

## **Remerciements.**

Je remercie en premier temps « Allah » le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaire pour réaliser ce présent travail.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à m'encadreur **Pr. Bounaya Kamel**, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, pour sa patience, son soutien et ses conseils.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les membres du jury.

Un remerciement tout particulier à mon équipe de travail et surtout au **Dr. AISSI AZZEDDINE** et à toute ma famille et mes amis.

Enfin, je remercie aussi toute personne de près ou de loin ayant participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

## Dédicace

Je dédie ce travail à:

Toutes les personnes qui m'ont encouragé de près ou de loin à réaliser ce mémoire.

À ma très chère mère et mon cher père qui m'ont toujours encouragé.

À mes frères surtout Nabil et ma sœur et sa petite fille Djoumana.

À toute l'équipe de pharmacie AISSI AZZEDDINE

À tous mes amis : Tarek, Nabil, Redouane, Hakim, Malek ...

À tous mes collègues de la promotion de M2. Réseaux électrique 2019.

# Sommaire

<b>Introduction.</b>	<b>01</b>
----------------------	-----------

## **Chapitre 1 : Profil de tension dans les réseaux électriques**

<b>1.1. Introduction.</b>	<b>03</b>
<b>1.2. Qualité de tension.</b>	<b>03</b>
1.2.1. Amplitude	03
1.2.2. Fréquence	03
1.2.3. Forme d'onde	03
1.2.4. Symétrie	04
<b>1.3. Dégradation de la qualité de la tension.</b>	<b>04</b>
1.3.1. Variation ou fluctuation de la fréquence	04
1.3.2. Variation lente de la tension	05
1.3.3. Fluctuation de tension (flicker)	05
1.3.4. Creux de tension et coupure brève	05
1.3.5. Chutes de tension	06
1.3.6. Déséquilibre	07
1.3.7. Les harmoniques	08
1.3.8. Les surtensions	09
<b>1.4. Ligne à grande portée électrique.</b>	<b>10</b>
1.4.1. Définition	10
1.4.2. Équations fondamentales des lignes	11
1.4.3. Description du modèle de la ligne	14
1.4.4. Expression de la tension et du courant de ligne	15
<b>1.5. Instabilité de la tension.</b>	<b>16</b>
1.5.1. Causes de l'instabilité de la tension	16
1.5.2. Facteurs d'influence liés à la stabilité de la tension	16

## **Chapitre 2 : Réglage de la tension et contrôle de la puissance réactive**

<b>2.1. Introduction.</b>	<b>18</b>
<b>2.2. Méthodes et moyens de réglage de la tension.</b>	<b>19</b>
2.2.1. Réglage directe	19
2.2.2. Réglage indirecte	20
2.2.2.1. Réglage shunt	20
2.2.2.2. Réglage série	20
2.2.3. Réglage de la tension par compensation de puissance réactive	20
<b>2.3. Moyens de compensation de la puissance réactive.</b>	<b>22</b>
2.3.1. Compensateurs synchrones	22
2.3.2. Condensateurs	22
2.3.3. Inductances	23
2.3.4. Compensateurs FACTS	23
<b>2.4. Caractéristiques de différents systèmes de compensation.</b>	<b>23</b>
2.4.1. Dispositif de compensation dynamique shunt	23
2.4.1.1. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (SVC)	24
2.4.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (STATCOM)	25
2.4.2. Dispositifs de compensation série	26

2.4.2.1. Compensateurs séries à base de thyristors (TCSC)	26
2.4.2.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)	27
2.4.2.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)	27
2.4.2.4. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)	27
2.5. Choix du lieu d'installation.	27
2.5.1. Compensation central	27
2.5.2. Compensation partielle ou par secteurs	28
2.5.3. Compensation Individuelle	29

### **Chapitre 3: Etude et analyse d'un modèle de ligne**

3.1. Introduction.	30
3.2. Description du modèle.	30
3.3. Etude de différents régimes de ligne.	31
3.3.1. Régime en charge	31
3.3.1.1. Compensation shunt au niveau de la charge	32
3.3.1.2. Compensation shunt au milieu de la ligne	35
3.3.2. Régime à vide	42
3.3.2.1. Compensation de puissance réactive au bout de la ligne	43
3.3.2.2. Compensation de puissance réactive au milieu de la ligne	44
3.4. Comparaison des investissements en puissance réactive.	48
3.5. Effet de la configuration et du niveau de tension nominal.	49
3.5.1. Paramètres primaires de la ligne	50
3.5.2. Paramètres secondaires de la ligne	51
3.5.3. Puissances par unité naturelle et relative	52
3.5.4. Résultats comparatifs	52
Conclusion générale.	55
Bibliographie.	56

## Introduction

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, constitue un enjeu vital dans tous les domaines socioéconomiques des peuples. En effet, on ne peut, désormais, concevoir une quelconque activité dans un quelconque domaine qui ne soit pas tributaire de l'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie est fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : Amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie, [1].

Aujourd'hui, l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence des lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations de pays à forte croissance de consommation accroissent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité. Pour éviter ce phénomène, des études de qualité de tension sont proposées dans divers travaux. Ces études se présentent comme un outil très important pour déterminer la possibilité de transfert de puissance dans le contexte des contraintes dues à la croissance de la consommation. Dans ce contexte, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer des moyens permettant de contrôler la tension et les puissances transmises de ligne afin d'atteindre un niveau d'exploitation et de gestion plus efficace et plus sûr, [2].

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle de la tension dans les réseaux électriques de grande distance par le moyen de compensation de la puissance réactive.

Le mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre du mémoire recense quelques aspects concernant la tension dans les réseaux d'énergie électrique ; comme la qualité de tension et sa dégradation et expose leurs causes et leurs conséquences. On y présente le modèle mathématique des lignes électriques de grande longueur en donnant leur système d'équations hyperboliques.

Le deuxième chapitre traite du réglage de la tension dans les réseaux électriques ; moyens et méthodes et de sa relation avec la puissance réactive; ainsi que du principe de la compensation et de certaines techniques du choix du types et de la localisation des systèmes de compensation.

Le troisième chapitre est orienté vers une analyse comparative paramétrique entre divers modèles de liaison pour en déduire le plus adéquat et ceci conformément à un plan de tension requis. Pour se faire, on fait recours au concept de compensation de la puissance réactive par une procédure de répartition de long de la liaison.

## **Chapitre 1 : Profil de la tension dans les réseaux électriques.**

### 1.1. Introduction.

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, parmi ceux-ci le niveau de tension.

La tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, elle peut être affectée par diverses perturbations, comme, par exemple, variation de la charge, variation de la structure du réseau, les courts-circuits, les ruptures de phases, les foudres... Ces perturbations se traduisent par la dégradation des indices de qualité de la tension : surtension, déséquilibre, fluctuation, harmonique, creux de tension. [3]

### 1.2. Qualité de tension.

L'énergie électrique doit d'être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par :

1. L'égalité de l'amplitude des trois tensions.
2. La fréquence.
3. La forme d'onde qui doit être sinusoïdale.
4. La symétrie du système triphasé, caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs.

La qualité de l'énergie délivrée aux utilisateurs dépend de ces quatre paramètres.

#### 1.2.1. Amplitude.

L'amplitude de la tension est un indice important de la qualité de l'électricité. Elle constitue, en général, le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale, [5].

#### 1.2.2. Fréquence.

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 HZ ou 60 HZ selon le pays, [5].

#### 1.2.3. Forme d'onde.

La forme d'onde des trois tensions triphasées doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut, en général, être considérée comme une onde fondamentale à 50HZ



associée à des ondes de fréquences supérieures à 50HZ appelées également harmoniques supérieures. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits, [7].

### 1.2.4. Symétrie.

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé asymétrie, [7].

### 1.3. Dégradation de la qualité de la tension.

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de [3, 5] ;

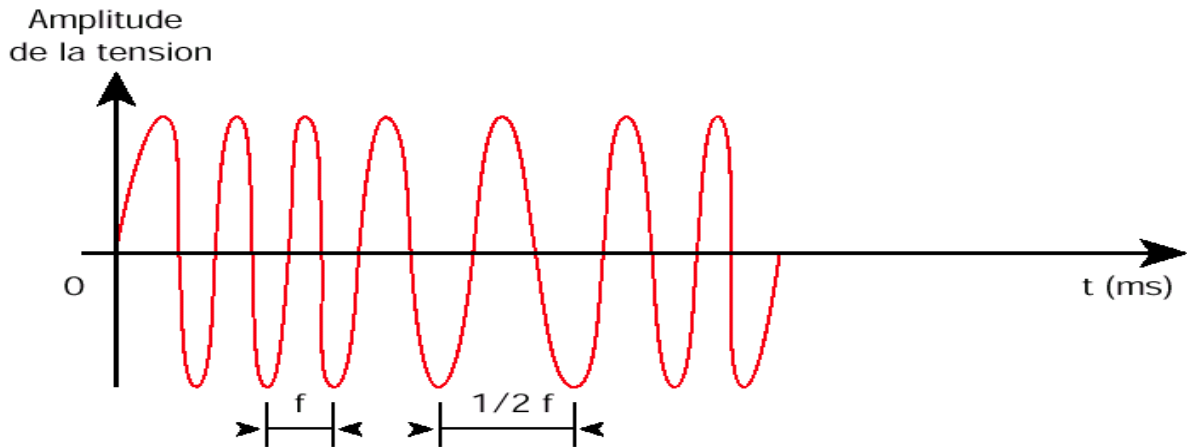
- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc... Ces défauts peuvent résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...),
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

Les principaux phénomènes affectant la qualité de la tension sont brièvement décrits ci-après.

#### 1.3.1. Variation ou fluctuation de la fréquence.

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  [1].

Un exemple de fluctuation quelconque de la fréquence est illustré par la Figure 1.1



**Figure 1.1.** Exemple de fluctuation de la fréquence.

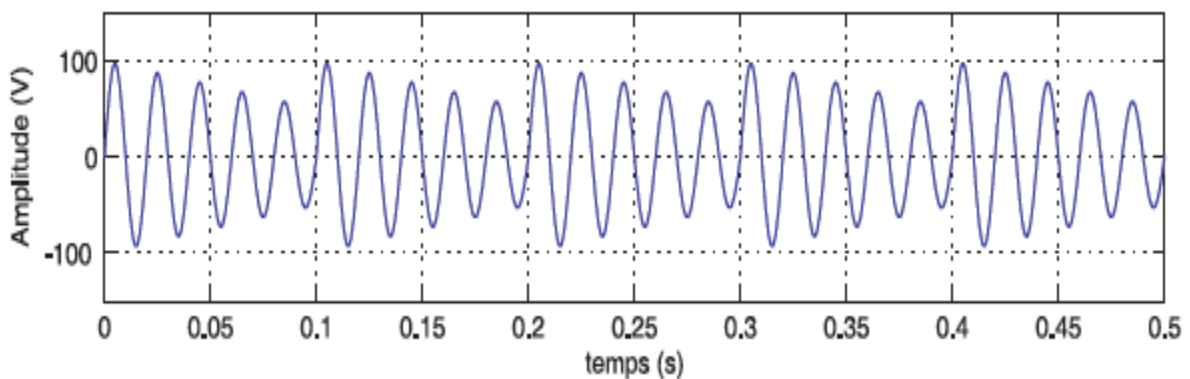
### 1.3.2. Variation lente de la tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement en raison de la variation du graphique des charges. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste dans l'intervalle des limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites.

Les appareils usuels peuvent supporter, sans inconvénient des variations lentes de la tension dans une plage de  $\pm 10\%$  de la tension nominale [8].

### 1.3.3. Fluctuation de tension (flicker).

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (Fig. 1.2), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations ou des démarrages fréquents (soudeuses, éoliennes, fours à arc pendant la période de fusion ; compresseur générateurs d'air conditionné, ...), [8].



**Fig. 1.2.** Exemple de Fluctuation de tension.

### 1.3.4. Creux de tension et coupure brève.

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10 ms à 1 minute [8].

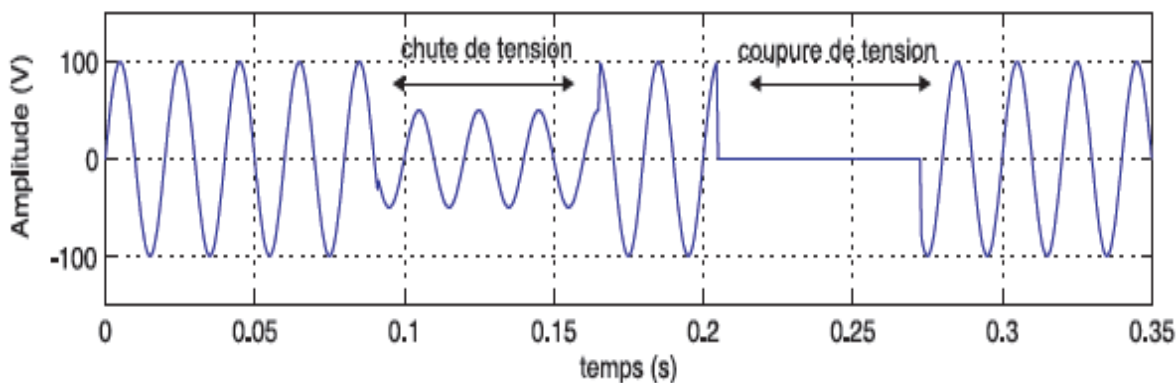


Figure I.3. Creux et coupure de tension.

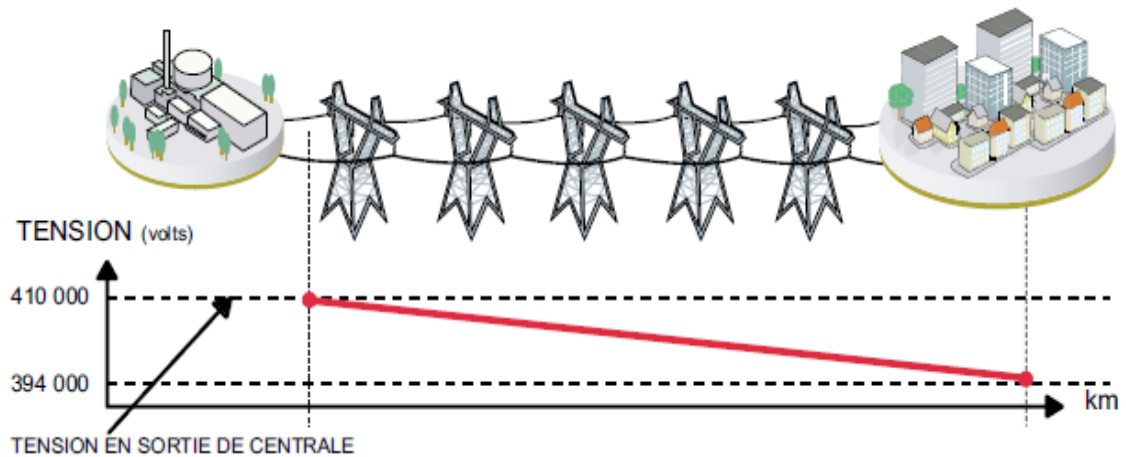
**Origines :** Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension :

- Ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs....etc.).
- Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes).

Les creux de tension sont caractérisés par leur profondeur et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées, [7].

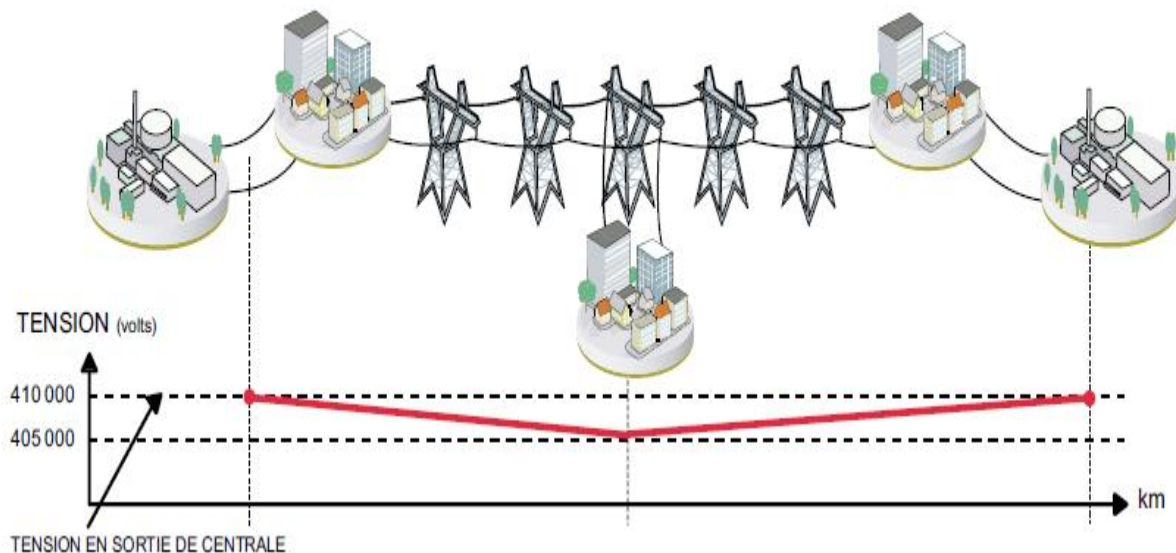
### 1.3.5. Chutes de tension.

