

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique**



CENTRE UNIVERSITAIRE D'EL-OUED

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine : science et technologie

Spécialité : Génie électrique

Option : Réseaux Electriques

Thème

**CALCULE LES PARAMETRES
ELECTRIQUES DES LIGNES
AERIENNES**

Présenté par :

Missi OMAR

Toma MAMMAR

Encadreur :

Mr. Guehrar YUCEF

Année Université

2009-2010

REMERCIEMENT

Nous tenons à remercier tout d'abord nous Dieu le Plus Puissant qui nous a aidés. Premièrement, nous remercions bien sur nous chers parents pour leur sacrifices et encouragement, durant toute la période de nous études, aussi à tous nous enseignants surtout à notre encadreur Mr. GUEHRAR Youcef pour son aides son sérieux durant toutes la période de notre recherches.

Nous adressons également nos vifs remerciements à tout le personnel.

Enfin nous remercions tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin surtout ceux qui nous sont très chers et toute la famille Missi et Toma.

Sommaire

Introduction générale :	1
-------------------------------	---

Chapitre I : Constitution des lignes aériennes

No table of contents entries found. *Chapitre II : Les paramètres électriques des lignes aériennes*

Introduction :	12
II-1-Représentation :	12
II-1-1-Définition :	12
II-1-2-Notion de constantes linéiques :	13
II-2- Calcul de la résistance d'une ligne :	14
II-2-1- Influence de la température :	14
II-2-2- Influence de la fréquence : effet pelliculaire	15
II-3-Calcul des inductances des lignes :	17
II-3-1-Inductance d'un conducteur simple :	17
II-3-1-1-Inductance interne :	18
II-3-1-2-Inductance externe :	19
II-3-2-Inductance de ligne biphasée :	20
II-3-3 flux en termes des inductances propre et mutuelle :	21
II-3-4-Inductance d'une ligne de transmission trépassées:	22
II-3-4-1-espacement symétrique:	22
II-3-4-2-Espacements asymétriques :	23
II-3-5-Ligne transposée:	24
II-3-6-Inductance des conducteurs composites :	25
II-3-7-GMR des conducteurs en faisceaux :	27
II-3-8-Inductance de ligne triphasée double circuit :	27
II-4-2 Capacité de ligne biphasée simple :	30
II-4-3-Capacitance des lignes tri phases :	31
II-4-3-Effet des conducteurs en faisceaux	33

II-4-4-Capacitance de ligne triphasée double circuit :	34
II-5-Conductance spécifique g_o d'une ligne :	35
Conclusion :	36

Chapitre III : Modélisation des lignes aériennes

Introduction :	37
III-1- Modèle de lignes court :	37
III-2-Modèle de lignes moyenne :	38
III-2-1-le modèle nominal en π :	38
III-2-2-le modèle nominal en T :	39
III-3-Module de ligne long :	40
Conclusion :	44

Conclusion générale :	45
-----------------------------	----

Bibliographiée

Introduction général

Pour transporter l'énergie électrique de centrale de production aux centres de consommateurs il faut avoir un moyen de transport c'est les lignes aériennes.

Les lignes aériennes sont utilisées surtout dans les transports de THT, HT, et dans distributeur rural.

Notre travail est composé de trois parties:

La première partie on parlera sur la constitution des lignes aériennes (types des conducteurs, supports, isolateurs...).

Dans le deuxième chapitre on déterminera les paramètres électriques (résistance, inductance, capacitance et conductance) pour différents types des lignes.

Et finalement, des modélisations des lignes seront représentées dans le troisième chapitre

Introduction

La fonction principale des réseaux électriques est le transport et distribution d'énergie électrique de central de production vers les consommateurs.

Un des composants principales de réseaux électriques les lignes aérienne qui elles comportent les conducteurs nue et d'autre composant fixer et de porter les conducteur pour les isoler les un des autres ou de la terre.

I-1-les conducteurs :[1]

Les conducteurs nus, utilisés pour la construction des lignes aériennes, sont des câbles constitués de fils ronds ou exceptionnellement de fils trapézoïdaux ou profilés en forme de Z.

Pour réaliser ces câbles, les métaux conducteurs de faible résistivité sont peu nombreux. Seuls sont utilisés actuellement l'aluminium dans sa forme écroui dur, de grande pureté d'une part, et un alliage d'aluminium, l'alélec, d'autre part. Les caractéristiques de ces métaux ont peu évolué au cours des dernières décennies et leur température maximale de fonctionnement ne peut dépasser 100 °C. Cependant, certains métaux conducteurs, par exemple l'aluminium recuit, ou certains alliages devraient permettre des températures de fonctionnement plus élevées, de l'ordre de 200 °C, et sont actuellement testés.

Depuis plusieurs années, le cuivre n'est plus utilisé en raison de sa masse et de son coût. Cependant, des conducteurs en cuivre équipent encore des lignes anciennes.

I-1-1 Aluminium: câbles aluminium acier (ACSR) (Aluminum Conductor Steel-Reinforced):

L'aluminium utilisé, écroui et de grande pureté a une contrainte à la rupture en traction de 160 MPa très insuffisante pour réaliser les lignes à haute tension.

Pour pallier cet inconvénient, les câbles ACSR comportent au centre une âme en fil d'acier galvanisé qui supporte la plus grande partie de la tension mécanique et autour de cette âme, plusieurs couches de fils d'aluminium conduisant le courant électrique. Les fils d'acier sont zingués, soit après tréfilage, soit avant le dernier passage dans la filière, cette deuxième façon d'opérer donnant une meilleure adhérence à la couche de zinc.

Deux types d'acier sont utilisés, caractérisés par leur contrainte minimale à 1 % d'allongement:

- acier à très haute résistance mécanique toujours retenu pour les lignes HTB : 1410 à 1450 MPa ;
- acier normal : 1140 à 1170 MPa.

I-1-2- Alliage d'aluminium :

a-Conducteurs homogènes en almélec (AAAC) (All- Aluminum Alloy Conductor)

Les alliages d'aluminium utilisés pour les conducteurs AAAC de lignes aériennes contiennent de faibles additions de magnésium et de silicium et sont appelés « almélec ».

b-Cables almélec acier (AACSR) : (Aluminum alloy- conductor steel- reinforced)

Dans le but d'obtenir des câbles très résistants mécaniquement pour les zones fortement givrées ou les lignes de montagne, des câbles almélec acier sont réalisés avec des sections voisines de celles des câbles aluminium acier (ACSR), les fils d'aluminium étant remplacés par des fils d'almélec. On utilise toujours de l'acier à très haute résistance mécanique.

I-1-3-Conducteurs compacts :

Dans un conducteur constitué de brins ronds, les vides représentent environ 20 % du volume total. Avec des brins de section trapézoïdale ou profilés en forme de Z, il est possible de réduire le pourcentage de vide dans de grandes proportions. On réalise ainsi des câbles compacts ayant, pour un même diamètre extérieur, une résistance électrique inférieure de 15 à 20 %, suivant les cas, à celle des conducteurs constitués uniquement de brins ronds. L'utilisation de fils profilés en Z dans les réseaux haute tension n'est pas récente.

Les câbles compacts ont un très bon comportement et leur utilisation, indépendamment des considérations économiques qui doivent être examinées dans chaque cas, est techniquement très intéressante :

- pour la réalisation des lignes nouvelles à cause de la diminution des pertes et également de l'augmentation de la puissance transmissible pour une même température de fonctionnement ;
- pour le renouvellement des conducteurs des lignes anciennes pour les mêmes raisons, en choisissant cependant un câble de diamètre voisin de celui équipant la ligne existante.

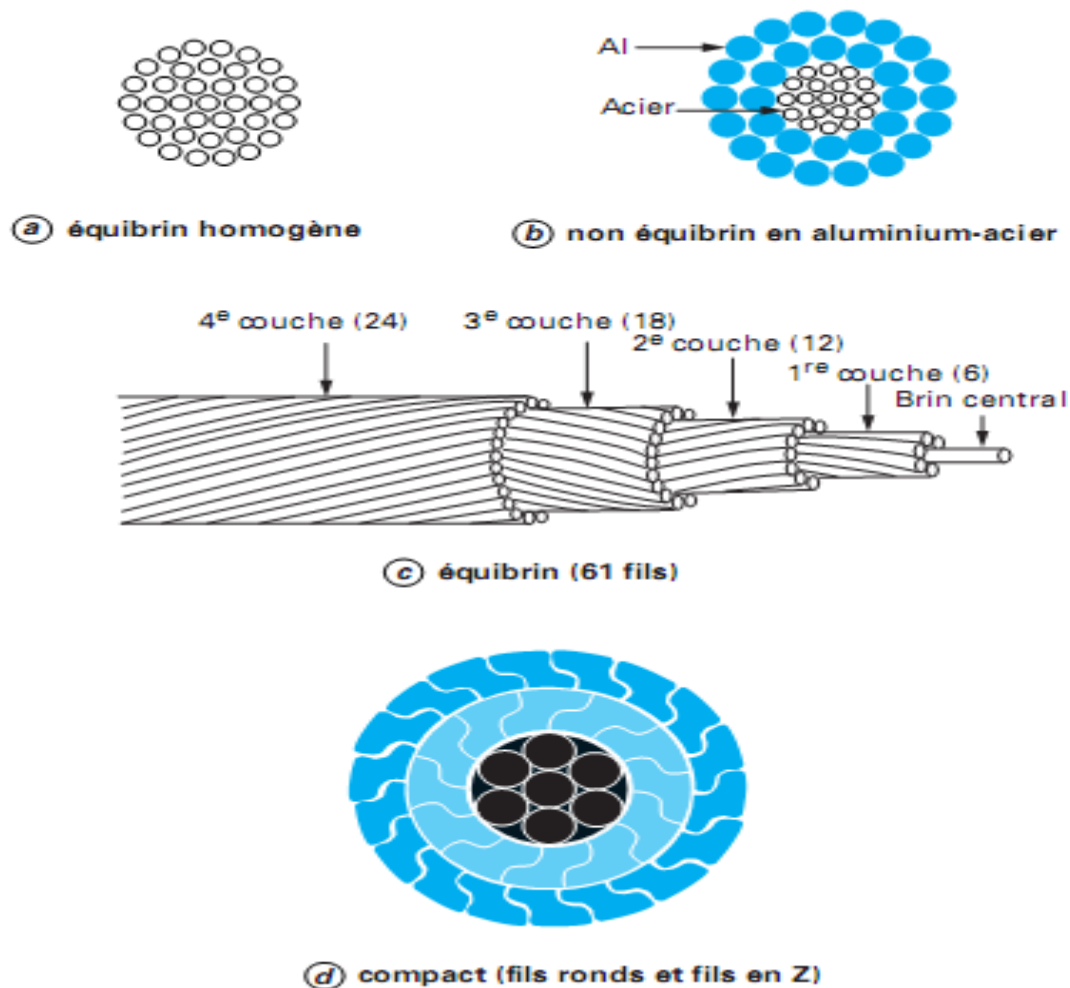


Figure I.1- Les conducteurs

I -2. Câbles de garde:[1].

Les rôles multiples des câbles de garde tel que :

Câble de garde protège contre la foudre car il est placé juste au dessus des conducteurs, en cas de coup de foudre c'est lui qui est touché en premier.

Les circuits de télécommunication sont inclus dans un tube central en aluminium qui assure à la fois la protection et l'étanchéité. Autour de ce tube sont disposées les couches de fils d'acier et d'alumélec.

Le tube peut être remplacé par une couche de fils en Z constituant une gaine et assurant une protection équivalente.

Les circuits de télécommunication sont, suivant les cas :

- des quarts téléphoniques ;
- un câble coaxial (technologie aujourd'hui abandonnée) ;
- de fibres optiques.

