



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique
Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière: Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électriques

Thème

*ETUDE DE LA LIGNE DE
TRANSPORT ÉLECTRIQUE
HAUTE TENSION 220KV*

Etudié par:

Encadreur:

BOUAZIZ Belgacem
KHELIKA Djalel

Dr BEN ATTOUS Djilani

Soutenu Juin 2013

Remerciements

Nous tenons à exprimer nos gratitudeles les plus sincères à dieu qui nous a donné le courage, la puissance et la patience pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à remercier très vivement, Dr BEN ATTOUS Djilani, professeur à l'université d'EL-Oued et directeur de mémoire, pour la confiance qu'il nous accordé à réaliser ce projet ainsi que pour sa grande attention et sa patience tout au long de ce travail.

Nous grandes remerciement aussi s'adressent à tous les enseignants de la filière de genie électrique pour leurs suivis durant notre etude.

Nous remercions tous nos amies et tous nos collègues pour leur soutien moral et pour tellement de choses.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à tous ceux qui ont empruntés le chemin de la connaissance, nous montrant la lumière là ou il n'y avait qu'obscurité auparavant.

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique.....	2
Figure I.2 : Composants d'un pylône.....	4
Figure I.3 : Pylône nappe.....	5
Figure I.4 : Pylône classique.....	5
Figure I.5 : Pylône haubané en V.....	6
Figure I.6 : Pylône tubulaire.....	6
Figure I.7 : Pylône haubané à chaînette.....	7
Figure I.8: Pylône de traversée.....	7
Figure I.9: Portique à treillis.....	8
Figure I.10: conducteurs de ligne aérienne.....	8
Figure I.11: Entretoise d'un faisceau de conducteurs.....	9
Figure I.12: isolateur rigide.....	11
Figure I.13: Isolateur capot et tige.....	12
Figure I.14: isolateur long fut à extrémités métalliques tronconiques.....	13
Figure I.15: isolateur long fut à extrémités métalliques des formes tiges.....	13
Figure I.16: isolateur capot et tige de profil standard.....	14
Figure I.17: isolateur capot et tige de profil Antibrouillard.....	14
Figure I.18: un isolateur capot et tige de profil plat.....	15
Figure I.19: un isolateur capot et tige de profil sphérique.....	15
Figure I. 20: Pollution des Isolateurs.....	16
Figure II.1: Constants distribués au circuit équivalent de la ligne.....	19
Figure II.2: Circuit équivalent de la ligne de transport courte.....	20
Figure II.3: diagramme de phase de la ligne de transport courte à charge inductive.....	21
Figure II.4: diagramme vectorielle de ligne de transport relié à une charge capacitive.....	22
Figure II.5: Le schéma modèle nominal en T.....	25
Figure II.6: Le schéma modèle nominal en π	26
Figure II.7: relation à une phase et neutre du la ligne de transport triphasée.....	31
Figure II.8 : Résistance linéique en fonction de la fréquence.....	37
Figure II.9: Le champ magnétique de la ligne monophasée.....	40
Figure II.10: cycle de transposition de la ligne triphasée.....	41
Figure II.11: capacitance de ligne monophasée.....	42

Figure II.12: capacitance phase à phase.....	43
Figure II.13: capacité phase-neutre.....	43
Figure II.14: ligne triphasée avec un espacement équilatéral.....	44
Figure II.15: Ligne triphasée et leur image.....	45
Figure III.1: Circuit équivalent du réseau électrique.....	47
Figure III.2: Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.....	48
Figure III.3: système simple à deux jeux de barres.....	49
Figure III.4: diagramme de phaseur relatif au système de la figure III.3.....	50
Figure III.5: diagramme de phaseur de la fig. III.4 quand $R = 0$	51
Figure III.6: système a deux J.d.B.....	53
Figure III.7: Circuit équivalent en π d'une ligne électrique.....	54
Figure III.8: Impédance série d'une ligne électrique.....	55
Figure III.9: Susceptance shunt d'une ligne électrique.....	55
Figure III.10: ligne de transport électrique haute tension hypothétique.....	56
Figure III.11: Les dimensions entre les conducteurs et leur images.....	58
Figure III.12: Circuit équivalent de la ligne de transport longue en Π et en T.....	61
Figure III.13: Circuit équivalent de la ligne de transport de notre exemple en Π et en T.....	62

Nomenclatures

Z = impédance totale série par phase en ohm.

Y = admittance série total de la ligne par phase

R = résistance totale série par phase en ohm.

z = l'impédance série linéique d'un conducteur en ohm.

X_L = réactance inductive totale d'un conducteur en ohm.

x : réactance inductive linéique d'un conducteur en ohm.

r = résistance linéique d'un conducteur en ohm.

l = longueur de la ligne.

V_S : la tension simple envoyer à l'extrémité de phase.

V_R : la tension simple obtenu à l'extrémité de phase.

I_S : le courant envoi à l'extrémité de phase.

I_R : le courant obtenue à l'extrémité de phase.

γ = constante par ligne de propagation unitaire

Z_C = impédance caractéristique linéique de la ligne,

Y_C = admittance caractéristique linéique de la ligne,

β = phase (ou variation de phase) constante en radians

J = est la densité de courant [A/m^2].

σ = est la conductivité électrique [$\Omega^{-1}m^{-1}$].

E = est le champ électrique (dans le conducteur) [V/m].

ρ_t = résistivité à une température t en ohm- mètres [$\Omega \cdot m$].

ρ_0 = résistivité à $0^\circ C$ en ohm- mètres [$\Omega \cdot m$].

α = coefficient de température, en $1/^\circ C$.

t = température, en $^\circ C$.

R_t = résistance à une température t , en ohms.

R_0 = résistance à $0^\circ C$, en ohms.

t = température, en $^\circ C$.

R_1 = la résistance du conducteur à la température t_1 .

R_2 = la résistance du conducteur à la température t_2 .

t_1, t_2 = la température du conducteur en degrés Celsius.

VD = la chute de tension due à l'impédance de ligne en volts.

l = longueur de la ligne en kilomètre.

D_m = distance moyenne équivalente ou géométrique (GMD) entre les centres de conducteurs en mètre.

D_s = rayon de la moyenne géométrique (GMR) ou auto-GMD d'un conducteur en mètre,

I = courant de phase en ampères.

T_0 = variant constante avec matériau du conducteur.

I_p = la composante active de courant;

I_q = la composante réactive de courant;

S_D = la puissance apparent demandée.

P_D = la puissance active demandée.

Q_D = la puissance réactive demandée.

ΔV = la chute de tension.

P_{12} = puissances active par phase.

Q_{12} = puissance réactive par phase.

S_G = puissance apparente de générateur.

P_G = puissance active de générateur.

Q_G = puissance réactive de générateur.

S_i = puissance apparente nette injectée au réseaux.

$P_i = F_{ip}$: puissance active nette injectée au réseaux.

$Q_i = F_{iq}$: puissance réactive nette injectée au réseaux.

P_{Lij} = pertes active.

Q_{Lij} = pertes réactive.

b = Susceptance shunt en Siemens.

G = conductance en Siemens.

V_{2n} : la tension à la sortie de la ligne.

I_2 : le courant à la sortie de la ligne.

Sommaire

Introduction générale.....	1
Chapitre I: Généralité sur le réseau de transport à haute tension	
I.1-Introduction.....	2
I.2- Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ.....	3
I.3- Composants d'une ligne de transport à haute tension.....	3
I.3.1- Pylônes.....	3
I.3.1.1-Types de pylônes.....	5
I.3.1.1.1-Pylône nappe.....	5
I.3.1.1.2-Pylône classique.....	5
I.3.1.1.3-Pylône haubané en V.....	6
I.3.1.1.4-Pylône tubulaire.....	6
I.3.1.1.5-Pylône haubané à chaînette.....	7
I.3.1.1.6-Pylône de traversée.....	7
I.3.1.1.7-Portique à treillis.....	8
I.3.2- Conducteurs.....	8
I.3.2.1-Les conducteurs sans nus.....	9
I.3.2.2- Faisceau du conducteur.....	9
I.3.2.3- Câble(s) de garde.....	9
I.3.3- Isolateurs.....	10
I.3.3.1- Définition.....	10
I.3.3.2- Fonctionnement et constitution d'un isolateur.....	10
I.3.3.3- Principaux types d'isolateurs.....	11
I.3.3.3.1-Isolateurs de type rigide.....	11
I.3.3.3.2- Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne.....	12
I.3.3.3.2.1- Isolateurs à capot et tige.....	12
I.3.3.3.2.2-Isolateur à long fut.....	13
I.3.3.3.2.3- Les éléments utilisés pour construire une chaîne d'isolateur.....	14
I.3.3.4- Choix des Isolateurs.....	16
I.3.3.5- Pollution des Isolateurs.....	16
I.4- Ligne Haute Tension et santé.....	17
I.5-Conclusion.....	18

Chapitre II: Modélisation et calcul des paramètres de réseau de transport à haute tension.

II.1-Introduction.....	19
II.2-Circuits équivalents de ligne de transport.....	19
II.2.1- Ligne de transport courte (soit 50km, jusqu'à 80 km).....	20
II.2.2- lignes de transport moyenne (soit 150 km, jusqu'à 240 km).....	24
II.2.3- ligne de transport longue (au-dessus de 240 km).....	30
II.3-Résistance longitudinale.....	36
II.3.1-Variation de la résistance avec la température.....	38
II.4- Réactance longitudinale (Inductance).....	39
II.4.1lignes aériennes monophasés.....	39
II.4.2 lignes aériennes triphasées.....	41
II.5-capacitance et réactance capacitive.....	42
II.5.1- lignes aériennes monophasés.....	42
II.5.2-Lignes aériennes triphasées.....	44
II.5.3-Effet de la terre sur la capacité de ligne triphasé de transport.....	44
II.6-Conclusion.....	46

Chapitre III: La chute de tension et les pertes dans la ligne à haute tension.

III.1-Introduction.....	47
III.2- Chute de tension sur une ligne.....	47
III.3-Transit de puissance et chute de tension dans une liaison.....	49
III.3.1-Modèle et relations principales.....	49
III.3.2 Effet du transport de puissance active et réactive.....	51
III.3.3 Transport de puissance réactive à longue distance.....	51
III.3.4 Expressions des transits en fonction des tensions.....	52
III.4- Les pertes de puissance dans les lignes.....	53
III.5-L'impédance et la Susceptance d'une ligne électrique.....	54
III.5.1-Impédances séries.....	55
III.5.2-Susceptance shunt.....	55
III.6- Application.....	56
III.6. 1-Calcul de la résistance.....	57
III.6. 2-Calcul de l'inductance.....	57
III.6. 3-Calcul de la capacitance.....	57

III.6. 4-Effet de la terre sur la capacité de ligne.....	58
III.6. 5-Calcul de l'impédance z et l'admittance y	59
III.6. 6- Calcul de la constante de propagation γ	59
III.6. 7- Calcul de l'impédance caractéristique Z_c	59
III.6. 8- la tension simple à la sortie de la ligne V_{2n}	60
III.6. 9- le courant à la sortie de la ligne I_2	60
III.6. 10- Calcul des constantes A, B, C , et D de la ligne.....	60
III.6. 11-Circuit équivalent de la ligne de transport longue.....	61
III.6. 12- Calcul de la tension et du courant d'entré.....	62
III.6. 13- Calcul de la chute de tension.....	63
III.6. 14- Calcul de la puissance active et réactive d'entrée et de sortie.....	63
III.6. 15- Calcul des pertes de puissance.....	64
III.6. 16- Le rendement de la ligne.....	64
III.7-Conclusion.....	64
Conclusion générale.....	65

Introduction générale

Les **lignes à haute tension** sont les lignes principales des réseaux de transport d'électricité. Elles peuvent être aussi bien aériennes que souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes. Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques.

Le choix d'utiliser des lignes à haute tension s'impose, dès qu'il s'agit de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures à quelques kilomètres. Le but est de réduire les chutes de tension en ligne, les pertes en ligne, et également d'améliorer la stabilité des réseaux.

Un autre avantage non négligeable du courant alternatif est la suppression du collecteur donc des problèmes de commutation dans les alternateurs ce qui a permis de construire des alternateurs de grande puissance à moyenne tension. Les réseaux étaient d'abord monophasés, puis triphasés (2.3 kV en 1893) et à différentes fréquences (28Hz à 133Hz). Progressivement, la nécessité de mise en fonctionnement en parallèle et d'interconnexion des différents réseaux a conduit à la standardisation de la fréquence :[1]

- 60 Hz aux Etats Unis et au Canada.
- 50 Hz pour la majorité des pays en Afrique, Asie et Europe.

Les niveaux de tensions ont eux aussi évolué graduellement jusqu'à atteindre aujourd'hui l'Ultra Haute tension 765 kV en service aux Etats Unis depuis 1969. Le transport d'énergie électrique sur de très grandes distances, est devenu plus avantageux en courant continu qu'en alternatif et ce, grâce au développement de l'électronique de puissance. Ainsi, il est plus économique de convertir la THT ou UHT de l'alternateur au continu, de transporter l'énergie électrique à l'aide de deux lignes et de la reconvertir à l'autre extrémité. Des études ont montré qu'il était avantageux de recourir au courant continu lorsqu'il s'agissait de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures ou égales à 500 km. [1]

Notre travail consiste à une étude sur le réseau de transport haute tension 220 kv, nous avons cherché à des formules qui calculent les paramètres R-L-C de réseau, puis on a appliqué cette équation sur un réseau spécifique. Vu la consistance de ce mémoire, le plan de travail a été organisé sur trois chapitres :

- ❖ Le premier chapitre traite une présentation générale sur le réseau de transport électrique,
- ❖ Le deuxième chapitre présente les différents types de schéma équivalent de ligne de transport à haute tension, ainsi que les différentes équations par lesquelles on calcul les valeurs des paramètres.
- ❖ Le troisième chapitre travaillé pour calculer la chute de tension et les pertes dans la ligne de transport à haute tension, et nous avons donné un exemple pour calculer leurs paramètres.

I.1-Introduction:

Le rôle du réseau aérien de transport est d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales situées à différents endroits du territoire jusqu'au réseau de distribution qui en dernier lieu alimente les charges. Les lignes de transport assurent aussi l'interconnexion des réseaux régionaux, ce qui permet, non seulement d'assurer une répartition économique de l'énergie électrique dans les régions elles-mêmes dans les conditions normales d'exploitation, mais aussi, un transfert inter-régional de l'énergie, dans les situations d'urgence.[1].

Un réseau électrique est généralement hiérarchisé par niveau de tension, celui-ci est fractionné en trois principales subdivisions à savoir le réseau de transport, de répartition et de distribution. Une notion de frontière peut être définie entre les niveaux de tension du réseau électrique, ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs.[5].

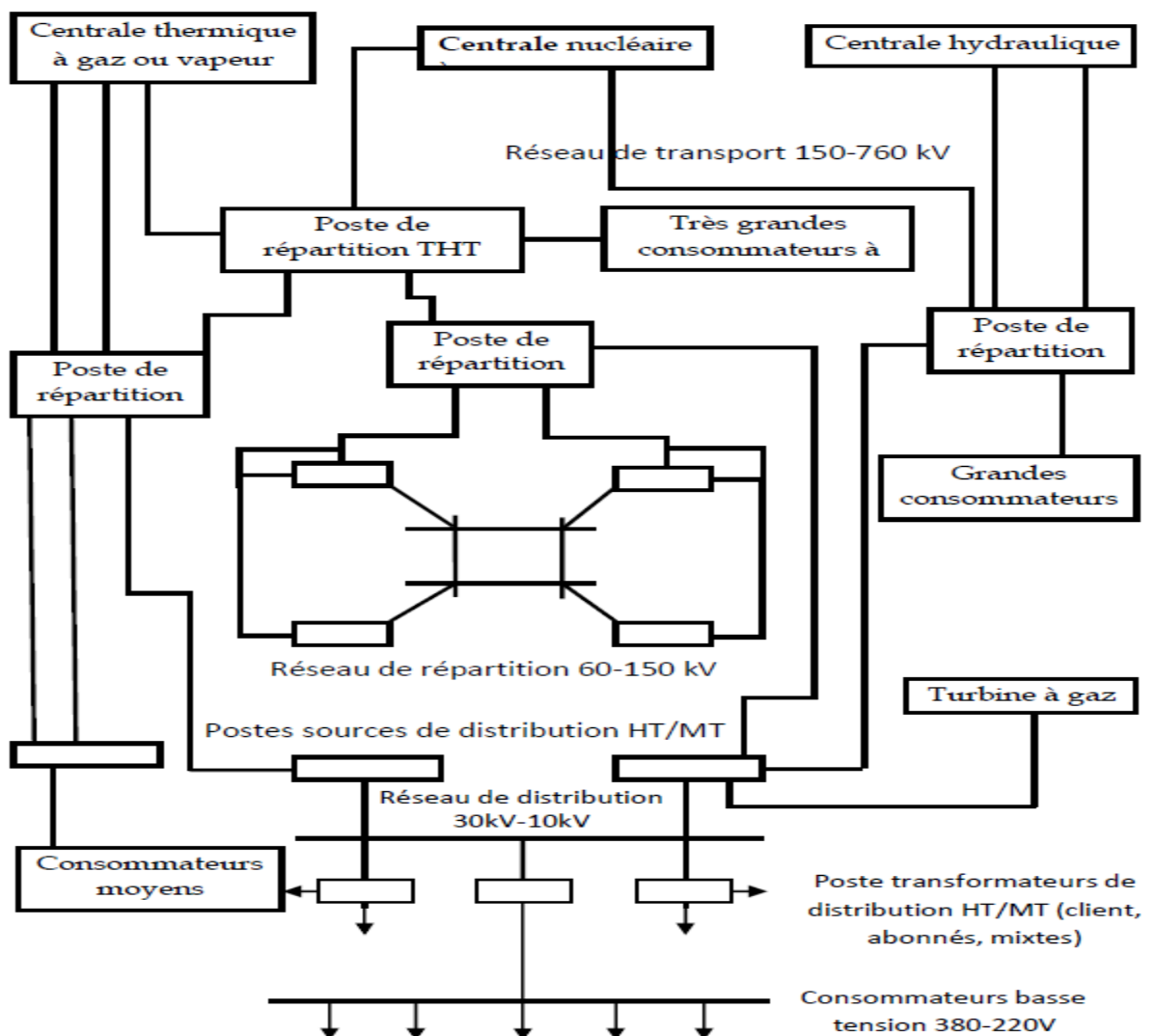


Figure (I.1) : Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique.[1]

I.2- Gamme des tensions utilisées par le groupe SONELGAZ :

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (SONELGAZ) définit les niveaux de tension alternative comme suit :

Domaines de Tension		Valeur de la tension composée nominale (Un en Volts)	
		Tension Alternatif	Tension Continu
Très Basse Tension (TBT)		$Un \leq 50$	$Un \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 \leq Un \leq 500$	$120 \leq Un \leq 750$
	BTB	$500 \leq Un \leq 1000$	$750 \leq Un \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA ou MT	$1000 \leq Un \leq 50\,000$	$1500 \leq Un \leq 75\,000$
	HTB	$Un > 50\,000$	$Un > 75\,000$

Tableau(I.1) : Tableau des domaines de tension [6].

Le réseau de transport (en Algérie 225kV, 400kV) ou réseau de haute tension de niveau B (HTB). Sur ce réseau les centrales de production classique sont connectées comme les centrales thermiques, hydrauliques de l'ordre du millier de mégawatts. Ces réseaux ont une architecture maillée, ainsi les productions ne sont pas isolées mais toutes reliées entre elles, cette structure permet une sûreté de fonctionnement accrue par rapport à une structure de réseau dite radiale puisqu'elle assure la continuité du service ou d'alimentation en cas d'aléas comme la perte d'une ligne, d'une productions, etc.[5]. En effet, lors de l'ouverture d'une ligne, le fait d'avoir cette structure maillée permet au flux de puissance de trouver un nouveau chemin pour contourner cette ligne en défaut et donc de garantir la continuité de l'alimentation en aval du problème. C'est à ce niveau de tension que sont assurées les interconnexions entre régions au niveau nationale et les échanges(importation/exportation) d'énergie électrique au niveau internationale (ex : Hassi Ameur(Algérie) – Bourdim (Maroc) et El-hadjar (Algérie) – Djendouba (Tunisie), en 400 kV).[5]

I.3- Composants d'une ligne de transporte à haute tension:

I.3.1- Pylônes:

Les pylônes supportent les conducteurs des lignes aériennes à haute tension, du poste de départ d'une centrale jusqu'aux postes sources et aux postes satellites, plus près des endroits habités.

