



جامعة بجاية  
Tasdawit n'Bgayet  
Université de Béjaïa

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

*Université Abderrahmane mira – BEJAÏA*

*Faculté de technologie*

*Département de génie électrique*

## **Mémoire Fin de Cycle**

Présenté pour l'obtention du diplôme

Master II en Génie électrique

**Options** : réseau électrique



# ***THEME***

*Calcul des paramètres et caractéristiques des  
lignes électriques triphasées*

**Réaliser par :**

- HADDAD LYAZID
- HAMI KHODIR

**Encadrer par :**

- Mme ZIDANE FATIHA

**Promotion 2014/2015**

## Remerciement

*Tous d'abord, nous aimerions remercier dieu le tout puissant, de nous avoir donnée la force et la patience de pouvoir mener ce travail à terme.*

*On veut exprimer notre reconnaissance à Mme ZIDANE, notre promotrice, qui a dirigé notre travail ; ces conseils et ces commentaires précieux nous ont permis de surmonter nos difficultés et de progresser dans notre étude.*

*Nous remercions aussi les enseignants qui nous ont suivis de notre cursus universitaire et particulièrement nous remercions aussi l'ensemble des membres du jury.*

*Que toutes et tous ceux qui ont fait pour que ce travail soit fait dans les bonnes et favorables conditions trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus distingués.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos amis (es) et à tous ceux qui nous ont soutenues et encouragées tout au long de notre formation.*

## *Dédicace*

*Je rends grâce à mon dieux de m'avoir donné la force, la  
volonté, l'intelligence et la sagesse d'être patient dans mes  
études.*

*La place de l'homme dans la vie est marquée non par ce qu'il  
sait, mais par ce qu'il veut et ce qu'il peut.*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A toutes ma famille pour le soutien et les encouragements  
qui m'apporté durant cette année, durant toute ma vie ;*

*A mon chère ami HAMZA et les autres qui se  
reconnaissent ;*

*A mon binôme LYAZID ;*

*A tous mes camarades de la promotion ;*

*A tous mes enseignants qu'ils ont nous suivi de notre cursus  
universitaire ;*

*Et a tous ce que ma plume a oubliés....*

*Je tien a exprimé ma gratitude à l'ensemble des personnes  
qui ont contribué de près ou de loin à ce travail.*

*C'est la foi qui donne à l'homme l'élan qu'il faut pour agir et  
l'entêtement qu'il faut pour persévérer.*

***KHODIR***

## *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail :*

*A toute ma famille mes parents ma mère et mon père ;*

*A mes frères et sœurs ;*

*A mon binôme KHODIR*

*A ma chère Djanet ;*

*A tous mes camarades de la promotion ;*

*A tous mes amis ;*

*A ceux qui m'ont soutenu pendant toute la période de mes études.*

***LYAZID***

# Sommaire

<b>Introduction générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Généralités sur les réseaux électriques</b>	
Introduction.....	3
I.1. la production de L'énergie électrique.....	4
I.2. système de transformation.....	4
I.3. Description des réseaux électriques.....	4
I.4. Les niveaux de tensions.....	5
I.5. Structure du réseau électrique et son rôle .....	5
I.5.1. Réseau de transport THT.....	6
I.5.2. Réseau de répartition HT.....	6
I.5.3. Réseau de distribution.....	6
I.6. Architecture des réseaux électriques.....	7
I.7. Poste de transformation .....	7
I.7.1. Poste de transformation HTA/BT.....	8
I.7.2. Postes sources.....	8
I.8. Lignes aériennes et câbles souterrains.....	9
I.8.1 Réseaux HTA aériens.....	10
I.8.2. Réseaux HTA souterrains.....	10
I.9. Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterraines.....	11
I.9.1 Lignes aériennes.....	11
a) AVANTAGES.....	11
b) INCONVÉNIENTS.....	12
I.9.2. Câbles souterraines.....	12
a) AVANTAGES.....	12
b) INCONVÉNIENTS.....	12
Conclusion.....	13

## Chapitre II : les paramétrés de la ligne électrique

Introduction.....	14
II.1. Les supports .....	14
II.2. Types de pylônes.....	14
II.3. Isolateurs de lignes aériennes.....	15
II.4. Types de conducteurs.....	16
a. Conducteur câblés (toronnée).....	16
b. Conducteurs creux.....	16
c. Conducteur massif .....	17
II.5. Effet coronne.....	17
II.6. Effet peau.....	18
II.7. Les paramètres de la ligne électrique.....	18
II.7.1. Les paramètres longitudinaux.....	19
II.7.1.1. la résistance de la ligne.....	19
a. Effet de spiralage du conducteur.....	19
b. Effet de température.....	19
c. Effet pelliculaire ou effet Kelvin.....	19
II.7.1.2. Inductance de la ligne.....	20
II.7.1.2.1. Définition.....	20
II.7.1.2.2. Inductance d'un conducteur.....	20
a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur.....	20
b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur.....	22
c. L'inductance d'un conducteur due au flux total.....	22
II.7.1.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant.....	23
II.7.1.2.4. Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés .....	25

II.7.1.2.5. Inductance des lignes triphasées.....	26
a. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux).....	26
b. Disposition quelconque.....	27
II.7.1.2.6. Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux .....	29
III.7.1.2.7. Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes .....	30
II.7.2. Les paramètres transversaux.....	30
II.7.2.1. Conductance .....	30
II.7.2.2. La capacité de la ligne .....	30
II.7.2.2.1. Capacité d'une ligne monophasée.....	30
II.7.2.2.2. Capacité d'une ligne triphasée.....	31
a. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal.....	31
b. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase inégal.....	32
II.7.2.2.3. capacité des conducteurs en faisceaux .....	33
II.7.2.2.4. effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée.....	34
Conclusion .....	34

### **Chapitre III : modélisation des éléments du réseau électrique**

Introduction.....	35
III.1. Modélisation des lignes aériennes.....	35
III.1.1. Ligne de transmission courte .....	36
III.1.2. Ligne de transmission moyenne.....	36
III.1.3. Ligne de transmission longue.....	38
III.2. Modélisation des générateurs.....	39
III.3. Modélisation des charges.....	40
III.4. Modélisation du transformateur.....	40
a. Transformateur à gradins.....	41
b. Transformateur déphaseur.....	43
III.5. Application aux lignes triphasées usuelles.....	44
III.5.1. Equations des puissances à l'entrée de la ligne (la source).....	45
III.5.2. Equations de puissances aux bornes de la charge .....	46
III.6. Les puissances dans la ligne .....	46

III.7. La chute de tension dans la ligne.....	47
a. La chute de tension composée .....	48
b. L'angle de transport de la ligne .....	49
c. La chute de tension de la ligne courte.....	49
III.8. La régulation de la tension .....	50
Conclusion .....	50

### **Chapitre IV : calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques**

Introduction .....	51
IV.1. calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée.....	51
IV.1.1. Algorithmes de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée.....	51
IV.1. 2. Application a une ligne contenant un conducteur par phase (n=1).....	52
IV.1.3. Application a une ligne a conducteur de phase en faisceaux de 3 cordes.....	53
IV.2. Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée.....	54
IV.2.1. Calcul des caractéristiques de la ligne longue .....	54
IV.2.1.1. Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue.....	55
IV.2.2. Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne.....	58
IV.2.2.1. Algorithme de Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne .....	59
IV.2.3. Calcul des caractéristiques de la ligne courte.....	61
IV.2.3.1. L'algorithme de calcul des caractéristiques de la ligne courte .....	62
Conclusion .....	64
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>65</b>



## Liste des figures

Figure. I.1 : Schéma d'un réseau électrique.....	4
Figure. I.2 : Niveaux de tension normalisés.....	5
Figure. I.3 : Structure du système électrique.....	5
Figure. I.4 : Architectures des réseaux électriques.....	7
Figure. I.5 : Schéma général d'un poste source HTB/HTA 90 ou 63/20 kV.....	9
Figure. I.6 : Réseau aérienne en Simple dérivation.....	10
Figure. I.7 : Réseaux HTA souterrains en Double dérivation.....	11
Figure. I.8 : Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère.....	11
Figure. II.1: Différentes types de pylône.....	15
Figure. II.2 : Conducteurs câblés en Al et Ac.....	16
Figure. II.3 : Conducteur creux en Cu .....	16
Figure. II.4 Les conducteurs aluminium massifs ronds ou sectorals.....	17
Figure. II.5 : Paramètres de la ligne.....	18
Figure. II.6 : Un conducteur massif.....	21
Figure. II.7: Conducteur de section circulaire plein.....	22
Figure. II.8 : flux d'un ensemble de conducteurs en parallèles.....	23
Figure. II.9 : Disposition des conducteurs en triangle équilatéral.....	26
Figure. II.10 : Transposition de la ligne.....	27
Figure. II.11: Liaisons triphasé à disposition quelconque.....	28
Figure. II.12 : Conducteurs en faisceaux.....	29
Figure. II.13 : Liaison monophasée.....	30
Figure. II.14 : Liaison triphasée avec espacement de phase égal.....	31
Figure. II.15 : Liaison triphasée avec espacement de phase inégal.....	32
Figure. II.16: Ligne triphasée avec deux conducteurs faisceaux.....	33
Figure. II.17 : La configuration des conducteurs en faisceaux.....	33
Figure. II.18 : effet partielle à la terre .....	34
Figure. III.1: Modèle d'une ligne courte.....	36
Figure. III.2: Ligne de longueur moyenne, représentation en $\Pi$ .....	37
Figure. III.3: Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur.....	38

Figure. III.4: Modèle du générateur.....	39
Figure. III.5: Modélisation d'une charge.....	40
Figure. III.6: Modèle d'un transformateur.....	41
Figure. III.7: Modèle approximatif du transformateur.....	42
Figure. III.8: Modèle d'un transformateur déphaseur.....	43
Figure. III.9: modèle équivalent de la ligne en $\Pi$ .....	44
Figure. III.10: diagramme vectoriel des tensions et le triangle des puissances.....	45
Figure. III.11: Diagramme vectoriel des tensions et des courants.....	48
Figure. III.12: diagramme vectoriel d'une ligne courte.....	49
Figure. IV.1: organigramme de calcul des paramètres de la ligne.....	52
Figure. IV.2: les données de la ligne contenant un conducteur par phase.....	53
Figure. IV.3: les données de la ligne en faisceau.....	54
Figure. IV.4: les données de la ligne longue.....	55
Figure. IV.5: organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue.....	57
Figure. IV.6: les données de la ligne moyenne.....	59
Figure. IV.7: organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne moyenne.....	60
Figure. IV.8: les données de la ligne courte.....	62
Figure. IV.9: organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne courte.....	63

## Liste des tableaux

Tableau. II-1 : les températures de certain conducteur .....	19
Tableau. II-2 : valeurs du RMG selon le nombre de brins .....	25
Tableau. IV-1 : résultats de calcul des paramètres d'une ligne sans faisceau.....	53
Tableau. IV-2 : résultats de calcul d'une ligne avec 3 cordes en faisceau.....	54
Tableau. IV-3 : caractéristiques linéiques de la ligne longue .....	58
Tableau. IV-4 : les caractéristiques de la ligne longue.....	58
Tableau. IV-5 : caractéristiques de la ligne moyenne.....	61
Tableau. IV-6 : caractéristiques de la ligne courte.....	64

## Abréviations

T.H.T : Très Haute Tension

H.T : Haute Tension

HTA : Haute Tension A

HTB : Haute Tension B

BTA : Basse Tension A

BTB : Basse Tension B

TBT : Très Basse Tension

GRD : Gestionnaire de Réseau de Distribution.

CEI : Commission Electrotechnique Internationale

RMG : Rayon moyen géométrique

## Symboles

$R'$  : résistance linéique ( $\Omega/\text{km}$ )

$L'$  : inductance linéique ( $\text{H}/\text{km}$ )

$C'$  : capacité linéique ( $\text{F}/\text{km}$ )

$\rho$  : résistivité du matériau ( $\Omega \cdot \text{mm}^2 / \text{m}$ )

$S$  : Section des conducteurs ( $\text{mm}^2$ )

$l$  : Longueur de la ligne ou câble ( $\text{km}$ )

$t_1, t_2$  : les températures en  $^\circ\text{C}$  à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.

$R_1, R_2$  : les résistances du conducteur respectivement aux températures  $t_1$  et  $t_2$ .

$T$  : température paramétrique ( $^\circ\text{C}$ ).

$K$  : le coefficient du spiralage du conducteur.

$q$  : facteur de Kelvin

$f$  : fréquence du réseau ( $\text{Hz}$ ).

$B$  : induction magnétique ( $\text{wb}/\text{m}^2$ )

$H$  : champ magnétique ( $\text{At}/\text{m}$ )

$\Psi$  : Flux ( $\text{Wb} \cdot \text{t}/\text{m}$ )

$\mu_0$  : La permittivité du vide ou de l'air ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H}/\text{m}$ )

$G_{11}$  : Rayon moyen géométrique du faisceau.

$g_{11}$  : Rayon moyen géométrique d'une corde.

$n$  : Nombre de corde dans un faisceau.

$r_T$  : Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

$D_{eq}$  : Distance géométrique moyenne (GMD)

$Y$  : Admittance de la ligne ( $\Omega^{-1}$ )

$Z$  : Impédance de la ligne ( $\Omega$ )

$\bar{Z}_c$  : Impédance caractéristique ( $\Omega$ )

$\gamma$  : Coefficient de propagation

$\theta$  : Angle propagation

$V_R$  : Tension au récepteur (kV)

$I_R$  : Courant au récepteur (A)

$\cos(\varphi_R)$  : facteur de puissance au récepteur

$V_S$  : Tension a la source (kV)

$I_S$  : Courant a la source (A)

$S_S$  : Puissance apparente a la source

$P_S$  : Puissance active a la source (MW)

$Q_S$  : Puissance réactive a la source (MVAR)

$Q_C$  : Puissance réactive fournie par une capacité (MVAR)

$\cos(\varphi_S)$  : Facteur de puissance a la source

$\eta$  : Le rendement de la ligne (%)

$\Delta \bar{U}$  : la chute de tension dans la ligne

## Introduction générale

L'énergie électrique est très présente dans la vie quotidienne de pratiquement tous les habitants et surtout dans les pays industrialisés. En particulier, elle consomme une partie très importante de leur énergie sous forme électrique. [1]

Autrement dit, parmi les autres énergies, la place de l'énergie électrique est tout à fait centrale, car elle se transporte bien, inodore et autorise des transferts à très bon rendement. Par ailleurs, cette dernière est directement liée à l'ensemble des énergies existantes.

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures, conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : Production – Transport – Distribution. [2]

Dans le réseau électrique, la ligne joue un rôle très important dans la transmission de l'énergie électrique sur l'ensemble d'un territoire, elle représente dans le système électrique ce que représente une veine dans un corps humain.

Selon la longueur, on distingue trois types de lignes, la ligne longue ; la ligne moyenne et la ligne courte. Cependant, les calculs relatifs aux lignes sont très longs et le risque de faire des erreurs est grand, le calcul avec l'outil informatique s'avère nécessaire.

Dans ce contexte, on a élaboré un ensemble de programmes pour le calcul des paramètres et des caractéristiques de différents types de lignes.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à des généralités sur les réseaux électriques, leur architecture et l'exploitation de ces différents types de réseaux.

Dans le deuxième chapitre, sont présentées des lignes aériennes avec les différents composants qui les constituent ; ainsi qu'une description théorique de calcul des paramètres des lignes électriques. Mentionnant aussi les effets créés par les paramètres transversaux ( $R$  &  $L$ ) et longitudinaux ( $C$  &  $G$ ) tout au long de la ligne.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation des différents types de lignes de transport de l'énergie électrique en utilisant le modèle en  $\Pi$ .

Le quatrième chapitre sera consacré à la programmation sur Matlab pour calculer les paramètres électrique et les caractéristiques des différents types de ligne électrique.

Finalement une conclusion générale achèvera notre présent mémoire.

**Introduction**

A l'origine, le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux consommateurs. Ainsi, les transits de puissances circulent depuis les centrales de productions d'énergie électrique de type thermique, hydraulique ou nucléaire, vers les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de postes 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. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence.

**I.1. la production de L'énergie électrique [3]**

La centrale de production est la composante principale du système électrique. Une centrale peut regrouper sur un même site plusieurs groupes de production.

Elle est destinée à produire de l'électricité par l'intermédiaire des alternateurs. la moyenne tension de production est élevée à une valeur entre 63 et 400 kV à l'aides des transformateurs situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de l'usine pour un transport économique de l'énergie.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des centrales capables de produire de l'électricité en grande quantité. Les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. Les centres de production sont répartis presque uniformément dans l'ensemble du réseau interconnecté, d'autres modes de production existent tels que l'éolien, solaire, marémotrice, géothermale,...etc.

La turbine et l'alternateur sont les deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité. Dans le cas des usines thermiques, la turbine est entraînée par la vapeur produite dans les chaudières où l'on brûle les combustibles. Alors que dans le cas des usines hydroélectriques, la turbine est animée par la force de l'eau. La turbine est couplée à un alternateur.



Les moyens mis en œuvre sont diversifiés, et dépendent de plusieurs facteurs :

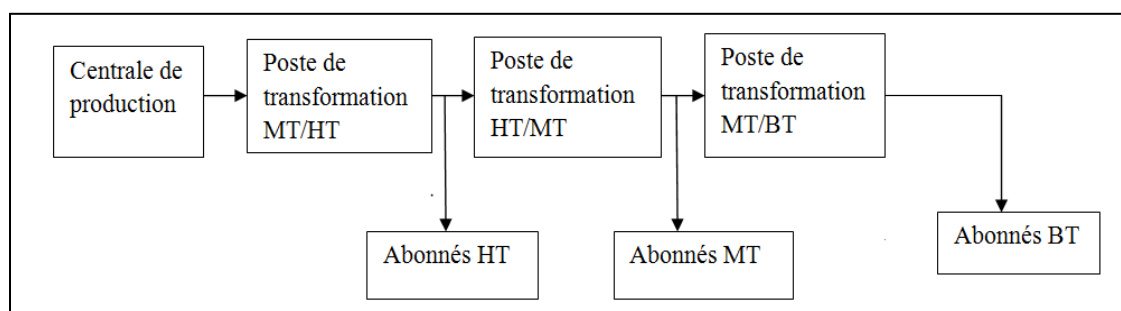
- ✓ Les technologies disponibles et sa fiabilité;
- ✓ La production nécessaire;
- ✓ Le rendement possible;
- ✓ Le coût des éventuelles matières premières.

### I.2. système de transformation [3]

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule de long de la ligne de transport, la solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension au départ pour le ramener à une tension plus basse, éventuellement la tension de départ, au point d'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs.