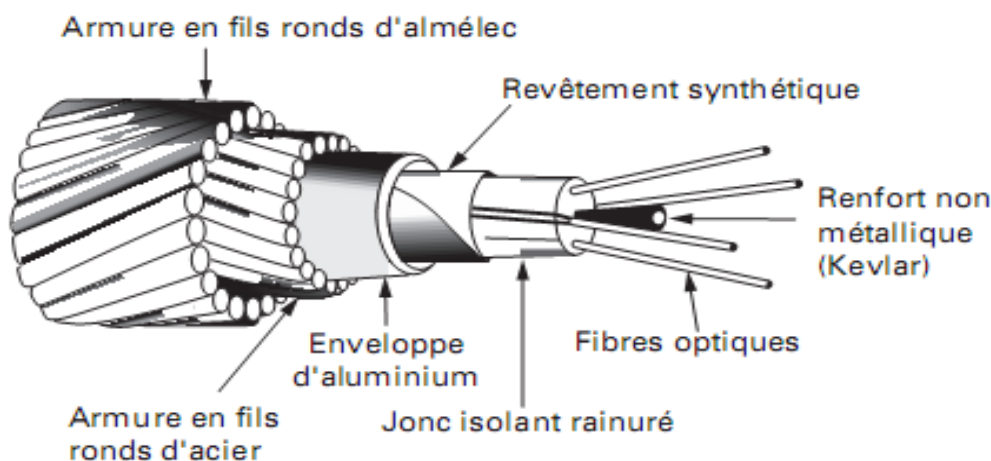


Figure I.2- câble de garde

I-3- Les pylônes:[1]

La silhouette des supports et leurs dimensions en largeur se trouvent déterminées par la disposition des conducteurs, compte tenu des distances minimales à respecter entre conducteurs et terre et entre les conducteurs eux-mêmes.

Les différentes dispositions des conducteurs (ou armements de la ligne) ainsi que les avantages et inconvénients de ces principaux modes d'armement sont donnés ci-après.

I-3-1 Armement en triangle:[2]

Cet armement exige des dimensions transversales réduites, donc permet d'obtenir assez facilement une bonne tenue du support aux efforts de torsion, mais la hauteur est nécessairement élevée.

Pour éviter le télescopage des deux conducteurs situés du même côté du support, en cas d'oscillations verticales résultant de détente après rupture ou de charges dissymétriques de givre, on dispose généralement ces deux conducteurs dans deux plans verticaux suffisamment distants (figure I.3 a, c et d).

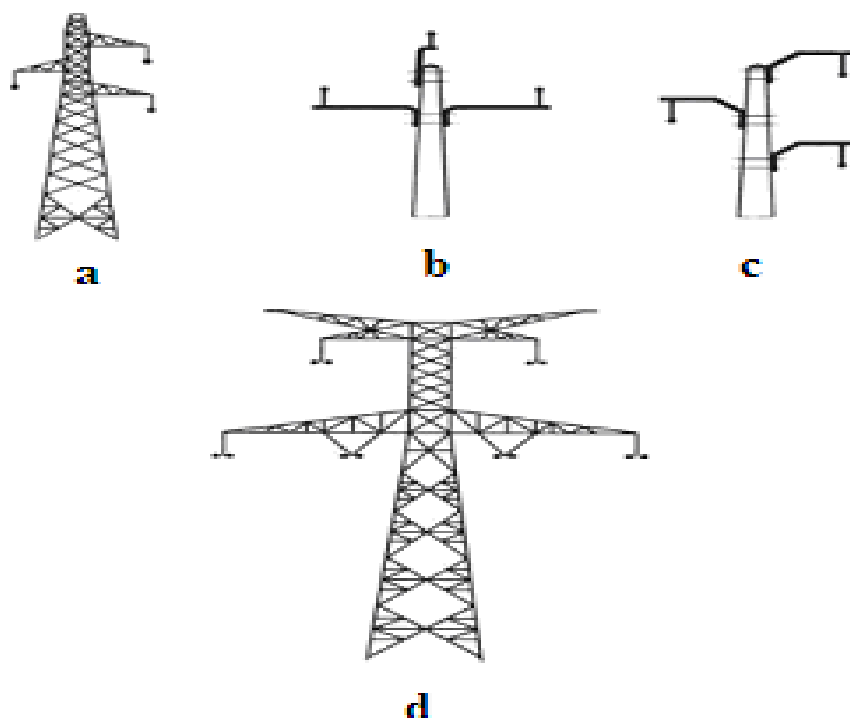


Figure I.3- Armement en triangle.

a : pylône pour ligne HTB (90 kV)

b : chapeau de gendarme ; pylône pour ligne HTA, avec isolateurs rigides

c : armement alterné avec bras inclinés ; pylône pour ligne HTA, avec isolateurs suspendus

d : pylône pour ligne HTB à 400 kV, à 2 circuits, type Beaubourg

La disposition en triangle symétrique par rapport à l'axe du support [armement en chapeau de gendarme, (figure I. b)] réduit le plus possible les inconvénients précités, mais n'est commodément réalisable que pour les lignes à tension assez basse, à isolateurs rigides, l'un des conducteurs étant attaché à un isolateur placé en tête de support, pour les lignes à haute tension, ce type d'armement, fréquemment utilisé en Amérique du Nord est réalisé l'aide d'isolateurs rigides en porcelaine et, souvent, en matériaux synthétiques.

I-3-2- Armement en drapeau:

Il est peu fréquent pour les lignes HTB à un seul circuit (sauf pour certains angles), mais assez habituel pour les lignes HTA et BT (figure 4 a).

En HTB, cette disposition est utilisée pour les lignes à deux circuits (figure 4- b et c).

Cet armement présente, accru, les défauts de l'armement en triangle, mais cette disposition est pratiquement imposée pour un grand nombre de lignes, notamment en HTB, lorsque l'encombrement en projection horizontale est limité (zones fortement urbanisées, en traversées de forêts).

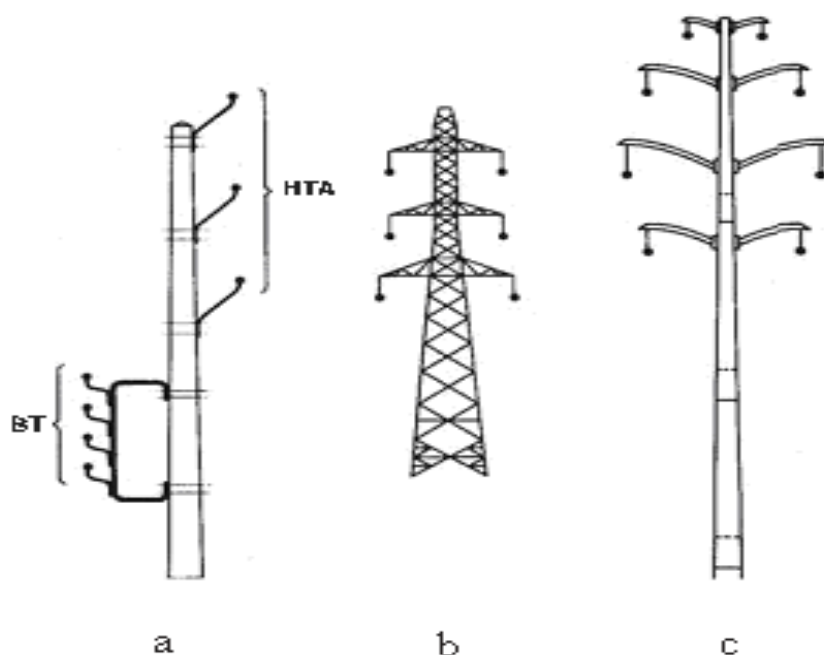


Figure I.4– Armements en drapeau

- a** pylône pour ligne mixte BT et HTA
- b** pylône pour ligne HTB à 2 circuits
- c** pylône muguet pour ligne HTB à 2 circuits

Dans les zones fortement givrées, les contacts entre phases sont plus fréquents (charges de givre différentes sur les conducteurs, décharge de givre). Une solution, lorsque l'on ne peut éviter ce type d'armement, est l'emploi d'espaces isolés entre phases, techniques de plus en plus utilisées en 63 et 90 kV. Ces espaces, placés en milieu de portée, sont du même type qu'un isolateur composite. Leur légèreté est un atout supplémentaire.

I-3-3- Armement en nappe:

Il est d'usage fréquent pour les lignes HTA et HTB (figure5-a). Le pylône du type *chat*, très utilisé en France pour les lignes HTB, peut être considéré comme armé en nappe, bien que la poutre centrale soit légèrement plus haute que les consoles (figure5-b).

Cet armement en nappe exige des supports plus larges mais moins élevés que pour les autres armements et donne une plus grande sécurité en cas de décharge de givre ou d'oscillations verticales des conducteurs. Il permet, par installation de deux câbles de garde, de protéger la ligne contre les coups de foudre et est bien adapté aux lignes de montagne.

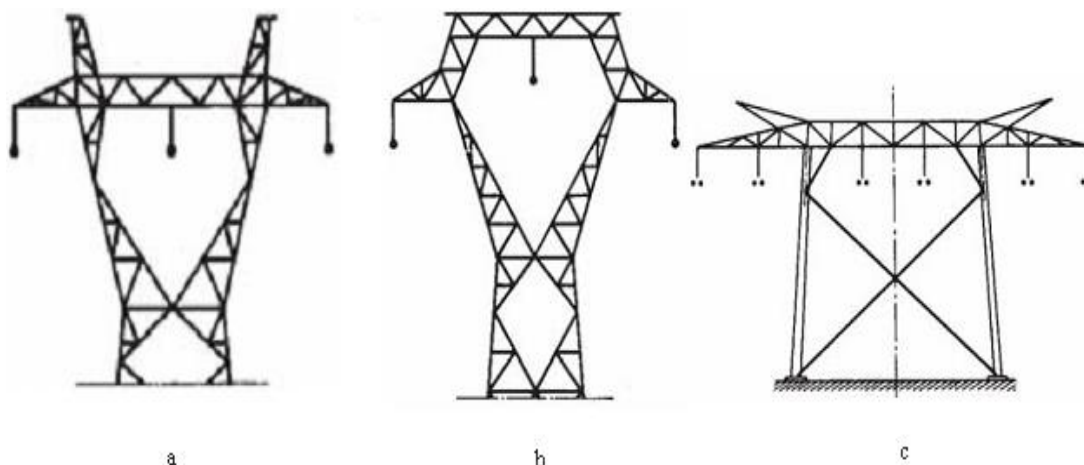


Figure I.5- Armement en nappe

a : pylône pour ligne HTA et HTB

b : pylône chat nappe voûte pour ligne HTB

c : pylône type Trianon

I-4- Les isolateurs:[3]

Les isolateurs représentent seulement une petite partie (quelque pourcents) du coût des équipements d'une ligne aérienne caractéristique des rôles mécanique représentée porte le conducteur et rôle électrique isolé les conducteurs par rapport les pylônes.

