

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la



Recherche Scientifique
Université A.MIRA BEJAIA
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin d'étude

En vue de l'Obtention du Diplôme Master en
Electrotechnique

Option : Techniques de Haute Tension

Thème :

**Etude du profil de la tension, du courant et
le sens de la circulation de la puissance
réactive dans une ligne THT.**

Présenté par :

M^r : OUAMAR Belaid
M^r : OUAMEUR Takfarinas

Encadré par :

M^r : MEDJDOUB. A

Membres du jury :

Mr : RAHMANI. A

M^{me} : MERABET. S

Promotion : 2015/2016

Remerciements

Nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et la patience pour mener ce travail à terme.

Nous tenons à exprimer vivement nos profondes reconnaissances à notre promoteur Mr MEDJDOUB. A, qui nous a précieusement aidé et suivi durant la réalisation de notre modeste travail, qu'il trouve ici toute notre gratitude et notre reconnaissance pour la confiance qu'il nous a accordé.

Notre sincère gratitude va aussi aux membres du jury, qui nous ont bien voulu nous faire l'honneur d'examiner et de juger ce présent travail.

Nous remercions exceptionnellement nos professeurs qui nous ont suivis depuis le début de notre rentrée à l'université.

Toute notre gratitude à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.

DÉDICACES

Louanges à Dieu, le seul et unique.

Je dédie ce présent travail en signe de reconnaissance à mes très chers parents qui ont tout fait pour me donner une bonne éducation et une soutenir dans mes études, ainsi que leurs compréhensions et encouragements ont pu me porter pour pouvoir arriver au bout de mon travail, que Dieu les garde pour moi.

A mes sœurs.

A toute ma famille.

A K-Tinhinane.

A mon très cher camarade TakfarinasOuameur.

A mesamis (Nouari, Nabil, Amar, Walid, Moustapha, Nadir, Bob, Anis, Said)

BelaidOuamar

DÉDICACES

Louanges à Dieu, le seul et unique.

Je dédie ce présent travail en signe de reconnaissance à mes très chers parents qui ont tout fait pour me donner une bonne éducation et une soutenir dans mes études, ainsi que leurs compréhensions et encouragements ont pu me porter pour pouvoir arriver au bout de mon travail, que Dieu les garde pour moi.

A mes frères et à ma sœur et son mari.

A toute ma famille.

A T. Oumeziane.

A mon très cher camarade Belaid Ouamar.

A mes amis (Nabil, Nassim, Hillal, Chafik, Djillali, Fateh, Hani)

Takfarinas Ouameur

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1. Les différents niveaux d'un système de puissance.....	4
Figure I.2. Centrale nucléaire.....	6
Figure I.3. Architecture d'un réseau électrique moderne.....	8
Figure I.4. Section d'un conducteur Aluminium/Acier.....	10
Figure I.5. Isolateurs rigides en verre.....	11
Figure I.6. Pertes de transport par composante.....	12

Chapitre II

Figure II.1. Impédance ($Z = R + jX$) et admittance ($Y = j/X_C$) par unité de longueur d'une ligne de transport monophasée.....	16
Figure II.2. Circuit équivalent de la ligne de transport de la figure II.1.....	17
Figure II.3. Quadripôle défini par ses paramètres A, B, C et D.....	17
Figure II.4. L'exploitation d'une ligne se fait suivant les conditions suivantes : type de ligne, puissance active ($P_R(W)$) et facteur de puissance ($\cos \Phi_R$) à la réception.....	18
Figure II.5. Circuit équivalent monophasé d'une ligne courte.....	19
Figure II.6. Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur courte.....	20
Figure II.7. Circuit monophasé représentant le réseau de la figure II.6.....	21
Figure II.8. Diagramme vectoriel d'une ligne courte avec un facteur de puissance à la réception en arrière.....	22
Figure II.9. Les valeurs des puissances paraissant dans le triangle des puissances (facteur de puissance en arrière) sont obtenues par le diagramme vectoriel montré à sa gauche	23
Figure II.10. Quadripôle d'une ligne courte définie par ses paramètres A, B, C et D.....	24
Figure II.11. Circuit équivalent monofilaire d'une ligne de longueur moyenne.....	25

Figure II.12. Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur moyenne.....	26
Figure II.13. Circuit monophasé représentant le réseau de la figure II.14.....	27
Figure II.14. Quadripôle d'une ligne de longueur moyenne défini par ses paramètres A, B, C et D.....	28
Figure II.15. Tronçon de ligne.....	30
Figure II.16. Ligne terminée sur une impédance autre que son impédance caractéristique....	34
Figure II.17. Ligne terminée sur son impédance caractéristique.....	35
Figure II.18. Ligne sans perte terminée sur sa résistance caractéristique.....	36
Figure II.19. Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée.....	37
Figure II.20. Quadripôle d'une ligne longue défini par ses paramètres A, B, C et D.....	38
Figure II.21. Circuit équivalent en Π d'une ligne longue.....	39

Chapitre III

Figure III.1. La tension en régime de charge maximale pour : K=1 ; $U_1=U_2=420$ kV ; $P^*=1.04$ (pu)	46
Figure III.2. Le courant en régime de charge maximale pour : K=1 ; $U_1=U_2=420$ kV ; $P^*=1.04$ (pu)	47
Figure III.3. La puissance réactive en régime de charge maximale pour : K=1 ; $P^*=1.04$ (pu) ; $U_1=U_2=420$ KV	47
Figure III.4. La tension en régime de charge maximale pour : $K>1$; $K=1.05$; $U_1=420$ kV, $U_2=400$ kV ; $P^*=1.146>1$	48
Figure III.5. Le courant en régime de charge maximale pour : $K>1$; $K=1.05$; $U_1=420$ kV, $U_2=400$ kV ; $P^*=1.146$ (pu) >1	49
Figure III.6. La puissance réactive en régime de charge maximale pour : $K>1$; $Q_2=56.8$ Mvar, $Q_1=97$ Mvar ; $P^*=1.146$ (pu)	49
Figure III.7. La tension en régime de charge minimale pour : K=1 ; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu)	51
Figure III.8. Le courant en régime de charge minimale pour : K=1 ; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu)	51
Figure III.9. La puissance réactive en régime de charge minimale pour : K=1 ; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu) ; $Q_1 = - Q_2 = - 70.37$ Mvar	52

SOMMAIRE

SOMMAIRE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I

Généralités sur les systèmes électriques de puissance

Introduction.....	3
I.1. Le système de production de l'énergie électrique.....	3
I.1.1. La production d'énergie électrique au niveau des centrales.....	4
I.1.1.1. Les centrales hydro-électriques.....	4
I.1.1.2. La centrale thermique classique.....	5
I.1.1.3. Les centrales nucléaires.....	5
I.1.2. Le réseau de transport.....	6
I.1.3. Les réseaux de répartition.....	8
I.1.3.1 Les réseaux de distribution haute tension.....	9
I.1.3.2. Les réseaux de distribution en moyenne tension.....	9
I.1.3.3. Les réseaux de distribution en basse tension.....	9
I.2. Composants de la ligne THT.....	10
I.2.1. Pylônes.....	10
I.2.2. Conducteurs.....	10
I.2.3. Isolateurs.....	11
I.2.4. Câbles de garde.....	12
I.3. Les problèmes liés au transport d'énergie électrique.....	12
I.3.1. Pertes globales sur le réseau de transport.....	12
I.3.1.1. L'échauffement maximal lié au passage de courant (l'effet Joule).....	12
I.3.1.2. Pertes par effet couronne.....	13
I.3.1.3. Pertes shunt.....	13
I.3.1.4. Pertes de fuite.....	14
I.3.1.5. Pertes par induction.....	14
Conclusion.....	15

Chapitre II

Les équations générales des lignes électriques

Introduction.....	16
II.1. Classification des lignes en régime permanent	18
II.2. Conditions d'exploitation d'une ligne	18
II.3. Lignes courtes	19
II.3.1. Circuit équivalent de la ligne	19
II.3.2. Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne	20
II.3.2.1. Expressions des puissances aux extrémités de la ligne	22
II.3.3. Représentation de la ligne par un quadripôle.....	24
II.4. Lignes de longueur Moyenne	25
II.4.1. Circuit équivalent de la ligne	25
II.4.2. Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne	26
II.4.2.1. Expressions des puissances de la ligne	28
II.4.3. Représentation de la ligne par un quadripôle	28
II.5. Lignes longues	29
II.5.1. Modèle mathématique	29
II.5.1.1. Equations différentielles fondamentales des lignes	29
II.5.1.2. Solutions des équations différentielles.....	31
II.5.2. Impédance caractéristique d'une ligne	34
II.5.2.1. Signification physique	34
II.5.2.2. Cas particulier ($R=0$).....	35
II.5.3. Puissance caractéristique d'une ligne.....	36
II.5.4. Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne longue	37
II.5.4.1. Représentation de la ligne par un quadripôle	38
II.5.5. Circuit équivalent d'une ligne longue.....	38
Conclusion	41

Chapitre III

Détermination des profils (tension, courant et la puissance réactive)

Introduction.....	42
III.1. La détermination des équations finale de la tension, courant et de la puissance réactive.....	42
III.2. La Simulation.....	45
III.2.1. Etude du régime de fonctionnement de la ligne.....	45
III.2.1.1. Etude du régime en charge maximale.....	45
III.2.1.2. Etude de régime en charge minimale.....	50
Conclusion.....	53
Conclusion Générale.....	54
Références Bibliographique.	

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités industrielles. Le système de puissance qui est à la base de cette énergie fonctionne dans un environnement en évolution continue : charges, puissance de génération, topologie du réseau.

L'augmentation de la dépendance électrique de la société moderne implique des systèmes de puissance exploitables à cent pour cent de leur capacité avec une sûreté maximale.

La qualité de cette puissance électrique est devenue de nos jours une grande préoccupation pour les consommateurs et les fournisseurs d'énergie électrique. Aussi, sont-ils exigés de plus en plus, des critères rigoureux de développement et d'exploitation des réseaux électriques. Dans ces conditions, la stabilité du système de puissance devient un souci permanent pour les fournisseurs de l'énergie électrique.

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique.

Le but de notre travail est l'étude des profils de la tension et son impact sur le fonctionnement et la qualité de la puissance fournie.

Pour ce faire, nous allons procéder à la modélisation et la détermination des équations générales de la tension et courant des lignes longues en fonction de la longueur de la ligne.

Notre travail est partagé en trois chapitres qui sont :

- Dans le premier chapitre, nous présenterons les généralités sur les systèmes de puissance en faisant ressortir les différents étages du système de puissance et les trois principaux types de production d'énergie électrique.
- Dans le deuxième chapitre nous allons étudier les équations générales et les limites d'exploitations des lignes électriques.
- Le troisième chapitre, sera consacré à la détermination des profils (I, U, Q). La simulation des modèles des lignes étudiés est faite par un calcul numérique effectué sur les équations du modèle, puis en fait l'analyse des résultats de simulation.
- Une conclusion générale clôturera notre présent travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES SYSTEMES ELECTRIQUES DE PUISSANCE

Introduction :

Le réseau électrique est une infrastructure vitale et stratégique pour nos sociétés modernes. Ainsi la consommation d'énergie électrique de l'homme a augmenté depuis la révolution industrielle.

Les sociétés développées ont besoin d'une offre toujours croissante et continue d'énergie électrique. De très complexes systèmes d'alimentation ont été alors construits pour satisfaire cette demande.

L'évolution de la production d'énergie électrique est tournée vers des réseaux interconnectés de lignes de transport reliant les générateurs et les charges dans les grands systèmes intégrés dont certains couvrent des continents entiers. Mais aujourd'hui, la perte du réseau est une véritable catastrophe, dans la mesure où nous dépendons considérablement de l'énergie électrique.

Le système de puissance électrique doit alors constamment préserver un équilibre entre la production et la consommation quand bien même cet équilibre serait fragile du fait que l'énergie électrique ne se stocke pas en grande quantité. Or le réseau est une structure complexe de grande dimension et multi couches qui est sujet en permanence à des perturbations diverses ; ce qui rend parfois son comportement difficile à prédire.

Mais, dans les sociétés de consommation actuelle, la rupture de l'alimentation en énergie électrique est de moins en moins acceptée surtout quand il s'agit de satisfaire des fonctions prioritaires telles que les industries, les hôpitaux, les aéroports, et les échanges internationaux. Dans tous les cas, une panne de réseau selon son étendue peut coûter des dizaines de milliards de francs et affecter des milliers de consommateurs. Ce qui soulève la problématique de l'impact économique et social d'une panne de réseau.

Dans ce chapitre, nous présenterons les généralités sur les systèmes de puissance en faisant ressortir les différents étages du système de puissance et les trois types principaux de production d'énergie électrique ainsi les problèmes liés au transport d'énergie électrique.

I.1 Le système de production de l'énergie électrique :

Un grand réseau électrique encore appelé système de puissance, se compose des éléments variés interconnectés (générateurs, transformateurs, lignes de transport, de distribution et des charges) plus ou moins nombreux selon la taille du réseau et formant un système complexe. Le dit système est capable de générer, de transporter et de distribuer l'énergie électrique à travers des étendues géographiques, figure(1) :

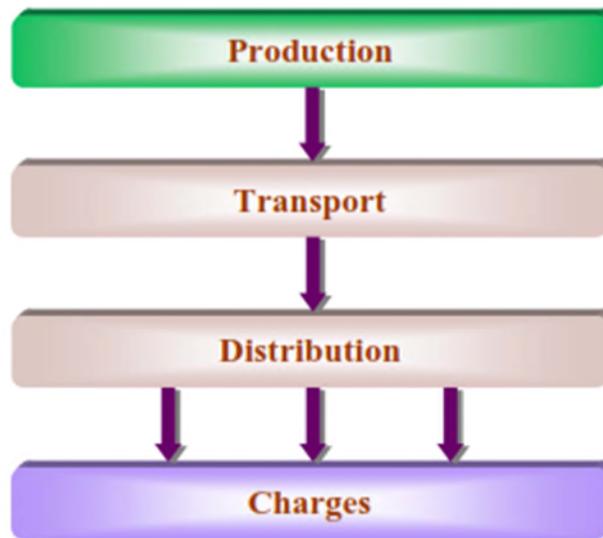


Figure 1. *Les différents niveaux d'un système de puissance.*

I.1.1 La production d'énergie électrique au niveau des centrales :

Une centrale électrique est un site industriel destiné à la production d'électricité. Les centrales électriques alimentent en électricité, au moyen du réseau électrique, les consommateurs, particuliers ou industriels éloignés de la centrale. Il existe plusieurs moyens de produire l'énergie électrique, mais ici nous allons essayer de décrire les trois principales centrales de production d'énergie de façon industrielle.

I.1.1.1 Les centrales hydro-électriques :

L'énergie hydro-électrique est une composante essentielle des énergies renouvelables et participe de la réduction de gaz à effet de serre. Son principe de fonctionnement repose sur la transformation de l'énergie potentielle d'une masse d'eau en énergie cinétique et en énergie mécanique par une turbine hydraulique puis en énergie électrique par un alternateur.

Le coût d'exploitation de ces types de centrales est économique.

Dans les pays en développement, le rôle des petites centrales hydrauliques est plus important dans la mesure où les réseaux sont moins puissants, et la diversité des solutions hydrauliques permet des solutions locales et décentralisées de production. La durée d'amortissement de ces centrales est longue car ses équipements sont robustes. Les centrales hydro-électriques sont essentielles à la sûreté du système électrique de par leurs performances spécifiques (rapidité de couplage et capacité à monter rapidement en charge et à s'arrêter).

Cependant dans les conditions hydrologiques sévères c'est-à dire quand la pluviométrie alimentant le bassin versant n'est pas suffisante, la production de l'énergie électrique baisse et influence la régulation et la stabilité des grands systèmes interconnectés.

L'aménagement d'un site hydroélectrique implique parfois de noyer des vallées entières de terre cultivable où les hommes vivent depuis des années.

Les investissements nécessaires pour la construction des centrales hydroélectriques sont souvent lourds et obligent les gouvernants à faire appel à des fonds auprès des organismes internationaux comme la Banque mondiale et autres institutions financières. On ne peut jamais garantir le risque zéro de rupture des barrages en particulier lors des conditions météorologiques exceptionnelles.

I.1.1.2 La centrale thermique classique :

Le principe de fonctionnement d'une centrale thermique consiste à transformer l'énergie thermique fournie par la combustion des hydrocarbures en énergie mécanique puis en énergie électrique.

L'investissement à la base de ces types de centrales n'est pas aussi lourd que l'implantation de l'hydroélectricité.