### I.3. Description des réseaux électriques [4]

Comme l'électricité ne se stocke pas en grande quantité, la production doit s'adapter sans cesse à la consommation. C'est pourquoi l'énergie produite doit être acheminée en temps réel jusqu'aux consommateurs. On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales électriques, vers les consommateurs d'électricité (figure. I.1).

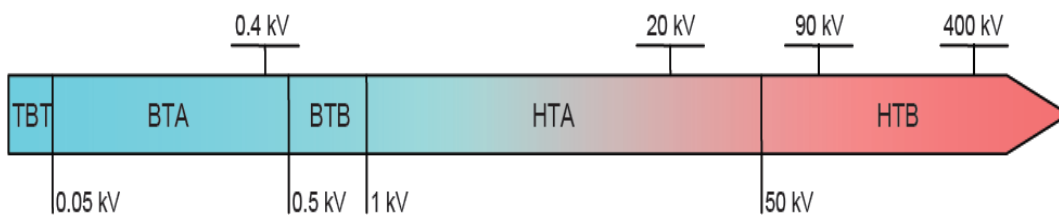


**Fig. I.1:** Schéma d'un réseau électrique

#### I.4. Les niveaux de tensions [4]

La nouvelle norme en vigueur en France UTE C18-510 définit les niveaux de tension alternative comme suit :

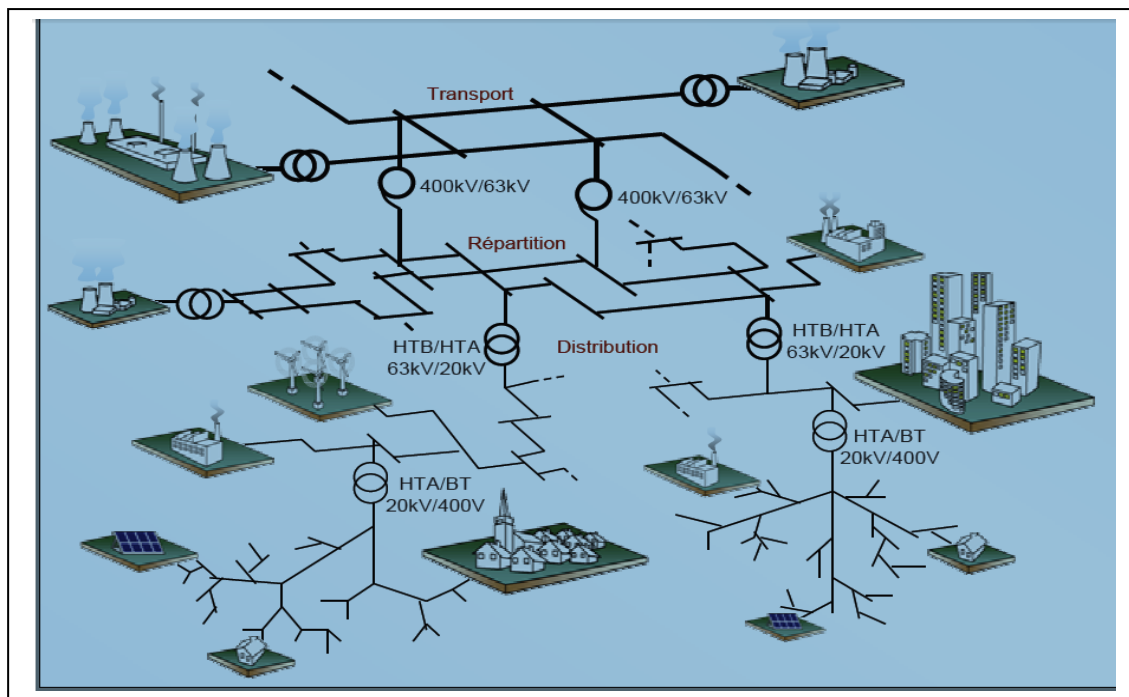
- ✓ HTB → pour une tension composée supérieure à 50 kV
- ✓ HTA → pour une tension composée comprise entre 1 kV et 50 kV
- ✓ BTB → pour une tension composée comprise entre 500 V et 1 kV
- ✓ BTA → pour une tension composée comprise entre 50 V et 500 V
- ✓ TBT → pour une tension composée inférieure ou égale à 50 V



**Fig. I.2** : Niveaux de tension normalisés [5]

#### I.5. Structure et fonction du système électrique [2]

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



**Fig. I.3** : Structure du système électrique

### **I.5.1. Réseau de transport THT**

La première de ces subdivisions est le réseau de transport qui permet de transporter de l'énergie électrique depuis les centres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont branchées les centrales de grandes puissances ( $> 300$  MW). Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs).

Ces réseaux sont, pour la plupart, aériens et souterrains dans les villes ou à leur approches. Ils sont étudiés pour un transit donné correspondant à la limite thermique de la ligne. Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leur exploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite ou de dispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence.

### **I.5.2. Réseau de répartition HT**

Le deuxième niveau de tension est le réseau de répartition, il est généralement à plus basse tension et donc moins dispendieux et contraignant à installer et opérer. De plus, son rôle est de répartir la puissance vers les centres de charges dans un rayon d'environ 100 kilomètres d'un poste de répartition. Le réseau de répartition est donc formé des lignes et des postes alimentant le réseau de distribution à partir du réseau de transport. Généralement, le réseau de répartition est aérien. Il existe aussi certaines installations de répartition souterraines.

Notons aussi, que certaines entreprises grandes consommatrices d'énergie sont parfois branchées directement au réseau de répartition sans passer par le réseau de distribution (par exemple les alumineries et les papetières).

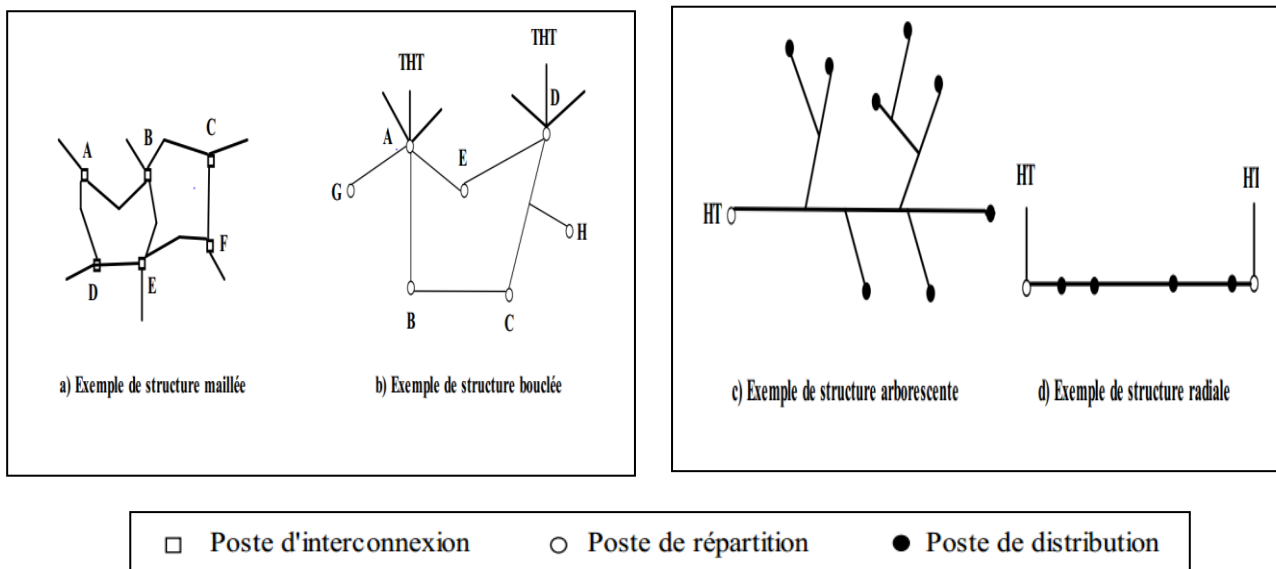
### **I.5.3. Réseau de distribution**

La troisième subdivision est le réseau de distribution (20kV, 400V). Ce réseau a pour fonction d'alimenter l'ensemble de la clientèle principalement connectée à ce réseau. Son exploitation est gérée par un Gestionnaire de Réseau de Distribution (GRD). Les réseaux de distribution ont principalement une structure radiale. A la différence d'une structure maillée, une structure radiale est une structure arborescente, ainsi, le flux de puissance n'a qu'un trajet possible pour transiter du poste de transformation HTB/HTA ou HTA/BT vers le point de consommation considérée.

**I.6. Architecture des réseaux électriques [7]**

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension.

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux sous forme des boucles, voici leurs différentes structures de liaisons.



**Fig. I.4:** Architectures des réseaux électriques

**I.7. Poste de transformation**

Un poste de transformation est un local logeant un transformateur, les appareils de protections (disjoncteurs, sectionneurs, parafoudre, ...etc.), des appareils de mesure et de contrôle.

A la sortie des centrales, les postes de transformation transforment la moyenne tension de production à la haute tension ou à la très haute tension nécessaire pour réaliser un transport économique de l'énergie électrique. La tension élevée pour le transport, doit être de nouveau abaissée dans d'autres postes de transformation successifs pour alimenter les réseaux de répartition puis les réseaux de distribution.

### I.7.1. Poste de transformation HTA/BT [8]

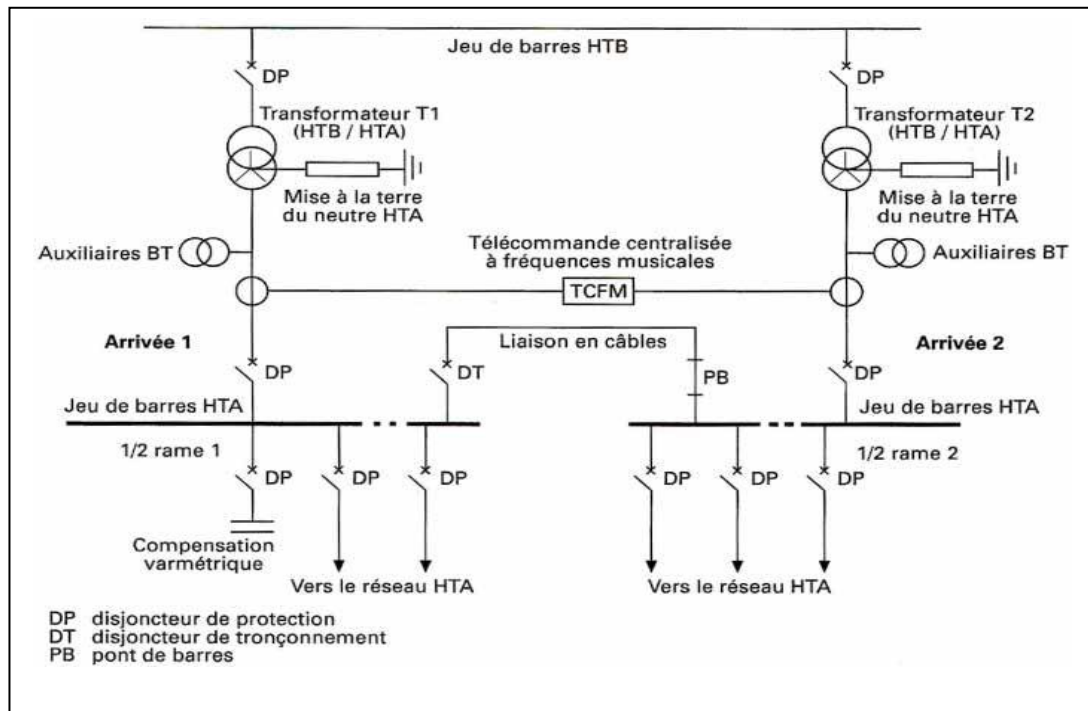
Les postes HTA/BT assurent l'alimentation et la protection du réseau BT. On rencontre deux types principaux :

- Les postes HTA/BT **sur réseaux aériens** sont très majoritairement représentés par les transformateurs sur poteau sans appareil de coupure sur la HTA.
- Les postes HTA/BT **sur réseaux souterrains** sont majoritairement représentés par les postes en cabine avec deux interrupteurs sectionneurs HTA pour manœuvrer sur l'artère et un interrupteur fusible en protection du transformateur.

### I.7.2. Postes sources [8]

Les postes HTB/HTA, appelés aussi les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 225 kV) constituent l'interface entre les réseaux de transport/répartition HTB et les réseaux de distribution HTA (figure.5). Leurs fonctions essentielles sont :

- la transformation de la tension du niveau HTB vers le niveau HTA, depuis une ou plusieurs lignes HTB et par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs transformateurs HTB/HTA ;
- la répartition de l'énergie électrique avec un ou plusieurs tableaux de répartition HTA, formés de l'assemblage de disjoncteurs HTA raccordés par embrochage à un jeu de barres ;
- la protection du réseau HTA par des disjoncteurs actionnés par différents types de protections définis selon le plan de protection retenu sur le réseau ;



**Fig. I.5 :** Schéma général d'un poste source HTB/HTA 90 ou 63/20 kV

### I.8. Lignes aériennes et câbles souterrains [9]

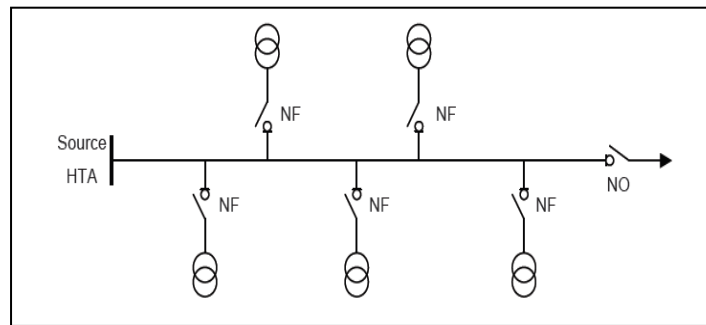
Depuis 1994 la plupart des compagnies d'électricité ont pris la décision de ne plus établir de nouvelles liaisons aériennes en deçà de 150 kV. A terme donc tout le réseau de distribution et progressivement celui de répartition se fera en câbles souterrains. L'utilisation de câbles en plus haute tension - même s'il existe quelques cas à 220 kV, 400 kV et 500 kV - est confronté à des problèmes technologiques significatifs (surtout les jonctions) ainsi qu'à un coût très élevé (si le coût en basse tension est similaire, voire inférieur pour une liaison souterraine, il devient jusqu'à environ 20 fois plus élevé à 400 kV par rapport à une liaison aérienne). En 2006, l'ordre de grandeur du coût d'une liaison aérienne à 400 kV (2 ternes) est chez nous de 1 millions de €/km.

Les lignes aériennes sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier.

### I.8.1 Réseaux HTA aériens [5]

Les zones rurales à faible densité de charge sont alimentées par des lignes HTA aériennes en simple dérivation (figure I.6), traditionnellement moins coûteuses que les câbles souterrains.

Le dimensionnement de ces ouvrages est lié aux chutes de tension maximales admissibles en raison de l'éloignement des charges à desservir.



**Fig. I.6 :** Réseau HTA aérienne en Simple dérivation

NF désigne un interrupteur normalement ferme, et NO un interrupteur normalement ouvert.

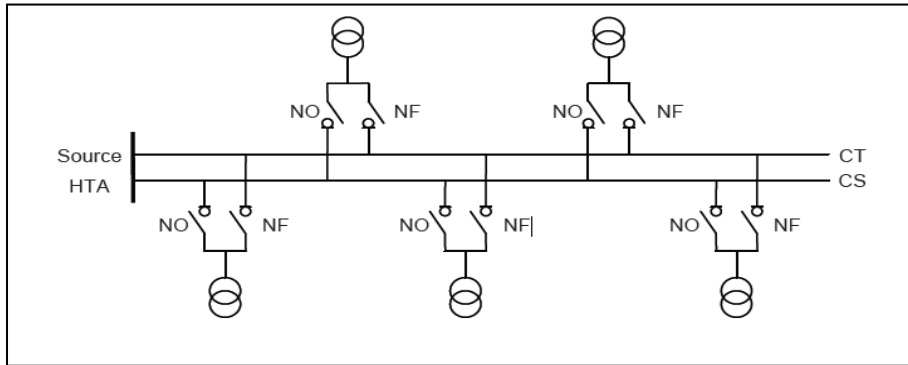
### I.8.2 Réseaux HTA souterrains [5]

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation (figure I.7) ou en coupure d'artère (figure I.8).

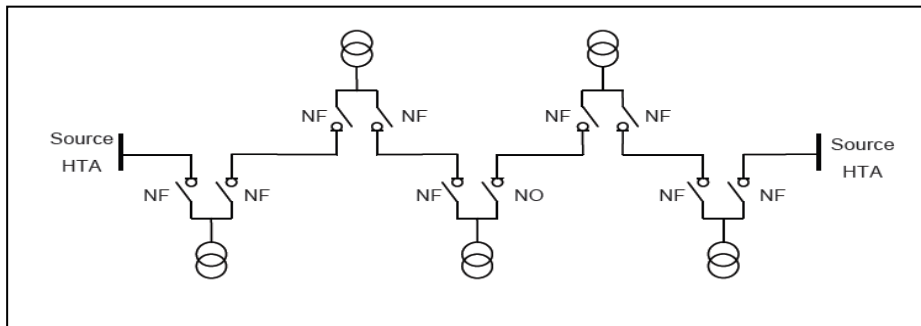
En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de travail (CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut. La technique en coupure d'artère est moins coûteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains est principalement lié aux courants admissibles dans les câbles en raison de la densité des charges à desservir.

Les ouvrages de distribution neufs ou les rénovations en zones rurales sont également réalisés en câble enterré depuis les années 1990, en raison de la baisse notable du surcout liée à cette technique. De plus, une volonté politique croissante de qualité environnementale tend à la réduction de l'impact visuel des ouvrages.



**Fig. I.7 :** Réseaux HTA souterrains en Double dérivation



**Fig. I.8 :** Réseaux HTA souterrains en Coupure d'artère

## I.9. Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterrains

### I.9.1. Lignes aériennes

#### a. AVANTAGES

- Sont moins coûteuses que les câbles souterrains au point de vue des frais d'installation et de réparation;
- permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et défauts;
- peuvent être réparées très rapidement en cas d'accident ou de défaut.
- peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.



**b. INCONVÉNIENTS**

- Sont exposées aux surtensions d'origine atmosphérique;
- leur installation donne lieu à de difficiles discussions avec les propriétaires des terrains surplombés;
- soulèvent des problèmes d'esthétique et de respect des sites;
- sont susceptibles d'induire des forces électromotrices perturbatrices ou dangereuses dans les circuits de télécommunication;
- sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques gênant les réceptions de radiodiffusion et de télévision;
- la rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers pour les personnes, les animaux.
- Selon certains scientifiques, les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé.