I-4-1-les éléments de chaîne:

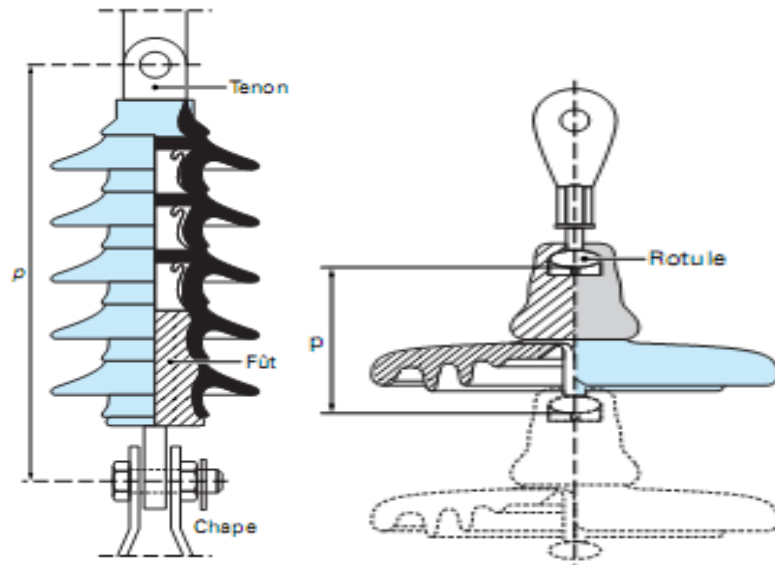
C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le reliaison de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support.

Ces éléments sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaînes d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrage).

La liaison entre deux éléments successifs est réalisée par des systèmes

métalliques soit à rotule et logement de rotule (*ball and socket*), soit à chape et tenon.

Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne : les isolateurs à capot et tige et les isolateurs à long fût.



A gauche : assemblage à chape et tenon (p pas) et **à droite** : assemblage à rotule

Figure I. 6-les éléments de chaîne

a -Les isolateurs du type capot et tige:

En verre trempé ou porcelaine sont les plus utilisés aujourd'hui.

La fiabilité élevée associée à un coût réduit et à la facilité de maintenance avec la possibilité de pratiquer le travail sous tension, explique le succès des isolateurs capot- tige en verre trempé sous les différents climats. Ce type d'isolateur est couramment utilisé sur les réseaux à courant alternatif (AC) jusqu'à 800 kV et sur les réseaux à courant continu (DC) jusqu'à 600 kV.

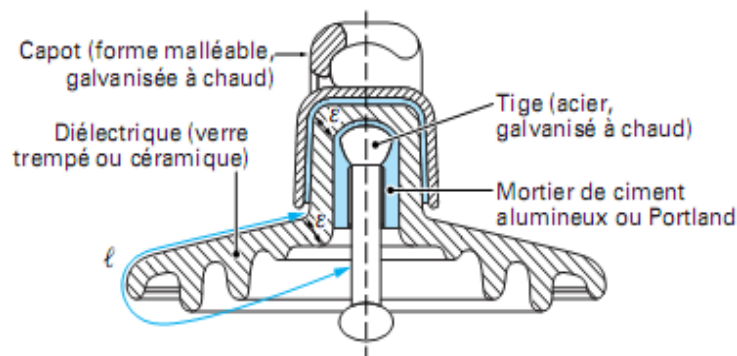
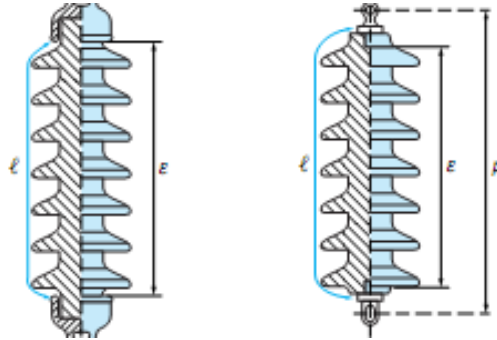


Figure I.7- Les isolateurs du type capot et tige

b-Les isolateurs long fut en porcelaine:

Sont constitués d'un fût en porcelaine assemblé avec des ferrures d'extrémités.

L'utilisation de ce type d'isolateur est limité à quelques pays car ce type d'isolateur présente l'inconvénient de provoquer une chute de ligne en cas d'endommagement, mécanique suite de la propagation de micro fissures. C'est pour cela qu'ils sont généralement utilisés en chaîne double.



A gauche : scellement externe et à droite : scellement interne
Figure I. 8-Les isolateurs long fut en porcelaine

I-4-2 Les isolateurs composites de suspension

Ils sont de plus en plus utilisés Leur développement et leur intérêt sont croissants pour les avantages suivants :

- 1-Grande résistance mécanique.
- 2- Excellentes performances sous pollution.
- 3-Poids réduit.
- 4-Résistance au vandalisme et lors du transport

I-5-Accessoire :[5]

On trouve plusieurs accessoires dans les lignes aériennes comme les sphères de balisage (figure I-9) qui sont généralement installées sur les câbles de garde des lignes de transmission, les distances entre deux sphères n'excéderont pas 30 mètres.



Figure I- 9- Les sphères

On trouve aussi, la lampe (figure I-10) est composée d'un tube néon, enroulé en spirale, rempli de néon basse pression et fixé à l'aide d'une électrode froide aux deux extrémités. Le tube spiralé est monté dans un logement pyrex étanche



Figure I. 10-La lampe

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons vu les différentes composantes d'une ligne aérienne (type de conducteurs, les pylônes, supports...etc.), et dans le chapitre suivant, on doit traiter le différent paramètre électrique d'une ligne aérienne.

Introduction

Une ligne de transmission possède quatre paramètres qui affectent son habileté à accomplir sa fonction en tant qu'élément du système de puissance : la résistance, l'inductance, la capacitance et la conductance, dans cette chapitre on déterminera les valeurs de chaque élément.

II-1-Représentation [5]

Une ligne de transmission peut être représentée comme suit



Figure II-1-: Représentation simplifiée d'une ligne de transmission.

Générateur : V_g , I_g , P_g

Récepteur : V_r , I_r , P_r

En général, pour une ligne d'énergie électrique, on connaît V_r , I_r , P_r (et Q_r). On cherche pour ce fonctionnement au récepteur :

V_g , I_g , φ_g au générateur.

⇒ réglage au niveau du générateur. Ce qui implique aussi de déterminer V , I en tout point de la ligne.

(⇒ Dimensionnement correct)

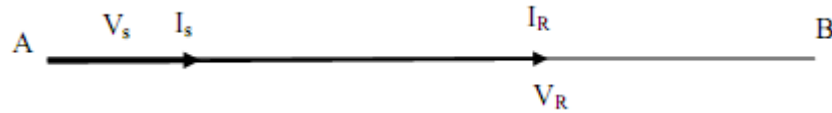
Les lignes et les câbles sont des circuits à constantes réparties

II-1-1-Définition :

Un circuit à constante répartie est un circuit de longueur finie dont tout élément, si petit soit-il, donne lieu à la fois à une variation de tension dans le sens longitudinale, et à une variation de courant dans le sens transversal.

Tous les circuits réels sont à constantes réparties mais, très souvent, on peut négliger Δv ou Δi .

Si on considère une ligne de transmission donnée :

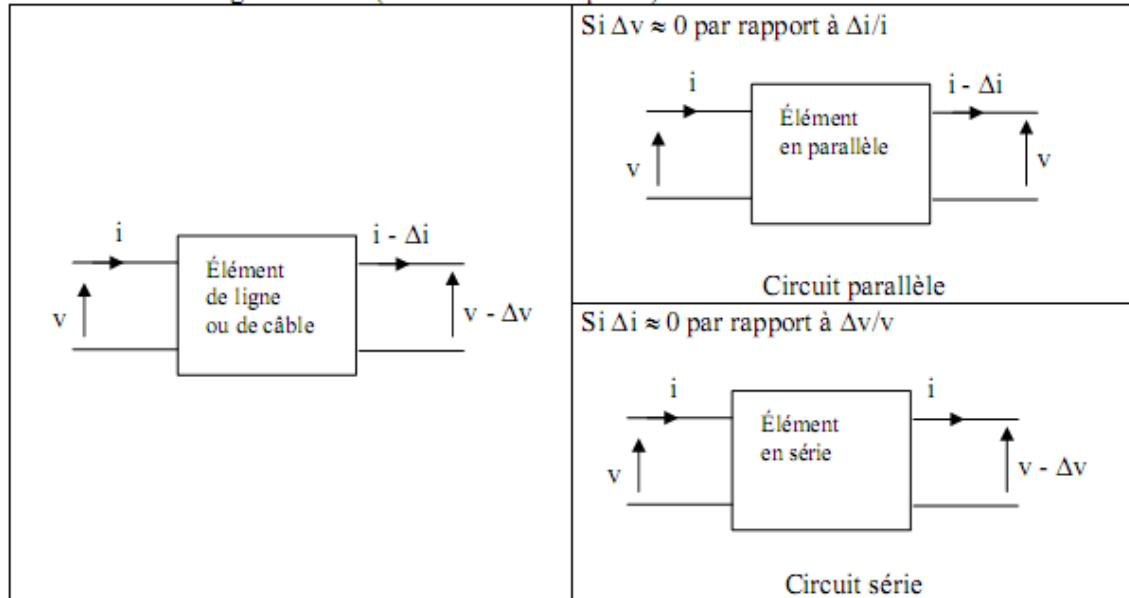


On a un flux magnétique $\Rightarrow$ inductance $L = \text{flux}/I$. Ce flux est variable en AC.

$\Rightarrow$ chute de tension à cause de R, L du câble.

$\Rightarrow$ capacité à prendre en compte $\Rightarrow I$ n'est pas le même le long de la ligne

Considérons une ligne bifilaire (ou un câble monophasé)



Dans ce cas, Δv ou ΔI non négligeable et indissociable pour tout élément de longueur du circuit réel, on est amené, à définir électriquement ce circuit par des constantes par unité de longueur (impédances et admittances).

II-1-2-Notion de constantes linéiques

Considérons une ligne bifilaire (ou un câble monophasé) dont on isole un élément de longueur dx . Intéressons nous au courant circulant dans les conducteurs et à la tension entre ces deux conducteurs (la fréquence des signaux appliqués est assez faible pour qu'il soit possible de définir la notion de tension électrique entre ces deux points).

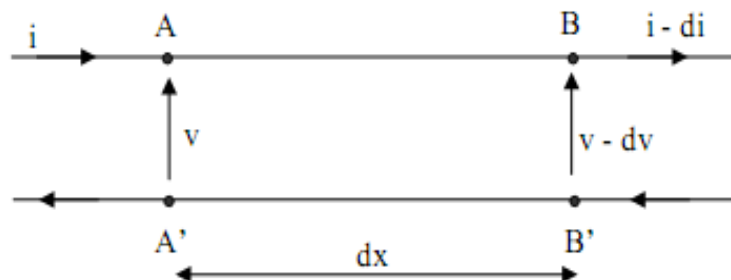


Figure II-2-une ligne bifilaire

Tout élément de longueur dx est le siège d'une chute de tension longitudinale et d'une dérivation de courant transversale.

Pour l'élément dx , on définit.

- une résistance propre série dr .
- une inductance propre dl
- une capacité entre conducteurs dc
- une conductance entre conducteur dg .

Si la ligne est homogène, les éléments précédents sont uniformément répartis, ce qui permet de définir les constantes linéiques (par unité de longueur)

- inductance linéique $L=dl/dx$,
- résistance linéique $R=dr/dx$
- capacité linéique $C=dc/dx$,
- conductance linéique $G=dg/dx$

II-2- Calcul de la résistance d'une ligne

C'est la capacité d'un matériau à s'opposer au passage des électrons. Elle dépend du matériau et de ses dimensions (longueur et section). La relation donnant la résistance R d'un cylindre de section constante (mais de forme quelconque) est la suivante :

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\text{II-1})$$

R la résistance (Ω)

ρ la résistivité du matériau Ωm

l la longueur du conducteur m

S section transversale du conducteur m

$$\rho = \rho_0 (1 + a.T) \quad (\text{II-2})$$

ρ_0 la résistivité à $T=0$

a le coefficient de température $^{\circ}\text{C}^{-1}$

T la température du matériau $^{\circ}\text{C}$

II-2-1- Influence de la température

La résistance du conducteur à une température de T_2 ($^{\circ}\text{C}$) connaissant sa valeur à une température T_1 ($^{\circ}\text{C}$) est obtenue par:

$$R = R_T (T + T_2) / (T + T_1) \quad (\text{II-3})$$

avec T constante dépendant du métal conducteur

Exemple: ($T_{Al} = 228^\circ\text{C}$ et $T_{Cu} = 241^\circ\text{C}$).