La contrainte de ce type de centrale est la nécessité de refroidir le condenseur par une circulation d'eau. Les centrales thermiques polluent l'environnement à cause de la gestion du gaz Co_2 issu des réactions chimiques et nécessite un refroidissement. Le coût d'exploitation des centrales thermiques est onéreux du fait de la nature de l'énergie primaire qui est fossile et inégalement répartie dans le monde. Les sources d'énergie fossile sont épuisables et polluants. Ils induisent une dépendance à l'égard des producteurs de ressources (gaz, pétrole).

I.1.1.3 Les centrales nucléaires :

Une centrale nucléaire utilise l'énergie thermique fournie par la fission d'un noyau atomique tels que l'uranium 235 ou du plutonium 239 dans une réaction nucléaire. Le réacteur produit une grande quantité de chaleur qui est captée par un caloporteur qui peut être de l'eau sous pression circulant dans le circuit primaire.

Elles sont une source fiable de production d'énergie électrique avec un très bon rendement. Aujourd'hui les centrales nucléaires apparaissent comme des industries les plus sûres et les plus respectueuses de l'environnement. Ce type de centrale nécessite pour son implantation un investissement lourd par rapport aux autres centrales.

Cependant l'implantation des centrales nucléaires pose la problématique de leur refroidissement et de la maîtrise de leur technologie. Elles doivent être implantées sur des sols qui ne sont pas susceptibles de subir des séismes. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. L'occurrence d'un tel accident est fortement probable dans les cas de catastrophe naturelle.



Figure(I.2) : centrale nucléaire.

I.1.2 Le réseau de transport :

Ces réseaux lient les principaux centres de production avec les zones de consommation. La tension dépend du pays, mais usuellement, le niveau de tension pour le transport est établi entre 220 kV et 800 kV.

Les distances géographiques entre centres de production et centres de consommation, la variabilité ou la versatilité de la charge et l'impossibilité de stocker l'énergie électrique en

grande quantité ont créé le besoin d'un système électrique capable de transmettre l'énergie électrique sur de longues distances.

Ces lignes de transport et d'interconnexion peuvent avoir des milliers de kilomètres, Les missions des réseaux de transport sont :

- _ Le transport d'énergie : Une fonction de transmission avec l'objectif d'acheminer l'électricité depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation ;
- _ L'interconnexion nationale : Une fonction d'interconnexion nationale qui gère la distribution en reliant la production avec la situation géographique et la nature des demandes temporaires ;
- _ L'interconnexion internationale : Une fonction d'interconnexion internationale pour échanger des puissances et favoriser la solidarité des systèmes en cas d'urgence.

Le niveau de tension doit être élevé car les pertes Joules sont inversement proportionnelles au carré de la tension ($P_j = k/U^2$) pour une puissance de service constante où (U) est la tension du réseau et (k) une constante qui dépend des lignes. Le transport d'énergie électrique peut être réalisé avec des liaisons à courant continu (HV DC) ou à courant alternatif (AC). Les lignes AC pour les longues distances ont des inconvénients liés aux problèmes de stabilité et de compensation de l'énergie réactive pour conserver un bon niveau de tension. Les liaisons à courant continu n'ont pas ces problèmes et ont même des avantages économiques (lignes moins chères pour les mêmes conditions de transport sur des distances suffisamment longues). Par contre, ils nécessitent l'utilisation de convertisseurs AC/DC et DC/AC relativement chers.

Enfin, le réseau de transport est constitué essentiellement de lignes aériennes de forte section, avec des sections des lignes variant de 570 mm² à 1200 mm². Cependant nous rencontrons aussi des réseaux de transport (225 kV) en câble souterrain de longueur limitée à quelques kilomètres pour l'alimentation des zones urbaines. Ces lignes et câbles de réseau de transport sont généralement à structure maillée pour garantir la continuité de service et de fourniture d'une part, et pour augmenter la puissance de court-circuit d'autre part. Cependant, la nécessité de maintenir les courants de court-circuit à un niveau acceptable conduit plus en plus, les exploitants à démailler de façon permanente, en un certain nombre de poches indépendantes. Nous pouvons aussi noter l'utilisation de câbles HVDC supra conducteur en zone urbaine.

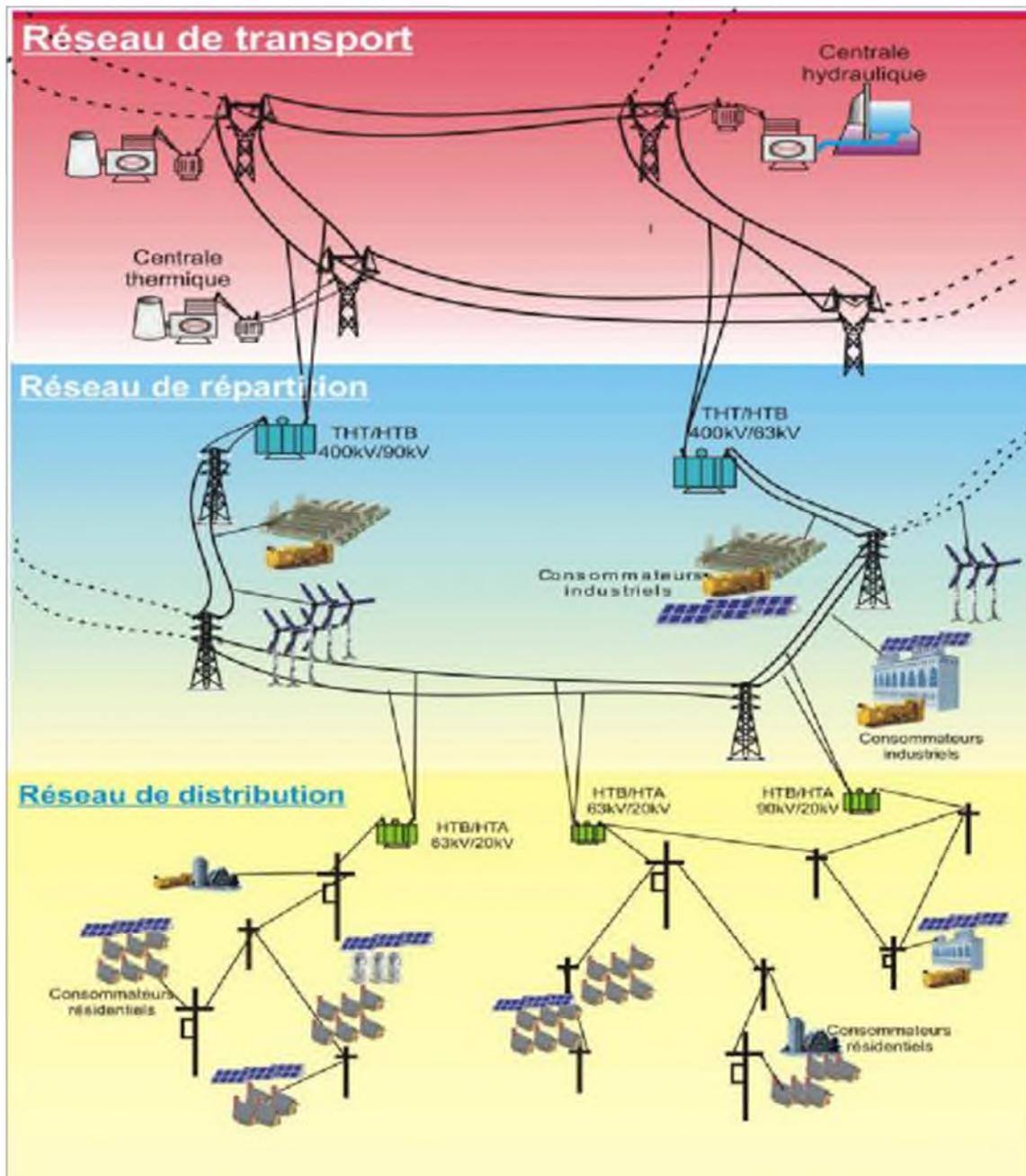


Figure (I.3) : Architecture d'un réseau électrique moderne.

I.1.3 Les réseaux de répartition :

Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de transport aux centres de consommation d'énergie les plus importants. Ces centres de consommation sont publics ou privés (plus de 10 MVA), essentiellement des industries de l'acier, des produits chimiques, le chemin de fer, pour ne citer que les plus importants. Leur niveau de tension, est souvent compris entre 45 kV et 160 kV.

Ils sont organisés normalement sous forme de boucles fermées (ou en chaînes) exploités parfois en boucle ouverte pour limiter la puissance de court-circuit ou éviter des déclenchements en cascade en cas de défaillance d'un poste source, et avec un transit de l'énergie souvent bidirectionnel. La structure de ces réseaux est essentiellement aérienne. Par contre, lorsqu'ils sont proches des villes, les lignes deviennent des câbles enterrés sur des longueurs n'excédant pas de quelques kilomètres.

I.1.3.1 Les réseaux de distribution haute tension :

Les réseaux de distribution acheminent l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels (pour les puissances comprises entre 250 kVA et 10 MVA). La structure des réseaux de distribution est bouclable et exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés et avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermée.

En zone urbaine, ces réseaux sont en canalisations souterraines, exploités en coupure d'artère ou en double dérivation pour les réseaux denses. En zone rurale, les densités et conditions d'exploitation justifient généralement le maintien des réseaux aériens à structure arborescente.

I.1.3.2 Les réseaux de distribution en moyenne tension :

Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de répartition aux points de la consommation en moyenne tension. Ces points de consommation moyenne tension sont : centres de consommations publics d'accès ou privés. La structure de ces réseaux est aérienne ou avec des câbles enterrés, et le niveau de tension de ces réseaux est inférieur à 40 kV.

I.1.3.3 Les réseaux de distribution en basse tension :

Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de moyenne tension aux points de la consommation en BT, il est le niveau final dans la structure électrique. Ce réseau permet de fournir à un très grand nombre de consommateurs du secteur domestique. Le niveau de tension de ce réseau est entre 100 et 400 V.

Le choix du niveau de tension et de la fréquence dépend de résultats techno- économique et de considérations historiques. Donc chaque pays a ses différents niveaux de tensions et aussi ses fréquences.

I.2 Composants de la ligne THT :

I.2.1 Pylônes :

Les pylônes constituent de 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.2.2 Conducteurs :

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.

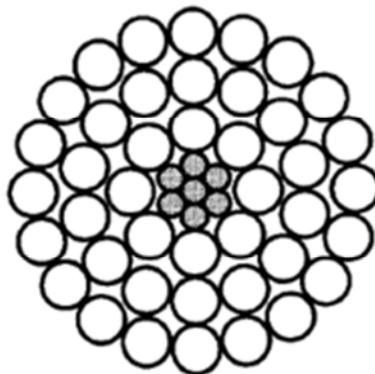


Figure (I.4) : Section d'un conducteur Aluminium/Acier.

Les conducteurs utilisés en hautes tensions sont aériens ou souterrains (et parfois sous-marins).

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.

I.2.3 Isolateurs :

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.

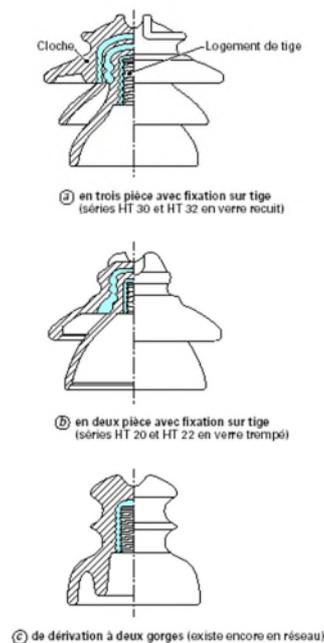


Figure (I.5) : Isolateurs rigides en verre.

I.2.4 Câbles de garde :

Les câbles de garde ne transportent pas le courant. 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 almélec-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.

I.3 Les problèmes liés au transport d'énergie électrique :

I.3.1 Pertes globales sur le réseau de transport :

Le graphique suivant présente à titre illustratif l'importance relative de chaque composante des pertes par rapport aux pertes de transport globales.

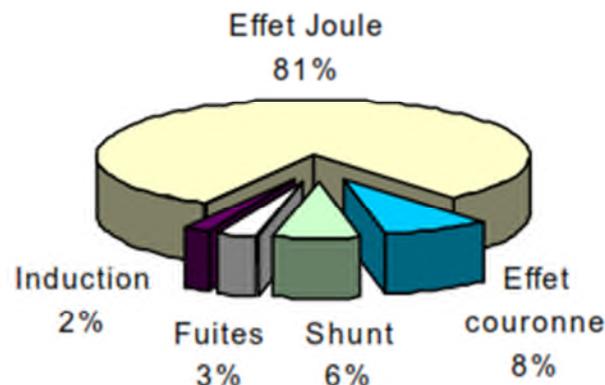


Figure (I.6) : pertes de transport par composante.

I.3.1.1 L'échauffement maximal lié au passage de courant (l'effet Joule) :

L'effet Joule est la dissipation d'énergie électrique sous forme de chaleur lors du passage d'un courant électrique à travers un conducteur, L'effet Joule est causé par les collisions des électrons, dont le flux forme le courant électrique, avec les atomes composant le matériau conducteur traversé. Lors de ces interactions, une partie de l'énergie cinétique des électrons est convertie en chaleur.

Mais cette dissipation d'énergie est aussi indésirable dans certaines situations : par effet Joule, les lignes électriques amenant le courant depuis les centrales perdent de la puissance. Pour

limiter ces pertes, on utilise des lignes à haute ou très haute tension qui permettent de diminuer l'intensité de courant dans la ligne tout en gardant une certaine puissance. C'est en déterminant le lien entre P et I que nous comprendrons exactement comment cela fonctionne.

L'effet Joule se manifeste dans tout conducteur électrique avec plus ou moins d'importance. On voit que le dégagement de chaleur est proportionnel : à la résistance au carré de l'intensité du courant, et au temps pendant lequel circule le courant.

Dans certains cas, il est responsable de pertes d'énergie, c'est-à-dire de la conversion indésirable, mais inévitable, d'une partie de l'énergie électrique en énergie thermique.

I.3.1.2 Pertes par effet couronne :

La deuxième source en importance est constituée des pertes par effet couronne. Tout près des fils, le champ électrique est très intense, ce qui provoque dans l'air à proximité une multitude de petites décharges électriques accompagnées d'un crépitement. Ce phénomène très local se produit à quelques centimètres des fils.

L'effet couronne est amplifié par les précipitations (neige, pluie, bruine).

Les aspérités présentes sur les conducteurs sont des discontinuités naturelles propices à augmenter le champ électrique. Par temps humide, les gouttelettes d'eau présentes sur les conducteurs augmentent considérablement les aspérités, ce qui favorise l'ionisation de l'air. Ce phénomène est principalement observé au niveau des conducteurs soumis à des tensions très élevées.

I.3.1.3 Pertes shunt :

Les pertes shunt proviennent des appareils branchés à la terre dont les appareils de compensation, de soutien, de mesurage, de protection. Les fluctuations de la puissance transitée en fonction de la demande affectent la tension du réseau. Les compensateurs synchrones et statiques de même que les condensateurs shunt et les inductances servent à contrôler la tension. Des appareils de mesurage et de protection sont également présents sur le réseau, dont les parafoudres qui protègent l'équipement des surtensions dues à la foudre et aux ondes de choc.

Les pertes shunt sont influencées par le niveau de tension et le facteur d'utilisation des appareils. Les compensateurs et les appareils de mesurage sont constamment en fonction, les condensateurs et les inductances sont manœuvrées périodiquement pour le contrôle de tension.

Chacun de ces appareils soutire une faible quantité de courant pour fonctionner, mais leur grand nombre entraîne des pertes relativement importantes.

I.3.1.4 Pertes de fuite :

Les pertes de fuite sont le résultat de courants à la surface des isolateurs et dans les gaines isolantes des lignes souterraines. Ces courants sont de faible amplitude mais touchent tous les isolateurs présents dans les lignes de transport, ce qui génère une certaine quantité de pertes.

I.3.1.5 Pertes par induction :

Les pertes par induction électromagnétique résultent de l'induction de courant dans des circuits parallèles fermés comme les fils de garde non isolés à leur point de support. Elles seront donc fonction du courant de charge circulant dans la ligne.

Conclusion :

Ce premier chapitre permet d'avoir une vue générale sur le réseau électrique. On y fait la connaissance du système de production, transport et de distribution de l'énergie électrique, des perturbations naturelles et des problèmes liées au transport de cette énergie électrique.

La production l'énergie électrique est faite au niveau des différentes centrales dans le but de produire l'énergie électrique avec différentes ressources naturelle

Le transport de l'énergie électrique peut être considéré comme un système complexe avec de nombreuses interactions non-linéaires, dont l'optimisation tant technique que financière relève encore de beaucoup de règles de bonnes pratiques même si les recherches en cours permettent d'évoluer progressivement vers une aide à la décision de plus en plus efficace. On utilise généralement la très haute tension pour diminuer l'effet joule qui représente une grande perte d'énergies électriques.

