliser des transformateurs pour modifier les niveaux de tension ;
- c) Génération des harmoniques ;
- d) Besoin d'une source de puissance réactive ;
- e) Complexité des contrôles.

Au fil des ans, il y a eu des avancées significatives de technologie à courant continu, qui ont permis de pallier les inconvénients énumérés ci-dessus, sauf pour l'inconvénient cité en b. Les progrès de la technologie à courant continu sont les suivants:

- Augmentation de la cote d'une cellule de thyristor qui constitue une valve ;
- Système de conversion à 12 pulsations ;
- Utilisation de la commutation forcée.

**Tab II.1**-Comparaison entre DC et AC [14]

DC	AC
Phénomènes électromagnétiques négligeables (puissance réactive, effet de peau, effet de couronne, effet Ferranti,...)	Existence de phénomènes électromagnétiques (puissance réactive, effet de peau, effet de couronne, effet Ferranti,...)
Moins encombrant (nombre de conducteurs, filtres,...)	Encombrant

## II.5 Conclusion

La technologie CCHT se développe rapidement et devient de plus en plus répandue. C'est un élément clé du réseau du futur, les « Smart grids », qui non seulement facilite l'insertion des énergies renouvelables mais participe aussi aux services systèmes.

La technologie de CCHT, permet d'avoir un marché libre, grâce au contrôle rapide et précis qui permet le changement flexible de la fréquence et du sens de transit de puissance. Le CCHT est La technologie d'avenir pour le transport d'électricité.

L'électronique de puissance est un levier essentiel pour faire évoluer la technologie CCHT (une puissance élevée, transmission longue distance, moins de pertes, moins cher,...).

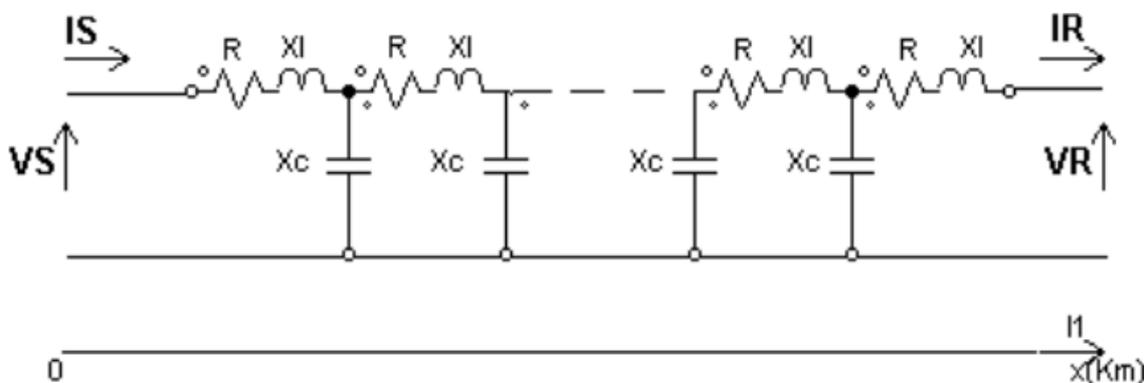
# Chapitre III

## Modélisation et étude des lignes de transport en régime permanent

### III.1 Introduction [17]

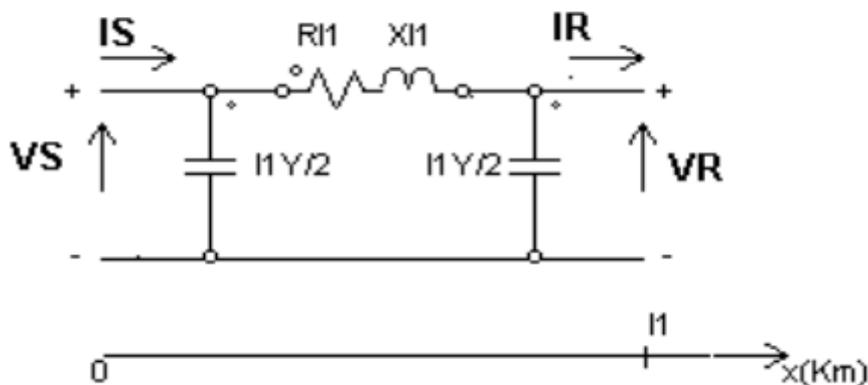
Nous considérons que la structure d'une ligne de transport est telle que ses propriétés électriques par unité de longueur sont pratiquement constantes. Alors si nous désirons étudier le comportement d'une ligne de longueur  $l$ , il faudra multiplier les paramètres de cette ligne (la résistance ( $R$ ), réactance inductive ( $X_L$ ) et réactance capacitive ( $X_C$ )) par unité de longueur de la ligne.

Lorsque la tension d'opération et la longueur ( $l$ ) d'une ligne sont telles que le courant de fuite (causé par le champ électrique) entre les conducteurs et la structure métallique du pylône (le long des isolateurs) n'est plus négligeable, alors il nous faut tenir compte de l'effet capacitif de cette ligne. Cet effet capacitif sera représenté par des condensateurs shunt, uniformément distribués le long de la ligne, comme nous montre la figure (Fig III.1).



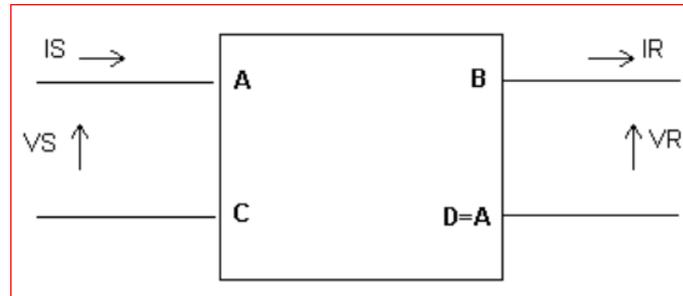
**Fig III.1** -Impédance ( $Z = R + jX.$ ) et admittance ( $Y = j/X_C$ ) par unité de longueur d'une ligne de transport monophasée . [15]

Nous considérons cette ligne comme étant un nombre fini d'impédances séries ( $Z$ ) et d'admittances ( $Y$ ). Etant donné la complexité de ce circuit, nous devons simplifier davantage le circuit de la Figure III.1 en le représentant par le circuit équivalent de la figure III.2.



**Fig III.2** -Circuit équivalent de la ligne de transport. [15]

Nous remarquons que le circuit équivalent de la figure III.2 est un quadripôle en pi ( $\Pi$ ). Comme nous savons, un quadripôle est toujours défini par ses paramètres A, B, C et D (Figure III.3).



**Fig III.3** - Quadripôle défini par ses paramètres A, B, C et D. [15]

Pour déterminer les caractéristiques à la source ( $V_S$  et  $I_S$ ) du circuit équivalent, il suffit de résoudre le système d'équations suivant:

$$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

Le système d'équations (III.1) établit les relations entre l'entrée et la sortie du quadripôle de la figure III.3. Mais d'abord, il faut déterminer les paramètres A, B, C et D de ce quadripôle à l'aide de méthodes de calculs ou par simple inspection du circuit équivalent. Expérimentalement, nous déterminons ces constantes à l'aide de l'essai à vide et de l'essai en court-circuit d'une ligne.

Pour une charge quelconque, connectée à la sortie d'une ligne, il sera possible d'obtenir les caractéristiques  $V_S$  (tension à l'entrée) et  $I_S$  (courant à l'entrée), à l'aide du système d'équations (III.1). A partir de ces caractéristiques, nous déterminerons les puissances ( $P_S$  et  $Q_S$ ) que la source (centrale électrique poste de transformation) aura à fournir pour que la charge soit satisfaite en tout temps.

### III.2 Caractéristique générale sur une ligne électrique [2]

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive, et capacitive (sa résistance série  $r_0$ , sa réactance série  $x_0$  sa susceptance shunt  $b_0$ , et sa conductance shunt  $g_0$ , exprimés par unité de longueur).

#### III.2.1 La résistance

La résistance ohmique  $r_0$  exprimée en  $\Omega$ , d'un conducteur homogène de longueur  $l$  (en m), de section uniforme  $s$  (en  $\text{mm}^2$ ) et de résistivité  $\rho$  ( $\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$ ) est donnée par la formule :

$$r_0 = \rho \cdot \frac{l}{s} \quad (\text{III.2})$$

Les formulaires, ainsi que les prescriptions des organismes de normalisation indiquent généralement les valeurs de la résistivité des conducteurs à 20 °C ( $t_{20}$ ) ou à 0 °C ( $t_0$ ). Pour une autre température  $t_t$  comprise entre -100 et +100 °C, on calcule la valeur de la résistivité  $\rho_{t_t}$  par la relation :

$$\rho_{t_t} = \rho_{20} [1 + \alpha_{20}(t - 20)] \quad (\text{III.3})$$

$\alpha_{20}$  : Étant le coefficient de température de la résistivité à 20 °C.

### III.2.2 La réactance

Elle dépend de l'inductance et de la fréquence du réseau :

$$x_0 = 2. \pi. f. L_0 \quad (\text{III.5})$$

L'inductance linéique  $L_0$  est donnée par la relation :

$$L_0 = \left[ 0.5 + 2. \ln \frac{DMG}{r_e} \right] \cdot 10^{-4} \quad (\text{III.6})$$

On note pour un faisceau de  $n$  conducteurs par phase, la réactance linéique :

$$x_0 = 0.1445 \log \frac{DMG}{r_e} + \frac{0.0157}{n} \quad (\text{III.7})$$

$r_e$  : Rayon équivalent du faisceau de conducteurs.

$DMG$  : Distance moyenne géométrique des phases.

### III.2.3 La susceptance

La susceptance de la ligne triphasée est liée à l'effet capacitif de chaque phase par rapport à la terre (l'effet capacitif entre les phases est faible devant l'effet capacitif entre phase terre), et elle dépend de la capacité linéique  $C_0$  et de la fréquence  $f$  du réseau :

$$b_0 = 2. \pi. f. C_0 \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$C_0 = \frac{10^{-6}}{18 \log(DMG/r_e)} \quad (\text{III.9})$$

La susceptance linéique  $b_0$  est donnée par la relation :

$$b_0 = \frac{7.58}{\log(DMG/r_e)} \cdot 10^{-6} \quad (\text{III.10})$$

### III.2.4 La conductance

Pour les lignes dont la tension nominale est supérieure à 220 kV, il est nécessaire de déterminer la conductance qui représente les pertes par effet couronne.

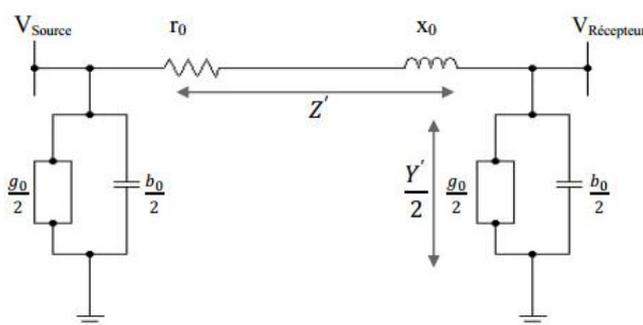
$$g_0 = \frac{\Delta P_c}{U_n^2} \quad (\text{III.11})$$

$\Delta P_c$  : Pertes de puissance active par effet couronne en.

Avec ces quatre paramètres, la ligne peut être représentée par un quadripôle. Pour les longues lignes nous utilisons le schéma en *PI* qui est montré à la Figure III.4.

Le schéma est composé par :

- ❖ L'impédance longitudinale  $Z'$  (composée de la résistance linéique  $r_0$  et de la réactance linéique  $x_0$ ) ;
- ❖ L'admittance transversale  $Y'$  (composée de la susceptance linéique  $b_0$  et de la conductance linéique  $g_0$ ).



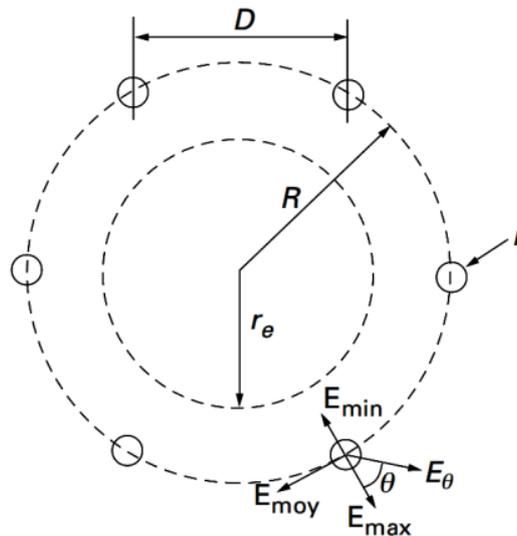
**Fig III.4** -Schéma équivalent d'une ligne aérienne. [2]

### III.3 Faisceau de conducteur

L'utilisation des faisceaux de conducteurs est largement répandue dans les lignes de transport d'énergie, surtout lorsque la tension de la ligne est élevée, supérieure à 300 kV. Elles sont équipées presque exclusivement de faisceaux de plusieurs conducteurs par phase.

Les faisceaux de conducteurs sont constitués de fils parallèles retenus par des entretoises, ce qui les branchent électriquement en parallèle. Ils offrent deux avantages :

- diminution de l'inductance série de la ligne ;
- diminution du champ électrique autour du conducteur, réduisant l'effet couronne.



**Fig III.5** -Grandeurs caractéristiques d'un faisceau de conducteurs. [18]

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes la figure III.6 :

- $r$ : Rayon des conducteurs élémentaires ;
- $n$  : Nombre de conducteurs élémentaires ;
- $R$ : Rayon géométrique (rayon du cercle passant par les centres de tous les conducteurs) ;
- $D$ : Distance entre deux conducteurs consécutifs :

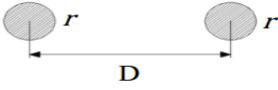
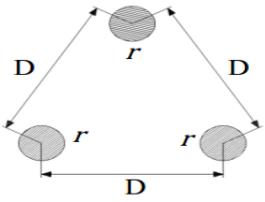
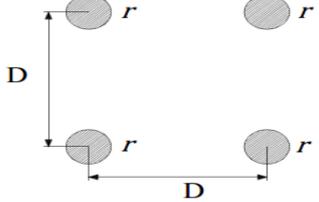
$$D = 2R \sin \frac{\pi}{n} \quad (\text{III.12})$$

- $r_e$ : Rayon équivalent. C'est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants. Il est donné par l'expression suivante :

$$r_e = \sqrt[n]{n \cdot r \cdot R^{n-1}} \quad (\text{III.13})$$

Un conducteur de phase peut être constitué d'un faisceau de 2 ou plusieurs conducteurs de mêmes diamètres, disposés symétriquement les uns par rapport aux autres. Dans ce cas, il est utile de connaître le rayon équivalent du faisceau (**Tab III.1**).

**Tab III.1** : Rayon équivalent de conducteurs en faisceau. [16]

Disposition			
Relation	$r_e = (r \cdot D)^{\frac{1}{2}}$	$r_e = r^{\frac{1}{3}} \cdot D^{\frac{2}{3}}$	$r_e = 2^{\frac{1}{8}} \cdot r^{\frac{1}{4}} \cdot D^{\frac{3}{4}}$

Pour calculer le champ superficiel des conducteurs d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale  $Q$  de celui-ci, en introduisant son rayon équivalent  $r_e$  dans les expressions des coefficients du potentiel. Le gradient moyen d'un conducteur est alors donné par :

$$E_{moy} = \frac{1}{n} \frac{Q}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot r} \quad (\text{III.14})$$

Où :

$$Q = C \cdot U_n \quad (\text{III.15})$$

Avec :

$C$  : Capacité linéique de fonctionnement de la ligne;

$U_n$  : Tension nominale de la ligne;

$\epsilon_0$  : Permittivité du vide.

Puisque la charge totale du faisceau se répartit également sur les  $n$  conducteurs du faisceau, par effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur, et plus faible vers l'intérieur du faisceau. On définit donc le champ maximal et le champ minimal des conducteurs, obtenus respectivement par les expressions :

$$E_{max} = E_{moy} \left[ 1 + \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (\text{III.16})$$

$$E_{min} = E_{moy} \left[ 1 - \frac{(n-1)r}{R} \right] \quad (\text{III.17})$$

On admet généralement que le champ varie autour du conducteur de la façon suivante la

Figure III.5 :

$$E_{\theta} = E_{moy} \left[ 1 + \frac{(n-1)r}{R} \cdot \cos \theta \right] \quad (\text{III.18})$$

La majorité des auteurs subdivise l'étude des lignes de transport théoriquement en trois catégories :

❖ **Les lignes courtes** : longueur inférieure à 80 km ( $l < 80$  km);

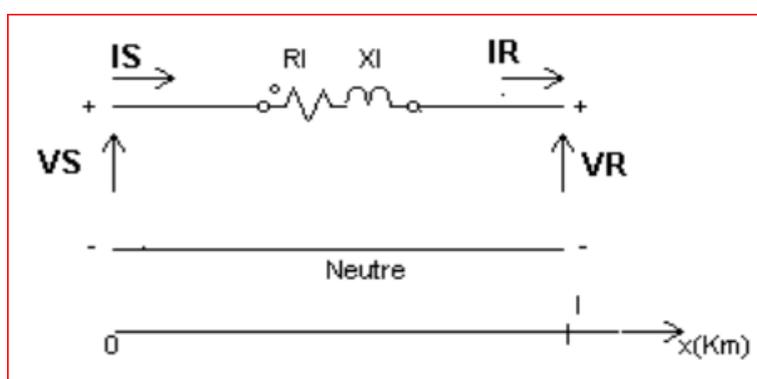
- ❖ **Les lignes moyennes** : longueur inférieure à 240 km ( $240 \text{ km} > l > 80 \text{ km}$ );
- ❖ **Les lignes longues** : plus de 240 km de long ( $l > 240 \text{ km}$ ).

### III.4 Lignes courtes [15]

Pour une ligne courte, l'effet capacitif de la ligne est négligeable. Cependant, nous devons tenir compte de l'effet inductif de la ligne qui sera représentée dans notre modèle par une inductance et de la résistance des conducteurs de la ligne.

#### III.4.1 Circuit équivalent de la ligne

Une ligne courte est représentée par le circuit équivalent ligne neutre de la figure III.6.



**Fig III.6** -Circuit équivalent monophasé d'une ligne courte. [15]

Les paramètres du circuit monophasé de la figure III.6 sont définis comme suit :

- $R$  = résistance d'un conducteur, exprimée en ohm par kilomètre ;
- $X_L$  = réactance inductive d'un conducteur, exprimée en ohm par kilomètre.