Leur forme, leur hauteur et leur robustesse, ou résistance mécanique, dépendent des contraintes auxquelles ils sont soumis. L'électricité ne passe pas dans les pylônes, à moins que la foudre frappe le câble de garde, placé au sommet du support ; ce câble vise à protéger les conducteurs en permettant à la décharge de la foudre de se rendre jusqu'au sol en passant par le pylône.[11]

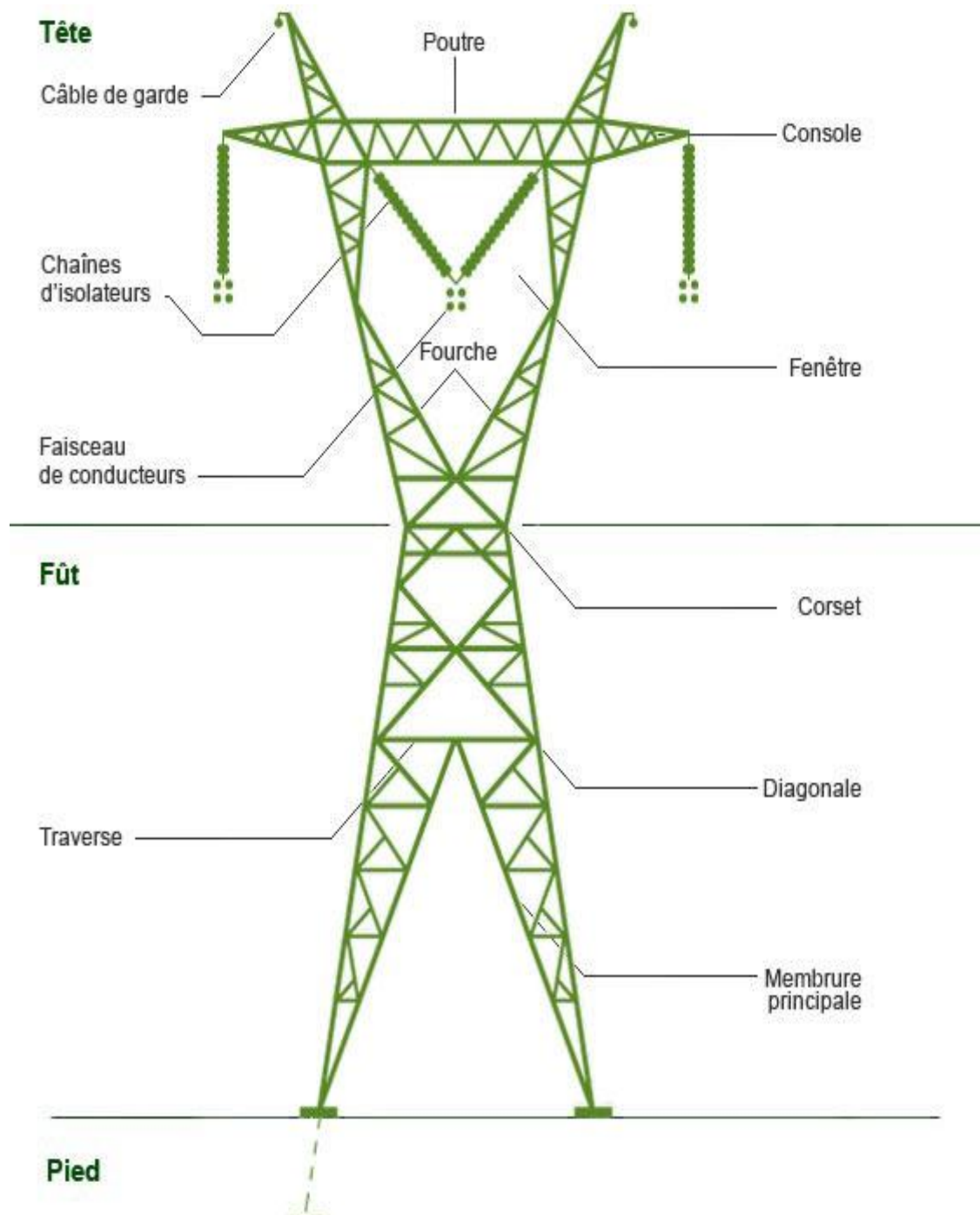


Figure (I.2) : Composants d'un pylône[11]

I.3.1.1-Types de pylônes:

I.3.1.1.1-Pylône nappe:

C'est le pylône le plus utilisé pour les lignes de transport. Il sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 735 000 volts. Ce pylône convient aux lignes qui traversent des terrains très accidentés, car il peut être assemblé facilement.

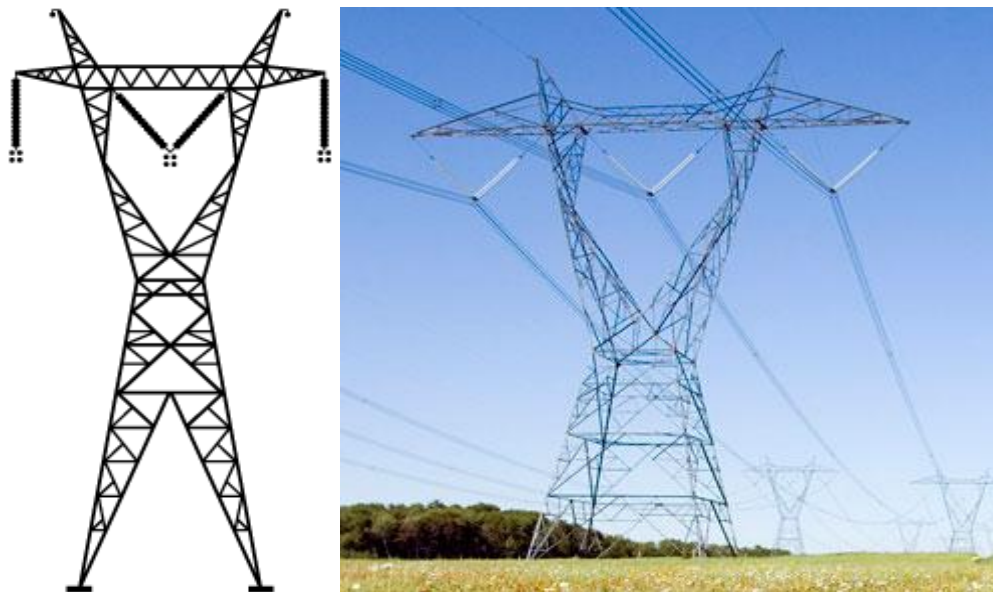


Figure (I.3) : Pylône nappe

I.3.1.1.2-Pylône classique:

Occupant une place réduite au sol, ce pylône est utilisé pour des paliers de tension allant de 110 000 à 315 000 volts. Sa hauteur varie entre 25 et 60 mètres.

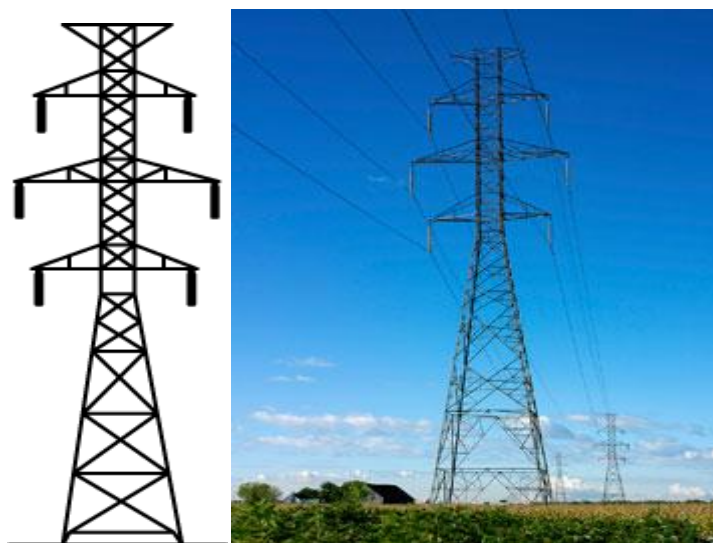


Figure (I.4) : Pylône classique

I.3.1.1.3-Pylône haubané en V:

Ce pylône est utilisé pour les paliers de tension allant de 230 000 à 735 000 volts, principalement pour les lignes en provenance des complexes. Il a l'avantage d'être plus économique que les pylônes classiques ou à armement en nappe.

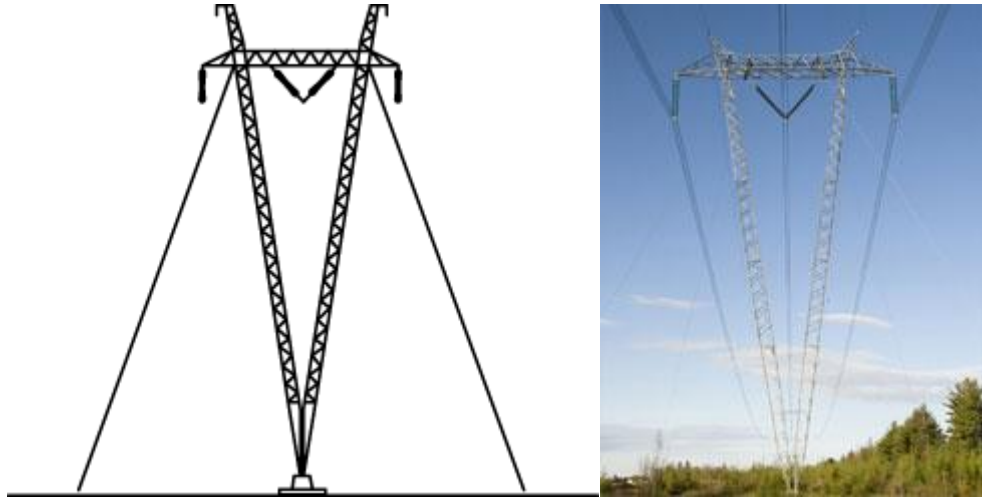


Figure (I.5) : Pylône haubané en V¹

I.3.1.1.4-Pylône tubulaire:

Ce support porte également le nom poétique de pylône « muguet ». Il est moins massif que les autres pylônes et s'intègre plus facilement au milieu. On l'utilise de plus en plus dans les centres urbains. Il mesure entre 27 et 45 mètres et sert aux paliers de tension allant de 110 000 à 315 000 volts.

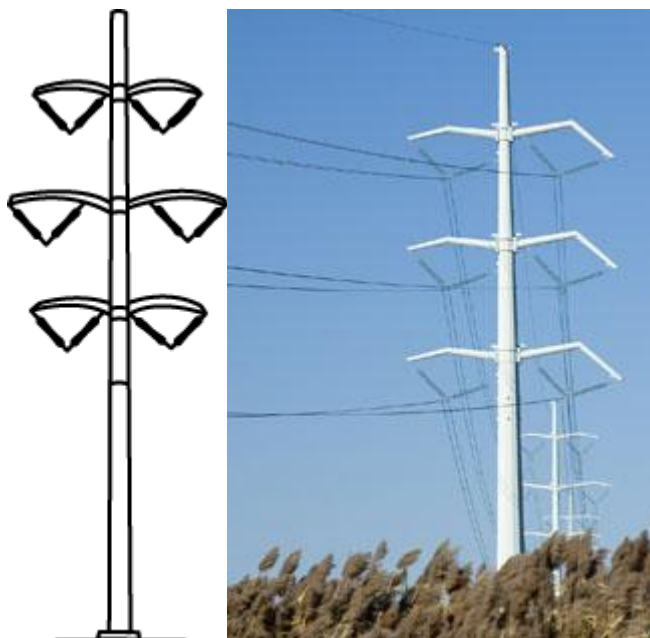


Figure (I.6) : Pylône tubulaire

¹ Dans l'image réelle les cordes qui tire le pylône n'apparaissent pas à cause de la luminosité de la lumière

I.3.1.1.5-Pylône haubané à chaînette:

Facile à monter et de fabrication simple. Il supporte des conducteurs à 735 000 volts. Ce type de pylône nécessite moins d'acier galvanisé que le pylône haubané en V ; il est donc moins lourd et moins cher.

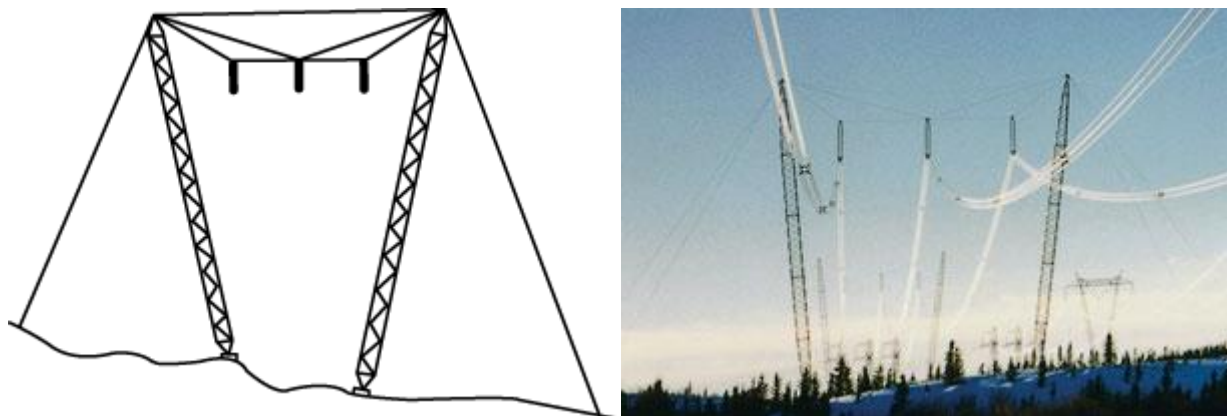


Figure (I.7) : Pylône haubané à chaînette

I.3.1.1.6-Pylône de traversée:

Les pylônes les plus imposants d'Hydro-Québec sont utilisés pour la traversée aérienne de grands cours d'eau, comme la rivière Saguenay ou le fleuve Saint-Laurent à la hauteur de l'île d'Orléans.

Cependant, il existe un autre moyen d'atteindre la rive opposée : sous le cours d'eau. Hydro-Québec possède une ligne de ce type, et elle constitue une réalisation inédite. En 1990, Hydro-Québec a effectivement construit la première traversée sous-fluviale de câbles électriques à 450 000 volts à courant continu dans le monde : son tunnel relie la rive nord près de Girondines et la rive sud à proximité du poste de Lotbinière.



Figure (I.8): Pylône de traversée

I.3.1.1.7-Portique à treillis:

Conçus pour les lignes à 735 000 volts, les portiques à treillis sont principalement utilisés en zone agricole afin de réduire l'encombrement au sol.

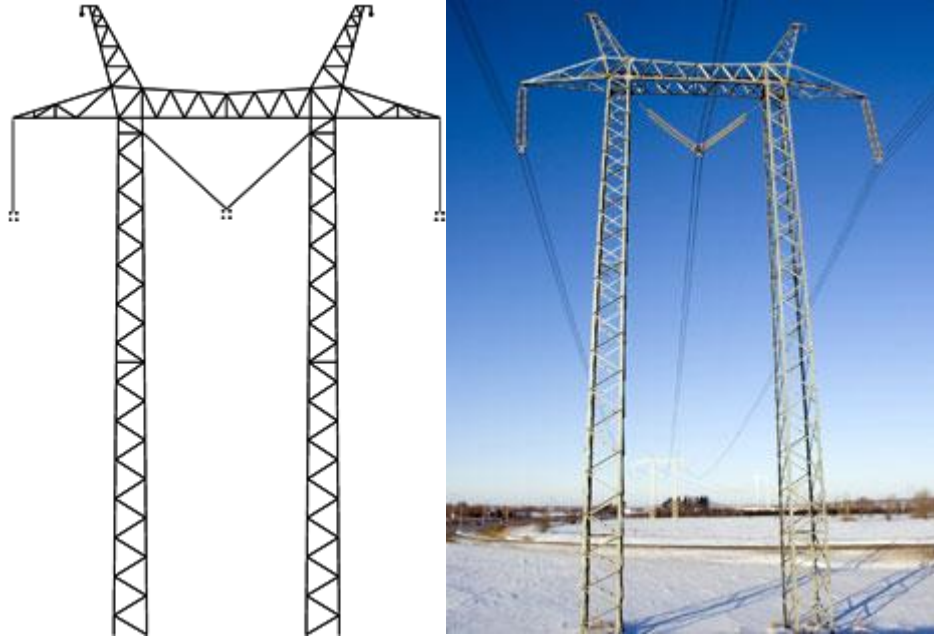


Figure (I.9): Portique à treillis

I.3.2- Conducteurs :[17]

Les conducteurs transmettent l'énergie électrique. la plupart des conducteurs à haute tension sont en aluminium avec un centre acier en lequel assure la résistance mécanique du câble.



Figure (I.10): conducteurs de ligne aérienne

I.3.2.1-Les conducteurs sans nus:

C'est l'air qui leur sert d'isolant. Chaque conducteur est toronné , c'est-à-dire formé de plusieurs brins enroulés ensemble . Cela lui confère une plus grande souplesse et une plus grande surface exposée à l'air, caractéristique que refroidit le conducteur et qui augmente par conséquent sa conductivité. En effet , le métal chaud ,plus résistant au passage de l'électricité, transforme une partie plus ou moins grande l'énergie électrique en énergie thermique, une forme de perte électrique.

I.3.2.2- Faisceau du conducteur:

Un faisceau de conducteurs est un groupe de deux, trois ou quatre conducteurs; leur écartement constant est assuré par une entretoise.

- ❖ L'entretoise amortisseur sépare les conducteurs d'un faisceau voir figure(I.11).

Tout en contrôlant les vibrations causées par le vent et l'accumulation de glace.



Figure (I.11): Entretoise d'un faisceau de conducteurs

Le courant alternatif produit par les centrales et acheminé sur les lignes à haute tension est divisé en trois parties, ou phases.

Les pylônes à haute comportent trois faisceaux de conducteurs, un par phase de courant.

Les faisceaux permettent de réduire les pertes par effet couronne, le bruit audible et les interférences radio sur les lignes à haute tension. Ils optimisent ainsi le transport de l'électricité: par exemple,

quartes petits conducteurs de 3 cm de diamètre sont aussi efficaces qu'un seul conducteur de 46 cm de diamètre, qui serait en outre beaucoup plus lourd.

I.3.2.3- Câble(s) de garde: [12]

Toutes les lignes HTB neuves doivent être équipées de câble(s) de garde. La mise en place de câbles de garde au-dessus des conducteurs permet d'assurer la protection de l'ouvrage contre les coups de foudre directes. Chaque câble de garde est relié électriquement à la terre. Sa fonction est de capter les coups de foudre directes afin qu'ils n'atteignent le câble conducteur actif que dans une proportion limitée.

- Afin de déterminer la position optimum des câbles de gardes par rapport aux conducteurs, le conducteur de l'ouvrage devra utiliser le modèle électro géométrique décrit dans la publication CIGRE².

I.3.3- Isolateurs: [7],[8]

Les équipements hautes tension (H.T) des réseaux aériens de transport de l'énergie électrique sont supposés opérer de façon fiable sous des conditions environnementales spécifiques pour lesquelles ils sont prévus. En particulier, les isolateurs, qui représentent relativement un faible pourcentage dans le prix des lignes aérienne, constituent un élément essentiel dans le bon fonctionnement de ces lignes. Leurs rôles est d'assuré l'isolement électrique entre les parties portées à la H.T. ou entre les parties H.T et les parties mise à la terre. Depuis plusieurs années, l'une des principales cibles dans les travaux de recherche et de développement dans le champ de transmission et de la distribution électrique a été la diminution du nombre et de la durée des interruptions de l'alimentation en énergie électrique de consommateurs.

Une quantité importante d'isolateurs est utilisées sur les réseaux aériens de transport de l'énergie électrique et, en pratique , ces isolateurs sont employés dans différents environnements tels que tropical, arctique, côtier, atmosphère polluée, etc. [7]

I.3.3.1- Définition:

L'isolateur est un matériau isolant solide que présente une très grande résistance au passage du courant et dont la conductibilité est pratiquement nulle. Il est utilisé pour isoler les conducteurs ou les pièces sous tension afin d'empêcher les courts-circulations, les pertes de courant et les charges d'électrocution.

I.3.3.2- Fonctionnement et constitution d'un isolateur:

Les isolateurs sont des composants indispensables au transport de l'énergie électrique. Leur fonction est de réaliser une liaison mécanique entre des conducteurs portés à des potentiels différents accrochés aux pylônes des lignes aériennes, ils maintiennent les conducteurs dans la position spécifiée (isolateurs d'alignement et d'ancrage), ils assurent la transition entre l'isolant interne (huile, SF6) et l'isolant externe, ils permettent de raccorder les matériels électriques au réseau (traversées de transformateurs) et ils constituent, également, l'enveloppe de certains appareils (disjoncteurs, parafoudres, réducteurs de mesure).

² Le **Conseil international des grands réseaux électriques** ou **CIGRÉ** est une organisation mondiale dans le domaine de l'électricité à haute tension. Il a été fondé en France en 1921. On y traite les aspects techniques et économiques des réseaux, mais aussi les aspects environnementaux et réglementaires.

Les matériaux isolants solides les plus utilisés sont essentiellement le verre trempé et la porcelaine. Mais les résines synthétiques commencent aussi à être utilisées.