Une description de la structure du réseau de distribution actuel permet de comprendre les mécanismes d'acheminement de l'électricité aux consommateurs et les contraintes associées.

CHAPITRE II

LES EQUATIONS GENERALES DES LIGNES ELECTRIQUES

Introduction :

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 résistance (R), réactance inductive (X_L) et réactance capacitive (X_C) par unité de longueur de la ligne par sa longueur totale (l). Cependant, nous verrons que ce n'est pas toujours le cas. Connaissant les paramètres d'une ligne ainsi que sa longueur, la question à laquelle nous devons répondre est la suivante: "Comment se comporte cette ligne sous des conditions normales d'opérations ?".

Pour pouvoir répondre à cette question, nous avons développé les modèles (ou circuits équivalents) représentant des lignes de longueur arbitraire. Ces modèles représentent très bien la réalité. Par exemple, 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(II.1).

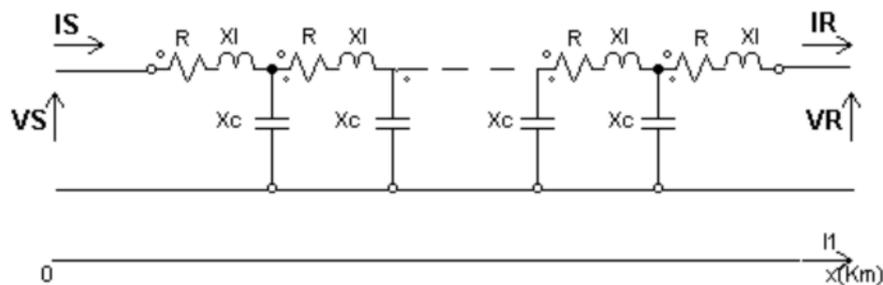


Figure II.1- Impédance ($Z = R + jX_L$) et admittance ($Y = j/X_C$) par unité de longueur d'une ligne de transport monophasée.

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 II.1 en le représentant par le circuit équivalent de la figure II.2

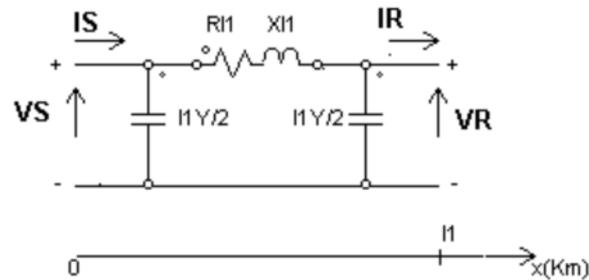


Figure II.2 - Circuit équivalent de la ligne de transport de la figure II.1

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

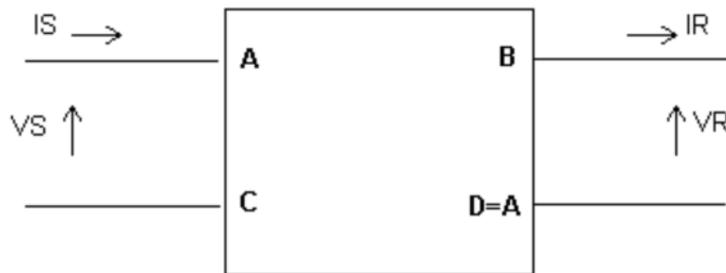


Figure II.3 - Quadripôle défini par ses paramètres A, B, C et D

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

$$V_S = AV_R + BI_R \quad (\text{II.1})$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

Le système d'équations (II.1) établit les relations entre l'entrée et la sortie du quadripôle de la figure (II.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 (II.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.

II.1 Classification des lignes en régime permanent :

Il existe présentement trois types de lignes auxquelles nous avons attribué un modèle.

Chaque type de ligne sera étudié dans ce chapitre en suivant la procédure établie à la section précédente. Nous définissons ces trois types de lignes comme suit:

1. Ligne courte ($l < 80 \text{ km}$)
2. Ligne de longueur moyenne ($80 \text{ km} < l < 250 \text{ km}$)
- 3- Ligne longue ($l \geq 250 \text{ km}$)

Etant donné les très grandes distances séparant les sources des centres de consommation, les lignes de transport sont généralement longues ou de longueur moyenne.

II.2 Conditions d'exploitation d'une ligne :

Il est bien important de connaître le comportement d'une ligne pour que son exploitation soit faite comme envisagée car, comme nous l'avons mentionné précédemment, la charge doit toujours être satisfaite. La ligne aura donc à transmettre de l'énergie sous certaines conditions. Le problème consiste alors à déterminer les caractéristiques à l'entrée de la ligne (à la source) connaissant le type de ligne utilisé ainsi que les caractéristiques à la sortie de la ligne (à la réception).

Pour pouvoir résoudre ce problème à l'aide des concepts concernant les circuits, il nous faut représenter le système de puissance considéré (ou réseau) par le diagramme conventionnel de la figure (II.4). Ce diagramme nous montre les interconnexions entre les différentes composantes du système de puissance.

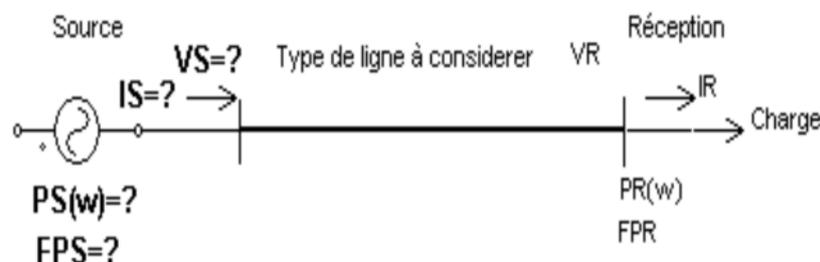


Figure II.4 - L'exploitation d'une ligne se fait suivant les conditions suivantes: type de ligne, puissance active ($PR(W)$) et facteur de puissance ($\cos \Phi_R$) à la réception.

Le fait que les systèmes de puissance soient triphasés est une complication majeure pour la résolution du problème. Cependant, étant donné la symétrie d'un système de puissance triphasé équilibré, il est possible de déterminer les caractéristiques à la source du diagramme

de la figure (II.5) en se référant à un circuit monophasé lequel représente une phase du système de puissance triphasé. Les caractéristiques (puissances, tensions et courants) d'un tel circuit seraient celles indiquées à la figure (II.4).

Pour savoir si l'exploitation d'une ligne est profitable ou non, une étude sur le comportement même de la ligne. Dans cette étude, le calcul est obligatoire de la régulation, les pertes par effet Joule ainsi que le rendement de la ligne pour une charge quelconque. A partir de cette étude, il faut prendre les décisions qui s'imposent sachant que la tension à la réception doit demeurer constante pour une tension fixée à la source. Pour faire suite à ces décisions, Voilà la façon dont nous aborderons les problèmes de lignes. Cependant, pour solutionner de tels problèmes, nous devons d'abord faire l'étude des types de lignes et c'est ce qui est fait dans les prochaines sections.

II.3 Lignes courtes :

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.

II.3.1 Circuit équivalent de la ligne :

Une ligne courte est représentée par le circuit équivalent ligne neutre de la figure (II.5).

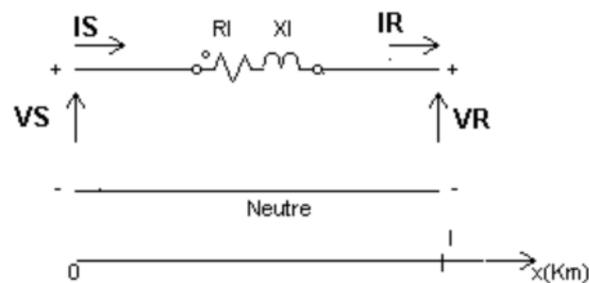


Figure II.5 - Circuit équivalent monophasé d'une ligne courte

Les paramètres du circuit monophasé de la figure (II.5) sont définis comme suit :

- R = résistance d'un conducteur, exprimée en Ω/Km
- X_L = réactance inductive d'un conducteur, exprimée en Ω/Km

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 :

$$X_L = 0.1736 \log \left[\frac{GMD}{GMR} \right] \Omega/Km \quad (II.2)$$

- GMR : Rayon géométrique moyen (en anglais : **G**eometric **M**ean **R**adius)

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

II.3.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne :

Soit le réseau de la figure (II.6), constitué d'une ligne courte triphasée, opérant en régime sinusoïdal.

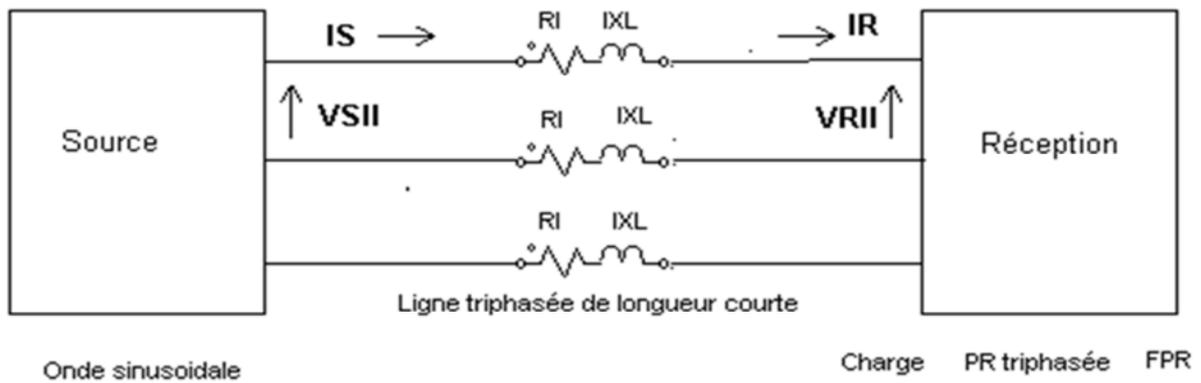


Figure II.6 - Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur courte

Les caractéristiques du réseau de la figure (II.6) sont définies comme suit:

- V_{SLL} = tension de ligne à ligne à la source, exprimée en volt
- $V_{RL.L}$ = tension de ligne à ligne 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
- $P_{S\ 3\phi}$ = puissance active triphasée à la source, exprimée en watt
- $P_{R\ 3\phi}$ = puissance active triphasée à la réception, exprimée en watt
- $Q_{S\ 3\phi}$ = puissance réactive triphasée à la source, exprimée en Var
- $Q_{R\ 3\phi}$ = puissance réactive triphasée à la réception, exprimée en Var
- $\cos \Phi_S$ = facteur de puissance à la source (f_{PS})
- $\cos \Phi_R$ = facteur de puissance à la charge (f_{PR})

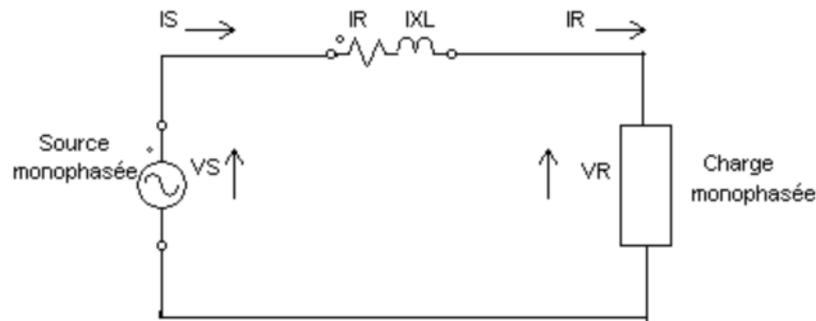


Figure II.7 - Circuit monophasé représentant le réseau de la figure II.6

Par simple inspection du circuit de la figure (II.7), nous déterminons les relations qui nous permettent de trouver les caractéristiques à la source.

Nous trouvons:

$$I_S = I_R \quad (\text{II.3})$$

$$V_S = V_R + l(R + jX_L)I_R = V_R + Z_L I_R \quad (\text{II.4})$$

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

$$I_R = \frac{P_{R3\phi}}{\sqrt{3}V_{RLL} \cos \phi_R} < \phi_R \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\phi_R = \cos^{-1} fp_R$$

Où le signe de ϕ_R est négatif lorsque le facteur de puissance à la réception (fp_R) est en arrière, et positif lorsque le facteur de puissance à la réception (fp_R) 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 3 pour obtenir la tension ligne-neutre à la réception (V_R). Les relations (II.3) et (II.4) peuvent maintenant être résolues.

Pour une charge ayant un facteur de puissance en arrière, les relations (II.3) et (II.4) sont représentées par le diagramme vectoriel de la figure II.8. C'est le cas qui se présente le plus souvent dans la réalité.

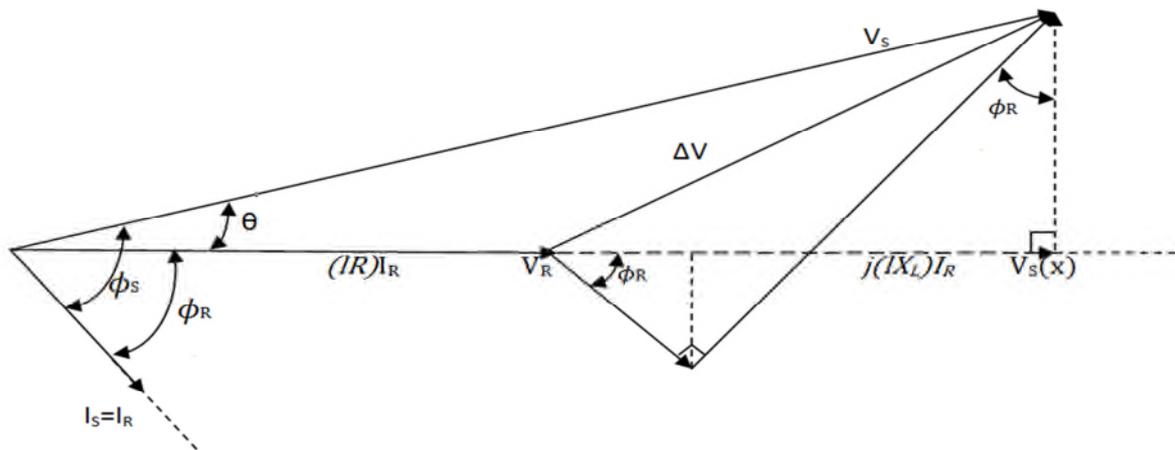


Figure II.8 - Diagramme vectoriel d'une ligne courte avec un facteur de puissance à la réception en arrière.

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 (ϕ_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:

$$\phi_S = \phi_R + \theta \quad (\text{II.6})$$

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.

II.3.2.1 Expressions des puissances aux extrémités de la ligne :

Les formules correspondant à la puissance apparente S_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 (II.9). Les trois côtés 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 .

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

$$\begin{aligned} \Delta P_{L3\phi} &= 3(P_S - P_R) \\ \Delta P_{L3\phi} &= P_{S3\phi} - P_{R3\phi} \end{aligned} \quad (\text{II.7})$$

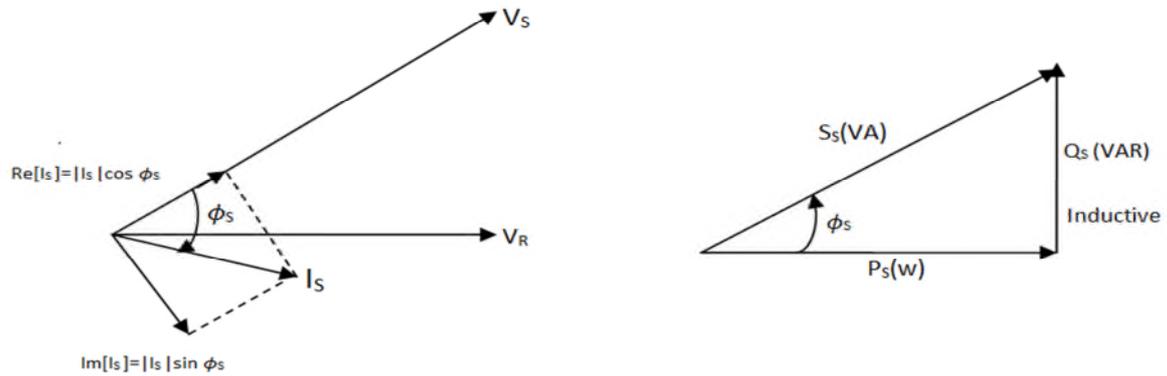


Figure II.9 - Les valeurs des puissances paraissant dans le triangle des puissances (facteur de puissance en arrière) sont obtenues par le diagramme vectoriel montré à sa gauche (voir figure. II.8).