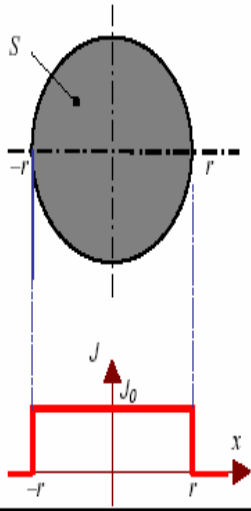
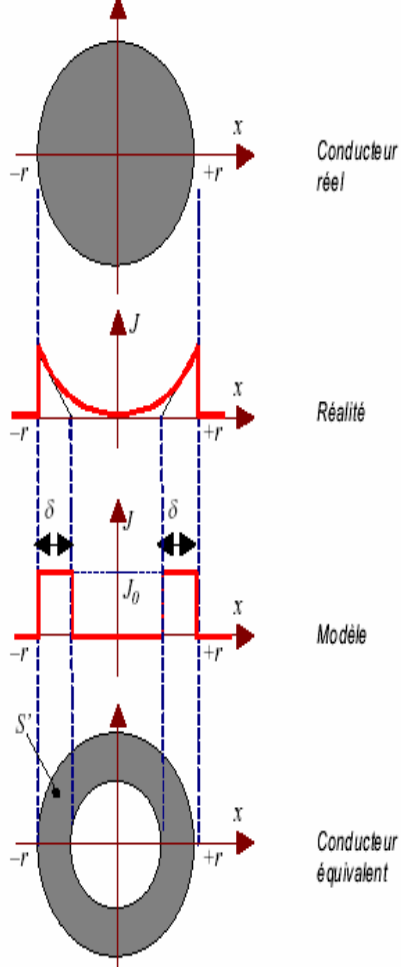
Tableau -1 : quelques exemples de coefficients de température pour les principaux conducteurs

.matériaux	a ($^\circ\text{C}^{-1}$)	Matériau	a ($^\circ\text{C}^{-1}$)
Aluminium	$3,9 \cdot 10^{-3}$	Nickel	$4,0 \cdot 10^{-3}$
Argent	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Nickel	$-2,0 \cdot 10^{-4}$
Cuivre	$3,8 \cdot 10^{-3}$	Zinc	$3,7 \cdot 10^{-3}$
Laiton	$1,5 \cdot 10^{-3}$	Constantan(Cu + Ni)	$-3,0 \cdot 10^{-5}$
Etain	$4,2 \cdot 10^{-3}$		

II-2-2- Influence de la fréquence : effet pelliculaire

En plus des matériaux et de la température, on remarque qu'une résistance électrique ne conserve pas une valeur stable dans un domaine de fréquences variables. Cet effet est dénommé effet pelliculaire ou effet de peau. Ceci provient du fait que lorsque la fréquence augmente, le courant a tendance à circuler à la périphérie du conducteur (la surface « utile » est plus faible, donc la résistance résultante plus élevée)

Tableau II-2- Influence de la fréquence

Résistance	Illustration schématique	Fréquences	Commentaires
$R = \rho \frac{l}{S}$ $S = \pi r^2$		Basses	On considère un conducteur cylindrique de longueur l et de section S traversé par un courant alternatif de valeur efficace I. En « basse fréquence » la densité de courant J est uniforme : $J = J_0 = \frac{I}{S}$
$R_0 = ?$ $R_0 = \rho \frac{l}{S'}$ $S' = \pi \delta (2r - \delta)$ quand $f \nearrow$ alors $R_0 \nearrow$		Elevées	En « haute fréquence » la densité de courant n'est plus uniforme, le courant a tendance à circuler à la périphérie du conducteur. C'est la manifestation de l'effet pelliculaire. Pour les calculs, on fait l'hypothèse que la densité de courant est uniforme sur une couronne d'épaisseur δ appelée épaisseur de peau. En conséquence, on peut supposer que le courant ne circule que dans la couronne d'épaisseur δ et de surface S'.

L'épaisseur de peau est donnée par la relation suivant:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\sigma \mu \omega}} \quad (\text{II-4})$$

σ est la conductivité en $\Omega^{-1}m^{-1}$

$\omega = 2\pi f$, f est la fréquence en Hz

μ = la perméabilité magnétique de matériau

$$\mu = \mu_0 \mu_r \quad (\text{II-5})$$

$\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H / m}$ est la perméabilité magnétique de vide

μ_r est la perméabilité relative, ($\mu_r \approx 1$ pour le cuivre)

II-3-Calcul des inductances des lignes [6]

II-3-1-Inductance d'un conducteur simple

Un conducteur parcouru par un courant produit un champ magnétique autour du conducteur. Les lignes de flux magnétiques sont le cercle central fermé avec la direction donnée par la règle de main droite. Avec le pouce indiquant la direction du courant, les doigts de la main droite donnent la direction du champ magnétique. Par définition, pour le matériel non magnétique, l'inductance L est le rapport entre leur flux magnétique total λ et le courant I , donné par

$$L = \frac{\lambda}{I} \quad (\text{II-6})$$

Considérez un conducteur long et rond avec un rayon r , parcouru par un courant I (Figure II-3)

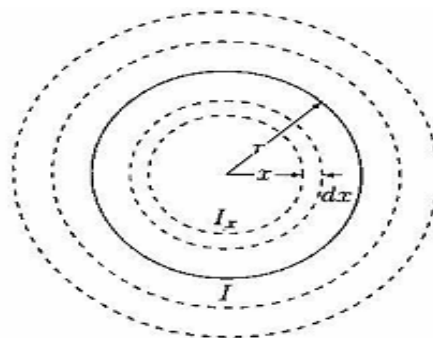


Figure II-3 -Inductance d'un conducteur simple

L'intensité de champ magnétique H_x , autour d'un cercle de rayon x , est constante et tangente au cercle. la loi d'Ampère donne la relation entre H_x le courant I_x

$$\int_0^{2\pi x} H_x \cdot dl = I_x \quad (\text{II-7})$$

Où

$$H_x = \frac{I_x}{2\pi x} \quad (\text{II-8})$$

Où I_x est le courant entouré par le cercle de rayon x .

L'inductance du conducteur peut être définie comme la somme de l'inductance interne, due au flux interne, et l'inductance externe, due au flux externe, de conducteur.

II-3-1-1-Inductance interne

Une expression simple peut être obtenue pour le flux interne en négligeant l'effet de peau et supposant que la densité de courant est uniforme sur la section de conducteur

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \Rightarrow I_x = \frac{I}{r^2} x^2 \quad (\text{II-9})$$

Remplaçant I_x dans l'équation (II-8)

$$H_x = \frac{I}{2\pi r^2} x \quad (\text{II-10})$$

Pour un conducteur non magnétique avec la perméabilité constante

$$\mu_0 H_x = B_x \quad (\text{II-11})$$

Où donne à la densité de flux magnétique

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x \quad (\text{II-12})$$

Où μ_0 est la perméabilité d'espace libre (ou l'air) et est égal $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$. Le flux différentiel $d\Phi$ crée par une petite région d'épaisseur dx et un mètre de longueur de conducteur est :

$$d\phi_x = B_x dx \cdot 1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx \quad (\text{II-13})$$

Le flux ϕ relie seulement la fraction de conducteur de centre au rayon x . Ainsi,

seulement la fraction $\frac{\pi \cdot x^2}{\pi \cdot r^2}$ de courant totale est reliée par le flux.

Donc on multiplie l'équation (II-13) par $\frac{x^2}{r^2}$

$$d\lambda_x = \left(\frac{x^2}{r^2} \right) d\phi_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x^3 dx \quad (\text{II-14})$$

Le flux total est trouvé en intégrant de 0 à r équation (II-14)

$$\lambda_{\text{int}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^r x^3 dx = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \text{Wb} / m \quad (\text{II-15})$$

La valeur d'inductance interne est

$$L_{\text{int}} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} 10^{-7} \text{H} / m \quad (\text{II-16})$$

II-3-1-2-Inductance externe

Considérant H_x externe au conducteur au rayon $x > r$ (figure II-4). Puisque le cercle au rayon x entoure le courant entier, $I_x = I$, on remplace I_x par I dans l'équation (II-8) et la densité de flux au rayon x devient

$$B_x = \mu_0 H_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} \quad (\text{II-17})$$

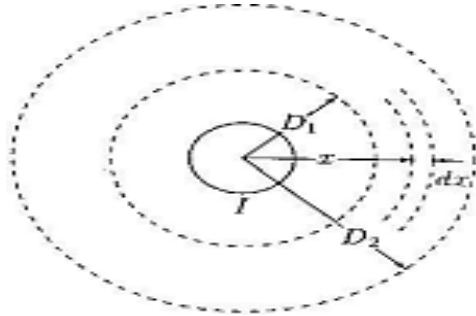


Figure II-4-le flux entre D1 et D2

On a

$$d\lambda_x = d\phi_x = B_x dx \cdot 1 = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} dx \quad (\text{II-18})$$

Le flux externe entre deux points $D1$ et $D2$ est trouvé en intégrant de $D1$ à $D2$.

$$\lambda_{\text{ext}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \int_{D2}^{D1} \frac{1}{x} dx = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{D2}{D1} \text{Wb} / m \quad (\text{II-19})$$

L'inductance externe à un conducteur est alors

$$L_{\text{ext}} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D2}{D1} \text{H} / m \quad (\text{II-20})$$

II-3-2-Inductance de ligne biphasée

Considérez une longueur de 1mètre d'une ligne biphasé simple consistant de deux conducteurs ronds de rayon r comme indiqué dans la Figure II-5. Les deux conducteurs sont séparés par une distance D .

Les valeurs des courants $I_1 = -I_2$

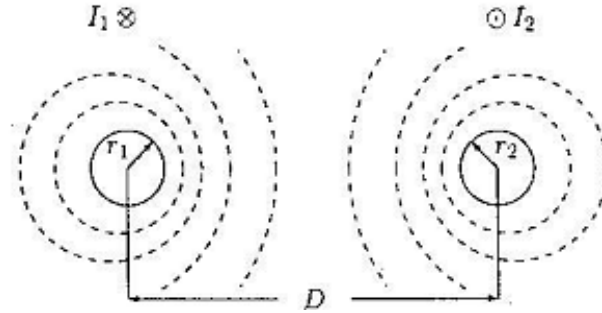


Figure II- 5-ligne biphasé

L'inductance externe

$$L_{1(ext)} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1} H / m \quad (II-21)$$

L'inductance totale de conducteur comme

$$L_1 = L_{1(int)} + L_{1(ext)} = 0.5 \times 10^{-7} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{r_2} H / m \quad (II-22)$$

L'équation est souvent réarrangée comme suivent:

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{D}{r_1} \right) H / m \quad (II-23)$$

$$\Rightarrow L_1 = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r_1 e^{-\frac{1}{4}}} + \ln \frac{D}{1} \right) \quad (II-24)$$

On pose

$$r' = r e^{-\frac{1}{4}} \quad (II-25)$$

r' est appelé rayon moyenne géométrique GMR (*self-geometric mean radius*)

On remplace la relation (II-25) dans l'équation (II-24)

$$L_1 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_1} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{1} H / m \quad (II-26)$$

L'inductance de conducteur 2 est :

$$L_2 = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_2} + 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D}{1} \quad H / m \quad (\text{II-27})$$

Donc

$$L = 0.2 \ln \frac{D}{r'} \text{ mH / Km} \quad (\text{II-28})$$

II-3-3 flux en termes des inductances propre et mutuelle

L'inductance série par phase pour le système précédent (biphasé) peut être exprimée en terme d'inductance propre de chaque conducteur et leur inductance mutuelle.