Les isolateurs sont conçus et dimensionnés pour résister aux contraintes prévisibles introduites par l'environnement. Du point de vue électrique, l'isolateur est considéré comme étant deux électrodes dont l'intervalle comporte trois zones constituant trois isolants en parallèles ayant des comportements différents, qui sont les suivants:

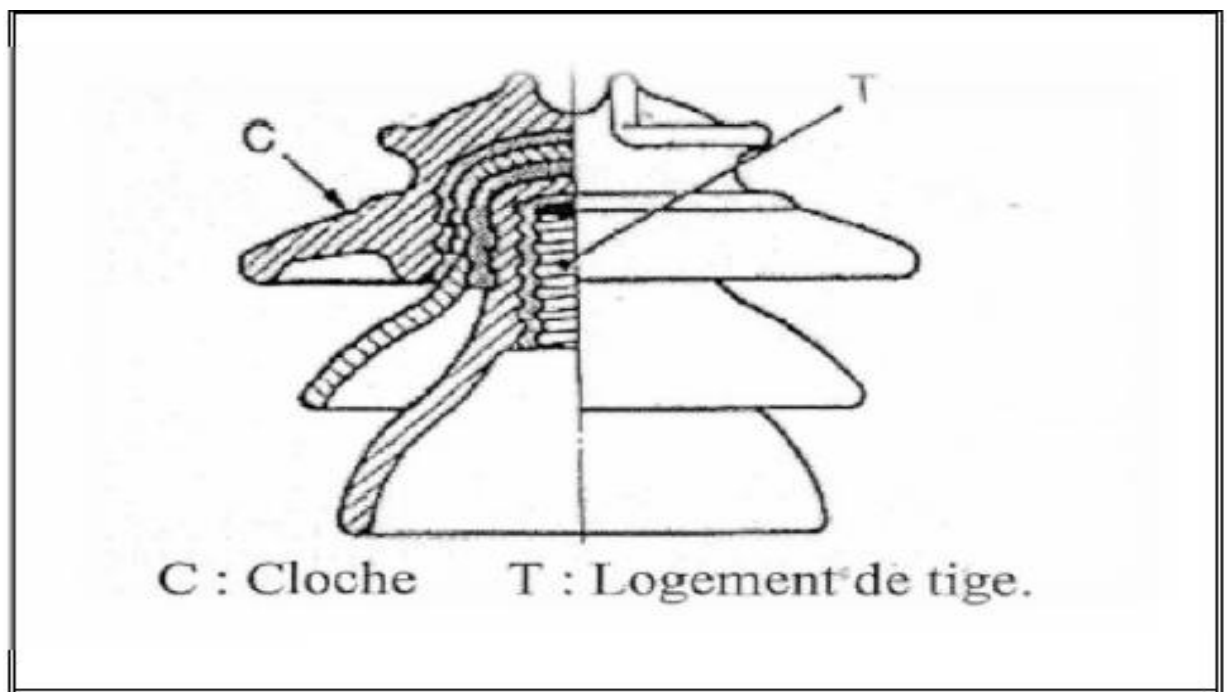
- ❖ L'intervalle d'air.
- ❖ Le matériau diélectrique.
- ❖ L'interface air-matériau diélectrique (la longueur de l'interface constitue la ligne de fuite ligne le long de laquelle circulait le courant de fuite).

I.3.3- Principaux types d'isolateurs:

On peut distinguer deux principaux types d'isolateurs: les isolateurs de type rigide et les éléments de chaîne

I.3.3.1-Isolateurs de type rigide:

Un isolateur rigide (Fig.I.12) est relié au support par une ferrure fixe. Tous les isolateurs rigides normalisés sont livrés avec une douille scellée de telle façon qu'ils puissent être vissés directement sur les ferrures correspondantes. La céramique et le verre sont les deux matériaux utilisés pour les isolateurs rigides.



Figure(I.12): isolateur rigide.

I.3.3.2- Isolateurs suspendus ou éléments de chaîne:

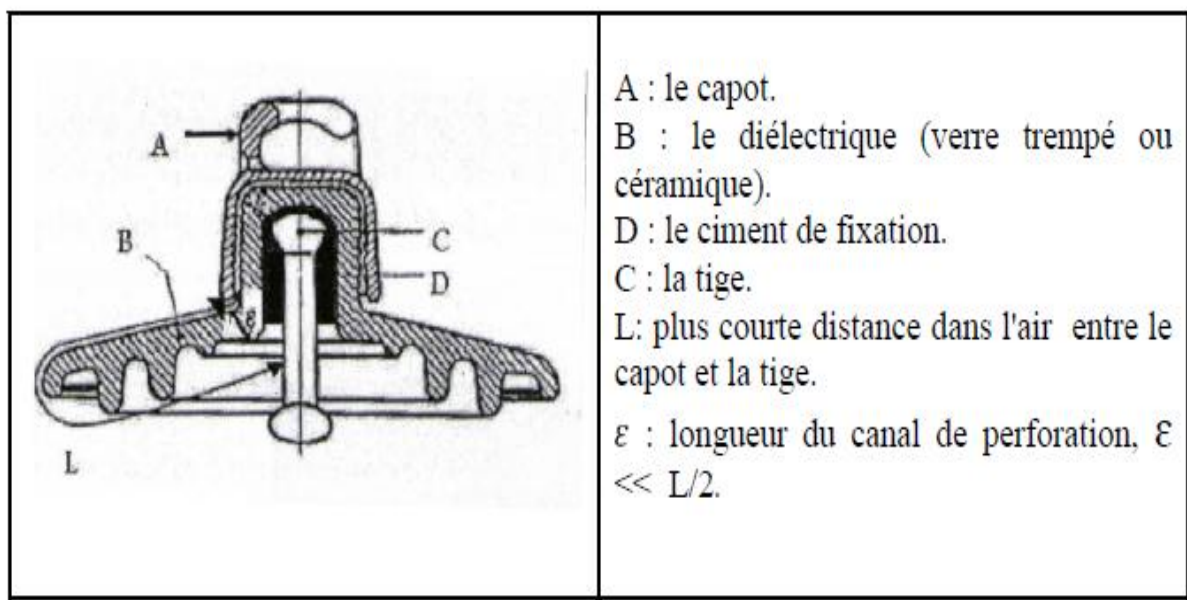
C'est un isolateur constitué par un matériau isolant équipé de pièces métalliques de liaison, nécessaires pour le relier de façon flexible à d'autres éléments de chaîne, à la pince de suspension du conducteur ou au support, ces éléments sont soumis principalement à des efforts de traction. Il sont généralement utilisés en suspension et forment des chaînes d'isolateurs soit verticales (chaîne d'alignement), soit horizontales (chaînes d'ancrages). Il existe deux types principaux d'éléments de chaîne.

- L'isolateur capot et tige.
- L'isolateur long fut.

A- Isolateurs à capot et tige:

L'isolateur capot et tige est constitué d'un bloc isolant portant à sa partie supérieure un capot scellé en fonte malléable et à l'intérieur une tige à acier, avec cannelures et dont la tête conique est également scellée dans le verre (ou la porcelaine). L'extrémité inférieure de cette tige est arrondie et a les démentions voulues pour pénétrer dans le capot de l'élément suivant, et y être maintenue par une goupille. L'assemblage consiste à effectuer un scellement du capot et du diélectrique par du ciment, puis celui de la tige et du diélectrique.

La coupe de l'isolateur capot-tige est schématisée à la figure (Fig I.13)



Figure(I.13): Isolateur capot et tige

I.3.3.2.2-Isolateur à long fut :

Il est constitué d'un cylindre plein en céramique, en porcelaine ou en matériaux synthétiques, muni d'ailettes (fig.I.14) (fig.I.15). A chaque extrémité est fixée une pièce métallique de liaison. Celle-ci peut être enveloppante en forme de capot scellé autour des extrémités tronconiques prévues sur le cylindre, ou bien en forme de tige scellée dans une cavité prévue à cet effet.

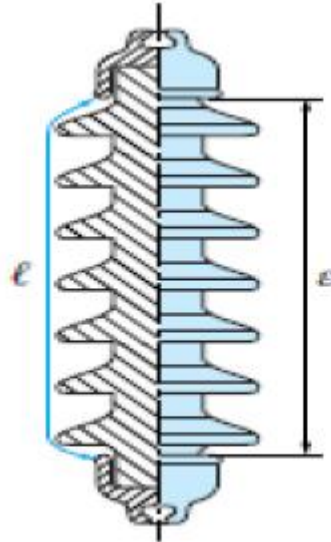


Figure (I.14) isolateur long fut à extrémités métalliques tronconiques.

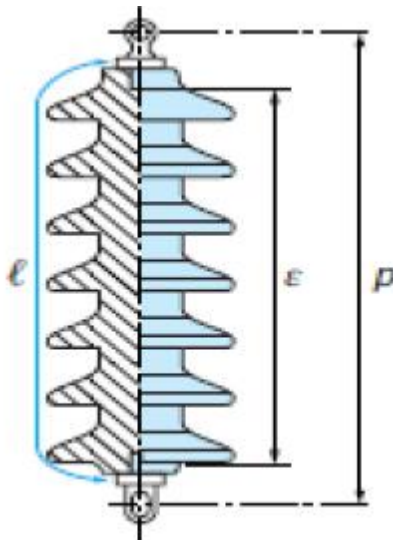


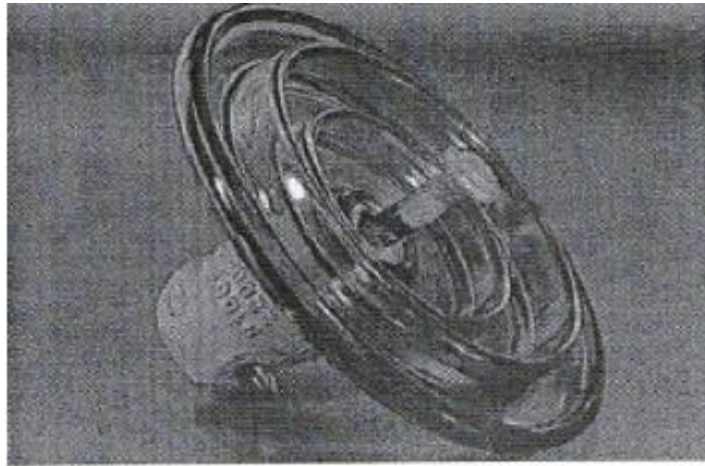
Figure (I.15) isolateur long fut à extrémités métalliques des formes tiges

I.3.3.2.3- Les éléments utilisés pour construire une chaîne d'isolateur:

De tels isolateurs peuvent être utilisés unitairement ou en série de plusieurs éléments en fonction de leur longueur et du niveau d'isolement requis.

A- Profil standard:

La faible profondeur, l'espacement entre les (nervures) et la ligne de fuite moyenne permettent l'utilisation de ce profil dans une zone de pollution modérée

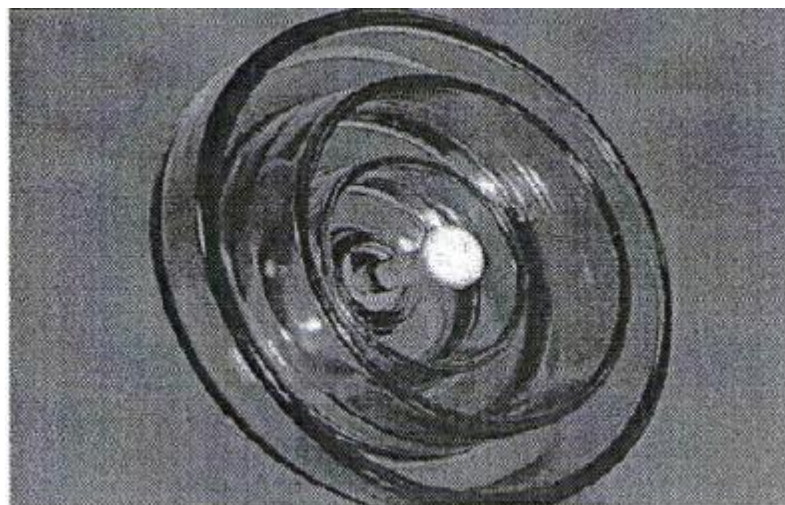


Figure(I.16):isolateur capot et tige de profil standard

B- Profil antibrouillard:

Plus large que le profil standard, l'écartement entre les anneaux permet un bon nettoyage par le vent ou pluie et facilite le lavage manuel si nécessaire.

L'espacement prévient également l'apparition d'arcs entre les anneaux adjacents dans des conditions sévères de pollution.



Figure(I.17):isolateur capot et tige de profil Antibrouillard

-

C- Profil plat:

L'élimination complète des rainures internes réduit l'accumulation des agents polluants sur la surface basse, grâce au courant d'air, cette conception est particulièrement efficace dans les zones désertiques ou l'auto lavage est pue fréquent par la pluie.

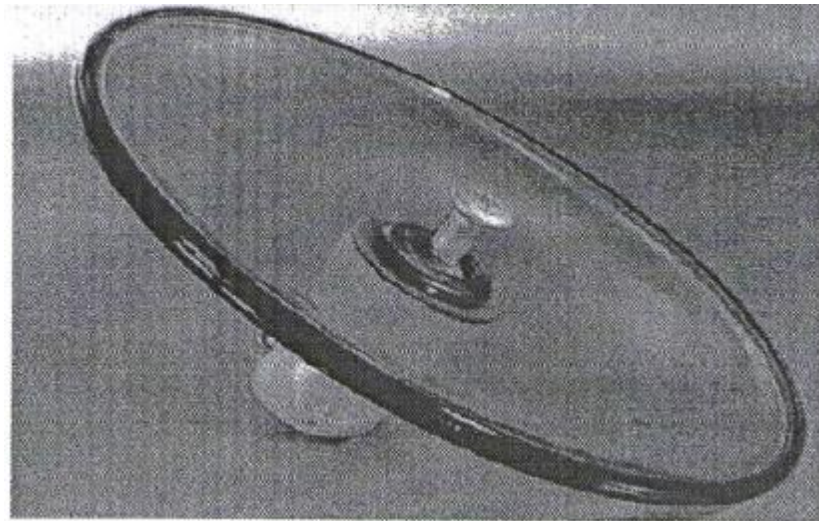


Figure (I.18):un isolateur capot et tige de profil plat

D- profil sphérique:

Ce type de profil donne une ligne de fuite équivalente au profil standard, mais l'absence d'anneaux facilite le nettoyage manuel.

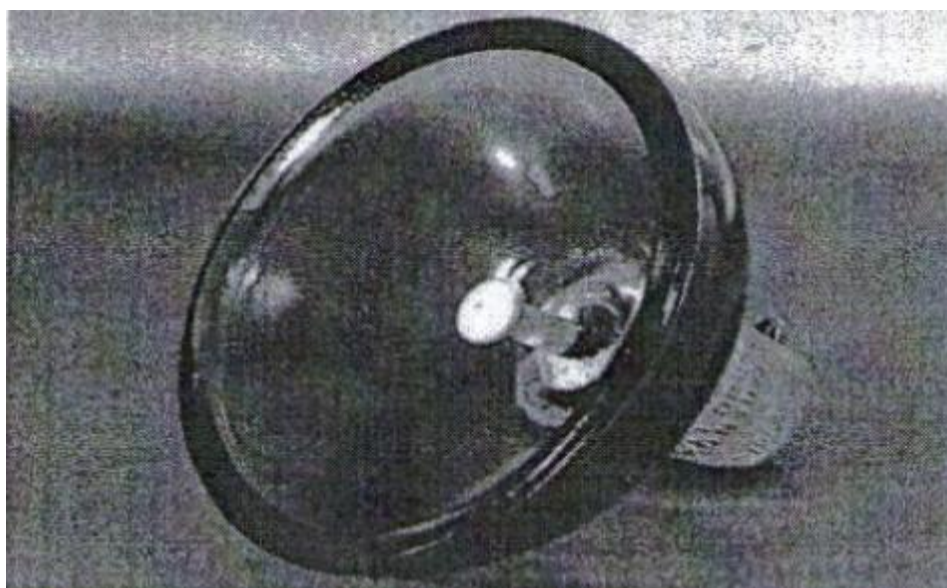


Figure (I.19):un isolateur capot et tige de profil sphérique

I.3.3.4- Choix des Isolateurs:

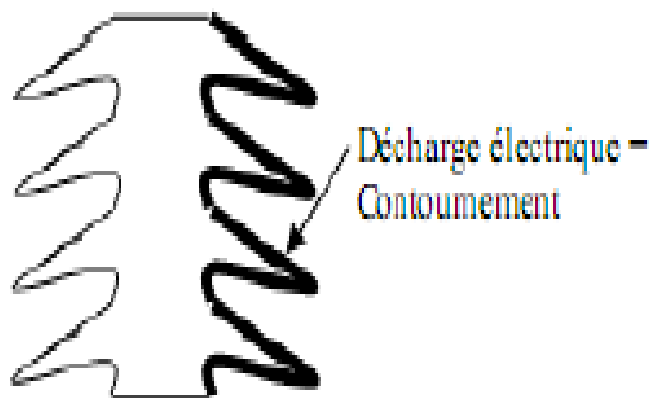
Les isolateurs entrent pour un pourcentage très modeste de l'ordre de 7%, dans le prix d'une ligne aérienne moyenne tension. Cependant, ils sont un élément essentiel dont dépend la sécurité d'exploitation, la qualité et la continuité de service.

Les isolateurs les mieux adaptés à un environnement donné sont ceux qui retiennent le taux de dépôts polluants le moins élevé, c'est-à-dire ceux qui possèdent les meilleures propriétés d'auto-nettoyage.

I.3.3.5- Pollution des Isolateurs:

La pollution est un phénomène qui constitue un sérieux problème sur l'isolement des ouvrages de haute tension, dont il faut tenir compte lors du dimensionnement de l'isolement des lignes de haute tension. Ceci est dû à la formation de couches plus ou moins conductrices sur la surface des isolateurs. Ces couches peuvent engendrer une diminution considérable de la résistivité superficielle des surfaces des isolants et par suite la diminution de la tension de tenue des isolateurs.

L'échauffement de la couche polluante conductrice humidifiée, provoqué par la circulation des courants de fuite sur la surface des ces isolateurs, entraîne des assèchements locaux de la couche de la pollution et l'apparition d'arcs de petite longueur (arcs partiels). Dans certaines conditions, ces arcs partiels peuvent se développer le contournement total des isolateurs, en connectant l'extrémité sous haute tension à celle mise à la terre, et conduisant ainsi à la mise hors service de l'ensemble de l'installation.



Figure(I. 20): Pollution des Isolateurs

-

I.4- Ligne Haute Tension et santé:[18]

Les lignes Haute Tension (HT) et Très Haute Tension (THT) près ou au-dessus des habitations génèrent des craintes et des questionnement, quant à leurs conséquences sur la santé des riverains. La circulation du courant électrique dans une ligne Haute Tension ou Très Haute Tension crée des champs magnétiques à très basses fréquences. Ces champs sont potentiellement dangereux pour la santé humaine, et particulièrement pour celle des enfants.

Une étude du Centre de Recherche et d'Information indépendantes sur les Rayonnements Electromagnétiques (CRIIREM) donne les premières conclusions sur les conséquences sanitaires des lignes THT début 2008. Une comparaison entre des riverains exposés à une ligne THT de 2x400 000 volts et des riverains non exposés est réalisé:

- Deux fois plus de dysfonctionnement sur les appareils électriques et électroniques des riverains exposés sont constatés.
- Des troubles du sommeil, de la mémoire, de l'audition, des maux de tête, des états dépressifs sont recensés chez les riverains exposés. Ces troubles disparaissent lorsqu'ils quittent la zone THT .
- Des leucémies, cancers de sein et de la thyroïde sont détectés en plus grand nombre chez les riverains exposés.
- Des courants parasites peuvent apparaître dans des structures métalliques (portails, abreuvoirs, cornadis...) et nuire aux animaux.

Une étude Britannique publiée par les recherches de l'université d'Oxford démontre que le risque de leucémie augmente de 69% pour les enfants dont le domicile se trouve à moins de 200 mètres d'une ligne haute tension dès leur naissance, et de 23% pour ceux vivant à une distance entre 200 et 59 mètres.

Le risque augmente à partir d'une exposition de 0.2 micro-tesla (unité de mesure de l'induction magnétique) et est multiplié par deux pour un niveau supérieur à 0.4 micro-tesla. Pour éviter tous ces risques sanitaires, l'option est l'enterrement des lignes haute tension, mais le cout est environ 10 fois plus élevé que pour les lignes aériennes.

L'Institut de Veille Sanitaire (INVS) en France considère que le risque est faible et difficile à cerner, mais pas pour autant négligeable.

-

I.5- Conclusion:

La conception et le fonctionnement d'un réseau électrique nécessitent des différentes analyses de son comportement dans une situation normale. l'objectif est: d'assurer un haut niveau de sécurité, de fiabilité et un cout de production optimal. Pour ce faire, il est obligé de réaliser une modélisation au réseau électrique.

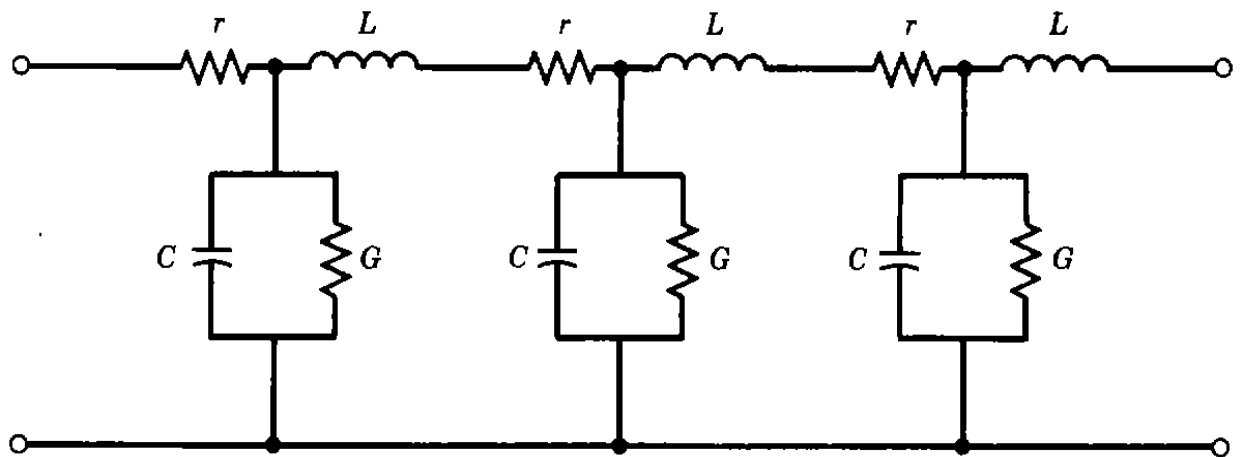
II.1-Introduction:

Aux fins de l'analyse du système, une ligne de transmission donnée peut être représentée par la résistance, l'inductance ou la réactance inductive, la capacité ou de la réactance capacitive, et une résistance de fuite (ce qui est généralement négligeable).[2]

Ce chapitre vise à déterminer les valeurs de ces paramètres. Il fait la distinction entre les caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs).