**I.9.2. Câbles souterraines****a. AVANTAGES**

- Constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses;
- sont soustraites aux surtensions d'origine atmosphérique ;
- ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications et les réceptions de radiodiffusion et télévision;
- seule solution possible pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance franchir dépasse 3 km.

**b. INCONVÉNIENTS**

- Sont d'un coût beaucoup plus élevé que celui des lignes aériennes. La différence est d'autant plus grande que la tension est plus élevée;
- le repérage des défauts y est délicat et lent,
- les réparations sont coûteuses et parfois malaisées;
- leurs armures et gaines doivent être protégées contre les effets de corrosion dus aux courants vagabonds,
- risquent d'être détériorés en cas de mouvements de terrains (particulièrement à craindre dans les régions minières),
- leur isolement est susceptible d'être détérioré par élévation de température des conducteurs en cas de surcharge.

**Conclusion**

L'objectif, de ce chapitre est de donner une vision globale des concepts classiques, des réseaux électriques, qui restent toujours d'actualité comme les cheminements de l'énergie électrique, la classification des tensions selon les normes de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et les schémas d'exploitation des différents types de réseau.

Les lignes et les câbles constituent des circuits de transmissions de l'énergie électrique des centres de productions (centrale électrique) jusqu' aux consommateurs. On a mentionné leurs avantages et inconvénients sous forme de comparaison entre les deux moyennes de transport de l'énergie électrique.

## Introduction

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmissions des réseaux triphasés reliant le générateur aux charges. Une ligne de transmission électrique a quatre paramètres, à savoir la résistance, inductance, capacité et la conductance shunt. Ces derniers sont répartis uniformément sur toute la ligne. Chaque élément de ligne a sa propre valeur, et il est impossible de les concentrer en des points discrets sur la ligne. Pour cette raison, les paramètres des lignes sont connus en tant que paramètres distribués, mais peuvent être regroupés en vue de l'analyse sur base approximatives.

Ces paramètres conjointement avec le courant de charge et le facteur de puissance déterminent les performances électriques de la ligne. La performance à long terme comprend le calcul de l'envoi de la tension de fin, l'envoi courant de la fin, l'envoi de facteur de puissance de la fin, la perte de puissance dans la ligne, l'efficacité de la transmission, la réglementation et les limites de débit de puissance pendant l'état d'équilibre et de l'état transitoire. [10]

### II.1. Les supports

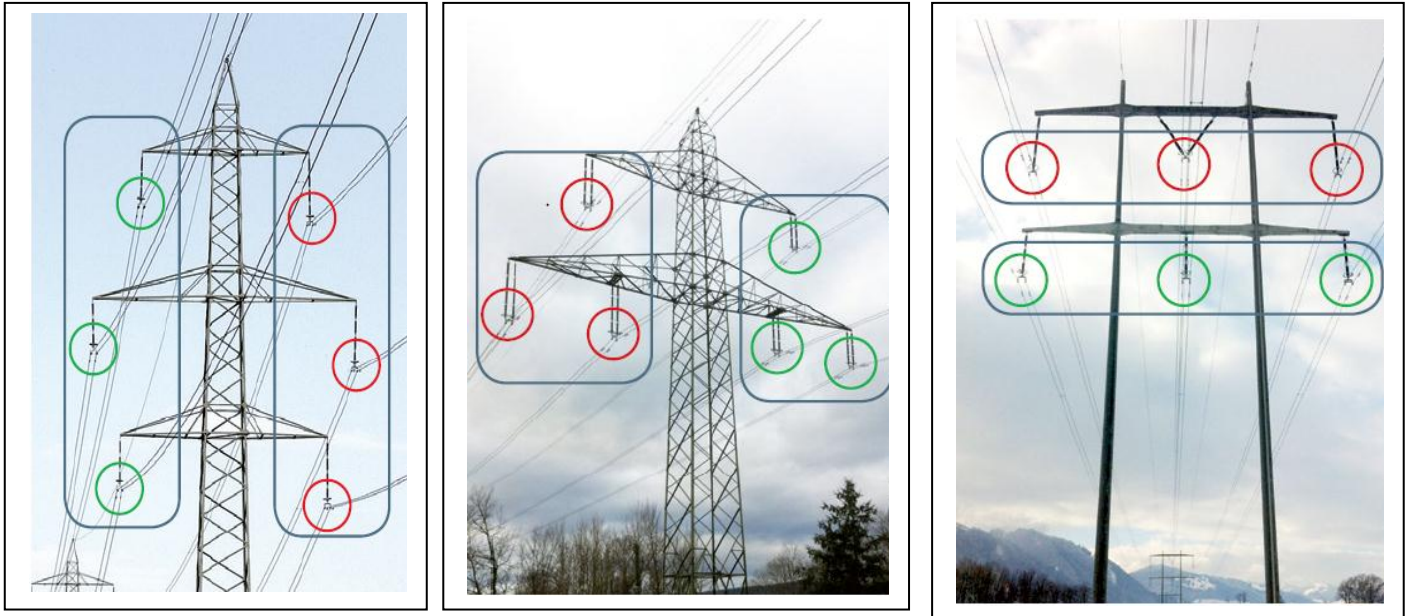
Ils sont destinés à supporter le poids des conducteurs et des charges extérieures (vent, neige) et à maintenir les conducteurs à une distance entre eux et à des hauteurs imposées par des normes en diverse forme en fonction du poids et de la tension de la ligne. Ces supports permettent de maintenir les conducteurs en nappe horizontale soit en nappe verticale (drapeau) ou en triangle.

### II.2. Types de pylônes [11]

En principe, un système de lignes (aériennes) du réseau de transport est composé de trois «phases», parfois aussi appelées «système» ou «terne». En général, un pylône supporte plusieurs systèmes (deux le plus souvent). Le réseau de transport comporte essentiellement des pylônes silhouette «sapin», «Danube» ou «portique».

- **le pylône silhouette «sapin»** Comme on le voit sur l'illustration (a), comporte généralement trois niveaux de bras (ou consoles). Il est donc plutôt mince et convient particulièrement aux régions boisées ou montagneuses.
- **Le pylône silhouette «Danube»** Comme le montre l'illustration (b), comporte en général deux niveaux de bras et semble donc plus trapu; on l'utilise surtout en plaine.

- **Le pylône «en portique»** ou (nappe) Comme le montre l'illustration (c), comporte au moins deux mâts et en général deux traverses. En plaine, il est relativement peu visible.



(a)

(b)

(c)

- a) Pylône silhouette sapin à deux systèmes (en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).  
 b) Pylône silhouette Danube à deux systèmes(en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).  
 c) Pylône en portique à deux systèmes (en bleu) à trois phases chacun (vert/rouge).

**Fig. II.1** : Différentes types de pylône

### II.3. Isolateurs de lignes aériennes [12]

L'isolateur est utilisé comme son nom l'indique pour l'isolement entre deux corps ou deux pièces sous différentes tensions pour empêcher les courts circuits, les pertes de courant et les charges d'électrocution. L'isolateur est un matériau solide, liquide ou gaz qui a une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle.

Les isolateurs des lignes aériennes ont deux fonctions principales. D'une part, ils permettent d'isoler électriquement les lignes de transport d'énergie électrique des pylônes mis à la terre, et d'autre part, ils ont un rôle mécanique qui consiste à soutenir ces mêmes lignes et donc résister aux différentes contraintes mécaniques dû surtout au poids de la ligne, son mouvement en présence de vent, ... etc.

En pratique, on distingue deux types d'isolateurs de lignes aériennes :

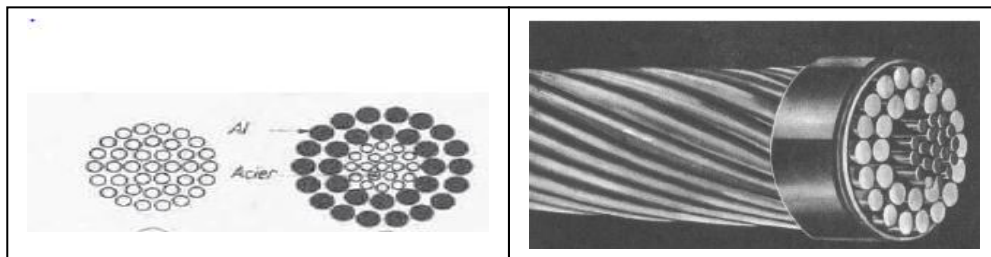
- Isolateurs rigides
- Isolateurs suspendus (éléments de chaîne)

#### II.4. TYPES de conducteurs [13]

Ils existent trois types de conducteurs : câblés (toronnée), massif et conducteurs creux.

##### a. Conducteur câblés (toronnée)

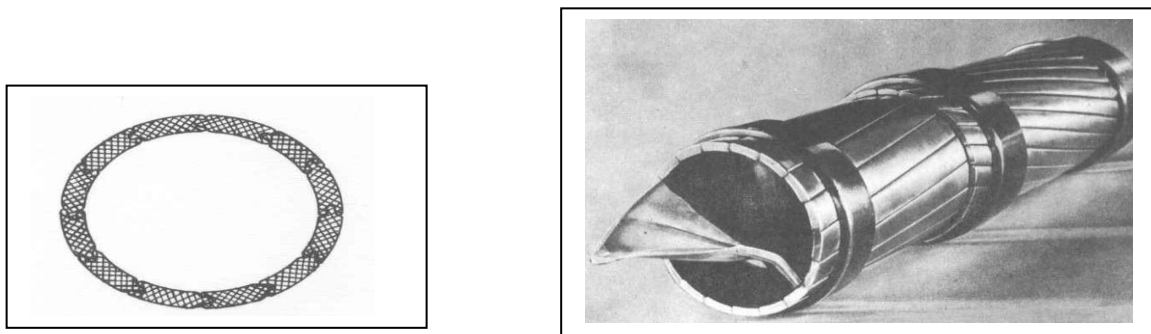
Afin de donner aux conducteurs une souplesse suffisante, les câbles sont constitués habituellement de brins d'égales sections circulaires disposés en couches spirales dont le sens est alterné d'une couche à la suivante autour d'un brin central rectiligne.



**Fig. II.2.** Conducteurs câblés en Al et Ac

##### b. Conducteurs creux

Avant 1940, des lignes à tensions égales à 220 kV en Europe et à 287 kV aux Etats-Unis d'Amérique ont été équipées de conducteurs creux. Cependant ces conducteurs creux sont très coûteux et ont été abandonnés dans la construction des lignes depuis 1950.



**Fig. II.3 :** Conducteurs creux en Cu

**c. Conducteur massif****Fig. II.4** : Les conducteurs aluminium massifs ronds ou sectorals**II.5. Effet couronne [14]**

Lorsqu'une différence de potentiel alternatif est appliquée à travers deux conducteurs dont l'espacement est grand par rapport à leurs diamètres, il n'y a pas de changement visible dans l'état de l'air atmosphérique entourant les fils si la tension appliquée est faible. Toutefois, lorsque la tension appliquée dépasse une certaine valeur, appelée tension de claquage critique, les conducteurs sont entourés d'une faible violette briller appelé corona. Le phénomène de la couronne est accompagné d'un sifflement, la production d'ozone, la perte de puissance et les interférences radio. Plus la tension est élevée, plus grande et la plus élevée de l'enveloppe devient lumineux, et une plus grande sont le son, la perte de puissance et le bruit de radio. Si la tension appliquée est augmentée de la valeur de panne, un flash-over se produira entre les conducteurs en raison de la rupture de l'isolation de l'air Si les conducteurs sont poli et lisse, la lueur de la couronne sera uniforme sur toute la longueur du conducteur, sinon les aspérités apparaîtront plus lumineux.

Le phénomène de la couronne est affecté par l'état physique de l'atmosphère ainsi que par la condition de la ligne. Il existe plusieurs facteurs influant sur le corona on cite parmi eux :

- ✓ l'atmosphère.
- ✓ la taille du conducteur.
- ✓ L'espacement entre les conducteurs.
- ✓ la tension de la ligne.

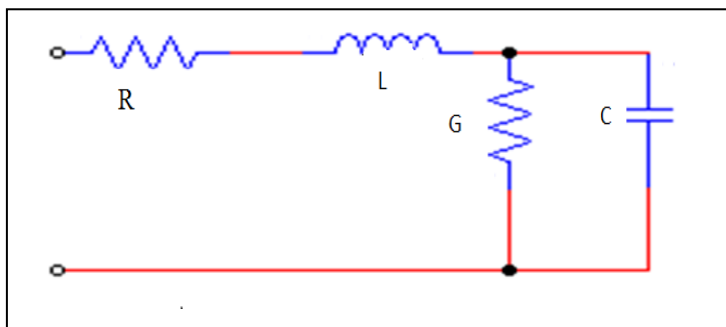
### II.6. Effet peau [15]

Les phénomènes résultant en raison de la répartition inégale du courant électrique sur toute la section transversale du conducteur utilisés pour la transmission de puissance à longue distance sont désignée comme le skin effect dans les lignes de transmission. Un tel phénomène n'a pas beaucoup de rôle à jouer dans le cas d'une ligne courte, mais avec l'augmentation de la longueur effective des conducteurs, effet de peau augmente considérablement. Ainsi, les modifications dans le calcul de la ligne doit être fait en conséquence.

La distribution du courant électrique sur toute la section transversale du conducteur est assez uniforme dans le cas d'un système à courant continu. Mais ce que nous utilisons dans l'ère actuelle de l'ingénierie du système d'alimentation est essentiellement un système électrique alternatif actuel, où le courant électrique a tendance à couler avec une densité plus élevée à travers la surface des conducteurs (c.-à-peau du conducteur), laissant le noyau privé de nombre nécessaire d'électrons. En fait, il se pose même quand une condition absolument aucun courant électrique circule à travers le cœur, et la concentration de la quantité totale de la zone de surface, conduisant ainsi à une augmentation de la résistance électrique effective du conducteur. Cette tendance particulière d'un système de transmission AC à prendre le trajet de surface pour le passage du courant électrique prive le noyau est appelé l'effet de peau dans les lignes de transmission.

### II.7. Les paramètres de la ligne électrique

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmissions des réseaux triphasés reliant le générateur aux charges. Chaque ligne possède ses propres paramètres ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $G$ ) les paramètres séries longitudinaux ( $R$ ,  $L$ ) et paramètres parallèles transversaux ( $C$ ,  $G$ ).



**Fig. II.5 :** Paramètres de la ligne.

### II.7.1. Les paramètres longitudinaux

#### II.7.1.1. la résistance de la ligne [16]

Les résistances a courant continue d'un conducteur homogène de longueur  $l$  en (m), de section uniforme  $s$  en ( $\text{mm}^2$ ) et de résistivité  $\rho$  a  $20^\circ\text{C}$  ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ ) est donnée par la formule :  $R = \rho \frac{l}{s} (\Omega/\text{km})$  (II.1)

La valeur de la résistance en courant continu peut être modifiée par l'effet de spirilage du conducteur et par l'effet température.

#### a. Effet de spirilage du conducteur

L'effet de spirilage du conducteur fait augmenter la résistance de 1% environ pour les conducteurs à trois brins et de 2% environ pour les conducteurs a nombre de brins supérieur.

#### b. Effet de température

La résistance du matériau croit avec la température selon la loi :

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T+t_2}{T+t_1} \quad (\text{II.2})$$

- $t_1$  et  $t_2$  sont les températures en  $^\circ\text{C}$  à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.
- $R_1$  et  $R_2$  sont les résistances du conducteur respectivement aux températures  $t_1$  et  $t_2$ .
- $T$  est une température paramétrique en  $^\circ\text{C}$  lie à la nature du matériau du conducteur.

**Tab. II-1:** les températures de certain conducteur

T( $^\circ\text{C}$ )	Nature de conducteur
234.5	Pour le cuivre recuit ayant 100% de conductivité
241	Pour le cuivre étiré ayant 97.3% de la conductivité du cuivre recuit
228	Pour l'aluminium étiré (et ses alliages) ayant 61% de la conductivité du recuit

#### c. Effet pelliculaire ou effet Kelvin

En courant alternatif, la densité de courant dans un conducteur n'est pas uniforme à travers la section du conducteur.

La densité de courant va en croissant vers la périphérie du conducteur ce phénomène appelle «effet pelliculaire» ou «effet kelvin».

Ou «effet de peau», modifie la valeur de la résistance et l'inductance du conducteur.



Le facteur de Kelvin est calculé à l'aide de l'expression suivante :

$$q = \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho}} \quad (\text{II.3})$$

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz

$\rho$  : résistivité du métal ( $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$ )

### II.7.1.2. Inductance de la ligne [15]

#### II.7.1.2.1. Définition

L'inductance est la grandeur du circuit qui relie la tension induite à la vitesse de la variation du courant. La variation de l'intensité de courant dans les conducteurs fait changer le nombre de ligne du champ magnétique et l'intensité de celui-ci dans le circuit.

Tout variation du flux couple induit une tension proportionnel à la vitesse de variation du flux

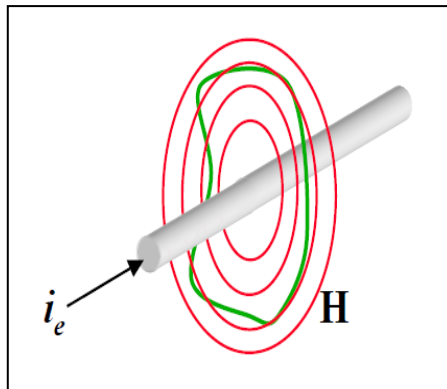
$$e = \frac{d\phi}{dt} = L \frac{di}{dt}$$

#### II.7.1.2.2 Inductance d'un conducteur

##### a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur

Un courant électrique d'intensité I, parcourant un fil conducteur, crée un champ magnétique autour de celui –ici.

D'après la loi de Maxwell, l'intégrale linéique de l'intensité de champ magnétique est égale au courant entouré.