Pour des conducteurs en faisceau ou des lignes en parallèle, pour le calcul de la réactance inductive de la ligne à l'aide de la formule suivante :

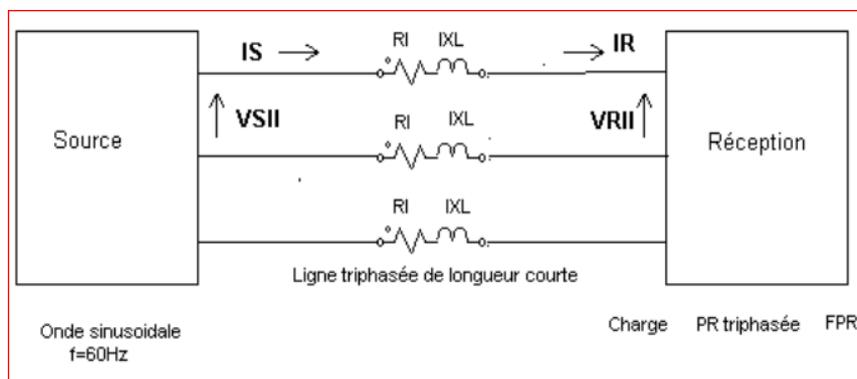
$$X_L = 0.1736 \log \left[ \frac{GMD}{GMR} \right] (\Omega/\text{km}) \quad (\text{III.19})$$

#### ➤ Données

- **GMR** : Rayon géométrique moyen (en anglais : **Geometric Mean Radius**)
- **GMD** : Distance géométrique moyenne entre deux groupes de conducteurs (en anglais : **Geometric Mean Distance**)

### III.4.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne

Soit le réseau de la figure III.7, constitué d'une ligne courte triphasée, opérant en régime sinusoïdal à la fréquence industrielle de 60 Hertz.

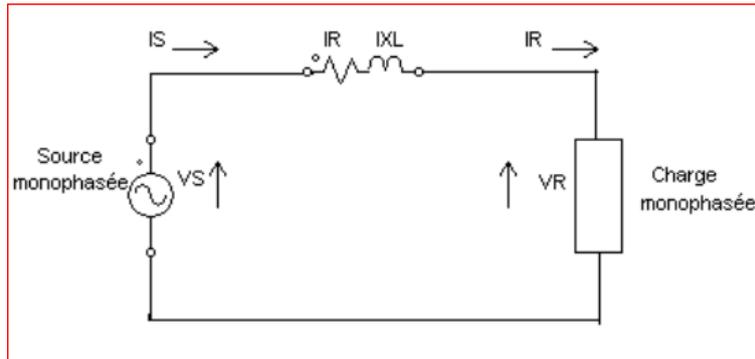


**Fig III.7** -Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur courte. [15]

Les caractéristiques du réseau de la figure III.7 sont définies comme suit:

- $V_{SLL}$  = tension de ligne à ligne (entre phases) à la source;
  - $V_{RLL}$  = tension de ligne à ligne (entre phases) à la réception;
  - $I_S$  = courant de ligne à la source;
  - $I_R$  = courant de ligne à la réception;
  - $P_{S3\phi}$  = puissance active triphasée à la source;
  - $P_{R3\phi}$  = puissance active triphasée à la réception;
  - $Q_{S3\phi}$  = puissance réactive triphasée à la source;
  - $Q_{R3\phi}$  = puissance réactive triphasée à la réception;
  - $\cos \Phi_S$  = facteur de puissance à la source;
  - $\cos \Phi_R$  = facteur de puissance à la charge.
- **Données**
- Caractéristiques à la réception:  $P_{R3\phi}$  (W),  $V_{RLL}$  (V),  $\cos \Phi_R$  (en avant ou en arrière) ;
  - Paramètres de la ligne courte:  $l$ ,  $R$ ,  $X_L$ .

Pour résoudre le réseau de la figure III.7 en se servant du circuit monophasé d'une ligne courte, nous devons représenter la figure III.7 par le circuit monophasé de la figure III.7.



**Fig III.8** -Circuit monophasé représentant le réseau de la figure III.7. [15]

Par simple inspection du circuit de la figure III.8, nous déterminons les relations qui nous permettent de trouver les caractéristiques à la source.

Nous trouvons:

$$I_S = I_R \quad (\text{III.20})$$

$$V_S = V_R + I_R (l R + j l X L) \quad (\text{III.21})$$

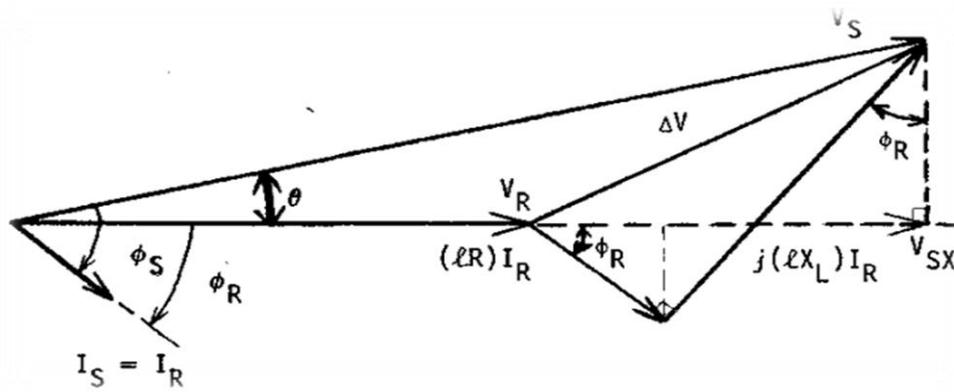
à l'aide des caractéristiques à la réception, nous déterminerons le courant de ligne à la réception  $I_R$  comme suit :

$$I_R = \frac{P_{R3\phi}}{\sqrt{3} V_{RLL} \cos \phi_R} \angle \phi_R \quad (\text{II.22})$$

Où le signe de  $\Phi_R$  est négatif lorsque le facteur de puissance à la réception est en arrière, et positif lorsque le facteur de puissance à la réception est en avant.

Etant donné que nous avons à résoudre un circuit monophasé, nous devons diviser la tension ligne-ligne à la réception ( $V_{RLL}$ ) par  $\sqrt{3}$  pour obtenir la tension ligne-neutre à la réception ( $V_R$ ). Les relations (III.20) et (II.21) peuvent maintenant être résolues.

Pour une charge ayant un facteur de puissance en arrière, les relations (III.20) et (III.21) sont représentées par le diagramme vectoriel de la figure III.9. C'est le cas qui se présente le plus souvent dans la réalité.



**Fig III.9-** Diagramme vectoriel d'une ligne courte avec un facteur de puissance à la réception en arrière. [15]

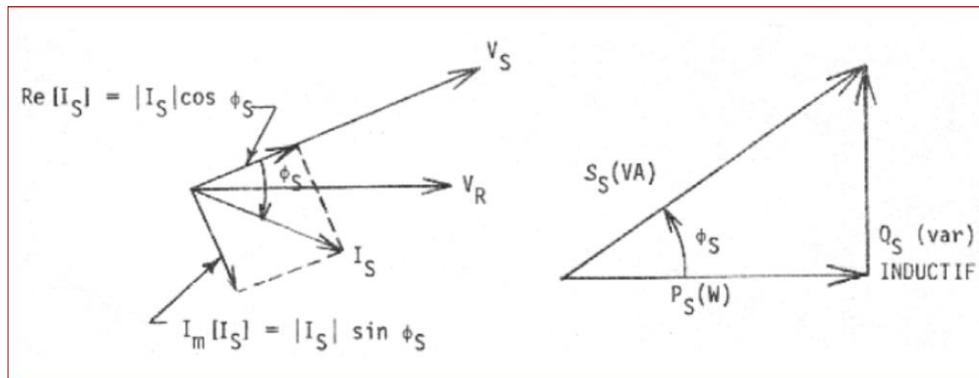
Ce diagramme vectoriel illustre les courants et les tensions aux extrémités de la ligne par rapport à l'axe de référence qui est la tension ligne-neutre à la réception ( $V_R$ ). A l'aide de ce diagramme vectoriel, nous déterminons l'angle  $\Phi_S$  formé par la tension ligne-neutre à la source ( $V_S$ ) et le courant de la ligne à la source ( $I_S$ ). Cet angle nous permet de déterminer le facteur de puissance à la source. Nous trouvons:

$$\phi_s = \phi_R + \theta \tag{III.23}$$

Connaissant les caractéristiques à la source, nous sommes en mesure de déterminer les puissances que doit fournir la source pour que la charge soit satisfaite.

### III.4.3 Expressions des puissances aux extrémités de la ligne

Les formules correspondant à la puissance apparente  $S$ , à la puissance active ( $P_s$ ) et à la puissance réactive ( $Q_s$ ) peuvent être représentées géométriquement par le triangle des puissances à la figure III.11. Les trois cotés  $S$ ,  $P$  et  $Q$  du triangle des puissances peuvent se déduire du produit  $V_s I_s^*$ : ce produit est une grandeur complexe appelée puissance complexe  $S_s$ .



**Fig III.10-** Les valeurs des puissances paraissant dans le triangle des puissances. [15]

(Facteur de puissance en arrière) sont obtenues par le diagramme vectoriel montré à sa gauche (voir figure. III.9).

Nous définissons la puissance complexe monophasée à la source comme suit:

$$S_s = P_s + j Q_s = V_s I_s^* \quad (\text{III.24})$$

où  $I^*$  signifie le conjugué de  $I_s$ .

La relation (III.22) peut s'écrire aussi:

$$S_s = |V_s| |I_s| e^{j\phi_s} \quad (\text{III.25})$$

La relation (III.23) nous donne la puissance apparente monophasée à la source.

Nous avons:

$$S_s = |S_s| = |V_s I_s^*|$$

Pour obtenir la puissance active monophasée à la source ( $P_s$ ), nous savons par définition que:

$$P_s = \text{Re}[S_s] = \text{Re}[V_s I_s^*]$$

d'où l'on obtient:

$$P_s = |V_s| |I_s| \cos \phi_s \quad (\text{III.26})$$

de même, pour la puissance réactive monophasée à la source ( $Q_s$ ), nous savons que :

$$Q_s = \text{Im}[S_s] = \text{Im}[V_s I_s^*]$$

d'où l'on obtient :

$$Q_s = |V_s| |I_s| \sin \phi_s \quad (\text{III.27})$$

Pour un système triphasé, la formule (III.26) devient :

$$P_{S3\phi} = 3 |V_s| |I_s| \cos \phi_s \quad (\text{III.28})$$

Si nous désirons connaître les puissances à la réception, nous appliquons les mêmes formules qui servent à déterminer les puissances à la source sauf que l'indice "S" devient "R".

#### III.4.4 Pertes de puissance dans la ligne

Connaissant la puissance active triphasée à la source ( $P_{S3\phi}$ ) ainsi qu'à la réception ( $P_{R3\phi}$ ), nous sommes alors en mesure de calculer les pertes par effet Joule dans les conducteurs.

Nous déterminons les pertes par effet Joule à l'aide de la relation suivante:

$$\Delta P_{L3\phi} = 3(P_S - P_R)$$

ou

$$\Delta P_{L3\phi} = P_{S3\phi} - P_{R3\phi} \quad (\text{III.29})$$

De même, connaissant la puissance réactive triphasée à la source ( $Q_{S3\phi}$ ) ainsi qu'à la réception ( $Q_{R3\phi}$ ), nous pouvons déterminer la puissance réactive inductive absorbée par l'inductance de la ligne, à l'aide de la relation suivante:

$$\Delta Q_{L3\phi} = 3(Q_S - Q_R)$$

Ou

$$\Delta Q_{L3\phi} = Q_{S3\phi} - Q_{R3\phi} \quad (\text{III.30})$$

### III.4.5 Rendement de la ligne

Un autre facteur important dans l'exploitation d'une ligne est le rendement de la ligne. Nous définissons le rendement d'une ligne comme étant le rapport entre la puissance active demandée à la réception et la puissance active fournie par la source. Le rendement d'une ligne triphasée est donné par la formule suivante:

$$\eta = \frac{P_{R3\phi}}{P_{S3\phi}} = \frac{P_{R3\phi}}{P_{R3\phi} - \Delta P_{L3\phi}} \quad (\text{III.31})$$

### III.5 Ligne de longueur Moyenne [15]

Contrairement à la ligne courte, l'effet capacitif d'une ligne de longueur moyenne n'est plus négligeable et nous devons en tenir compte dans notre modèle. L'effet capacitif de cette ligne sera représenté dans notre modèle par deux condensateurs identiques, placés respectivement à l'entrée et à la sortie de la ligne.

#### III.5.1 Circuit équivalent de la ligne

Une ligne de longueur moyenne est représentée par le circuit équivalent ligne-neutre de la figure III.13

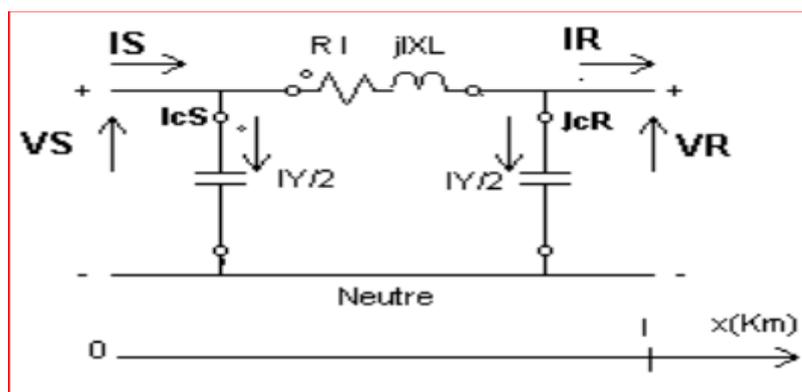


Fig III.11 - Circuit équivalent monofilaire d'une ligne de longueur moyenne. [17]

Les paramètres du circuit monophasé de la figure III.13 sont définis comme suit:

- R = résistance d'un conducteur ;
- $X_L$  = réactance inductive d'un conducteur;
- Y = admittance de la ligne.

L'impédance d'un conducteur par unité de longueur est exprimée par la relation suivante:

$$Z = R + j X_L \quad (\text{III.32})$$

L'admittance de la ligne par unité de longueur est exprimée par la relation suivante:

$$Y = G + j WC \quad (\text{III.33})$$

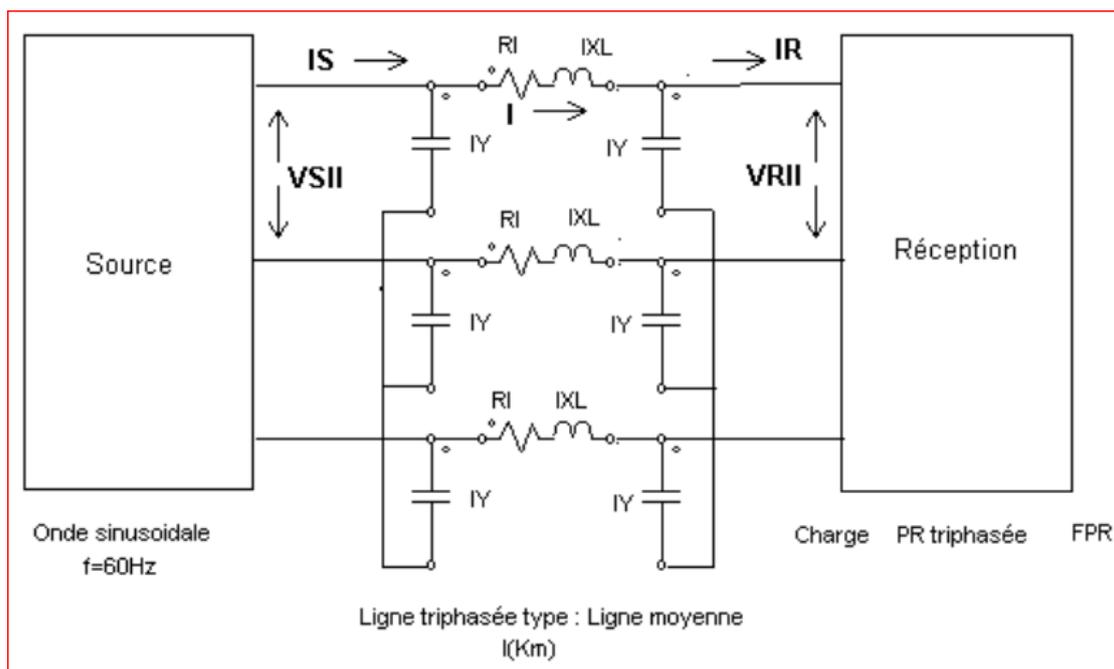
Ou

- $G$  = conductance d'un conducteur;
- $C$  = capacitance d'un conducteur.

Cependant, la conductance de la ligne représentant les pertes dues à l'effet couronne, à l'imperfection de l'isolation, peut être négligée dans les conditions normales.

### III.5.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne

Soit le réseau de la figure III.12, constitué d'une ligne triphasée de longueur moyenne. Le réseau opère en régime sinusoïdal à la fréquence industrielle de 60 Hertz.



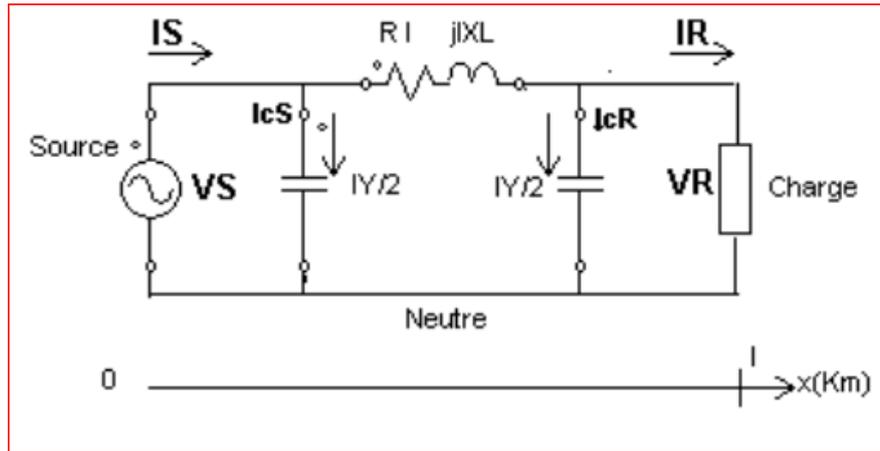
**Fig III.12** - Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur moyenne. [15]

Les caractéristiques du réseau de la figure III.12 ont déjà été définies à la section III.4.2. Nous verrons cependant qu'il existe trois autres caractéristiques à définir pour une ligne de longueur moyenne. Connaissant les caractéristiques à la réception, nous désirons connaître les caractéristiques à la source. Avant de déterminer ces caractéristiques, nous exposons clairement le problème de la façon suivante:

#### ➤ Données

- Caractéristiques à la réception:  $P_R$  3 $\Phi$  (W),  $V_{RLL}$  (V),  $\cos \Phi_R$  (en avant ou en arrière) ;
- Paramètres de la ligne courte:  $l$ ,  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ .