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

$$S_S = P_S + jQ_S = V_S I_S^* \tag{II.8}$$

Ou I_S^* signifie-le conjugué de I_S .

La relation (II.6) peut s'écrire aussi:

$$S_S = |V_S| |I_S| \angle \phi_S \tag{II.9}$$

La norme de la relation (II.8) nous donne la puissance apparente monophasée à la source.

Nous avons:

$$S_S = |S_S| = |V_S I_S^*| \tag{II.10}$$

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

$$P_S = Re[S_S] = Re[V_S I_S^*] \tag{II.11}$$

D'où l'on obtient:

$$P_S = |V_S| |I_S| \cos \phi_S \tag{II.12}$$

De même, pour la puissance réactive monophasée à la source (Q_S), nous savons que :

$$Q_S = Im[S_S] = Im[V_S I_S^*] \tag{II.13}$$

D'où l' on obtient :

$$Q_S = |V_S| |I_S| \sin \phi_S \tag{II.14}$$

Pour un système triphasé, la formule (II.12) devient :

$$P_{S\ 3\phi} = 3 |V_S| |I_S| \cos \phi_S \quad (W) \tag{II.15}$$

Ou :

$$P_{S\ 3\phi} = \sqrt{3} |V_{S\ LL}| |I_S| \cos \phi_S \quad (W) \tag{II.16}$$

Et la formule (II.13) devient :

$$Q_{S3\phi} = 3|V_S||I_S| \sin \phi_S \quad (\text{Var}) \quad (\text{II.17})$$

Ou :

$$Q_{S3\phi} = \sqrt{3}|V_{SLL}||I_S| \sin \phi_S \quad (\text{Var}) \quad (\text{II.18})$$

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".

II.3.3 Représentation de la ligne par un quadripôle

Nous avons mentionné à l'introduction qu'un quadripôle était défini par ses paramètres A, B, C et D. Il est maintenant possible de déterminer ces paramètres grâce aux relations (II.3) et (II.4) qui établissent les relations entre l'entrée et la sortie du quadripôle représentant une ligne courte (Figure II.10)

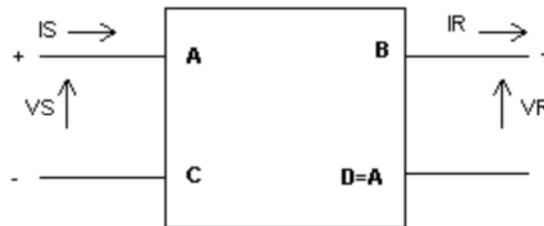


Figure II.10 - Quadripôle d'une ligne courte définie par ses paramètres A, B, C et D.

En comparant les termes des relations (II.3) et (II.4) avec ceux du système d'équations (II.1), nous déterminons les paramètres A, B, C et D du quadripôle de la figure II.12.

En procédant de cette façon, nous avons :

$$V_S = AV_R + BI_R = V_R + Z_L I_R \quad (\text{II.19})$$

$$I_S = CV_R + DI_R = I_R \quad (\text{II.20})$$

Pour que les expressions (II.19) et (II.20) soient satisfaites, les paramètres du quadripôle doivent être les suivants:

$$A = 1 < 0^\circ \quad \text{Sans dimension} \quad (\text{II.21})$$

$$B = Z_L \quad (\Omega) \quad (\text{II.22})$$

$$C = 0 \quad (\Omega^{-1}) \quad (\text{II.23})$$

$$D = A \quad (\text{II.24})$$

II.4 Lignes de longueur Moyenne :

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.

II.4.1 Circuit équivalent de la ligne :

Une ligne de longueur moyenne est représentée par le circuit équivalent ligne-neutre de la figure (II.11)

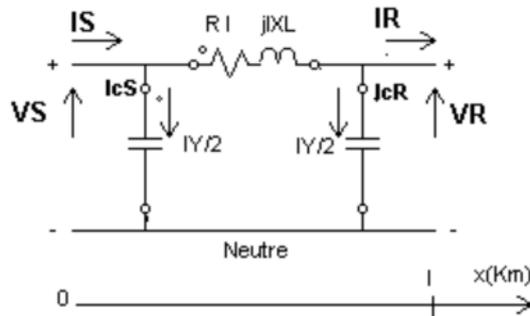


Figure II.11 - Circuit équivalent monofilaire d'une ligne de longueur moyenne.

Les paramètres du circuit monophasé de la figure (II.11) sont définis comme suit:

- R = résistance d'un conducteur
- X_L = réactance inductive d'un conducteur, exprimée en ohm par kilomètre
- Y = admittance de la ligne, exprimée en micro siemens par kilomètre

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

$$Z = R + jX_L (\Omega/\text{km}) \quad (\text{II.25})$$

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

$$Y = G + j\omega C \quad (\mu\Omega^{-1}/\text{Km}) \quad (\text{II.26})$$

Ou

- G = conductance d'un conducteur, exprimée en micro siemens par kilomètre.
- C = capacitance d'un conducteur, exprimée en microfarad par kilomètre.

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.

De plus, nous savons que la réactance capacitive d'un conducteur par unité de longueur est donnée par la relation suivante:

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \text{ (M}\Omega/\text{Km)} \quad (\text{II.27})$$

Nous obtenons finalement l'admittance de la ligne par unité de longueur, à l'aide de la relation suivante:

$$Y = \frac{j}{X_C} (\mu\Omega^{-1}/\text{Km}) \quad (\text{II.29})$$

Nous calculons la réactance inductive et la réactance capacitive de la ligne à l'aide des formules suivantes :

$$X_L = 0.1736 \log \left[\frac{GMD}{GMR} \right] \Omega/\text{Km} \quad (\text{II.30})$$

- GMR : Rayon géométrique moyen (en anglais : **G**eometric **M**ean **R**adius)
- GMD : Distance géométrique moyenne entre deux groupes de conducteurs (en anglais: **G**eometric **M**ean **D**istance)

II.4.2 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne :

Soit le réseau de la figure (II.12), constitué d'une ligne triphasée de longueur moyenne. Le réseau opère en régime sinusoïdal.

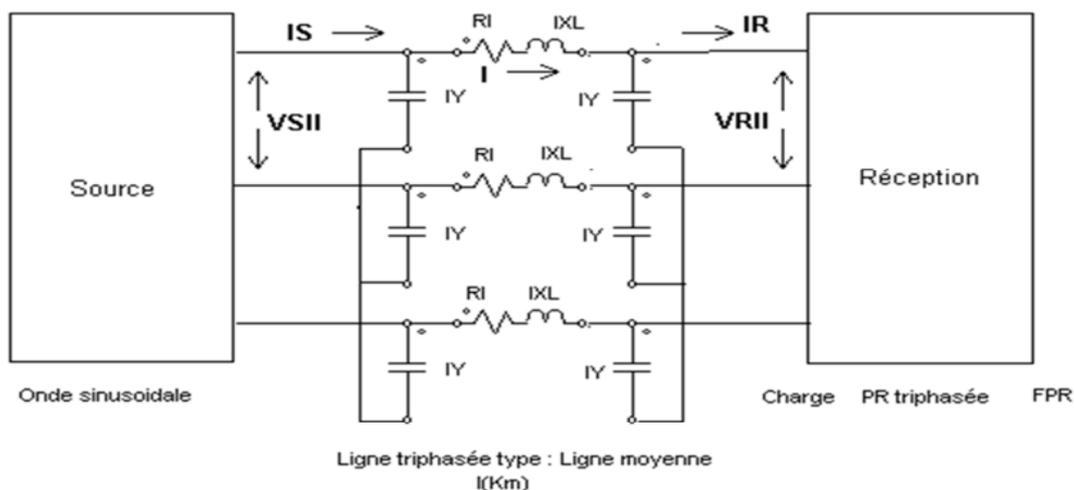


Figure II.12- Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée de longueur moyenne.

Les caractéristiques du réseau de la figure II.12 ont déjà été définies à la section II.4.1. 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, Pour résoudre le réseau de la figure (II.12) en se servant du circuit monophasé d'une ligne de longueur moyenne, nous devons représenter la figure (II.12) par le circuit monophasé de la figure II.13.

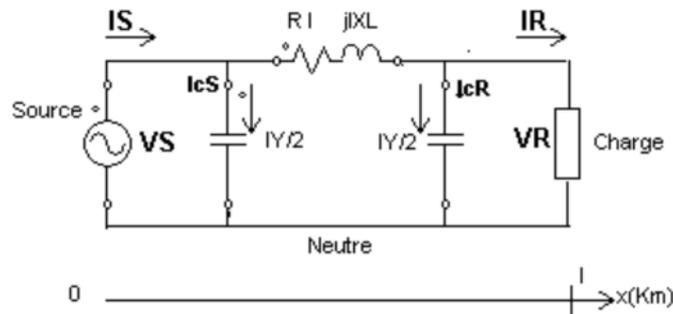


Figure II.13- Circuit monophasé représentant le réseau de la figure II.14

Par simple inspection du circuit monophasé de la figure (II.13), nous déterminons les relations qui nous permettent de trouver les caractéristiques à la source.

Nous trouvons:

$$V_S = V_R + I_R Z_L \quad (\text{II.31})$$

$$I_S = I_R + I_{CS} \quad (\text{II.32})$$

Où

I_{CS} : Courant de fuite à la source causé par l'effet capacitif de la ligne, exprimé en ampère

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

$$I_{CS} = V_S \frac{Y_L}{2} \quad (\text{II.33})$$

Par une relation identique à la relation (II.32), mais du côté de la réception, nous avons:

$$I = I_R + I_{CR} \quad (\text{II.34})$$

Où

I : Courant parcourant la ligne, exprimé en ampère

I_{CR} : Courant de fuite à la réception causé par l'effet capacitif de la ligne, exprimé en ampère

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

$$I_{CR} = V_R \frac{Y_L}{2} \quad (\text{II.35})$$

Les caractéristiques du circuit monophasé de la figure II.13 sont maintenant toutes définies.

Les relations (II.31) et (II.32) deviennent finalement:

$$V_S = \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) V_R + Z_L I_R \quad (\text{II.36})$$

$$I_S = Y_L \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{4}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) I_R \quad (\text{II.37})$$

II.4.2.1 Expressions des puissances de la ligne :

Les puissances aux extrémités de la ligne sont déterminées à l'aide des relations (II.8) à (II.18). De plus, les pertes par effet Joule dans les conducteurs sont déterminées par la relation (II.7). Nous allons expliciter davantage les puissances réactives absorbées et générées par la ligne car, maintenant, la ligne possède des condensateurs qui génèrent de la puissance réactive inductive, 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:

$$\Delta Q_{L3\phi} = 3(lX_L)|I|^2 \quad (\text{Var}) \quad (\text{II.38})$$

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

$$Q_{CS3\phi} = 3|V_S|^2 \frac{lY}{2} \quad (\text{Var}) \quad (\text{II.39})$$

$$Q_{CR3\phi} = 3|V_R|^2 \frac{lY}{2} \quad (\text{Var}) \quad (\text{II.40})$$

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.

II.4.3 Représentation de la ligne par un quadripôle :

A l'aide des relations (II.36) et (II.37) qui établissent les relations entre l'entrée et la sortie du quadripôle de la figure (II.14), nous déterminons les paramètres A, B, C et D définissant le quadripôle d'une ligne de longueur moyenne.

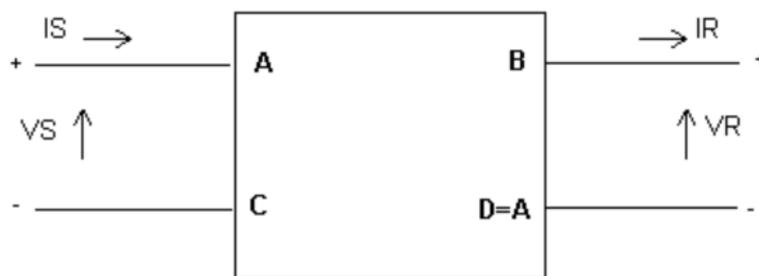


Figure II.14 - Quadripôle d'une ligne de longueur moyenne défini par ses paramètres A, B, C et D.

Nous comparons les termes des relations (II.36) et (II.37) avec ceux du système d'équations (II.1), nous déterminons les paramètres A, B, C et D du quadripôle de la figure (II.14).

En procédant de cette façon, nous avons

$$V_S = AV_R + BI_R = \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) V_R + Z_L I_R \quad (\text{II.41})$$

$$I_S = CV_R + DI_R = Y_L \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) V_R + \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) I_R \quad (\text{II.42})$$

Pour qu'il ait égalité entre les termes de droite et ceux de gauche des expressions (II.41) et (II.42), les paramètres du quadripôle doivent s'écrire comme suit :

$$A = 1 + \frac{Z_L Y_L}{2} \quad (\text{II.43})$$

$$B = Z_L \quad (\text{II.44})$$

$$C = Y_L \left(1 + \frac{Z_L Y_L}{2}\right) \quad (\text{II.45})$$

$$D = A = 1 + \frac{Z_L Y_L}{2} \quad (\text{II.46})$$

II.5 Lignes longues :

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. Et pourtant, il existe bien des différences dans la structure des conducteurs, ce qui fait que les caractéristiques ne sont pas tout à fait constantes le long de la ligne. Malgré ces différences, nous obtenons des résultats suffisamment précis à partir des méthodes de calcul approximatif, utilisées pour résoudre ces types de lignes. Pour des lignes longues, dorénavant, ces différences existantes ne pourront être négligées, si nous désirons obtenir des résultats précis.

II.5.1 Modèle mathématique :

II.5.1.1 Equations différentielles fondamentales des lignes :

Considérons le circuit montré à la figure (II.15), représentant un élément de longueur Δx d'une ligne monophasée (appelé aussi tronçon de ligne). A la figure (II.15), le tronçon de ligne a une impédance série de:

$$Z\Delta x = R\Delta x + j\omega L\Delta x \quad (\text{II.48})$$

Et une admittance de :

$$Y\Delta x = j\omega C\Delta x \quad (\text{II.49})$$

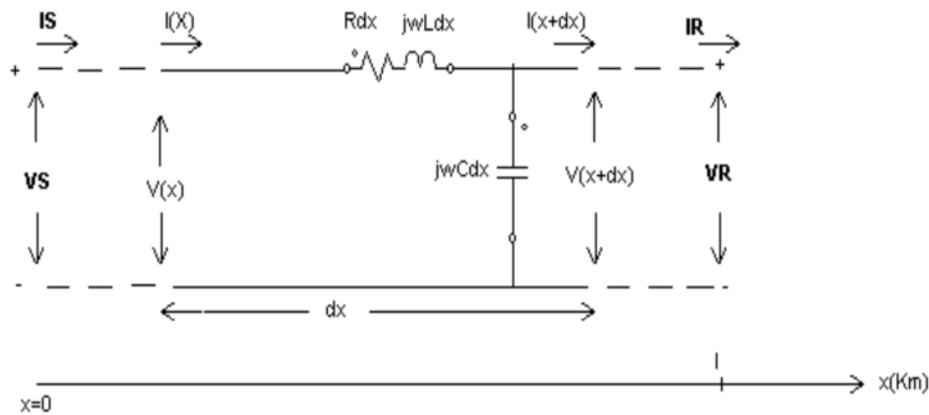


Figure II.15 - Tronçon de ligne.