II.2-Circuits équivalents de ligne de transport:

Une ligne aérienne ou un câble peut être représenté comme un circuit à constante répartie, comme indiqué sur la figure (II.1). La résistance, l'inductance, la capacitance et la conductance de fuite d'un circuit à constantes réparties sont distribuées uniformément à la longueur de la ligne, sur la figure (II.1), L représente l'inductance d'un conducteur de phase et neutre, r représente la résistance linéique en courant alternatif d'un conducteur de phase, C est la capacité linéique d'un conducteur de phase et neutre, et G est la conductance linéique de fuite.



Figure(II.1): Constants distribués au circuit équivalent de la ligne.

II.2.1- Ligne de transport courte (soit 50km, jusqu'à 80 km):

Dans le cas d'une ligne de transport courte, la capacité et la résistance de fuite à la terre sont habituellement négligés, comme représenté sur la figure (II.2) Par conséquent, la ligne de transport peut être traitée comme une impédance simple, constante et localisée:

$$Z = R + jX_L = zl = rl + jxl \quad \Omega \quad (\text{II.1})$$

Où

Z = impédance totale série par phase en ohms.

R = résistance totale série par phase en ohms.

z = l'impédance série linéique d'un conducteur en ohms.

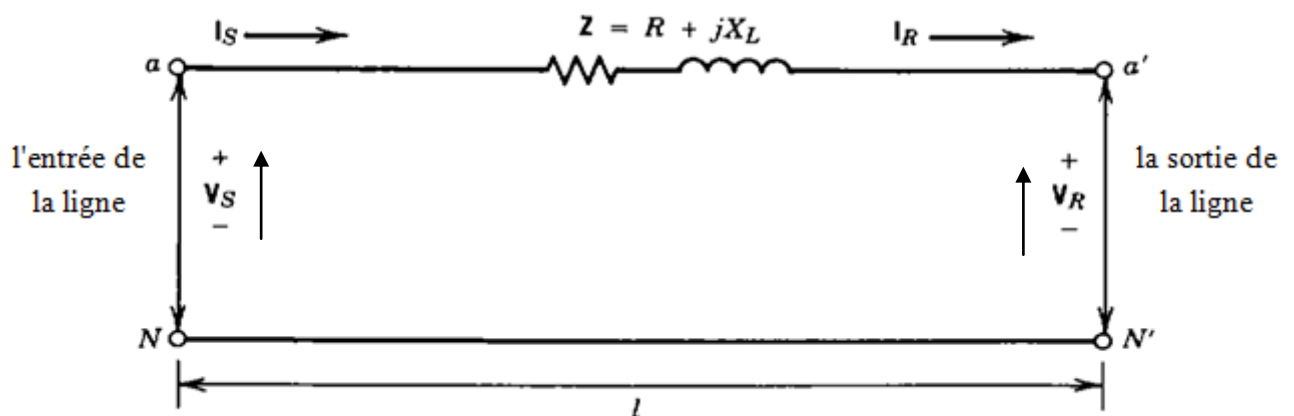
X_L = réactance inductive totale d'un conducteur en ohms.

x : réactance inductive linéique d'un conducteur en ohms.

r = résistance linéique d'un conducteur en ohms.

l = longueur de la ligne.

Le courant à l'entrée de la ligne qui est en cours d'envoi à la fin de la ligne est égal au courant de sortie de réception à l'extrémité. Les figures (II.3) et (II.4) indécant vecteur des diagrammes pour une ligne courte de transport connectée à une charge inductive et une charge capacitive, respectivement



Figure(II.2): Circuit équivalent de la ligne de transport courte.

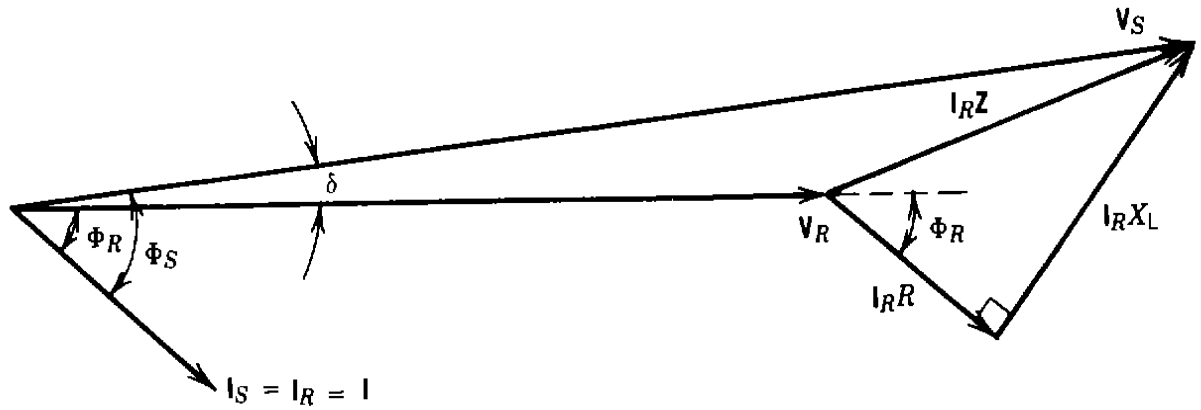


Figure (II.3): diagramme de phase de la ligne de transport courte à charge inductive.

$$V_S = V_R + I_R Z \quad (\text{II. 2})$$

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

$$V_R = V_S - I_R Z \quad (\text{II. 4})$$

V_S : la tension(phase-neutre)envoyer à l'extrémité de phase.

V_R : la tension(phase-neutre) obtenue à l'extrémité de phase.

I_S : le courant envoyer à l'extrémité de phase.

I_R : le courant obtenue à l'extrémité de phase.

Z : l' impédance série total par phase.

Alors, en utilisant V_R comme référence, l'équation (II.2) peut être écrite comme:

$$V_S = V_R + (I_R \cos \Phi_R \pm j I_R \sin \Phi_R)(R + jX_L) \quad (\text{II. 5})$$

Où

Le signe plus ou moins est déterminé par Φ_R , l'angle du facteur de puissance de la charge. Si le facteur de puissance est en retard, le signe de moins est utilisé. D'autre part, si elle est à l'avance, le signe plus est utilisé.

Toutefois, si l'équation (II.4) est utilisée, il est commode d'utiliser V_S comme référence. Alors:

$$V_R = V_S - (I_S \cos \Phi_S \pm jI_S \sin \Phi_S)(R + jX) \quad (\text{II. 6})$$

Où

Φ_S est l'angle de facteur de puissance, si la signe plus ou moins sera utilisée qui détermine comme précédemment. Aussi, à partir de la figure (II.3), en utilisant V_R comme le vecteur de référence

$$V_S = \sqrt{(V_R + IR \cos \Phi_R + IX \sin \Phi_R)^2 + (IX \cos \Phi_R \pm IR \sin \Phi_R)^2} \quad (\text{II. 7})$$

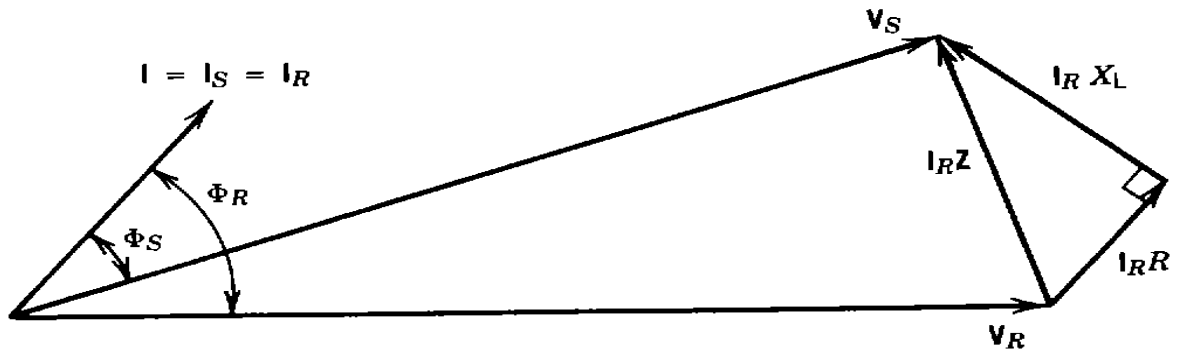


Figure (II.4):diagramme vectorielle de la ligne de transport relié à une charge capacitive.

Et l'angle de charge:

$$\delta = \Phi_S - \Phi_R \quad (\text{II. 8})$$

Ou

$$\delta = \tan^{-1} \frac{IX \cos \Phi_R \pm IR \sin \Phi_R}{V_R + IR \cos \Phi_R + IX \sin \Phi_R} \quad (\text{II. 9})$$

Les constantes générales, ou les paramètres ABCD ,peut être déterminé à partir de la réalisation de la figure (II.2) par:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{II. 10})$$

Et $AD-BC = 1$, où

$$A=1 \quad B=Z \quad C=0 \quad D=1 \quad (\text{II.11})$$

Alors:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{II. 12})$$

Et

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -Z \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix}$$

Le rendement de transmission de la ligne court en peut exprimée par:

$$\eta = \frac{\text{la puissance de la sortie}}{\text{la puissance de l'entrée}} = \frac{\sqrt{3}V_R I \cos \Phi_R}{\sqrt{3}V_S I \cos \Phi_S} = \frac{V_R \cos \Phi_R}{V_S \cos \Phi_S} \quad (\text{II. 13})$$

L'équation (II.13) est applicable si la ligne est monophasé ou triphasé.

L'rendement de la transmission peut être exprimée aussi comme:

$$\eta = \frac{\text{la puissance de sortie}}{\text{la puissance de sortie} + \text{Les pertes}}$$

Pour une ligne monophasé:

$$\eta = \frac{V_R I \cos \Phi_R}{V_R I \cos \Phi_R + 2I^2 R} \quad (\text{II. 14})$$

Pour une ligne triphasée:

$$\eta = \frac{\sqrt{3}V_R I \cos \Phi_R}{\sqrt{3}V_R I \cos \Phi_R + 3I^2 R} \quad (\text{II. 15})$$

II.2.2- lignes de transport moyenne (soit 150 km, jusqu'à 240 km):

Comme la longueur de ligne et la tension augmente, L'utilisation des formules développés pour les lignes de transport courtes donne des résultats inexacts ,donc, l'effet du courant de fuite à travers la capacité doit être pris en compte pour une meilleure approximation. Ainsi, l'admittance shunt est «regroupée» à certains points au long de la ligne et représentée en modèle soit réseau en T ou réseau en π , comme représenté sur les figures (II.5) et (II.6).

Ou

$$Z=zl$$

Pour le modèle en T illustré à la figure (II.5).

$$V_S = I_S \times \frac{1}{2}Z + I_R \times \frac{1}{2}Z + V_R = [I_R + (V_R + I_R \times \frac{1}{2}Z)Y]\frac{1}{2}Z + V_R + I_R \frac{1}{2}Z$$

Ou

$$V_S = \underbrace{\left(1 + \frac{1}{2}ZY\right)}_A V_R + \underbrace{\left(Z \times \frac{1}{4}YZ^2\right)}_B I_R \quad (II. 16)$$

Et

$$I_S = I_R + (V_R + I_R \times \frac{1}{2}Z)Y$$

Ou

$$I_S = \underbrace{Y \times V_R}_C + \underbrace{\left(1 \times \frac{1}{2}ZY\right)}_D I_R \quad (II. 17)$$

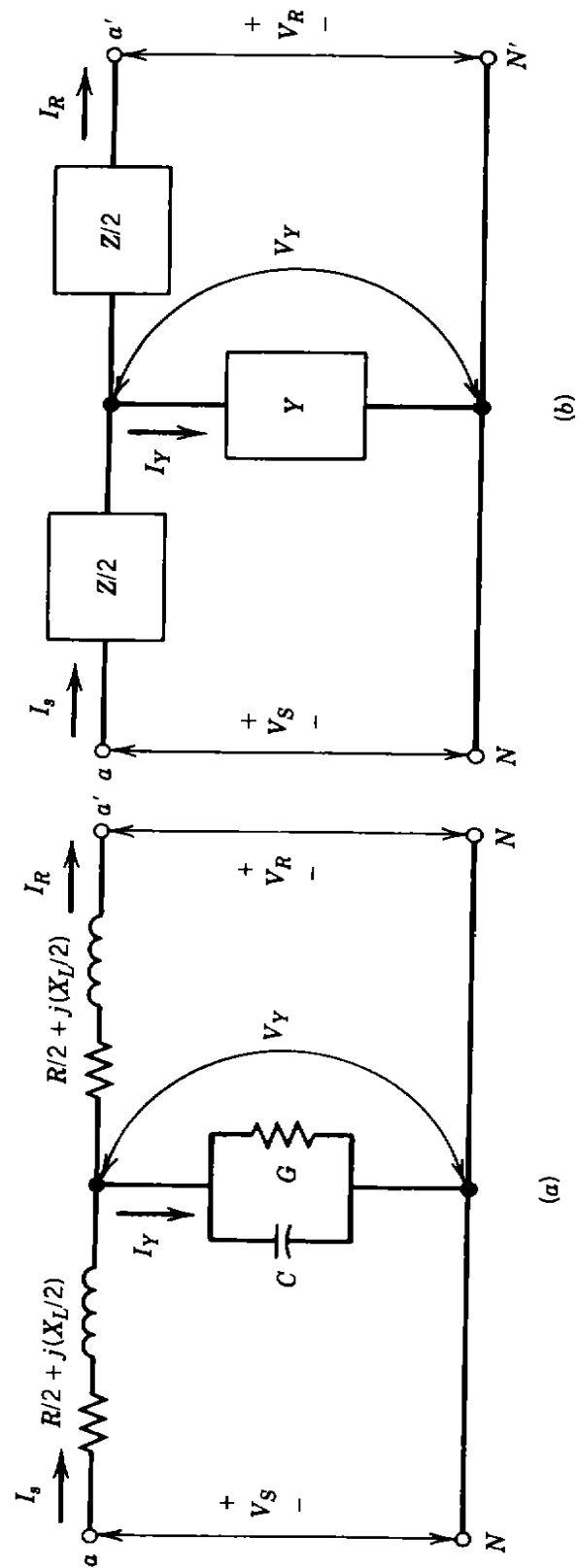
Alternativement, la conductance négliger, Alors:

$$I_C = I_Y \text{ et } V_C = V_Y$$

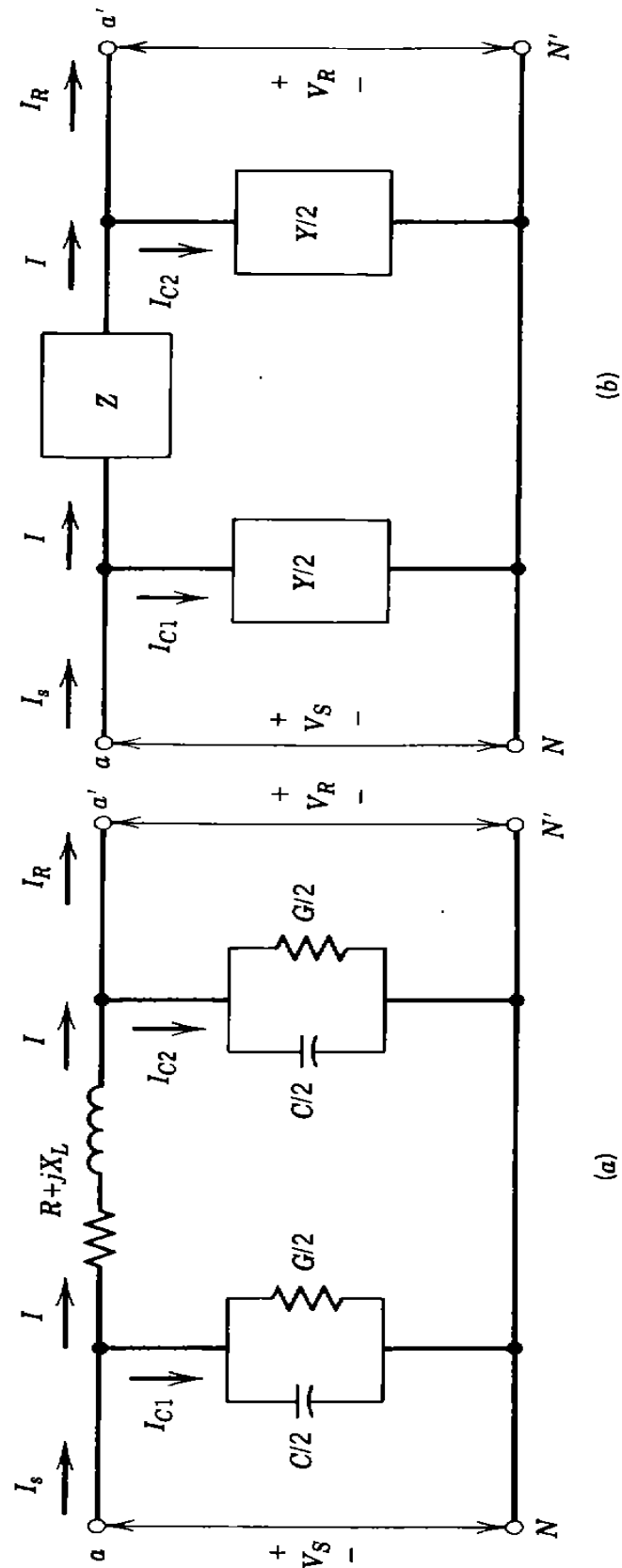
Donne

$$I_C = V_C \times Y$$

$$V_C = V_R + I_R \times \frac{1}{2}Z$$



Figure(II.5): Le schéma modèle nominal en T



Figure(II.6): Le schéma modèle nominal en π

Ainsi,

$$V_S = V_R + I_S \times \frac{1}{2}Z = V_R + I_S \times \frac{1}{2}Z + [V_R Y + I_R (1 + \frac{1}{2}YZ)](\frac{1}{2}Z)$$

Ou

$$V_S = \underbrace{(1 + \frac{1}{2}YZ)}_A V_R + \underbrace{(Z + \frac{1}{4}YZ^2)}_B I_R \quad (II. 18)$$

aussi

$$I_S = I_R \times I_C = I_R + V_C \times Y = I_R + (V_R + I_R \times \frac{1}{2}Z)Y$$

Encore

$$I_S = \underbrace{Y \times V_R}_C + \underbrace{(1 + \frac{1}{2}ZY)}_D I_R \quad (II. 19)$$

Où

$$A = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (II. 20)$$

$$B = Z + \frac{1}{4}YZ^2 \quad (II. 21)$$

$$C = Y \quad (II. 22)$$

$$D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (II. 23)$$

Pour un circuit nominal-T, la matrice de paramètres de circuit général ou de la matrice de transfert, devient:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z + \frac{1}{4}YZ^2 \\ Y & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix}$$

Où

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z + \frac{1}{4}YZ^2 \\ Y & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (II. 24)$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z + \frac{1}{4}YZ^2 \\ Y & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (\text{II. 25})$$

Pour le circuit en π illustré à la figure (II.6)

$$V_S = (V_R \times \frac{1}{2}Y + I_R)Z + V_R$$

Ou

$$V_S = \underbrace{\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)}_A V_R + \underbrace{Z \times}_{\text{B}} I_R \quad (\text{II. 26})$$

Et

$$I_S = \frac{1}{2}Y \times V_S + \frac{1}{2}Y \times V_R + I_R \quad (\text{II. 27})$$

En remplaçant l'équation (II.26) dans l'équation (II.27)

$$I_S = \left[\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right) V_R + Z I_R \right] \frac{1}{2}Y + \frac{1}{2}Y \times V_R + I_R$$

Ou

$$I_S = \underbrace{\left(Y + \frac{1}{4}Y^2Z\right)}_C V_R + \underbrace{\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)}_D I_R \quad (\text{II. 28})$$

Alternativement négligeant la conductance:

$$I = I_{C2} + I_R$$

Ou

$$I_{C2} = \frac{1}{2}Y \times V_R$$

nous obtenons

$$I_{C2} = \frac{1}{2}Y \times V_R + I_R \quad (\text{II. 29})$$

aussi

$$V_S = V_R + IZ \quad (\text{II. 30})$$

En remplaçant l'équation (II.29) dans l'équation (II.30).

$$V_S = V_R + \left(\frac{1}{2}Y \times V_R + I_R\right)Z$$

Ou

$$V_S = \underbrace{\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)}_A V_R + \underbrace{Z \times I_R}_B \quad (\text{II. 31})$$

Et

$$I_{C1} = \frac{1}{2}Y \times V_S \quad (\text{II. 32})$$

En remplaçant l'équation (II.29) dans l'équation (II.30).

$$I_{C1} = \frac{1}{2}Y\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + \frac{1}{2}Y \times Z I_R \quad (\text{II. 33})$$

Et donc

$$I_S = I + I_{C1} \quad (\text{II. 34})$$

En remplaçant l'équation (II.33) dans l'équation (II.34).

$$I_S = \frac{1}{2}Y V_R + I_R + \frac{1}{2}Y\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)V_R + \frac{1}{2}Y Z I_R$$

Ou

$$I_S = \underbrace{\left(Y + \frac{1}{4}Y^2Z\right)}_C V_R + \underbrace{\left(1 + \frac{1}{2}YZ\right)}_D I_R \quad (\text{II. 35})$$

Donc:

$$A = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (\text{II. 36})$$

$$B = Z \quad (\text{II. 37})$$

$$C = Y + \frac{1}{4}Y^2Z \quad (\text{II. 38})$$

$$D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (\text{II. 39})$$

Pour un circuit nominale en π , le paramètre de circuit général devient:

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z \\ Y + \frac{1}{4}Y^2Z & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix} \quad (\text{II. 40})$$

Où

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z \\ Y + \frac{1}{4}Y^2Z & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{II. 41})$$

Et

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{2}YZ & Z \\ Y + \frac{1}{4}Y^2Z & 1 + \frac{1}{2}YZ \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (\text{II. 42})$$

On peut démontrer facilement à l'aide d' une transformation triangle-étoile, le circuit nominale- en T et nominale en π ne sont pas équivalents entre eux. Ce résultat est attendu car les deux approximations réalisés sont différentes au circuit réel, Aucun est absolument correct. Des résultats plus précises peuvent être obtenus en divisant la ligne en parties, chacun donne par sa circuits nominal-T ou nominal- π et en cascade les parties qui en résultent.