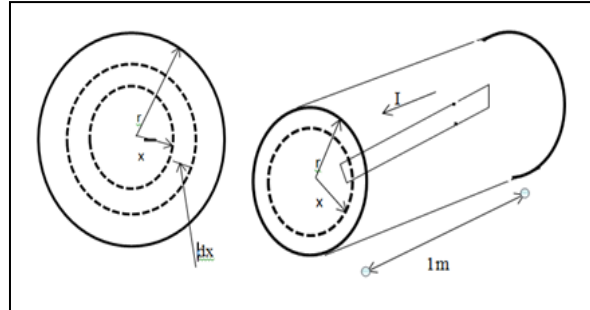
Soit un conducteur de rayon  $r$  parcouru par un courant  $I$ , considérant le champ magnétique  $H$  créée à l'intérieur de ce conducteur a une distance  $x$  du centre .soit  $I_x$  le courant entoure par un cercle de rayon  $x$ .  $H$  constant à chaque point du cercle.

$$\int_0^{2\pi x} H. dx = I_x$$

$$H.2\pi x = I_x$$

$$H = \frac{I_x}{2\pi x} \text{ (At/m)}$$

$$B = \mu_0 H \text{ (wb/m}^2\text{)}$$



**Fig. II.6 : Un conducteur massif**

$$B = \mu_0 \frac{I_x}{2\pi x} \tag{II.4}$$

Le flux travers une section d'épaisseur  $dx$  et de longueur de  $1m$  est :

$$d\phi = B.ds = B.dx .1$$

Supposant que la densité du courant est uniforme :

$$\frac{I_x}{\pi x^2} = \frac{I}{\pi r^2} \Rightarrow I_x = \frac{x^2}{r^2} I$$

Le flux intérieur entoure seulement une partie du conducteur, donc comme le courant, il constitue une portion du flux total.

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} d\phi$$

$$d\psi = \frac{x^2}{r^2} B. dx = \frac{x^2}{r^2} \mu_0 \frac{1}{2\pi x} \cdot \frac{x^2}{r^2} I dx$$

$$d\psi = \mu_0 \cdot I \cdot \frac{x^3}{2\pi r^4} dx$$

$$\psi_{int} = \int_0^r d\psi = \frac{\mu_0 \cdot I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx$$

$$\psi_{int} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} I \quad \text{(Wb.t/m)} \tag{II.5}$$

$\mu_0$  : La permittivité du vide ou de l'air ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ )

$$L_{int} = \frac{\psi_{int}}{I} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} \text{ (H/m)} \tag{II.6}$$

**b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur**

Pour déterminer le flux extérieur entre deux contours situés respectivement à la distance  $D_1$  et  $D_2$  du centre du conducteur, considérant un élément d'épaisseur  $dx$  entre  $D_1$  et  $D_2$ .

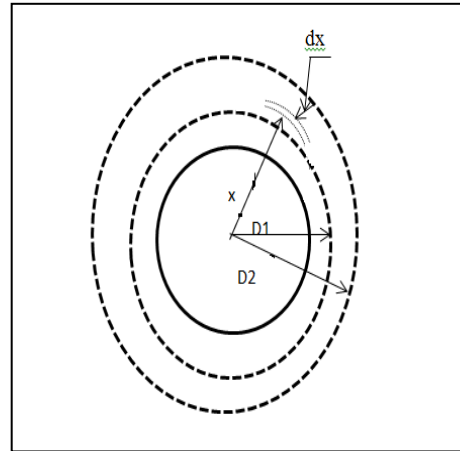
$$\int_0^{2\pi} H \cdot dx = I$$

$$H \cdot 2\pi x = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi x} \quad (\text{At/m}) \quad x > r$$

$$B = \mu_0 H \quad (\text{wb/m}^2)$$

$$B = \mu_0 \frac{I}{2\pi x}$$



**Fig. II.7 :** Conducteur de section circulaire plein

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur  $dx$  et de longueur de 1m est :

$$d\phi = B \cdot dS = B \cdot dx \cdot 1$$

$$d\phi = \mu_0 I \frac{dx}{2\pi x}$$

$$d\phi = 2 \cdot 10^{-7} I \frac{dx}{x}$$

Le flux crée entre deux contours  $D_1$  et  $D_2$

$$\psi_{12} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} \quad (\text{Wb.t/m}) \tag{II.7}$$

Si  $D_1 = r$  et  $D_2 = D$

$$\psi_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \tag{II.8}$$

L'inductance d'un conducteur due au flux extérieure

$$L_{ext} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{H/m}) \tag{II.9}$$

**c. L'inductance d'un conducteur due au flux total**

Le flux de liaison total est :

$$\Psi = \psi_{int} + \psi_{ext}$$

$$\Psi = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} I + 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r} \tag{II.10}$$

Sachant que:

$$2 \ln e^{\frac{1}{4}} = \frac{1}{2}$$

$$\Psi = 2 \cdot 10^{-7} I \left[ \ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r} \right] \tag{II.11}$$

$$\Psi = 2.10^{-7} I \ln \frac{D}{re^{-\frac{1}{4}}} \quad (II.12)$$

En posant:

$$re^{-\frac{1}{4}} = r'$$

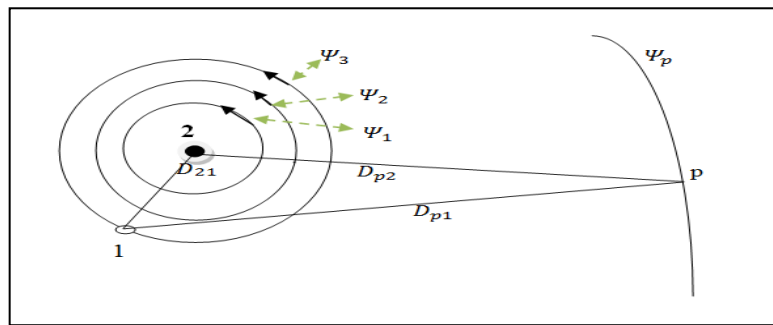
Le flux crée par un conducteur est :

$$\Psi = 2.10^{-7} I \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{Wb.t/m}) \quad (II.13)$$

L'inductance du conducteur est:

$$L = \frac{\Psi}{I} = 2.10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{H/m}) \quad (II.14)$$

### II.7.1.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant



**Fig. II.8 :** flux d'un ensemble de conducteurs en parallèles

Considérant n conducteurs parallèles parcourus chacun par un courant ( $I_1, I_2, \dots, I_n$ ) et considérons que le système est équilibré ( $I_1 + I_2 + \dots + I_n = 0$ ).

On a calculé le flux du au conducteur 1 seul et on a ajouté la contribution des flux des conducteurs 2,3,...,n, en faisant la superposition.

Soit le flux crée par le conducteur 2, les lignes de ce flux sont des cercles concentriques.

La ligne  $\psi_1$  du flux, n'entoure pas le conducteur 1.

Les lignes  $\psi_2$  et  $\psi_3$  et  $\psi_p$  du flux crée par le conducteur 2 entourent le conducteur 1.

La ligne  $\psi_2$  et  $\psi_p$  du flux crée par le conducteur 2 marque les limite extrêmes du flux due au conducteur 2 entourant le conducteur 1.

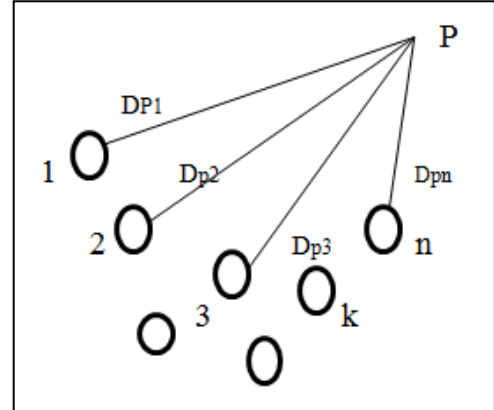
D'après la relation (II.7), le flux a un point p par le conducteur1 est :

$$\psi_{12}=2.10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{p2}}{D_{12}} \quad (II.15)$$

De la même manière, le flux crée par le conducteur3 autour du conducteur 1 est

$$\psi_{13}=2.10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{p3}}{D_{13}} \quad (II.16)$$

$$\psi_{1n}=2.10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{pn}}{D_{1n}} \quad (II.17)$$



Le flux total crée autour du conducteur 1 a un point p distant de  $D_{p1}$  du centre du conducteur 1 est :

$$\psi_1 = \psi_{11} + \psi_{12} + \dots + \psi_{1n}$$

$$\psi_1 = 2.10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{1j}} \quad (II.18)$$

D'une manière générale, le flux total crée autour d'un conducteur k a un point p distant de  $D_{pk}$  du centre du conducteur k est :

$$\psi_k = \psi_{k1} + \psi_{k2} + \dots + \psi_{kj} + \dots + \psi_{kk} + \dots + \psi_{kn}$$

$\psi_{kj}$  est le flux crée par le conducteur j autour de k, c'est le flux mutuel.

$$\psi_k = 2.10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{kj}} \quad (II.19)$$

$D_{jk} = D_{kj}$  est la distance entre deux conducteurs j et k.

$D_{kk} = r'_k$  est le rayon du conducteur k.

$$\psi_k = 2.10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} + \sum_{j=1}^n I_j \ln D_{pj} \right] \quad (II.20)$$

$$I_n = -(I_1 + I_2 + \dots + I_{n-1}) = - \sum_{j=1}^{n-1} I_j$$

D'où

$$\psi_k = 2.10^{-7} \left[ \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} + \sum_{j=1}^{n-1} I_j + \ln \frac{D_{pj}}{D_{pn}} \right]$$

Comme le point p est supposé très loin des conducteur, les valeurs :

$$\frac{D_{p1}}{D_{pn}} \approx \frac{D_{p2}}{D_{pn}} \approx \frac{D_{pn-1}}{D_{pn}} \approx 1$$

$$\psi_k = 2.10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} \quad (\text{Wb.t/m}) \quad (\text{II.21})$$

#### II.7.1.2.4. Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés

Pour les conducteurs toronnés, les valeurs de RMG peuvent être calculés à partir de la section utile S du conducteur et du nombre de brins.

**Tab. II-2:** valeurs du RMG selon le nombre de brins

Type	$g_{11}$ RMG
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 3brins sans âme centrale	$0.4750S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046S^{\frac{1}{2}}$

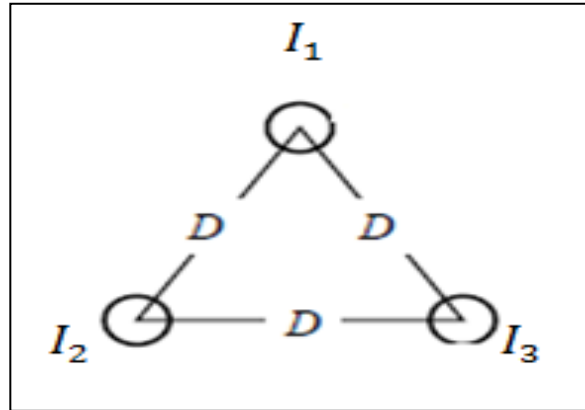
II.7.1.2.5. Inductance des lignes triphasées

a. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux)

Les trois conducteurs de la ligne sont de rayon r et espacés de la distance D.

Les courants dans les conducteurs satisfont la relation :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$



**Fig. II.9 :** Disposition des conducteurs en triangle équilatéral

En appliquant la relation (II.21), on peut déterminer le flux du conducteur 1 du au courants  $I_1$ ,  $I_2$  et  $I_3$ .

$$\psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^3 I_j \ln \frac{1}{D_{kj}}$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{D_{11}} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \tag{II.22}$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + (I_2 + I_3) \ln \frac{1}{D} \right) \tag{II.23}$$

On à :  $I_1 = -(I_2 + I_3)$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} - I_1 \ln \frac{1}{D} \right) \tag{II.24}$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{D}{r'} \tag{II.25}$$

L'inductance du conducteur 1 est :

$$L_1 = \frac{\psi_1}{I_1} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r'} \text{ (H/m)} \tag{II.26}$$

A cause de la symétrie, les trois inductances sont égales.

L'inductance linéique par phase de la ligne est :

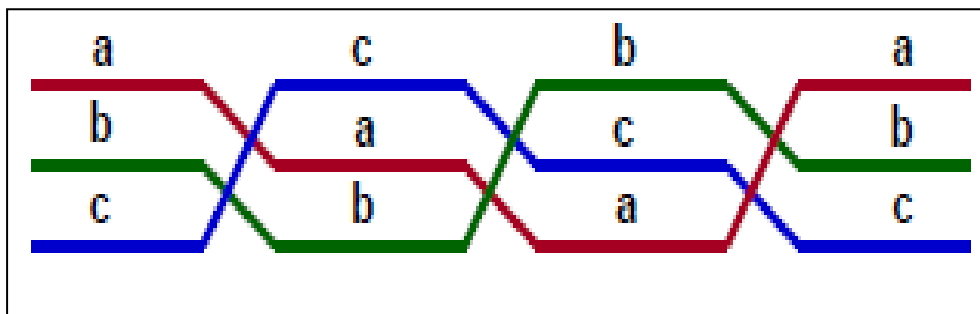
$$L' = 2.10^{-7} \ln \frac{D}{g_{11}} \text{ (H/m)} \tag{II.27}$$

$r'=g_{11}$  est le rayon moyen géométrique du conducteur (RMG).

**b. Disposition quelconque**

Si les conducteurs des phases de la ligne ne sont pas régulièrement espacés, les capacités et les inductances des phases sont différentes. Ce problème peut être résolu par la transposition de la ligne.

La transposition de la ligne est la permutation des conducteurs de phase à des intervalles réguliers le long de la ligne telle que chaque conducteur occupera sa position originale.



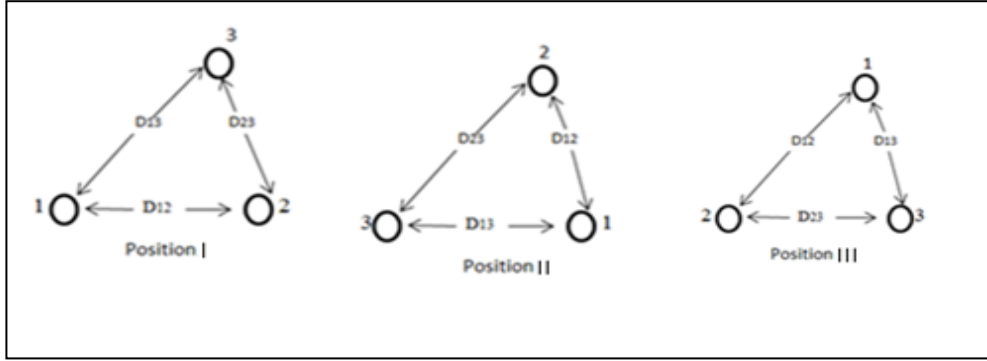
**Fig. II.10 :** Transposition de la ligne

Les trois conducteurs de la ligne sont de rayon  $r$  et les courants dans les conducteurs satisfont la relation  $I_1+I_2+I_3=0$

Les distances  $D_{12} \neq D_{23} \neq D_{31}$ , les inductances des phases sont différentes, cela conduit à des chutes de tension différentes dans chaque phase par conséquent les tensions à la sortie de la ligne sont différentes.

En appliquant la relation (II.21) on peut déterminer le flux du conducteur 1 du aux courants  $I_1, I_2,$  et  $I_3$  dans les positions I, II et III.





**Fig. II.11** : Liaisons triphasé à disposition quelconque

$$\begin{cases} \psi_{1I} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ \psi_{2II} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{23}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \\ \psi_{3III} = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} + I_2 \ln \frac{1}{D_{13}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

Le flux moyen de la phase 1 on utilise les équations (II.28):

$$\psi_1 = \frac{\psi_{1I} + \psi_{2II} + \psi_{3III}}{3}$$

$$\psi_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} \left( 3 \cdot I_1 \ln \frac{1}{r'} + (I_2 + I_3) \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} \right) \quad (\text{II.29})$$

Comme  $I_1 = -(I_2 + I_3)$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left( I_1 \ln \frac{1}{r'} - I_1 \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}} \right) \quad (\text{II.30})$$

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{r'} \quad (\text{II.31})$$

L'inductance linéique d'une phase de la ligne est :

$$L' = \frac{\psi_1}{I} \quad (\text{II.34})$$

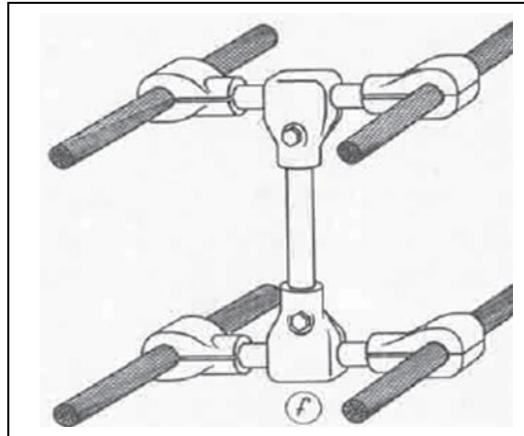
$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{g_{11}} \quad (\text{H/m}) \quad (\text{II.32})$$

Avec  $D_{\text{éq}} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}$  la distance moyenne géométrique (DMG)

Donc

$$L' = 2.10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}}}{G_{11}} \quad (\text{H/m}) \quad (\text{II.33})$$

**II.7.1.2.6. Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux**



**Fig. II.12 : Conducteurs en faisceaux**

Si la ligne est formée par des conducteurs de phase en faisceaux, l'inductance linéique est :

$$L' = 2.10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}}}{G_{11}} \quad (\text{H/m}) \quad (\text{II.34})$$

Avec  $G_{11} = \sqrt[n]{n \cdot g_{11} \cdot r_T^{n-1}}$

$G_{11}$  Rayon moyen géométrique du faisceau.

$g_{11}$  Rayon moyen géométrique d'une corde.

n Nombre de corde dans un faisceau.

$r_T$  Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

**III.7.1.2.7. Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes**

$$L' = 2.10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}} D'_n}{g_{11} \cdot D_n} \quad (\text{H/m}) \tag{II.35}$$

Avec  $D_n = \sqrt[3]{D_{Aa} D_{Bb} D_{Cc}}$

$$D'_n = \sqrt[3]{D_{Ab} D_{Ac} D_{Bc}}$$

**II.7.2. Les paramètres transversaux**

**II.7.2.1. Conductance [17]**

Le terme G, en effet, dû aux courants superficiels au long des chaînes d'isolateurs et à l'effet couronne des conducteurs est, par temps sec, G est inférieur à 0.005 Cω ; ce n'est que sous très forte pluie, lorsque les courants superficiels et les pertes par effet couronne sont les plus élevés, que G peut atteindre 0.1 Cω. Ces conditions étant particulièrement rares, il est donc généralement admis de négliger la conductance transversale G des lignes.

**II.7.2.2. La capacité de la ligne [15]**

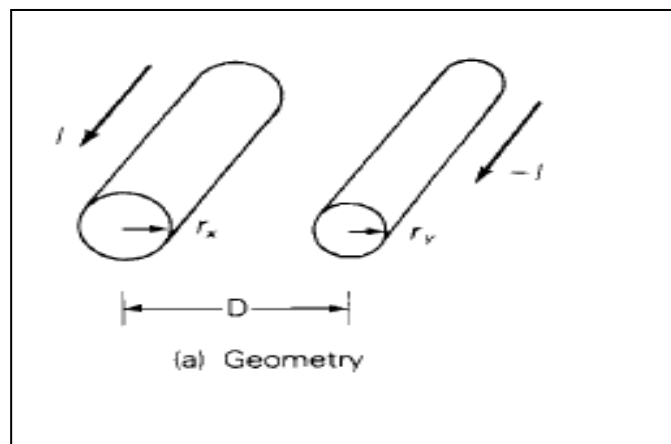
Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est représenté par la capacité linéique C' de la ligne .pour son calcul, le fait qu' ; un conducteur soit creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre a la périphérie (loi de faraday).