Pour résoudre le réseau de la figure III.12 en se servant du circuit monophasé d'une ligne de longueur moyenne, nous devons représenter la figure III.12 par le circuit monophasé de la figure III.13.



**Fig III.13** - Circuit monphasé représentant le réseau de la figure III.12 [15]

Par simple inspection du circuit monphasé de la figure III.12, nous déterminons les relations qui nous permettent de trouver les caractéristiques à la source.

Nous trouvons:

$$V_S = V_R + I_R (R + j X_L) \quad (\text{III.34})$$

$$I_S = I_R + I_{CS} \quad (\text{III.35})$$

Ou

$I_{CS}$  : Courant de fuite à la source causé par l'effet capacitif de la ligne.

$I$  : Courant parcourant la ligne.

Nous obtenons le courant de fuite à la source par la relation suivante:

$$I_{CS} = V_S \frac{lY}{2} \quad (\text{III.36})$$

Par une relation identique à la relation (III.35), mais du côté de la réception, nous avons:

$$I = I_R + I_{CR} \quad (\text{III.37})$$

ou

$I_{CR}$  : Courant de fuite à la réception causé par l'effet capacitif de la ligne.

Nous obtenons le courant de fuite à la réception par la relation suivante:

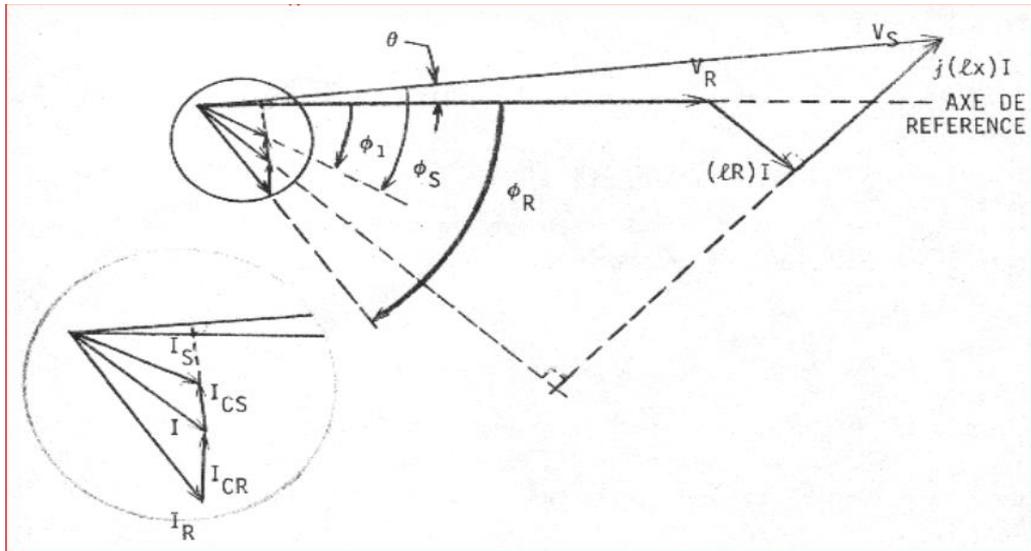
$$I_{CR} = V_R \frac{lY}{2} \quad (\text{III.38})$$

Les caractéristiques du circuit monphasé de la figure III.13 sont maintenant toutes définies. Les relations (III.34) et (III.35) deviennent finalement:

$$V_S = \left(1 + \frac{l^2 ZY}{2}\right) V_R + lZI_R \quad (\text{III.39})$$

$$I_S = \left(1 + \frac{l^2 ZY}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{l^2 ZY}{2}\right) I_R \quad (\text{III.40})$$

Pour une charge ayant un facteur de puissance en arrière à la réception, nous représentons les relations (III.34), (III.35) et (III.36) par le diagramme vectoriel de la figure III.14. Evidemment, c'est le cas qui se présente le plus souvent dans la réalité. A la figure III.14, nous avons pris comme axe de référence, la tension à la réception ( $V_R$ ).



**Fig III.14** - Diagramme vectoriel d'une ligne de longueur moyenne avec un facteur de puissance à la réception en arrière. [15]

A l'aide du diagramme vectoriel de la figure III.14, nous pouvons déterminer l'angle  $\phi_S$  formé par la tension ligne-neutre à la source ( $V_S$ ) et le courant de ligne à la source ( $I_S$ ). Cet angle nous permet de déterminer le facteur de puissance à la source. Nous trouvons:

$$\phi_S = \phi_1 + \theta \quad (\text{III.41})$$

Connaissant les caractéristiques du réseau ainsi que les paramètres de la ligne, il est possible de déterminer les puissances circulant dans le circuit de la figure III.13.

### III.5.3 Expressions des puissances de la ligne

Les puissances aux extrémités de la ligne sont déterminées à l'aide des relations (III.24) à (III.30). De plus, les pertes par effet Joule dans les conducteurs sont déterminées par la relation (III.31). Nous allons expliquer davantage les puissances réactives absorbées et générées par la ligne car, maintenant, la ligne possède des condensateurs qui génèrent de la puissance réactive capacitive, ce qui n'était pas le cas pour une ligne courte.

La puissance réactive absorbée par l'inductance de la ligne est obtenue par la formule suivante:

$$\Delta Q_{L\phi} = 3 * (IX_L)^2 \quad (\text{III.42})$$

Les puissances réactives générées par les condensateurs à la source et à la réception sont obtenues par les formules suivantes:

$$Q_{C3\phi} = 3 * |V_S|^2 \frac{1Y}{2} \quad (\text{III.43})$$

$$Q_{C3\phi} = 3 * |V_R|^2 \frac{1Y}{2} \quad (\text{III.44})$$

Dans la pratique, nous considérons que la puissance réactive générée par le condensateur à l'entrée de la ligne est égale à celle générée à la sortie de la ligne. Ceci étant dû au fait que la tension à la charge est à toute fin pratique égale à celle à la source.

### III.6 Lignes longues [15]

A la section III.1, nous avons mentionné que les paramètres d'une ligne par unité de longueur étaient pratiquement constants. Nous avons tenu compte de cette considération dans nos modèles représentant les lignes courtes et celles de longueur moyenne.

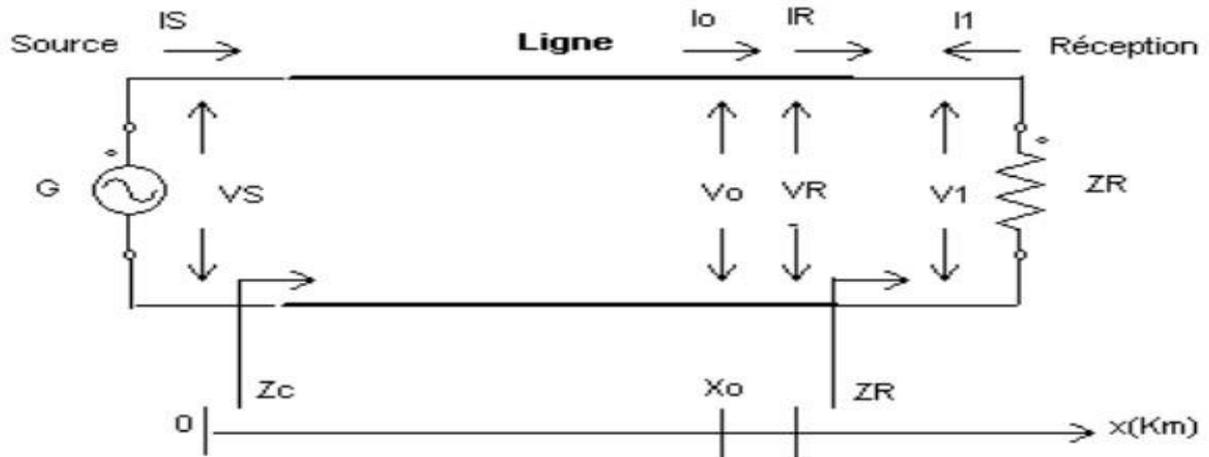
La méthode de calcul utilisée pour résoudre une ligne courte était basée sur le fait que le courant parcourant la ligne est le même partout et, que les chutes de tension par unité de longueur causées par la résistance et la réactance de la ligne sont constantes le long de la ligne. Nous avons fait de même pour la ligne de longueur moyenne et de plus, nous avons assumé que l'effet capacitif de la ligne était uniformément distribué le long de la ligne.

#### III.6.1 Impédance caractéristique d'une ligne

#### III.6.2 Signification physique

Lorsque nous appliquons une tension à l'entrée d'une ligne ( $V_S$ ), il y a une distribution de cette tension le long de la ligne ( $V(x)$ ). Cependant, cette tension est constituée de deux tensions. L'une qui voyage de la source à la réception que nous appelons, onde incidente et l'autre, qui voyage en sens inverse, c'est-à-dire de la réception vers la source, que nous appelons onde réfléchie. Chacune de ces tensions est accompagnée par un courant respectif. Le rapport de chaque tension au courant correspondant,  $S$  n'importe quel endroit de la ligne, est une constante, laquelle est indépendante de la longueur de la ligne mais fonction de l'impédance série et de l'admittance de la ligne par unité de longueur. Nous appelons cette constante, impédance caractéristique de la ligne, désignée par  $Z_C$ .

A la Figure III.16, une ligne possédant une impédance caractéristique ( $Z_C$ ) est terminée à la réception sur une impédance  $Z_R$  différente de  $Z_C$ .



**Fig III.15** -Ligne terminée sur une impédance autre que son impédance caractéristique. [15]

Les ondes incidentes  $V_0$  et  $I_0$ , à une distance  $x$  de l'origine, voyagent en direction de la réception. Elles sont caractérisées par la relation suivante:

$$\frac{V_0}{I_0} = Z_C \tag{III.45}$$

Lorsqu'elles rencontrent l'impédance  $Z_R$ , il doit y avoir des ondes réfléchies ( $V_1$  et  $I_1$ ), dans la direction de la source, pour qu'à la réception nous ayons la relation suivante:

$$\frac{V_R}{I_R} = Z_R \tag{III.46}$$

Ou

$V_R$  et  $I_R$  sont les ondes totales à la réception par conséquent, à la réception nous devons avoir :

$$I_0 + I_1 = I_R \tag{III.47}$$

$$V_0 + V_1 = V_R \tag{III.48}$$

Evidemment, ici nous nous intéressons à savoir ce qui se passe à la réception. Mais pour un endroit quelconque de la ligne, nous déterminons les ondes totales à l'aide des équations (31) et (32) (voir l'annexe), ou encore, par les équations (25) et (26) (voir l'annexe).

$$V(x) = ch[-\gamma(x-l)]V_R + Z_C sh[-\gamma(x-l)]I_R \tag{III.49}$$

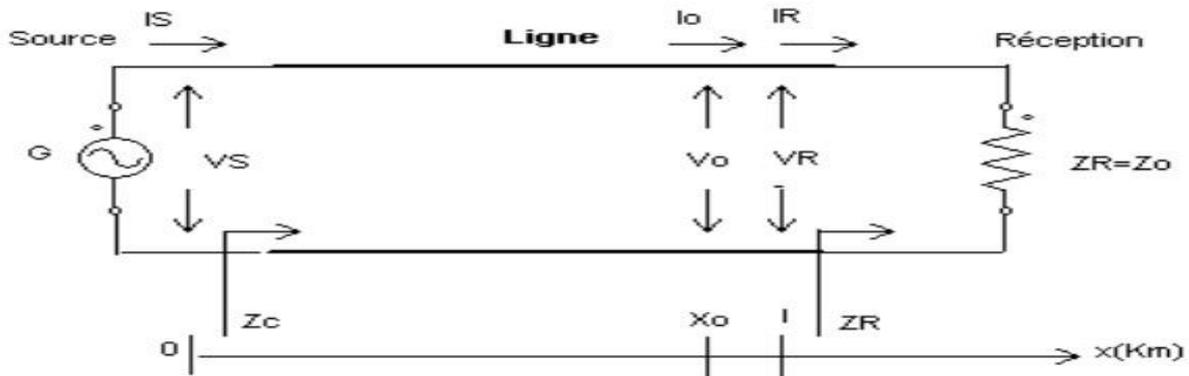
$$V(x) = \frac{1}{Z_C} sh[-\gamma(x-l)]V_R + Z_C ch[-\gamma(x-l)]I_R \tag{III.50}$$

Ou

$$V(x) = \frac{1}{2} [V_R + Z_C I_R] e^{-\gamma(x-l)} + \frac{1}{2} [V_R - Z_C I_R] e^{+\gamma(x-l)} \tag{III.51}$$

$$I(x) = \frac{1}{2Z_C} [V_R + Z_C I_R] e^{-\gamma(x-l)} + \frac{1}{2Z_C} [V_R - Z_C I_R] e^{+\gamma(x-l)} \tag{III.52}$$

Lorsqu'une ligne est terminée sur son impédance caractéristique, comme montrée à la Figure III.17, il n'y a plus d'ondes réfléchies.



**Fig III.16-** Ligne terminée sur son impédance caractéristique. [15]

Evidemment, il n'y a plus d'ondes réfléchies car nous avons:

$$\frac{V_0}{I_0} = \frac{V_R}{I_R} = Z_C \quad (\text{III.53})$$

De plus, à l'aide des équations (II.51) et (II.52), nous pouvons démontrer:

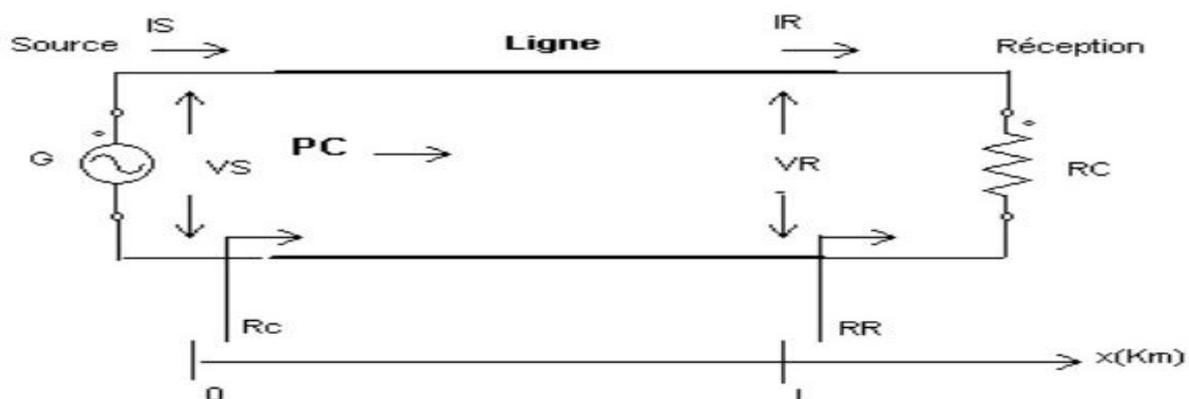
$$\frac{V(x)}{I(x)} = Z_C, \text{ quel que soit } x \quad (\text{III.54})$$

La relation (III.54) nous montre que l'impédance caractéristique d'une ligne de longueur  $l$  est l'impédance vue d'une extrémité si cette ligne se prolonge à l'infini.

La valeur de l'impédance caractéristique est sensiblement constante pour des lignes à très haute tension de 60 à 400 kV constituée d'un conducteur par phase.

### III.6.3 Puissance caractéristique d'une ligne

Soit la ligne sans pertes de la Figure III.20, terminée sur sa résistance caractéristique



**Fig III.17 -**Ligne sans perte terminée sur sa résistance caractéristique. [15]

A l'aide de la formule (III.54), nous pouvons écrire :

$$\frac{V_X}{I_X} = R_C, \text{ quel que soit } x \quad (\text{III.55})$$

Cela signifie que la source ne voit que la résistance caractéristique de la ligne et par conséquent, génère de la puissance active en fonction de cette résistance. Etant donné que la résistance caractéristique est purement résistive, cela implique que le facteur de puissance, à n'importe quel endroit de la ligne, est unitaire. C'est-à-dire:

$$\cos \emptyset = 1, \text{ quel que soit } x \quad (\text{III.56})$$

Alors, la puissance réactive inductive demandée par la ligne est compensée par la puissance réactive capacitive générée par la ligne. Il n'y a donc aucune compensation provenant de l'extérieur de la ligne.

A l'aide des équations (III.20) et (III.21), ou encore par les équations (25) et (26), nous pouvons démontrer que l'amplitude de la tension le long de la ligne est la même. Il en est de même pour le courant. Autrement dit, nous avons:

$$|V_S| = |V_R| = |V_X| = |V|, \text{ quelque soit } x.$$

$$|I_S| = |I_R| = |I_X| = |I|, \text{ quelque soit } x.$$

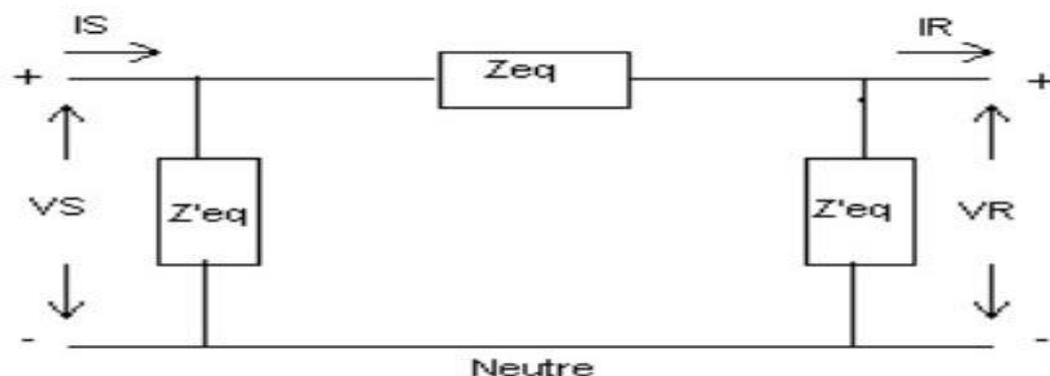
La puissance active fournie par la source est donnée par :

$$P_S = \frac{V^2}{R_C} = P_R = P_C \quad (\text{III.57})$$

Cette puissance active s'appelle puissance caractéristique de la ligne, désignée par  $P_C$ .