II.2.3- ligne de transport longue (au-dessus de 240 km):

Une analyse plus précise de la ligne de transport nécessite que les paramètres de la ligne ne sont pas regroupées , Comme précédemment, mais ils sont répartis uniformément sur toute la longueur de la ligne .La figure (II.7) présente une ligne uniforme longue avec une section dx incrémentale à une distance x de l'extrémité de réception, ses impédance série est z dx, et son admittance de dérivation est y dx, où z et y sont l'impédance et admittance linéique, respectivement.

La chute de tension dans la section est:

$$dV_x = (V_x + dV_x) - V_x = dV_x = (I_x + dI_x)zdx$$

Ou

$$dV_x \cong I_x z dx \quad (\text{II. 43})$$

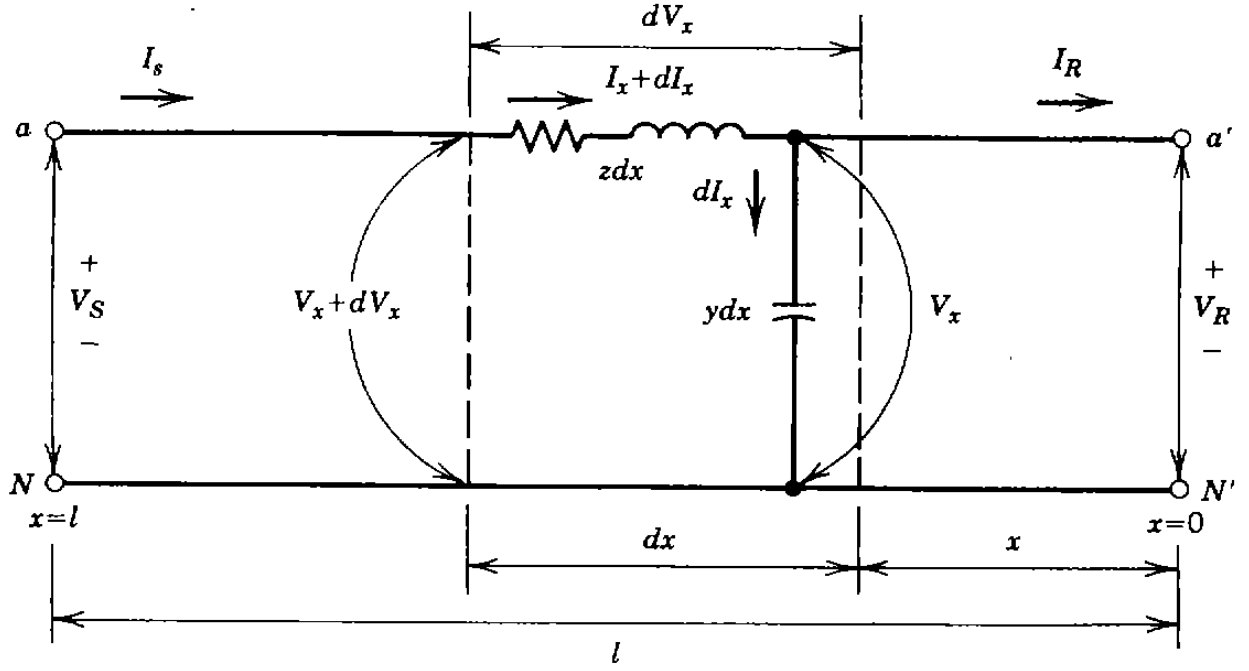


Figure (II.7): relation à une phase et neutre du la ligne de transport triphasée.

De même, le courant de charge supplémentaire est:

$$dI_x \cong V_x y dx \quad (II.44)$$

Où

$$\frac{dV_x}{dx} = z I_x \quad (II.45)$$

Et

$$\frac{dI_x}{dx} = y V_x \quad (II.46)$$

Différencier l'équation (II.45) et (II.46) par rapport à x:

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = z \frac{dI_x}{dx} \quad (II.47)$$

Et

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} = Y \frac{dV_x}{dx} \quad (II.48)$$

En remplaçant les valeurs de dI_x / dx et dV_x / dx de l'équation (II.46) et (2.47) dans l'équation (II.45) et (II.48), respectivement

$$\frac{d^2 V_x}{dx^2} = yz V_x \quad (\text{II. 49})$$

Et

$$\frac{d^2 I_x}{dx^2} = yz I_x \quad (\text{II. 50})$$

à $x = 0$, $V_x = V_R$ et $I_x = I_R$, Par conséquent, la solution de l'équation différentielle du seconde ordre ordinaire (II.49) et (II.50) donne:

$$V(x) = \underbrace{(\cosh \sqrt{yz} x)}_A V_R + \underbrace{\left(\sqrt{\frac{z}{y}} \sinh \sqrt{yz} x \right)}_B I_R \quad (\text{II. 51})$$

De même

$$I(x) = \underbrace{\left(\sqrt{\frac{y}{z}} \sinh \sqrt{yz} x \right)}_C V_R + \underbrace{(\cosh \sqrt{yz} x)}_D I_R \quad (\text{II. 52})$$

$$V(x) = (\cosh \gamma x) V_R + (Z_C \sinh \gamma x) I_R \quad (\text{II. 53})$$

Et

$$I(x) = (Y_C \sinh \gamma x) V_R + (\cosh \gamma x) I_R \quad (\text{II. 54})$$

Où:

$$\gamma = \text{constante de propagation unitaire par ligne} = \sqrt{yz}$$

$$Z_C = \text{impédance caractéristique linéique de la ligne,} = \sqrt{z/y}$$

$$Y_C = \text{admittance caractéristique linéique de la ligne,} = \sqrt{y/z}$$

En outre

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (\text{II. 55})$$

Où:

α = constante d'atténuation (décrément de mesure de tension et de courant linéiques dans la sens de déplacement) en népers par unité de longueur.

β = phase (ou variation de phase) constante en radians par unité de longueur (i, e., variation de l'angle de phase entre deux tensions ou courants, à deux points de l'unité de longueur à part sur la ligne infinie).

Lorsque $x = l$, l'équation (II.53) et (II.54) deviennent

$$V_S = (\cosh \gamma l) V_R + (Z_C \sinh \gamma l) I_R \quad (\text{II. 56})$$

Et

$$I_S = (Y_C \sinh \gamma l) V_R + (\cosh \gamma l) I_R \quad (\text{II. 57})$$

L'équation (II.56) et (II.57) peut s'écrire sous forme matricielle comme:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_C \sinh \gamma l \\ Y_C \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{II. 58})$$

Et

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & Z_C \sinh \gamma l \\ Y_C \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (\text{II. 59})$$

ou

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh \gamma l & -Z_C \sinh \gamma l \\ -Y_C \sinh \gamma l & \cosh \gamma l \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (\text{II. 60})$$

pour cela:

$$V_R = (\cosh \gamma l) V_S - (Z_C \sinh \gamma l) I_S \quad (\text{II. 61})$$

Et

$$I_R = -(Y_C \sinh \gamma l) V_S + (\cosh \gamma l) I_S \quad (\text{II. 62})$$

En termes de constante ABCD,

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad (\text{II. 63})$$

Et

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B \\ -C & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} \quad (\text{II. 64})$$

Où:

$$A = \cosh \gamma l = \cosh \sqrt{YZ} = \cosh \theta \quad (\text{II. 65})$$

$$B = Z_C \sinh \gamma l = \sqrt{Z/Y} \sinh \sqrt{YZ} = Z_C \sinh \theta \quad (\text{II. 66})$$

$$C = Y_C \sinh \gamma l = \sqrt{Z/Y} \sinh \sqrt{YZ} = Y_C \sinh \theta \quad (\text{II. 67})$$

$$D = \cosh \gamma l = \cosh \sqrt{YZ} = \cosh \theta \quad (\text{II. 68})$$

$$\theta = \sqrt{YZ} \quad (\text{II. 69})$$

$$\sinh \gamma l = \frac{1}{2}(e^{\gamma l} - e^{-\gamma l}) \quad (\text{II. 70})$$

$$\cosh \gamma l = \frac{1}{2}(e^{\gamma l} + e^{-\gamma l}) \quad (\text{II. 71})$$

Les équations (II.56) - (II.69) peuvent être utilisés si les tables de fonctions hyperboliques complexes ou des calculatrices de poche avec fonction hyperbolique complexe sont confectionnées. .

Alternativement, les extensions suivantes peuvent être utilisées:

$$\sinh \gamma l = \sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh \alpha l \cosh j\beta l + j \cosh \alpha l \sinh j\beta l \quad (\text{II. 72})$$

$$\cosh \gamma l = \cosh(\alpha l + j\beta l) = \cosh \alpha l \cosh j\beta l + j \sinh \alpha l \sinh j\beta l \quad (\text{II. 73})$$

En outre, en remplaçant γl et Z_C en termes de Y et Z , qui est l'admittance shunt total de la ligne par phase et l'impédance série totale de la ligne par phase, dans l'équation (II.63) donne:

$$V_S = (\cosh \sqrt{YZ})V_R + \left(\sqrt{\frac{Z}{Y}} \sinh \sqrt{YZ} \right) I_R \quad (\text{II. 74})$$

Et

$$I_S = \left(\sqrt{\frac{Y}{Z}} \sinh \sqrt{YZ} \right) V_R + (\cosh \sqrt{YZ}) I_R \quad (\text{II. 75})$$

Ou sinon

$$V_S = (\cosh \sqrt{ZY}) V_R + \left(\frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \right) Z I_R \quad (\text{II. 76})$$

Et

$$I_S = \left(\frac{\sinh \sqrt{YZ}}{\sqrt{YZ}} \right) V_R + (\cosh \sqrt{ZY}) I_R \quad (\text{II. 77})$$

Les paramètres ABCD peuvent être exprimées en termes de séries infinies comme:

$$A = 1 + \frac{YZ}{2} + \frac{Y^2 Z^2}{24} + \frac{Y^3 Z^3}{720} + \frac{Y^4 Z^4}{40,320} + \dots \quad (\text{II. 78})$$

$$B = Z \left(1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \frac{Y^4 Z^4}{362,880} + \dots \right) \quad (\text{II. 79})$$

$$C = Y \left(1 + \frac{YZ}{6} + \frac{Y^2 Z^2}{120} + \frac{Y^3 Z^3}{5040} + \frac{Y^4 Z^4}{362,880} + \dots \right) \quad (\text{II. 80})$$

Où:

Z= impédance série totale de ligne par phase

$$= z l = (r + jx_l) l \quad \Omega$$

Y= admittance série total de la ligne par phase

$$= y l = (g + jb) l \quad S$$

Turan GÖNEN [2],il a dit: Weedy suggère que les valeurs approximatives suivantes des constantes ABCD si la ligne aérienne de transport est inférieure à 500 km de longueur.

$$A = D = 1 + \frac{1}{2}YZ \quad (\text{II. 81})$$

$$B = Z(1 + \frac{1}{6}YZ) \quad (\text{II. 82})$$

Et

$$C = Y(1 + \frac{1}{6}YZ) \quad (\text{II. 83})$$

Toutefois, l'erreur impliquée peut être trop grande pour être ignorée pour certaines applications.

II.3-Résistance longitudinale: [4] , [2] , [13]

Partons de la loi d'Ohm locale :

$$\vec{J} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II. 84})$$

Où :

J est la densité de courant [A/m^2] .

σ est la conductivité électrique [$\Omega^{-1}m^{-1}$] .

E est le champ électrique (dans le conducteur) [V/m].

Appliquée à un conducteur de longueur ' l ' [m], de section ' S ' [m^2] et de conductivité ' σ ' [$\Omega^{-1}m^{-1}$], parcouru par un courant continu d'intensité ' I ' [A], nous trouvons :

$$I = \frac{\sigma \cdot S}{l} \cdot V \quad (\text{II. 85})$$

La résistance d'un conducteur se définit de la manière suivante :

$$R = \frac{l}{\sigma \cdot S} = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega] \quad (\text{II. 86})$$

Où « $\rho = 1/\sigma$ » est la résistivité du conducteur [$\Omega.m$].

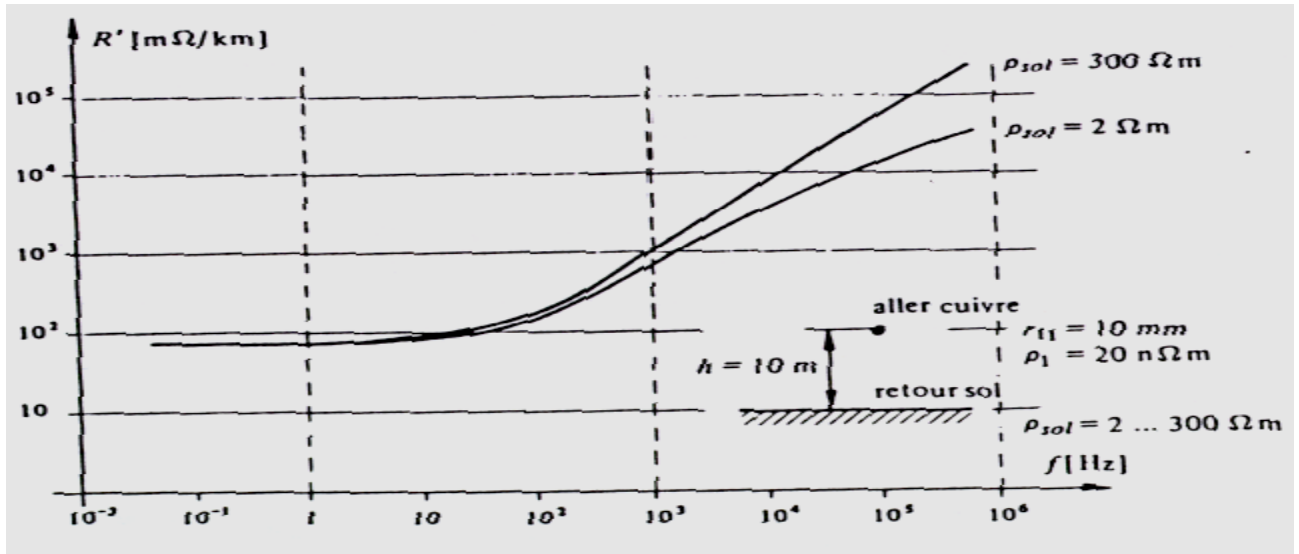
Par extension, la loi d'Ohm est également utilisée en régime quasi-stationnaire. Cependant, ce régime introduit des modifications dans la répartition du courant dans les conducteurs.

Les courants alternatifs qui circulent dans les conducteurs créent un champ d'induction magnétique (alternatif également) qui existe non seulement entre les conducteurs, mais aussi à l'intérieur de ceux-ci.

Un contour fermé à l'intérieur d'un tel conducteur embrasse un flux d'induction **variable** et se trouve être le siège d'une tension induite qui provoque, à son tour, l'apparition de courants dans

le métal. Ces courants, appelés courants de Foucault, modifient la répartition du vecteur densité de courant, 'J', admise uniforme en première approximation. Plus la fréquence est élevée et l'épaisseur des conducteurs forte, plus l'effet des courants de Foucault est important.

Lors d'un défaut à la terre, la partie des courants de retour qui circulent par la terre circulent essentiellement en surface (effet pelliculaire) et suivent le tracé de la ligne (effet de proximité¹).



Figure(II.8) : Résistance linéique en fonction de la fréquence

La difficulté d'introduire dans les calculs le conducteur terre provient du fait que les dimensions de la couche de terre par où passe le courant sont mal définies, que la répartition du courant dans cette couche n'est pas uniforme et que la résistivité du sol est irrégulière dans l'espace et variable au cours du temps. Nous devons aussi nous attendre à trouver diverses canalisations enterrées (eau, gaz, câbles, ...), particulièrement aux voisinages des lignes électriques. La résistivité du sol peut ainsi varier, suivant l'endroit et les conditions météorologiques, entre 0,1 et $10^6 \Omega.m$. La résistance du sol dépend fortement de la fréquence, du courant (figure II.8).

Pour un courant de fréquence 50 Hz, la profondeur de pénétration pour un conducteur de cuivre vaut 10 mm et pour un sol de résistivité 100 $\Omega.m$, elle vaut 100 m.[13]

Nous pouvons donc assimiler le sol à un conducteur de 100 m de rayon. La résistance du sol est donc de environ 70 m Ω /km. [13]

¹L'effet de proximité est le phénomène par lequel le courant alternatif a tendance à emprunter des chemins aussi voisins que possible pour l'aller et le retour.

II.3.1-Variation de la résistance avec la température:

Lorsque la température d'un conducteur augmente, l'agitation de ses atomes s'accroît. L'opposition au déplacement des électrons (courant) augmente parce que les collisions entre les électrons et les atomes se multiplient. C'est ce qui explique l'augmentation de la résistivité des métaux conducteurs avec la température.

Cette variation obéit à la formule suivante:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t) \quad [\Omega \cdot m] \quad (II. 87)$$

Où

ρ_t = résistivité à une température t en ohms- mètres [$\Omega \cdot m$].

ρ_0 = résistivité à 0°C en ohms- mètres [$\Omega \cdot m$].

α = coefficient de température, en 1/°C.

t = température, en °C.

Pour le cuivre : $\alpha=0.00427$. [4]

Puisque la résistivité varie avec la température, il s'ensuit que la résistance de tout dispositif électrique (bobine ,fil ,câble, élément chauffant ,etc.) varie en proportion. On peut donc exprimer la variation de la résistance par la formule:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad [\Omega] \quad (II. 88)$$

Où

R_t = résistance à une température t , en ohms.

R_0 = résistance à 0°C, en ohms.

α = coefficient de température, en 1/°C.

t = température, en °C.

La résistance du conducteur à n'importe quelle température peut être déterminée par:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{T_0 + t_2}{T_0 + t_1} \quad (II. 89)$$

Où

R_1 = la résistance du conducteur à la température t_1 .

R_2 = la résistance du conducteur à la température t_2 .

t_1, t_2 = les températures du conducteur en degrés Celsius.

T_0 = variant constante avec matériau du conducteur.

II.4- Réactance longitudinale (Inductance):[3],[13],[14]

II.4.1-lignes aériennes monophasés:

Figure II.9 présente une ligne aérienne monophasée. Supposons qu'un courant circule dans le conducteur a, et retourne dans la conducteur b. ces courants provoquent des lignes de champ magnétique liaison entre les conducteurs. Un changement dans les courantes causer des changements dans le flux, ce qui entraîne à son tour une tension induite dans le circuit. Dans un circuit à courant alternatif, cette tension induite est appelée la chute(**I.X**). si R est la résistance de chaque conducteur, les pertes totales de la tension due à la résistance est **2.I.R**. Par conséquent, la chute de tension dans la ligne monophasée en raison de l'impédance du circuit à 50Hz est:

$$VD = 2l \left(R + j0.2328 \log_{10} \frac{D_m}{D_s} \right) I \quad [V] \quad (II. 90)$$

Où

VD= la chute de tension due à l'impédance de ligne en volts.

l= longueur de la ligne en kilomètre.

R= résistance de chaque conducteur en ohms par kilomètre.

D_m = distance moyenne équivalente ou géométrique (GMD) entre les centres de conducteurs en mètre.

D_s = rayon de la moyenne géométrique (GMR) ou auto-GMD d'un conducteur en mètre,

r = rayon de conducteur cylindrique en mètre (voir la figure II.9).

I= courant de phase en ampères.