**II.7.2.2.1. Capacité d'une ligne monophasée [15]**

$$V_{xy} = \frac{q}{\pi \times \epsilon} \ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}$$

$$C_{xy} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} \quad (\text{F/m})$$

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2}$$



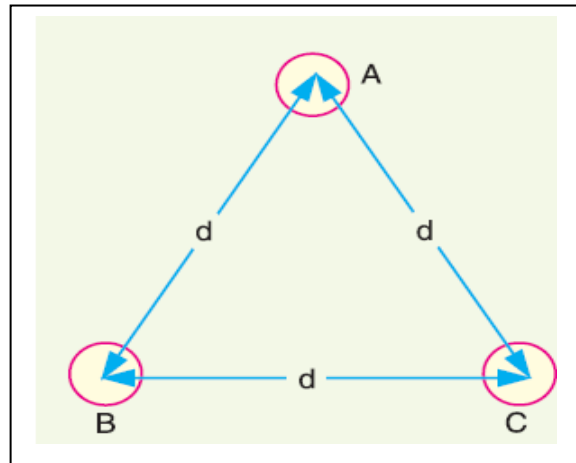
**Fig. II.13 : Liaison monophasée**

$$C_{xn} = \frac{\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_x r_y}}} \quad \left( \frac{F}{m} \right) \quad (II.36)$$

**II.7.2.2.2. Capacité d'une ligne triphasée [15]**

**a. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal**

On montre les trois conducteurs A, B et C de la ligne triphasée de transport aérienne ayant des charges  $Q_A$ ,  $Q_B$  et  $Q_C$  par mètre de longueur, respectivement. Que les conducteurs soient équidistants (mètres  $d$ ) de l'autre. Nous allons trouver la capacité de conducteur de ligne à neutre dans cette ligne espacés symétriquement. En se référant à la (Figure II.14).



**Fig. II.14:** Liaison triphasée avec espacement de phase égal

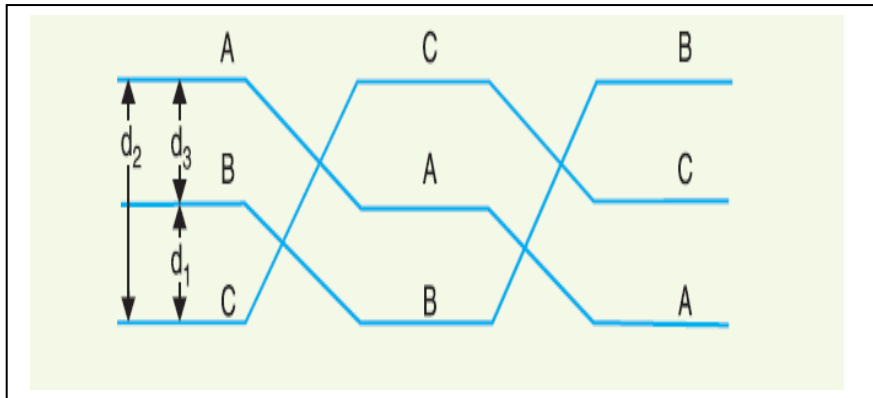
$$D_{ab} = D_{ba} = D_{ca} = D_{cb} = D$$

$$D_{aa} = D_{bb} = r$$

$$\begin{cases} V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right] \\ V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \\ V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon} \end{cases} \quad (II.37)$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} \quad (F/m) \quad (II.38)$$

b. Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase inégal



**Fig. II.15 :** Liaison triphasée avec espacement de phase inégal

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \tag{II.39}$$

$$V_{ac} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \tag{II.40}$$

$$V_{an} = \frac{q_a \ln \frac{D_{eq}}{r}}{2 \times \pi \times \epsilon}$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{r}} \quad (F/m) \tag{II.41}$$

Ou,

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}} ;$$

$D_{eq}$ : Distance géométrique moyenne (GMD)

II.7.2.2.3. capacité des conducteurs en faisceaux

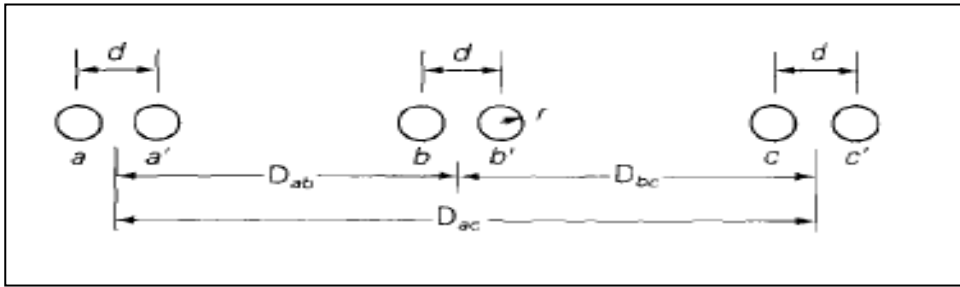


Fig. II.16 : Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux

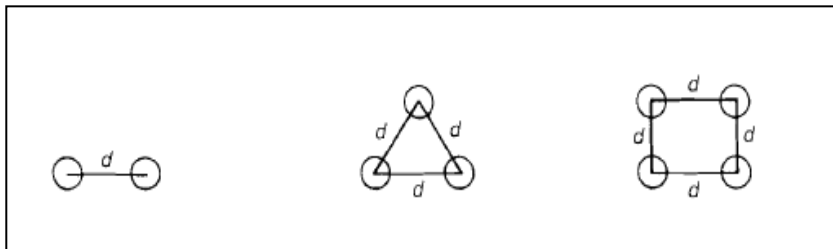


Fig. II.17 : La configuration des conducteurs en faisceaux

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[ q_a \ln \frac{D_{ba}}{\sqrt{rd}} + q_b \ln \frac{\sqrt{rd}}{D_{ab}} + q_c \ln \frac{D_{bc}}{D_{ac}} \right] \tag{II.42}$$

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{D_{sc}}} \text{ (F/m)} \tag{II.43}$$

Ou:

$$D_{sc} = \sqrt{rd} \text{ Pour deux conducteurs en faisceaux.}$$

$$D_{sc} = \sqrt[3]{rd^2} \text{ Pour trois conducteurs en faisceaux.}$$

$$D_{sc} = 1.091 \times \sqrt[4]{rd^3} \text{ Pour quatre conducteurs en faisceaux.}$$

II.7.2.2.4. Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée

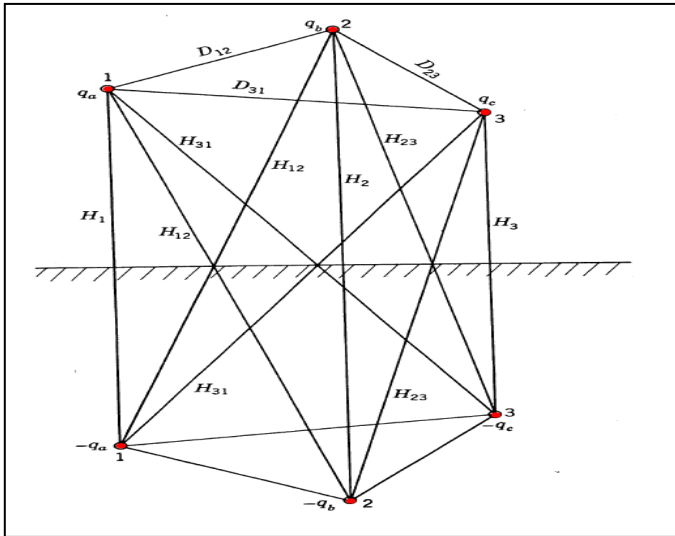


Fig. II.18 effet partielle à la terre

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{13}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \tag{II.44}$$

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la théorie de calcul des paramètres d’une ligne électrique aérienne.

La Connaissance de ces paramètres est très importantes pour l’analyse des réseaux électriques tel que La capacité a peu d’influence dans le cas de lignes courtes à basse tension, mais elle prend une grande importance dans le calcul des régimes de fonctionnement des lignes à haute tension de grande longueur. La conductance latérale due aux pertes d’énergie (par effet couronne) dans l’isolement qui entoure les conducteurs est négligeable. Elle peut être très appréciable dans certains cas.

La branche transversale (résistance et inductance) influe sur la chute de tension dans la ligne, tel qu’une résistance importante induit des pertes par effet joule.

### Introduction

Selon la longueur de la ligne, on distingue trois types de lignes ; les lignes courtes, moyennes et longues ; la modélisation de toutes ces lignes exigent une précision dans les calculs, doit tenir compte du fait que leurs paramètres ne sont pas regroupés, mais plutôt repartis uniformément le long de chaque ligne.

Les lignes de longueurs courtes et moyennes peuvent être représentées par des paramètres concentrés et celles dites longues sont nécessairement représentées par des paramètres repartis. Leurs limites de longueur qui seront données dans la suite concernent les réseaux dont la fréquence est de 50 Hz.

#### III.1. Modélisation des lignes aériennes [4]

Une ligne électrique peut être considérée comme une succession de circuits dont les paramètres sont uniformément répartis sur toute sa longueur. Ces circuits se composent d'une infinité d'éléments identiques tels que, résistances et inductances linéiques dans le sens longitudinal et des capacités linéiques dans le sens transversal.

Le fonctionnement de la ligne bifilaire par unité de longueur est modélisé par un tronçon de ligne où la tension  $V_S$  et le courant  $I_S$  d'entrée (source) sont reliés à la tension  $V_R$  et le courant  $I_R$  de sortie (récepteur) à travers les paramètres d'un quadripôle  $A, B, C$  et  $D$ , tel que :

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

Ou bien, sous la forme matricielle,

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{III.2})$$

$A, B, C$  et  $D$  sont les paramètres qui dépendent des constantes de la ligne de transmission  $R, L, C$  et  $G$ . Les paramètres  $ABCD$  sont, en général, des nombres complexes.  $A$  et  $D$  sont sans dimensions.  $B$  a l'unité en Ohm et  $C$  a l'unité en Siemens. Dans ce qui suit, nous allons identifier les paramètres  $A, B, C$  et  $D$ .

Pour éviter la confusion entre l'impédance série totale et l'impédance série par unité de longueur, la notation suivante est employée :



$\bar{Z} = \gamma + j\omega.L \left(\frac{\Omega}{m}\right)$ , Impédance série par unité de longueur ;

$\bar{Y} = G + j\omega.C(S/m)$ , admittance shunt par unité de longueur ;

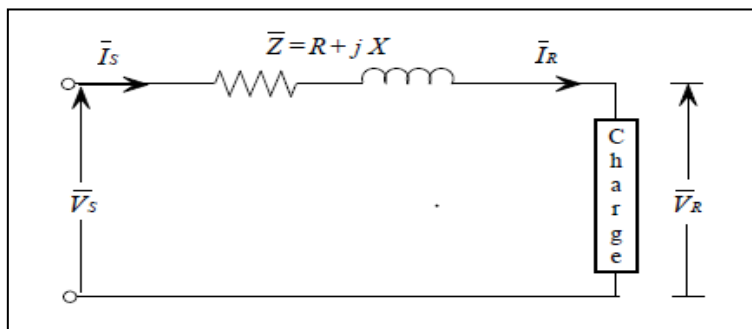
$\bar{Z} = \bar{z}.l(\Omega)$ , impédance série totale ;

$\bar{Y} = \bar{y}.l$ , admittance shunt totale;

$l(m)$ , longueur de la ligne.

### III.1.1. Ligne de transmission courte [4]

La capacité peut être ignorée sans beaucoup d'erreur si les lignes sont de moins de 80 kilomètres de long ou si le niveau de tension ne dépasse pas 66 kV. Le modèle de ligne courte par phase est illustré par la (figure III.1).



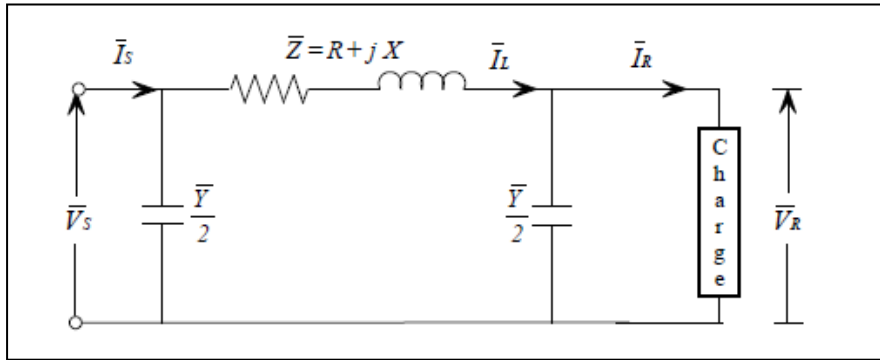
**Fig. III.1** : Modèle d'une ligne courte

C'est un circuit série simple. Le rapport entre les courants et les tensions de chaque extrémité de la ligne (entre la source et la charge) peut être écrit comme:

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

### III.1.2. Ligne de transmission moyenne [4]

Pour les lignes de longueurs comprises entre 80 km et 250 km sont considérées comme des lignes de longueurs moyennes, le courant de ligne devient appréciable et la capacité shunt doit être considérée. La moitié de la capacité shunt peut être considérée à chaque extrémité de la ligne. Ceci est désigné sous le nom du modèle nominal en  $\Pi$ .



**Fig. III.2 :** Ligne de longueur moyenne, représentation en  $\Pi$

La tension et le courant à l'extrémité source sont obtenus comme suit:

A partir de la (Figure III.2), le courant dans l'impédance série désigné par  $\bar{I}_L$ , est

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_R \tag{III.4}$$

La tension à la source est exprimée comme:

$$\bar{V}_s = \bar{V}_R + \bar{Z} \bar{I}_L \tag{III.5}$$

Des équations (III.4) et (III.5), on trouve,

$$\bar{V}_s = \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z} \bar{I}_R \tag{III.6}$$

Le courant à la source est,

$$\bar{I}_s = \bar{I}_L + \frac{\bar{Y}}{2} \bar{V}_s \tag{III.7}$$

Des équations (III.4), (III.6) et (III.7), on trouve,

$$\bar{I}_s = \bar{Y} \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{4}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \bar{I}_R \tag{III.8}$$

Les équations (III.6) et (III.7) peuvent être écrites sous la forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_s \\ \bar{I}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) & \bar{Z} \\ \bar{Y} \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{4}\right) & \left(1 + \frac{\bar{Y} \cdot \bar{Z}}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix} \tag{III.9}$$

III.1.3. Ligne de transmission longue [4]

Pour les longueurs de lignes courtes et moyennes, les modèles ont été obtenus en supposant que les paramètres de la ligne sont des valeurs exactes. Dans le cas où la longueur de la ligne est supérieure à 250km, pour des solutions plus précises, les paramètres doivent être donnés comme une distribution uniformément répartie le long de la longueur. Dans ce cas, les tensions et les courants varient d'un point à l'autre sur la ligne. La (figure III.3) illustre un schéma unifilaire en  $\Pi$  d'une ligne par unité de longueur.

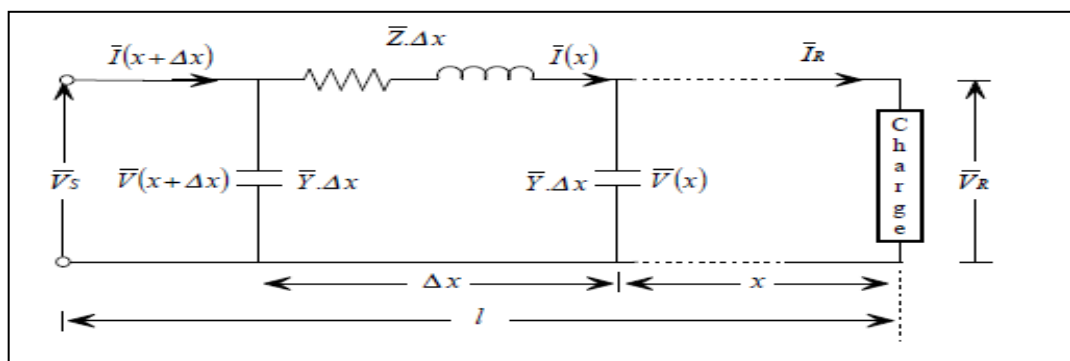


Fig. III.3 : Schéma unifilaire d'une ligne longue avec les paramètres par unité de longueur

Les expressions de la tension et le courant en un point  $x$  de la ligne sont :

$$\begin{cases} \bar{V}(x) = \cosh(\bar{\gamma}x)\bar{V}_R + \bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}x)\bar{I}_R \\ \bar{I}(x) = \frac{1}{\bar{Z}} \sinh(\bar{\gamma}x)\bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}x)\bar{I}_R \end{cases} \quad (III.10)$$

Cependant, quand  $x = l$ , l'expression (III.10) permet de trouver les grandeurs courant et tension à la source, avec  $\bar{V}_s = \bar{V}(l)$  et  $\bar{I}_s = \bar{I}(l)$ , le résultat est:

$$\begin{cases} \bar{V}(l) = \cosh(\bar{\gamma}l)\bar{V}_R + \bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}l)\bar{I}_R \\ \bar{I}(l) = \frac{1}{\bar{Z}} \sinh(\bar{\gamma}l)\bar{V}_R + \cosh(\bar{\gamma}l)\bar{I}_R \end{cases} \quad (III.11)$$

Cependant, les constantes ABCD sont:

$$\bar{A} = \cosh(\bar{\gamma}l), \bar{B} = \bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}l), \bar{C} = \frac{1}{\bar{Z}} \sinh(\bar{\gamma}l), \bar{D} = \cosh(\bar{\gamma}l)$$

C'est possible maintenant de trouver le modèle équivalent en  $\Pi$  très précis pour une ligne de transmission longue. D'une manière similaire aux expressions (III.6) et (III.8) obtenues pour modèle équivalent en  $\Pi$ , nous avons,

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \left(1 + \frac{\bar{Y}'\bar{Z}'}{2}\right)\bar{V}_R + \bar{Z}'\bar{I}_R \\ \bar{I}_s = \bar{Y}'\left(1 + \frac{\bar{Y}'\bar{Z}'}{4}\right)\bar{V}_R + \left(1 + \frac{\bar{Y}'\bar{Z}'}{2}\right)\bar{I}_R \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