Nous définissons les caractéristiques de la ligne de la figure (II.15) comme suit:

- V_S = tension de ligne à neutre à la source, exprimée en volt
- V_R = tension de ligne à 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 Kirchhoff, nous obtenons les relations suivantes:

$$V(x) = Z\Delta x I(x) + V(x + \Delta x) \quad (\text{II.50})$$

$$I(x) = Y\Delta x V(x + \Delta x) + I(x + \Delta x) \quad (\text{II.51})$$

Les relations (II.50) et (II.51) mises une autre forme deviennent :

$$\frac{V(x+\Delta x)-V(x)}{\Delta x} = -ZI(x) \quad (\text{II.52})$$

$$\frac{I(x+\Delta x)-I(x)}{\Delta x} = -YV(x + \Delta x) \quad (\text{II.53})$$

Lorsque Δx tend vers zéro, nous avons :

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

Ou

$$\frac{dV(x)}{dx} = -ZI(x) \quad (\text{II.54})$$

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

$$\frac{dI(x)}{dx} = -YV(x) \quad (\text{II.55})$$

Les équations (II.54) et (II.55) sont appelées *équations télégraphistes par les ingénieurs de communications*

En dérivant les identités (II.54) et (II.55), nous avons :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -Z \frac{dI(x)}{dx} \quad (\text{II.56})$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = -Y \frac{dV(x)}{dx} \quad (\text{II.57})$$

Si nous substituons les identités (II.54) et (II.55) dans les relations (II.56) et (II.57), nous obtenons :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = -ZYV(x) \quad (\text{II.58})$$

$$\frac{d^2I(x)}{dx^2} = -ZYI(x) \quad (\text{II.59})$$

II.5.1.2 Solutions des équations différentielles

Les solutions des équations différentielles (II.58) et (II.59) sont les suivantes:

$$V(x) = V^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} + V^- e^{+x(ZY)^{1/2}} \quad (\text{II.60})$$

$$I(x) = I^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} + I^- e^{+x(ZY)^{1/2}} \quad (\text{II.61})$$

Où 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 (II.54). Alors en se servant des relations (II.60) et (II.61) pour résoudre la relation (II.54), 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:

$$I^+ = +V^+ \left(\frac{Y}{Z}\right)^{1/2} \quad (\text{II.62})$$

$$I^- = -V^- \left(\frac{Y}{Z}\right)^{1/2} \quad (\text{II.63})$$

A l'aide des relations (II.62) et (II.63), l'équation (II.61) devient:

$$I(x) = \left(\frac{Y}{Z}\right)^{1/2} \left[V^+ e^{-x(ZY)^{1/2}} - V^- e^{+x(ZY)^{1/2}} \right] \quad (\text{II.64})$$

Les équations (II.59) et (II.63) peuvent être écrites autrement, à l'aide des expressions suivantes:

$Z_C = \left(\frac{Z}{Y}\right)^{1/2}$, un nombre complexe, appelé impédance caractéristique de la ligne, exprimé en ohms (II.65)

$\gamma = (ZY)^{1/2}$, nombre complexe, appelé facteur de propagation de la ligne, sans dimension (II.66)

Le facteur de propagation de la ligne, étant constitué d'une partie réelle et d'une partie imaginaire est défini comme suit:

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

Avec :

α : facteur d'atténuation de la ligne exprimée en Neper par kilomètre

β : facteur de phase de la ligne exprimée en radian par kilomètre

Maintenant, les équations (II.60) et (II.61) deviennent:

$$V(x) = V^+ e^{-\gamma x} + V^- e^{+\gamma x} \quad (\text{II.67})$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} [V^+ e^{-\gamma x} - V^- e^{+\gamma x}] \quad (\text{II.68})$$

$V^+ e^{-\gamma x}$ Onde incidente (onde qui se déplace de la source vers la réception)

$V^- e^{+\gamma x}$ Onde réfléchie (onde qui se déplace de la réception vers la source)

En fixant une valeur à x des équations (II.67) et (II.68), nous aurons alors deux équations à deux inconnues (V^+ et V^-) que nous pourrions résoudre afin de déterminer les inconnus.

Plaçons nous à la réception ; $x=l$

Les équations (II.67) et (II.68) s'écrivent :

$$V(l) = V_R = V^+ e^{-\gamma l} + V^- e^{+\gamma l} \quad (\text{II.69})$$

$$I(l) = I_R = \frac{1}{Z_C} [V^+ e^{-\gamma l} - V^- e^{+\gamma l}] \quad (\text{II.70})$$

Ou les constantes V^+ et V^- sont déterminé comme suit :

$$V^+ = \frac{\begin{vmatrix} V_R & e^{+\gamma l} \\ I_R & \frac{-e^{+\gamma l}}{Z_C} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{-\gamma l} & e^{+\gamma l} \\ \frac{e^{-\gamma l}}{Z_C} & \frac{-e^{+\gamma l}}{Z_C} \end{vmatrix}} = \frac{1}{2} [V_R + Z_C I_R] e^{+\gamma l} \quad (\text{II.71})$$

$$V^- = \frac{\begin{vmatrix} e^{-\gamma l} & V_R \\ \frac{e^{-\gamma l}}{Z_C} & I_R \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} e^{-\gamma l} & e^{+\gamma l} \\ \frac{e^{-\gamma l}}{Z_C} & \frac{-e^{+\gamma l}}{Z_C} \end{vmatrix}} = \frac{1}{2} [V_R - Z_C I_R] e^{-\gamma l} \quad (\text{II.72})$$

Substituant les expressions (II.71) et (II.72) dans les équations (II.67) et (II.68), nous obtenons :

$$V(x) = \frac{1}{2}[V_R + Z_C I_R]e^{-\gamma(x-l)} + \frac{1}{2}[V_R - Z_C I_R]e^{+\gamma(x-l)} \quad (\text{II.73})$$

$$I(x) = \frac{1}{2Z_C}[V_R + Z_C I_R]e^{-\gamma(x-l)} + \frac{1}{2Z_C}[V_R - Z_C I_R]e^{+\gamma(x-l)} \quad (\text{II.74})$$

Les équations (II.73) et (II.74) sont adéquates pour déterminer les conditions d'exploitation d'une ligne, connaissant Z_C et γ de la ligne ainsi que la charge à la réception.

Pour obtenir les caractéristiques à la source, nous posons x égal à zéro. Alors les équations (II.73) et (II.74) deviennent:

$$V_S = V(0) = \frac{1}{2}[V_R + Z_C I_R]e^{+\gamma l} + \frac{1}{2}[V_R - Z_C I_R]e^{-\gamma l} \quad (\text{II.75})$$

$$I_S = I(0) = \frac{1}{2Z_C}[V_R + Z_C I_R]e^{+\gamma l} + \frac{1}{2Z_C}[V_R - Z_C I_R]e^{-\gamma l} \quad (\text{II.76})$$

Nous pouvons simplifier davantage les équations (II.73) et (II.74). Tout d'abord, nous écrivons ces équations sous la forme suivante :

$$V(x) = \left[\frac{e^{-\gamma(x-l)} + e^{+\gamma(x-l)}}{2} \right] V_R + Z_C \left[\frac{e^{-\gamma(x-l)} - e^{+\gamma(x-l)}}{2} \right] I_R \quad (\text{II.77})$$

$$I(x) = \left[\frac{e^{-\gamma(x-l)} - e^{+\gamma(x-l)}}{2} \right] V_R + Z_C \left[\frac{e^{-\gamma(x-l)} + e^{+\gamma(x-l)}}{2} \right] I_R \quad (\text{II.78})$$

A l'aide des fonctions hyperboliques \sinh et \cosh , les équations (II.77) et (II.78) deviennent:

$$V(x) = \cosh[-\gamma(x-l)]V_R + Z_C \sinh[-\gamma(x-l)]I_R \quad (\text{II.79})$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \sinh[-\gamma(x-l)]V_R + \cosh[-\gamma(x-l)]I_R \quad (\text{II.80})$$

Nous déterminons les caractéristiques à la source, à l'aide des équations (II.79) et (II.80), en posant x égal à zéro.

En procédant ainsi, nous avons :

$$V_S = V(0) = \cosh[\gamma l]V_R + Z_C \sinh[\gamma l]I_R \quad (\text{II.81})$$

$$I_S = I(0) = \frac{1}{Z_C} \sinh[\gamma l]V_R + \cosh[\gamma l]I_R \quad (\text{II.82})$$

Nous pourrions toujours démontrer que les équations (II.81) et (II.82) proviennent aussi des équations (II.75) et (II.76).

Alors, connaissant les paramètres de la ligne par unité de longueur ainsi que les caractéristiques à la réception, les équations (II.81) et (II.82) déterminent les caractéristiques à la source pour une ligne de longueur arbitraire (l).

II.5.2 Impédance caractéristique d'une ligne :

II.5.2.1 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, 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 (II.16), une ligne possédant une impédance caractéristique (Z_C) est terminée à la réception sur une impédance Z_R différente de Z_C

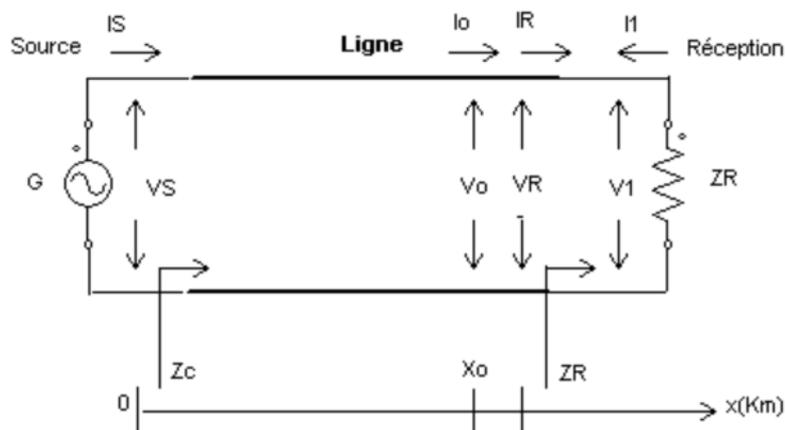


Figure II.16 - Ligne terminée sur une impédance autre que son impédance caractéristique.

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:

$$\frac{V_0}{I_0} = Z_C \quad (\text{II.83})$$

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:

$$\frac{V_R}{I_R} = Z_R \quad (\text{II.84})$$

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:

$$I_R = I_0 + I_1 \quad (\text{II.85})$$

$$V_R = V_0 + V_1 \quad (\text{II.86})$$

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 (II.79) et (II.80), ou encore, par les équations (II.73) et (II.74).

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

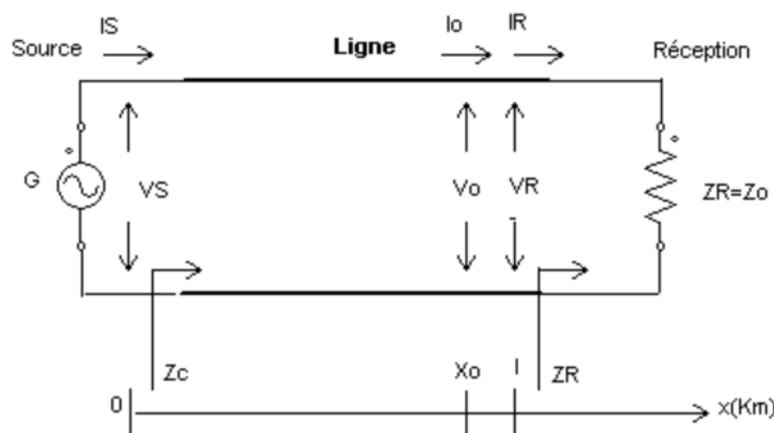


Figure II.17- Ligne terminée sur son impédance caractéristique.

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

$$\frac{V_0}{I_0} = \frac{V_R}{I_R} = Z_C \quad (\text{II.87})$$

De plus, à l'aide des équations (II.73) et (II.74), nous pouvons démontrer:

$$\frac{V(x)}{I(x)} = Z_C \quad (\text{II.88})$$

La relation (II.87) 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 (L-L) constituée d'un conducteur par phase. Elle est de l'ordre de 400 Ω

II.5.2.2 Cas particulier ($R = 0$):

Lorsque la résistance d'une ligne est nulle, c'est-à-dire une ligne sans pertes, la relation (II.65) devient:

$$Z_C = \left(\frac{j\omega L}{j\omega C} \right)^{1/2} = \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} \quad (\Omega) \quad (\text{II.89})$$

Evidemment, le résultat obtenu par la relation (II.89) ne donne pas une valeur complexe.

Alors, nous définissons la résistance caractéristique d'une ligne comme suit:

$$R_C = \left(\frac{L}{C} \right)^{1/2} \quad (\Omega) \quad (\text{II.90})$$

Ou

L = inductance d'un conducteur par unité de longueur, exprimée en henry par kilomètre

C = capacitance d'un conducteur par unité de longueur, exprimée en farad par kilomètre.

II.5.3 Puissance caractéristique d'une ligne :

Soit la ligne sans pertes de la figure (II.18), terminée sur sa résistance caractéristique

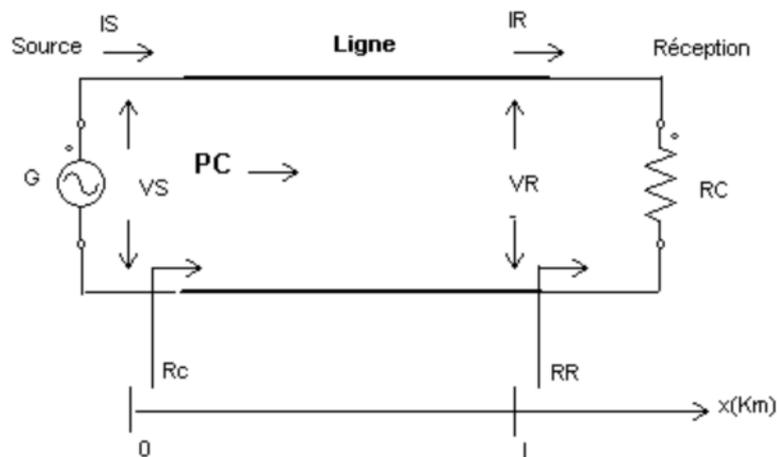


Figure II.18 - Ligne sans perte terminée sur sa résistance caractéristique

A l'aide de la formule (II.88), nous pouvons écrire :

$$\frac{V_x}{I_x} = R_C, \text{ quelque soit } x. \quad (\text{II.91})$$

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:

$$\cos \phi_x = 1.0, \text{ quelque soit } x. \quad (\text{II.92})$$

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 (II.3) et (II.4), ou encore par les équations (II.73) et (II.74), 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:

$$|V_S| = |V_R| = |V_x| = V, \text{ quelque soit } x. \tag{II.93}$$

$$|I_S| = |I_R| = |I_x| = I, \text{ quelque soit } x. \tag{II.94}$$

La puissance active fournie par la source est donnée par :

$$P_S = \frac{V^2}{R_C} = P_R = P_C \tag{II.95}$$

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

II.5.4 Méthode de calcul des caractéristiques de la ligne longue :

Soit le réseau de la figure (II.19), constitué d'une ligne triphasée qui opère en régime sinusoïdal.

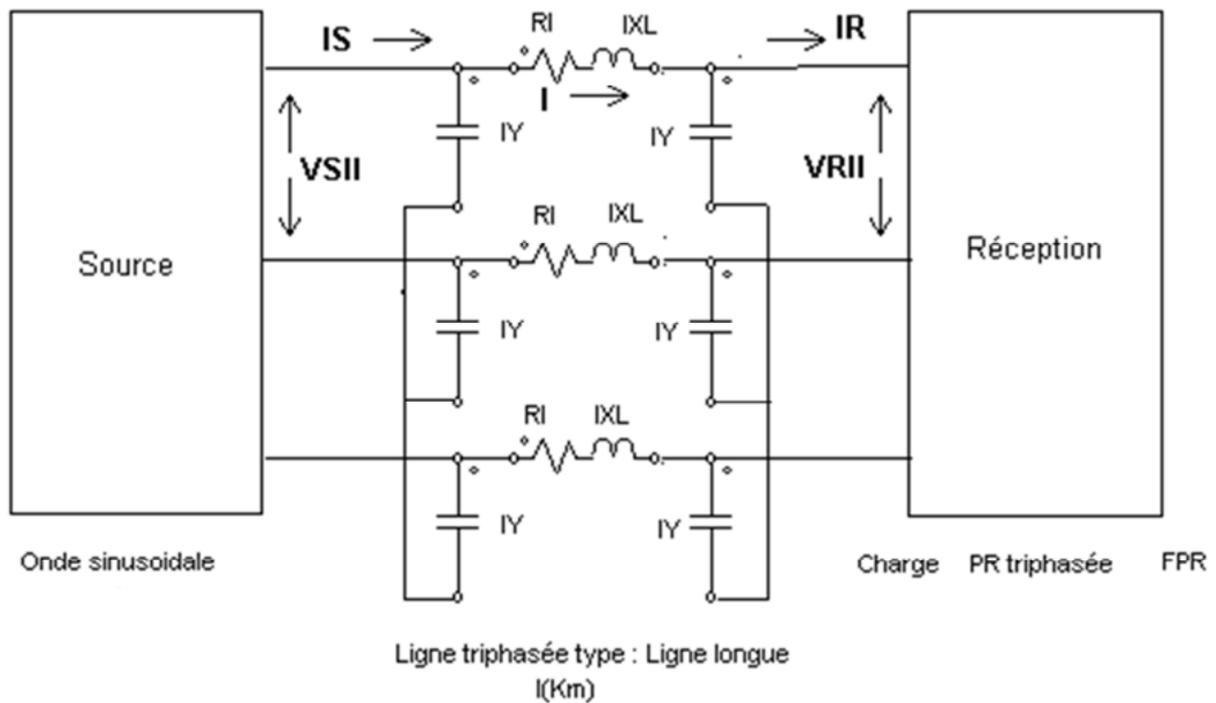


Figure II.19 - Source triphasée alimentant une charge, à travers une ligne triphasée

Les caractéristiques du réseau de la figure (II.19) ont déjà été définies à la section II.4.1. 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.