### III.6.4 Circuit équivalent d'une ligne longue

Une ligne longue peut être représentée par le circuit de la Figure III.21



**Fig III.18** - Circuit équivalent en  $\Pi$  d'une ligne longue. [15]

Par la loi de Kirchhoff concernant les courants, nous trouvons à l'aide de la Figure III.20, la relation suivante :

$$I_R = \frac{V_S - V_R}{Z_{eq}} - \frac{V_R}{Z'_{eq}} \quad (\text{III.58})$$

En regroupant les termes, nous avons:

$$I_R = \frac{V_S}{Z_{eq}} - V_R \left( \frac{1}{Z_{eq}} + \frac{1}{Z'_{eq}} \right) \quad (\text{III.59})$$

De plus, nous avons la relation suivante:

$$V_S = AV_R + BI_R$$

Où A et B sont des constantes de la quadri pôle d'une ligne longue.

Cette relation, écrite autrement, devient:

$$I_R = \frac{V_S}{B} - \frac{AV_R}{B} \quad (\text{III.60})$$

En identifiant les termes de la relation (III.59) avec ceux de la relation (III.60), nous avons:

$$\frac{1}{Z_{eq}} + \frac{1}{Z'_{eq}} = \frac{A}{B} \quad (\text{III.61})$$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{B} \quad (\text{III.62})$$

A l'aide des relations (III.61) et (III.62), nous obtenons finalement:

$$Z_{eq} = B \quad (\text{III.63})$$

$$Z'_{eq} = \frac{B}{A-1} \quad (\text{III.64})$$

$Z_{eq}$  et  $Z'_{eq}$  sont les impédances du circuit équivalent de la Figure III.20.

### III.8 Conclusion

Nous avons présenté les différentes Caractéristiques de la ligne électrique, les trois catégories de la ligne (courte, moyenne, longue) et son Circuit équivalent, Méthode de calcul des caractéristiques, et nous avons aussi présenté la théorie de la modélisation de différents types de lignes de transport d'énergie, dont la connaissance de ces paramètres est important pour l'analyse des réseaux électriques.

# Chapitre VI

## Amélioration du facteur de puissance

## VI.1 Introduction

Le transport de la puissance réactive par les lignes électriques cause des pertes, une diminution de la stabilité du réseau et une chute de tension à son extrémité. Afin d'éviter cela, de la compensation de puissance réactive, série ou shunt selon les cas, est utilisé pour limiter ce transport de puissance réactive. Différents appareils électriques peuvent servir à réaliser cette compensation : machines synchrones, batteries de condensateurs, inductance ou FACTS. [3]

## VI.2 L'effet Ferranti [17]

### VI.2.1 Définition

L'effet Ferranti est un phénomène où la tension à l'extrémité ouverte d'une ligne de transmission sans compensation est toujours supérieure à la tension débitée par la centrale, ou la tension résultante augmente en fonction de l'augmentation de la longueur de ligne.

### VI.2.2 Détails

L'effet Ferranti est causé par l'effet capacitif de la ligne, les lignes électriques ont une certaine capacité par rapport à la terre. Une capacité de ligne peut être représentée par un condensateur entre le conducteur de phase et la terre, si le conducteur de phase est raccordé à une source de courant alternatif mise à la terre, l'effet capacitif se traduirait par la circulation d'un courant réactif dans la ligne.

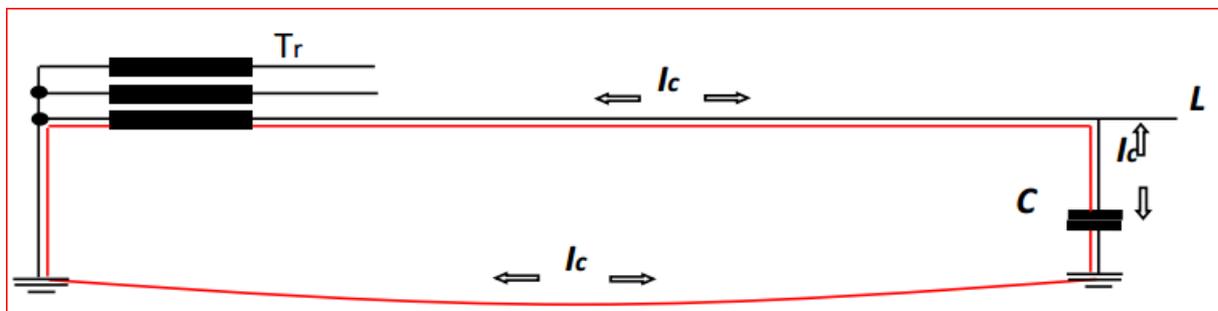


Fig. VI -1. Cause de l'effet ferranti.

La valeur du courant  $I_c$  généré par l'effet capacitif est en fonction de la tension par rapport à la terre, c'est-à-dire de la tension de phase  $U_{ph}$ , de la capacité de ligne  $C$  et de la fréquence  $f$  de la source de courant.

La formule permettant de calculer le courant capacitif est :

$$I_c = U_{ph} \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \quad (IV.1)$$

$$C = (\pi \cdot \epsilon \cdot L) / \log(2D/d) \quad (IV.2)$$

D : distance phase/sol.

L : longueur de la ligne.

$\varepsilon$  : permittivité de l'air.

$d$  : diamètre de la ligne.

$C$  : capacité.

### **VI.3 Amélioration de Cos $\Phi$ [18]**

L'amélioration du Cosinus Phi doit passer par l'installation d'un moyen de compensation qui constitue la solution la plus efficace : très généralement une ou plusieurs batteries de condensateurs.

#### **Un mauvais Cosinus Phi:**

- Accroît les chutes de tension dans les câbles,
- Augmente les pertes par effet joule lors du transport de l'énergie électrique,
- Entraîne une surfacturation par une surconsommation ou une pénalité,
- Dégrade la capacité de transport de l'énergie électrique par des câbles,
- Entraîne un surdimensionnement des installations neuves : câbles, transformateur,
- Entraîne des renforcements prématurés des installations existantes.

#### **VI.3.1 Amélioration par utilisation de compensateurs spéciaux**

- Compensation synchrone : les machines synchrones peuvent être utilisées comme compensateurs de l'énergie réactive.
- Condensateurs : les condensateurs utilisés comme source d'énergie réactive sont généralement fabriqués à puissance plus petite que celui des machines synchrones. Ils peuvent être groupés en série ou en parallèle pour donner la puissance désirée. La capacité d'un condensateur est d'autant plus faible que la tension est plus élevée. Dans les installations triphasées, on emploie des batteries composées chacune de trois condensateurs branchées en triangle.

#### **VI.3.2 Amélioration sans utilisation de compensateurs spéciaux**

C'est la solution la plus rationnelle et économique. Les méthodes sont :

1. Remplacement des moteurs asynchrones ayant des puissances nominales beaucoup plus grandes que la charge réelle par des moteurs plus petits.
2. Le fonctionnement de la majorité des systèmes électromécaniques à moteur asynchrone se caractérise par la marche à vide pour un certain temps (50 à 65% du temps total de fonctionnement). Il est utile de diminuer ce temps en débranchant le moteur si le temps est suffisamment long. Par suite la compensation de l'énergie active et particulièrement réactive diminuera.
3. Diminution de la tension d'alimentation des moteurs à charge réelle plus petite que la charge nominale.
4. Amélioration de la réparation capitale des moteurs asynchrones : pendant la réparation des moteurs asynchrones il faut faire attention des données nominales du moteur, des schémas d'enroulement statorique.

5. Remplacement des transformateurs : on substitue ou on réarrange les transformateurs en service : lorsque l'on a des transformateurs en parallèle il faut débrancher un ou plusieurs unités dans les heures à petite charge.

### VI.3.3 Amélioration par filtrage

Les techniques d'atténuation des harmoniques sont classées en trois catégories : les techniques passives, les techniques actives et les techniques hybrides.

## VI.4 Avantages dus à l'amélioration du facteur de puissance

- Diminution de la facture d'électricité ;
- Optimisation des choix technico économiques ;
- Diminution de la section des câbles ;
- Diminution des pertes en ligne ;
- Réduction de la chute de tension ;
- Augmentation de la puissance disponible.

## VI.5 Compensation d'énergie réactive par la méthode classique

Presque tous les consommateurs d'énergie électrique non nécessitent seulement de la puissance active mais aussi de la puissance réactive.

Dans la plupart des cas, la puissance réactive a effet inductive pour créer des champs magnétiques, qui sont nécessaires à tous les actionnaires électriques de l'énergie électriques, par exemple

Comme la puissance active, cette puissance réactive doit être générée par des générateurs et transmise aux consommateurs. Dû au fait que la transmission de la puissance réactive provoque aussi des pertes de puissance active à la résistance ohmique du système de transmission, les compagnies d'électricité essaient de garder le facteur de puissance  $\cos \varphi$  des consommateurs aussi hautes que possible (c'est-à-dire dans le voisinage de la valeur **1**). Même un  $\cos \varphi$  de valeur inférieure à 0,9 conduit à une augmentation notable dans le courant apparent et ainsi des pertes de puissance active.

## VI.6. Les différents Moyens de compensation

La compensation d'énergie réactive peut se faire :

- par condensateurs fixes (si la puissance des condensateurs est inférieure à 15% de la puissance du transformateur) ;
- par batteries de condensateurs à régulation automatique (si la puissance des condensateurs est supérieure à 15% de la puissance du transformateur), qui permettent l'adaptation immédiate de la compensation aux variations de la charge.

La compensation peut être : [19]

- **Globale** : La batterie de condensateurs est raccordée en tête de l'installation et reste en service de façon permanente. Ce mode de compensation convient lorsque la charge est stable et continue.
- **Partielle** : la batterie de condensateurs est raccordée au tableau de distribution et fournit l'énergie réactive par atelier ou par groupe de récepteur. Ce mode de compensation convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.
- **Individuelle** : La batterie de condensateurs est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur du type inductif, notamment les moteurs. Elle convient lorsque la puissance de certains récepteurs est très importante par rapport à la puissance totale, elle offre le plus d'avantages.

## VI.7. Les type de compensations par des condensateurs [20]

### VI.7.1. Compensation Parallèle

Au moyen d'une connexion parallèle d'une capacité d'entrée, le facteur de puissance d'une charge mixte ohmique-inductifs peuvent être améliorées. Le courant capacitif réactif du condensateur compense la composante inductive du consommateur actuel.

Le principe de cette compensation parallèle, fréquemment utilisé dans la pratique, est représenté dans la figure suivante ; pour des raisons de simplification, la capacité opérationnelle de la ligne n'a pas été prise en considération :

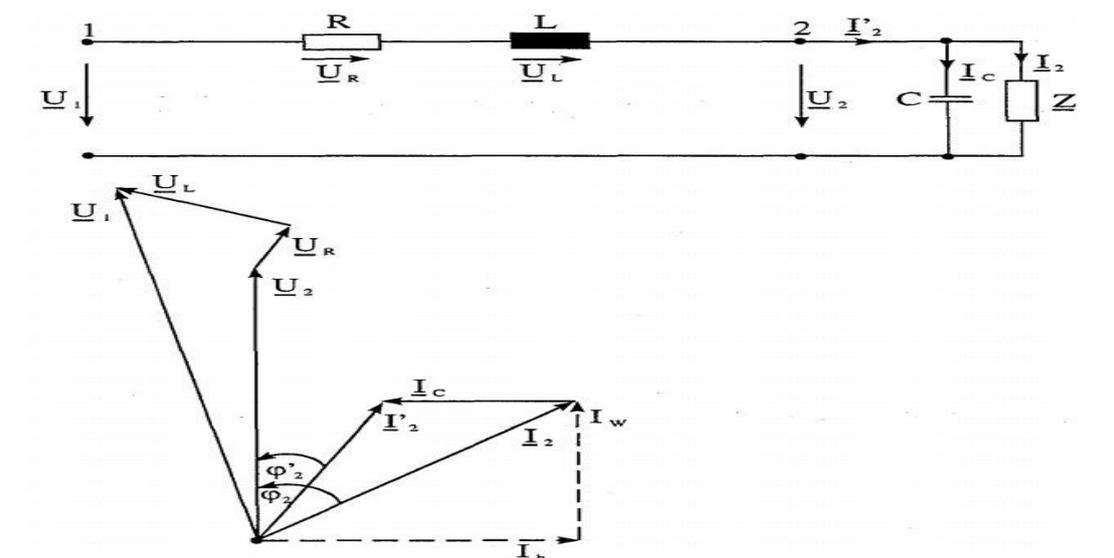
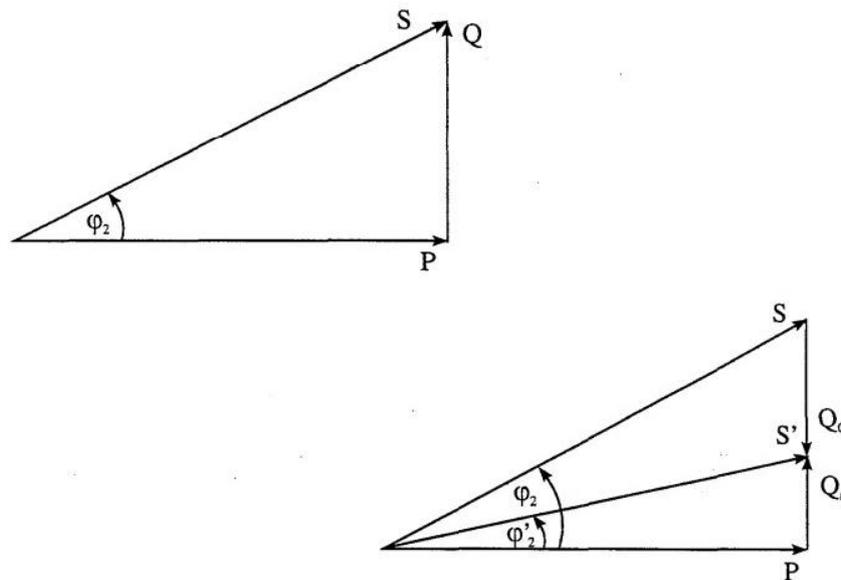


Fig. VI -2 : Compensation d'énergie réactive au moyen de condensateurs parallèles et le diagramme vectoriel correspondant.

La puissance réactive capacitive  $I_C$  du condensateur partiellement ou totalement compense la composante réactive  $I_b$  la charge actuelle, selon la valeur de  $C$ . Pour des raisons ayant trait à des échelles tarifaires, une indemnisation complète n'est pas d'utilité pour les services publics d'électricité. Compensation n'est réalisée pour une résiduelle puissance réactive  $Q'$ , auquel cas un facteur de puissance  $\cos \varphi'_2$  vient d'atteindre, pour laquelle aucune énergie réactive ne doivent être payé.

Pour les valeurs de puissance qui sont non compensée ou partiellement compensé, les diagrammes vectoriels suivants sont valides ( $P, Q, S$  = active, réactive et la puissance apparente du consommateur,  $\cos \varphi_2$  = facteur de puissance du consommateur, sans indemnité et le  $\cos \varphi'_2$  = facteur de puissance avec compensation) :



**Fig. VI -3** : Facteur de puissance avec un fonctionnement sans compensation et partiellement compensé.

La puissance de compensation  $Q_C$  nécessaire pour améliorer le facteur de puissance de l'angle  $\varphi_2$  à l'angle  $\varphi'_2$  en peut déduire le diagramme vectoriel ci-dessus :

$$Q_C = P (\tan \varphi_2 - \tan (\varphi'_2)) \quad (\text{IV.3})$$

De là, la capacité nécessaire des trois capacités individuelles d'un système de compensation en connexion en étoile peut être déduite :

$$C = \frac{Q_C}{\omega \cdot 3U_N^2} \quad (\text{IV.4})$$

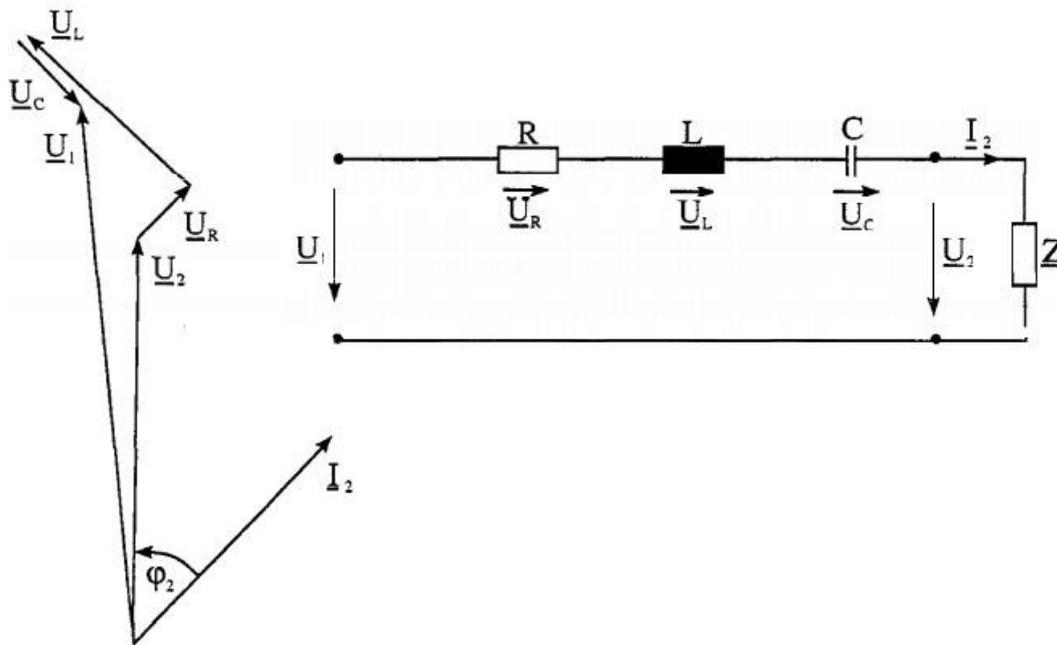
Compensation parallèle est selon la charge. Dans la pratique les condensateurs sont connectés ou déconnectés selon l'état de charge. Dans la détermination de la capacité nécessaire en compensation pour les câbles et les lignes aériennes depuis longtemps, la moitié de la capacité opérationnelle doit également prendre en considération si nécessaire.