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension (**Fig. 1.4**). La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.



**Figure 1.4.** Cas d'une consommation alimentée par une ligne depuis une centrale.

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties (Fig. 1.5). Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la charge de transit.



**Figure 15.** Cas d'une consommation répartie avec plusieurs centrales.

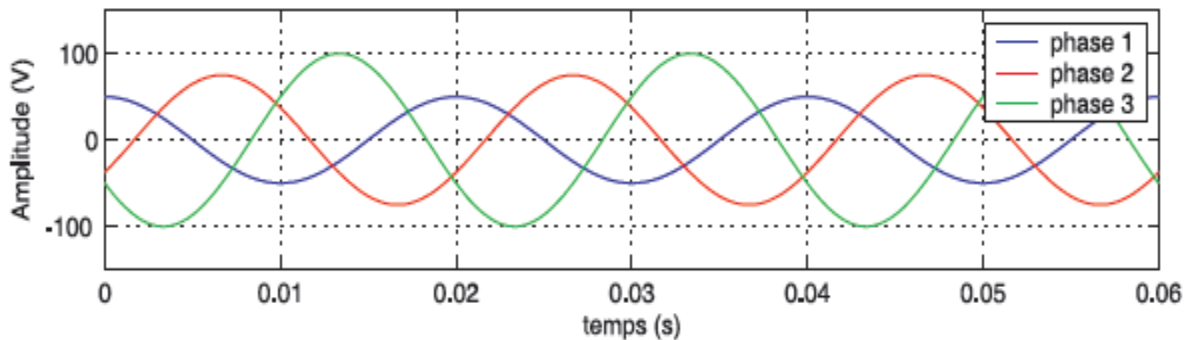
C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. À la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où

les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales. [9]

### 1.3.6. Déséquilibre.

Trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré et symétrique lorsqu'elles ont la même amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de  $\pm 120^\circ$ .

Cependant un système asymétrique peut être équilibré et un système asymétrique peut être non équilibré (composante homopolaire). Lorsque les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé asymétrique (non équilibré), [5].



**Fig. 1.6.** Exemple de l'asymétrie des amplitudes et des phases.

**Origine :** Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car, dans ce cas, les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques.

On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de  $120^\circ$ .

Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre, [5].

### 1.3.7. Les harmoniques

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue.

Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

Un récepteur d'énergie pour un réseau électrique est une charge perturbatrice dans le sens générale. Ces perturbations deviennent spécifiques, s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques [9].

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions en différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence de l'harmonique. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau [8].

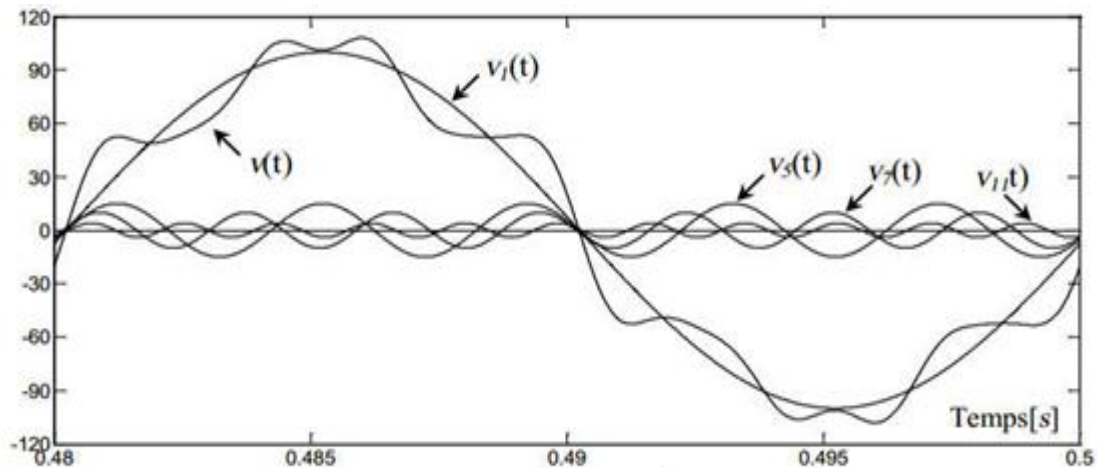


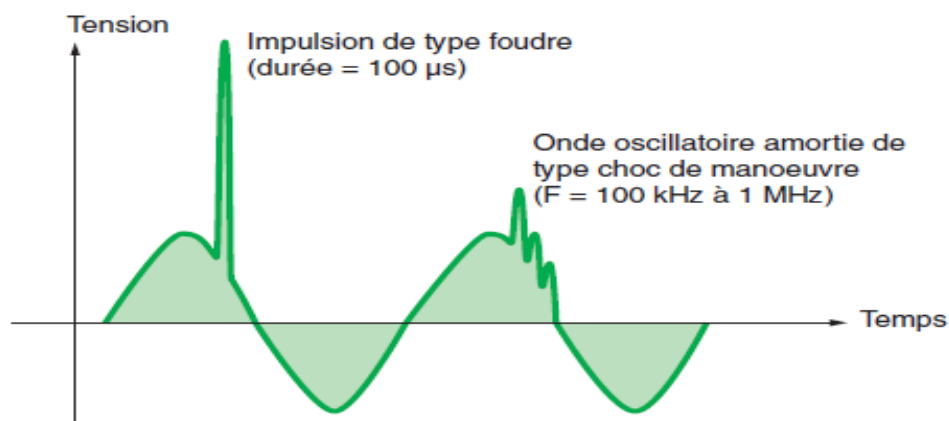
Fig. 1.7. Synthèse d'une tension distordue à partir des harmoniques.

**Origine :** Les harmoniques sont des perturbations permanentes affectant la forme d'onde de la tension du réseau.

Ces perturbations résultent de la superposition sur l'onde fondamentale, d'ondes également sinusoïdales mais de fréquences multiples de celle du fondamental. En général, les harmoniques pairs sont négligeables et seuls les harmoniques impairs existent. Nous pouvons également observer des sous-harmoniques ou des inter-harmoniques à des fréquences non multiples de la fréquence fondamentale. La figure 1.7 illustre un exemple de forme d'onde d'une tension distordue contenant, en plus du terme fondamental de fréquence 50HZ, trois harmoniques de rang impair 5, 7 et 11, [8].

### 1.3.8. Surtensions

Une surtension est une impulsion ou une onde de tension qui se superpose à la tension nominale du réseau. [5]



**Fig. 1.8.** Exemple de surtension.

Quatre types de surtension peuvent perturber les installations électriques et les récepteurs :

- surtensions de manoeuvre : surtensions à haute fréquence ou oscillatoire amortie (Figure 1.8) causées par une modification du régime établi dans un réseau électrique (lors d'une manoeuvre d'appareillage).
- les surtensions à fréquence industrielle : surtensions à la même fréquence que le réseau (50, 60 ou 400 Hz) causées par un changement d'état permanent du réseau (suite à un défaut : défaut d'isolement, rupture conducteur neutre, ..).
- surtensions causées par des décharges électrostatiques : surtensions à très haute fréquence très courtes (quelques nanosecondes) causées par la décharge de charges

électriques accumulées (Par exemple, une personne marchant sur une moquette avec des semelles isolantes se charge électriquement à une tension de plusieurs kilovolts).

- surtensions d'origine atmosphérique : provoquées par des phénomènes atmosphériques (foudre) ; on en distingue deux types : coup de foudre directe et indirecte, [5].

### 1.4. Ligne à grande portée électrique.

#### 1.4.1. Définition.

La ligne est un élément à paramètres réparties le long de sa longueur. A la différence des autres éléments, l'impact de la répartition des paramètres, impliqué pendant le processus de transport, peut être plus ou moins important selon que la ligne est plus ou moins longue. En règle générale, on distingue les lignes de petite longueur ( $L < 250 \div 300$  km), et les lignes de grande longueur ( $L \geq 250 \div 300$  km). Dans les lignes courtes, les effets dus à la répartition des paramètres sont négligeables. Au-delà de ces longueurs, ces effets deviennent progressivement plus importants, [10].

Les lignes de grandes longueurs sont caractérisées par :

- La présence des pertes actives et réactives considérables,
- Le problème d'isolation et pertes par effet couronne,
- La limite de la capacité de transport,
- Une compensation pour le contrôle de la tension qui nécessite dans ce cas de grandes quantités de la puissance réactive.

Les lignes de grandes longueurs sont utilisées pour les interconnexions entre systèmes électriques. Elles permettent :

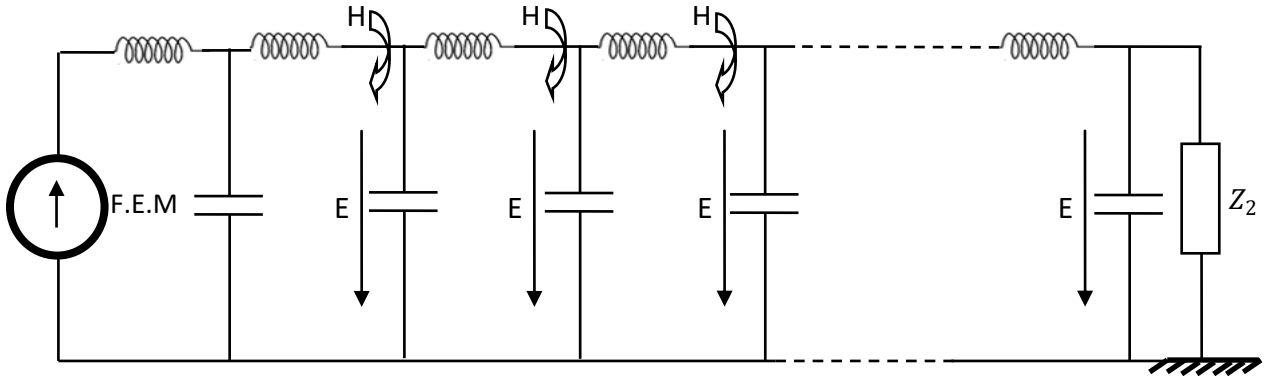
- une bonne conduite de service,
- une bonne distribution de charge,
- une bonne réserve de stabilité de réseaux.

Le transport d'énergie électrique s'effectue par la propagation des ondes électromagnétiques qui se réduisent aux ondes spacio-temporelles de la tension et du courant. En fait, l'énergie électrique véhiculée est la superposition d'onde incidente et d'onde réfléchie. Le processus d'incidence et de réflexion est déterminé par le rapport entre les impédances, respectivement de la charge et de celle caractéristique d'onde de la ligne.



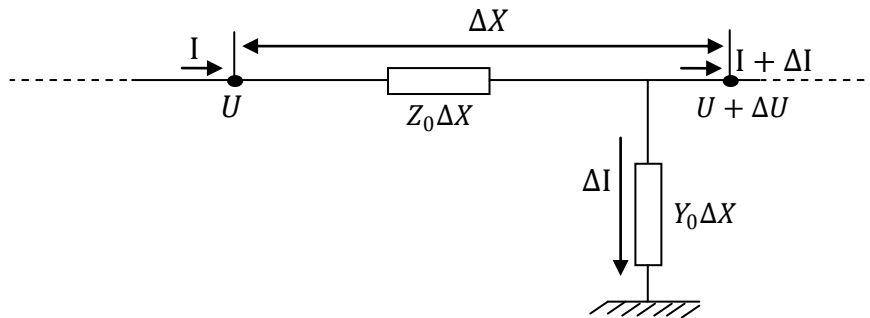
**1.4.2. Équations fondamentales des lignes.**

Sous l'application de la F.e.m de la génératrice, un champ électrique et un champ magnétique s'installent le long de la ligne : un champ électrique est diffusé dans l'espace autour de la ligne et un champ magnétique rotationnel s'installe à l'intérieur et l'extérieur du conducteur. L'interaction entre ces deux champs donne lieu à une onde E.M qui va se propager le long de la ligne (Figure 1.9) [10].



**Fig. 1.9.** Représentation d'une ligne avec charge.

Pour déduire les équations des lignes, on considère un élément  $\Delta x$  de cette dernière, (Fig. 1.10).



**Fig. 1.10.** Dédution des équations de ligne.

Sachant la valeur des paramètres électriques linéiques de la ligne ( $r_0, x_0, b_0$  et  $g_0$ ) ; c.-à-d.,

$$Z_0 = r_0 + jx_0 \tag{1.1}$$

$$Y_0 = g_0 + jb_0 \tag{1.2}$$

On peut écrire, pour l'élément  $\Delta x$  de la ligne, et pour les valeurs complexes ;

$$U - (U + \Delta U) = IZ_0 \Delta x \tag{1.3}$$

$$I - (I + \Delta I) = (U + \Delta U)Y_0 \Delta x \quad (1.4)$$

Ou bien, en considérant approximativement que  $\Delta U \Delta x \rightarrow 0$ ,

$$-\Delta U = I_0 Z_0 \Delta x \quad (1.5)$$

$$-\Delta I = U Y_0 \Delta x \quad (1.6)$$

En faisant tendre  $\Delta x$  vers  $dx$  on peut réécrire,

$$\frac{\partial U}{\partial x} = -I Z_0 \quad (1.7)$$

$$\frac{\partial I}{\partial x} = -U Y_0 \quad (1.8)$$

Ces deux équations permettent de réécrire le système sous la forme,

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} - U Z_0 Y_0 = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial^2 I}{\partial x^2} - I Z_0 Y_0 = 0 \quad (1.10)$$

On obtient ainsi un système d'équations différentielles homogènes de second ordre.

Pour résoudre l'équation en tension ou en courant, on utilise la forme opérationnelle où on pose,

$$\frac{\partial}{\partial x} = p \quad (1.11)$$

ce qui donne,

$$p^2 U - U Y_0 Z_0 = U(p^2 - Y_0 Z_0) = 0 \quad (1.12)$$

$$p^2 I - I Y_0 Z_0 = I(p^2 - Y_0 Z_0) = 0 \quad (1.13)$$

Ce qui permet de déduire ;

$$p = \pm \sqrt{Z_0 Y_0} = \pm \gamma_0 \quad (1.14)$$

La solution sous forme générale sera, alors ;

$$U = A_1 e^{-p_1 x} + A_2 e^{p_2 x} = A_1 e^{-\gamma_0 x} + A_2 e^{\gamma_0 x} \quad (1.15)$$

## Chapitre 1 : Profil de tension dans les réseaux électriques

---

Où  $A_1$  et  $A_2$  représentent les constantes d'intégrations et dépendent des conditions initiales.

La grandeur  $\gamma_0 = \sqrt{Y_0 Z_0} = \beta_0 + j \alpha_0$  est dite facteur d'onde. Dans cette grandeur, on définit ;

$\beta_0$ : Facteur linéique d'amortissement d'onde,

$\alpha_0$ : Facteur linéique de phase de l'onde

On définit également,

$$\sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = Z_c \quad (1.16)$$

comme impédance caractéristique d'onde.

Les grandeurs  $\gamma_0$  et  $Z_c$  sont déterminées par les paramètres électriques primaires de la ligne et sont définis, donc comme paramètres secondaires de la ligne.