Pour faciliter l'utilisation de ces équations, nous les exprimons comme étant des relations entre l'entrée à la sortie d'un quadripôle, semblables au système d'équations (II.1),

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

Il ne nous reste donc, qu'à déterminer les paramètres A, B, C et D, définissant le quadripôle d'une ligne longue.

II.5.4.1 Représentation de la ligne par un quadripôle :

A l'aide des relations (II.81) et (II.82), qui établissent les relations entre l'entrée et la sortie du quadripôle de la figure (II.20), nous pouvons déterminer les paramètres A, B, C et D du quadripôle d'une ligne longue.

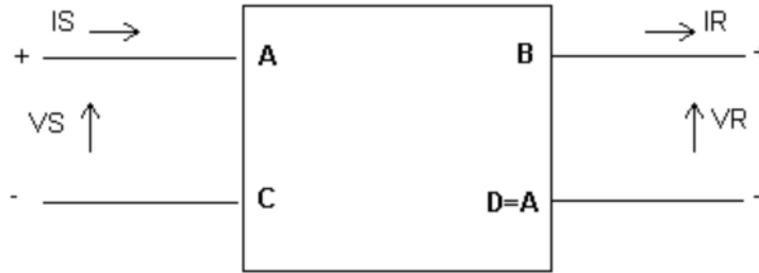


Figure II.20 - Quadripôle d'une ligne longue défini par ses paramètres A, B, C et D.

Si nous comparons les relations (II.81) et (II.82) avec le système d'équations (II.1), nous avons:

$$V_S = AV_R + BI_R = \cosh[\gamma l]V_R + Z_C \sinh[\gamma l]I_R \quad (\text{II.96})$$

$$I_S = CV_R + DI_R = \frac{1}{Z_C} \sinh[\gamma l]V_R + \cosh[\gamma l]I_R \quad (\text{II.97})$$

Pour que les expressions (II.96) et (II.97) soient satisfaites, les paramètres du quadripôle doivent s'écrire:

$$A = \cosh[\gamma l] \quad (\text{II.98})$$

$$B = Z_C \sinh[\gamma l] \quad (\text{II.99})$$

$$C = \frac{1}{Z_C} \sinh[\gamma l] \quad (\text{II.100})$$

$$D = A = \cosh[\gamma l] \quad (\text{II.101})$$

Où les facteurs Z_C et γ sont déterminés à l'aide des formules (II.65) et (II.66),

$$Z_C = \left(\frac{R + j\omega L}{j\omega C} \right)^{1/2} \quad (\text{II.102})$$

$$\gamma = [(R + j\omega L)j\omega C]^{1/2} \quad (\text{II.103})$$

II.5.5 Circuit équivalent d'une ligne longue :

Une ligne longue peut être représentée par le circuit de la figure II.21

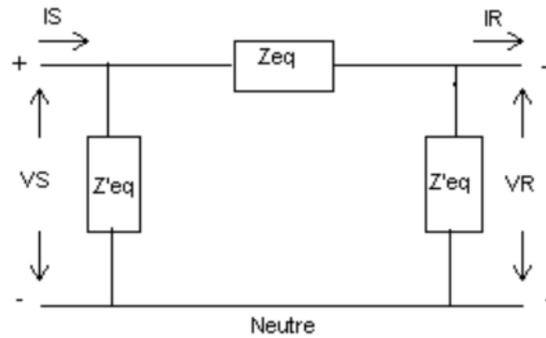


Figure II.21 - Circuit équivalent en Π d'une ligne longue

Par la loi de Kirchhoff concernant les courants, nous trouvons à l'aide de la figure (II.21), la relation suivante :

$$I_R = \frac{V_S - V_R}{Z_{eq}} - \frac{V_R}{Z'_{eq}} \quad (\text{II.104})$$

En regroupant les termes, nous avons:

$$I_R = \frac{V_S}{Z_{eq}} - V_R \left(\frac{1}{Z_{eq}} + \frac{1}{Z'_{eq}} \right) \quad (\text{II.105})$$

De plus, par le système d'équations (II.1), nous avons la relation suivante:

$$V_S = AV_R + BI_R$$

$$I_S = CV_R + DI_R$$

Où A, B, C et D sont des constantes du quadripôle d'une ligne longue.

Cette relation, écrite autrement, devient:

$$I_R = \frac{V_S}{B} - \frac{AV_R}{B} \quad (\text{II.106})$$

$$I_R = \frac{I_S}{D} - \frac{CV_R}{D} \quad (\text{II.107})$$

D'après le schéma équivalent de la figure (II.21) on trouve :

$$I_S = \frac{V_S}{Z'_{eq}} + I_R \quad (\text{II.108})$$

On remplace la relation (II.108) dans la relation (II.107) on trouve :

$$I_R = \frac{V_S}{Z'_{eq}(D-1)} - \frac{CV_R}{D-1} \quad (\text{II.109})$$

En identifiant les termes des relations (II.106) et (II.109) avec ceux de la relation (II.105), nous avons:

$$\frac{1}{Z_{eq}} + \frac{1}{Z'_{eq}} = \frac{A}{B} = \frac{C}{D-1} \quad (\text{II.110})$$

$$\frac{1}{Z_{eq}} = \frac{1}{B} = \frac{1}{Z'_{eq}(D-1)} \quad (\text{II.111})$$

A l'aide des relations (II.110) et (II.111), nous obtenons finalement:

$$B = Z_{eq} \quad (\text{II.112})$$

$$Z'_{eq} = \frac{B}{A-1}$$

$$A = \frac{Z_{eq}}{Z'_{eq}} + 1 \quad (\text{II.113})$$

$$Z'_{eq}(D-1) = Z_{eq}$$

$$D = A = \frac{Z_{eq}}{Z'_{eq}} + 1 \quad (\text{II.114})$$

$$C = \left(\frac{1}{Z_{eq}} + \frac{1}{Z'_{eq}} \right) (D-1)$$

$$C = \frac{Z'_{eq} + Z_{eq}}{Z'_{eq}{}^2} \quad (\text{II.115})$$

Z_{eq} et Z'_{eq} sont les impédances du circuit équivalent de la figure (II.21).

En identifiant les termes des relations (II.112), (II.113), (II.114) et (II.115) avec le système d'équations (II.1), nous avons:

$$V_S = \left(\frac{Z_{eq}}{Z'_{eq}} + 1 \right) V_R + Z_{eq} I_R \quad (\text{II.116})$$

$$I_S = \left(\frac{Z'_{eq} + Z_{eq}}{Z'_{eq}{}^2} \right) V_R + \left(\frac{Z_{eq}}{Z'_{eq}} + 1 \right) I_R \quad (\text{II.117})$$

Les équations (II.116) et (II.117) sont équivalentes aux équations de la ligne longue :

$$V(x) = \cosh[-\gamma(x-l)]V_R + Z_C \sinh[-\gamma(x-l)]I_R$$

$$I(x) = \frac{1}{Z_C} \sinh[-\gamma(x-l)]V_R + \cosh[-\gamma(x-l)]I_R$$

Conclusion :

Ce chapitre est consacré à l'étude et à la détermination des caractéristiques à la source (V_S et I_S) du circuit équivalent de chaque modèle de ligne (ligne courte, ligne moyenne et la ligne longue) en fonction de la longueur (l). Il est consacré aussi à l'identification des paramètres des équations différentielles (l'impédance, l'admittance et le facteur de propagation de la ligne), obtenues d'après l'analyse et le développement des équations télégraphistes à l'aide des équations de système d'un quadripôle.

CHAPITRE III

Déterminations des profils (tension, courant et la puissance réactive)

Introduction :

Les objectifs de la compensation de ligne sont :

- Pour augmenter la capacité de transmission de puissance de la ligne.
- Pour conserver le profil de tension de la ligne sur toute sa longueur dans des limites acceptables pour assurer la qualité de l'offre aux clients connectés.

Parce que la compensation de puissance réactive influence sur la capacité de transmission de puissance de la ligne connectée, la compensation contrôlée peut être utilisée pour améliorer la stabilité du système en changeant la puissance maximale de transmission. Il existe deux méthodes pour réaliser l'augmentation de la puissance maximale de transfert de limite de la ligne. La première méthode consiste à augmenter les tensions de transmission. La deuxième méthode est de réduire l'impédance caractéristique de la ligne. La réduction de l'impédance caractéristique de la ligne peut être réalisée soit en changeant les dimensions de la ligne ou par addition de condensateurs en série. Les dimensions de la ligne ne peuvent pas être changées considérablement et elle ne crée qu'un faible impact sur la valeur de l'impédance caractéristique.

Les caractéristiques électriques qui intéressent l'exploitant de la ligne sont :

- Les distributions de la tension et du courant.
- La circulation de la puissance réactive.
- Le maintien de la tension aux extrémités de ligne.

III.1 La détermination des équations finale de la tension, courant et de la puissance réactive :

Les distributions de tension et du courant sont données par :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 \cosh(\gamma l) + \bar{I}_2 \bar{Z}_C \sinh(\gamma l) \quad (\text{III.1})$$

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_2 \frac{1}{\bar{Z}_C} \sinh(\gamma l) + \bar{I}_2 \cosh(\gamma l) \quad (\text{III.2})$$

Ou :

$$\bar{Z}_C = \sqrt{\frac{\bar{Z}}{\bar{Y}}}, \gamma = \sqrt{\bar{Z}\bar{Y}} = \beta + j\alpha$$

Z_C : Impédance caractéristique

γ : Constante de propagation

V_1 et V_2 : les tensions composées maintenues en tête de ligne et en bout de ligne respectivement.

I_1 et I_2 : les courants de phase en tête de ligne et en bout de ligne respectivement.

Si on néglige la composante active de l'impédance $\beta=0$ (c'est toujours le cas des lignes longues), dans ce cas, les tensions et les courants seront exprimés par les équations trigonométriques suivantes :

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 \cos(\alpha l) + \bar{I}_2 \bar{Z}_C \sin(\alpha l) \quad (\text{III.3})$$

$$\bar{I}_1 = \bar{V}_2 \frac{1}{\bar{Z}_C} \sin(\alpha l) + \bar{I}_2 \cos(\alpha l) \quad (\text{III.4})$$

Avec $\alpha = 0.06$ (deg/km) constant d'atténuation à 50 Hz et l la longueur en km.

Prenant pour référence l'extrémité terminale de la ligne où est supposée connectée la charge

$$\bar{S}_2 = P_2 + jQ_2 \text{ sous la tension } \bar{V}_2 = |V_2| \angle 0^\circ$$

La tension et le courant à la distance x sont donnés par les équations :

$$\bar{V}(x) = V_2 \cos(\alpha x) + j \sqrt{3} I_2 \bar{Z}_C \sin(\alpha x) \quad (\text{III.5})$$

$$\bar{I}(x) = I_2 \cos(\alpha x) + j \frac{V_2}{\sqrt{3} \bar{Z}_C} \sin(\alpha x) \quad (\text{III.6})$$

$$V(x) = V_2 \cos(\lambda_x) + j \sqrt{3} I_2 Z_C \sin(\lambda_x) \quad (\text{III.7})$$

$$I(x) = I_2 \cos(\lambda_x) + j \frac{V_2}{\sqrt{3} Z_C} \sin(\lambda_x) \quad (\text{III.8})$$

Où ($\alpha \cdot x = \lambda_x$)

Il est rationnel d'introduire des grandeurs sans dimensions en rapportant les tensions, les courants, les puissances et les impédances aux valeurs caractéristiques. Cela signifie que les courants sont rapportés au courant qui correspond à la puissance caractéristique (courant caractéristique), les puissances à la puissance naturelle et les tensions à la tension maintenue en bout de ligne.

Substituant l'expression du courant de la charge :

$$\bar{I}_2 = \frac{P_2 - jQ_2}{\sqrt{3} V_2}$$

On remplace cette expression dans l'équation (III.7) et (III.8) on obtient :

$$V(x) = V_2 \cos(\lambda x) + j \sqrt{3} Z_C \left(\frac{P_2 - j Q_2}{\sqrt{3} V_2} \right) \sin(\lambda x)$$

$$V(x) = V_2 \cos(\lambda x) + j \frac{P_2 Z_C}{V_2} \sin(\lambda x) + \frac{Q_2 Z_C}{V_2} \sin(\lambda x)$$

$$V(x) = V_2 \left[\cos(\lambda x) + j \frac{P_2 Z_C}{V_2} \sin(\lambda x) + \frac{Q_2 Z_C}{V_2} \sin(\lambda x) \right]$$

$$V(x) = V_2 [\cos(\lambda x) + Q_{2B} \sin(\lambda x) + j P_{2B} \sin(\lambda x)] \quad (\text{III.9})$$

$$I(x) = \frac{V_2}{\sqrt{3} Z_C} [P_{2B} \cos(\lambda x) + j(\sin(\lambda x) - Q_{2B} \cos(\lambda x))] \quad (\text{III.10})$$

En valeur réduite par rapport au courant caractéristique : $I_2 = \frac{V_2}{Z_C \sqrt{3}}$

Ce qui donne :

$$V(x) = V_2 [\cos(\lambda x) + Q_{2B} \sin(\lambda x) + j P_{2B} \sin(\lambda x)] \quad (\text{III.11})$$

$$I(x) = P_{2B} \cos(\lambda x) + j(\sin(\lambda x) - Q_{2B} \cos(\lambda x)) \quad (\text{III.12})$$

Le rapport des tensions maintenues aux extrémités de la ligne en fonction du transit de la puissance active en bout de ligne est donné par la relation :

$$K = \frac{V_1}{V_2} = [(\cos \lambda + Q_{2B} \sin \lambda)^2 + (P_{2B} \sin \lambda)^2]^{1/2} \quad (\text{III.13})$$

L'analyse de l'expression (III.13) montre que la réalisation du régime optimal de fonctionnement des longues lignes est directement liée à la puissance réactive Q_{2B} apparaissant en bout de la ligne et pouvant être contrôlée par le rapport des tensions maintenues aux extrémités de la ligne. De la relation (III.13) on trouve au niveau de la charge :

$$K = [(\cos \lambda + Q_{2B} \sin \lambda)^2 + (P_{2B} \sin \lambda)^2]^{1/2}$$

$$K^2 = (\cos \lambda + Q_{2B} \sin \lambda)^2 + (P_{2B} \sin \lambda)^2$$

$$K^2 - (P_{2B} \sin \lambda)^2 = (\cos \lambda + Q_{2B} \sin \lambda)^2$$

$$\left(\frac{K}{\sin \lambda} \right)^2 - (P_{2B})^2 = \left(\frac{\cos \lambda}{\sin \lambda} + Q_{2B} \right)^2$$

$$\sqrt{\left(\frac{K}{\sin \lambda}\right)^2 - (P_{2B})^2} = \frac{\cos \lambda}{\sin \lambda} + Q_{2B}$$

$$Q_{2B} = -\frac{\cos \lambda}{\sin \lambda} + \sqrt{\left(\frac{K}{\sin \lambda}\right)^2 - (P_{2B})^2}$$

$$Q_{2B} = -\cot \lambda + \sqrt{\left(\frac{K}{\sin \lambda}\right)^2 - (P_{2B})^2} \quad (\text{III.14})$$

Sachant qu'on a supposé la ligne sans perte, la puissance active qui transite la ligne.

$$P_B = P_{1B} = P_{2B}$$

La relation qui lie les puissances réactives apparaissant aux extrémités de la ligne en fonction de sa longueur et du rapport des tensions K :

$$Q_{1B} = (K^2 - 1) \cot \lambda - Q_{2B} \quad (\text{III.15})$$

La substitution de l'expression (III.14) dans l'équation (III.15) donne la puissance réactive apparaissant en tête de ligne :

$$Q_{1B} = K^2 \cot \lambda - \sqrt{\left(\frac{K}{\sin \lambda}\right)^2 - (P_B)^2} \quad (\text{III.16})$$

A partir de l'équation (III.15) quand $V_1 = V_2$ les puissances réactives aux extrémités de la ligne sont égales et de directions opposées et cela indépendamment de la puissance active transmis.

III.2 La Simulation :

III.2.1 Etude du régime de fonctionnement de la ligne :

Les calculs vont porter sur une ligne haute tension de 420kV, longue de 320 km avec une puissance de 600 MW.