Si chaque consommateur est compensé individuellement, puis nous nous référons à la rémunération individuelle. Si un système commun de condensateur est utilisé pour la compensation d'une série de consommateurs par exemple, pour tous les lecteurs d'un utilisateur industriel - puis nous nous référons à compensation centrale ou en groupe. Une fois de plus, il doit être possible de connecter et déconnecter des condensateurs individuels, afin d'adapter le système de compensation aux différentes conditions de charge.

### VI.7.2. Compensation Séries

Une autre tâche est remplie par les condensateurs série dite. Ils sont utilisés pour compenser l'inductance de lignes plus longues et donc de réduire la chute de tension sur la ligne de transmission. Cependant, les pertes de transmission survenant ne peuvent être réduites à l'aide de ce type d'indemnité.

Pour illustrer ce principe, il suffit à nouveau pour étudier une ligne sans la capacité de fonctionnement :



**Fig. VI -4 :** Compensation d'énergie réactive à l'aide de condensateur de série et le diagramme vectoriel correspondant.

Chute de la tension  $\Delta U$  entre  $U_1$  au début de la ligne et  $U_2$  à la fin de la ligne peut être divisée en une composante directe-axe  $\Delta U_1$  et une composante en quadrature  $\Delta U_q$ , comme illustré sur la Figure. IV-7 ; la composante en directe est toujours beaucoup plus petite que la composante en quadrature :

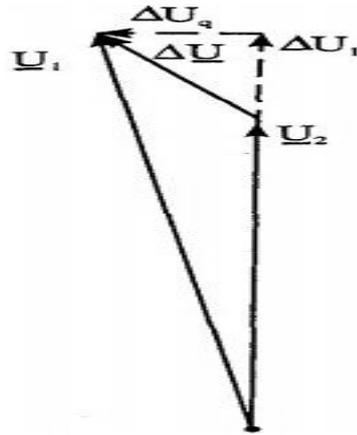


Fig. VI -5 : Division de la chute de tension sur une ligne en un axe direct et une composante en quadrature-axe.

### VI.8 Etude d'une ligne électrique haute tension par un Banc d'Essai

Le banc d'essai pour réseau électrique est un système de transit complet pour l'analyse de réseaux électriques et Il est composé d'un transformateur triphasé, un modèle de ligne triphasé de différente longueur et des appareils de mesures pour indiquer le courant la tension ,la puissance et le facteur de puissance.

#### ➤ Objectifs

- ❖ Voir et comprendre le comportement d'une ligne électrique haute tension avec différents modelés de ligne (longue, moyenne et courte) à vide ;
- ❖ Etudier le comportement d'une ligne électrique en court-circuit et en charge.

#### VI.8.1 Les essais expérimentaux

##### ➤ Matériels utilisés

- Transformateur triphasé ;
- Alimentation triphasé avec disjoncteur ;
- Module ligne de transmission 380 KV ;
- Instrument Multimètre ;
- câbles d'expérience de sécurité ;
- câbles, rouge/bleu ;
- câbles d'expérience de sécurité, vert/jaune ;
- Jeu de cavaliers de sécurité, noir ;
- Jeu de cavaliers de sécurité, vert/jaune.

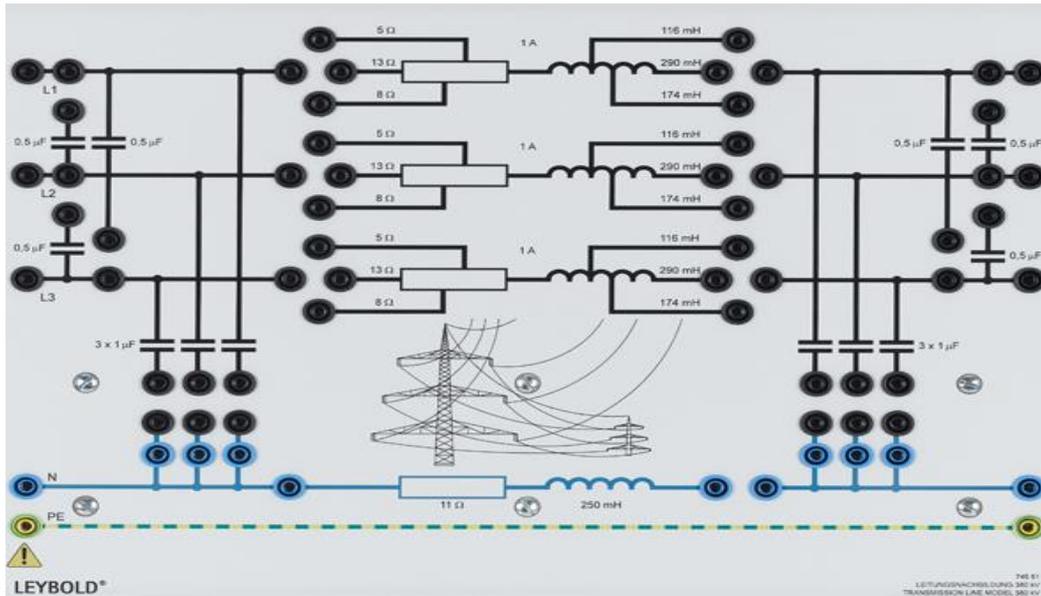


Fig. VI -6 : Schéma équivalent d’une ligne électrique en PI.

Les caractéristiques de la ligne représentées dans le tableau suivant :

Tab- VI.1 : Caractéristiques de la ligne.

Longueur(KM)	360(longue)	216(moyenne)	144(courte)
Longueur(%)	<b>100</b>	<b>60</b>	<b>40</b>
R(Ω)	<b>13</b>	<b>08</b>	<b>05</b>
L(H)	<b>290</b>	<b>174</b>	<b>116</b>
C (μF)	<b>05</b>	<b>03</b>	<b>02</b>

➤ **Capacité entre lignes et ligne-terre [21]**

Dans un système triphasé, il y a des capacités entre les lignes et la terre, mais également entre lignes. Comme le montre la figure

On peut démontrer en utilisant le théorème de Kennelly que :

$$C'_b = 3 \cdot C_L + C_T$$

Avec CL la capacité mutuelle et CT la capacité à la terre.

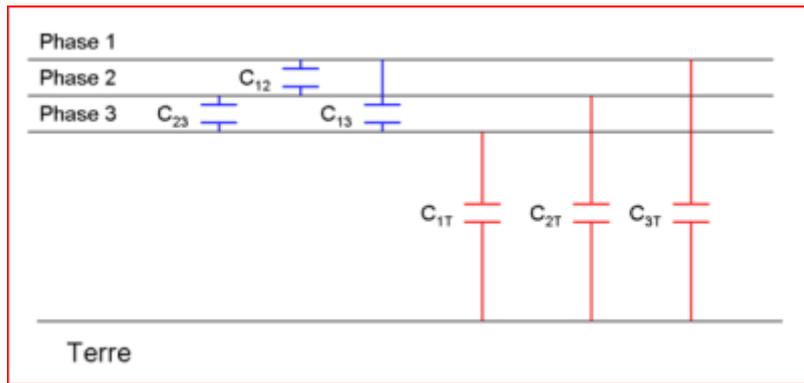


Fig. VI.7- Capacités présentes dans un système triphasé. [21]

**VI.8.1.1 Manipulation N°01**

Nous avons effectué des essais en plusieurs étapes :

- ♣ **1<sup>er</sup> étape :** choisir une prise réglable du transformateur convenable a notre travail expérimental.

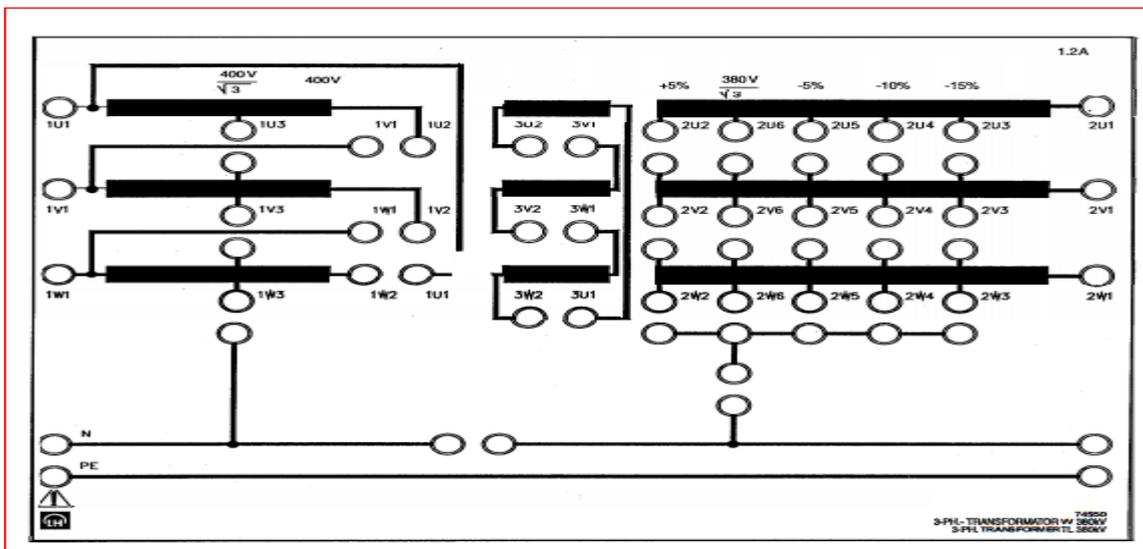


Fig. VI -8 : transformateur à prise réglable.

Les résultats des mesures obtenues sont présentés sur le tableau suivant :

Tab-IV.2 : les résultats de mesure des prises du transformateur.

Prise de transformateur	Tension $U_1$ (V)
$U_N -5\%$	378
$U_N +5\%$	418
$U_N -10\%$	355

La tension choisie doit être proche de la tension nominal du réseau, pour tous les essais suivants nous avons considéré  $U_N -5\%$ .

♣ 2<sup>ème</sup> étape : essai en court-circuit

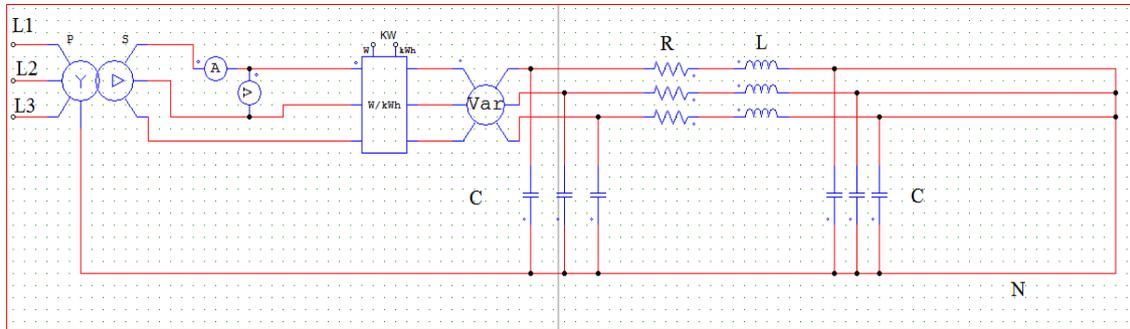


Fig. VI -9 : Circuit équivalent d'un essai en court-circuit.

Remarque :

L'essai en court-circuit ne peut-être effectuer pour la seule raison que le laboratoire il n'est pas équipé d'une source de tension réduite variable, en alimentant notre circuit d'une tension de 380V nous observons une augmentation rapide du courant, qui dépasse les valeurs nominale du matériels utilisé.

♣ 3<sup>ème</sup> étape : essai à vide

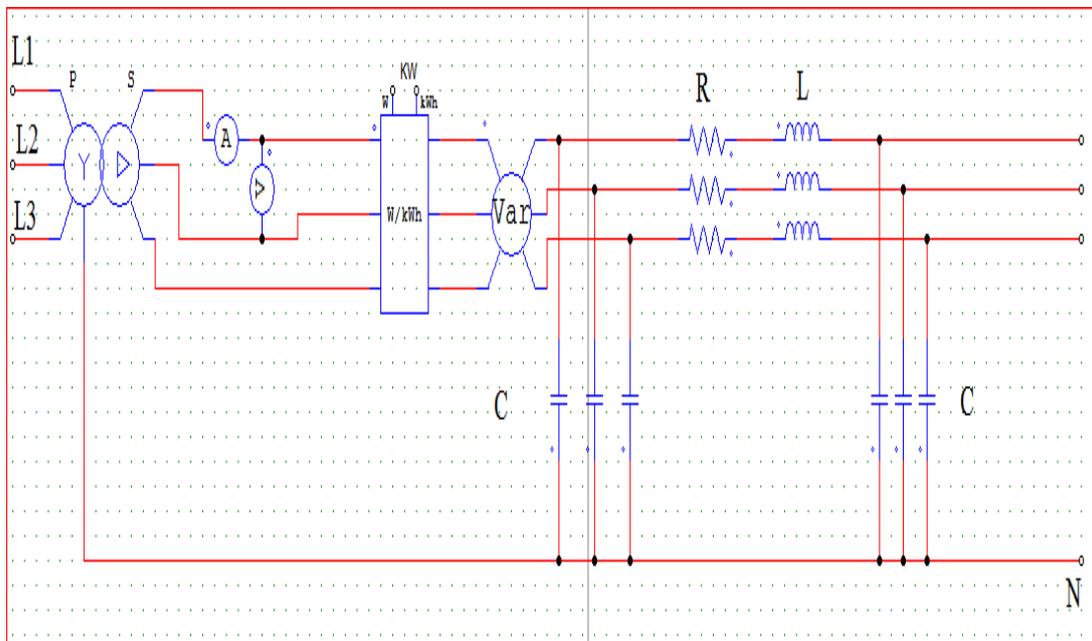


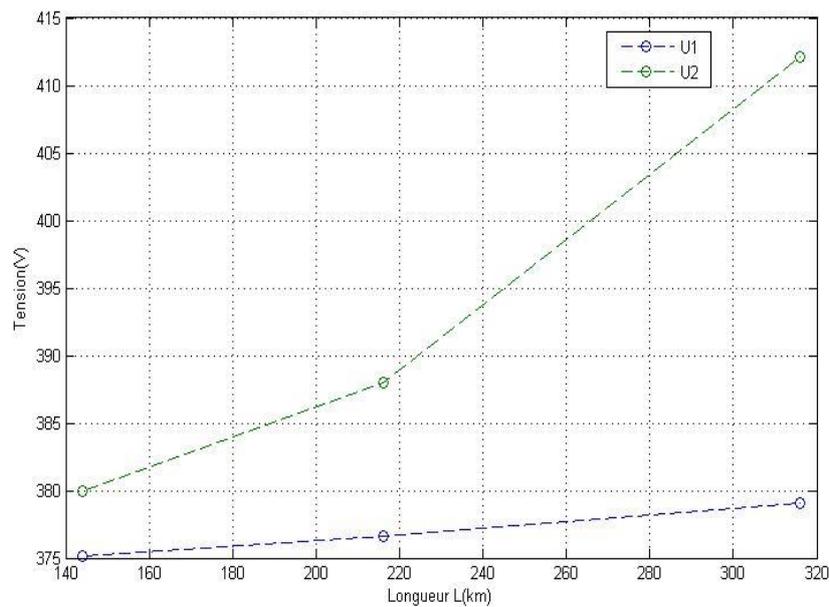
Fig. VI -10- Circuit équivalent d'une ligne à vide.

Les résultats des mesures obtenues pour différentes types de lignes à vide sont présentés sur le tableau suivant :

**Tab VI -4** : Les résultats de mesures pour différents types de lignes à vide.

Ligne	Courte	Moyenne	Longue
$U_1$ (V)	375.1	376.6	379.1
$U_2$ (V)	380	388	412.1
I (A)	0.142	0.203	0.353
P (W)	-25.29	-36.1	-65.3
Q (Var)	-47	-67	-117
$\cos \varphi$	-0.496	-0.442	-0.486
$\frac{U_2}{U_1}$	1.013	1.030	1.087

L'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est montré sur les figures suivantes :

**Fig VI.11-** Variation des tensions  $U_1$  et  $U_2$  en fonction de la longueur.

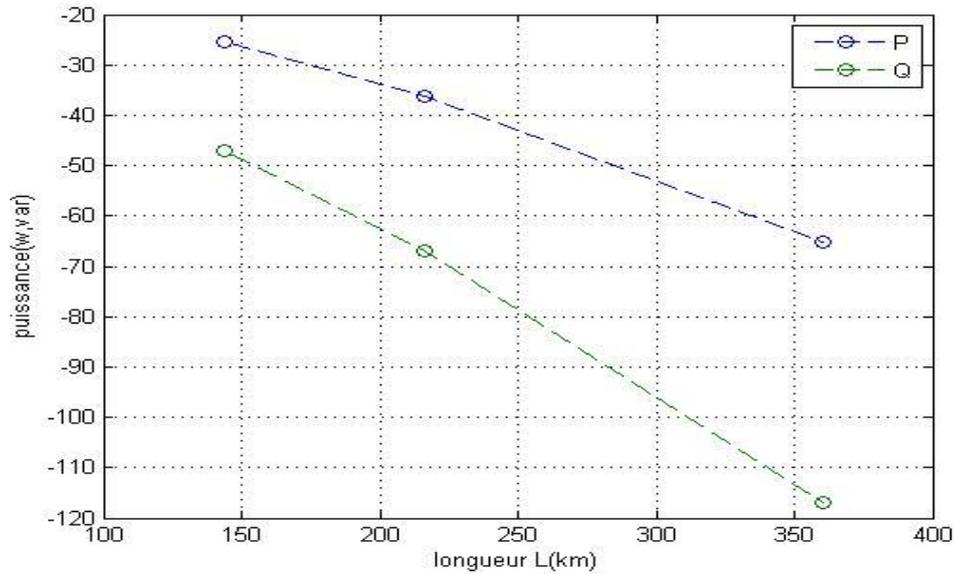


Fig VI.12- Variation des puissances P et Q en fonction de la longueur.