L'expression définie de la tension permet de déterminer celle du courant. En effet, à partir de la forme différentielle des équations de ligne, on peut écrire :

$$I = -\frac{1}{Z_0} \frac{\partial U}{\partial x} = \frac{\gamma_0}{Z_0} (A_1 e^{-\gamma_0 x} - A_2 e^{\gamma_0 x}) \quad (1.17)$$

Ou bien 
$$I = \sqrt{\frac{Y_0}{Z_0}} (A_1 e^{-\gamma_0 x} - A_2 e^{\gamma_0 x}) = \frac{1}{Z_c} (A_1 e^{-\gamma_0 x} - A_2 e^{\gamma_0 x}) \quad (1.18)$$

Le système d'équations prend alors la forme générale,

$$U(x) = A_1 e^{-\gamma_0 x} + A_2 e^{\gamma_0 x} \quad (1.19)$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_c} (A_1 e^{-\gamma_0 x} - A_2 e^{\gamma_0 x}) \quad (1.20)$$

1.4.3. Description du modèle de la ligne.

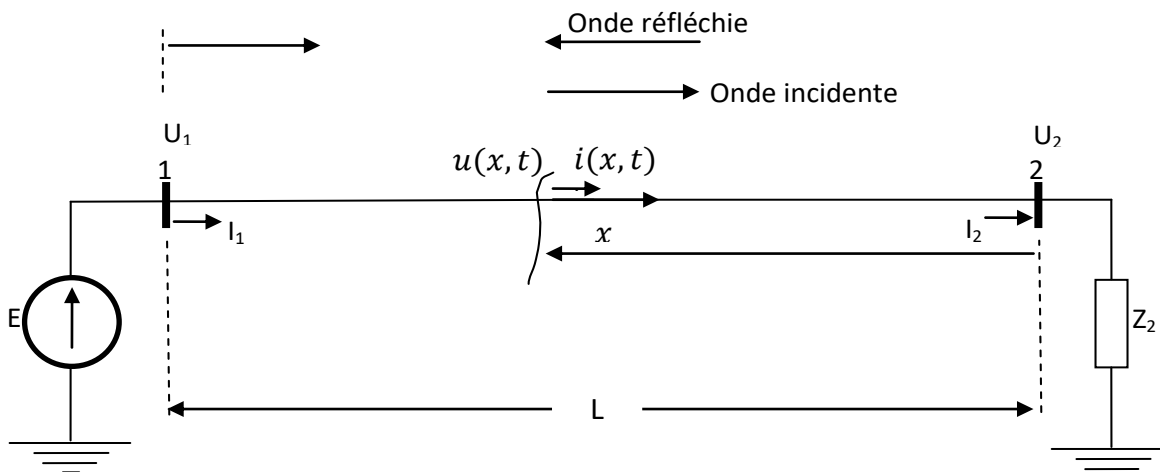


Fig. 1.11. Modèle de principe.

L'effet interactif entre onde incidente et onde réfléchie dépend du rapport entre les impédances, respectivement, de la charge  $Z_2$  et de l'onde  $Z_C$ . Les ondes interactives donnent lieu à un régime (de tension par exemple) résultant qu'on décrit comme suit,

$$U(x, t) = U_1(x, t) + U_2(x, t) \quad (1.21)$$

où,  $U_1(x, t)$  représente l'onde incidente et  $U_2(x, t)$  l'onde réfléchie.

L'onde réfléchie est impliquée quand  $Z_C \neq Z_2$ . Si  $Z_2 = Z_C$ , la composante  $U_2(x, t)$  s'annule et  $U(x, t) = U_1(x, t)$ . Ce cas correspond au régime dit « naturel » (ou caractéristique) de la ligne ; il est similaire au cas d'une ligne de longueur infinie. En régime naturelle la puissance transmise est entièrement active. Quand  $Z_2 \neq Z_C$ , la ligne est le siège de processus aussi bien actif que réactif ;

$$(S(x) = P(x) + JQ(x)), [11].$$

1.4.4. Expression de la tension et du courant de ligne.

Pour l'analyse des divers régimes de la liaison, il est nécessaire de disposer des relations analytiques entre tension, courant, puissance ... et de certaines données initiales.

Si les données initiales concernent l'entrée de la ligne, soit :

$$U(0) = U_1 \quad (1.22)$$

$$I(0) = I_1 \quad (1.23)$$

Les équations précédentes (1.19) et (1.20) donnent ;

$$U_1 = A_1 + A_2 \quad (1.24)$$

$$I_1 = \frac{1}{Z_c} (A_1 - A_2) \quad (1.25)$$

En insérant ces deux grandeurs par leur valeur dans le système d'équations obtenue, on réécrit :

$$U_2 = U_1 \operatorname{ch} \gamma_0 L - \sqrt{3} I_1 Z_c \operatorname{sh} \gamma_0 L \quad (1.26)$$

$$I_2 = -\frac{1}{Z_c} U_1 \operatorname{sh} \gamma_0 L + I_1 \operatorname{ch} \gamma_0 L \quad (1.27)$$

Généralement, la tension à l'extrémité de la ligne est exigée constante par le centre de consommation. De ce fait, il serait intéressant de déterminer le système d'équations par les données initiales sur la sortie de la ligne. Dans ces conditions, le système détermine la tension à réaliser à l'entrée de la ligne pour qu'à sa sortie, elle soit égale à celle exigée (par exemple nominale) [10].

Ainsi, on opérant un changement de variable, dans le système initial, tel que  $x = (L - x)$  et après transformation, on peut atteindre la forme générale

$$U_1 = U_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L + \sqrt{3} I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma_0 L \quad (1.28)$$

$$I_1 = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 L + I_2 \operatorname{ch} \gamma_0 L \quad (1.29)$$

pour la relation entre les grandeurs d'entrée et de sortie et celle suivante

$$U(x) = U_2 \operatorname{ch} \gamma_0 x + \sqrt{3} I_2 Z_c \operatorname{sh} \gamma_0 x \quad (1.30)$$

$$I(x) = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \operatorname{sh} \gamma_0 x + I_2 \operatorname{ch} \gamma_0 x \quad (1.31)$$

pour déterminer la tension et le courant à n'importe quel point de la ligne.

### 1.5. Instabilité de la tension.

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans des conditions normales de fonctionnement, après avoir subi une perturbation. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant à son effondrement généralisé de la tension [11].

#### 1.5.1. Causes de l'instabilité de la tension.

Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau, à sa limite de puissance transmissible maximale, à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive [11].

#### 1.5.2. Facteurs d'influence liés à la stabilité de la tension.

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent au scénario propice à une instabilité de tension.

Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau:

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- Les changeurs de prises en charge (ULTC) et les transformateurs fixes.
- Les relais de protection.
- Les caractéristiques de la charge.

Parmi ces éléments, on retrouve les lignes de transport d'énergie. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension chute considérablement dans le sens de l'écoulement des puissances, par contre si la charge est faible (minimum de charge), la valeur de la tension augmente progressivement le long de la ligne en raison des susceptances de cette dernière et peut, en différents endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Ainsi sur les lignes de transport non compensées, le plan de tension se trouve dans un état très susceptible à l'instabilité.

## Chapitre 1 : Profil de tension dans les réseaux électriques

---

La stabilité en régime permanent est aussi mise en difficulté par la longueur des lignes de transport: plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est réduite.

Ces deux effets contraignants (de la longueur et de la puissance) sur la variation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être maîtrisés et réduits moyennant des techniques de contrôle et de régulation adéquats ; tel que, par exemple, offertes par les diverses installations de compensation de la puissance réactive, [11].

A l'issue de cette partie de travail, on peut dire que dans un réseau électrique, l'asymétrie (déséquilibre) de tension, les harmoniques, les fluctuations de tension, les surtensions et les creux de tension ont des effets très nocifs sur les équipements électriques. Ces perturbations empêchent les réseaux électriques à fonctionner dans les diapasons et les normes requises de la qualité d'énergie électrique et posent un problème sérieux à la stabilité du système énergétique.

Ce chapitre a décrit les différents phénomènes perturbateurs qui influent sur la qualité de la tension par la présentation d'une étude simple concernant son profil. Les lignes de grandes longueurs ont un impact significatif sur la régulation de la tension et la stabilité du réseau.

## **Chapitre 2 : Réglage de la tension et contrôle de la puissance réactive**



### 2.1. Introduction.

Actuellement les limites des réseaux de transport de l'électricité peuvent être repoussées par l'ajout de nouvelle capacité de transport. Cependant les exploitants des réseaux cherchent des moyens pour utiliser plus efficacement les lignes de transport existant [10].

On doit atteindre ;

- L'amélioration des régimes permanents des lignes de grandes longueurs pour autoriser des flux d'énergie plus importants, augmentant ainsi leur capacité de transport,
- L'amélioration, dans les réseaux fortement maillés, des flux d'énergie appelés par les charges par des distributions plus adéquates,
  - Le contrôle d'un plan de tension requis pour maintenir les régimes dans leur état rationnel ou optimal.

En installant, dans les réseaux maillés, des possibilités de contrôle de l'impédance de ligne, on peut atteindre des flux d'énergie requis très améliorants [10].

Pour le modèle de ligne représenté ci-dessous et alimentant une charge résistive (Fig. 2.1),

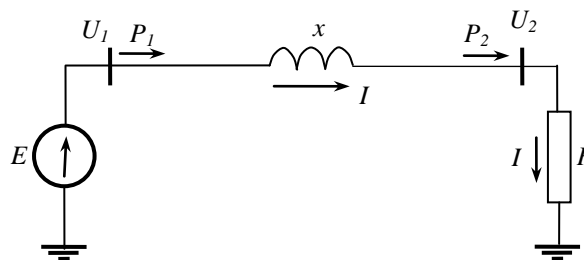


Fig.2.1. Modèle d'une ligne à charge résistive.

on peut écrire,

$$P_2 = U_2 I = P_1 \quad (2.1)$$

$$I = \frac{U_1}{X} \sin \delta \quad (2.2)$$

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta \quad (2.3)$$

$U_1$ : Réglage de l'excitation de rotor de l'alternateur.

$U_2$ : Réglage du plan de tension.

$x$ : Contrôle de l'impédance de ligne.

$\delta$ : Contrôle de l'angle de transport.

- Le réglage du plan de tension est assuré par des compensateurs de puissance réactive placés en différents points du réseau. Ce sont des compensateurs parallèles.
- Le contrôle de l'angle de transport se fait par des transformateurs déphaseurs qui maintiennent l'angle de transport dans la plage de stabilité.
- Le contrôle de l'impédance de ligne est effectué par des compensateur série.

### 2.2. Méthodes et moyens de réglage de la tension.

Le réglage de la tension consiste à maintenir un niveau de tension acceptable aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau.

La valeur de la tension à un jeu de barres donné dépend de la tension de source qui l'alimente, de la réactance de ligne qui le sépare de cette source et des puissances active et réactive à son niveau. Ainsi, si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires [12].

Les méthodes de réglage de la tension peuvent être présentées en deux catégories.

#### 2.2.1. Réglage directe.

Il consiste à agir directement sur la tension elle-même. Dans cette catégorie, le réglage de la tension de charge  $U$  est réalisé soit par la modification de la tension  $U$  elle même, soit par la modification de la tension de source  $E$ . Parmi les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie, il y a :

- La correction du niveau de la tension  $U$ , qui fait appel à un autotransformateur aux niveaux des postes de distribution ;
- La correction du niveau de la tension  $E$ , soit par autotransformateur s'il s'agit d'une tension à la sortie d'un poste source, soit par modification de l'excitation s'il s'agit de la tension à la sortie d'un alternateur, [12].

#### 2.2.2. Réglage indirecte.

## Chapitre 2 : Réglage de la tension et contrôle de la puissance réactive

Dans cette catégorie on trouve un ensemble de solutions pour modifier la chute de tension en modifiant les caractéristiques des charges ou du réseau. Principalement, ces solutions consistent à utiliser des compensateurs pour modifier l'écoulement de puissance réactive. Les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie sont :

- La compensation de puissance réactive : la puissance réactive est en grande partie responsable des chutes de tension. Ainsi, la compensation d'une partie de la puissance réactive demandée par la charge permet de réduire ces chutes de tensions.
- Modification de la réactance de la ligne : Il est possible de modifier les chutes de tension en modifiant la réactance «  $x$  » de la ligne, [12].

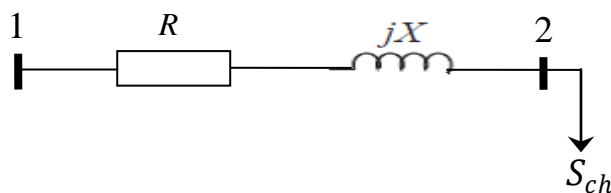
### 2.2.2.1. Réglage shunt.

Le réglage shunt consiste à installer en parallèle au jeu de barres de la charge un compensateur de puissance réactive (condensateur ou dispositif FACTS). Il a pour but de produire immédiatement aux bornes de la charge la puissance réactive requise par cette dernière. Ces compensateurs, ou bien sources complémentaires d'énergie réactive, déchargent les lignes du réseau d'une quantité importante d'énergie réactive pour la substituer par une énergie active utile en offrant, ainsi la possibilité d'augmenter la capacité de transport.

### 2.2.2.2. Réglage série.

Le réglage série consiste à régler soit la tension de charge par autotransformateur, ou la tension de source par autotransformateur ou par modification de l'excitation du générateur, soit par la compensation d'une partie de la réactance de la ligne. La compensation série par la variation de la réactance de liaison a pour objectif essentiel d'augmenter la limite maximale de la caractéristique de puissance de la liaison. On installe ainsi les conditions d'amélioration de la capacité de transport tout en contrôlant sa réserve de stabilité.

### II.2.3. Réglage de la tension par compensation de puissance réactive.



a. Avant compensation.

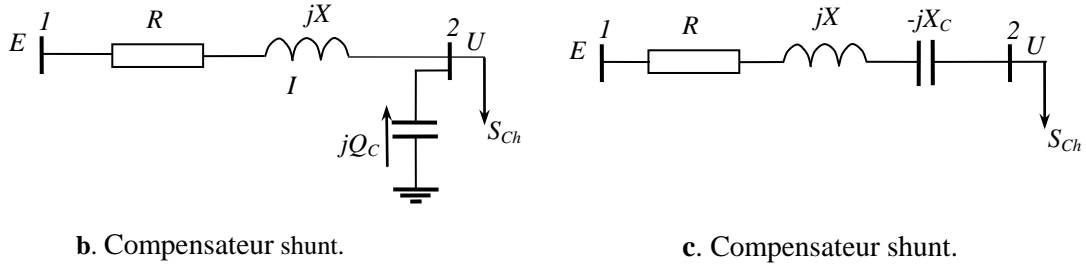


Fig.2.2. Réglage de la tension par compensateur.

La puissance de la charge (consommateur) est donnée par :

$$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} \quad (2.4)$$

Pour le contrôle de la tension du nœud de charge, on introduit le compensateur ; soit, en règle générale, de puissance ;

$$S_C = 0 \pm jQ_{C,L} \quad (2.5)$$

Où, le signe (-) correspond à une éventuelle absorption et le signe (+) à une éventuelle injection selon le caractère du nœud de charge.

Pour la ligne donnée sous compensation ;

$$\dot{U} = E - \Delta\dot{U} = E - \frac{P_{ch}R + (Q_{ch} \pm Q_C)X}{V} - j \frac{P_{ch}X + (Q_{ch} \pm Q_C)R}{V} \quad (2.6)$$

Mais comme  $R \approx 0$ , on réécrit,

$$\dot{U} = E - \frac{(Q_{ch} \pm Q_{C,L})X}{U} - j \frac{P_{ch}X}{U} \quad (2.7)$$

Où  $Z = R + jX$  : impédance de liaison

On écrit, ainsi, en module ;

$$U^2 = \left( E - \frac{(Q_{ch} \pm Q_{C,L})X}{U} \right)^2 + \left( \frac{P_{ch}X}{U} \right)^2 \quad (2.8)$$

On obtient, ainsi, la relation,

$$U = f(E; Q_C; X);$$

laquelle relation dévoile les paramètres de contrôle de la tension du nœud( $E; Q_C; X$ ).

Le réglage de  $U$  s'effectue donc par celui de  $E$  à travers l'excitation (ou autotransformateur), ou par le contrôle de la chute de tension à travers celui de  $X$  (compensation série) et ou celui de  $(Q_{ch} \pm Q_{C.L})$  par une compensation transversale (shunt  $Q_{C.L}$ ).

### 2.3. Moyens de compensation de la puissance réactive.

#### 2.3.1. Compensateurs synchrones.

Il s'agit d'un moteur synchrone tournant à vide, sans aucune charge utile. Il fournit ou consomme alors de la puissance réactive vis-à-vis du réseau ; il se comporte comme une charge capacitive (inductive), sans que les effets secondaires des bancs de condensateurs pour courant alternatif entrent en jeu.

En effet, il faut savoir que la plupart des moteurs dans une installation industrielle classique sont des moteurs asynchrones, eux-mêmes consommateurs de puissance réactive. Pour ne pas dégrader le facteur de puissance ( $\cos \varphi$ ) de l'installation électrique, on place alors le compensateur synchrone, qui comme dit précédemment, n'est rien d'autre qu'un moteur synchrone qu'on surexcite (capacitif) ou qu'on sous excite (inductif).