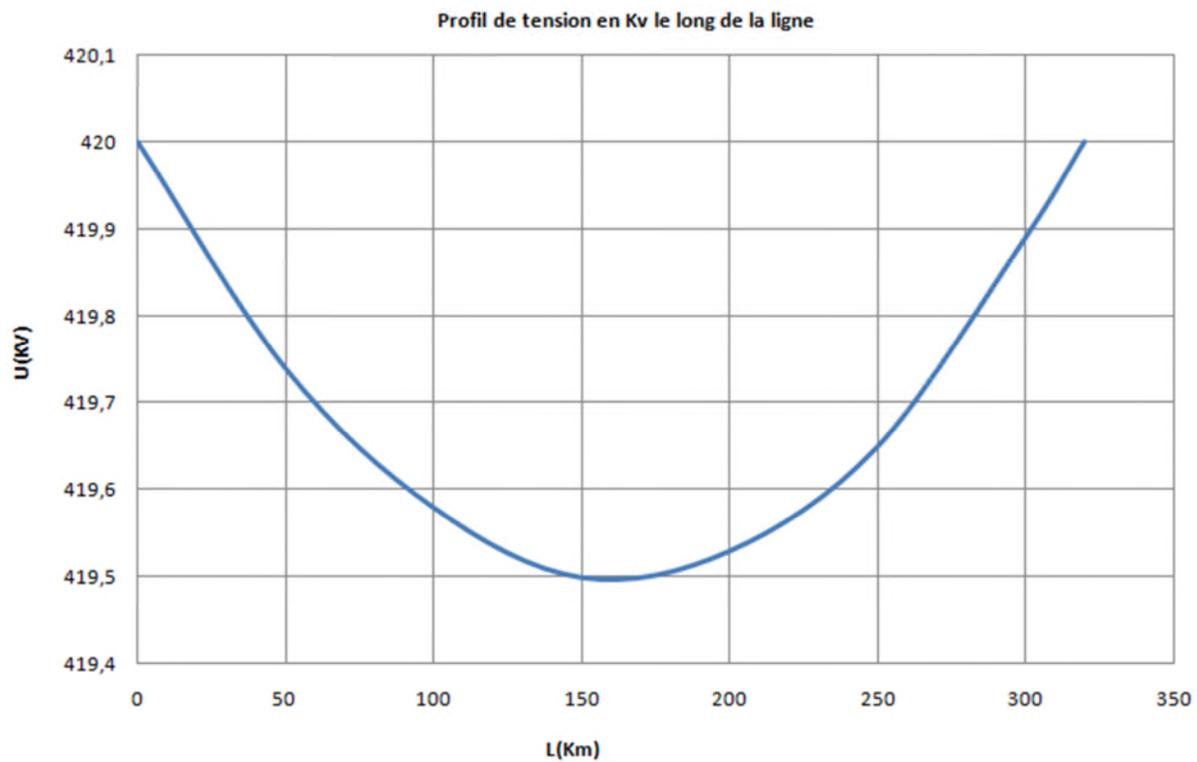
III.2.1.1 Etude du régime en charge maximale :

L'étude du régime de fonctionnement de la ligne en charge maximale pour une puissance active $P=600$ MW par terre consiste à déterminer les distributions du courant, de la tension le long de la ligne et de la puissance réactive.

Cette étude doit être investie pour deux cas lorsque le rapport de tension :

A-Pour : $k=U_1/U_2=420/420=1$

- Fixant les tensions des deux extrémités de la ligne à une valeur maximale, l'étude de la distribution de la tension, du courant et de la circulation de la puissance réactive le long de la ligne est illustrée par la figure (III.1), (III.2), (III.3) respectivement.



**Figure (III.1) : La tension en régime de charge maximale pour :
 $K=1$; $U_1=U_2=420$ kV ; $P^*=1.04$ (pu)**

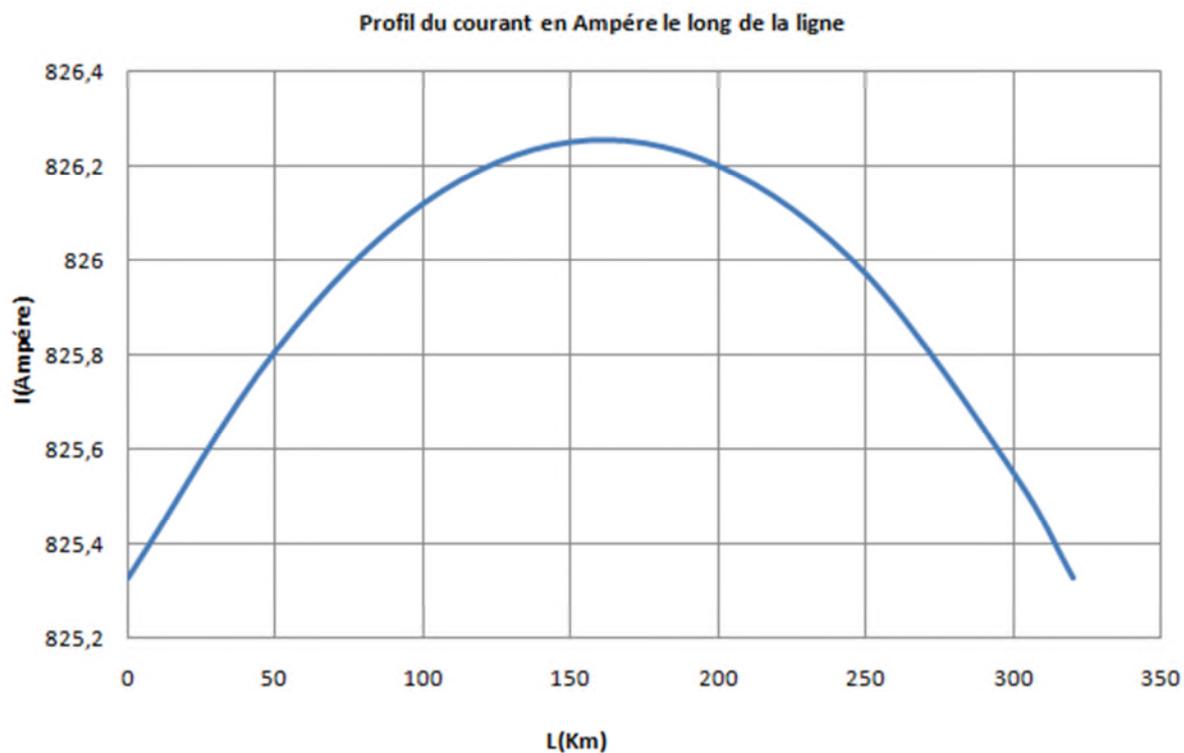


Figure (III.2) : Le courant en régime de charge maximale pour :
 $K=1$; $U_1=U_2=420$ kV ; $P^*=1.04$ (P.U)

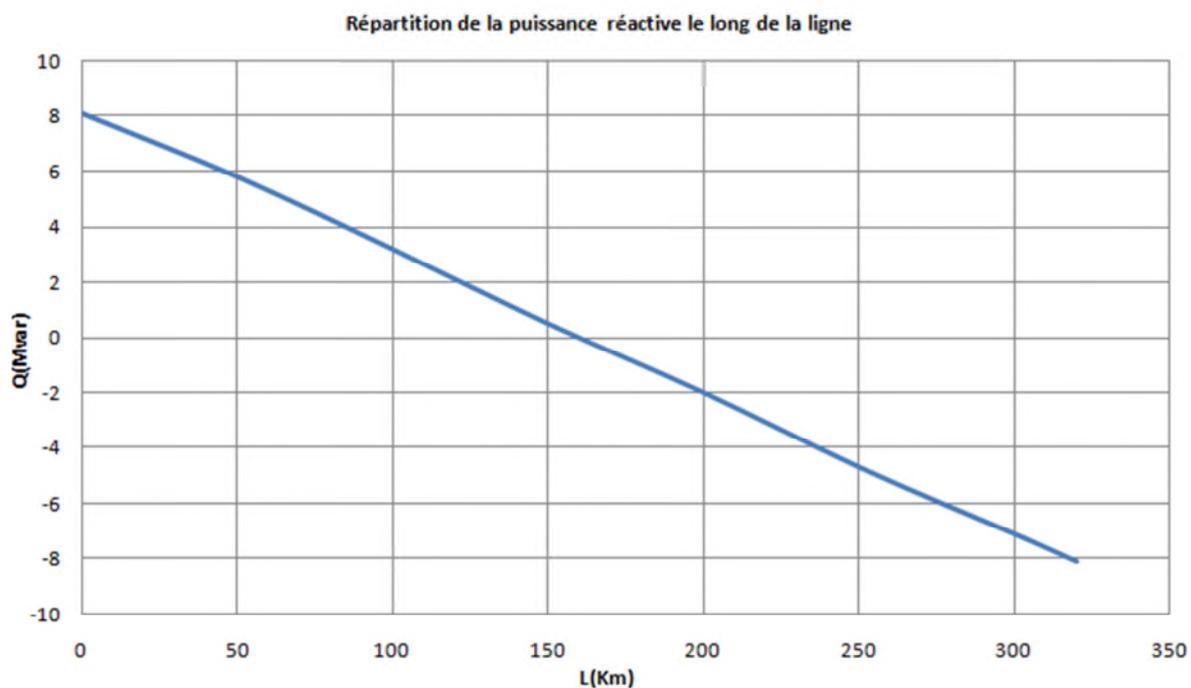


Figure (III.3): La puissance réactive en régime de charge maximale pour :
 $K=1$; $P=1.04$ (pu) ; $U_1=U_2=420$ KV

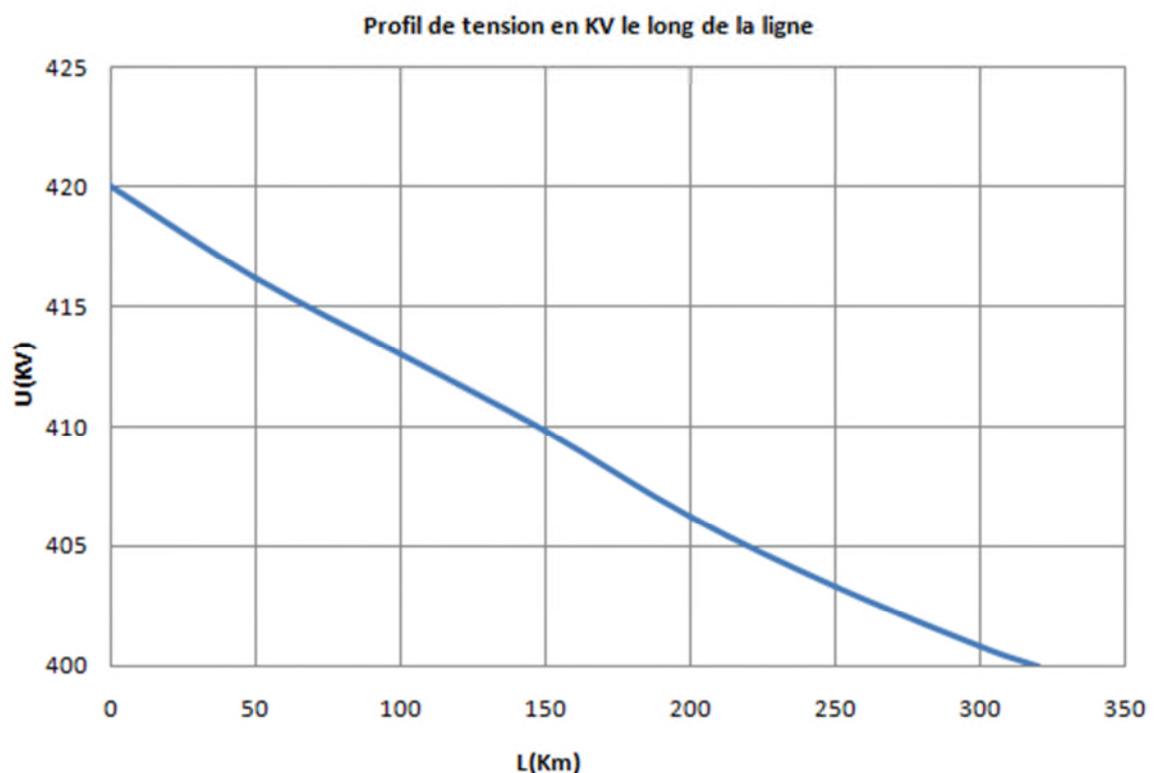
Commentaire et analyse des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus sur les graphes (III.1), (III.2), (III.3) nous remarquons que:

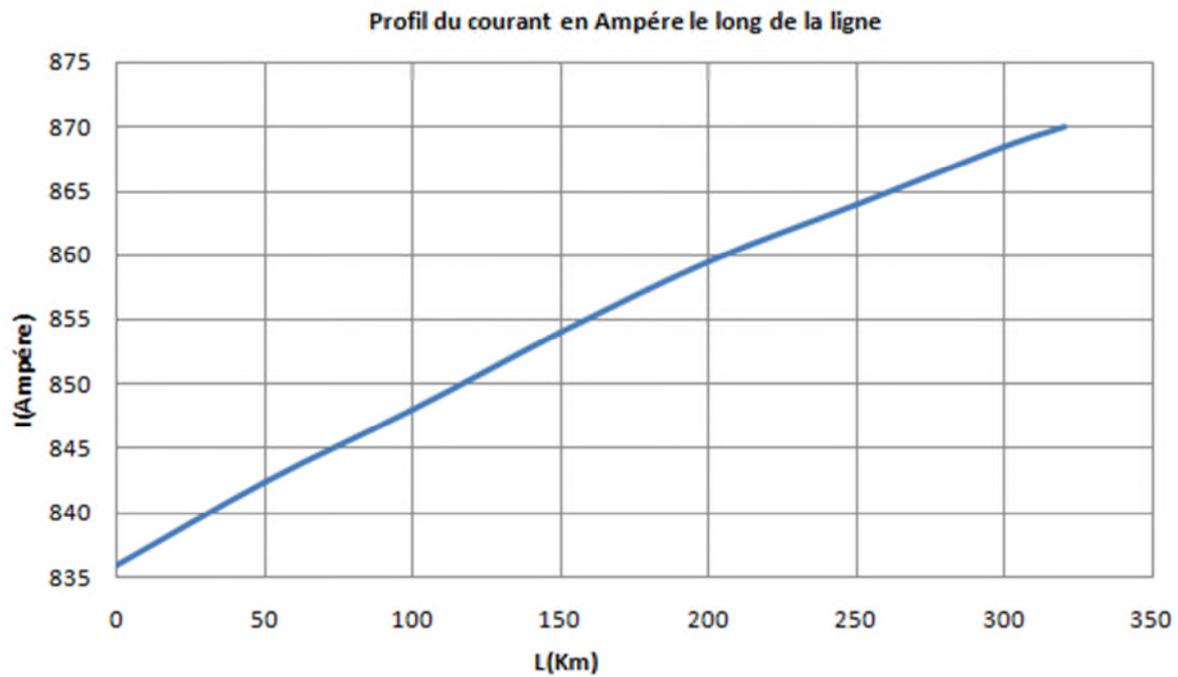
- Lorsque la puissance transmise est plus grande que la puissance caractéristique, la distribution de la tension présente un creux au milieu de la ligne.
- La distribution du courant présente un ventre.
- Nous remarquons que dans ce cas les puissances réactives apparaissant aux extrémités de la ligne sont égales mais de directions opposées, ce qui implique que ce régime est caractérisé par un manque en puissance réactive.
- On voit qu'il existe dans ce cas un point dans la ligne où le courant et la tension sont en phase ce que nous appellerons par conséquent '**point particulier**'. Dans ce cas d'étude pour $k=1$, le point particulier se trouve à mi-distance des extrémités (160 km).

B-pour : $K=U_1/U_2=420/400=1.05$

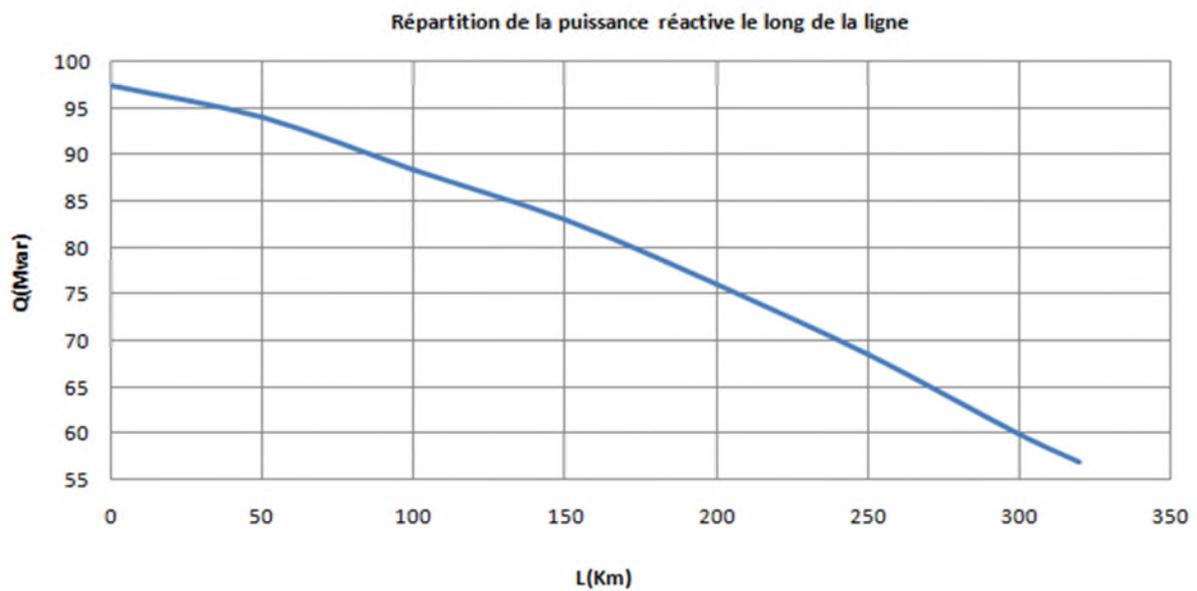
- L'étude de la distribution de la tension, du courant et de la circulation de la puissance réactive le long de la ligne est illustrée par les figures (III.4), (III.5), (III.6) respectivement.