Maintenant, en comparant (III.14) avec (III.13) et utilisant l'expression :

$$\tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) = \frac{\cosh(\bar{\gamma}l)-1}{\sinh(\bar{\gamma}l)}$$

Les paramètres du modèle équivalent en  $\Pi$  sont obtenus comme:

$$\bar{Z}' = \bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}l) = \frac{\bar{Z}_c \sinh(\bar{\gamma}l)}{\bar{\gamma}l} \quad (\text{III.13})$$

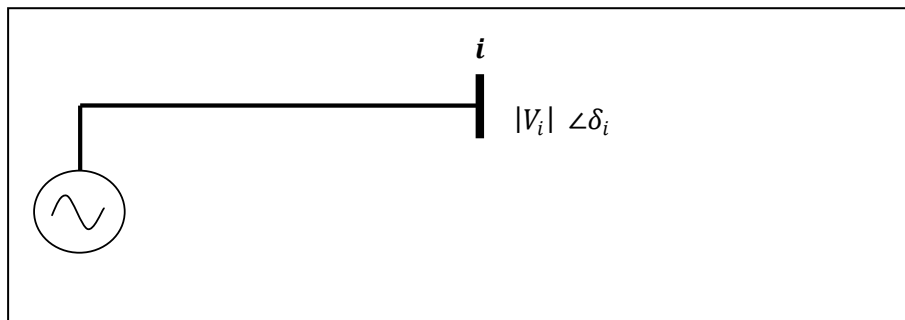
$$\frac{\bar{Y}'}{2} = \frac{1}{\bar{Z}_c} \tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right) = \frac{\bar{Y}}{2} \frac{\tanh\left(\frac{\bar{\gamma}l}{2}\right)}{\frac{\bar{\gamma}l}{2}} \quad (\text{III.14})$$

### III.2. Modélisation des générateurs [4]

Les générateurs sont des éléments du réseau capable de fournir de la puissance active au système (figure III.4). Ils peuvent aussi produire, voire consommer, de la puissance réactive de manière à maintenir un certain niveau de tension. Les limites de production des générateurs sont définies par :

$$P_{Gi,min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,max}$$

$$Q_{Gi,min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi,max}$$



**Fig. III.4:** Modèle du générateur

Avec,

$P_{Gi}$  : Puissance active délivrée par le générateur au nœud  $i$  ;

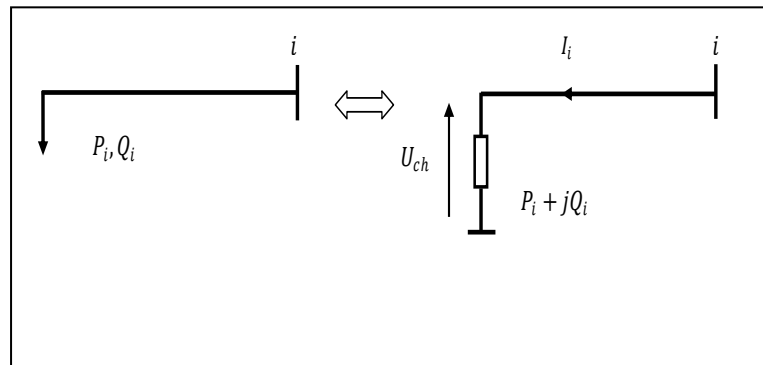
$Q_{Gi}$  : Puissance réactive délivrée par le générateur au nœud  $i$  ;

$V_i$  : Tension au nœud  $i$  ;

$\delta_i$  : Angle de phase de la tension au nœud  $i$ .

### III.3. Modélisation des charges [4]

Dans les calculs de répartition de puissance, on représente les charges par des consommations de puissances  $P_i$  et  $Q_i$  (figure III.5), que l'on peut considérer comme constantes en régime normal car la fréquence  $f$  et la tension  $U_{ch}$  aux bornes de la charge sont constantes.



**Fig. III.5:** Modélisation d'une charge

La puissance apparente aux bornes de la charge est donnée par :

$$\bar{S}_{ich} = P_i + jQ_i \quad (\text{III.15})$$

Avec,

$\bar{S}_{ich}$  : Puissance apparente complexe au nœud (i).

$P_i$  : Puissance active demandée par la charge.

$Q_i$  : Puissance réactive (elle peut être positive ou négative selon que la charge est de nature inductive, respectivement, capacitive).

$U_{ch}$  : Tension aux bornes de la charge.

### III.4. Modélisation du transformateur [4]

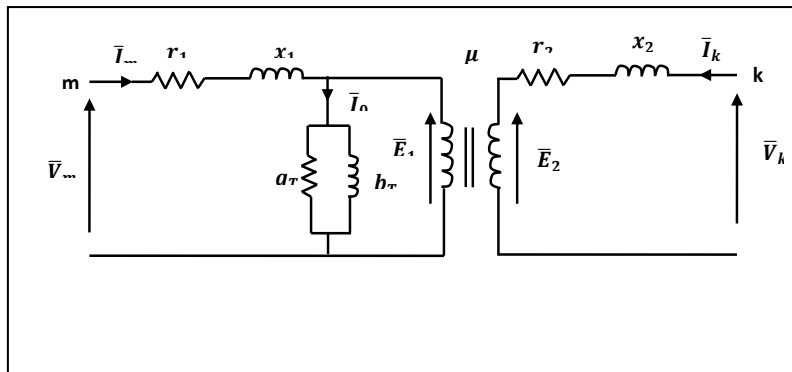
Les transformateurs de puissance sont des éléments importants du réseau et ont contribué au développement des capacités de transport des réseaux électriques. Les différentes parties du réseau électrique requièrent différents niveaux de tension. Pour tirer profit du meilleur rendement. Il paraît impératif de disposer d'un outil capable de changer le niveau de tension (et l'intensité du courant) et cela à des niveaux de puissances élevés.

Le transformateur de puissance, tel qu'il est connu actuellement, répond à ce besoin avec des rendements approchant l'unité.

Il existe plusieurs types de transformateurs. Deux modèles des plus usités sont représentés dans ce qui suit :

**a. Transformateur à gradins**

Un transformateur à gradins peut être modélisé comme suit :



**Fig.III.6 : Modèle d'un transformateur**

Avec,

$\bar{V}_m, \bar{I}_m$  : Tension et courant respectivement au primaire du transformateur ;

$\bar{V}_k, \bar{I}_k$  : Tension et courant respectivement au secondaire du transformateur ;

$\bar{E}_1, \bar{E}_2$  : F.e.m primaire et secondaire respectivement ;

$\bar{Z}_1 = r_1 + jx_1$  : Impédance de l'enroulement primaire ;

$\bar{Z}_2 = r_2 + jx_2$  : Impédance de l'enroulement secondaire ;

$r_1, r_2$  : Résistance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement ;

$x_1, x_2$  : Réactance de l'enroulement primaire et secondaire respectivement ;

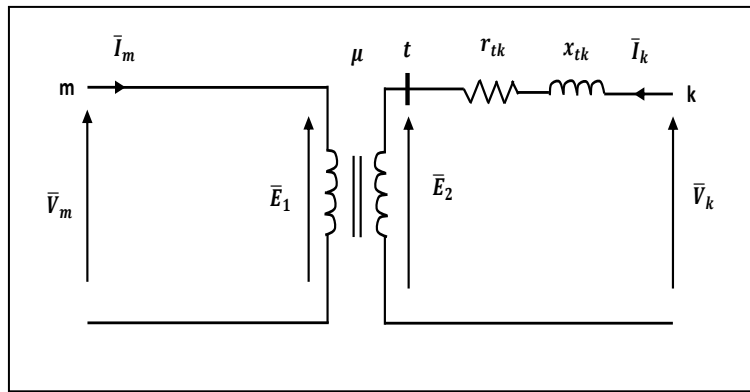
$\bar{Y}_T = g_T + jb_T$  : Admittance shunt;

$g_T, b_T$  : Conductance et susceptance shunt ;

$I_0$  : Courant qui traverse la branche magnétisante ;

$\mu$  : Rapport de transformation.

En négligeant l'effet de la branche magnétisante et en ramenant l'impédance de l'enroulement primaire au secondaire on aura le schéma approximatif suivant :



**Fig. III.7 :** Modèle approximatif du transformateur

Avec,

$$\bar{z}_{tk} = r_{tk} + jx_{tk} \tag{III.16}$$

$\bar{z}_{tk}$  : Impédance du transformateur ramenée au secondaire.

$r_{tk}$ ,  $x_{tk}$  : Résistance et réactance, respectivement, du transformateur ramenée au secondaire.

De la (figure III.7), on peut écrire :

$$\mu = \frac{\bar{E}_1}{\bar{E}_2} = -\frac{\bar{I}_k}{\bar{I}_m} \tag{III.17}$$

$$\bar{V}_m = \bar{E}_1 \tag{III.18}$$

$$\bar{V}_k = \bar{E}_2 + (r_{tk} + jx_{tk})\bar{I}_k \tag{III.19}$$

Les équations (III.17), (III.18) et (III.19) donnent les expressions des courants comme suit:

$$\begin{cases} \bar{I}_m = \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} \bar{V}_m + \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_k \\ \bar{I}_k = \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \bar{V}_m + \bar{y}_{tk} \bar{V}_k \end{cases} \tag{III.20}$$

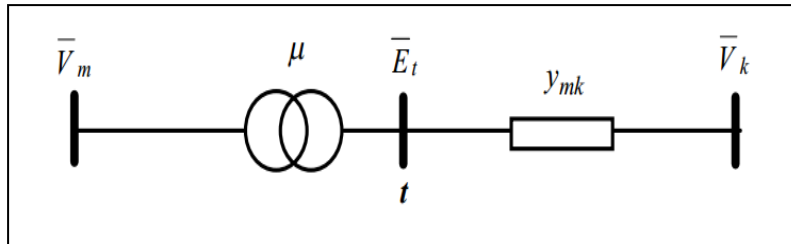
Avec,

$$\bar{y}_{tk} = \frac{1}{\bar{z}_{tk}} \tag{III.21}$$

D'où la matrice admittance nodale du transformateur est :

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{tk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} \\ \frac{-\bar{y}_{tk}}{\mu} & \bar{y}_{tk} \end{pmatrix} \quad (\text{III.22})$$

**b. Transformateur déphaseur**



**Fig. III.8 :** Modèle d'un transformateur déphaseur

Etant donné que le transformateur est idéal, on aura :

$$\bar{S}_m = \bar{S}_t \quad (\text{III.23})$$

Donc :

$$\bar{E}_m \bar{I}_m^* = \bar{E}_t \bar{I}_t^*$$

$$\text{Alors, } \bar{I}_m = \frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m} \bar{I}_t$$

Avec

$$\bar{I}_t = -\bar{I}_k, \text{ on aura } \bar{I}_m = -\frac{\bar{E}_t^*}{\bar{E}_m} \bar{I}_k$$

$$\text{Sachant que, } \bar{\mu} = \frac{\bar{E}_m}{\bar{E}_t} \text{ et } \bar{E}_m = \bar{V}_m$$

alors :

$$\bar{I}_k = (\bar{V}_k - \bar{E}_t) \bar{y}_{mk} = \left( \bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} \quad (\text{III.24})$$

$$\left( \bar{E}_t - \frac{\bar{V}_m}{\bar{\mu}} \right) \bar{y}_{mk} = -\frac{\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} \bar{V}_m + \bar{y}_{mk} \bar{V}_k \quad (\text{III.25})$$



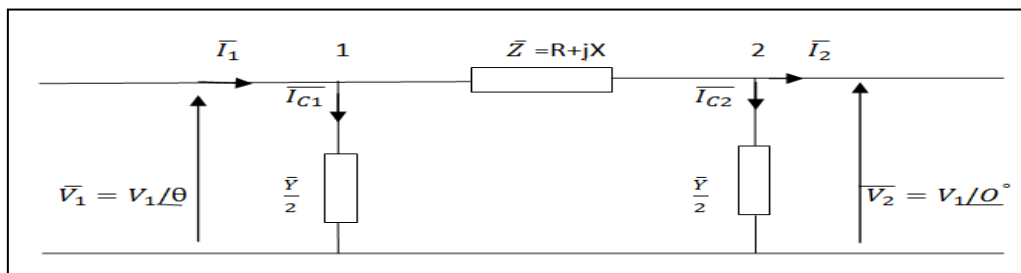
Finalement on obtient:

$$\begin{bmatrix} \bar{I}_m \\ \bar{I}_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(\frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2}\right) & \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*}\right) \\ \left(\frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}}\right) & \bar{y}_{mk} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_m \\ \bar{V}_k \end{bmatrix} \quad (\text{III.26})$$

D'où, la matrice admittance du transformateur déphaseur est:

$$\bar{Y}_{TR} = \begin{pmatrix} \frac{\bar{y}_{mk}}{\mu^2} & \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}^*} \\ \frac{-\bar{y}_{mk}}{\bar{\mu}} & \bar{y}_{mk} \end{pmatrix} \quad (\text{III.27})$$

### III.5. Application aux lignes triphasées usuelles



**Fig. III.9 :** modèle équivalent de la ligne en  $\Pi$

Le courant à l'entrée de la ligne est :  $\bar{I}_1 = I_1 \angle -\varphi_1 \varphi_1(\bar{I}_1, \bar{V}_1)$

Le courant à la sortie de la ligne est :  $\bar{I}_2 = I_2 \angle -\varphi_2 \varphi_2(\bar{I}_2, \bar{V}_2)$

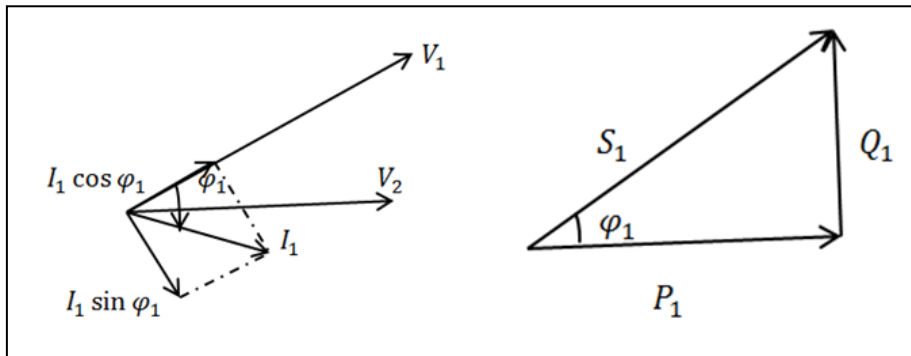
Le courant passant dans la ligne est :  $\bar{I}$

L'impédance de la ligne est :  $\bar{Z} = R + jL\omega = R + jX \quad Z \angle \beta \quad [\Omega]$

L'admittance de la ligne est :  $\bar{Y} = jC\omega = Y \angle 90^\circ \quad [S] \quad \text{ou} \quad [\Omega^{-1}]$

**III.5.1. Equations des puissances à l'entrée de la ligne (la source) [18]**

Les formules correspondant à la puissance apparente ( $S_1$ ), à la puissance active ( $P_1$ ) et à la puissance réactive ( $Q_1$ ), à la source de la ligne peuvent être représentées géométriquement par le triangle des puissances à la figure (III.10).



**Fig. III.10 :** diagramme vectoriel des tensions et le triangle des puissances

La puissance active

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (\text{W}) \quad \text{par phase}$$

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 \quad (\text{W}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.28})$$

La puissance réactive

$$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par phase}$$

$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.29})$$

La puissance apparente

$$\bar{s}_1 = \bar{V}_1 \cdot \bar{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (\text{VA}) \quad \text{par phase}$$

$$\bar{s}_1 = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_1 \cdot \bar{I}_1^* = P_1 + jQ_1 \quad (\text{VA}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.30})$$

**III.5.2. Equations de puissances aux bornes de la charge [18]**

a) La puissance active

$$P_1 = V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (\text{W}) \quad \text{par phase}$$

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 \quad (\text{W}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.31})$$

b) La puissance réactive

$$Q_2 = V_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par phase}$$

$$Q_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.32})$$

c) La puissance apparente

$$\bar{s}_2 = \bar{V}_2 \cdot \bar{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (\text{VA}) \quad \text{par phase}$$

$$\bar{s}_2 = \sqrt{3} \cdot \bar{U}_2 \cdot \bar{I}_2^* = P_2 + jQ_2 \quad (\text{VA}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.33})$$

### III.6. Les puissances dans la ligne [18]

✓ **Les pertes puissance active**

$$\Delta p = RI^2 \quad (\text{W}) \quad \text{par phase}$$

$$\Delta p = 3RI^2 \quad (\text{W}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.34})$$

✓ **La puissance réactive consommée par la ligne**

$$Q = L\omega I^2 = X_l I^2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par phase}$$

$$Q = 3L\omega I^2 = 3X_l I^2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.35})$$

✓ **La puissance réactive fournie par un condensateur de capacité C soumis à une tension v**

$$Q_c = X_c I_c^2 = \frac{1}{C\omega} (C\omega V)^2 = C\omega V^2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{Par phase}$$

$$Q_c = 3C\omega V^2 = C\omega U^2 \quad (\text{VAR}) \quad \text{Par trois phases} \quad (\text{III.36})$$

✓ **La puissance réactive fournie par la ligne**

$$Q = Q_{c1} + Q_{c2} = \frac{Y}{2} V_1^2 + \frac{Y}{2} V_2^2 = \frac{C\omega}{2} (V_1^2 + V_2^2) \quad (\text{VAR}) \quad \text{par phase}$$

$$Q = Q_{c1} + Q_{c2} = \frac{Y}{2} U_1^2 + \frac{Y}{2} U_2^2 = \frac{C\omega}{2} (U_1^2 + U_2^2) \quad (\text{VAR}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.37})$$

✓ **Les pertes de puissance réactive dans la ligne**

$$\Delta Q = L\omega I^2 - \frac{C\omega}{2} (V_1^2 + V_2^2) \quad (\text{VAR}) \quad \text{Par phase}$$

$$\Delta Q = 3X_l I^2 - \frac{C\omega}{2} (U_1^2 + U_2^2) \quad (\text{VAR}) \quad \text{par trois phases} \quad (\text{III.38})$$

✓ **Le rendement de la ligne**

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

$$\eta\% = \frac{P_2}{P_1}\% = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P}\% \quad (\text{III.39})$$

### III.7. La chute de tension dans la ligne [19]

Pour diminuer la chute de tension produite dans une ligne, nous devons penser à diminuer l'impédance de la ligne. Pour ce faire, la résistance de la ligne peut être réduite en installant une ligne plus lourde avec des conducteurs plus gros ou par un arrangement de conducteurs (solution adoptée en pratique). Cependant, cela doit être rentable par rapport à l'économie réalisée par la diminution de la chute de tension dans la ligne. Aussi, nous savons que la réactance inductive de la ligne est proportionnelle à l'inductance des conducteurs. Alors en diminuant l'espacement entre les conducteurs, nous nous trouvons par le fait même à diminuer la réactance inductive de la ligne. Une fois que la section des conducteurs est choisie et que l'arrangement des conducteurs est déterminé, il nous reste à tenir compte de l'effet de la charge sur la chute de tension produite dans la ligne.