L'avantage de ces compensateurs synchrones sur les bancs de condensateurs est que l'on peut faire varier la puissance réactive produite en jouant sur l'excitation du moteur. La régulation peut se faire sur une consigne de tension de l'installation ou de facteur de puissance.

Cette technologie est de moins en moins utilisée, actuellement, et est remplacée par celle des compensateurs statiques.

#### 2.3.2. Condensateurs.

Le condensateur est le moyen le plus conventionnel pour la compensation de la puissance réactive. La puissance réactive fournie par le condensateur est directement proportionnelle au carré de la tension à ces bornes. S'il est connecté en parallèle (shunt), (Fig. 2.2.b), la tension à ces bornes augmente ce qui permet d'augmenter la puissance où il est connecté. Lorsqu'il est mis en série (Fig. 2.2.c), il permet aussi de compenser une partie de la puissance réactive absorbée par la réactance de la ligne, tout en diminuant la réactance sommaire de ligne. En pratique, on utilise des batteries de condensateurs pour pouvoir varier la puissance réactive en cas de besoin. Le condensateur est un moyen simple mais il n'est pas bien adapté aux variations de charge [12].

### 2.3.3. Inductances.

La réactance est très utilisée pour le réglage de la tension dans les lignes de transport sur des grandes distances, en régime de minimum de charge ou en régime à vide. En effet, pour ces régimes, la ligne est soumise à l'injection « excessive » de sa propre puissance réactive ; laquelle est d'autant plus importante que la longueur est plus longue. En l'absence d'installation de son absorption (par une réactance régulatrice), la ligne peut être le siège de surtension considérable.

### 2.3.4. Compensateurs FACTS.

Les compensateurs FACTS sont des compensateurs modernes qui offrent la possibilité d'un réglage automatique de la tension. Parmi les compensateurs FACTS, on trouve des compensateurs shunts comme le SVC (Static Var Compensator), le STATCOM (Static Compensator), et des compensateurs séries comme le TCSC (Thyristor controlled series compensator), ou le DVR (Dynamic Voltage Restorer). Néanmoins, la fonction de ce dernier est un peu différente, puisque il sert à corriger les creux de tension et à rétablir la tension suite à une coupure brève [12].

## 2.4. Caractéristiques des systèmes de compensation.

### 2.4.1. Dispositif de compensation dynamique shunt.

Les condensateurs de puissance sont les plus souvent installés en dérivation sur le réseau. Pratiquement, ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle. Les condensateurs fournissent à la pulsation  $\omega$  une puissance  $Q_C$ , la dimension du condensateur est déterminée par sa puissance. Les condensateurs Shunt sont utilisés soit en basse tension ; souvent auprès des appareils d'utilisation les plus puissants, soit en moyenne tension où ils sont regroupés en batteries de quelques MVAR. En moyenne tension, les batteries sont installées par l'intermédiaire d'un disjoncteur sur les jeux de barres moyennes tensions des postes HT / MT. Ces batteries compensent les charges réactives locales et une partie des pertes réactives sur les réseaux en amont. [12]

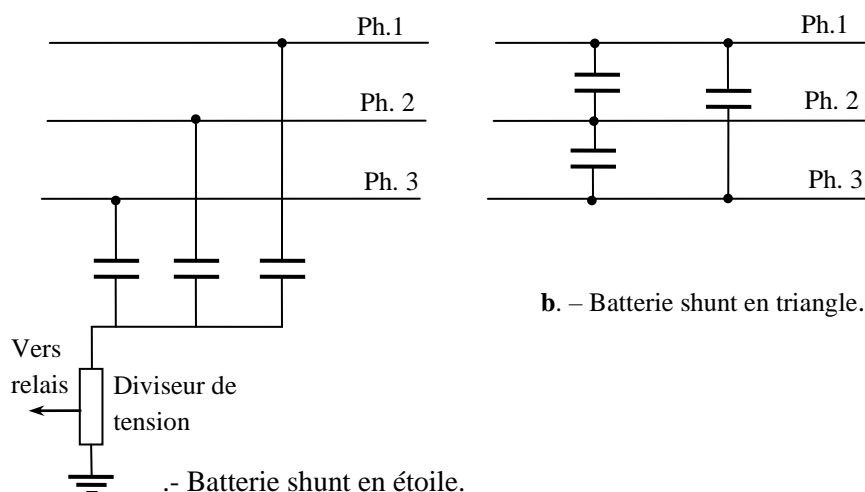


Fig.2.3. Compensation shunt.

Les lignes électriques transportent des puissances actives et des puissances réactives. Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés, il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. Ces dispositifs sont caractérisés par des temps de réponse très courts, contrairement aux installations à dynamique tournante.

En règle générale, ces installations sont une combinaison « d'inductance-capacité » gérées par des commutateurs électroniques, tels les thyristors... Selon le besoin et grâce aux moyens de commutation, ces installations peuvent aussi bien fournir qu'absorber l'énergie réactive. Leur structure et leur lieu d'installation dépendent des objectifs à atteindre et de la nature des régimes à traiter.

Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont cités dans ce qui suit.

### 2.4.1.1. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (SVC).

Ces types de compensateurs sont très connus et très utilisés dans le domaine des systèmes d'énergie à travers le monde. Ils sont l'objet d'un grand nombre de travaux de recherche et sont largement introduits comme plateforme pédagogique.

Pour un but de rappel immédiat à faire atteindre au lecteur de ce mémoire, nous rapportons, dans ce qui suit, l'essentiel de leur description, leurs caractéristiques et leurs modèles, par des citations tirées d'autres travaux. Le mérite dans ces investigations revient à ceux qui se sont approfondis dans leurs études et leur conception.

Le SVC est une association des dispositifs TCR, TSC, banc de capacités fixes et des filtres d'harmoniques. Ces dispositifs constituent le compensateur hybride, plus connu sous le nom de SVC (compensateur statique d'énergie réactive). Un SVC est une impédance continuellement ajustable capacitive (+V) à inductive (-V), qui peut rapidement répondre à

des modifications du réseau pour contrebalancer les variations de charge ou les conséquences d'un défaut. [12]

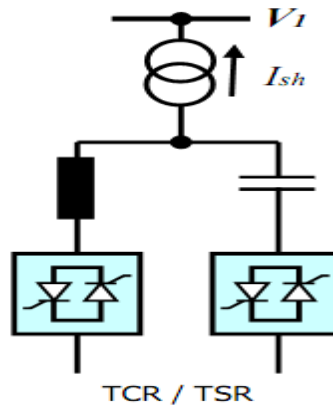


Figure 2.4. Schéma du SVC.

### 2.4.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (STATCOM).

Le STATCOM (Static synchronous Compensator) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle à un réseau alternatif en général par le biais d'un transformateur abaisseur.

La (Fig. 2.5) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage. [12]

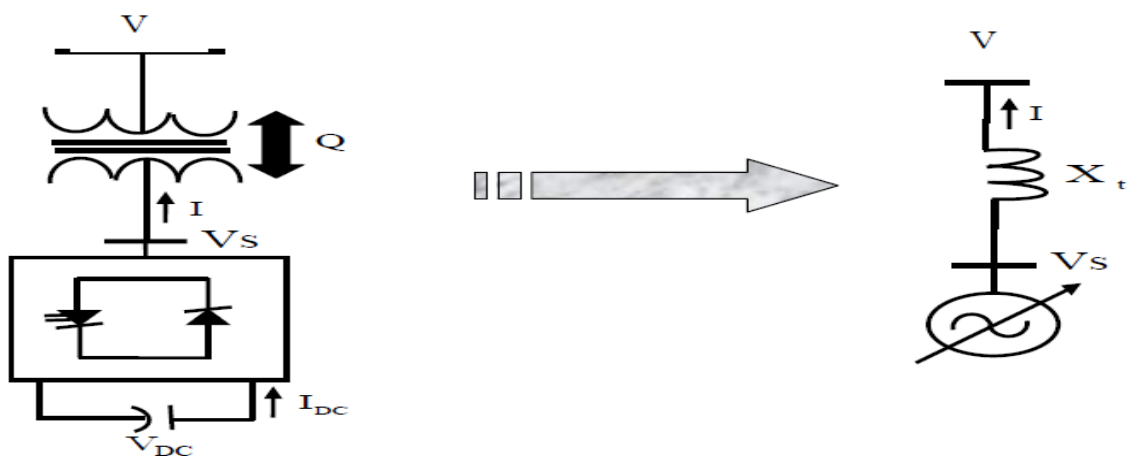


Figure 2.5. Présentation d'un compensateur STATCOM.



### 2.4.2. Dispositifs de compensation série.

Les condensateurs sont placés en série sur une ligne dont ils compensent la réactance. (Fig. 2.2.c) La compensation série est utilisée sur certaines lignes à haute tension à la fois très longues et très chargées. Elle est justifiée par des considérations telles que la stabilité. Ce type de compensation est assez exceptionnel.

Mentionnons que les principaux problèmes résident dans la protection contre les surintensités qui traversent les batteries lorsqu'un court-circuit se produit sur la ligne où elles sont installées. [12]

#### 2.4.2.1. Compensateurs séries à base de thyristors (TCSC)

TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor): il est constitué d'une inductance en série avec un gradateur et l'ensemble en parallèle avec une capacité (Fig. 2.6).

Le TCSC placé en série dans une ligne de transport permet de contrôler le flux de puissance et d'élever la capacité de transfert des lignes en agissant sur la réactance  $TCSC X$  qui varie selon l'angle de retard à l'amorçage des thyristors  $\alpha$ . [12]

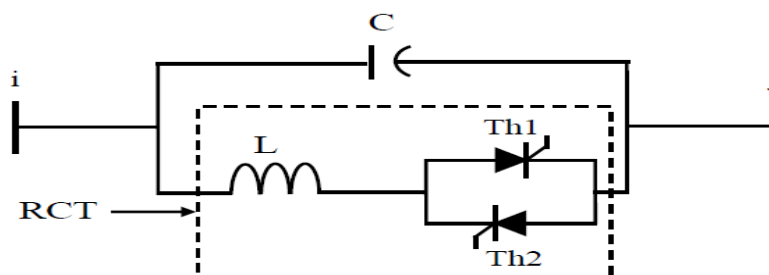


Figure II.6. Schéma de base d'un TCSC

#### 2.4.2.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).

Le compensateur série commuté par thyristor TSSC est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. La différence entre le (TSSC) et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de "90°" soit de "180°". [12]

#### 2.4.2.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor).

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable. [12]

### 2.4.2.4. SSSC (Static Synchronous Series Compensator).

Le compensateur série synchrone (Static Synchronous Série Compensator) est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur. Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. [12]

### 2.5. Choix du lieu d'installation.

La compensation peut être centrale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est elle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico- économique [14].

#### 2.5.1. Compensation centrale.

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation [14].

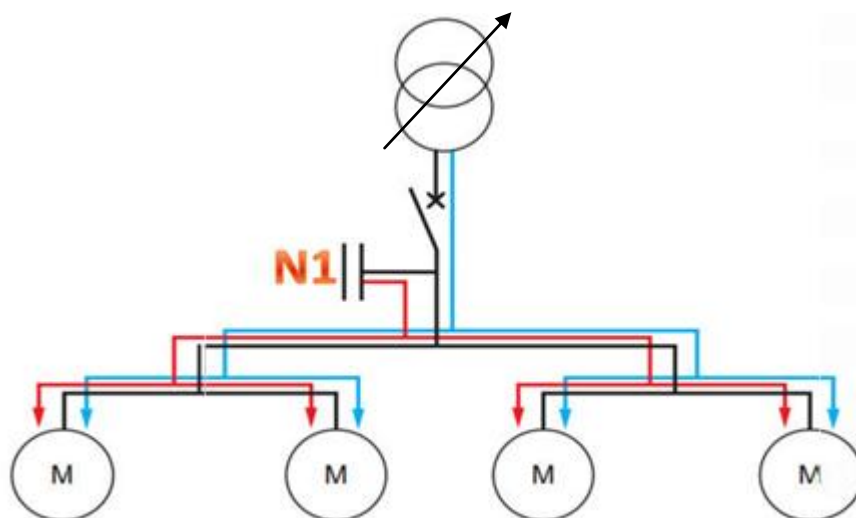


Figure II.7. Compensation centrale.

#### 2.5.2. Compensation partielle ou par secteurs.

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

Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment concernant le dimensionnement des câbles d'arrivée ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

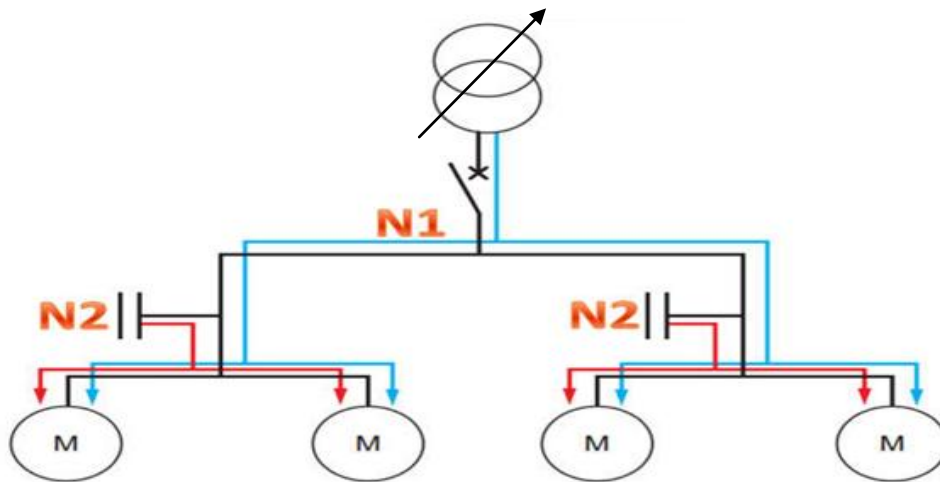


Figure II.8. Compensation par secteur.

### 2.5.3. Compensation Individuelle.

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

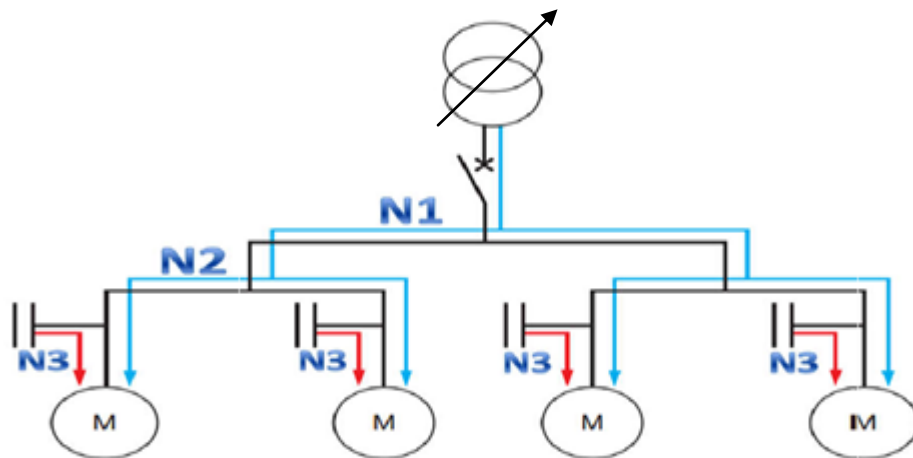


Figure II.9. Compensation individuelle.

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

De ce chapitre, on peut retenir des points suivants :

- la tension est fortement liée à la puissance réactive ; celle-ci n'est pas la seule mais la principale cause des variations de tension ;

## **Chapitre 2 : Réglage de la tension et contrôle de la puissance réactive**

---

- Le réglage de la tension est réalisé par différents moyens, shunt et série de compensation de la puissance réactive. Chaque moyen de réglage a des avantages et des inconvénients ;
- La stabilité de la tension est fortement déterminée par la puissance réactive, et les moyens de son réglage.

### **Chapitre 3 : Etude et analyse d'un modèle de ligne.**

### 3.1. Introduction.

Les territoires de grande superficie imposent le transport de l'énergie électrique par des lignes de grande longueur. Le transport de l'énergie électrique sur des grandes portées électriques implique diverses difficultés. En effet, le transport de grande quantité d'énergie sur des grandes distances implique des variations de tension très importantes, ainsi que des pertes de puissance active et réactive. Ces processus posent des problèmes de stabilité et de contrôle et les moyens pour résoudre ces derniers deviennent importants.

Pour cette raison, il est indispensable d'étudier et d'analyser ces processus de transport pour une meilleure maîtrise de leur gestion et leur exploitation.