Considérant un mètre de longueur du circuit de biphasé simple représenté par deux bobines caractérisées par l'inductance propre L_{11} et L_{22} et l'inductance mutuelle L_{12} . La polarité magnétique est indiquée par des points gras comme l'indique la figure II-6.

Les flux λ_1 et λ_2 sont données par :

$$\begin{cases} \lambda_1 = L_{11}I_1 + L_{12}I_2 \\ \lambda_2 = L_{21}I_1 + L_{22}I_2 \end{cases} \quad (\text{II-29})$$

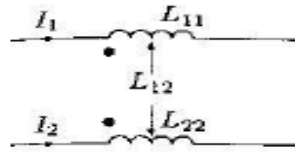


Figure II- 6-le ligne mono phase est l'inductance

On a $I_2 = -I_1$ donc

$$\begin{cases} \lambda_1 = (L_{11} - L_{12})I_1 \\ \lambda_2 = (L_{21} - L_{22})I_2 \end{cases} \quad (\text{II-30})$$

En comparant l'équation (II-30) par rapport (II-26) et (II-27)

$$L_{11} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_1} \quad (\text{II-31})$$

$$L_{22} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{r'_2} \quad (\text{II-32})$$

Et

$$L_{12} = L_{21} = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{1}{D} \quad (\text{II-33})$$

Le concept d'inductance propre et mutuelle peut être prolongé à un groupe de n conducteur. Considère n conducteurs parcourus par des courants $I_1, I_2, I_3 \dots I_n$. tel que

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_i + \dots + I_n = 0$$

En généralisant (II-30), le flux de conducteur

$$\lambda_i = L_{ii}I_i + \sum_{j=1}^n L_{ij}I_j \quad i \neq j \quad (\text{II-34})$$

$$\lambda_i = 2 \times 10^{-7} \left(I_i \ln \frac{1}{r'_1} + \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{ij}} \right), \quad j \neq i \quad (\text{II-35})$$

II-3-4-Inductance d'une ligne de transmission trépasses:

II-3-4-1-espacement symétrique:

Considérez un mètre de longueur d'une ligne triphasés (trois conducteur chacun avec rayonne r), symétriquement espacée comme indiqué la figure II-7

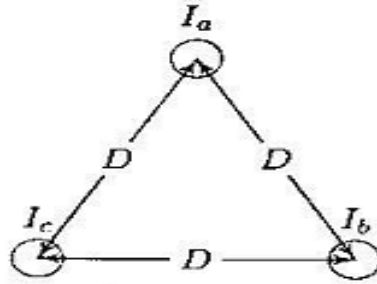


Figure II-7- ligne triphasés avec espacement symétrique

Le système est symétrique, on a :

$$I_a + I_b + I_c = 0$$

L'équation (II-34) donne le flux total pour le conducteur « a »

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'_1} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \text{H / m} \quad (\text{II-36})$$

Mais $I_b + I_c = -I_a$ donc :

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'_1} - I_a \ln \frac{1}{D} \right) = 2 \times 10^{-7} I_a \ln \frac{D}{r'_1} \quad (\text{II-37})$$

A cause de symétrie: $\lambda_c = \lambda_b = \lambda_a = \lambda$

Les trois phases est identique donc

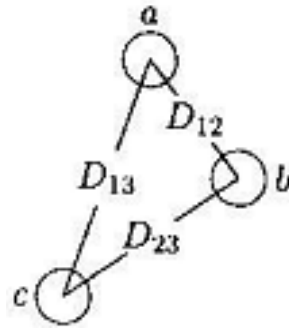
$$L = 0.2 \ln \frac{D}{D_s} \text{mH / Km} \quad (\text{II-38})$$

Tel que

$$D_s = r' = re^{\frac{-1}{4}} \quad (\text{II-39})$$

II-3-4-2-Espacements asymétriques :

A cause des contraintes de construction les lings de transport ne sont pas à espacements symétriques. Avec espacements asymétriques, même avec des courants symétriques, les chutes des tensions seront asymétriques. Considérant un mètre d'une ligne triphasée, composée de trois conducteurs de rayon r . les conducteurs sont espacés asymétriquement comme indique la figure II-8



FigureII-8-Line tri phase système asymétrique

L'application de l'équation II résultera les formules des flux suivantes

$$\begin{aligned} \lambda_a &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ \lambda_b &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{12}} + I_b \ln \frac{1}{r'} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \\ \lambda_c &= 2 \times 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_{13}} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{r'} \right) \end{aligned} \quad (\text{II-40})$$

Sous forme matriciel

$$\lambda = L I \quad (\text{II-41})$$

Où la matrice d'inductance est donnée par :

$$L = 2 \times 10^{-7} \begin{bmatrix} \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{D_{13}} \\ \ln \frac{1}{D_{12}} & \ln \frac{1}{r'} & \ln \frac{1}{D_{23}} \\ \ln \frac{1}{D_{13}} & \ln \frac{1}{D_{23}} & \ln \frac{1}{r'} \end{bmatrix} \quad (\text{II-42})$$

Pour des courants triphasés symétriques avec I_a comme référence, on a :

$$\begin{aligned} I_b &= I_a \angle 240^\circ = a^2 I_a \\ I_c &= I_a \angle 120^\circ = a I_a \end{aligned} \quad (\text{II-43})$$

Où $a = 1 \angle 120^\circ$ et $a^2 = 1 \angle 240^\circ$. Remplaçant dans l'équation II-40

$$\begin{aligned} L_a &= \frac{\lambda_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{12}} + a \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \\ L_b &= \frac{\lambda_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left(a \ln \frac{1}{D_{12}} + \ln \frac{1}{r'} + a^2 \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \\ L_c &= \frac{\lambda_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left(a^2 \ln \frac{1}{D_{13}} + a \ln \frac{1}{D_{23}} + \ln \frac{1}{r'} \right) \end{aligned} \quad (\text{II-44})$$

II-3-5-Ligne transposée:

Pour avoir une inductance symétrique d'une ligne triphasée, les compagnes d'électricité utilisent la technique de transposition des phases. La transposition est similaire à la figure II-9

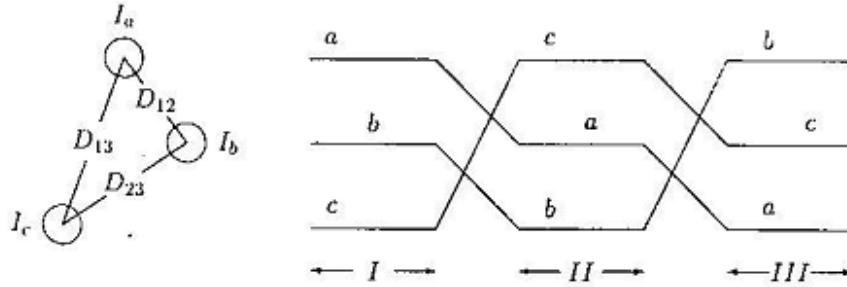


Figure II-9- lignes tri phases

Si chaque phase de la ligne triphasée prend tous les positions, l'inductance par phase peut être trouvée par la moyenne des trois inductances.

$$L = \frac{L_a + L_b + L_c}{3} \quad (\text{II-45})$$

Notant que :

$$a + a^2 = 1 \angle 120^\circ + 1 \angle 240^\circ = -1 \quad (\text{II-46})$$

Donc

$$L = \frac{2 \times 10^{-7}}{3} \left(3 \ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{D_{12}} - \ln \frac{1}{D_{23}} - \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad (\text{II-47})$$

Ou

$$L = 2 \times 10^{-7} \left(\ln \frac{1}{r'} - \ln \frac{1}{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right) = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{(D_{12} D_{23} D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r'} \quad (\text{II-48})$$

Et l'inductance par phase et par un kilomètre de longueur est :

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{D_s} \quad mH / Km \quad (\text{II-49})$$

Avec :

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}} \quad (\text{II-50})$$

II-3-6-Inductance des conducteurs composites

Dans l'évaluation de l'inductance, les conducteurs sont considérés ronds et solide (un seul brins ou fil). Cependant dans les lignes de transport, des conducteurs des plusieurs brins sont utilisées. Aussi, pour des raisons économiques des conducteurs en faisceaux sont utilisées pour les lignes de THT. Dans cette section une expression est trouvée pour l'inductance des conducteurs composites.

Considérant une ligne monophasée constituée de deux conducteurs x et y comme indique la figure II-10. Le conducteur x parcouru par un courant I et constituée par n brin identiques de rayon r_x , donc chaque brins est parcouru par un courant I/n . Le conducteur y parcouru par un courant $-I$ et constituée par m brin identiques de rayon r_y donc chaque brins est parcouru par un courant $-I/m$.

L'application de l'équation II-35 résultera l'expression suivante pour le flux total de conducteur « a » :

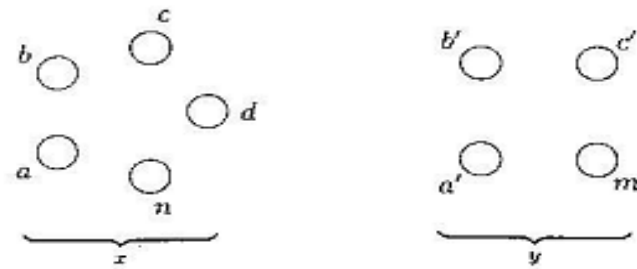


Figure II-10-les conducteurs composites

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \frac{I}{n} \left(\ln \frac{1}{r'_x} - \ln \frac{1}{D_{ab}} - \ln \frac{1}{D_{ac}} \dots \ln \frac{1}{D_{an}} \right) - 2 \times 10^{-7} \frac{I}{m} \left(\ln \frac{1}{D_{aa'}} - \ln \frac{1}{D_{ab'}} - \ln \frac{1}{D_{ac'}} \dots \ln \frac{1}{D_{am}} \right) \quad (\text{II-51})$$

Ou

$$\lambda_a = 2 \times 10^{-7} I \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad (\text{II-52})$$

L'inductance de conducteur « a » est

$$L_a = \frac{\lambda_a}{I/n} = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad (\text{II-53})$$

Utilisant l'équation II-35, on peut trouver les autres inductances des conducteurs (L_b , L_c , $L_d \dots L_n$) de phase x. par exemple, l'inductance de conducteur n est :

$$L_n = \frac{\lambda_n}{I/n} = 2n \times 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r'_x D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad (\text{II-54})$$

L'inductance moyenne pour chaque conducteur de la phase x est :

$$L_{\text{moy}} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n} \quad (\text{II-55})$$

Les conducteurs de phase x sont électriquement en parallèle, donc l'inductance totale de conducteur x sera :

$$L_x = \frac{L_{\text{moy}}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n^2} \quad (\text{II-56})$$

Remplaçant les valeurs de L_a , L_b , $L_c \dots L_n$ dans l'équation (II-56) on trouve :

$$L_x = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{GMD}{GMR_x} \quad (\text{II-57})$$

Tel que

$$GMD = \sqrt[m]{(D_{aa'} D_{ab'} \dots D_{am}) \cdot (D_{na'} D_{nb'} \dots D_{nm})} \quad (\text{II-58})$$

Et

$$GMR_x = \sqrt[n]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an}) \cdot (D_{na} D_{nb} \dots D_{nn})} \quad (\text{II-59})$$

Où $D_{aa} = D_{bb} = D_{cc} \dots = D_{nn} = r_x$

L'inductance de conducteur y peut aussi trouver de la même façon. Le GMR_y sera différent de GMR_x et le GMD reste le même.