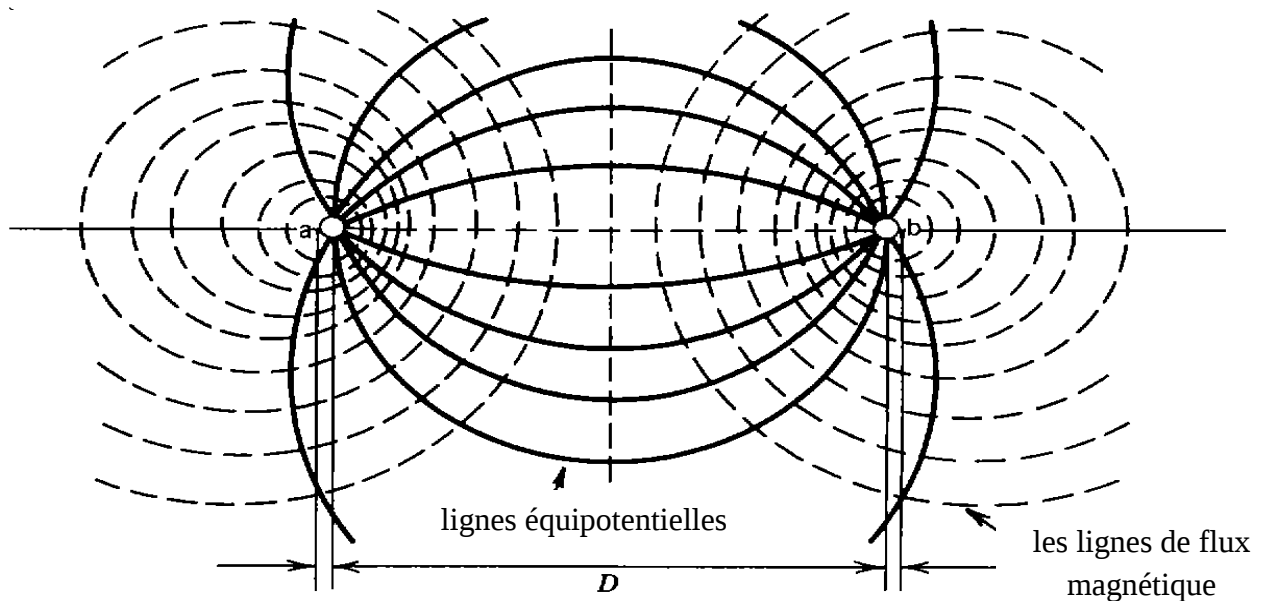


Figure II.9-Le champ magnétique de la ligne monophasée.

Par conséquent, l'inductance du conducteur est exprimée comme:

$$L = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad \text{H/m} \quad (\text{II. 91})$$

Ou

$$L = 0.4603 \cdot \log \frac{D_m}{D_s} \quad \text{H/km} \quad (\text{II. 92})$$

Avec l'inductance appelé, la réactance inductive peut être trouvé comme suite:

$$X_L = 2\pi f L = 2.02 \times 10^{-3} f \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (\text{II. 93})$$

Ou

$$X_L = 4.657 \times 10^{-3} f \log_{10} \frac{D_m}{D_s} \quad (\text{II. 94})$$

Ou, à 50Hz.

$$X_L = 0.1446 \log_{10} \frac{D_m}{D_s} \quad \Omega/\text{km} \quad (\text{II. 95})$$

$$X_L = 0.1952 \ln \frac{D_m}{D_s} \quad \Omega/\text{km} \quad (\text{II. 96})$$

En utilisant le rayon de la moyenne géométrique d'un conducteur, D_s , le calcul de l'inductance et de réactance inductive peut se faire facilement tableaux donnent le rayon moyen géométrique des divers conducteur rapidement.

II.4.2 lignes aériennes triphasées:

En général, les espacements D_{ab} , D_{bc} et D_{ca} entre les conducteurs de lignes de transport triphasés ne sont pas égaux. Pour toute configuration de conducteur donnée, les valeurs moyennes des inductances et des capacités peuvent être trouvés en représentant le système en une espace équilatéral équivalent.

Le "espacement équivalent" est calculé comme suite:

$$D_{eq} \triangleq D_m = (D_{ab} \times D_{bc} \times D_{ca})^{1/3} \quad (\text{II. 97})$$

En pratique, les conducteurs d'une ligne de transport sont transposées, comme indiqué dans Figure(II.10).l'opération de transposition, qui est, en échangeant les positions des conducteurs, est généralement effectuée dans les stations de commutation.

Par conséquent, l'inductance moyenne par phase est:

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \text{H/m} \quad (\text{II. 98})$$

$$L_a = 0.4603 \log_{10} \frac{D_{eq}}{D_s} \text{mH/km} \quad (\text{II. 99})$$

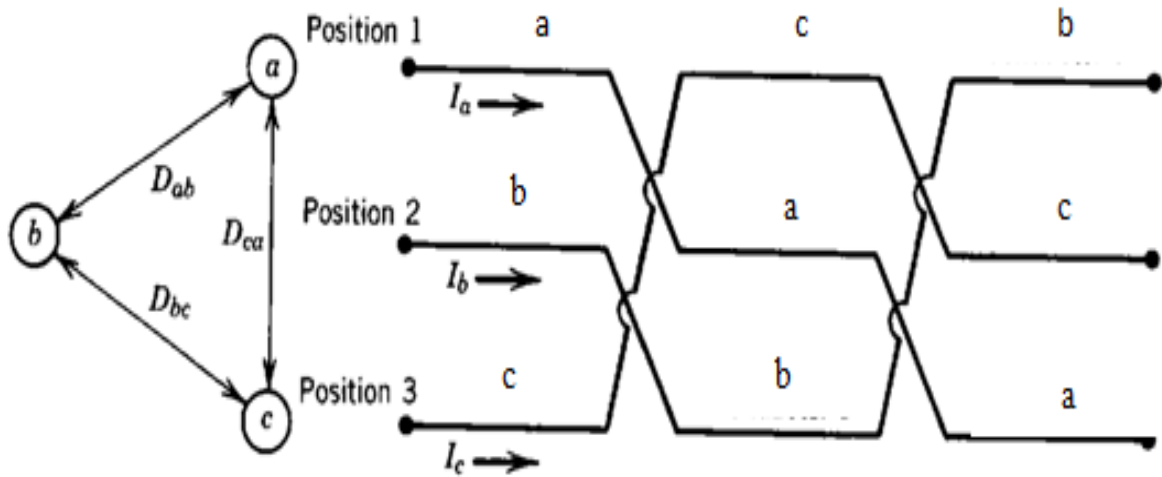


Figure (II.10): cycle de transposition de la ligne triphasée.

Et la réactance inductive est:

$$X_L = 0.0628 \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \Omega/\text{km} \quad (\text{II. 100})$$

Ou

$$X_L = 0.1446 \log_{10} \frac{D_{eq}}{D_s} \quad \Omega/\text{km} \quad (\text{II. 101})$$

II.5-capacitance et réactance capacitive:[3]

II.5.1- lignes aériennes monophasés:

La figure (II.11) représente une ligne monophasée à deux conducteurs parallèles identiques **a** et **b**, de rayon **r** séparés par une distance **D**, du centre au centre, et avec une différence de potentiel de **V_{ab}** (volts). Le conducteur a et b portent des charges de + **q_a** et -**q_b** (farads par mètre).

La capacité entre les conducteurs peut être trouvé comme suite:

$$C_{ab} = \frac{q_a}{V_{ab}} = \frac{2\pi\epsilon}{\ln(D^2/r_a \cdot r_b)} \quad \text{F/m} \quad (\text{II. 102})$$

Si $r_a = r_b = r$,

$$C_{ab} = \frac{2\pi\epsilon}{2\ln(D/r)} \quad \text{F/m} \quad (\text{II. 103})$$

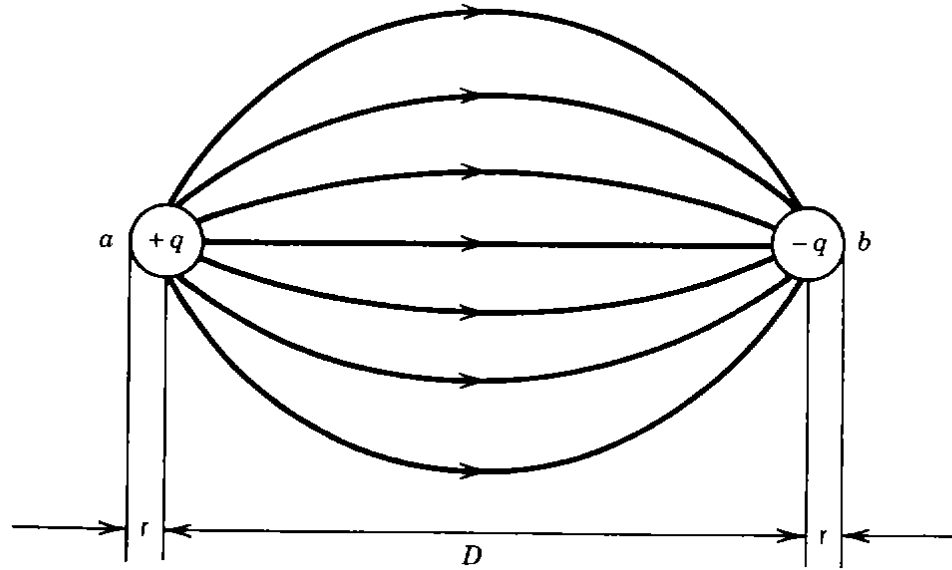


Figure (II.11): capacitance de ligne monophasée.

Puisque

$$\epsilon = \epsilon_0 \cdot \epsilon_r$$

Où

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \times 10^9} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$$

Et

$$\epsilon_r \cong 1 \text{ pour l'air}$$

L'équation (II.103) devient:

$$C_{ab} = \frac{0.0241}{2 \log_{10}(D/r)} \quad \mu\text{F/km} \quad (\text{II. 104})$$

Ou

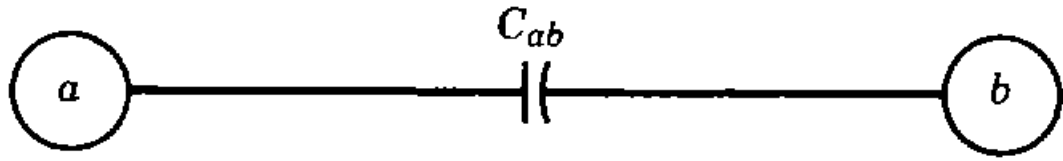
$$C_{ab} = \frac{0.02143}{2 \ln(D/r)} \quad \mu\text{F/km} \quad (\text{II. 105})$$

Stevenson [2] explique que la capacité de neutre ou la capacité à la terre pour la ligne à deux fils est le double de la capacité phase à phase ou de capacité entre les conducteurs, comme montré sur les figures II.12 et II.13, par conséquent, la capacité de ligne à neutre est:

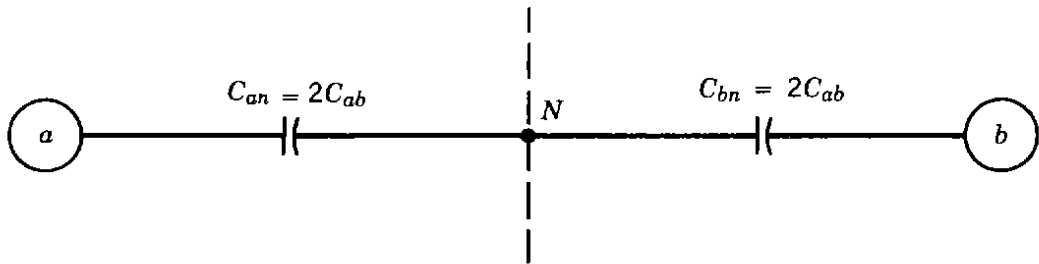
$$C_N = C_{aN} = C_{bN} = \frac{0.0241}{\log_{10}(D/r)} \quad \mu\text{F/km} \quad \text{au neutre} \quad (\text{II. 106})$$

Ceci peut être facilement vérifié car le C_N doit être égal à $2C_{ab}$ afin que la capacité totale entre les conducteurs peut être:

$$c_{ab} = \frac{c_N \times c_N}{c_N + c_N} = \frac{c_N}{2} = C_{ab} \quad \text{comme précédemment} \quad (\text{II. 107})$$



Figure(II.12): capacitance phase à phase.



Figure(II.13): capacité phase-neutre.

Grâce à la capacité connue, la réactance capacitive entre un conducteur et neutre peut être trouvé comme:

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C_N} \quad (\text{II. 108})$$

Où pour 60Hz.

$$X_c = 0.0425 \log_{10} \frac{D}{r} \text{ M}\Omega/\text{km} \quad \text{au neutre} \quad (\text{II. 109})$$

Et la susceptance phase-neutre est:

$$b_c = \omega C_N$$

Ou

$$b_c = \frac{1}{X_c} \quad (\text{II. 110})$$

Ou

$$b_c = \frac{9.0854}{\log_{10}(D/r)} \text{ mS/km} \quad \text{au neutre} \quad (\text{II. 111})$$

Le courant de charge de la ligne est:

$$I_c = j\omega C_{ab} V_{ab} \text{ A/km} \quad (\text{II. 112})$$

II.5.2-Lignes aériennes triphasées:

Figure (II.14) indique la section transversale d'une ligne triphasée avec un espacement équilatéral D . La capacité phase-neutre peut être trouvée comme suit:

$$C_n = \frac{0.0241}{\log_{10}(D/r)} \quad \mu F/km \quad \text{au neutre} \quad (II.113)$$

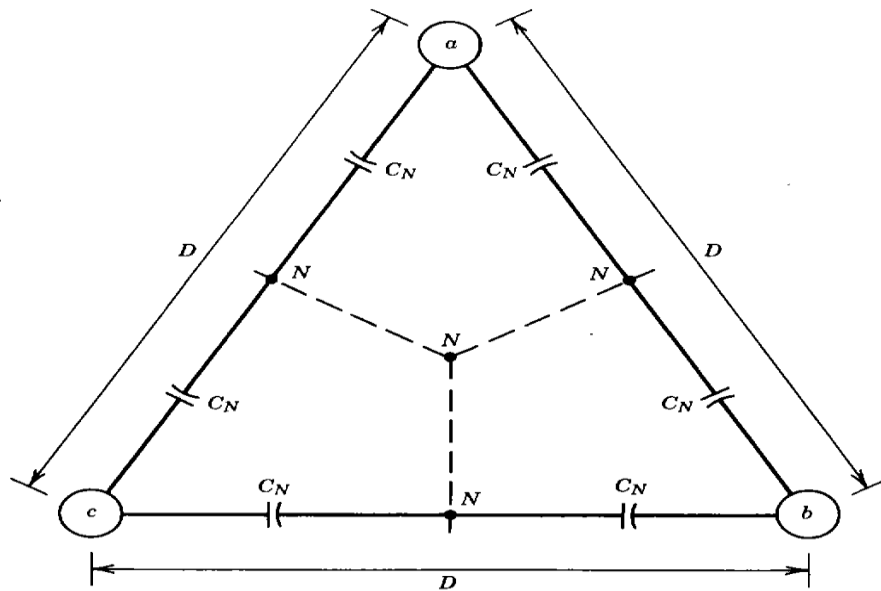
Qui est identique à l'équation (II.106).

D'autre part, si les espacements entre les conducteurs de la ligne triphasée ne sont pas égaux, la capacitance de ligne à neutre est:

$$C_n = \frac{0.0241}{\log_{10}(D_{eq}/r)} \quad \mu F/km \quad \text{au neutre} \quad (II.114)$$

Où

$$D_{eq} \triangleq D_m = (D_{ab} \times D_{bc} \times D_{ca})^{1/3}$$



Figure(II.14): ligne triphasée avec un espacement équilatéral.

II.5.3-Effet de la terre sur la capacité de ligne triphasé de transport:[13]

Nous considérons des conducteurs de ligne triphasé et leurs images sous la surface du sol, comme le montre la figure II.15, supposons que la ligne est transposée et que les conducteurs a , b , et c avoir des charges q_a , q_b , et q_c , et leurs images les charges $-q_a$, $-q_b$ -et- $-q_c$.

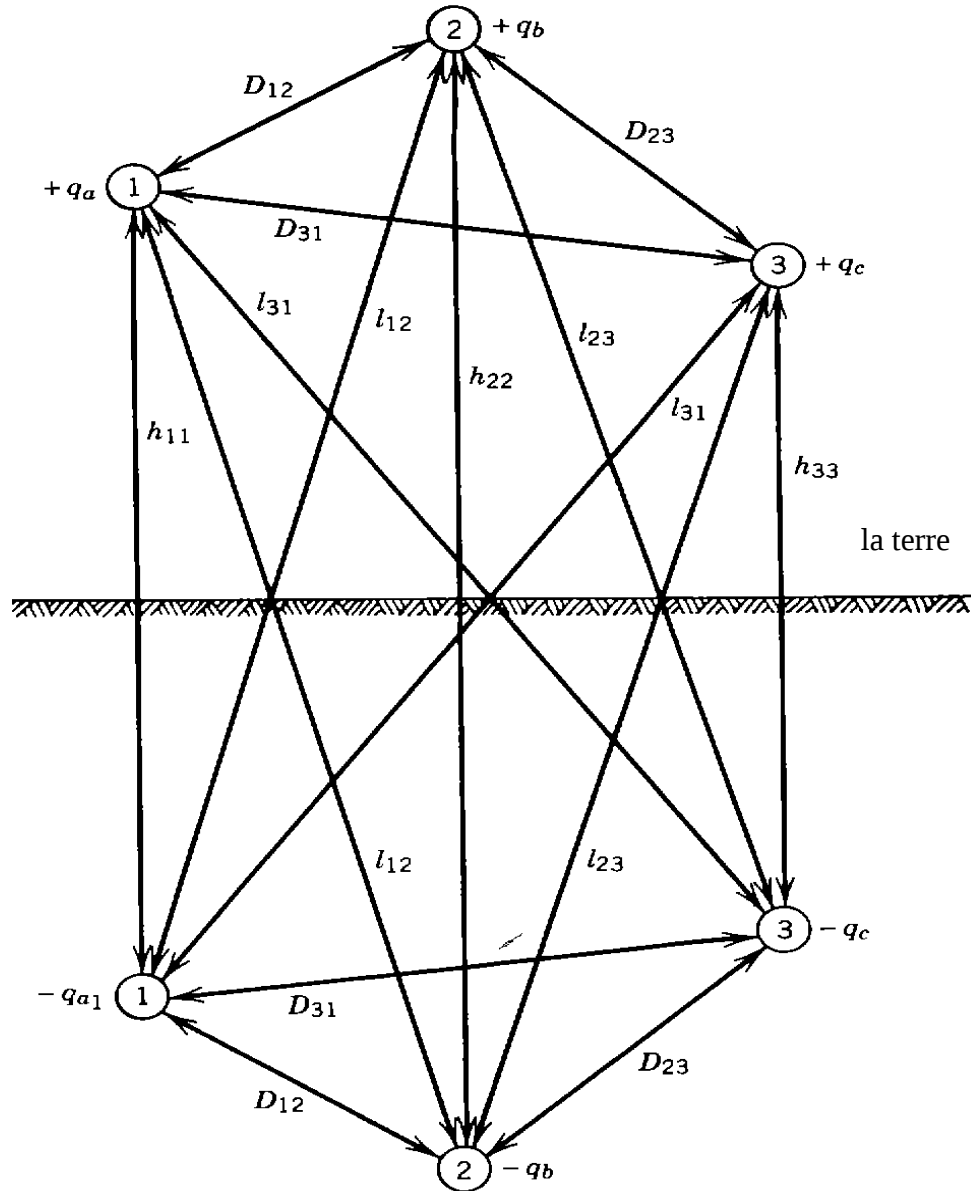


Figure (II.15): Ligne triphasée et leur image.

La capacité phase-neutre peut être exprimé comme: [13]

$$C_n = \frac{2\pi \times 8.8538 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{l_{12}l_{23}l_{31}}}{\sqrt[3]{h_{11}h_{22}h_{33}}}\right)} \text{ F/m} \quad (\text{II. 115})$$

Tandis que, si l'effet de la terre n'est pas pris en compte, la capacité de ligne à neutre est:

$$C_n = \frac{2\pi \times 8.8538 \times 10^{-12}}{\ln(D_{eq}/r)} \quad \text{F/m} \quad (\text{II. 116})$$

Par conséquent, l'effet de la terre augmente la capacité de la ligne.

Cependant, si les hauteurs des conducteurs sont beaucoup plus grandes que les distances entre eux, l'effet de la terre est en général négligé pour les lignes triphasées.

II.6-Conclusion:

Dans ce chapitre nous avons modélisé la ligne électrique la ligne qui est classé selon la longueur de la ligne si inférieur de 50 km la ligne court , la longueur de ligne entre 50 et 240 km la ligne moyenne et si la longueur de ligne est supérieur 240 km la ligne est long.

Les paramètres d'une ligne aérienne effet par la distance entre phase , la température d'air , la section de conducteur aérien et leur matériaux et la longueur de la ligne.

Les lignes de THT sont habituels construis 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.

III.1-Introduction:

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse à l'extrémité de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.[10].L'électricité transportée sur le réseau implique des pertes dont l'origine est de plusieurs natures et qu'il convient au départ de qualifier : pertes par effet Joule et par effet couronne ainsi que pertes shunt, de fuite et par induction.[16].Dans ce chapitre nous montrons les équations de transit de puissance et chute de tension et les pertes dans une ligne d'énergie électrique fonctionnant en régime établi.

III.2- Chute de tension sur une ligne:[10],[9]

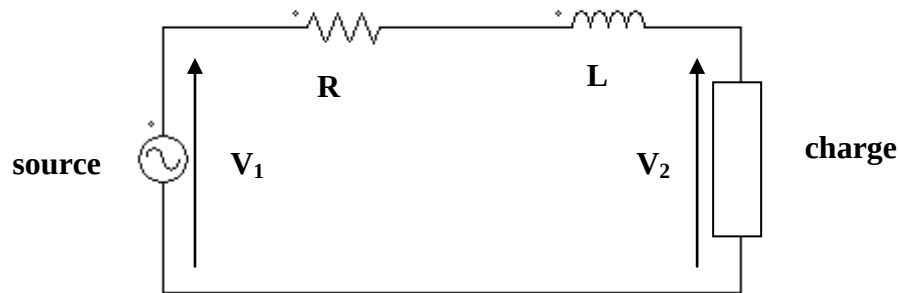


Figure III.1.Circuit équivalent du réseau électrique.