Dans ce qui suit, on développe l'analyse d'un modèle de ligne de grande portée pour déduire les caractéristiques essentielles de sa performance.

### 3.2. Description du modèle.

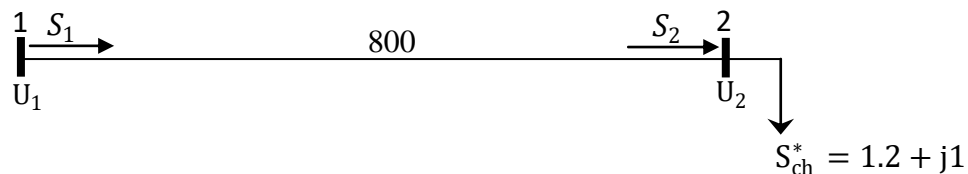
Soit donnée un modèle de ligne de paramètres suivants :

$$L = 800 \text{ km}$$

$$U_N = 500 \text{ kv}$$

$$S_{ch}^* = 1.2 + j1 \text{ p.u.}$$

**n = 2 : Nombre de conducteurs par phase.**



**Figure 3.1.** Modèle de principe.

Si la ligne est soumise au seul effet de la charge, alors on peut écrire,

$$S_2^* = S_{ch}^*$$

Contraintes :

$$1 \leq U_1 \leq 1,1$$

$$1 \leq U_1 \leq 1,05$$

### 3.3. Etude de différents régimes de ligne.

#### 2.3.1. Régime en charge.

L'expression de la tension à l'entrée de la ligne supposée idéale ( $\Delta P \approx 0$ ) est :

$$\dot{U}_1 = U_2 [\cos \alpha_0 l + Q_2^* \sin \alpha_0 l + j P_2^* \sin \alpha_0 l] \quad (3.1)$$

$$U_2^* = \sqrt{(\cos \alpha_0 l + Q_2^* \sin \alpha_0 l)^2 + (P_2^* \sin \alpha_0 l)^2} \quad (3.2)$$

Le déphasage entre la tension  $U_1$  et  $U_2$  est défini par :

$$\delta = \arctg \frac{(P_2^* \sin \alpha_0 l)}{1 + Q_2^* \sin \alpha_0 l} \quad (3.3)$$

$$K_U = \frac{\dot{U}_1}{U_2} = k_U e^{j\delta} \quad (3.4)$$

où :

$k_U$  : Rapport entre les modules des tensions  $U_1$  et  $U_2$  .

En prenant, comme valeur de base la tension, exigée constante, de l'extrémité de ligne :

$$U_2 = U_N = U_b \quad (3.5)$$

$$U_2^* = \frac{U_2}{U_N} = 1 \text{ (p. u)} \quad (3.6)$$

On aura donc, pour la ligne sans pertes donnée ;

$$U_1^* = \cos \alpha_0 l + \sin \alpha_0 l + j 1,2 \sin \alpha_0 l$$

**Tableau 3.1**

$l$ (km)	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	6	12	24	36	48
$U_i^*$	1	1,106	1,212	1,407	1,564	1,670

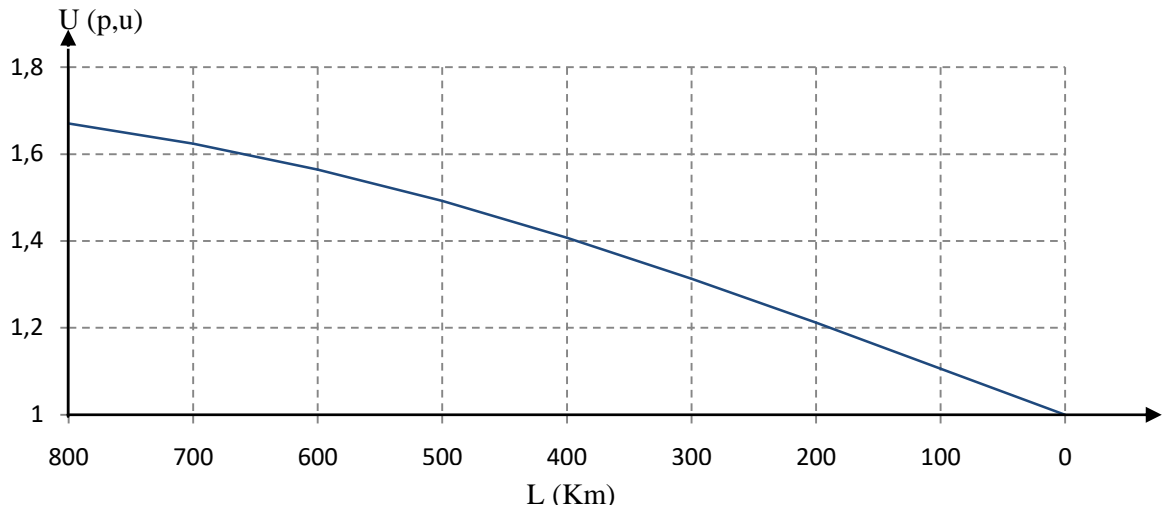


Figure 3.2. Épure du potentiel.

On observe que sous l'effet de la charge donnée, le plan de tension s'installe dans un large intervalle ( $\approx 67\%$ ) ce qui est inadmissible.

On doit adopter donc à un moyen de contrôle et de correction.

### 3.3.1.1. Compensation shunt au niveau de la charge

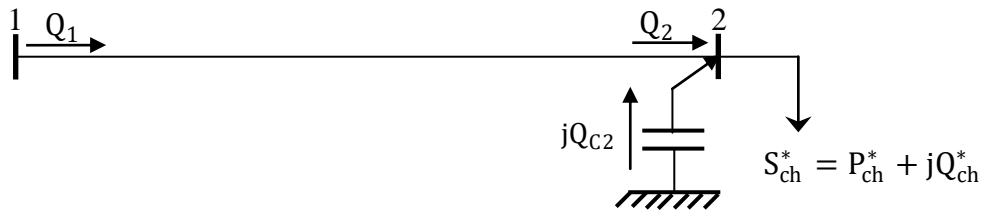


Figure 3.3. Modèle de principe.

L'expression de la puissance réactive au bout de la ligne est :

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 l + \sqrt{\frac{k_U^2}{(\sin \alpha_0 l)^2} - P_2^{*2}} \quad (3.7)$$

$$Q_{C2}^* = Q_{ch}^* - Q_2^* \quad (3.8)$$

où,  $Q_{C2}^*$ . - Puissance réactive injectée.

Conformément aux conditions données  $k_U = 1 \div 1,1$  ; on détermine,



$$Q_2^*(800) = -\operatorname{ctg} 48 + \sqrt{\frac{k_U^2}{(\sin 48)^2} - 1,2^2}$$

**Tableau 3.2**

$k_U$	1	1,05	1,1
$Q_2^*$	-0,291	-0,154	-0,034
$Q_{C2}^*$	1,291	1,154	1,034
$S_2^* = 1,2 + jQ_2^*$	$1,2 - j0,291$	$1,2 - j0,154$	$1,2 - j0,034$

avec :

$$k_U = 1$$

$$U_l^* = \cos \alpha_0 l - 0,291 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

$$k_U = 1,05$$

$$U_l^* = \cos \alpha_0 l - 0,154 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

$$k_U = 1,10$$

$$U_l^* = \cos \alpha_0 l - 0,033 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

Ces expressions permettent de définir le graphique du potentiel correspondant, (Fig. 3.4)

**Tableau 3.3**

$l$ (km)	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	6	12	24	36	48
$U_l^*$ ( $k_U = 1$ )	1,000	0,972	0,950	0,933	0,951	1,000
$U_l^*$ ( $k_U = 1,05$ )	1,000	0,986	0,978	0,981	1,006	1,050
$U_l^*$ ( $k_U = 1,1$ )	1,000	1,000	1,002	1,023	1,058	1,100

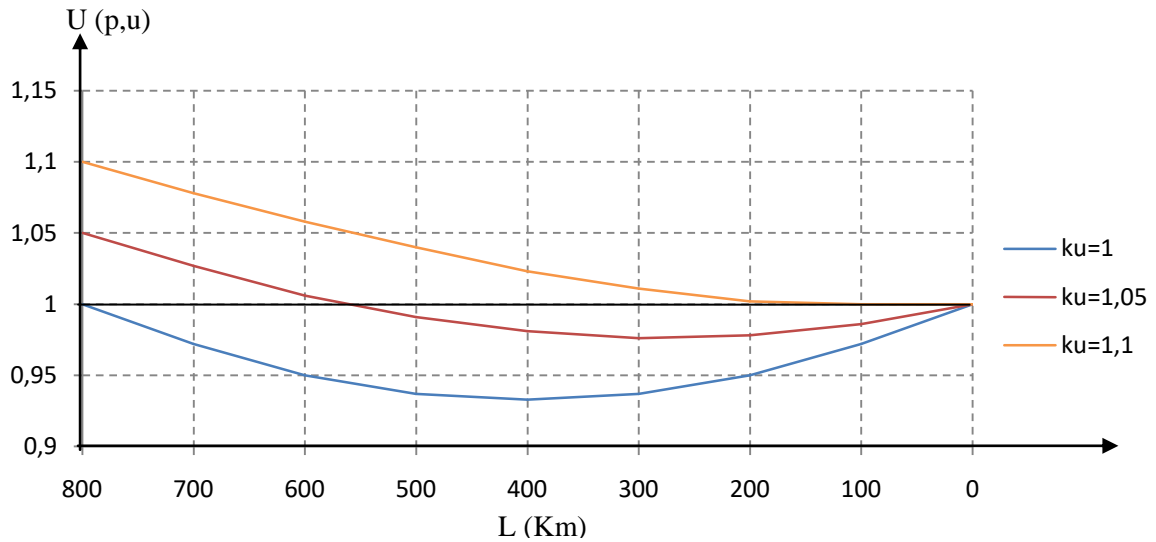


Figure 3.4. Epure de potentiel après compensation shunt au bout de la ligne.

La variation de la tension le long de sa longueur ne sort pas de l'intervalle  $\pm 10\%$  .

Pour les valeurs  $U_1$  à l'entrée maintenues égales à, respectivement,  $U_1 = 1; 1,05; 1,1$  ; la capacité maximale de transport de la ligne sera respectivement :

$$P_{m(1)} = \frac{k_U}{\sin \alpha_0 l} \simeq 1,345 \quad (3.9)$$

$$P_{m(1,05)} = \frac{k_U}{\sin \alpha_0 l} \simeq 1,413$$

$$P_{m(1,1)} = \frac{k_U}{\sin \alpha_0 l} \simeq 1,48$$

Comme la charge active donnée représente  $P_{ch} = P_2 = 1,2$  ; alors la réserve en puissance de la liaison représente, respectivement ;

$$k_{m(1)} = \frac{P_{m(1)} - P_2}{P_2} 100 = 12,08\% \quad (3.10)$$

$$k_{m(1,05)} = 17,75\%$$

$$k_{m(1,1)} = 23,33\%$$

Pour garantir ces réserves, il est nécessaire d'investir une compensation au bout de la ligne de valeur  $Q_{C,2}$  (Tab. 3.4).

La capacité de transport peut être améliorée par une redistribution du réactif le long de la ligne. Considérons, pour le traitement, le cas  $k_U = 1$  ( $U_1^* = U_2^* = 1$ ), et introduisons une compensation au milieu de la ligne ; (Fig. 3.6).

**3.3.1.2. Compensation shunt au milieu de la ligne.**

Pour cette redistribution, on réécrit ;

$$\dot{U}_M = \cos \alpha_0 \frac{l}{2} + Q_2^* \sin \alpha_0 \frac{l}{2} + j1,2 \sin \alpha_0 \frac{l}{2} \quad (3.11)$$

$$Q_2^* = -\text{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} + \frac{k_M^2}{\sqrt{\left(\sin \alpha_0 \frac{l}{2}\right)^2 - P_2^{*2}}} \quad (3.12)$$

avec ;

$$k_M = \frac{U_M}{U_2} \quad (3.13)$$

L'exemple de calcul pour les trois cas  $k_M = 1; 1,05; 1,1$  est donné dans le tableau suivant :

**Tableau 3.4**

$k_M$	1	1,05	1,1
$Q_2^*$	-0,100	0,039	0,177
$Q_{C2}^*$	1,100	0,961	0,823
$S_2^* = 1,2 + jQ_2^*$	1,2 - j0,100	1,2 + j0,039	1,2 + j0,177

La puissance réactive à injecter au nœud « 2 » a diminué par rapport au cas précédent, ainsi que la nouvelle puissance de ligne  $S_2^*$  (Tab. 3.4).

Chaque valeur imposée à  $U_M$  implique une valeur correspondante de  $U_1$  qui permet de réécrire pour la ligne,

$k_M = 1$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l - 0,100 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

$k_M = 1,05$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,039 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

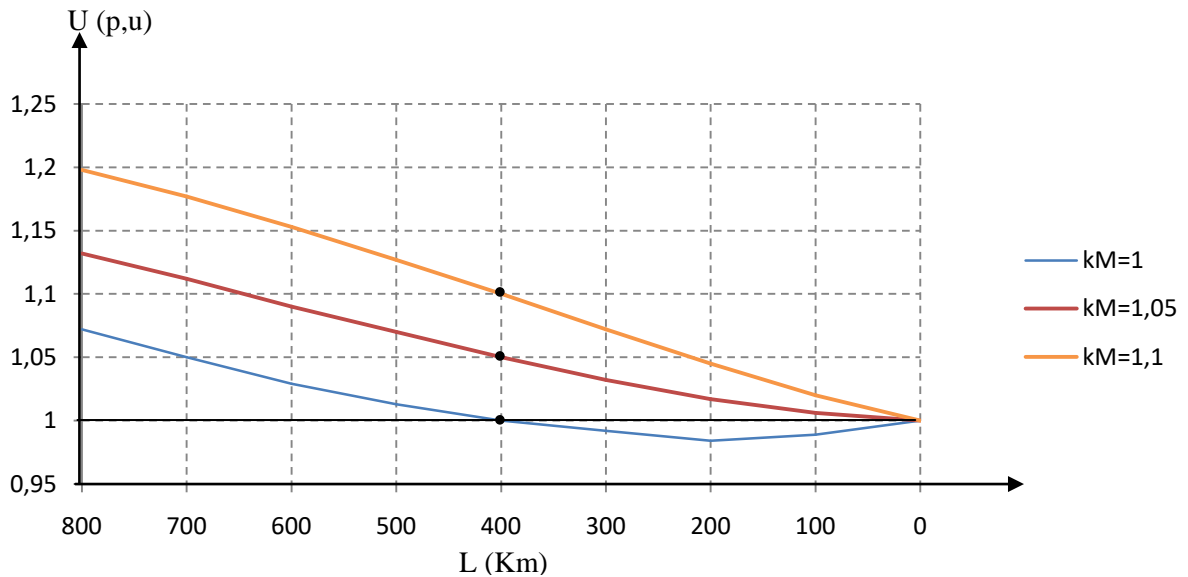
$k_M = 1,10$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,177 \sin \alpha_0 l + j1,2 \sin \alpha_0 l$$

Ces expressions donnent le graphique de potentiel de la (Fig. 3.5), (Tab 3.5) ;

**Tableau 3.5**

$l$ (km)	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	6	12	24	36	48
$U_l^*$ ( $k_M = 1$ )	1,000	0,989	0,984	1,000	1,029	1,072
$U_l^*$ ( $k_M = 1,05$ )	1,000	1,006	1,017	1,050	1,090	1,132
$U_l^*$ ( $k_M = 1,1$ )	1,000	1,020	1,045	1,100	1,153	1,198



**Figure 3.5.** Epure du potentiel :  $k_M = 1; 1,05; 1,1$ .

Si on doit se conformer à la condition  $k_U = 1$ , les valeurs obtenues de la tension à l'entrée de la ligne doivent être abaissées à celle  $U_1^* = 1$ , tout en maintenant  $U_M^*$  aux valeurs considérées. Ceci ne peut être atteint que par voie de compensation transversale dans le point médian « M » de la ligne, (Fig. 3.6). La tension sera alors le siège d'une autre distribution aussi bien de potentiel que de puissance réactive.

Pour que la tension au nœud « 1 » soit maintenue à sa valeur  $U_1^* = 1$ , il est nécessaire de déterminer la puissance réactive requise de ligne  $Q_{1M}$ .