II-3-7-GMR des conducteurs en faisceaux :

Les lignes de THT sont habituellement construites avec des conducteurs en faisceaux. Cette technique diminue la réactance inductive de la ligne, qui augmente la performance de la ligne et la puissance maximale, et diminue les pertes corona. Typiquement, les conducteurs en faisceaux constituent de deux, trois ou quatre conducteurs arrangés symétriquement comme indique la figure II-11.

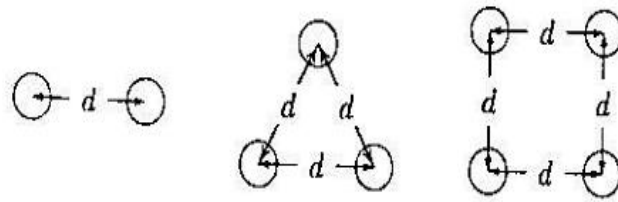


Figure II-11-conducteurs en faisceaux

Le GMR équivalent des conducteurs en faisceaux est obtenue par la relation (II-59). Si D_s est le GMR de chaque conducteur et d est la distance entre les conducteurs en faisceaux, nous avons :

Pour deux conducteurs en faisceaux

$$D_s^f = \sqrt[4]{(D_s \times d)^2} = \sqrt{D_s \times d} \quad (\text{II-60})$$

Pour trois conducteurs en faisceaux

$$D_s^f = \sqrt[9]{(D_s \times d \times d)^3} = \sqrt[3]{D_s \times d^2} \quad (\text{II-61})$$

Et pour quatre conducteurs en faisceaux

$$D_s^f = \sqrt[16]{\left(D_s \times d \times d \times d \times 2^{\frac{1}{2}}\right)^4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s \times d^3} \quad (\text{II-62})$$

II-3-8-Inductance de ligne triphasée double circuit

Une ligne triphasée double circuit constitue de deux circuits triphasés identiques. Soit une ligne triphasée double circuit représenté sur la figure II-12, la méthode de GMD peut être utilisée pour trouver l'inductance par phase. Pour faire ça, nous regroupons

les phases identiques et utilisons l'équation (II-58) pour trouver le GMD entre chaque groupe de phase.

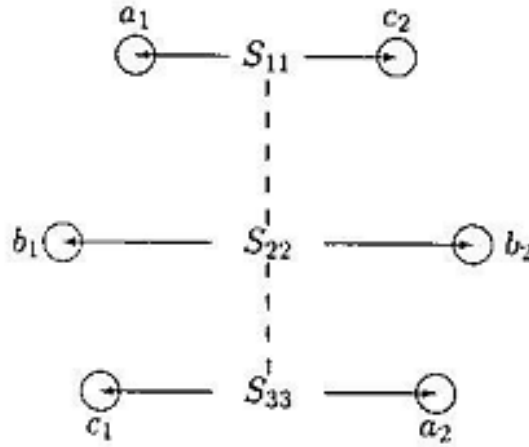


Figure II-12-ligne triphasée double circuit

$$\begin{aligned}
 D_{AB} &= \sqrt[4]{D_{a1b1} D_{a1b2} D_{a2b1} D_{a2b2}} \\
 D_{BC} &= \sqrt[4]{D_{b1c1} D_{b1c2} D_{b2c1} D_{b2c2}} \\
 D_{aC} &= \sqrt[4]{D_{a1c1} D_{a1c2} D_{a2c1} D_{a2c2}}
 \end{aligned} \tag{II-63}$$

Le GMD équivalent par phase est :

$$GMD = \sqrt[3]{D_{AB} D_{BC} D_{AC}} \tag{II-64}$$

Similaire, de l'équation (II-60) le GMR de chaque groupe de phase est :

$$\begin{aligned}
 D_{SA} &= \sqrt[4]{(D_s^f D_{a1a2})^2} = \sqrt{(D_s^f D_{a1a2})} \\
 D_{SB} &= \sqrt[4]{(D_s^f D_{b1b2})^2} = \sqrt{(D_s^f D_{b1b2})} \\
 D_{SC} &= \sqrt[4]{(D_s^f D_{c1c2})^2} = \sqrt{(D_s^f D_{c1c2})}
 \end{aligned} \tag{II-65}$$

Où D_s^f est le GMR des conducteurs en faisceaux donné par (II-60). le GMR équivalent pour calculer l'inductance total par phase est :

$$GMR_L = \sqrt[3]{D_{SA} D_{SB} D_{SC}} \tag{II-66}$$

L'inductance par phase en milli-Henries par kilomètre est

$$L = 0.2 \ln \frac{GMD}{GMR_L} \text{ mH / Km} \tag{II-67}$$

II-4-Capacitance de ligne [6]

II-4-1-définition

La capacitance de ligne de transmission est due au différence de

potentielle entre les conducteurs et les conducteurs et la terre.

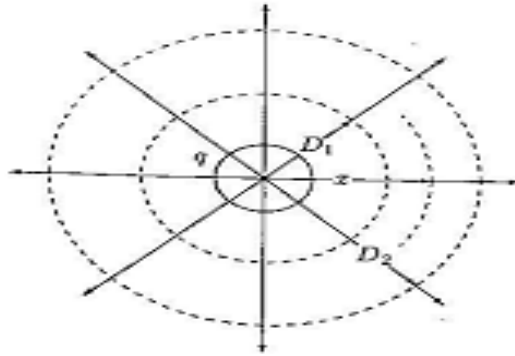
Par définition la capacitance C est le rapport entre la charge électrique et la tension.

$$C = \frac{q}{V} \quad (\text{II-68})$$

C: Farad

q: Coulomb

V: Volt



Fuguer II-8- électrique classé autour un long autour de conducteur

La charge de conducteur crée un champ électrique avec des lignes de flux radiaux. Le flux électrique total est numériquement égal à la valeur de charge dans le conducteur. L'intensité de champ est définie comme la force par unité de charge. Les cylindres concentriques au tour de conducteur sont des surfaces équipotentiels et ont la même densité de flux. D'après la loi de Gauss, pour une longueur de un mètre de conducteur, la densité de flux pour un cylindre de rayon x est donnée par :

$$D = \frac{q}{a} = \frac{q}{2\pi x(1)} \quad (\text{II-69})$$

densité de flux électrique est donnée par relation suivante

$$E = \frac{D}{\epsilon_0} \quad (\text{II-70})$$

tel que ϵ_0 est la perméabilité dans l'air égal $8.85 \cdot 10^{-12}$ F/m,

on remplace l'équation (II-69) dans (II-70)

$$E = \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} \quad (\text{II-71})$$

le différentiel de potentiel entre D_1 et D_2 est donné par l'intégrale

$$V_{12} = \int_{D_2}^{D_1} E dx = \int_{D_2}^{D_1} \frac{q}{2\pi\epsilon_0 x} dx = \frac{q}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_1}{D_2} \quad (\text{II-72})$$

II-4-2 Capacité de ligne biphasée simple

Considérant un mètre d'une ligne biphasée constituée de deux conducteurs ronds de rayon r (figure II-9). Les deux conducteurs sont séparés par une distance D et chargés par des charges q_1 et q_2 coulombs /mètre. La présence du deuxième conducteur et la terre déforme le champ électrique du premier conducteur. La distance entre les conducteurs D est plus grande par rapport au rayon r et l'altitude du conducteur de la terre est plus grande par rapport à la distance D ; donc l'effet de déformation du champ est petit et la distribution de la charge est presque uniforme.

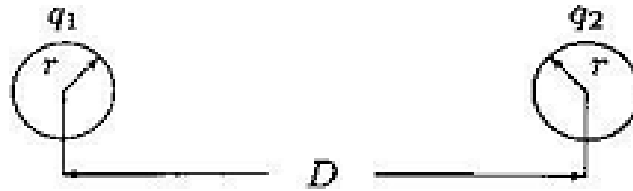


Figure II-9- ligne biphasée simple (deux conducteurs)

Supposons qu'il y ait le conducteur 1 seul chargé par une charge q_1 , La tension entre le conducteur 1 et 2 est

$$V_{12(q1)} = \frac{q_1}{2\pi\mu_0} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II-73})$$

Supposons maintenant, qu'il y ait le conducteur 2 seul chargé par une charge q_2 , La tension entre le conducteur 2 et 1 est

$$V_{21(q2)} = \frac{q_2}{2\pi\mu_0} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II-74})$$

Mais $V_{21} = -V_{12}$ Nous avons

$$V_{12(q2)} = -\frac{q_2}{2\pi\mu_0} \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II-75})$$

Par le principe de superposition, la différence de potentiel créée par les deux charges est :

$$V_{12} = V_{12(q1)} + V_{12(q2)} = \frac{q_1}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D}{r} + \frac{q_2}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{r}{D} \quad (\text{II-76})$$

Pour une ligne biphasé simple $q_2 = -q_1 = -q$, on a :

$$V_{12} = \frac{q}{\pi \epsilon_0} \ln \frac{D}{r} \quad V \quad (\text{II-77})$$

Donc la capacitance entre des conducteurs est

$$C_{12} = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} F / m \quad (\text{II-78})$$

Tell que

$$\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} F / m \quad (\text{II-79})$$

Donc la capacitance entre le conducteur et le neutre est égale (figure II-10):

$$C = 2C_{12} = \frac{2\pi \epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} = \frac{0.0556}{\ln \frac{D}{r}} \mu F / Km \quad (\text{II-80})$$

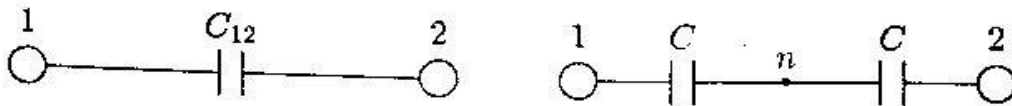


Figure II-10-la capacitance de neutre

II-4-3-Capacitance des lignes tri phases

Considérant un mètre d'une ligne triphasée. Chacun des conducteurs a un rayon r , avec l'espacement de conducteur comme indiqué la figure II-11.

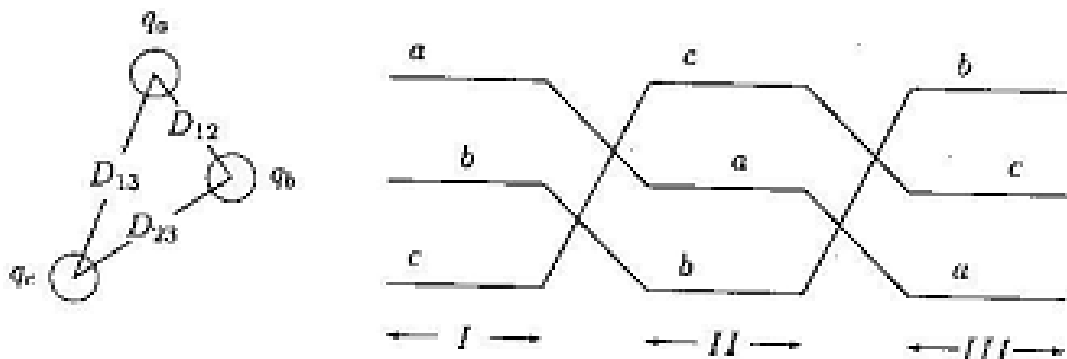


Figure II-11- ligne triphasée transposée

Puisque nous avons un système équilibré triphasée on a

$$q_a + q_b + q_c = 0$$

Nous négligerons l'effet de la terre. et supposons que la ligne est Transposée.