R: la résistance linéique de la ligne en Ohms.

L: l'inductance linéique de la ligne en Henri.

V_1 :la tension à l'entré de la ligne en volt.

V_2 :la tension à la sortie de la ligne en volt

Afin d'illustrer les relations entre la puissance réactive et la chute de tension, considérons le circuit équivalent ci-dessous. La chute de tension due au courant I dans l'impédance.

$$Z = R + jX \text{ est } \Delta V = ZI = V_1 - V_2 \quad (\text{III. 1})$$

Si nous traçons le diagramme vectoriel de ce circuit.

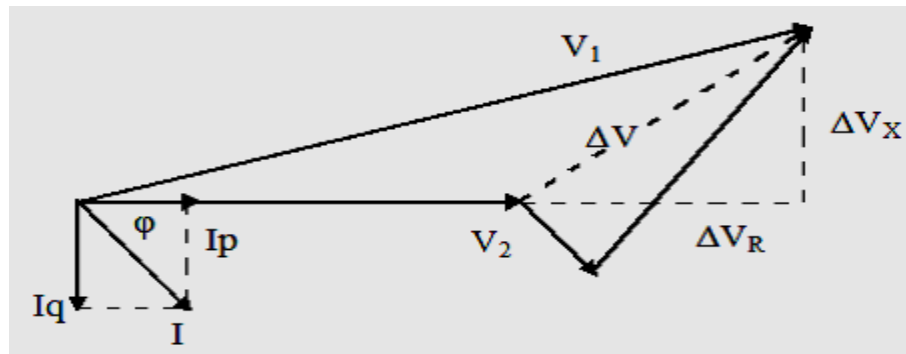


Figure III.2. Diagramme vectoriel associé au circuit précédent.

I: le courant circulé dans la ligne;

I_p : la composante active du courant;

I_q : la composante réactive du courant;

V_2 étant pris comme référence

$$S_D = V_2 I^* = P_D + jQ_D \quad (\text{III. 2})$$

S_D : la puissance apparent demandée.

P_D : la puissance active demandée.

Q_D : la puissance réactive demandée.

$$I = (P_D - jQ_D)/V_2 \quad (\text{III. 3})$$

$$\Delta V = ZI = (R + jX)(P_D - jQ_D)/V_2 \quad (\text{III. 4})$$

$$\Delta V = (R.P_D + X.Q_D)/V_2 + j(X.P_D - R.Q_D)/V_2 \quad (\text{III. 5})$$

$$\Delta V = \Delta V_R + j\Delta V_X \quad (\text{III. 6})$$

C'est-à-dire que la chute de tension a une composante ΔV_R en phase avec V_2 et une composante ΔV_X en quadrature avec V_2 .

Il est clair que la chute de tension dépend simultanément de la puissance active et réactive de la charge.

Comme $\Delta V = V_1 - V_2$ donc $V_1 = V_2 + \Delta V$ et en considérant de V_1 .

$$|V_1|^2 = (V_2 + \Delta V_R)^2 + (\Delta V_X)^2 \quad (\text{III. 7})$$

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{R \cdot P_D + X \cdot Q_D}{V_2} \right)^2 + \left(\frac{X \cdot P_D - R \cdot Q_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{III. 8})$$

Comme $\Delta V_X < (V_2 + \Delta V_R)$ on peut approximer:

$$|V_1|^2 = \left(V_2 + \frac{R \cdot P_D + X \cdot Q_D}{V_2} \right)^2 \quad (\text{III. 9})$$

$$V_1 - V_2 = \frac{R \cdot P_D + X \cdot Q_D}{V_2} \quad (\text{III. 10})$$

Puisque la réactance X est le paramètre prédominant dans l'impédance du réseau c'est-à-dire $R \ll X$, on peut écrire que :

$$\Delta V = V_1 - V_2 \approx \frac{X \cdot Q_D}{V_2} \quad (\text{III. 11})$$

Donc la cause de la chute de tension à travers une impédance est due principalement au courant réactif passant dans cette impédance, ou en d'autres termes elle est due à la variation de la puissance réactive. Pour maintenir V_2 constante si le courant I change, il faut varier la puissance réactive au point de raccordement de la charge.

III.3-Transit de puissance et chute de tension dans une liaison:[15]

III.3.1-Modèle et relations principales:

Considérons le système simple de la figure III.3. Il comporte deux jeux de barres (ou nœuds électriques, ou simplement nœuds) reliés par une ligne ou un câble, dont nous supposons que le schéma par phase consiste en une résistance R en série avec une réactance X . Le transformateur de puissance peut, sous certaines conditions, être également représenté par un tel dipôle.

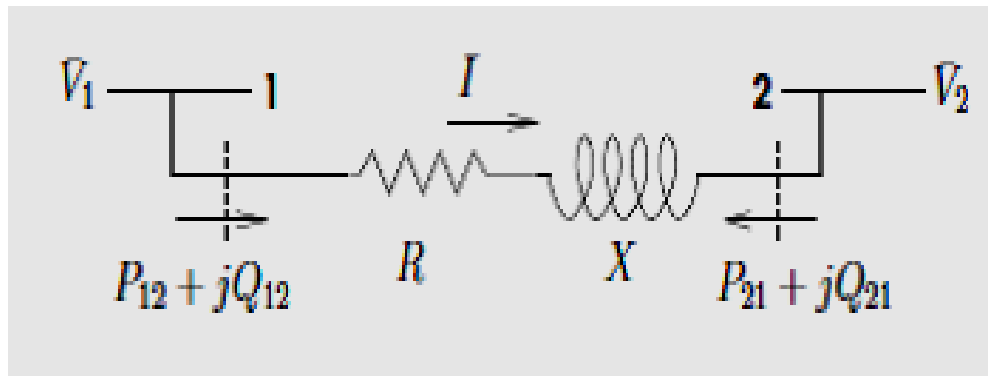


Figure III.3: système simple à deux jeux de barres.

Par un choix approprié de l'origine des temps, on peut supposer que le phaseur de la tension au nœud 1 a une phase est nulle. Posons: $\bar{V}_1 = V_1 \angle 0^\circ$ et $\bar{V}_2 = V_2 e^{j\theta_2} = V_2 \angle \theta_2$.

Soit $\bar{I}$ le courant parcourant la ligne. Soient P_{12} et Q_{12} les puissances active et réactive par phase entrant dans la ligne par le nœud 1 (cf. figure III.3). On a évidemment:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - (R + jX)\bar{I} \quad (\text{III. 12})$$

Il y correspond le diagramme de phaseur de la figure III.3.

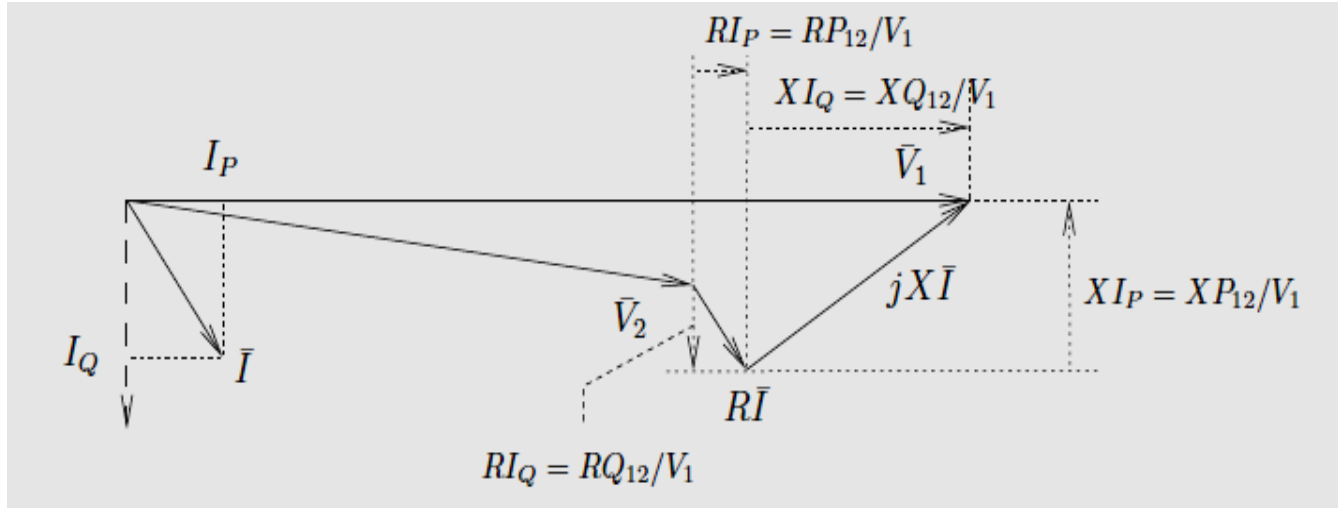


Figure III.4: diagramme de phaseur relatif au système de la figure III.3

Etablissons l'expression de la tension $\bar{V}_2$ en fonction de la tension $\bar{V}_1$ et des transits de puissance P_{12} et Q_{12} . On a:

$$P_{12} + jQ_{12} = \bar{V}_1 \bar{I}^* \quad (\text{III. 13})$$

d'où l'on tire:

$$\bar{I} = \frac{P_{12} - jQ_{12}}{\bar{V}_1^*} = \frac{P_{12} - jQ_{12}}{V_1}$$

En introduisant cette dernière relation dans (III.12), on obtient:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - (R + jX) \left[\frac{P_{12} - jQ_{12}}{V_1} \right] = \bar{V}_1 - \frac{RP_{12} + XQ_{12}}{V_1} - j \frac{XP_{12} - RQ_{12}}{V_1} \quad (\text{III. 14})$$

On peut retrouver ce résultat au d'épart de la figure III.4, en considérant que:

- la projection de $\bar{I}$ sur $\bar{V}_1$ est le courant actif $I_P = P_{12}/V_1$
- la projection de $\bar{I}$ sur la perpendiculaire à $\bar{V}_1$ est le courant réactif $I_Q = Q_{12}/V_1$.

III.3.2 Effet du transport de puissance active et réactive:

Comme nous le verrons, dans les réseaux de transport à Très Haute Tension (THT), la résistance R est négligeable devant la réactance X . Si l'on suppose donc $R = 0$, la relation (III.14) se simplifie en:

$$\bar{V}_2 = \bar{V}_1 - \frac{XQ_{12}}{V_1} - j \frac{XP_{12}}{V_1} \quad (\text{III. 15})$$

Le diagramme de phaseur correspondant est donné à la figure III.5.

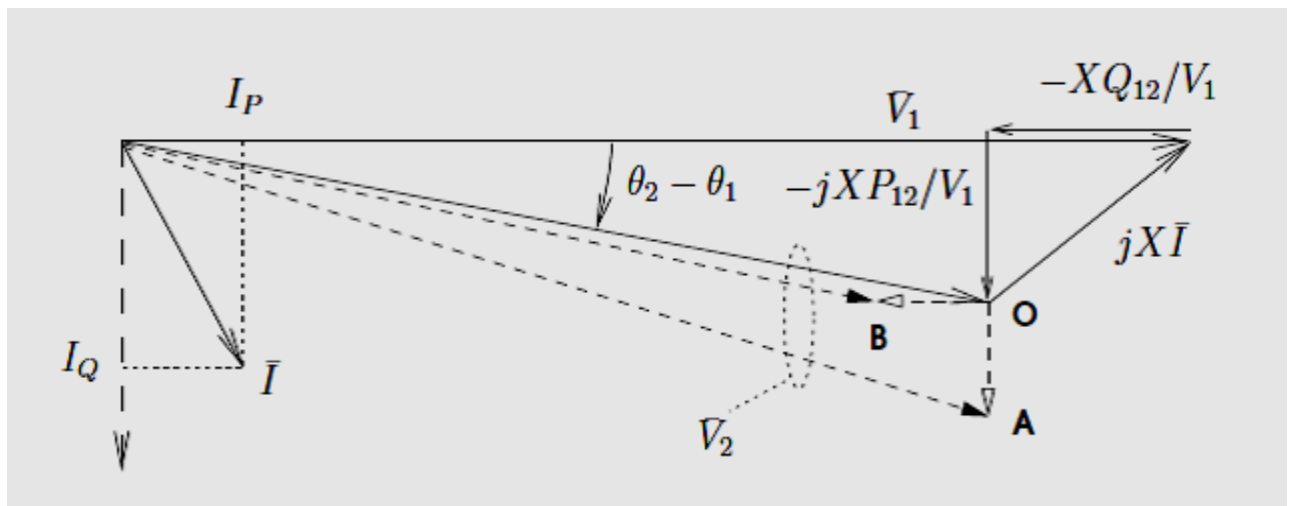


Figure III.5: diagramme de phaseur de la fig. III.4 quand $R = 0$

Cette figure montre de plus la variation de la tension $\bar{V}_2$ sous l'effet de variations supplémentaires de la puissance active (passage du point O au point A) et de la puissance réactive (passage de O en B), la tension V_1 étant supposée constante. On peut en conclure que:

- le transfert de puissance active crée une chute de tension en quadrature avec $\bar{V}_1$. Si l'on suppose, comme c'est le cas en pratique, que $\|\bar{V}_2 - \bar{V}_1\|$ est faible devant V_1 , on peut conclure que le transport de puissance active induit principalement un déphasage des tensions.
- le transfert de puissance réactive crée une chute de tension en phase avec $\bar{V}_1$. On peut en conclure que le transport de puissance réactive induit principalement une chute des (modules des tensions).

III.3.3 Transport de puissance réactive à longue distance:

Dans les réseaux de transport à THT, il est d'usage de dire que la puissance réactive ne se transporte pas aisément sur de longues distances. Ce fait peut être illustré comme suit sur notre exemple à deux nœuds.

Le bilan de puissance complexe de la liaison fournit:

$$P_{12} = -P_{21} + RI^2 \quad (\text{III. 16})$$

$$Q_{12} = -Q_{21} + XI^2 \quad (\text{III. 17})$$

Comme $X \gg R$, on voit que les pertes réactives sont nettement plus élevées que les pertes actives. Ainsi, si les puissances active et réactive entrent en quantités égales dans la liaison, il sort à l'autre extrémité nettement moins de puissance réactive que de puissance active.

Par ailleurs, nous venons de voir que le transfert de puissance réactive va de pair avec une variation des (modules des) tensions. Transférer beaucoup de puissance réactive requiert des chutes de tension importantes. En pratique, ceci n'est pas acceptable car les tensions aux différents nœuds d'un réseau doivent rester dans une plage de quelques pourcents autour des valeurs nominales, sous peine de fonctionnement incorrect des matériels.

Une telle limitation n'existe pas pour la puissance active car le déphasage des tensions n'a pas de conséquence directe pour les équipements.

III.3.4 Expressions des transits en fonction des tensions:

Etablissons à présent l'expression des puissances P_{12} et Q_{12} en fonction des modules et des phases des tensions aux extrémités. Pour plus de généralité, nous considérerons le cas où $\theta_1 \neq 0$.

On obtient à partir des relations (III.12,III.13):

$$\begin{aligned} P_{12} + jQ_{12} &= \overline{V_1 I}^* = \overline{V_1} \frac{\overline{V_1}^* - \overline{V_2}^*}{R - jX} = V_1 e^{j\theta_1} \frac{V_1 e^{-j\theta_1} - V_2 e^{-j\theta_2}}{R - jX} = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 e^{-j(\theta_1 - \theta_2)}}{R - jX} \\ &= \frac{[V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2) - jV_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)](R + jX)}{R^2 + X^2} \end{aligned}$$

En développant le numérateur et en égalant parties réelle et imaginaire des deux membres, on obtient les relations recherchées:

$$P_{12} = V_1^2 \frac{R}{R^2 + X^2} - V_1 V_2 \left[\frac{R}{R^2 + X^2} \cos(\theta_1 - \theta_2) - \frac{X}{R^2 + X^2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \quad (\text{III. 18})$$

$$Q_{12} = V_1^2 \frac{X}{R^2 + X^2} - V_1 V_2 \left[\frac{X}{R^2 + X^2} \cos(\theta_1 - \theta_2) + \frac{R}{R^2 + X^2} \sin(\theta_1 - \theta_2) \right] \quad (\text{III. 19})$$

Par simple permutation des indices 1 et 2, on obtient l'expression des puissances entrant dans la ligne du côté du nœud 2:

$$P_{21} = V_2^2 \frac{R}{R^2 + X^2} - V_2 V_1 \left[\frac{R}{R^2 + X^2} \cos(\theta_2 - \theta_1) - \frac{X}{R^2 + X^2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \right]$$

$$Q_{21} = V_2^2 \frac{X}{R^2 + X^2} - V_2 V_1 \left[\frac{X}{R^2 + X^2} \cos(\theta_2 - \theta_1) + \frac{R}{R^2 + X^2} \sin(\theta_2 - \theta_1) \right]$$

Le lecteur est invité à vérifier que ces expressions obéissent bien aux bilans de puissance (III.16, III.17).

Sous l'hypothèse $R = 0$, les relations ci-dessus deviennent simplement:

$$P_{12} = \frac{V_1 V_2 \sin(\theta_1 - \theta_2)}{X} \quad (\text{III. 20})$$

$$Q_{12} = \frac{V_1^2 - V_1 V_2 \cos(\theta_1 - \theta_2)}{X} \quad (\text{III. 21})$$

$$P_{21} = \frac{V_2 V_1 \sin(\theta_2 - \theta_1)}{X} \quad (\text{III. 22})$$

$$Q_{21} = \frac{V_2^2 - V_2 V_1 \cos(\theta_2 - \theta_1)}{X} \quad (\text{III. 23})$$

Ces relations sont utilisées dans de nombreux raisonnements. Rappelons que P_{12} et Q_{12} sont des puissances par phase.

La puissance triphasée s'obtient en multipliant ces relations par un facteur 3.

III.4- Les pertes de puissance dans lignes:[10]

On considère l'exemple d'un système à deux J.d.B(jeu de barres)suivant:

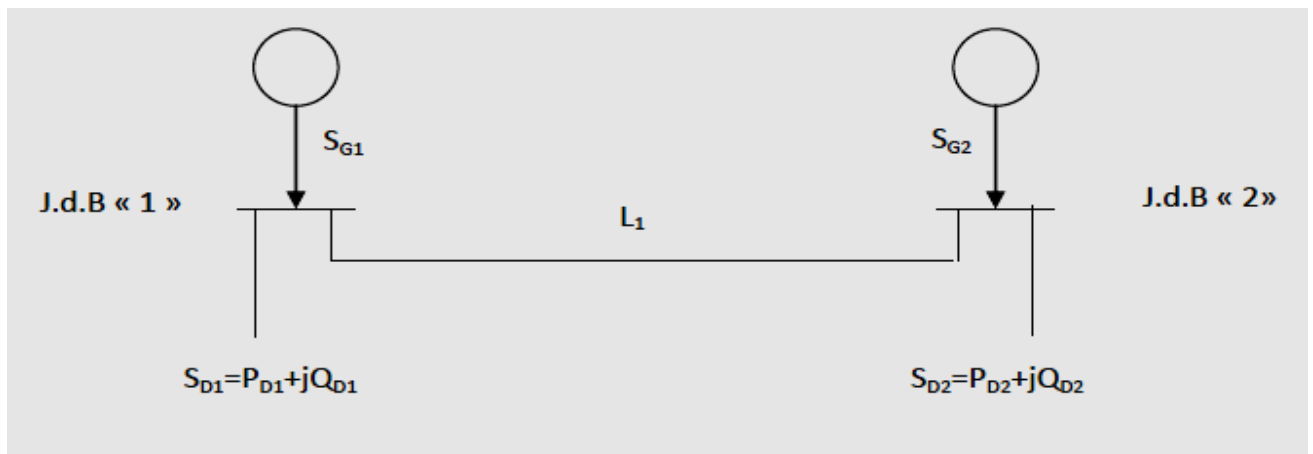


Figure III.6. système a deux J.d.B

On note que :

$$S_1 = S_{G1} - S_{D1}, S_2 = S_{G2} - S_{D2}$$

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

$$S_i = P_i + jQ_i = P_{Gi} + jQ_{Gi} - (P_{Di} + jQ_{Di})$$

$$S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di})$$

Au niveau de J.d.B la puissance apparente nette est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée. Pour un J.d.B « i », On a :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di}$$

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = F_{iP}$$

$$Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = F_{iQ}$$

$$\sum P_i = \sum F_{iP} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad (\text{III. 24})$$

$$\sum Q_i = \sum F_{iQ} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (\text{III. 25})$$

Ou bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme donne l'expression des pertes.

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad (\text{III. 26})$$

$$Q_{Lij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (\text{III. 27})$$

III.5-L'impédance et la Susceptance d'une ligne électrique:[3]

On considère le schéma équivalent en π d'une ligne électrique suivant:

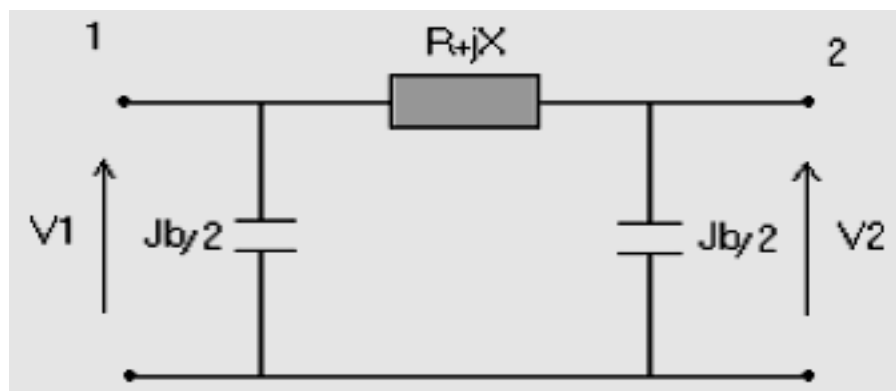


Figure III.7. Circuit équivalent en π d'une ligne électrique.