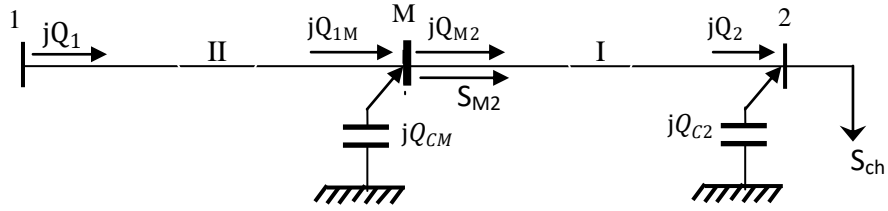


Figure 3.6. Répartition de la compensation.

La tension du nœud « M » est assurée par l'injection de  $Q_{C2}$  au nœud « 2 » ; de même, la tension du nœud « 1 » doit être assurée par l'injection de  $Q_{CM}$ ,  $U_M$  étant maintenue constante. La tension  $U_1$  est donc déterminée par la puissance requise  $Q_{1M}$  à réaliser au bout tronçon « II », laquelle puissance s'exprime :

$$Q_{1M(M)}^* = -\operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} + \sqrt{\frac{k_{1M}^2}{\left(\sin \alpha_0 \frac{l}{2}\right)^2} - P_{2(M)}^{*2}} \quad (3.14)$$

où, les puissances sont exprimées par unité de base relativement à la tension du nœud « M » : c.-à-d. ;

$$Q_{1M(M)}^* = \frac{Q_{1M}}{P_{C(M)}} \quad \text{et} \quad P_{2(M)}^* = \frac{P_2}{P_{C(M)}} \quad (3.15)$$

avec ;

$$P_{C(M)} = \frac{U_M^2}{Z_C} = \frac{k_M^2 U_2^2}{Z_C} = k_M^2 P_C \quad (3.16)$$

de même ;

$$k_{1M} = \frac{U_1}{U_M} = \frac{U_1}{k_M U_2} = \frac{k_U}{k_M} \quad (3.17)$$

avec :

$$k_M = \frac{U_M}{U_2} \quad (3.18)$$

ce qui donne ;

$$Q_{1M(M)}^* = \frac{Q_{1M}}{k_M^2 P_C} = \frac{Q_{1M}^*}{k_M^2} \quad (3.19)$$

$$P_{1M(M)}^* = \frac{P_2}{k_M^2 P_C} = \frac{P_2^*}{k_M^2} \quad (3.20)$$

on ré-exprime donc :

$$Q_{1M(M)}^* = \frac{Q_{1M}^*}{k_M^2} = -\operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} + \sqrt{\frac{k_U^2}{\left(k_M \sin \alpha_0 \frac{l}{2}\right)^2} - \left(\frac{P_2^*}{k_M^2}\right)^2} \quad (3.21)$$

ou bien ;

$$Q_{1M}^* = -k_M^2 \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} + \sqrt{\left(\frac{k_M k_U}{\sin \alpha_0 \frac{l}{2}}\right)^2 - P_2^{*2}} \quad (3.22)$$

où, les puissances  $Q_{1M}^*$  et  $P_2^{*2}$  sont exprimées par unité relativement à la tension de base  $U_2 = U_N$ , de manière à rendre directement comparables toutes les grandeurs quelque soit la variation de l'état de la liaison ; puisque ces grandeurs seront rapportées à la même base.

La même procédure, conduit à exprimer pour le tronçon «II» :

$$\dot{U}_1 = k_M \left( \cos \alpha_0 \frac{l}{2} + \frac{Q_{1M}^*}{k_M^2} \sin \alpha_0 \frac{l}{2} + j \frac{P_2^*}{k_M^2} \sin \alpha_0 \frac{l}{2} \right) \quad (3.23)$$

$$Q_1^* = (k_U^2 - k_M^2) \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} - Q_{1M}^* \quad (3.24)$$

Ainsi pour chaque valeur de  $k_M$  on a une répartition différente. Ayant la puissance réactive  $Q_{1M}$  pour chaque cas, on peut calculer la puissance à injecter  $Q_{CM}$  correspondante :

$$Q_{CM}^* = Q_{M2}^* - Q_{1M}^* \quad (3.25)$$

La puissance réactive  $Q_{M2}$  peut être calculée par la formule :

$$Q_{M2}^* = (k_M^2 - 1) \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} - Q_2^* \quad (3.26)$$

### Chapitre 3 : Etude et analyse d'un modèle de ligne

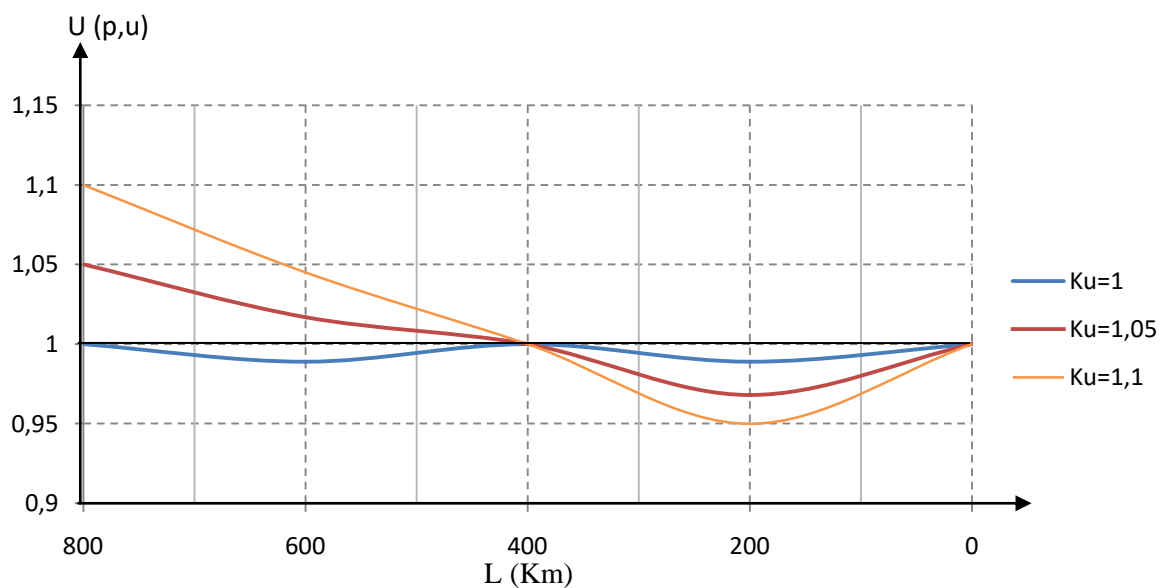
Ainsi, conformément à la condition  $k_M = 1$ ,  $k_U = 1; 1,05; 1,1$ , on peut réaliser un exemple de calcul (Tab. 3.6, 7) ; la représentation graphique étant donnée sur la Figure 3.7.

**Tableau 3.6**

$k_U$	1	1,05	1,1
$Q_2^*$	-0,100	0,039	0,177
$Q_{M2}^*$	0,100	-0,039	-0,177
$Q_1^*$	0,100	0,190	0,294
$Q_{1M}^*$	-0,100	0,039	0,177
$Q_{CM}$	0,200	-0,078	-0,354
$S_{M2}^* = P_2^* + jQ_{M2}^*$	$1,2 + j0,100$	$1,2 - j0,039$	$1,2 - j0,177$

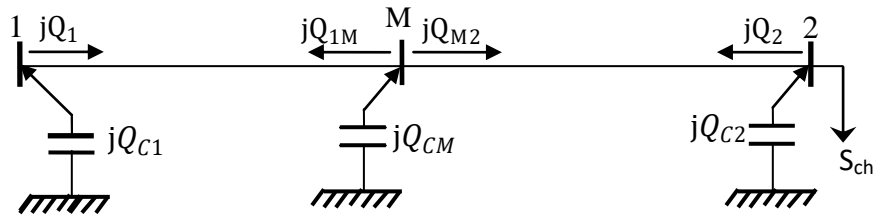
**Tableau 3.7**

$k_U$		1	1,05	1,1
$\dot{U}_M(x)$	$l$ (km)			
	$\alpha_0 l$ (°)			
$\dot{U}_M(x)$	0	0	1,000	1,000
	200	12	0,989	0,968
	400	24	1,000	1,000
$\dot{U}_1(x)$	0	0	1,000	1,000
	200	12	0,989	1,017
	400	24	1,000	1,100



**Figure 3.7.** Epure du potentiel :  $k_U = 1; 1,05; 1,1$  et  $k_M = 1$ .

Pour le cas  $k_U = 1$ , la circulation de la puissance réactive de ligne aura comme montée sur la Figure. 3.8.



**Figure 3.8.** Répartition de la compensation.

Ainsi, conformément à la condition  $k_U = 1$  et  $k_M = 1; 1,05; 1,1$ , on peut réaliser un exemple de calcul (Tableau 3.8, 9) ; la représentation graphique étant donnée sur la Figure 3.9.

**Tableau 3.8**

$k_M$	1	1,05	1,1
$Q_2^*$	-0,100	0,039	0,177
$Q_{C2}^*$	1,1	0,961	0,823
$Q_{1M}^*$	-0,100	-0,190	-0,294
$Q_{M2}^*$	0,100	0,190	0,294
$Q_1^*$	0,100	-0,039	-0,177
$Q_{CM}$	0,200	0,380	0,588
$S_{M2}^* = P_2^* + jQ_{M2}^*$	1,2 + j0,100	1,2 + j0,190	1,2 + j0,294
$S_{1M}^* = P_1^* + jQ_{1M}^*$	1,2 - j0,100	1,088 - j0,190	0,991 - j0,294

Pour le tronçon « I » avec  $x = 0 \div 400$  ou bien  $l (0 \div 400)$  on obtient :

$$\dot{U}_M(x) = \cos \alpha_0 x + Q_2^* \sin \alpha_0 x + j1,2 \sin \alpha_0 x$$

Pour les trois cas de  $k_M = 1; 1,05; 1,1$  ; l'expression de tension correspondante s'exprime comme suite :

$$k_M = 1$$

$$\dot{U}_M(x) = \cos \alpha_0 x - 0,100 \sin \alpha_0 x + j 1,2 \sin \alpha_0 x$$

$$k_M = 1,05$$

$$\dot{U}_M(x) = \cos \alpha_0 x + 0,039 \sin \alpha_0 x + j 1,2 \sin \alpha_0 x$$

$$k_M = 1,10$$

$$\dot{U}_M(x) = \cos \alpha_0 x + 0,177 \sin \alpha_0 x + j1,2 \sin \alpha_0 x$$



### Chapitre 3 : Etude et analyse d'un modèle de ligne

De même pour le tronçon « II » avec  $x = 0 \div 400$  ou bien  $l (400 \div 800)$  :

$$\dot{U}_1(x) = k_M \left( \cos \alpha_0 x + \frac{Q_{1M}^*}{k_M^2} \sin \alpha_0 x + j \frac{P_2^*}{k_M^2} \sin \alpha_0 x \right)$$

$k_M = 1$

$$\dot{U}_1(x) = \cos \alpha_0 x - 0,100 \sin \alpha_0 x + j 1,2 \sin \alpha_0 x$$

$k_M = 1,05$

$$\dot{U}_1(x) = 1,05 (\cos \alpha_0 x - 0,172 \sin \alpha_0 x + j 1,088 \sin \alpha_0 x)$$

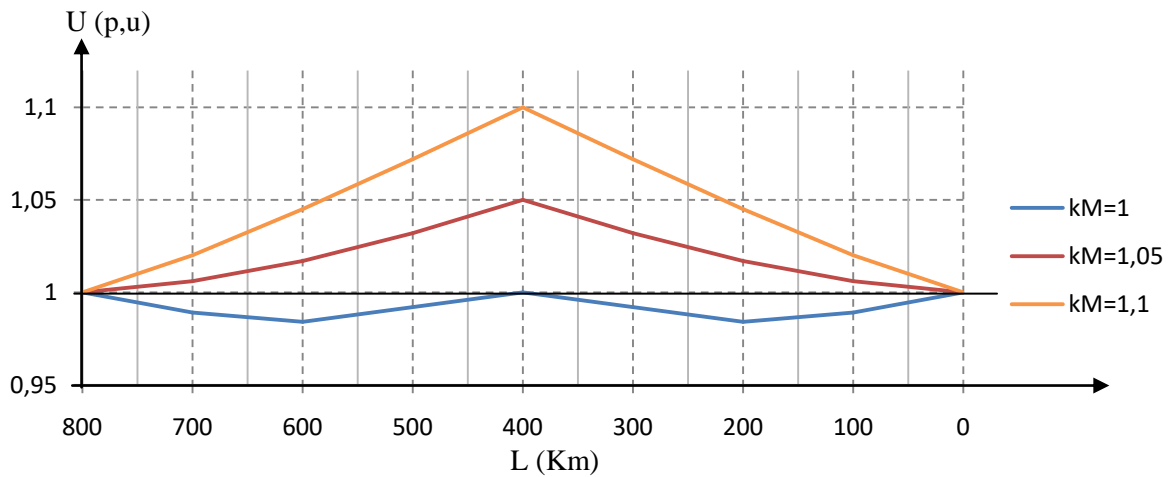
$k_M = 1,10$

$$\dot{U}_1(x) = 1,10 (\cos \alpha_0 x - 0,242 \sin \alpha_0 x + j 0,991 \sin \alpha_0 x)$$

Ces expressions permettent de définir le graphique du potentiel correspondant, (Fig.3.9)

**Tableau 3.9**

$k_M$			1	1,05	1,1
	$l$ (km)	$\alpha_0 l$ (°)			
$\dot{U}_M(x)$	0	0	1,000	1,000	1,000
	100	6	0,984	1,006	1,020
	200	12	0,989	1,017	1,045
	400	24	1,000	1,050	1,100
$\dot{U}_1(x)$	0	0	1,000	1,050	1,100
	100	6	0,989	1,006	1,020
	200	12	0,984	1,017	1,045
	400	24	1,000	1,000	1,000



**Figure 3.9.** Epure de potentiel :  $k_M = 1; 1,05; 1,1$  et  $k_U = 1$ .

**3.3.2. Régime à vide.**

En régime à vide, on a :

$$S_{ch}^* = P_{ch}^* + JQ_{ch}^* = 0 \quad (3.29)$$

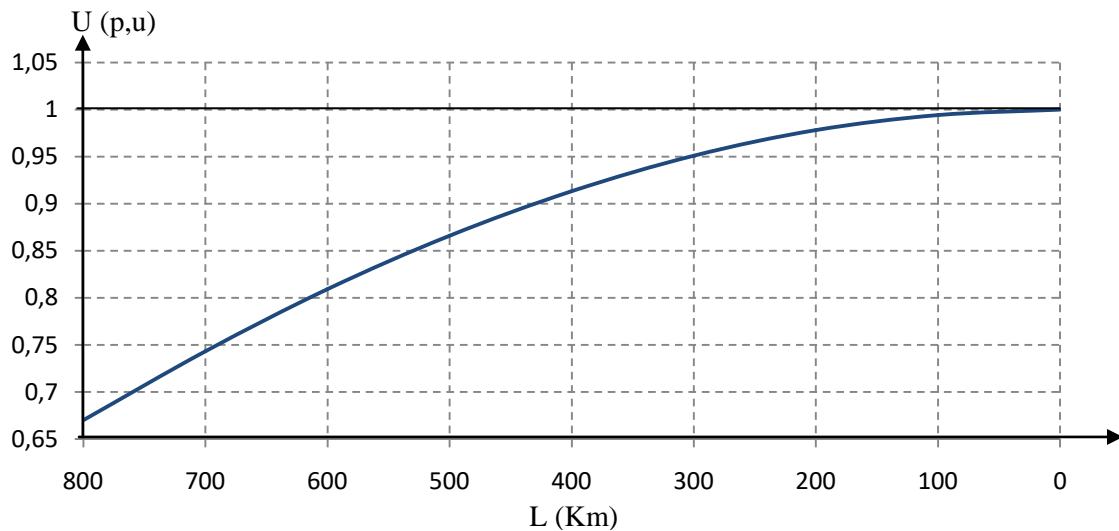
En l'absence de la compensation au bout de la ligne, l'expression de la tension d'entrée, est :

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l$$

Cette dernière donne le graphique de la Figure 3.10, (Tab. 3.10).

**Tableau 3.10**

$l$ (km)	0	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	12	24	36	48
$\dot{U}_1$	1	0,978	0,913	0,809	0,670



**Figure 3.10.** Epure du potentiel régime à vide.

Si on doit maintenir la tension à l'entrée de la ligne égale à l'unité, quand cette dernière est à vide, alors la tension, le long de la ligne sous l'effet capacitif de cette dernière, augmente considérablement jusqu'à atteindre, au bout de la ligne, la valeur inadmissible de  $U_2 \approx 1,33$ ; soit une augmentation de 33%.