Nous calculons la différence de potentielle entre « a » et « b » pour chaque section de transposition. Appliquant à la section « I », on a :

$$V_{ab(I)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{12}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{12}} + q_c \frac{D_{23}}{D_{13}} \right) \quad (\text{II-81})$$

Pour la deuxième section :

$$V_{ab(II)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{23}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{23}} + q_c \frac{D_{13}}{D_{12}} \right) \quad (\text{II-82})$$

Et pour la troisième section :

$$V_{ab(III)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{13}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{13}} + q_c \frac{D_{12}}{D_{23}} \right) \quad (\text{II-83})$$

Donc V_{ab} est le moyenne des trois tensions ($V_{ab} = (V_{ab(I)} + V_{ab(II)} + V_{ab(III)})/3$)

$$V_{ab} = \frac{1}{(3)2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{r^3} + q_b \ln \frac{r^3}{D_{12}D_{23}D_{13}} + q_c \ln \frac{D_{12}D_{23}D_{13}}{D_{12}D_{23}D_{13}} \right) \quad (\text{II-84})$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r} + q_b \ln \frac{r}{(D_{12}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (\text{II-85})$$

On pose :

$$GMD = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}} \quad (\text{II-86})$$

Où GMD est appelée distance géométrique moyenne (*Geometric Mean Distance*)

Donc :

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_b \ln \frac{r}{GMD} \right) \quad (\text{II-87})$$

Et

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(q_a \ln \frac{GMD}{r} + q_c \ln \frac{r}{GMD} \right) \quad (\text{II-88})$$

Ainsi $q_b + q_c = -q_a$

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(2q_a \ln \frac{GMD}{r} - q_a \ln \frac{r}{GMD} \right) = \frac{3q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{GMD}{r} \quad (\text{II-89})$$

Pour une ligne triphasée symétrique

$$\begin{aligned} V_{ab} &= V_{an} \angle 0^\circ - V_{an} \angle -120^\circ \\ V_{ac} &= V_{an} \angle 0^\circ - V_{an} \angle -240^\circ \end{aligned} \quad (\text{II-90})$$

Donc :

$$V_{ab} + V_{ac} = 3V_{an} \quad (\text{II-91})$$

La capacitance totale

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} F / m \quad (\text{II-92})$$

AN

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{r}} \mu F / Km \quad (\text{II-93})$$

Cette formule a la même forme que l'expression pour la capacité d'une ligne biphasée simple.

GMD (la distance géométrique moyenne) est l'espacement de conducteur équivalent.

Pour la ligne triphasée, c'est la racine cubique du produit des espacements entre les trois phases. Si les espacements sont symétriques entre les conducteurs le GMD=D

II-4-3-Effet des conducteurs en faisceaux

Les étapes de procédure pour trouver la capacitance par phase d'une ligne transposée avec des conducteurs en faisceaux sont les mêmes étapes de section précédente

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r^f}} F / Km \quad (\text{II-95})$$

L'effet des conducteurs en faisceaux est d'introduire un rayon équivalent r^f . Ce rayon est similaire de GMR calculé pour l'inductance sauf que le rayon r est utilisé à la place de D_s

Pour deux conducteurs en faisceaux

$$r^f = \sqrt{r \times d} \quad (\text{II-96})$$

Pour trois conducteurs en faisceaux

$$r^f = \sqrt[3]{r \times d^2} \quad (\text{II-97})$$

Et pour quatre conducteurs en faisceaux

$$r^f = 1.09 \sqrt[4]{r \times d^3} \quad (\text{II-98})$$

II-4-4-Capacitance de ligne triphasée double circuit :

Considérant une ligne triphasée double circuit de la figure II-12. Les conducteurs de phase sont transposés et l'effet de la terre est considérée négligeable pour ces conditions de symétrie. La même procédure que la section (II-4-3), les tensions V_{ab} , V_{ac} et V_{an} sont calculées et la capacité équivalente entre phase et neutre est obtenue.

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR_c}} \quad F / m \quad (II-99)$$

Cette capacitance en μF par kilomètre est :

$$C = \frac{0.0556}{\ln \frac{GMD}{GMR_c}} \quad \mu F / m \quad (II-100)$$

L'expression de GMD est la même comme l'on a trouvé dans le calcul de l'inductance (équation II-64). Le GMR_c de chaque groupe de phase est similaire de GMR_L , sauf que dans l'équation (II-65) D_s^f est remplacé par r^f et on a la résultat suivante :

$$\begin{aligned} r_a &= \sqrt{r^f D_{a1a2}} \\ r_b &= \sqrt{r^f D_{b1b2}} \\ r_c &= \sqrt{r^f D_{c1c2}} \end{aligned} \quad (II-101)$$

Où r^f est le GMR de conducteurs en faisceaux donné par (II-96). Le GMR équivalent pour calculer la capacité entre phase et neutre est :

$$GMR_c = \sqrt[3]{r_a r_b r_c} \quad (II-102)$$

II-5-Conductance spécifique g_0 d'une ligne [7]

La conductance g_0 d'une ligne peut être déterminée d'après la relation suivante :

$$g_0 \cdot Un^2 = \Delta P_{tr} \Rightarrow g_0 = \frac{\Delta P_{tr}}{Un^2} \quad (II-103)$$

où ΔP_{tr} sont les pertes actives transversales.

Pour une ligne aérienne ΔP_{tr} sont égales aux pertes par effet couronne $\Delta P_{couronne}$ et qui sont calculées d'après la formule suivante:

$$\Delta P_{ouronn} = \frac{0.18}{\delta} \sqrt{\frac{r_{cond}}{D_{moy}}} (U_s - U_{cr})^2 \quad kW/KM \quad (II-104)$$

U_s étant la tension simple de la ligne et U_{cr} la tension critique de l'apparition de l'effet couronne, donc si $U_{cr} < U_s$ nous avons apparition de l'effet couronne.

La tension critique est calculée comme:

$$U_{cr} = 48.9.m_t.m_o.\delta.r_{cond} \log_{10} \left(\frac{D_{moy}}{r_{cond}} \right) \text{ en kV} \quad (\text{II-105})$$

m_o est le coefficient tenant compte de l'état de surface du câble nu ($m_o=0,83 - 0,87$)

δ est le coefficient tenant compte de la pression et la température atmosphérique (pour $T^\circ=+25^\circ\text{C}$ et $p=1\text{atm}$ $\delta=1$)

m_t est le coefficient tenant compte de la saison, $m_t=1$ lorsqu'il fait beau, $m_t=0,8$ pour un mauvais temps.

r_{cond} est rayon de conducteur,

D_{moy} est distance entre trois phases,

R_{eq} est le rayon moyen des conducteurs.

Afin d'éliminer l'effet couronne c.à.d avoir $U_{cr} > U_s$, on limite les diamètres ou rayons à leurs valeurs minimales. Les valeurs minimales autorisées des diamètres et des sections correspondantes sont données dans le tableau ci-dessous:

Tableau II-3 Les valeurs minimales autorisées des diamètres et des sections correspondantes

Un [KV]	Diamètre admissible en [mm]	Section minimale admissible en [mm ²]
110	11,4	70
150	13,5	95
220	21,6	240
330	33,1	600

Le paramètre g_o ne se manifeste qu'à partir de haute tension : 220 KV, 1750 KV .

Dans les lignes en câble l'effet de couronne n'existe pas mais les pertes transversales existent:

$$\Delta P_{tr \text{ câble}} = U^2 . b_0 . tg \delta \quad (\text{II-106})$$

$U \geq 35\text{KV}$, $tg \delta$, étant une constante relative au diélectrique utilisé.

Conclusion

Dans ce chapitre, on a calculé le différent paramètre électrique d'une ligne aérienne (la résistance R , l'inductance L , la capacité C et la conductance G), pour différentes types biphasé, triphasé, double circuit).

Après déterminer ces paramètre, on doit modéliser ces lignes, si le contenu de chapitre suivant.

Introduction

Dans le chapitre II, on a déterminé les paramètres par phase des lignes aériennes. Donc dans ce chapitre, on exploite ces résultats pour modéliser les lignes aériennes avec différentes longueurs des lignes.

III-1- Modèle de lignes court [6]

On appelle une ligne courte une ligne de longueur comprise entre 50 et 80Km son schéma équivalent est représenté dans la figure III-1.

Dans le modèle de ligne court l'impédance shunt est négligée donc :

$$Z = (r + j\omega L) l = R + jX$$

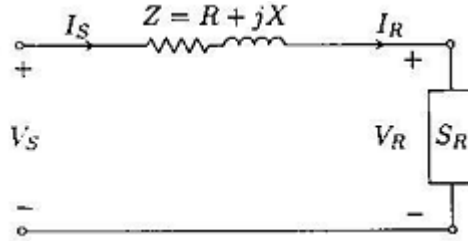


Figure III-1-lignes court

Si une charge triphasée de puissance apparente S_R est connectée à la fin de la ligne de transmission, le courant traversant la charge pour les trois phases est donné par

$$I_R = \frac{S_R^*}{3V_R^*} \quad (\text{III-1})$$

Et la tension de source

$$V_S = V_R + ZI_R \quad (\text{III-2})$$

Dans le cas 1- on a

$$I_S = I_R \quad (\text{III-3})$$

La ligne de transmission peut être représentée par un quadripôle comme indiqué dans Figure III-2.

Et les susdites équations peuvent être représentées par les paramètres en chaîne de quadripôle (ABCD)



Figure .III-2- La ligne de transmission représentée par un quadripôle

$$\begin{cases} V_S = AV_R + BI_R \\ I_S = CV_R + DI_R \end{cases} \quad (\text{III-4})$$

En écrire la forme matricielle
$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Donc
$$\begin{cases} A=1 & B=Z \\ C=0 & D=1 \end{cases} \quad (\text{III-5})$$

III-2-Modèle de lignes moyenne [6]

Les lignes moyennes sont caractères par la longueur comprise entre 80 et 250Km

Dans le calcul ses type de ligne on introduit une impédance composée d'une capacité pur

Tel que Z est la impédance série totale de la ligne donnée par première équation

$$Z = (r + j\omega L) L = R + jX$$

et Y est l'admittance total de le ligne donné par $Y = (j\omega C)L$

III-2-1-le modèle nominal en π

Le schéma modèle nominal π est obtenu comme suit :

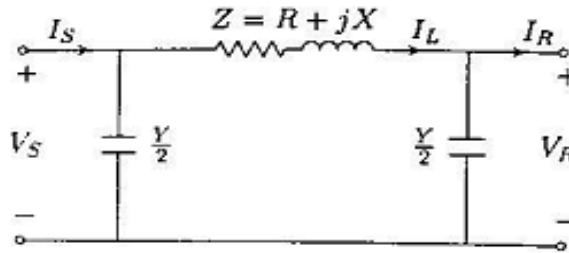


Figure III-3- modèle en π de ligne moyenne

Le courant dans l'impédance série est

$$I_L = I_R + \frac{Y}{2} V_R \quad (\text{III-6})$$

Et la tension

$$V_S = V_R + ZI_L \quad (\text{III-7})$$

On remplace- I_L de l'équation (III-6) dans l'équation (III-7) :

$$V_S = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)V_R + ZI_R \quad (\text{III-8})$$

Par la loi de Kirchhoff

$$I_S = I_L + \frac{Y}{2}V_S \quad (\text{III-9})$$

On remplace l'équation (III-8) dans l'équation (III-9)

$$I_S = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right)V_R + \left(1 + \frac{ZY}{2}\right)I_R \quad (\text{III-10})$$