### Commentaire

D'après les résultats de mesure obtenus nous avons remarqué :

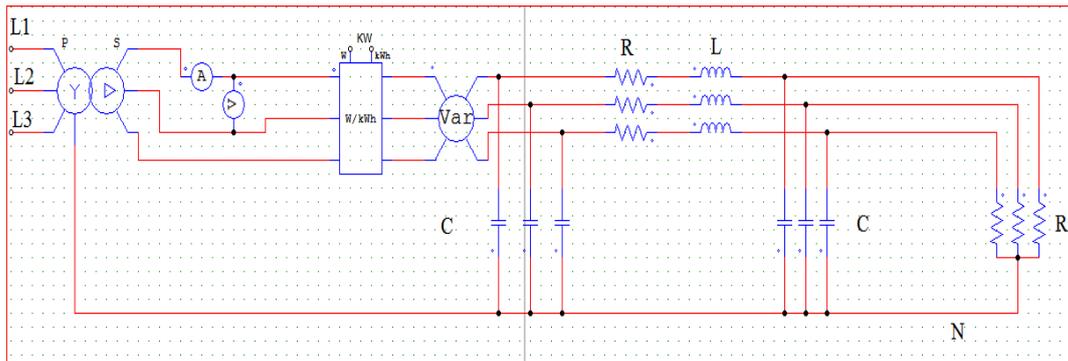
- ❖ La ligne aérienne fournit à vide une puissance réactive ;
- ❖ La puissance réactive inductive demandée par la ligne est compensée par la puissance réactive capacitive générée par la ligne. Il n'y a donc aucune compensation provenant de l'extérieur de la ligne ;
- ❖ Une relation proportionnelle entre la longueur de ligne et la tension  $U_2$  (tension à la fin de la ligne) ;
- ❖ puissance réactive en signe (-) signifié que la ligne produit cette énergie ;
- ❖ Le pouvoir réactif augmente proportionnellement à la longueur de la ligne; En revanche, la tension à la fin de la ligne augmente. « Effet Ferranti »

#### VI.8.1.2. Manipulation N°02

Pour étudier le comportement de la ligne électrique en charge: Nous avons utilisé une ligne de longueur 360 km, et une charge résistive variable.

✚ Essai en charge (R):

Nous avons choisi une résistance R de caractéristique ( $1000\Omega/3A$ ), on n'a pas considéré l'effet capacitif de la ligne.



**Fig VI.13-** Schéma d'une ligne avec charge résistive R.

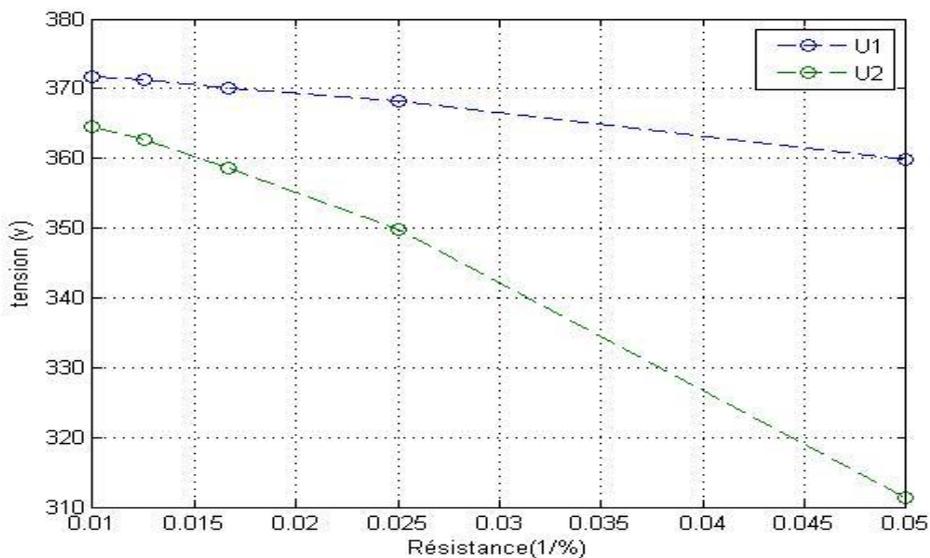
Les résultats de mesure d'une ligne triphasée en charge :

**Tab- VI.5:** Les résultats de mesures pour une charge résistive R

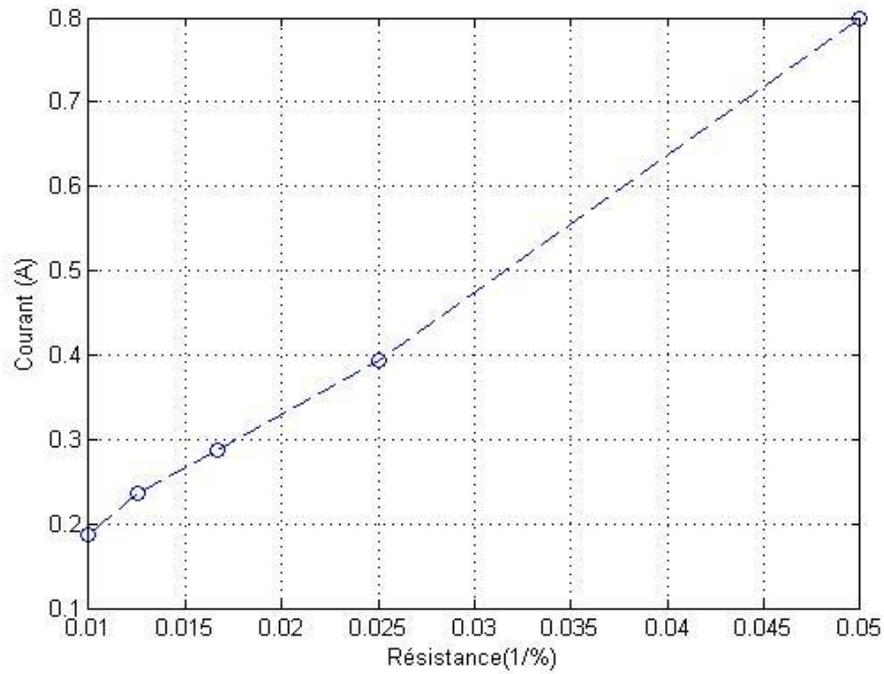
<b>R (%)</b>	<b>100</b>	<b>80</b>	<b>60</b>	<b>40</b>	<b>20</b>
<b><math>U_1</math> (V)</b>	371.8	371.3	370.1	368.3	359.8
<b><math>U_2</math> (V)</b>	364.6	362.8	358.6	349.9	311.3
<b>I (A)</b>	0.188	0.237	0.287	0.393	0.800
<b>P (W)</b>	67.1	80.7	98.3	136.7	285.2
<b>Q (Var)</b>	-31	-35	-40	-47	-37
<b>cos <math>\varphi</math></b>	-0.910	-0.917	-0.927	-0.945	-0.992

**Remarque :** les mesures doivent être effectuées rapidement afin que les composants de l'expérience ne soient que brièvement exposés à des courants élevés).

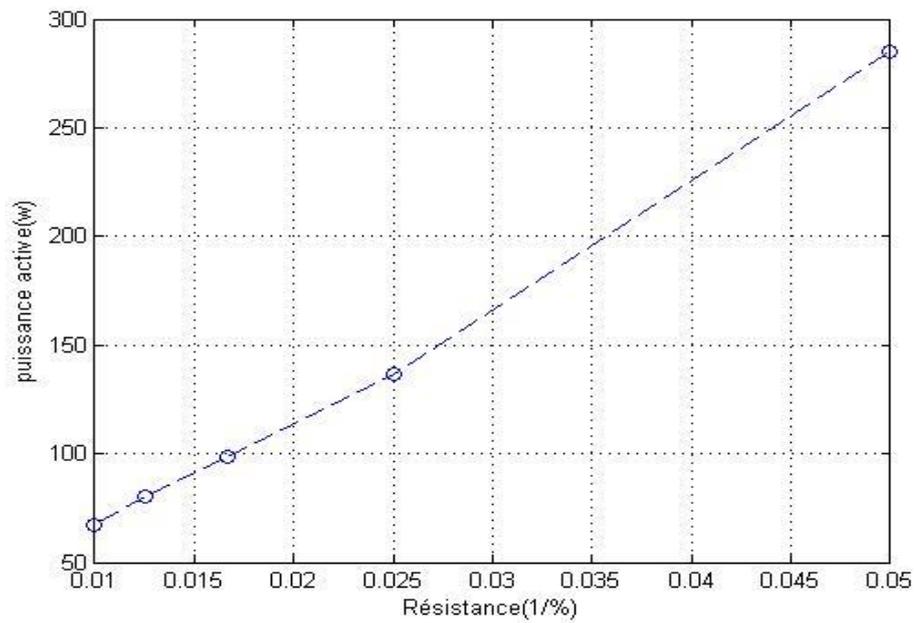
L'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est montré sur les figures suivantes :



**Fig VI.14-** Variation des tensions  $U_1$  et  $U_2$  en fonction de résistance R.



**Fig VI.15-** Variation de courant I en fonction de résistance R.



**Fig VI.16.a-** Variation des puissances P en fonction de résistance R.

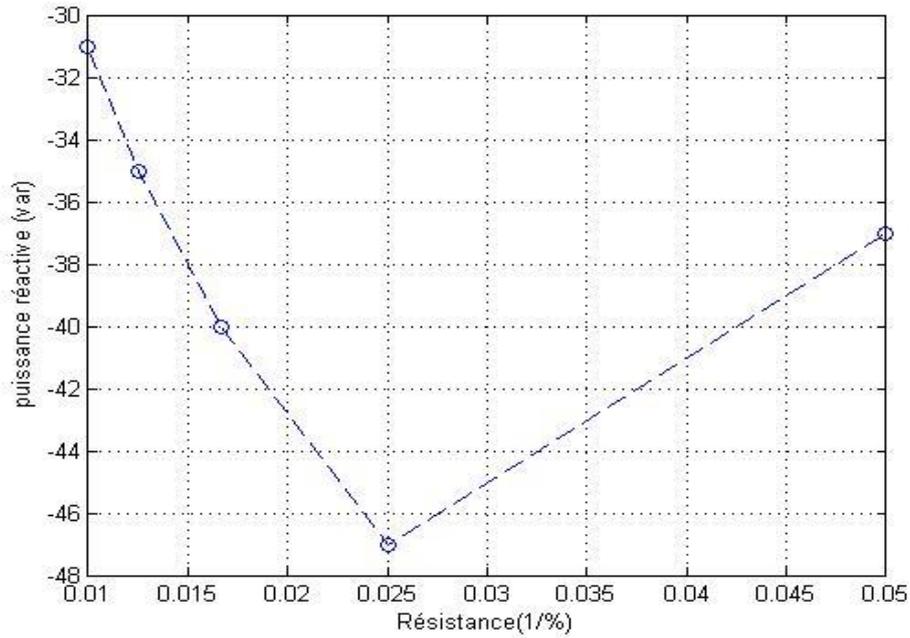


Fig VI.16.b- Variation des puissances Q en fonction de résistance R.

**Commentaire**

D’après les résultats de mesure nous avons remarqué :

- ❖ Qu’il y a un fort appel de courant I au fur et à mesure que la charge augmente, pratiquement une augmentation des pertes par effet de joule  $P=RI^2$  ;
- ❖ Une chute de tension quand la résistance augmente ;
- ❖ Lorsque la charge résistive a des valeurs supérieures à 30%, il existe un comportement capacitif; Le comportement inductif se traduit par des valeurs inférieures à celles-ci. Après la valeur de 20%, la ligne ne consomme aucune puissance réactive détectable.

🔧 Essai en charge (résistive-inductive) (R-L):

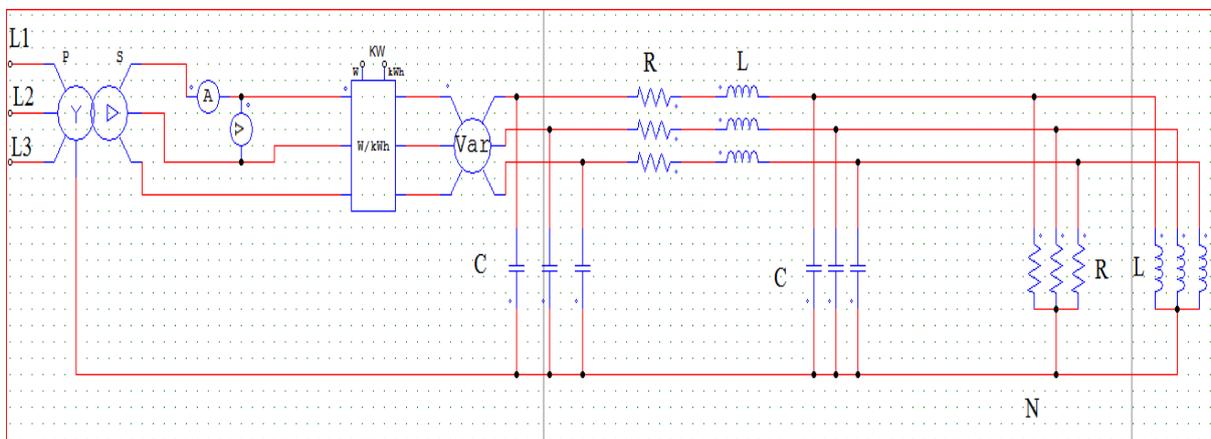


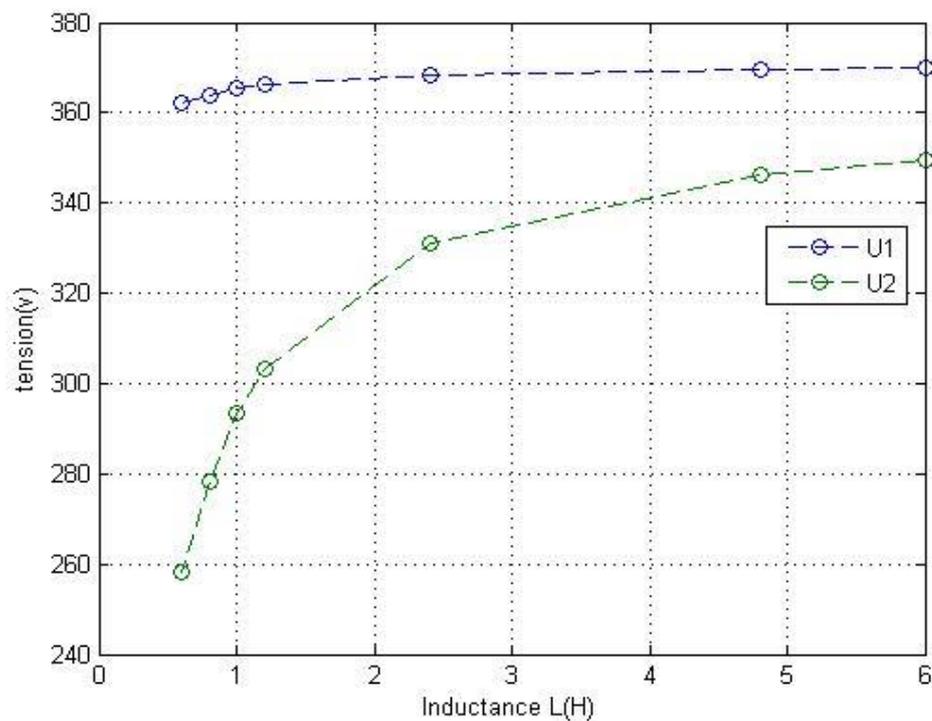
Fig VI.17- Schéma d’essai en charge (résistive-inductive R-L).

Les résultats de mesure obtenus d'une ligne triphasée alimentant une charge résistance de  $R=1k\Omega$  et une charge inductance  $L$  variable de  $6H$  à  $0.8H$ , sont montrés sur le tableau suivant :

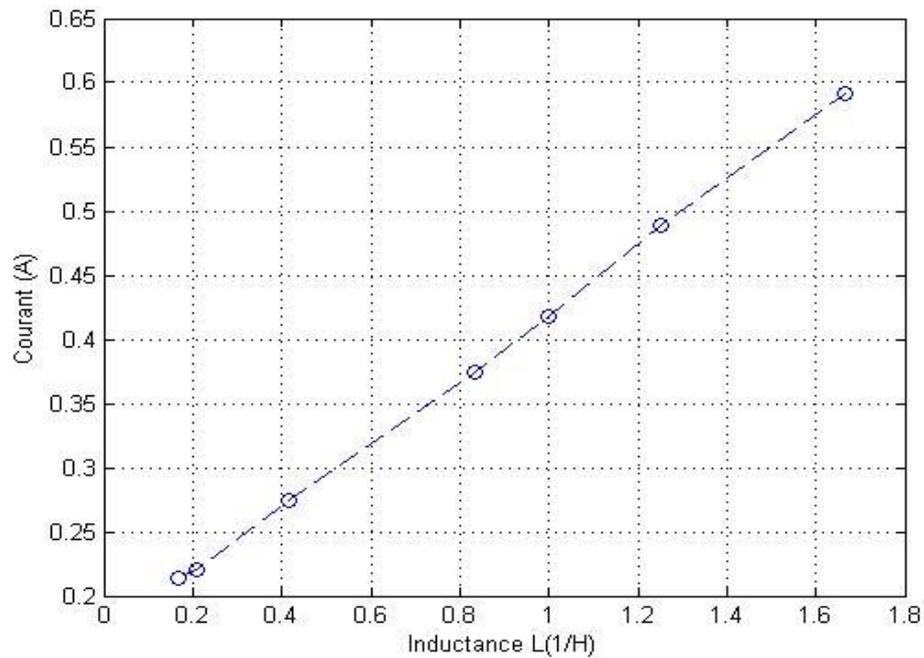
**Tab VI.6** : Les résultats de mesures pour une charge résistive-inductive R-L.