Donc, en régime à vide, ou un régime de minimum de charge, il est nécessaire de disposer de moyen de compensation pour éviter de telles surtensions.

**3.3.2.1. Compensation de puissance réactive au bout de la ligne.**

L'injection de la puissance réactive au nœud « 2 » redéfinit ;

$$Q_{2,0}^* = -\operatorname{ctg} \alpha_0 l + \sqrt{\left(\frac{k_U}{\sin \alpha_0 l}\right)^2 - 0}$$

$$Q_{2,0}^* = -\operatorname{ctg} 48 + \frac{k_U}{\sin 48}$$

$$Q_{C,0}^* = -Q_{2,0}^*$$

**Tableau 3.11**

$k_U$	1	1,05	1,1
$Q_{2,0}^*$	0,445	0,512	0,580
$Q_{C,0}^*$	-0,445	-0,512	-0,580
$S_{2,0}^*$	$0 + j0,445$	$0 + j0,512$	$0 + j0,580$

$k_U = 1$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,445 \sin \alpha_0 l$$

$k_U = 1,05$

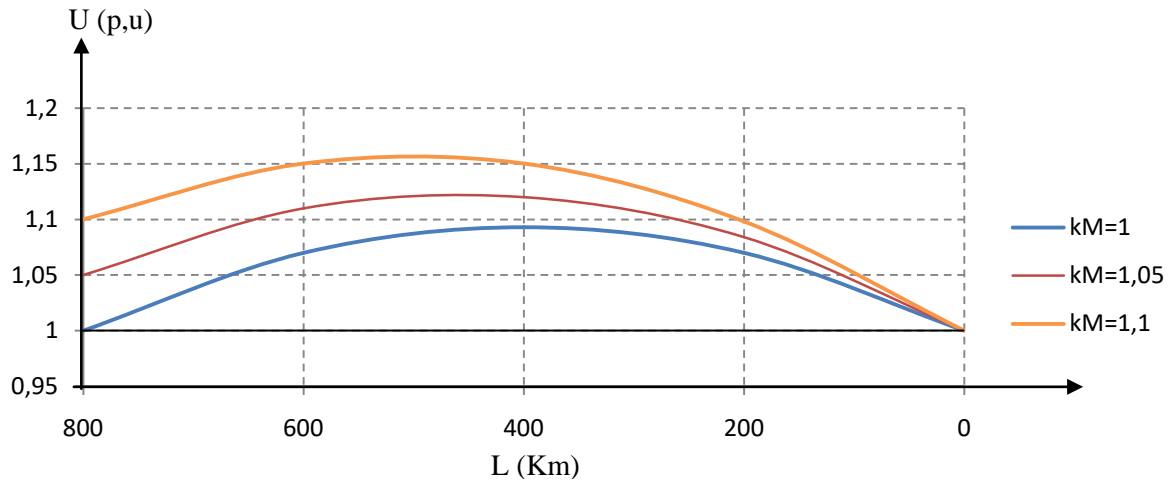
$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,512 \sin \alpha_0 l$$

$k_U = 1,1$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,580 \sin \alpha_0 l$$

**Tableau 3.12**

$l$ (km)	0	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	12	24	36	48
$U_l^*(k_U = 1)$	1,000	1,070	1,094	1,070	1,000
$U_l^*(k_U = 1,05)$	1,000	1,084	1,12	1,11	1,050
$U_l^*(k_U = 1,1)$	1,000	1,098	1,149	1,150	1,100



**Figure 3.11.** Epure de potentiel après une compensation au bout de la ligne.

Même avec l'utilisation d'une compensation de la puissance réactive à la fin de la ligne la tension sort de la marge admissible pour les cas de  $k_U = 1,05 \div 1,1$ .

Une autre répartition du réactif peut très bien améliorer le plan de potentiel.

### 3.3.2.2. Compensation de puissance réactive au milieu de la ligne.

Comme précédemment, en imposant une tension au point médian tel que :

$$U_M = 1; 1,05; 1,1 = k_M$$

On peut redéfinir,

$$Q_{2,0}^* = -\text{ctg } \alpha_0 \frac{l}{2} + \frac{k_M}{\sin \alpha_0} \frac{l}{2}$$

$$Q_{C,0}^* = -Q_{2,0}^*$$

**Tableau 3.13**

$k_M$	1	1,05	1,1
$Q_{2,0}^*$	0,212	0,335	0,458
$Q_{C,0}^*$	-0,212	-0,335	-0,458
$S_{2,0}^*$	0 + j0,212	0 + j0,335	0 + j0,458

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + Q_{2,0}^* \sin \alpha_0 l$$

$$k_M = 1$$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,212 \sin \alpha_0 l$$

$$k_M = 1,05$$

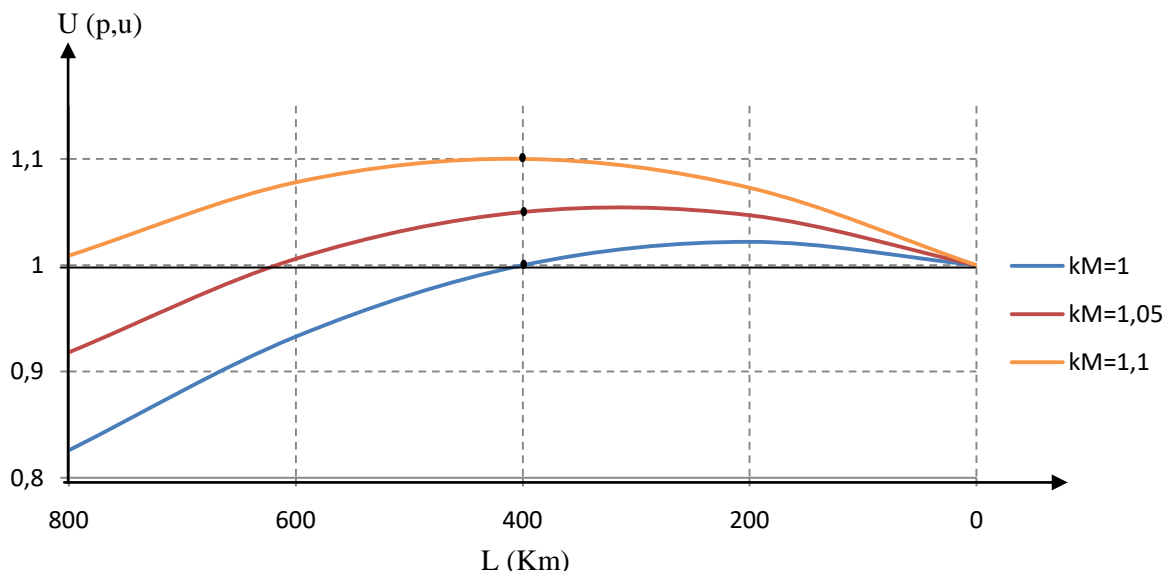
$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,335 \sin \alpha_0 l$$

$$k_M = 1,1$$

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + 0,458 \sin \alpha_0 l$$

**Tableau 3.14**

$l$ (km)	0	200	400	600	800
$\alpha_0 l$ (°)	0	12	24	36	48
$U_l^*$ ( $k_M = 1$ )	1,000	1,022	1,000	0,933	0,826
$U_l^*$ ( $k_M = 1,05$ )	1,000	1,047	1,050	1,006	0,918
$U_l^*$ ( $k_M = 1,1$ )	1,000	1,073	1,100	1,078	1,009



**Figure 3.12.** Epure de potentiel :  $k_M = 1; 1,05; 1,1$ .

On obtient ainsi, trois graphiques  $k_M = 1; 1,05; 1,1$ ; (Fig.3.12).

Le changement de la répartition de la puissance réactive implique celui de la tension. Si on exige encore, comme pour le point « M », que la tension dans le nœud « 1 » doit être

### Chapitre 3 : Etude et analyse d'un modèle de ligne

maintenue à une valeur donnée, par exemple  $k_U = 1$ , on doit alors, réaliser une puissance réactive de ligne  $Q_{1M,0}$  bien déterminée ;

$$Q_{1M,0}^* = -k_M^2 \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} + \frac{k_U k_M}{\sin \alpha_0} \frac{1}{2}$$

Ce qui permet de réaliser la tension,

$$\dot{U}_1 = k_M \left( \cos \alpha_0 \frac{l}{2} + \frac{Q_{1M,0}^*}{k_M^2} \sin \alpha_0 \frac{l}{2} \right)$$

et,

$$Q_{CM,0}^* = Q_{M2,0}^* - Q_{1M,0}^*$$

avec,

$$Q_{M2,0}^* = (k_M^2 - 1) \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} - Q_{2,0}^*$$

$$Q_{1,0}^* = (k_U^2 - k_M^2) \operatorname{ctg} \alpha_0 \frac{l}{2} - Q_{1M,0}^*$$

**Tableau 3.15**

$k_M$	1	1,05	1,1
$Q_{C2,0}^*$	-0,212	-0,335	-0,458
$Q_{1M,0}^*$	0,212	0,105	-0,013
$Q_{M2,0}^*$	-0,212	-0,105	0,013
$Q_{1,0}^*$	-0,212	-0,335	-0,458
$Q_{CM,0}^*$	-0,424	-0,210	0,260
$S_{M2}^* = 0 + jQ_{M2,0}^*$	$0 - j0,212$	$0 - j0,105$	$0 + j0,013$

$k_M = 1$

$$U_1^*(x) = 1(\cos \alpha_0 x + 0,212 \sin \alpha_0 x)$$

$k_M = 1,05$

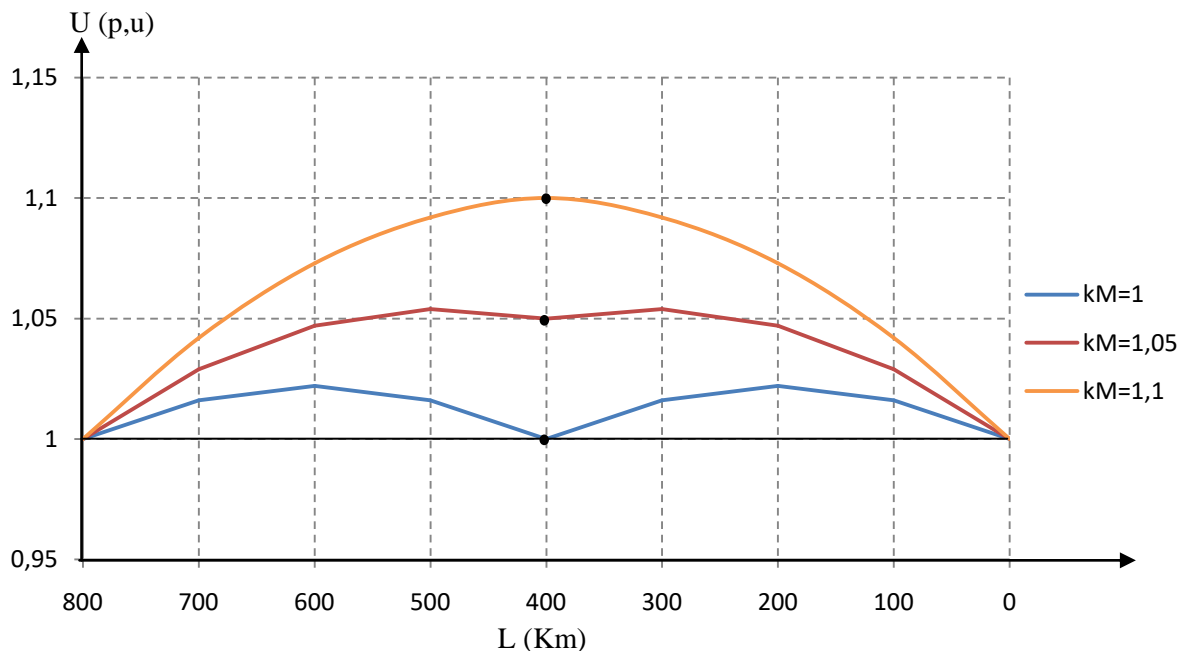
$$U_1^*(x) = 1,05(\cos \alpha_0 x + 0,095 \sin \alpha_0 x)$$

$k_M = 1,1$

$$U_1^*(x) = 1,1(\cos \alpha_0 x - 0,010 \sin \alpha_0 x)$$

**Tableau 3.16**

$k_M$			1	1,05	1,1
	$l$ (km)	$\alpha_0 l$ (°)			
$U_M^*(x)$	0	0	1,000	1,000	1,000
	100	6	1,016	1,054	1,092
	200	12	1,022	1,047	1,073
	400	24	1,000	1,050	1,100
$U_1^*(x)$	0	0	1,000	1,050	1,100
	100	6	1,016	1,054	1,092
	200	12	1,022	1,047	1,073
	400	24	1,000	1,000	1,000



**Figure 3.13.** Epure de potentiel :  $k_M = 1; 1,05; 1,1$  et  $k_U = 1$ .

On voit que la tension s'insère dans les limites admissibles.

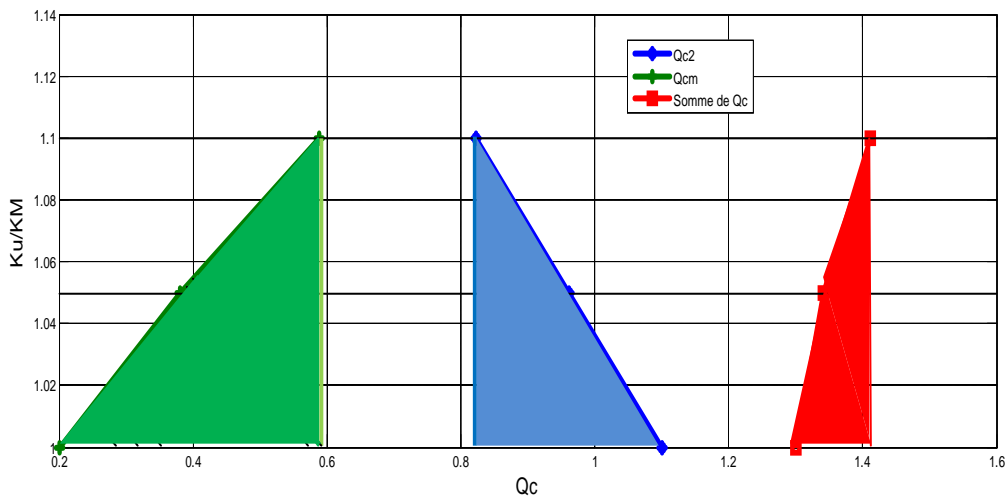
**3.4. Comparaison des investissements en puissance réactive.**

Cette comparaison est faite, par exemple pour le en charge, pour voir la différence de quantité de la puissance réactive injectée pour chaque cas considéré  $k_M = 1 ; 1,05 ; 1,1$  avec  $k_U = 1$ , (Fig.3.9 ; Tb.3.8).

**Tableau 3.17**

$k_M$	Régime en charge			Régime à vide		
	$Q_{C2}^*$	$Q_{CM}^*$	$\sum Q_C^*$	$Q_{C2,0}^*$	$Q_{CM,0}^*$	$\sum Q_C^*$
1	1,100	0,200	1,300	-0,212	-0,424	-0,636
1,05	0,961	0,380	1,341	-0,335	-0,210	-0,545
1,1	0,823	0,588	1,411	-0,458	0,260	-0,198

La valeur sommaire de la puissance injectée varie en passant d'une distribution à une autre. Les chutes sont fortement atténuées.



**Figure 3.14.** Puissance réactive dont il faut disposer pour réaliser le plan de tension requis ;  $k_U = 1$ .

On définit, ainsi, par les aires obtenues (colorées) toutes les valeurs possibles de la puissance réactive de compensation à même de réaliser le plan de tension requis le long de la liaison. Pour plus d'avantage, les coordonnées à arrêter pour un choix définitif de la puissance sommaire de compensation, on peut introduire un autre critère de performance qui relève, par exemple, de considération économique, technique...



3.5. Effet de la configuration et du niveau de tension nominal

Il s'agit de déterminer les effets impliqués par l'introduction des phases en faisceau et le passage à un autre niveau nominal de tension sur les états de régime du système.