Donc

$$\begin{cases} A = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) & B = Z \\ C = Y\left(1 + \frac{ZY}{4}\right) & D = \left(1 + \frac{ZY}{2}\right) \end{cases} \quad (\text{III-11})$$

III-2-2-le modèle nominal en T

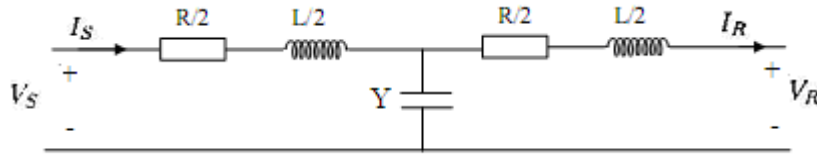


Figure .III-4-modèle en T de ligne moyenne

$$\begin{cases} V_S = \frac{Z}{2}I_1 + \frac{I_S + I_R}{Y} \dots \\ V_R = -\frac{Z}{2}I_R + \frac{I_S - I_R}{Y} \dots \end{cases} \quad (\text{III-12})$$

On réécrit l'équation (III-12) comme :

$$\begin{cases} V_S = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right)I_S - \frac{I_R}{Y} \dots (1) \\ V_R = -\left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y}\right)I_R + \frac{I_S}{Y} \dots (2) \end{cases} \quad (\text{III-13})$$

Déterminer I_S dans l'équation (III-13-(1))

$$I_S = \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) I_R - V_R Y \quad (\text{III-14})$$

On remplace le courant I_S dans relation (III-13-(2))

$$V_S = \left(\frac{Z}{2} + \frac{1}{Y} \right) \left(V_R Y + I_R \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) \right) - I_R \frac{1}{Y} \Rightarrow V_S = \left(\frac{YZ}{2} + 1 \right) V_R + I_R Z \left(\frac{YZ}{4} + 1 \right) \quad (\text{III-15})$$

Donc

$$\begin{cases} A = \frac{Z}{2} + 1 & B = Z \left(\frac{ZY}{2} + 1 \right) \\ C = Y & D = \frac{Z}{2} + 1 \end{cases} \quad (\text{III-16})$$

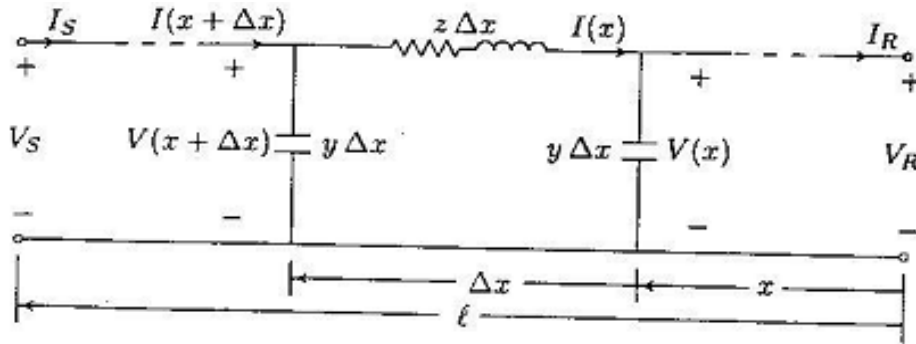
III-3-Module de ligne long

On appelle une ligne long une ligne de longueur supérieure de 250 Km son schéma équivalent est représenté dans la figure III-5.

$$V(x + \Delta x) = V(x) + z \Delta x I(x) \quad (\text{III-17})$$

Divisez sur Δx

$$\frac{V(x + \Delta x) - V(x)}{\Delta x} = z I(x) \quad (\text{III-18})$$



Fugue. III 5- schéma de ligne long

Si limite $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dV(x)}{dx} = z I(x) \quad (\text{III-19})$$

Aussi, de la loi de Kirchhoff

$$I(x + \Delta x) = I(x) + y \Delta x V(x + \Delta x) \quad (\text{III-20})$$

Donc

$$\frac{I(x + \Delta x) - I(x)}{\Delta x} = yV(x + \Delta x) \quad (\text{III-21})$$

Si limite $\Delta x \rightarrow 0$

$$\frac{dI(x)}{dx} = yV(x) \quad (\text{III-22})$$

Si on dérive l'équation (III-19), on a :

$$\frac{d^2V(x)}{dx^2} = z \frac{dI(x)}{dx} = zyV(x) \quad (\text{III-23})$$

On pose :

$$\gamma^2 = zy \quad (\text{III-24})$$

Où γ est appelée la constante de propagation

Donc, on a une équation de deuxième ordre : se forme

$$\frac{d^2V}{dx^2} - \gamma^2 V(x) = 0 \quad (\text{III-25})$$

La solution de cette équation est donnée par :

$$V(x) = A_1 e^{\gamma x} + A_2 e^{-\gamma x} \quad (\text{III-26})$$

Tel que :

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{zy} = \sqrt{(r + j\omega l)(g + j\omega c)} \quad (\text{III-27})$$

Où :

α : Coefficient linéique d'affaiblissement, il caractérise l'affaiblissement de l'onde incidente (appelé aussi constante d'atténuation).

β : Coefficient linéique de phase de l'onde incidente(rad/m)

$$I(x) = \frac{1}{z} \frac{dV(x)}{dx} = \frac{\gamma}{z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) = \sqrt{\frac{y}{z}} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (\text{III-28})$$

On pose

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} \quad (\text{III-29})$$

Où :

Z_c : est appelée l'impédance caractéristique

$Y_c = \sqrt{y/z}$: est appelée admittance caractéristique

Donc :

$$I(x) = \frac{1}{Z} (A_1 e^{\gamma x} - A_2 e^{-\gamma x}) \quad (\text{III-30})$$

Pour les conditions initiales $I(0)=I_R$ et $V(0)=V_R$, on trouve les constants A_1 et A_2 :

$$\begin{cases} A_1 = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} \\ A_2 = \frac{V_R - Z_C I_R}{2} \end{cases} \quad (\text{III-31})$$

On remplace A_1 et A_2 dans les équations (III-29) et (III-30) :

$$\begin{cases} V(x) = \frac{V_R + Z_C I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{V_R - Z_C I_R}{2} e^{-\gamma x} \\ I(x) = \frac{\frac{V_R}{Z_C} + I_R}{2} e^{\gamma x} + \frac{\frac{V_R}{Z_C} - I_R}{2} e^{-\gamma x} \end{cases} \quad (\text{III-32})$$

Donc :

$$\begin{cases} V(x) = \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} V_R + Z_C \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} I_R \\ I(x) = \frac{1}{Z_C} \frac{e^{\gamma x} - e^{-\gamma x}}{2} V_R + Z_C \frac{e^{\gamma x} + e^{-\gamma x}}{2} I_R \end{cases} \quad (\text{III-33})$$

On a

$$\begin{cases} \sinh(x) = \frac{e^{jx} - e^{-jx}}{2} \\ \cosh(x) = \frac{e^{jx} + e^{-jx}}{2} \end{cases} \quad (\text{III-34})$$

L'équation (III-33) devient :

$$\begin{cases} V(x) = V_R \cosh \gamma x + I_R Z_C \sinh \gamma x \\ I(x) = V_R \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma x + I_R \cosh \gamma x \end{cases} \quad (\text{III-35})$$

Donc

$$\begin{cases} V_S = V_R \cosh \gamma l + I_R Z_C \sinh \gamma l \\ I_S = V_R \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l + I_R \cosh \gamma l \end{cases} \quad (\text{III-36})$$

La forme matricielle

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{III-37})$$

On a

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & \sinh \gamma l \\ \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{III-38})$$

Donc

$$\begin{cases} A = \cosh \gamma l & B = Z_C \sinh \gamma l \\ C = \frac{1}{Z_C} \sinh \gamma l & D = \cosh \gamma l \end{cases} \quad (\text{III-39})$$

Le circuit équivalent exact de la ligne longue peut être établi selon le schéma en " π " ou en " T ". Les paramètres du circuit équivalent sont facilement obtenus par comparaison avec ceux relatifs à une ligne moyenne.

D'après le schéma en π , nous avons:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + Y'Z'/2 & Z' \\ Y'(1 + Y'Z'/4) & 1 + 1/2.Y'Z' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{III-40})$$

Pour avoir l'équivalence exacte entre (III-38) et (III-40) .

$$Z' = Z_C \cdot \sinh \gamma l = \sqrt{z/y} \sinh \gamma l = \sqrt{z/y} \frac{l}{l} \frac{\sqrt{z}}{\sqrt{y}} \sinh \gamma l = \frac{zl}{l\sqrt{zy}} \sinh \gamma l = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}.$$

Donc $Z' = Z \cdot K_1$ où $K_1 = \sinh \gamma l / \gamma l$

Pour obtenir le paramètre Z' du circuit équivalent on doit multiplier l'impédance Z par K_1

$$1 + (Y'Z')/2 = \cosh \gamma l \Rightarrow 1 + (Y'Z_C \sinh \gamma l)/2 = \cosh \gamma l$$

$$\Rightarrow \frac{Y'}{2} = \frac{\cosh \gamma l - 1}{Z_C \sinh \gamma l} = \frac{1}{Z_C} \cdot \tanh(\gamma l / 2) = \frac{\sqrt{y}}{\sqrt{z}} \frac{\sqrt{y}}{\sqrt{y}} \frac{l}{l} \tanh(\gamma l / 2) = y l \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh(\gamma l / 2)}{\gamma l / 2}$$

Pour obtenir Y' le paramètre du circuit équivalent on doit multiplier l'admittance Y par K_2

où $K_2 = \tanh(\gamma l / 2) / (\gamma l / 2)$

Conclusion :

Nous avons dans ce chapitre la modélisation des différents types de lignes.

Le premier type la ligne courte entre 50Km et 80 Km elle est modélisée par la résistance inductance en série.

La deuxième type est la ligne moyenne ça longueur entre 80Km et 250Km, elle peut être modélisée par un modèle en π ou en T .

Enfin la ligne longue ça longueur supérieure 250 Km, elle est caractérisée par leur impédance caractéristique et leur constante de propagation γ .

Conclusion général

Après l'étude de ce travail, on conclue que les paramètres électriques (résistance, inductance, capacitance et conductance) varient avec la tension la fréquence et section des conducteurs. La résistance et la conductance varient aussi en fonction de température et la distance s'influent de l'effet de température et la matière utilisée dans la fabrication du conducteur. La distance entre conducteur influe sur l'inductance et la capacitance.

Donc on doit choisie ces paramètres pour obtenir un meilleur résultat pour les conditions suivantes :

- La tension constante à la longueur des lignes.
- Une perte minimale d'énergie.
- Un prix de transport réduit.

Bibliographiée

- [1] **André CHANAL, Jean-Pierre LÉVÊQUE**, « *Lignes aériennes : matériels Conducteurs et câbles de garde* », Technique de l'ingénieur D 4 422.
- [2] **Jean-FRANÇOIS**, « *Lignes aériennes : matériels supports* », Technique de l'ingénieur D 4 424.
- [3] **Xavier DUCOURET**, « *Lignes aériennes : matériels Isolateurs* », Technique de l'ingénieur D 4 423.
- [4] **Groupe renaissance communication**, « *Système d'énergie électrique guide de référence 1998* ».
- [5] **Issouf FOFANA**, « *étude d'une ligne de transmission* » cours Transport et Exploitation d'Énergie Électrique.
- [6] **Hadi SAADAT**, « *Power system analysis* », WCB McGraw-Hill.
- [7] **Talal GUIA**, « *Modélisation des lignes aérienne* », cours quatrième réseaux électriques.