L (H)	6	4.8	2.4	1.2	1	0.8	0.6
$U_1$ (V)	370	369.7	368.2	366.2	365.5	363.7	362.2
$U_2$ (V)	349.6	346.4	331.2	303.1	293.5	278.2	258.1
I (A)	0.214	0.221	0.275	0.375	0.418	0.489	0.592
P (W)	78.7	81.8	94.5	117	125.3	138.2	156.9
Q (Var)	-6	-2	25	71	87	112	146
$\cos \varphi$	-0.997	1	0.967	0.854	0.821	0.777	0.732

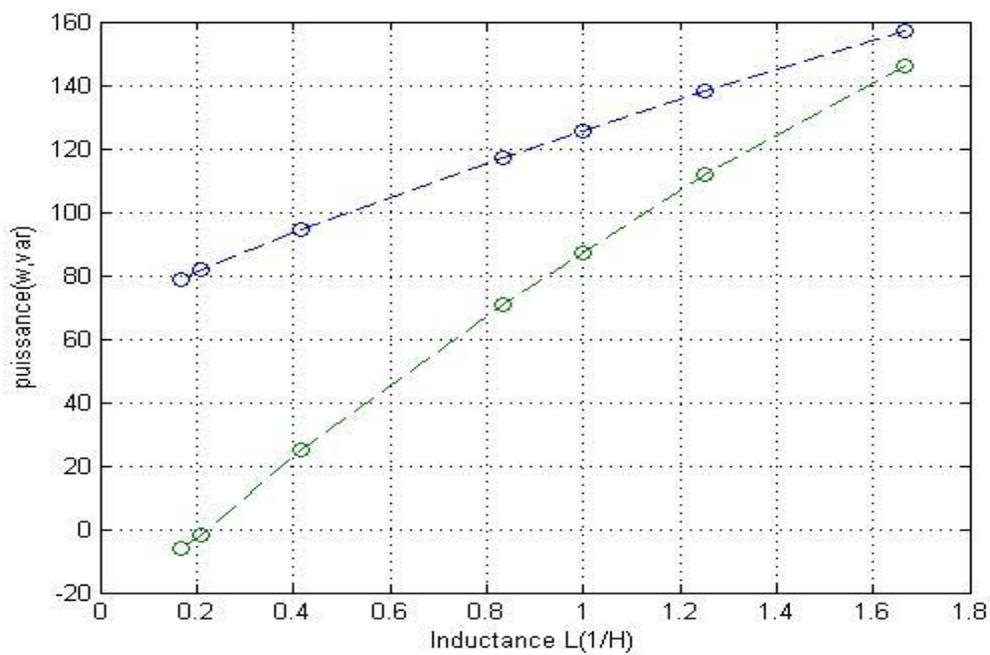
L'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est montré sur les figures suivantes :



**Fig VI.18**- Variation des tensions  $U_1$  et  $U_2$  en fonction de l'inductance  $L$ .



**Fig VI.19-** Variation de courant I en fonction de l'inductance L.



**Fig VI.20-** Variation des puissances P et Q en fonction de l'inductance L.

### Commentaire

D'après les résultats de mesure obtenus nous avons remarqué :

- ❖ Un mauvais cos phi accroît La chute de tension dans la ligne ;

- ❖ L'utilisation de grande inductance entraîne une augmentation de l'énergie réactive ce qui se répercute sur le bon fonctionnement du réseau électrique ;
- ❖ le facteur de puissance est inversement proportionnel avec la charge (un mauvais facteur de puissance signifie une grande inductance).

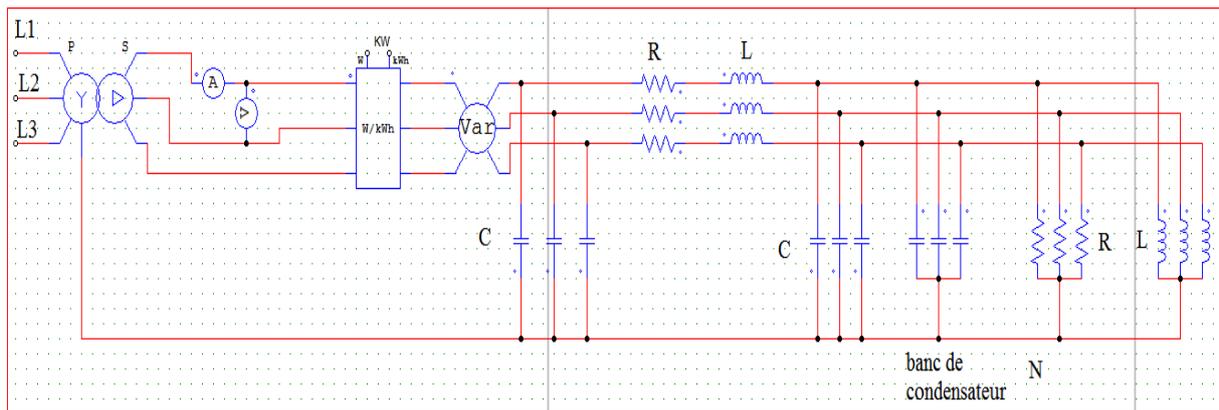
**VI.8.2 Réglage de la tension par la méthode de compensation de l'énergie réactive à l'aide d'un banc de condensateur**

**VI.8.2.1 Manipulation N°03**

Pour résoudre le problème de la chute de tension et l'augmentation de l'énergie réactive (un mauvais facteur de puissance), nous avons introduit un banc de condensateur en shunt et en série pour le but de compenser et d'améliorer le facteur de puissance de notre installation électrique.

**La compensation shunt**

Connecte un banc de condensateur en parallèle avec la charge RL.  $R=1K\Omega$ , l'inductance L varie de 1.2 à 0.8H et condensateur C de 2 à 10 $\mu$ F.



**Fig VI.21-** Schéma de compensation shunt.

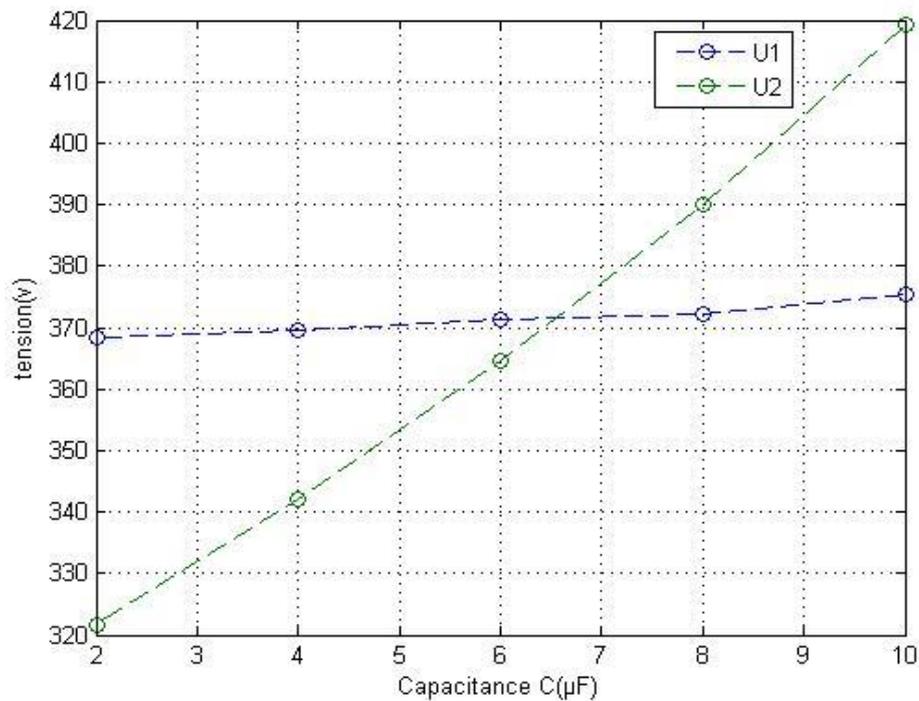
Les résultats de mesure d'une ligne triphasée en charge à l'aide d'une compensation shunt :

**Tab VI.7 :** Résultats obtenu avec la compensation shunt.

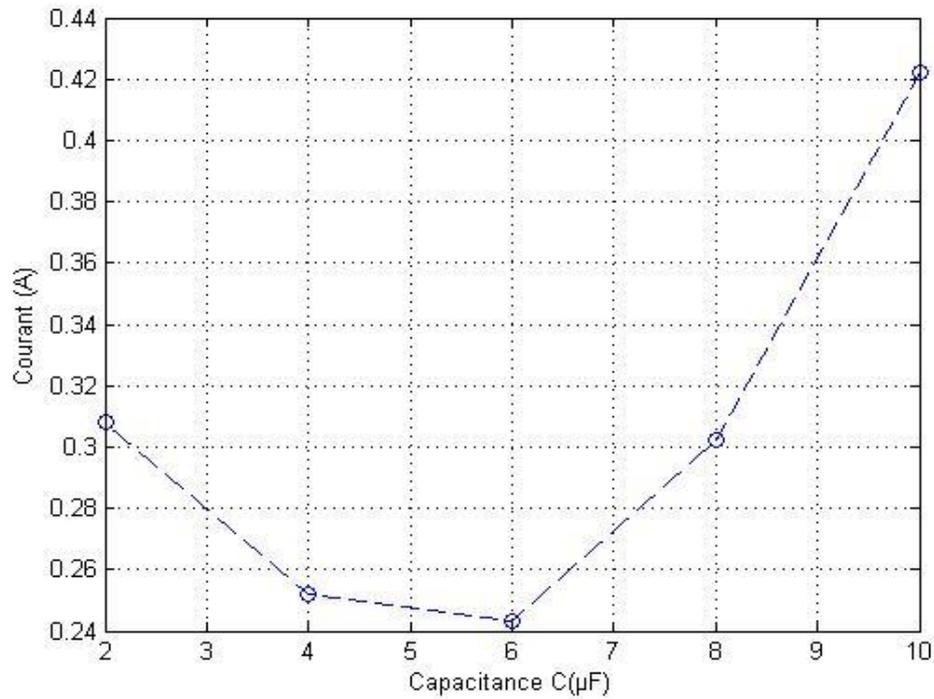
<b>L=1.2H</b>					
<b>C (μF)</b>	2	4	6	8	<b>10</b>
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	368.3	369.7	371.2	372.3	375.5
<b>U<sub>2</sub> (V)</b>	321.7	342.1	364.5	390.0	419.4
<b>I (A)</b>	0.308	0.252	0.243	0.302	0.422
<b>P (W)</b>	105.9	92.9	80	67	54.1
<b>Q (Var)</b>	40	-6	-42	-90	-149
<b>cos φ</b>	0.935	-0.998	-0.887	-0.595	-0.342
<b>L=1H</b>					
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	372.2	374.3	376.3		

$U_2$ (V)	373.7	402.7	433.8		
$I$ (A)	0.222	0.313	0.458		
$P$ (W)	64.8	49.3	34.4		
$Q$ (Var)	-51	-116	-169		
$\cos \varphi$	-0.785	-0.420	-0.200		
<b>L=0.8H</b>					
$U_1$ (V)	365.7	366.9	368.5	369.7	371.9
$U_2$ (V)	393.7	310.5	329.0	349.3	373.4
$I$ (A)	0.424	0.353	0.293	0.259	0.278
$P$ (W)	128.8	117	105.8	93.9	82.6
$Q$ (Var)	46	55	22	-18	-63
$\cos \varphi$	0.831	0.905	0.980	-0.981	-0.797

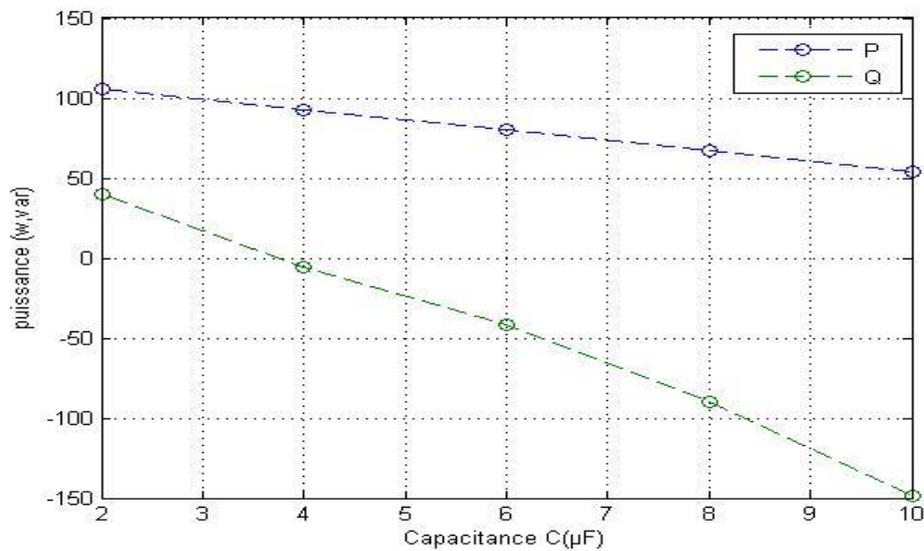
L'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est montrée sur les figures suivantes :



**Fig VI.22-** Variation des tensions  $U_1$  et  $U_2$  en fonction de la capacitance  $C$ .



**Fig VI.23-** Variation de courant I en fonction de capacitance C.



**Fig VI.24-** Variation des puissances P et Q en fonction de capacitance C.

### Commentaire

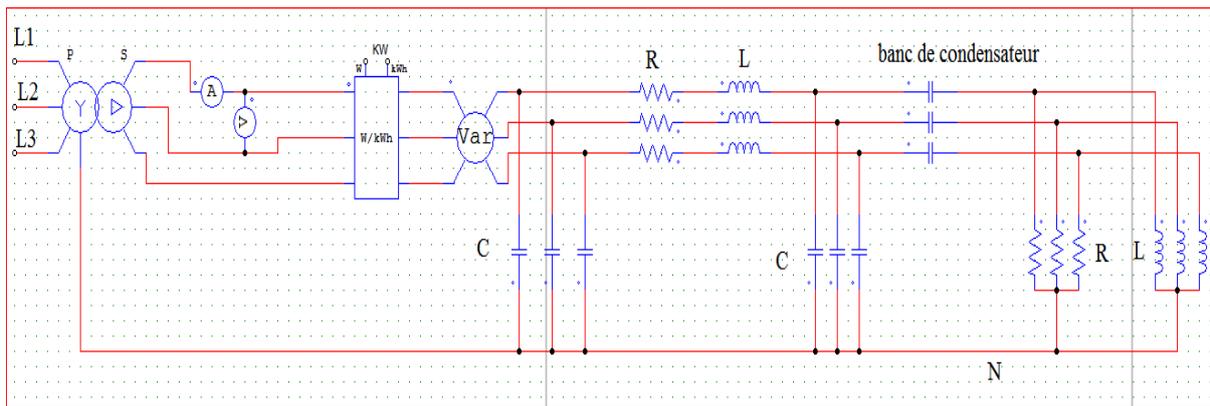
D'après les résultats et les graphes ci-dessus nous avons remarqué :

- ❖ L'augmentation du facteur de puissance se fait par l'ajout d'une charge capacitive convenable au réseau (compensation).

- ❖ Si la valeur de la charge capacitive dépasse la valeur convenable, la puissance réactive s'augmente par suite le facteur de puissance total diminue.
- ❖ Un mauvais choix du condensateur dégrade la capacité de transit de puissance active.

**Compensation Série**

Pour effectuer la compensation série nous allons connecter un banc de condensateur en série avec la charge comme il est montré sur le circuit



**Fig VI.25-** Schéma de compensation série.

$R=100\Omega=1k\Omega$ , l'inductance  $L$  varie de 1.2 à 0.8H et condensateur  $C$  de 2 à  $4\mu F$ .

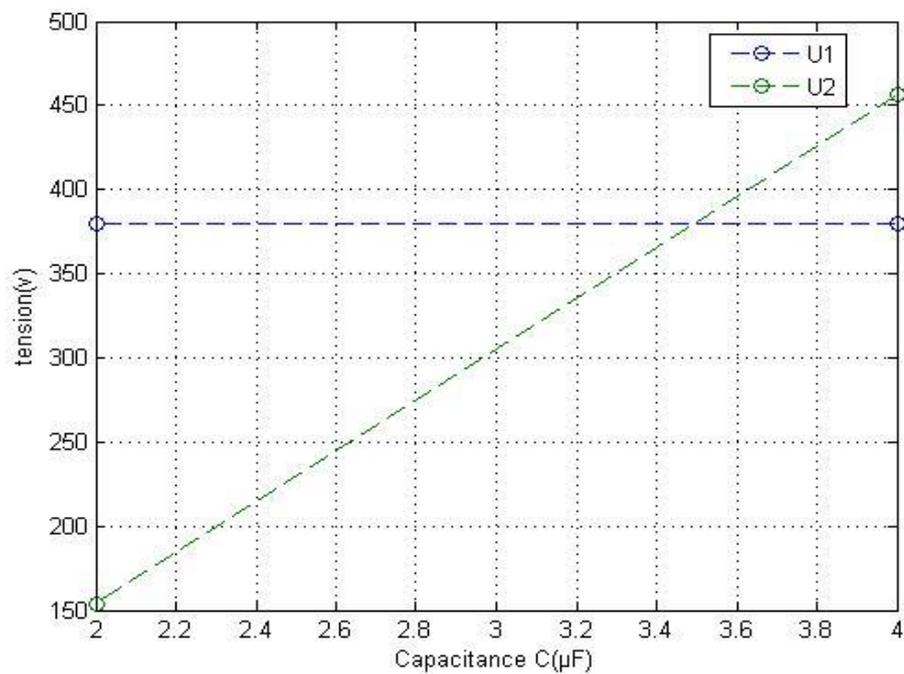
Les résultats de mesure obtenus d'une compensation série sont montrés sur le tableau suivant :

**Tab VI.8 :** Résultats de mesures pour une charge résistive-inductive RL avec condensateur série.

<b>L=1.2H</b>		
<b>C (μF)</b>	2	4
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	379.7	379.5
<b>U<sub>2</sub> (V)</b>	154.0	456.0
<b>I (A)</b>	0.189	0.563
<b>P (W)</b>	-19.7	47.8
<b>Q (Var)</b>	-69	-208.0
<b>cos φ</b>	-0.274	-0.224
<b>L=1H</b>		
<b>U<sub>1</sub> (V)</b>	380.5	382.0
<b>U<sub>2</sub> (V)</b>	131.1	397.2
<b>I (A)</b>	0.186	0.568
<b>P (W)</b>	-22.8	-217
<b>Q (Var)</b>	-67	-217
<b>cos φ</b>	-0.323	-0.057
<b>L=0.8H</b>		

$U_1$ (V)	380.1	382.9
$U_2$ (V)	102.2	303.7
$I$ (A)	0.179	0.539
$P$ (W)	-25.4	-27
$Q$ (Var)	-63	-205
$\cos \varphi$	-0.375	-0.130

L'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est montrée sur les figures suivantes :



**Fig VI.26-** Variation des tensions  $U_1$  et  $U_2$  en fonction de la capacitance  $C$ .

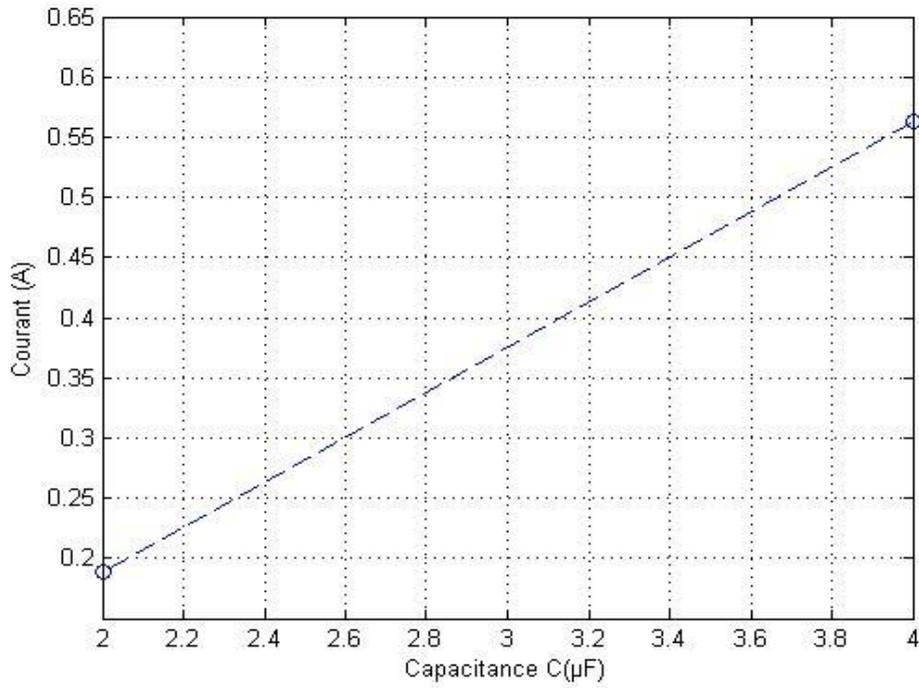


Fig VI.27- Variation de courant I en fonction de capacitance C.