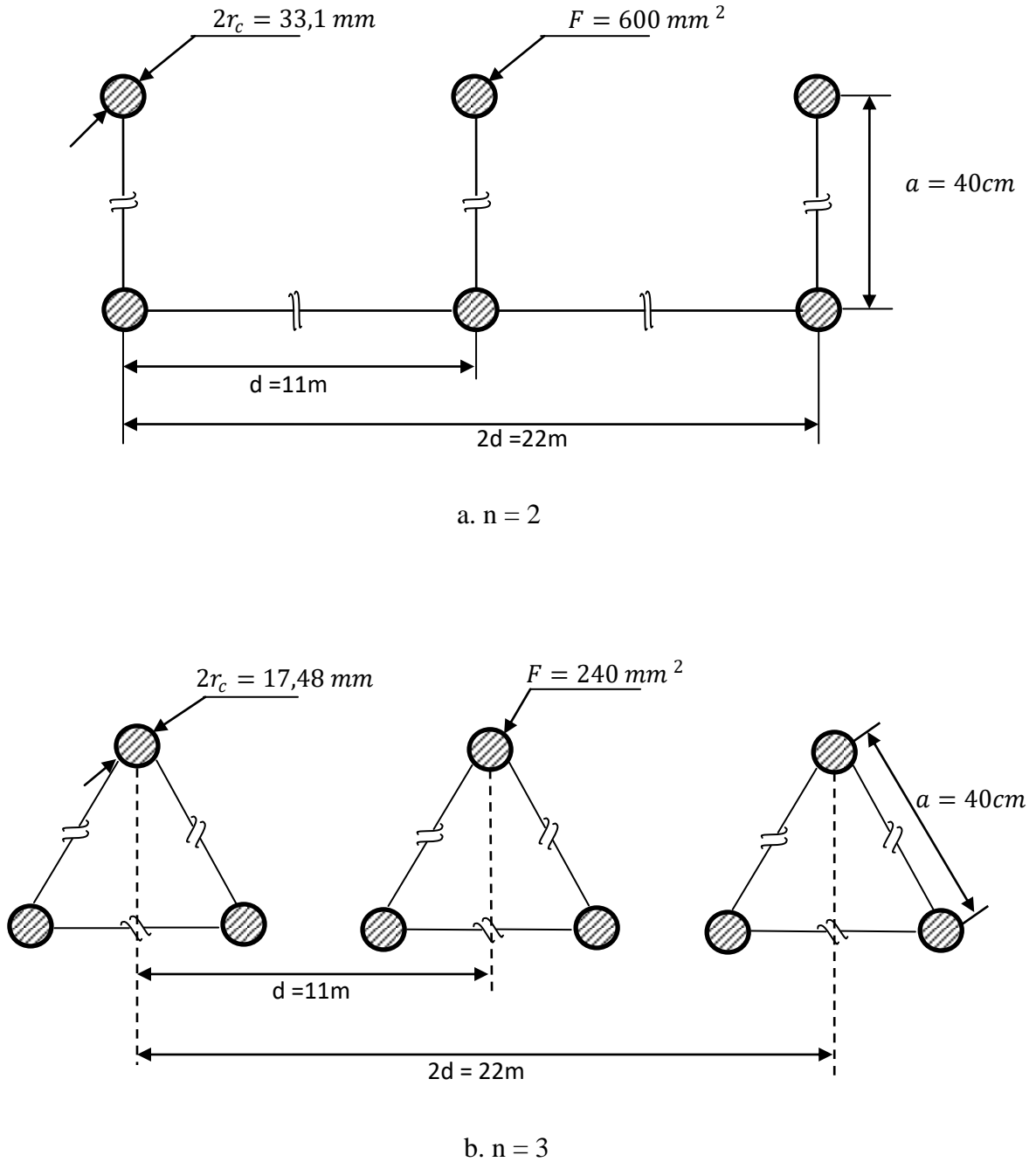


Figure 3.15. Configuration des phases.

**3.5.1. Paramètres primaires de la ligne.**

On calcule les paramètres par les expressions suivantes :

La réactance  $x_0$  se calcule comme,

$$x_0 = 0,144 \log\left(\frac{D_m}{R_{eq}}\right) + \frac{0,016}{n} \quad [\Omega/\text{km}] \quad (3.30)$$

où,

$D_m$  : Distance moyenne géométrique entre phases :  $D_m = 1,26 \cdot d$

$R_{eq}$  : Rayon équivalent de phase ;

\* Pour  $n \leq 3$        $R_{eq} = \sqrt[n]{r_c d_m^{n-1}}$

\* Pour  $n > 3$        $R_{eq} = \sqrt[n]{r_c \cdot \prod_{i=2}^n a_{1i}}$

$r_c$  : Rayon d'un conducteur du faisceau.

$d_m$  : Distance moyenne géométrique entre les conducteurs de phase.

$a$  : Distance entre conducteurs du faisceau de la phase.

$\Pi$  : produit .

La susceptance  $b_0$  est calculée comme,

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log(D_m/R_{eq})} \quad [\Omega^{-1}/\text{km}] \quad (3.31)$$

**Tableau 3.18**

n	F (mm <sup>2</sup> )	$r_c$ (cm)	$R_{eq}$ (cm)	$D_m$ (cm)	$x_0$ [ $\Omega/\text{km}$ ]	$b_0$ [ $\Omega^{-1}/\text{km}$ ]
2	600	1,655	8,136	1386	0,329	$3,397 \cdot 10^{-6}$
3	240	1,155	12,271	1386	0,300	$3,692 \cdot 10^{-6}$

La multiplication des conducteurs par phase (faisceau) a pour but principal d'augmenter le rayon équivalent de la phase, pour réduire le risque de décharge par effet couronne en cas de haute tension. On réduit ainsi la conductance transversale jusqu'à la négligée.

Les effets avantageux accompagnateurs de cette configuration en faisceau sont que la réactance de la phase diminue de manière important et sa susceptance augmente

considérablement. Ce qui procure à la ligne, respectivement, une plus grande capacité de transport et une plus grande réserve en puissance réactive.

**3.5.2. Paramètres secondaires de la ligne.**

A l'aide des paramètres primaires, on calcule les paramètres secondaires de la ligne. Pour les lignes HT on utilise naturellement des sections plus grandes pour lesquelles  $r_0$  diminue considérablement. De même, la multiplication en faisceau permet de négliger la conductance  $g_0$ . Ce qui permet de poser,

$$r_0 \approx g_0 \approx 0$$

Le facteur d'onde électromagnétique  $\gamma_0$  s'exprime,

$$\gamma_0 = \beta_0 + j\alpha_0$$

$$\gamma_0 = \sqrt{Z_0 Y_0} = j\sqrt{x_0 b_0} = j\alpha_0$$

où :

$\beta_0$ : Facteur d amortissement de l'onde.

$\alpha_0$ : Facteur de phase qui représente la déviation par km du vecteur tension [ $^\circ$ /Km]

L'impédance caractéristique (d'onde) de la ligne est :

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} \tag{3.32}$$

**Tableau 3.19**

n	F (mm <sup>2</sup> )	$\alpha_0$ (°/km)	$Y_0$ (n <sup>-3</sup> )	$Z_c$ ( $\Omega$ )
2	600	0,06	1,057	311,207
3	240	0,06	1,057	285,055

On constate que l'augmentation de la section du conducteur et le nombre de conducteurs par phase entraine la diminution de l'impédance caractéristique d'onde  $Z_c$ .

**3.5.3. Puissances par unité naturelle et relative.**

### Chapitre 3 : Etude et analyse d'un modèle de ligne

L'expression de la puissance caractéristique  $P_C$  est :

$$P_{C(n)} = \frac{U_N^2}{Z_{C(n)}} \quad (3.33)$$

**Tableau 3.20**

$U_N$ (kv)	500 (KV)			750 (KV)		
n	F (mm <sup>2</sup> )	$Z_C$ ( $\Omega$ )	$P_C$ (MW)	F (mm <sup>2</sup> )	$Z_C$ ( $\Omega$ )	$P_C$ (MW)
2	600	311,207	803,323	600	311,207	1807,478
3	240	285,055	877,023	240	285,055	1973,303

Par exemple, pour  $n = 2$  ;

$$P = P^* \cdot P_{C1} \quad \rightarrow \quad P = 1,2 \cdot 803,323 = 963,987 \text{ MW}$$

$$Q = Q^* \cdot P_{C1} \quad \rightarrow \quad Q = 1 \cdot 803,323 = 803,323 \text{ MVAR}$$

$$S_{Ch} = P + JQ = 963,987 + J 803,323 \text{ MVA}$$

avec,

$$P_i^* = \frac{P_1}{P_{Ci}}$$

$$Q_i^* = \frac{Q_1}{P_{Ci}}$$

#### 3.5.4. Résultats comparatifs.

Pour les deux configurations, on obtient

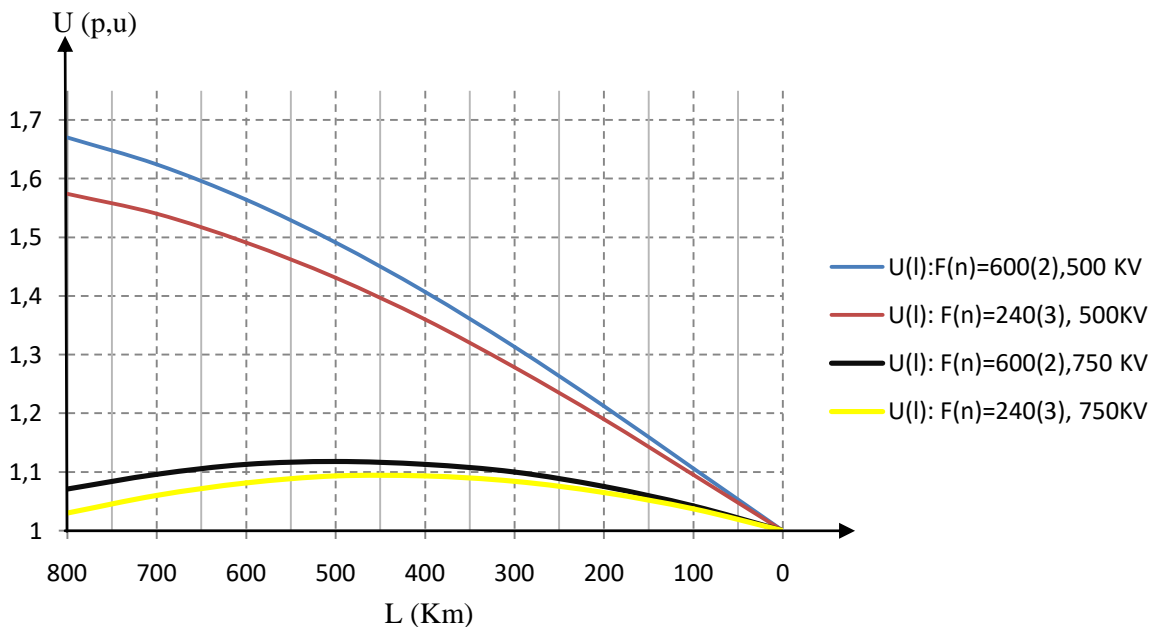
**Tableau 3.21**

$U_N$ (kv)	500 (KV)			750 (KV)		
n	F (mm <sup>2</sup> )	$P_C$ (MW)	$S_{Ch} = P^* + JQ^*$	F (mm <sup>2</sup> )	$P_C$ (MW)	$S_{Ch} = P^* + JQ^*$
2	600	803,323	1,2 + J1	600	1807,478	0,53 + J0,44
3	240	877,023	1,10 + J0,91	240	1973,303	0,48 + J0,40

$$\dot{U}_1 = \cos \alpha_0 l + Q_2^* \sin \alpha_0 l + jP_2^* \sin \alpha_0 l$$

**Tableau 3.22**

$U_N$ (kv)		500		750	
n		2	3	2	3
$S_2^* = P_2^* + JQ_2^*$		1,2 + J1	1,10 + J0,91	0,53 + J0,44	0,48 + J0,40
l (km)	$\alpha_0 l$ (°)	$U_l^*$	$U_l^*$	$U_l^*$	$U_l^*$
0	0	1,000	1,000	1,000	1,000
100	6	1,106	1,095	1,042	1,037
200	12	1,212	1,190	1,075	1,065
400	24	1,407	1,360	1,113	1,093
600	36	1,564	1,491	1,112	1,081
800	48	1,670	1,574	1,071	1,030



**Figure 3.16.** Epure de potentiel.

On constate que, pour le cas  $U_N = 500 \text{ kV}$ , la tension reste toujours hors les limites admissibles ; mais la tension diminue au long de la ligne si on augmente le nombre de conducteurs par phase.

Pour le cas  $U_N = 750 \text{ KV}$ , on voit que la tension s'insère dans les limites admissibles :  $\Delta U \leq 10\%$ . La configuration en faisceau participe à l'amélioration du plan de tension ; mais

pas de manière consistante. Par contre le niveau de tension nominale utilisée améliore considérablement le plan de potentiel.

Le choix du niveau de tension permet aussi d'accéder à d'autres performances ; telles que, diminution des pertes, augmentation de la capacité de transport ...

Mais l'équipement spécifique accompagnateur devient plus coûteux. La haute tension pose, également, des problèmes sérieux de dimensionnement, lequel dimensionnement se traduit par plus de consommation de matière, plus d'investissement, plus de contraintes mécaniques...

L'étude qu'on a faite dans ce chapitre montre que le contrôle de la tension au long de la ligne par compensation de l'énergie réactive exige de prendre en considération les conditions suivantes :

- Lieu de compensation,
- Type de la charge,
- Nombre des conducteurs par faisceau,
- Tension nominale,

La configuration en faisceau peut améliorer le plan de tension mais reste insuffisante.

## **Conclusion.**

A l'issue de ce travail, on peut faire les conclusions suivantes :

- Les chutes de tension sont considérables, en l'absence des moyens de contrôle,
- L'augmentation du niveau de tension ou bien le nombre de conducteurs par phase provoque une diminution importante de la chute de tension,
- Pour une ligne de transport à grande distance, il est justifier d'utiliser un niveau plus haute de tension et un nombre plus grand de conducteurs en faisceau,
- La variation de la tension le long de ligne résultat de l'interaction entre les processus capacitif et inductif,
- Le transport d'énergie électrique à haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils de compensation pour maintenir une tension admissible et pour garantir la stabilité,
- Le compensateur de la puissance réactive s'installe en série ou shunt.

## Bibliographie

- [1] BEAUVOIS Véronique, « Qualité de la tension-Qualité de l'électricité », ATT 00254, Université de Liège 2008.
- [2] HENRI Persoz, GERARD Santucci, JEAN-CLAUDE Lemoine, PAUL Sapet, « La planification des réseaux électriques » Editions EYROLLES 1984.
- [3] HAMDANI Mohamed Amine, TILIOUINE Abderrahim, « Contrôle de tension dans un réseau de Grand Taille par Dispositifs FACTS », Mémoire de master, Université Tahar Moulay Saïda, 2014.
- [4] MICHEL Crappe, « Commande et régulation des réseaux électriques», Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [5] BOUDJELLA Houari, « Contrôle des puissances et des tensions dans un réseau de transport au moyen de dispositifs FACTS (SVC) » mémoire de magister, Université de Sidi Bel-Abbes 2008.
- [6] HADDAD Salim, « Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique », Mémoire de magistère, Univ, Badji Mokhtar Annaba, 2006.
- [7] VANYA Ignatova, « Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique », Thèse de doctorat, Université JOSEF Fourier, 2006.
- [8] Dr. Mohamed Zellagui « Conférence, Qualité d'Énergie Électrique présenté par , 2018 ». <https://www.researchgate.net/publication/323228398>.
- [9] KHODJA Djalal Eddine, « Compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB) », Mémoire de master, Université de Mohamed Boudiaf-M'sila, 2016.
- [10] Pr. BOUNAYA Kamel, « Cours réseaux industriels », Département de Génie Electrotechnique et Automatique, Université 08 mai 1945 Guelma, 2019.
- [11] LEMDANI Soufiane, « importance et nécessité de l'étude de la compensation et de Sa contribution a la gestion de l'exploitation des longues Lignes de transport a extra haut tension », Mémoire de magister en électrotechnique, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudhif, 2010
- [12] ABDELALI Alibi, « Contrôle des réseaux électrique par les systèmes FACTS : Flexible AC Transmission Systems », Mémoire magister, Université de Batna 2009.



## Bibliographie

---

[13] MERLIN André, « Réseaux électriques », Edition, EDITURA TEHNICA, Bucuresti, 2000.

[14] « Guide technique compensation de Schneider Electric »,  
<http://www.compensation.schneider-electric.fr/energie/facturation.html>

[15] Pr. BOUNAYA Kamel, «cours : analyse des réseaux électriques», Département de génie électrotechnique et automatique, Université 08 mai 1945, 2017/2018.