Nous savons qu'une charge qui possède un facteur de puissance en arrière augmente la chute de tension dans la ligne. Pour une telle charge, nous proposons sans détails les techniques employées pour diminuer cette chute de tension et, par le fait même, améliorer l'exploitation de la ligne.

Les équations régissant le fonctionnement du modèle en  $\Pi$  de la ligne sont :

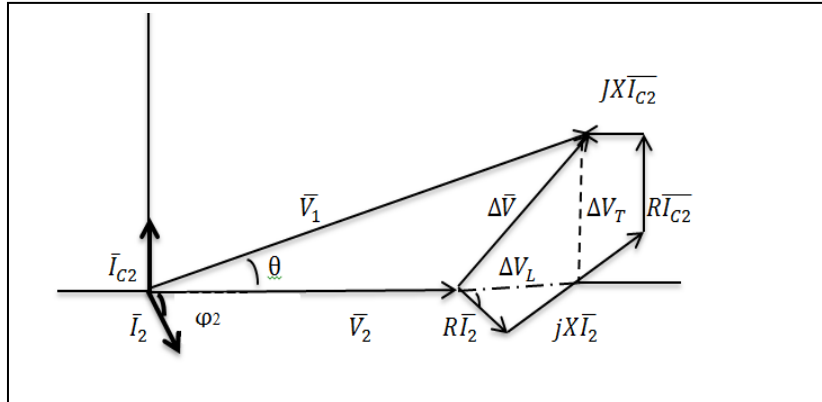
$$\bar{I}_1 = \bar{I} + \bar{I}_{C1} = \bar{I}_2 + \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2} \quad \text{avec} \quad \bar{I} = \bar{I}_2 + \bar{I}_{C2}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z}\bar{I}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z}(\bar{I}_2 + \bar{I}_{C2})$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + \bar{Z}\bar{I}_2 + \bar{Z}\bar{I}_{C2}$$

$$\bar{V}_1 = \bar{V}_2 + R\bar{I}_2 + jX\bar{I}_2 + R\bar{I}_{C2} + jX\bar{I}_{C2}$$



**Fig. III.11** : Diagramme vectoriel des tensions et des courants

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 à la réception (la charge) ( $V_1$ ). A l'aide de ce diagramme vectoriel, nous déterminons la chute de tension dans la ligne.

$$\Delta\bar{V} = \Delta V_L + j\Delta V_T \tag{III.40}$$

En faisant les projections sur les axes des abscisses et des ordonnées

$$\Delta V_L = R \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + X \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 - X I_{C2}$$

$$\Delta V_T = -R \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 + X \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + R I_{C2}$$

**a. La chute de tension composée**

$$\Delta\bar{U} = \Delta U_L + j\Delta U_T \tag{III.41}$$

$$\Delta U_L = \sqrt{3} R \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{3} X \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 - \sqrt{3} X I_{C2}$$

$$\Delta U_T = -\sqrt{3} R \cdot I_2 \cdot \sin \varphi_2 + \sqrt{3} X \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2 + \sqrt{3} R I_{C2}$$

Sachant que :

$$I_{C2} = \frac{Y}{2} V_2 = \frac{C\omega}{2} \left( \frac{U_2}{\sqrt{3}} \right)$$

$$Q_{C2} = \frac{C\omega}{2} U_2^2$$

$$\Delta U_L = \frac{RP_2 + X(Q_2 - Q_{C2})}{U_2} \tag{III.42}$$

$$\Delta U_T = \frac{XP_2 + X(Q_2 - Q_{C2})}{U_2} \tag{III.43}$$

La tension à la source est :

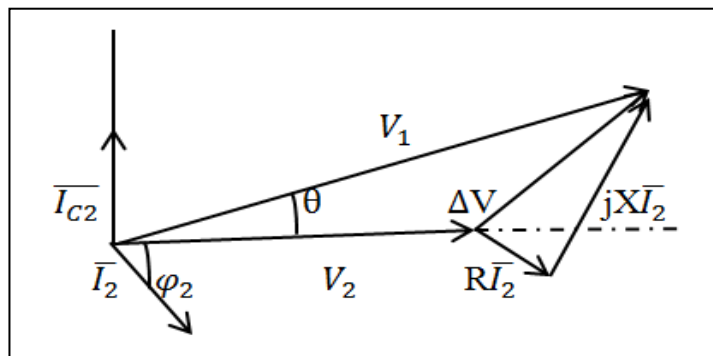
$$\bar{U}_1 = (U_2 + \Delta U_L) + j\Delta U_T \Rightarrow U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_L)^2 + (\Delta U_T)^2} \tag{III.44}$$

**b. L'angle de transport de la ligne**

$$\theta = \arctg \frac{\Delta U_T}{U_2 + \Delta U_L} \tag{III.45}$$

**c. La chute de tension de la ligne courte**

Pour une ligne courte on néglige la branche transversale (l'effet capacitif dans la ligne)  $C=0$  ;  $Q_{C2} = 0$  , donc le diagramme vectoriel sera simplifié sera comme l'indique la figure (III.12).



**Fig. III.12** : diagramme vectoriel d'une ligne courte

La chute de tension est donnée par les formules suivantes :

$$\Delta U_T = \frac{RP_2 + XQ_2}{U_2} \quad (III.46)$$

$$\Delta U_T = \frac{XP_2 - RQ_2}{U_2} \quad (III.47)$$

### III.8. La régulation de la tension [20]

Pour une tension demandée à la charge, il peut arriver que la tension (tension déterminée par la relation) que doit générer la source soit très élevée (dépendant de la charge). Ceci a pour conséquence de causer une chute de tension élevée dans la ligne. Il est préférable que cette chute de tension ne varie pas plus que +10% de la tension normale d'opération pour que l'isolement de l'équipement dans le réseau ne soit pas soumis à des tensions excessives.

Les causes principales de la chute de tension le long de la ligne sont l'impédance de la ligne et une charge ayant un facteur de puissance en arrière.

Nous définissons la régulation de tension d'une ligne comme suit:

$$R\% = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \cdot 100\% = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100\% \quad (III.48)$$

### Conclusion

L'objectif de ce chapitre est de modéliser les différents types de lignes de transmissions et certains éléments du réseau électrique, le générateur, la charge et le transformateur.

Le transit de la puissance de la ligne dépend de la tension, le courant et le facteur de puissance à la source et à la charge. Tel que la tension en un point du réseau dépend des forces électromotrices des générateurs et de l'impédance de la ligne et la chute de tension des différents éléments en série dans la ligne.

## Introduction

Le calcul des paramètres et des caractéristiques des lignes électriques en élaborant des logiciels est une chose très importante pour l'analyse des réseaux électriques. Plusieurs travaux se sont intéressés à ce sujet.

Le but de notre travail est la réalisation d'un ensemble de programmes sous MATLAB pour le calcul des paramètres des lignes électriques triphasées et de leurs caractéristiques pour les différents types de lignes (longue, moyenne courte). L'intérêt de notre travail est de faciliter et réduire le temps de calcul ainsi que la précision.

Notre travail est fait en deux étapes. Dans la première étape on expliquera les algorithmes des programmes et la deuxième étape on fera des exemples d'application en utilisant ces programmes.

### IV.1. calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

#### IV.1.1. Algorithmes de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

Dans le but de calculer des paramètres linéiques d'une ligne électrique triphasée par ordinateur sous Matlab ; on a abordé l'algorithme du déroulement du programme suivant :

Le calcul de la résistance de la ligne à courant continu a une température de 20°C

$$r = \rho_{20} \cdot l / s \quad (\Omega/\text{km}) ;$$

Calcul de l'effet de spirilage sur les conducteurs  $R = k \cdot r$  ;

$$\text{Calcul du coefficient de kelvin : } q = \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot f \cdot 10^{-5}}{\rho_{20}}}$$

$$q < 1 \Rightarrow r_a = R ;$$

$$\text{Calcul de l'effet de température : } R_T = R \cdot \frac{T + t_2}{T + t_1}$$

Calcul de l'inductance de la ligne (basé sur le RMG tirés des tableaux donnés par les fabricants).

$$\text{Calcul de la distance moyen géométrique : } D_{\text{éq}} = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}$$

$$\text{Calcul du rayon moyen géométrique : } g_{11} = u \cdot \sqrt{s}$$

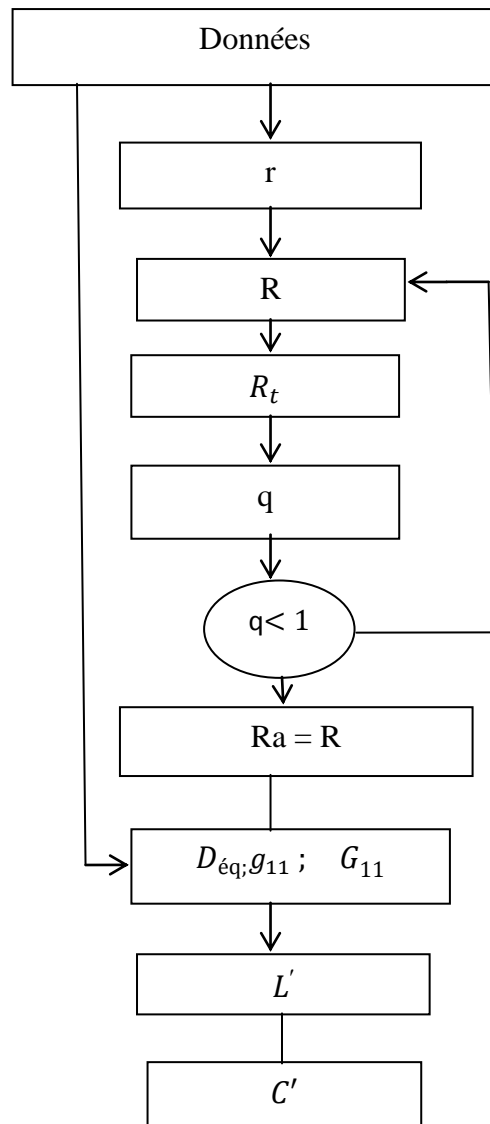
u : voir le tableau II-2.

$$\text{Calcul du Rayon moyen géométrique du faisceau : } G_{11} = \sqrt[n]{n \cdot g_{11} \cdot r_T^{n-1}}$$

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{\text{éq}}}{G_{11}}$$



Calcul de la capacité de la ligne :  $C = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \log \frac{D_{\text{eq}}}{G_{11}}$



**Fig. IV.1 :** organigramme de calcul des paramètres de la ligne

#### IV.1. 2. Application a une ligne contenant un conducteur par phase (n=1)

On va déterminer les résistances linéiques, en courant continue et en courant alternatif en  $\Omega/\text{km}$  des conducteurs de phase respectivement à  $20^\circ\text{C}$  et à  $50^\circ\text{C}$ . Ensuite les autres paramètres linéiques ; inductance et capacité respectivement en  $\text{H}/\text{km}$  et  $\text{F}/\text{km}$ .

Soit une ligne de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans figure (IV.2) ci-dessous.

```

1 210 % s section du cable en mm^2
2 1 % l la longueur du cable km
3 35.9 % rau la resistivité du materiau mm^2/m à 20°C
4 1.02 % k le coeficean du spiralge du conducteur
5 50 % f la frequence de la ligne en Hz
6 228 % T la temperature du conducteur de la ligne °C
7 50 % t2 la température °C
8 2.75 %D12la distance entre le conducteur 1 et 2 en m
9 2.75 %D23la distance entre le conducteur 2 et 3 en m
10 7.75 %D13la distance entre le conducteur 1 et 3 en m
11 0.4982 % u coeficeant depend du nombre de brin du conducteur
12 1 % n nomber de conducteurs en faiscaux
13 1 % rt rayon du centre des conducteur en m
14
    
```

**Fig. IV.2 :** les données de la ligne contenant un conducteur par phase

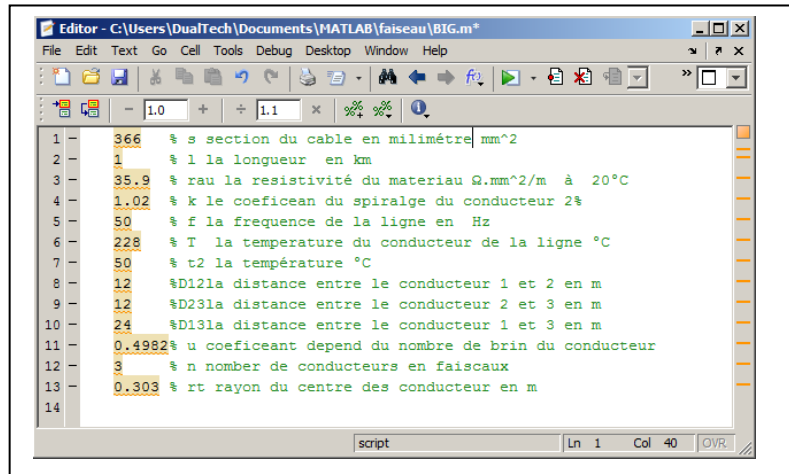
Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

**Tab. IV-1:** résultats de calcul des paramètres d’une ligne sans faisceau

Paramètres longitudinales		Paramètres transversales	
R (Ω/km)		L (H/km)	C (F/Km)
Résistance continue (20°C)	0.1710	0.0013	8.8433 × 10 <sup>-9</sup>
Effet spiralage (2%)	0.1744		
Effet température	0.1955		
Facteur de kelvin	0.2711		
Résistance alternatif	0.1744		

**IV.1.3. Application a une ligne a conducteur de phase en fiscaux de 3 cordes**

On va déterminer les mêmes paramètres que l’exemple précédent, mais avec une ligne triphasée symétrique disposition nappe horizontale, à conducteurs de phases en faisceaux de 3 cordes placées sur un triangle équilatéral de 40 cm de côté. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans figure (IV.3) ci-dessous.



**Fig. IV.3 :** les données de la ligne en faisceau

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

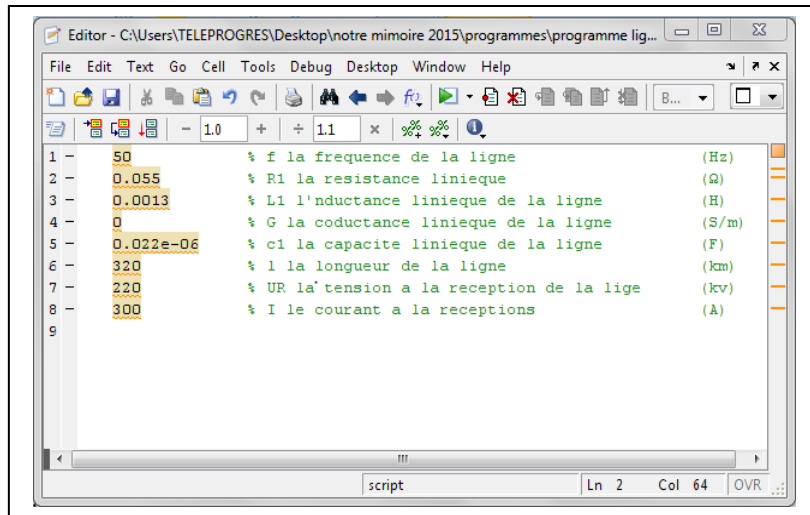
**Tab. IV-2:** résultats de calcul d’une ligne avec 3 cordes en faisceau.

Paramètres longitudinales		Paramètres transversales	
R (Ω/km)		L (H/km)	C (F/Km)
Résistance continue (20°C)	0.0981	9.3937 × 10 <sup>4</sup>	1.1839 × 10 <sup>-11</sup>
Effet spiralage (2%)	0.10		
Effet température	0.1122		
Facteur de kelvin	0.3579		
Résistance alternatif	0.10		

**IV.2. Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée**

**IV.2.1. Calcul des caractéristiques de la ligne longue**

On va déterminer les caractéristiques à la source d’une ligne longue de transport d’énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans figure (IV.4) ci-dessous.