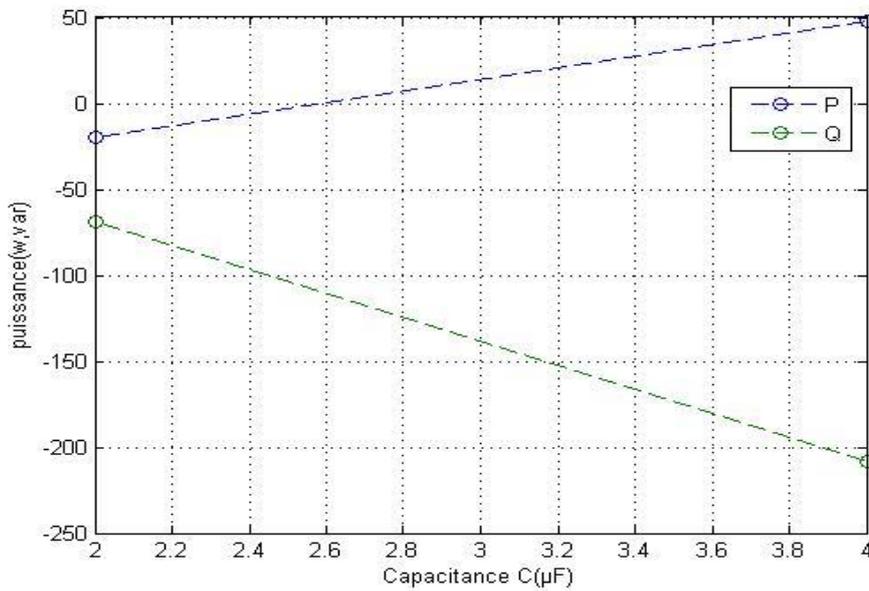


Fig VI.28- Variation des puissances P et Q en fonction de capacitance C.

- ♣ Nous avons choisi par tâtonnement la valeur de condensateur nécessaire pour améliorer le facteur, dans notre essai ;

Pour distinguer la valeur exacte de condensateur nécessaire, nous avons appliqué la relation suivante :

$$Q_c = U_2^2 \cdot C \cdot \omega \longrightarrow C = \frac{Q_c}{U^2 \cdot \omega}$$

Avec :

$Q_C$  : La puissance réactive.

$U_2$  : La tension d'arrivé.

$W$  : La pulsation ( $w=2\pi f$ ,  $f=50\text{Hz}$ ).

<b>L(H)</b>	<b>1.2</b>	<b>1</b>	<b>0.8</b>
<b>C (µF)</b>	2.46	3.2	4.6

### Remarque

D'après la comparaison entre les résultats de mesure et calculé on a :

- Les résultats calculé sont convenable aux résultats mesuré dans le cas de compensation shunt ;
- La compensation shunt est plus efficace que la compensation série, dans cette dernier le valeur du condensateur doit être soigneusement choisi.

### Commentaire

- ❖ L'augmentation du facteur de puissance se fait par l'ajout d'une charge capacitive convenable au réseau (compensation).
- ❖ On conclut que les condensateurs peuvent être groupés en série ou en parallèle pour donner la puissance désirée, et vont produire la puissance réactive qui va s'opposer à celle des circuits inductifs, cela provoque la diminution de la puissance réactive totale, la diminution de la puissance apparente, la diminution de l'intensité et l'augmentation du facteur de puissance.

### VI.9 Conclusion

Les expériences décrites dans le présent chapitre sont effectuées avec une ligne électrique à différentes longueurs utilisée (longue, moyenne et courte). Ensuite, le modèle considérée est un modèle en PI. C'est un modèle qui peut aussi bien être connecté à vide et en charge. L'augmentation du facteur de puissance se fait par l'ajout d'une charge capacitive convenable au réseau c'est le principe de la compensation de la puissance réactive.

# Conclusion générale

### Conclusion Générale

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter la puissance active. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active, à moins que la distance de transport ne soit courte.

L'étude présentée dans ce mémoire s'inscrit dans ce concept et porte sur l'étude d'une ligne électrique et l'amélioration de facteur de puissance dans un réseau par un banc de condensateur ; les essais expérimentaux sont effectués via la maquette didactique de laboratoire de réseaux électrique.

L'objectif de ce travail est d'étudier le comportement d'une ligne électrique haute tension avec différents modèles de ligne (longue, moyenne et courte) à vide et en charge (charge variable). Une telle liaison est constituée d'un modèle en pi une résistance, une inductance et un condensateur connectés en transversal de la ligne. Afin d'atteindre cet objectif, nous avons effectué plusieurs étapes après des études théoriques dans les trois premiers chapitres:

La ligne et la charge forment un circuit en série. Le rapport de la puissance d'émission converti dans les deux éléments et donc le rendement sont indépendants de la grandeur de la tension d'alimentation. Cependant, si une puissance constante est censée d'être transmise, une tension d'alimentation plus élevée serait plus favorable, car les pertes de ligne diminuent lorsque le courant diminue.

nous avons constaté que il est essentiel de maintenir la tension du récepteur ( $V_r$ ) et la tension du source ( $V_s$ ) aussi près que possible de la limite supérieur admissible, il faut placer aux deux extrémités de la ligne des dispositifs capable d'absorber (ligne à vide) ou de fournir (ligne en charge) de puissance réactive, encore nous avons remarqué le phénomène de L'effet Ferranti où la tension à l'extrémité ouverte d'une ligne de transmission sans compensation est toujours supérieure à la tension débité par la source, ou la tension résultante augmente en fonction de l'augmentation de la longueur de ligne.

L'amélioration du  $\cos \varphi$  doit passer par l'installation d'un moyen de compensation qui constitue la solution la plus efficace : très généralement une ou plusieurs banc de condensateurs.

Les résultats de mesure obtenus au cours d'expériences effectuées avec la maquette didactique servent de valeurs de référence pour une restitution normalisée. On a ainsi la garantie que l'allure de la courbe issue de la mesure effectuée sur la maquette est également applicable à d'autre réseau électrique, même si les valeurs absolues des résultats diffèrent les unes des autres. Des écarts liés aux tolérances dans le cadre des erreurs admissibles sont possibles et doivent être acceptés.

### ❖ Perspectives

Les perspectives à ce travail peuvent être mentionnées comme suit :

- Améliorer le facteur de puissance par self mobile ;
- Améliorer le facteur de puissance par dispositif FACTS.

Référence

### Reference

- [1] Snehal, D., Mahesh Luitel, A Novel Approach for Prioritizing Maintenance of Underground Cables, Final Project Report, pp 2.3, 4.6, October 2006.
- [2] MEKHLOUFI Med Abdelatif. « Modélisation, Simulation et analyse des régimes de fonctionnement et des conditions d'exploitation des longues lignes de transport d'énergie électrique à extra haute tension (E.H.V) 400kv et plus» Mémoire de Magister. Département électrotechnique. Option Réseaux électrique. Université Oran. 2012
- [3] E. Acha, Power electronic control in electrical systems. Oxford: Newnes, 2002.
- [4] « Pertes De Puissances Dans Les Longues Lignes Et Moyens Techniques D'amélioration Du Rendement », PFE USTO 1995/1996.
- [5] SETYAWAN, J, Investigation of Partial Discharge Occurrence and Detectability in High Voltage Power Cable Accessories, master thesis, Delft University of Technology. November 2009.
- [6] GÖKÇEN BAS, electric field analysis in stress controlled high voltage cables, Master thesis, Turkey Middle East technical university. January 2005.
- [7] ROGTI Fatiha. Rôle des interfaces « métal / diélectrique et diélectrique /diélectrique » dans la formation des charge d'espace dans les polymères sous contrainte continue.
- [8] B . Koudri Mémoire " DETECTION DU DEFAUT D'UN CABLE SOUTERRAIN " Institut de Technologie-Université Ibn-Khaldoun. Tiaret.2014
- [9] Lignes Aériennes Présentation Et Calcul Des Lignes (André CHANAL)
- [10] Un plan d'action pour la gouvernance du système d'information consulte le site « <http://www.leseco.ma/derniere-minute/54432-onee-un-plan-d-action-pour-la-gouvernance-du-systeme-d-information.html> » .Juin 2017.
- [11] Courent continu haute tension consulte le site « [https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant\\_continu\\_haute\\_tension](https://fr.wikipedia.org/wiki/Courant_continu_haute_tension) ». Juin 2017.
- [12] Thi Thu Nga VU, «Étude des phénomènes de charges d'espace dans des matériaux de câbles et câbles modèles destinés à des applications au transport d'énergie en Haute Tension Continue (HVDC) », Thèse de doctorat, Université de Toulouse III – Paul Sabatier, 2014
- [13] BENASLA Mokhtar, «Apport du SMES comme stockage d'énergie aux performances de l'HVDC pour améliorer la stabilité d'un réseau électrique», Thèse de Magister, Université Ibn Khaldoun, Tiaret 2011.
- [14] SAADE Firas, «Etude des interactions électromécaniques entre les stations HVDC et les alternateurs», PFE Pour obtenir le Diplôme d'ingénieur en Electricité et Electronique. Option Informatique Industrielle & Contrôle, Université libanaise, 2013

- [15] LABED Djamel, «Production de centralisée et couplage au réseau », Thèse de doctorat, Université de Mentouri Constantine, 2008
- [16] KHEFIANI GUELLIL SMAIL, «Etude, modélisation et calcul des régimes de fonctionnement des longues lignes de transport et leurs compensation par FACTS», Mémoire de Magister, Université des Sciences et de Technologie d'Oran, 2011
- [17] GUERNOUDJ Nassim, «Réglage de Tension dans un Réseau par Travée Self 220kV», Mémoire de Magister, Université EL Hadj Lakhdar BATNA, 2015
- [18] Walter DI PILLA, « Monsieur Cosinus PHI », Electrotech-City webmaster, France, 6 Mai, 2001.
- [19] Emmanuel Boyer, « Compensation de l'Énergie Réactive », ETT, France, 22 mars 2013.
- [20] J. Schultz «Transmission Line Model 380kV ».1994.
- [21] Modélisation en Pi des lignes électrique consulte le site  
« [https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation\\_en\\_Pi\\_des\\_lignes\\_%C3%A9lectriques](https://fr.wikipedia.org/wiki/Mod%C3%A9lisation_en_Pi_des_lignes_%C3%A9lectriques)  
». Juin 2017

Annexe

## Annexe-A : Modèle mathématique des lignes longues

### I. Modèle mathématique

#### I.1 Equations différentielles fondamentales des lignes

Considérons le circuit montré à la figure 1, représentant un élément de longueur  $Dx$  d'une ligne monophasée (appelé aussi tronçon de ligne). A la figure 1, le tronçon de ligne a une impédance série de:

$$Z\Delta x = R\Delta x + j\omega L\Delta x \quad (\Omega/\text{phase}) \quad (1)$$

et une admittance de :

$$Y\Delta x = j\omega C\Delta x \quad (\Omega^{-1}/\text{phase}) \quad (2)$$

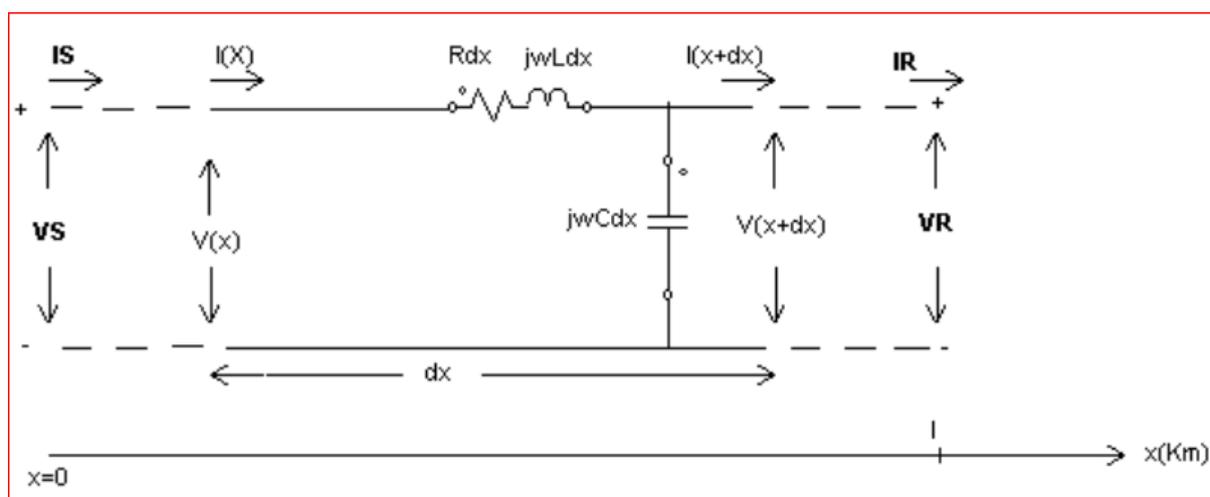


Fig 1- Tronçon de ligne.

Ces paramètres de la ligne peuvent être déterminés aussi par les relations de la section III.6.1.

Nous définissons les caractéristiques de la ligne de la figure 1 comme suit:

- $V_s$  = tension de ligne à neutre à la source, exprimée en volt ;
- $V_R$  = tension de ligne a neutre à la réception, exprimée en volt ;
- $I_s$  = courant de ligne à la source, exprimé en ampère ;
- $I_R$  = courant de ligne à la réception, exprimé en ampère ;

La tension ligne-neutre et le courant de ligne à une distance  $x$  de l'origine ( $x = 0$ ) sont respectivement égaux à  $V(x)$  et  $I(x)$ . A la sortie de ce tronçon de ligne, c'est-à-dire à une distance de  $(x + \Delta x)$ , la tension et le courant sont respectivement  $V(x + \Delta x)$  et  $I(x + \Delta x)$ . La différence en tension et en courant est due à la chute de tension à travers  $Z\Delta x$  et au courant de fuite à travers  $Y\Delta x$

En appliquant les lois de Kirchoff, nous obtenons les relations suivantes:

## Annexe-A : Modèle mathématique des lignes longues

---

$$V(x) = Z\Delta x I(x) + V(x + \Delta x) \quad (3)$$

$$I(x) = Y\Delta x V(x + \Delta x) + I(x + \Delta x) \quad (4)$$

Les relations (3) et (4) mises une autre forme deviennent :

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = -ZI(x) \quad (5)$$

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = -YI(x + \Delta x) \quad (6)$$

Lorsque  $\Delta x$  tend vers zéro, nous avons :

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = -ZI(x)$$

Ou

$$\frac{dV(x)}{dx} = -ZI(x) \quad (7)$$

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = -YI(x + \Delta x)$$

Ou

$$\frac{dI(x)}{dx} = -YV(x) \quad (8)$$

Les équations (7) et (8) sont appelées **équations télégraphiste**.

En dérivant les identités (7) et (8), nous avons :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -Z \frac{dI(x)}{dx} \quad (9)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = -Y \frac{dV(x)}{dx} \quad (10)$$

Si nous substituons les identités (7) et (8) dans les relations (9) et (10), nous obtenons :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -ZYV(x) \quad (11)$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = ZYI(x) \quad (12)$$

### I.2 Solutions des équations différentielles

Les solutions des équations différentielles (11) et (12) sont les suivantes:

$$V(x) = V^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} + V^- e^{+x(ZY)^{1/2}} \quad (13)$$

$$I(x) = I^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} + I^- e^{+x(ZY)^{1/2}} \quad (14)$$

## Annexe-A : Modèle mathématique des lignes longues

---

Ou

$V^+$ ,  $V^-$ ,  $I^+$ ,  $I^-$  sont des constantes à déterminer.

Les constantes  $V^+$ ,  $V^-$ ,  $I^+$ ,  $I^-$  ne sont pas indépendantes entre elles, comme nous le fait voir la relation (7). Alors en se servant des relations (13) et (14) pour résoudre la relation (7), nous obtenons:

$$-V^+ (ZY)^{1/2} e^{-x(ZY)^{1/2}} + V^-(ZY)^{1/2} e^{+x(ZY)^{1/2}} = -ZI^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} - ZI^- e^{+x(ZY)^{1/2}}$$

On faisant correspondre chacun des termes de cette égalité, nous trouvons:

$$I^+ = +V^+ \left(\frac{Y}{Z}\right)^{1/2}$$

$$I^- = -V^- \left(\frac{Y}{Z}\right)^{1/2}$$