**Figure (III.4) : La tension en régime de charge maximale pour :
 $K>1$; $K=1.05$; $U_1=420$ kV, $U_2=400$ kV ; $P^*=1.146>1$**



**Figure (III.5) : Le courant en régime de charge maximale pour :
 $K > 1$; $K = 1.05$; $U_1 = 420$ kV, $U_2 = 400$ kV ; $P^* = 1.146$ (pu) > 1**



**Figure (III.6) : La puissance réactive en régime de charge maximale pour :
 $K > 1$; $Q_2 = 56.8$ Mvar, $Q_1 = 97$ Mvar ; $P^* = 1.146$ (pu)**

Commentaire et analyse des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus sur les graphes (III.4), (III.5), (III.6) nous remarquons que :

- Lorsque la puissance transmise est plus grande que la puissance caractéristique et un rapport $k > 1$, la distribution de la tension diminue, en bout de la ligne la tension égale à 400 kV et en tête de la ligne égale 420 kV.
- Le courant augmente le long de la ligne.
- La circulation de la puissance réactive dans ce cas de fonctionnement de la ligne est caractérisée par un flux unidirectionnel comme la montre la figure (III.6).

III.2.1.2 Etude de régime en charge minimale :

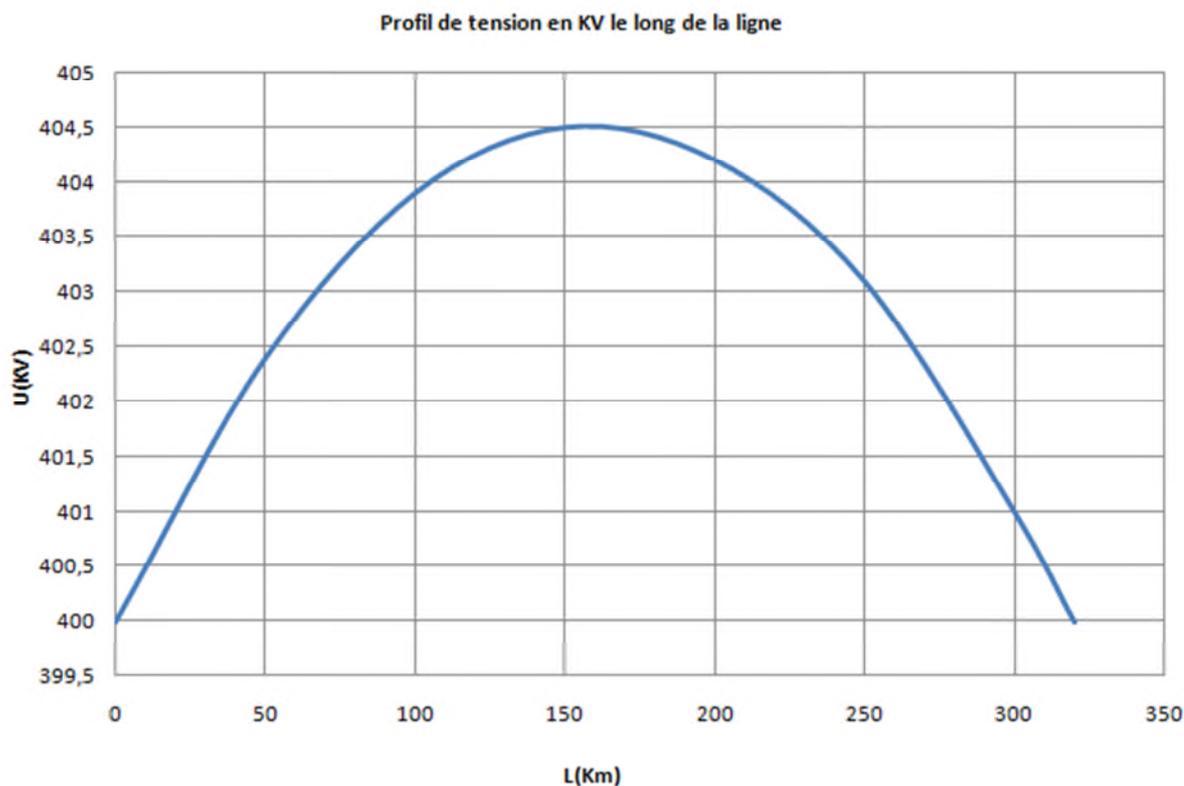
L'étude du régime de fonctionnement de la ligne en charge minimale consiste à étudier les distributions du courant, de la tension le long de la ligne et la circulation de la puissance réactive lorsque dans la ligne transite une puissance réduite faible par rapport à la puissance naturelle. La puissance transmise dans cette étude est supposée :

$$P=40\%*P_{max}=240 \text{ MW}$$

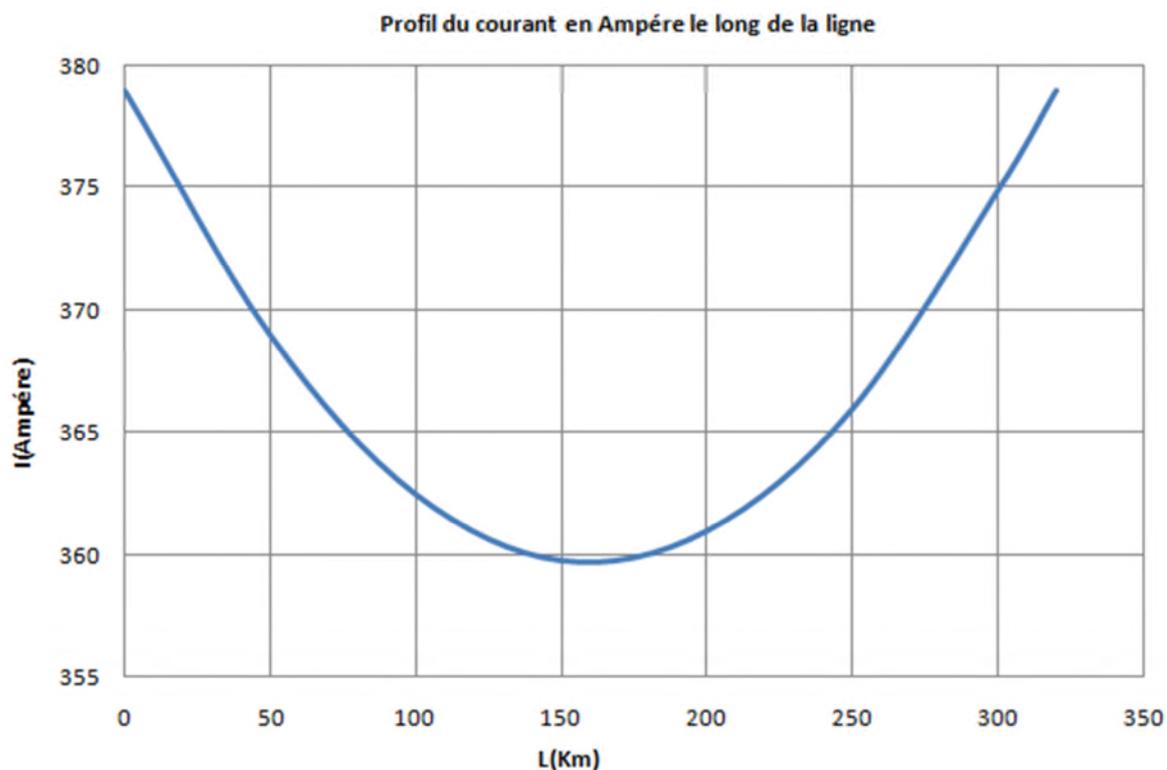
Le rapport des tensions aux extrémités est fixé à :

$$\mathbf{A-pour : K=U_1/U_2=400/400=1}$$

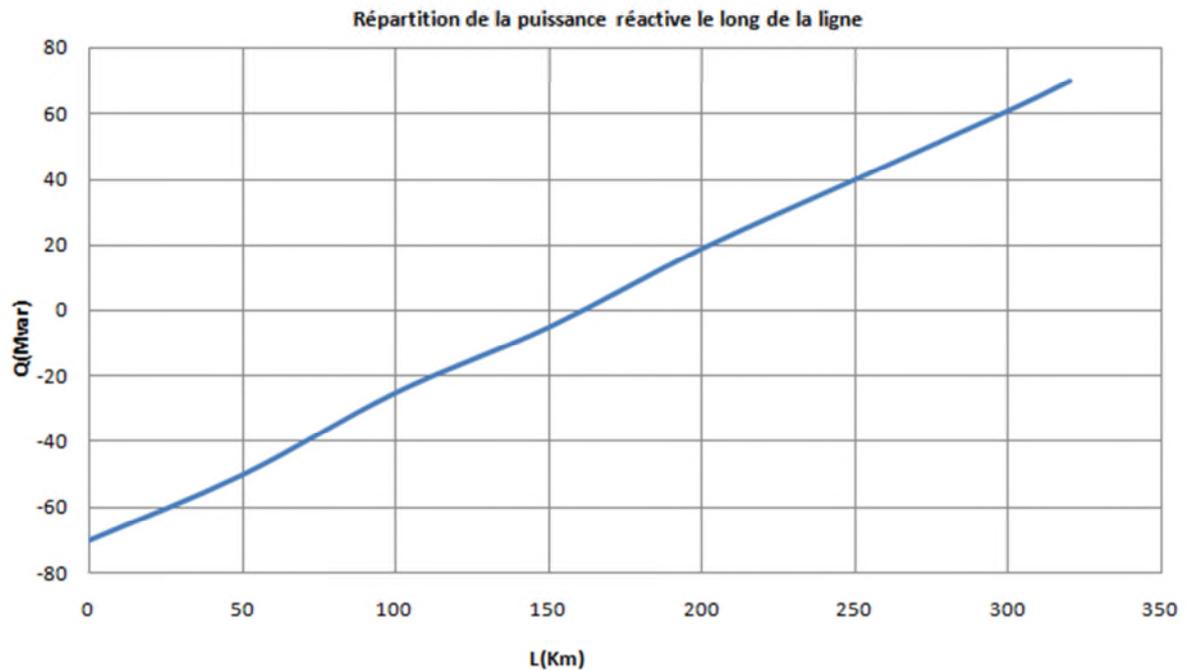
- L'étude de la distribution de la tension, du courant et de la circulation de la puissance réactive le long de la ligne est illustrée par les figures (III.7), (III.8),(III.9) respectivement.



**Figure (III.7) : La tension en régime de charge minimale pour :
 $k=1$; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu)**



**Figure (III.8) : Le courant en régime de charge minimale pour :
 $k=1$; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu)**



**Figure (III.9) : La puissance réactive en régime de charge minimale pour :
 $k=1$; $U_1=U_2=400$ kV ; $P^*=0.4584$ (pu) ; $Q_1 = - Q_2= - 70.37$ Mvar**

Commentaire et analyse des résultats obtenus :

D'après les résultats obtenus sur les graphes (III.7), (III.8), (III.9) nous remarquons que :

- Lorsque la puissance transmise est plus faible que la puissance caractéristique, la distribution de la tension présente un ventre au milieu de la ligne.
- La distribution du courant présente un creux.
- nous remarquons que dans ce cas, dans la ligne existe un excès de la puissance réactive ce qui se traduit par un ventre de la tension au point particulier de la ligne.
- Les puissances réactives apparaissant aux extrémités de la ligne sont égales mais de directions opposées, et se dirigeant vers les extrémités de la ligne, ce qui se traduit par son ultime absorption soit par les compensateurs synchrones, ou les selfs.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons simulé les équations de la tension, le courant et la puissance réactive par un calcul numérique. D'après l'étude faite et les résultats obtenus, nous avons noté que la variation de la puissance réactive est en relation avec le rapport des tensions maintenues (k).

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

D'après le présent travail, nous pouvons conclure que l'une des conditions principales de l'exploitation efficace des réseaux est d'assurer les plans de tensions dans toutes les régions sans atteindre les valeurs critiques ou les dépasser.

Par ailleurs 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. En plus de ces exigences, une ligne de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes :

- La tension doit être maintenue assez constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale. La variation de la tension de zéro à pleine charge ne doit pas dépasser 5 % de la tension nominale.
- Les pertes Joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs. Si la ligne ne peut d'elle-même répondre à ces exigences, on doit alors ajouter de l'équipement supplémentaire afin de réaliser toutes ces conditions.

Les résultats de simulation ont montré que le transport de l'énergie à très haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils de compensation pour maintenir une tension constante et pour garantir la stabilité du réseau électrique, à cet effet le fonctionnement et l'exploitation des longues lignes de transport et plus nécessitent impérativement des techniques d'étude, un savoir-faire et des mesures bien spécifiques à envisager dans le but d'une conduite saine, rentable et performante.

Enfin, nous pensons que par ce travail avoir ouvert un champ d'étude dans le domaine de l'amélioration du transit et de la qualité d'énergie dans les réseaux électriques.

Références Bibliographiques

- [1] A. AHMANE et O. AREZKI « Analyse de la Stabilité de la Tension en Présence des Compensateurs FACTS » Mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia 2007.
- [2] M. HAMMA et M. KHIARI « Influence de L'inexactitude des Paramètres d'un Réseau Electrique sur sa Stabilité en Tension » Mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia 2000.
- [3] « Une Brève Histoire de l'Electrotechnique » ([http:// www. clubeea. org/ Documents/ Médiathèque/ Histoire_Electrotech2. htm](http://www.clubeea.org/Documents/Médiathèque/Histoire_Electrotech2.htm)), sur le site *clubeea.org*
- [4] OUALI. A « Evaluation de la Stabilité Transitoire des Réseaux Electriques par les Réseaux de Neurones Artificiels et les Plans d'Expériences » Mémoire de Magister, Université de Houari Boumediene(USTHB) 2008.
- [5] R. BENABID « Optimisation Multi Objectif de la Synthèse des FACTS par les Particules en Essaim pour le Contrôle de la Stabilité de Tension des Réseaux Electriques » Mémoire de Magister, Université Amar Telidji, Laghouat 2007.
- [6] ZABAIYOU Tarik, 2010, « Coordination des Régulateurs Conventionnels des Machines Synchrones et des Compensateurs Statiques (SVCS) » Thèse de Doctorat Ecole de Technologie Supérieure Université du Québec.
- [7] Xiao-Ping Zhang, Christian Rehtanz, Bikash Pal, Livre: Flexible AC Transmission Systems: Modeling and Control. Verlag Berlin Heidelberg Germany: Library of Congress Control Number: 2005936513-Springer, 2006.
- [8] Efficacité Energétique et Réseaux Electriques, Revue ABB 2/2007.
- [9] Michel Crappe, « Stabilité et Sauvegarde des Réseaux Electriques » Herme Science. Lavoisier 2003.
- [10] N. FERDJOUKH et M. NAIT SADA « Etude des Dispositifs FACTS en Vue de l'Amélioration de la Stabilité de la Tension d'un Réseau Electrique »

Mémoire d'Ingénieur, Université de Bejaia 2006.

[11] A. MEKHLOUFI « Modélisation, Simulation et Analyse des Régime de Fonctionnement et des Conditions D'exploitation des Longues Lignes de Transport D'énergie Electrique A Extra Haute Tension (E.H.V) 400 kV et Plus » Thèse de Magister, Université d,ORAN Mohamed Boudiaf 2012.

[12] A. HAMMOUD « Etude des Convertisseurs Haute Tension pour la Protection et la Coordination des Réseaux de Distribution » Thèse de Doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon 2010.

[13] D. LABED « Production Décentralisée et Couplage au Réseau » Thèse de Doctorat. Université MENTOURI Constantine 2008.