**Fig. IV.4 :** les données de la ligne longue

**IV.2.1.1. Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue**

Dans le but de modéliser la ligne longue on a fait l’algorithme du déroulement du programme :

Calcul de coefficient de propagation  $\bar{\gamma} = \sqrt{\bar{Z}'\bar{Y}'}$  ;

Calcul des impédances et l’admittance de la ligne :

$$\bar{Z}_c = \sqrt{\frac{\bar{Z}'}{\bar{Y}'}}$$

$$\bar{Z} = \bar{Z}_c \cdot \sinh(\bar{\gamma}l)$$

$$\bar{Y} = \frac{\cosh \bar{\gamma}l - 1}{\bar{Z}}$$

Calcul des caractéristiques à la source :

$$\begin{cases} \bar{V}_s = \left(1 + \frac{\bar{Y}' \cdot \bar{Z}'}{2}\right) \bar{V}_R + \bar{Z}' \bar{I}_R \\ \bar{I}_s = \bar{Y} \left(1 + \frac{\bar{Y}' \cdot \bar{Z}'}{4}\right) \bar{V}_R + \left(1 + \frac{\bar{Y}' \cdot \bar{Z}'}{2}\right) \bar{I}_R \end{cases}$$

La puissance maximale transmise dans la ligne :

$$P_{max} = \frac{U_S U_R - U_R^2 \cos \beta}{U_R}$$

Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$n\% = \frac{P_R}{P_S} \%$$

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_S - V_R}{V_R} \cdot 100\% = \frac{U_S - U_R}{U_R} \cdot 100\%$$

Calcul de la puissance réactive fournit par la ligne :

$$Q_C = \frac{\bar{Y}}{2} U_R^2$$

Calcul de la chute de tension :

$$\Delta U_L = \frac{R P_2 + X(Q_2 - Q_{C2})}{U_2}$$

$$\Delta U_T = \frac{X P_R + X(Q_R - Q_{C2})}{U_R}$$

Calcul des pertes de puissance active et réactive :

$$\Delta P = 3 \cdot R I^2$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X_l I^2 - Y_p (U_S^2 + U_R^2)$$

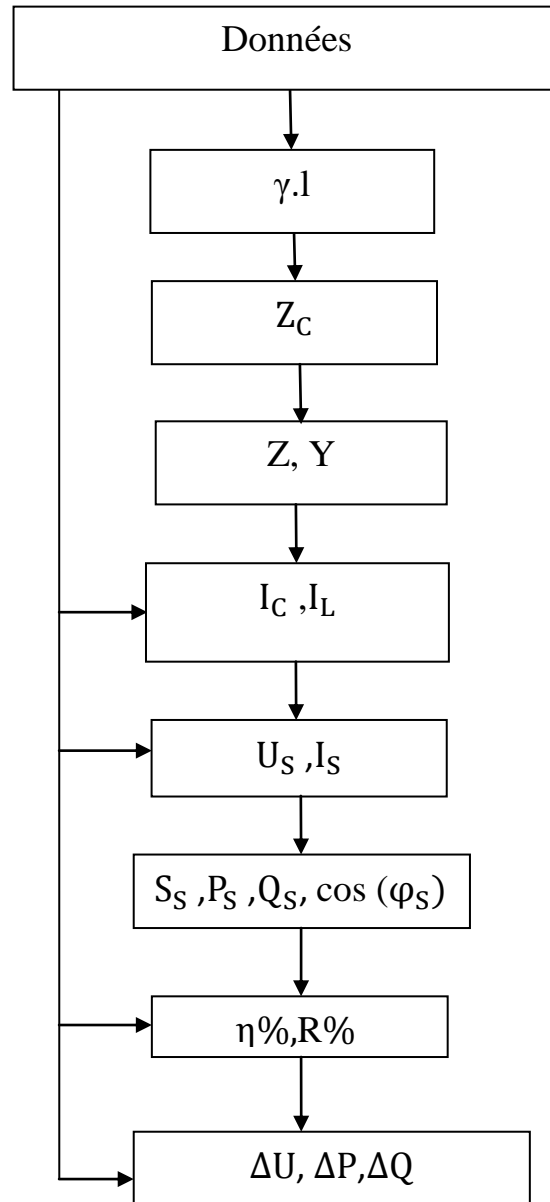


Fig. IV.5 : organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue

Les résultats de calculs sont présentés dans les tableaux suivants :

**Tab. IV-3:** caractéristiques linéiques de la ligne longue

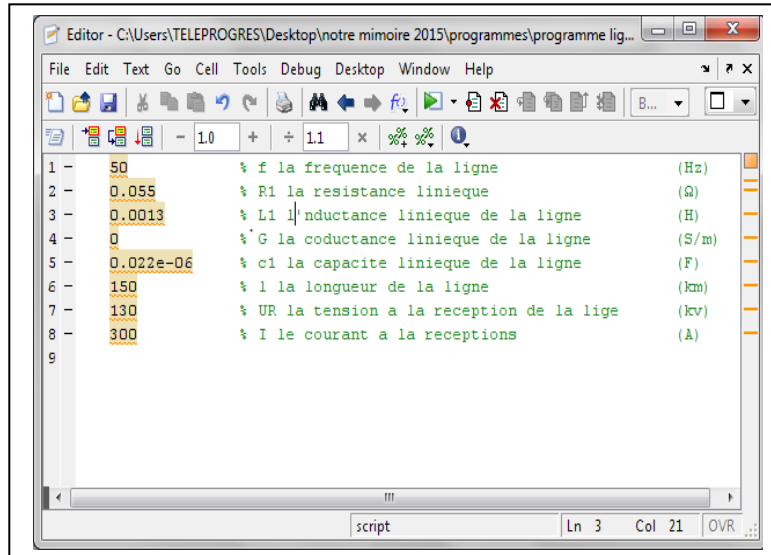
Impédance linéique $Z'$ ( $\Omega/\text{Km}$ )	$0.4121e^{i82.3301}$
Admittance linéique $Y'$ ( $\Omega^{-1}/\text{Km}$ )	$6.2832 \times 10^{-6}e^{i90}$
Coefficient de propagation $\gamma$	$0.0017e^{i86.1651}$
$\gamma l$	$0.5401e^{86.1651i}$
Impédance caractéristique $Z_c$ ( $\Omega$ )	$244.1809e^{-3.8349i}$
Impédance de la ligne $Z$ ( $\Omega$ )	$125.6096e^{i82.7092}$
Admittance de la ligne $Y$ ( $\Omega^{-1}$ )	$0.0011e^{i89.8077}$

**Tab. IV-4:** les caractéristiques de la ligne longue

$U_s$ (kV)	$239.8837e^{12.2508i}$
$I_s$ (A)	$238.5938e^{i29.4843}$
$S_s$ (MVA)	$99.133e^{-17.2334i}$
$P_s$ (MW)	94.683
$Q_s$ (MVAR)	29.370
$\cos\varphi_s$	0.9551
$\Delta U$ (kV)	$52.801e^{74.1652i}$
$P_{\max}$ (MW)	371.2472
$\Delta P$ (MW)	4.3039
$\Delta Q$ (MVAR)	22.102
n%	96.5878
R%	8.2889

#### IV.2.2. Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne

On va déterminer les caractéristiques à la source d'une ligne moyenne de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans figure (IV.6) ci-dessous.



**Fig. IV.6 :** les données de la ligne moyenne

**IV.2.2.1. Algorithme Calcul des caractéristiques de la ligne moyenne**

Dans le but de modéliser la ligne électrique de longueur moyenne on a fait l’algorithme du déroulement du programme, est le suivant :

Calcul de l’impédance de la ligne :  $\bar{Z}=(R+jX_l).l$  et l’admittance de la ligne :  $\frac{\bar{Y}}{2}=j\frac{Cw}{2}l$

Le courant passant la branche transversale :

$$\bar{I}_L = \bar{I}_R + \frac{\bar{Y}}{2}\bar{V}_R$$

Calcul de la chute de tension dans la ligne :

$$\bar{\Delta V}=\bar{Z}\bar{I}_L$$

Calcul des caractéristiques à la source :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 + \frac{\bar{Y}\bar{Z}}{2}\right) \bar{Z} \\ \bar{Y}\left(1 + \frac{\bar{Y}\bar{Z}}{4}\right)\left(1 + \frac{\bar{Y}\bar{Z}}{2}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}$$

La puissance apparente :

$$\bar{S}_1=\sqrt{3}\bar{U}_1\bar{I}_1^*$$

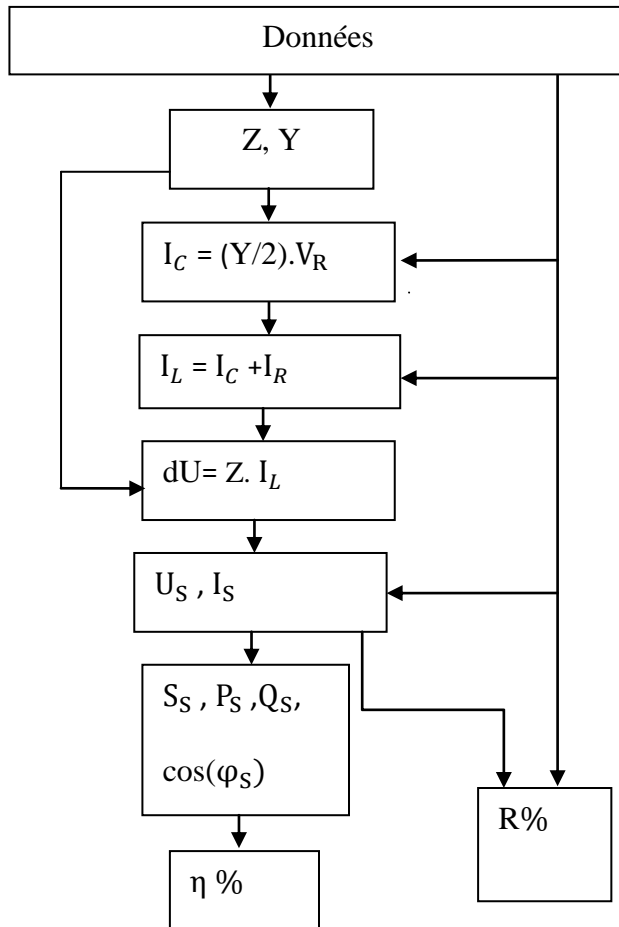


Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$n\% = \frac{P_R}{P_S} \%$$

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_S - V_R}{V_R} \cdot 100\% = \frac{U_S - U_R}{U_R} \cdot 100\%$$



**Fig. IV.7** : organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne moyenne

Les résultats de calcul sur la ligne moyenne sont présentés sur les tableaux suivants :

**Tab. IV-5** : caractéristiques de la ligne moyenne

$Z$ ( $\Omega$ )	$10.2752e^{36.5960i}$
$Y$ ( $\Omega^{-1}$ )	$10.3672 \times 10^{-4} e^{90i}$
$I_L$ (A)	$278.4017e^{-30.4510i}$
$I_{C1}$ (A)	$40.3807e^{90.2252i}$
$I_{C2}$ (A)	$38.9060e^{90i}$
$I_S$ (A)	$260.1288e^{-22.7785i}$
$U_S$ (kV)	$134.9276e^{0.2252i}$
$S_S$ (MVA)	$60.792e^{23.0037i}$
$P_S$ (MW)	55.958
$Q_S$ (MVAR)	23.757
$\cos(\varphi_S)$	0.9205
$\Delta U$ (kV)	$22.022e^{54.6310i}$
$\Delta P$ (MW)	0.63999
$\Delta Q$ (MVAR)	-8.2855
$P_{\max}$ (MW)	386.5670
R%	3.6520
n%	96.5719

### IV.2.3. Calcul des caractéristiques de la ligne courte

On va déterminer les caractéristiques à la source d'une ligne courte de transport d'énergie électrique, triphasée et symétrique. Les données des différents éléments de la ligne sont représentées dans figure (IV.8) ci-dessous.

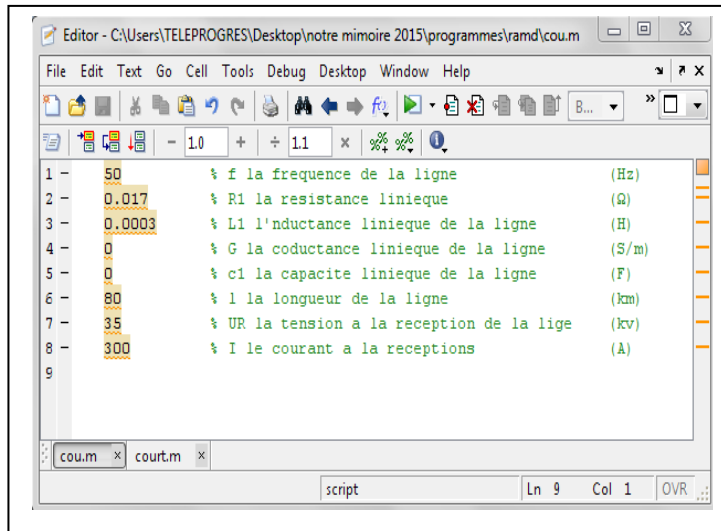


Fig. IV.8 : les données de la ligne courte

**IV.2.3.1. L’algorithme de calcul des caractéristiques de la ligne courte :**

Dans le but de modéliser la ligne électrique de longueur moyenne on a fait l’algorithme du déroulement du programme, est le suivant :

Calcul de l’impédance de la ligne :

$$\bar{Z}=(R+jX_l).l$$

Calcul de la chute de tension avec la formule suivant :

$$\bar{\Delta V}=\bar{Z}\bar{I}_L ; \quad \bar{I}_L=\bar{I}_R$$

Calcul de la tension et courant à la source :

$$\begin{bmatrix} \bar{V}_S \\ \bar{I}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \bar{Z} \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \bar{V}_R \\ \bar{I}_R \end{bmatrix}$$

La puissance maximale transmise dans la ligne :

$$P_{max} = \frac{U_S U_R - U_R^2 \cos \beta}{U_R}$$

Calcul du rendement avec la formule suivant :

$$n\% = \frac{P_2}{P_1} \%$$

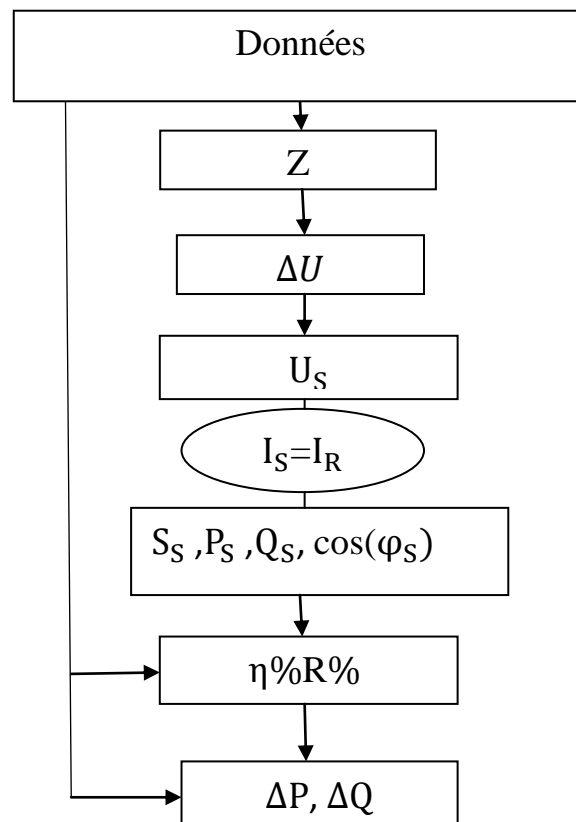
La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_1 - V_2}{V_2} \cdot 100\% = \frac{U_1 - U_2}{U_2} \cdot 100\%$$

Calcul des pertes de puissance active et réactive :

$$\Delta P = 3 \cdot R I^2$$

$$\Delta Q = 3 \cdot X_l I^2 - Q_c$$



**Fig. IV.9** : organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne courte

Les résultats de calcul sur la ligne court sont présentés sur le tableau suivant :

**Tab. IV-6** : caractéristiques de la ligne courte

$Z$ ( $\Omega$ )	$7.6615e^{79.7752i}$
$I_s$ (A)	$300e^{-36.8700i}$
$U_s$ (kV)	$38.0128e^{4.0885i}$
$S_s$ (MVA)	$19.752e^{40.9585i}$
$P_s$ (MW)	14.916
$Q_s$ (MVAR)	12.948
$\text{Cos}(\varphi_s)$	0.7552
$\Delta U$ (kV)	$3.9810 e^{42.9052i}$
$\Delta P$ (MW)	0.367200
$\Delta Q$ (MVAR)	2.0358
$P_{\text{max}}$ (MW)	145.2714
n%	97.5383
R%	7.9257

### Conclusion

A travers ce travail on a réalisé un ensemble de programmes sous Matlab pour le calcul des paramètres linéiques et des caractéristiques de la ligne électriques (tension, et courant à la source, chutes de tension, pertes de puissances actives et réactive, la puissance maximale transmise par la ligne le rendement de la ligne et la régulation de la tension.

On a fait des exemples d'application en utilisant ces programmes et on a constaté la rapidité et l'efficacité des calculs.

### Conclusion générale

L'objet de notre présent mémoire est le calcul des paramètres et les caractéristiques d'une ligne de transport de l'énergie électrique par ordinateur sous logiciel de programmation MATLAB; ce langage nous a permis de faire des programmes afin de faciliter à l'utilisateur de réduire le temps de calcul et le risque de l'erreur à chaque fois qu'il souhaite faire des calculs sur les lignes aériennes.

Notre travail a été réalisé en deux parties, tel que la première partie est consacrée à la réalisation des programmes de calcul des paramètres des lignes électriques dont on a fait deux applications sur la ligne formée par un seul conducteur par phase et la ligne dans laquelle les conducteurs de phase sont en faisceau.

La deuxième partie est consacrée au calcul des différentes caractéristiques des lignes (longue, moyenne et courte) en utilisant le modèle en  $\Pi$ . La procédure de calcul diffère d'une ligne à une autre.

Nous espérons que notre travail sera utile et que d'autres étudiants futurs le développeront d'avantage pour l'intégrer au logiciel Matlab.

## *Bibliographie*

---

### *Bibliographie*

- [1] **Luc.Lasen**, « Exercice et problèmes d'électrotechnique » .Paris, Dunod, 2005,256P.
- [2] **Labeled.Djamel**, « production décentralisée et couplage au réseau », thèse de doctorats d'états de l'Université de mentouri de Constantine, Anne 2008.
- [3] **SihemBouri** « Optimisation de la production et de la structure d'énergie électrique par les colonies de fourmis »Université Jilali Liabès - Doctorat 2007.
- [4] **N.Lahaçani AOZELLAG**, «Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens », Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 03 Novembre 2011.
- [5] **Olivier RICHARDOT**,«Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée», thèse doctorat de Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 10 octobre 2006
- [6] **G. RAMI**, «Contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution », Thèse de doctorat de l'INPG, 09 novembre 2006.
- [7] **Jean-Michel Delbarre** « poste a haute et très haute tension »technique de l'ingénieur D4 570-2.
- [8] **Georges VALENTIN, René FONDEUR, Bernard JOYEUX-BOUILLON & Jean-Claude TURPAIN** «Postes à moyenne tension» Techniques de l'Ingénieur D 4 600-7.
- [9] **J.L. LILIEN** «Transport et Distribution de l'énergie Electrique » cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore université de Liège 2006
- [10] **W.D Stevenson**, «Elements of Power System Analysis », 4th éd, McGraw-Hill Book 1982.
- [11] **B. Cova- RET T et D, G. Pirovano- Pec ; S. Meregalli-PeC**« Audit des alternatives a la réalisation d'une ligne a très haute tension entre le cotentin et le Maine »8 décembre 2005.
- [12] **M. ADEL Kara** « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué »UNIVERSITE de SETIF1UFAS (ALGERIE) *Soutenu le 18/12/2013.*
- [13] **Pierre HAUTEFEUILLE & Yves PROCHERON** « Lignes aériennes » Techniques de l'Ingénieur D640a\_6\_1973.
- [14] **Claude Gary** «*Effet couronne en tension alternatif*» Techniques de l'Ingénieur D 640-3.
- [15] **MR. RITESH SHARMA & MR. DINANATH PRASAD** «Elements of Power System» EEE-503.

## *Bibliographie*

---

[16] **Pierre ESCANÉ & Jean-Marie ESCANÉ** « Réseaux électriques linéaires à constantes réparties » Techniques de l'Ingénieur D 1 100.

[17] **Thierry DEBU** « ligne aériennes, paramètres électriques » Techniques de l'Ingénieur D 4435.

[18] **Pierre JOHANNET & Bernard DALLE** « ligne aériennes, calcul des chutes de tensions, des échauffements et des efforts électrodynamiques » Techniques de l'Ingénieur D 673.

[19] **Pierre BORNARD & Michel PAVARD** « Réseaux d'interconnexion et de transport, réglage et fonctionnement » Techniques de l'Ingénieur D 4090.

[20] **John Wiley & Sons Ltd** « Electric Power System » B.

M Weedy, 3rd éd, London, 1979.