Les lignes sont normalement spécifiées par :

- Une impédance série : $Z = R + jX \text{ } \Omega/\text{Km}$
- Une admittance shunt : $Y = G + jb \text{ } \Omega^{-1}/\text{Km}$

En pratique G est extrêmement petit ($G=0$) et par conséquent $jb=jC\omega$

Où b représente la Susceptance shunt Ω^{-1}/Km .

III.5.1-Impédances séries:

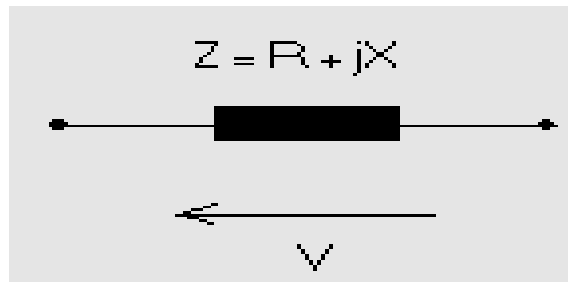


Figure III.8. Impédance série d'une ligne électrique

Les pertes dans les impédances série sont donnés par:

$$S = V \cdot I^* \quad (\text{III. 28})$$

$$V = Z \cdot I \text{ c'est-à-dire que } S = ZI \cdot I^* = Z(I_r + jI_i)(I_r - jI_i) \quad (\text{III. 29})$$

$$S = P + jQ = Z(I_r^2 + I_i^2) = Z|I|^2 \quad (\text{III. 30})$$

Avec: $P = R|I|^2$ et $Q = X|I|^2$

Si $R=0$ alors $P=0$,

$X=0$ alors $Q=0$,

III.5.2-Susceptance shunt:

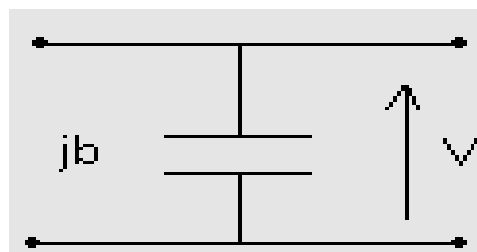


Figure III.9 . Susceptance shunt d'une ligne électrique.

En complexe la tension $\bar{V}$ peut s'écrire :

$$V = V_r + jV_i \quad (\text{III. 31})$$

$$I = jbV = jb(V_r + jV_i) = -bV_i + jbV_r \quad (\text{III. 32})$$

$$I^* = -bV_i - jbV_r = -b(V_i + jV_r) \quad (\text{III. 33})$$

La puissance S dans la Susceptance est donnée par $S = VI^* = P + jQ$ c'est-à-dire que :

$$S = VI^* = (V_r + j V_i) (-b (V_i + j V_r)) = -b (V_r + j V_i) (V_i + j V_r) \quad (\text{III.34})$$

$$S = -jb(V_r^2 + V_i^2) = -jb|V|^2 \quad (\text{III. 35})$$

Comme $S = P + jQ$, donc $P = 0$ et $Q = -jb|V|^2$

En d'autre termes la puissance réactive Q est délivrée par la Susceptance de la ligne.

III.6. Application:

Pour mieux expliquer, on a appliqué les équations qui calculent les paramètres de ligne sur une ligne hypothétique possède les données suivantes:

La hauteur : $h=8.7$ m

La distance entre les phases a et b:

$$D_{ab}=8\text{m}$$

-La distance entre les phases b et c:

$$D_{bc}=8\text{m} ;$$

-La distance entre les phases a et c:

$$D_{ac}=16\text{m}$$

-Longueur de la ligne: $l= 250$ Km

-La matière de conducteur est (AMS)

-La résistivité : $\rho = 0.325 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$

à la température 20°C .

-Diamètre de conducteur 0.028 m

-La ligne est se forme nappe transposée.

- $V=220$ kv ; $S= 50$ MVA;

- $\cos\Phi_2 = 0.85$;

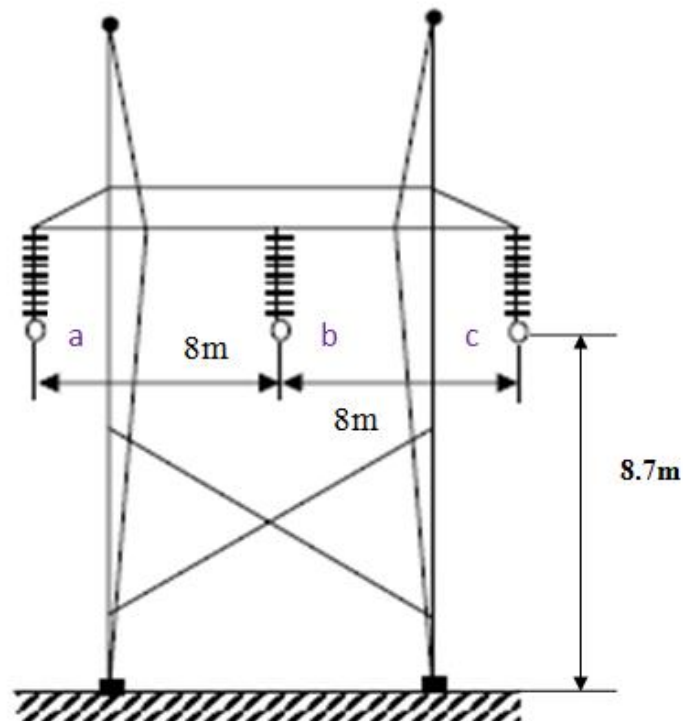


Figure III.10. ligne de transport électrique haute tension hypothétique.

III.6. 1-Calcul de la résistance :

En utilisant l'équation (II. 86):

$$R = \frac{\rho \cdot l}{S} \quad [\Omega]$$

$$R = \frac{0.325 \cdot 10^{-7} \times 250 \times 10^3}{\pi \times (0.014)^2} = 13.1952 \quad [\Omega]$$

$$R = 0.0528 \Omega/\text{km}$$

III.6. 2-Calcul de l'inductance:

En utilisant l'équation (II. 98):

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad H/m$$

$$D_{eq} = (D_{ab} \times D_{bc} \times D_{ca})^{1/3}$$

$$D_{eq} = (8 \times 8 \times 16)^{1/3} = 10.0794 \text{ m}$$

$$D_s = 0.7788 \times r \times 2.54 \times 10^{-2} = 0.0002769 \text{ m}$$

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \ln \frac{10.0794}{0.0002769} = 21.0552 \times 10^{-7} \quad H/m \quad \text{par phase}$$

$$X_L = 2 \times \pi \times 50 \times 21.0552 \times 10^{-7} = 6614.6862 \times 10^{-7} \quad \Omega/m \quad \text{par phase}$$

$$X_L = 0.6615 \quad \Omega/\text{km}$$

III.6. 3-Calcul de la capacitance:

En utilisant l'équation(II. 115)

$$C_n = \frac{0.0241}{\log_{10}(D_{eq}/r)} \quad \mu F/\text{km} \quad \text{au neutre}$$

$$C_n = \frac{0.0241}{\log_{10}(\sqrt[3]{1024}/0.014)} = 0.0084 \quad \mu F/\text{km}$$

$$= 8.4345 \times 10^{-12} \quad F/m$$

$$X_c = \frac{10^{12}}{2 \times \pi \times 50 \times 8.4345} = 0.3774 \cdot 10^{12} \quad \Omega/\text{km}$$

III.6. 4-Effet de la terre sur la capacité de ligne:

En utilisant l'équation(II. 115)

$$C_n = \frac{2\pi \times 8.8538 \times 10^{-12}}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{l_{12}l_{23}l_{31}}}{\sqrt[3]{h_{11}h_{22}h_{33}}}\right)} \quad \text{F/m}$$

$$h_{11} = 8.7 \times 2 = 17.4 \text{ m}$$

$$h_{22} = h_{33} = h_{11} = 17.4 \text{ m}$$

$$l_{12} = ba'$$

On appliqué le théorème de Pythagore

sur le triangle a b a':

$$l_{12} = ba' = \sqrt{(ab)^2 + (aa')^2}$$

$$ab=8\text{m}, aa'=h_{11}=17.4\text{m}$$

$$l_{12} = ba' = \sqrt{(8)^2 + (17.4)^2} = 19.151 \text{ m}$$

Avec la figure on remarque que:

$$l_{23} = l_{12}$$

$$l_{31}=ac'$$

On appliqué le théorème de Pythagore sur le triangle a c c':

$$l_{31} = ac' = \sqrt{(ac)^2 + (cc')^2}$$

on à:

$$ac=16 \text{ m}, cc'=17.4 \text{ m}$$

$$l_{31} = ac' = \sqrt{(16)^2 + (17.4)^2} = 23.6381 \text{ m}$$

Donc:

$$C_n = \frac{2\pi \times 8.8538 \times 10^{-12}}{\ln(\sqrt[3]{1024}/0.014) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{19.151 \times 19.151 \times 23.6381}}{\sqrt[3]{17.4 \times 17.4 \times 17.4}}\right)} = 8.6744 \times 10^{-12} \quad \text{F/m}$$

$$X_c = \frac{10^{12}}{2 \times \pi \times 50 \times 8.6744} = 0.367 \cdot 10^{12} \quad \Omega/\text{km}$$

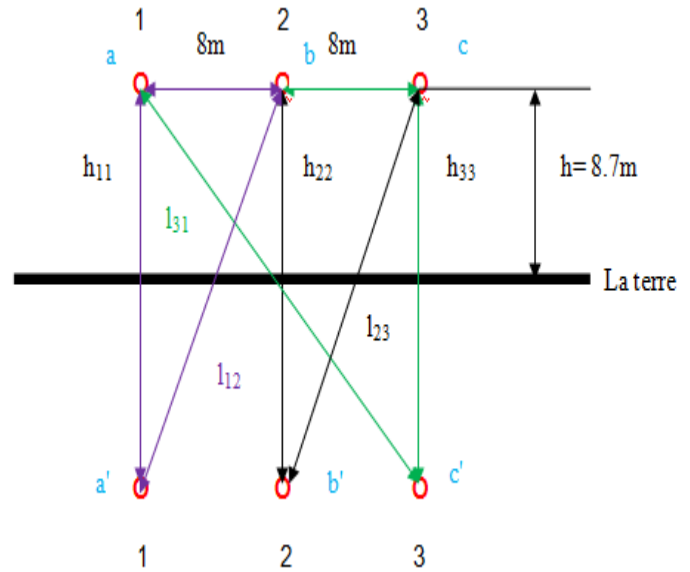


Figure III.11. Les dimension entre les conducteurs et leur images

Pour clarifier l'influence de la hauteur des conducteurs à la réactance capacitive, nous avons changé la hauteur plusieurs fois et chaque fois on a calculé la capacité et la réactance-voir le tableau III.1- Où il s'avère que la est augmenté ,la réactance est aussi augmenté. En d'autres termes, si la surface de la terre est approché à la conducteur de ligne l'effet sera plus.

Hauteur en m	8.7	10.7	12.7	14.7	16.7
Capacité en F/m	8.6744×10^{-12}	8.6093×10^{-12}	8.569×10^{-12}	8.5425×10^{-12}	8.5241×10^{-12}
Réactance capacitive en Ω/km	0.367×10^{12}	0.3697×10^{12}	0.3715×10^{12}	0.3726×10^{12}	0.3734×10^{12}

Tableau III.1 Variations de la réactance en fonction de la hauteur.

III.6. 5-Calcul de l'impédance z et l'admittance y:

$$z = R + jX_L$$

$$z = 0.0528 + j0.6615 = 0.6636 \angle 85.4364^\circ \quad \Omega/\text{km}$$

$$y = j2 \cdot \pi \cdot f \cdot c_n = j2 \times \pi \times 50 \times 8.6744 \times 10^{-9} = j2.725 \times 10^{-6} \quad \text{S/km}$$

$$y = 2.725 \times 10^{-6} \angle 90^\circ \quad \text{S/km}$$

III.6. 6- Calcule de la constante de propagation γ :

$$\gamma = \sqrt{zy} = [(0.6636 \angle 85.4364^\circ)(2.725 \times 10^{-6} \angle 90^\circ)]^{1/2}$$

$$= [1.8085 \cdot 10^{-6}]^{1/2} \angle \frac{1}{2}(90^\circ + 85.4364^\circ)$$

$$\gamma = 0.0013 \angle 87.7182^\circ$$

III.6. 7- Calcule de l'impédance caractéristique Z_c :

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \left(\frac{0.6636 \angle 85.4364^\circ}{2.725 \times 10^{-6} \angle 90^\circ} \right)^{1/2} = \left(\frac{0.6636 \times 10^6}{2.725} \right)^{1/2} \angle \frac{1}{2}(85.4364^\circ - 90^\circ)$$

$$Z_c = 493.4804 \angle - 2.2818^\circ$$

III.6. 8- la tension simple à la sortie de la ligne V_{2n} :

$$V_{2n} = \frac{220 \text{ kv}}{\sqrt{3}} = 127.0171 \text{ kv}$$

On utilise la tension V_{2n} come référence:

$$V_{2n} = 127.0171 \angle 0^\circ \text{ kv} = 127017.1 \angle 0^\circ \text{ V}$$

III.6. 9- le courant à la sortie de la ligne I_2 :

$$I_2 = \frac{50 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 220 \times 10^3} = 131.2160 \text{ A}$$

$$I_2 = 131.2160 \angle -31.8^\circ$$

III.6. 10- Calcule les constantes A,B,C, et D de la ligne:

$$A = \cosh \gamma l = \cosh(\alpha + j\beta) l = \frac{1}{2}(e^{\alpha l} e^{j\beta l} + e^{-\alpha l} e^{-j\beta l})$$

$$\gamma = 0.0013 \angle 87.7182^\circ = \underbrace{0.000051759}_{\alpha} + j \underbrace{0.001298969}_{\beta}$$

Donc:

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{2}(e^{0.0129} e^{j0.3247} + e^{-0.0129} e^{-j0.3247}) = \frac{1}{2}(e^{0.0129} \angle 18.6035^\circ + e^{-0.3247} \angle -18.6035^\circ) \\ &= \frac{1}{2}(1.0129 \angle 18.6035^\circ + 0.9872 \angle -18.6035^\circ) \\ &= (0.5064 \angle 18.6035^\circ + 0.4936 \angle -18.6035^\circ) \end{aligned}$$

$$A = 0.9477 + j0.0041 = 0.9477 \angle 0.2479^\circ$$

$$\begin{aligned} B &= Z_c \sinh \gamma l = Z_c \sinh(\alpha + j\beta) l = Z_c \left[\frac{1}{2}(e^{\alpha l} e^{j\beta l} - e^{-\alpha l} e^{-j\beta l}) \right] \\ &= \frac{1}{2}(493.4804 \angle -2.2818^\circ)(e^{0.0129} \angle 18.6035^\circ - e^{-0.3247} \angle -18.6035^\circ) \\ &= (493.4804 \angle -2.2818^\circ)(0.5064 \angle 18.6035^\circ - 0.4936 \angle -18.6035^\circ) \\ &= (493.4804 \angle -2.2818^\circ)(0.3193 \angle 87.8284^\circ) \end{aligned}$$

$$B = 157.5683 \angle 85.5466^\circ \Omega$$

$$C = Y_c \sinh \gamma l = \frac{1}{Z_c} \sinh \gamma l$$

$$= \frac{1}{493.4804 \angle -2.2818^\circ} \times 0.3193 \angle 87.8284^\circ$$

$$C = 0.000647 \angle 90.1102^\circ \text{ S}$$

$$D = A = 0.9477 \angle 0.2479^\circ$$

III.6. 11-Circuit équivalent de la ligne de transport longue:[15]

Par l'utilisation du paramètres A B C D obtenu à la ligne ,elle est développer en Π ou en T (figure III.5)

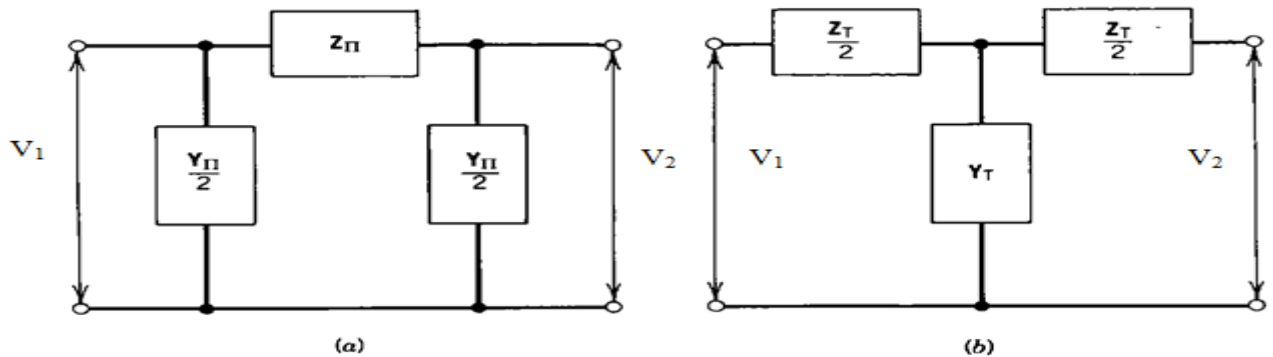


Figure III.12: Circuit équivalent de la ligne de transport longue en Π et en T.

pour le circuit équivalent en Π :

$$Z_{\Pi} = B = Z_c \sin h\theta$$

$$\frac{Y_{\Pi}}{2} = \frac{A - 1}{B}$$

pour le circuit équivalent en T:

$$\frac{Z_T}{2} = \frac{A - 1}{C}$$

$$Y_T = C = Y_c \sinh \theta$$

On applique ca sur l'exemple:

- pour le circuit équivalent en Π :

$$Z_{\Pi} = B = 157.5683 \angle 85.5466^{\circ} \quad \Omega$$

$$\frac{Y_{\Pi}}{2} = \frac{A - 1}{B} = \frac{0.9477 \angle 0.2479^{\circ} - 1 \angle 0^{\circ}}{157.5683 \angle 85.5466^{\circ}}$$

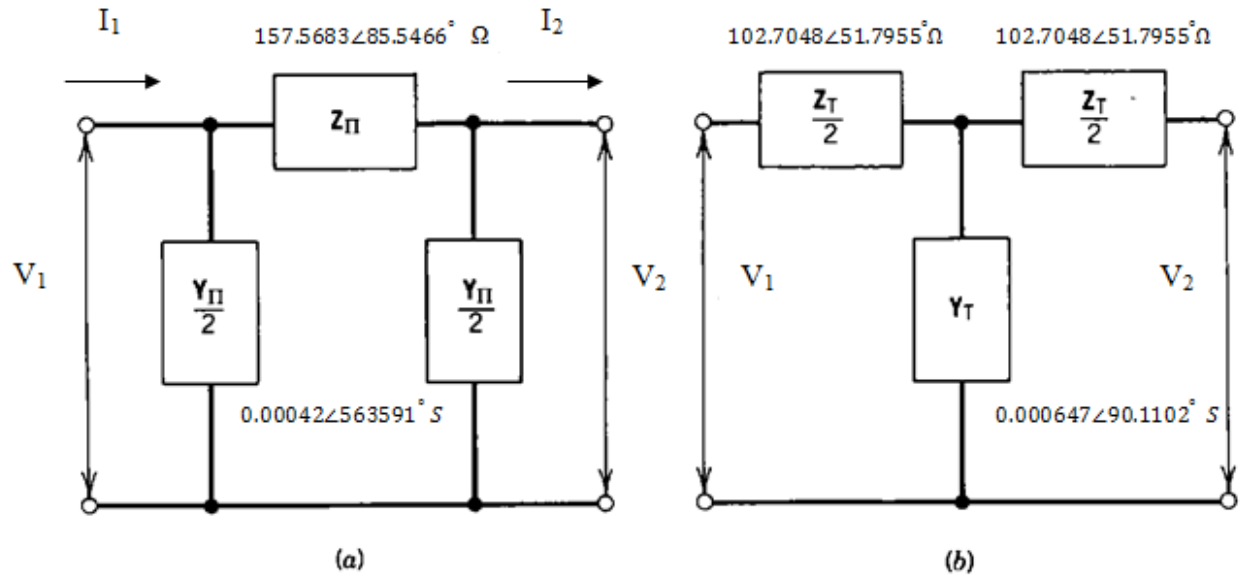
$$\frac{Y_{\Pi}}{2} = 0.00042 \angle 56.3591^{\circ} \quad S$$

- pour le circuit équivalent en T:

$$\frac{Z_T}{2} = \frac{A - 1}{C} = \frac{0.9477 \angle 0.2479^{\circ} - 1 \angle 0^{\circ}}{0.000647 \angle 90.1102^{\circ}}$$

$$\frac{Z_T}{2} = 102.7048 \angle 51.7955^{\circ} \quad \Omega$$

$$Y_T = C = 0.000647 \angle 90.1102^{\circ} \quad S$$

Figure III.13: Circuit équivalent de la ligne de transport de notre exemple en Π et en T.**III.6. 12- Calcule de la tension et le courant d'entrée:**

On utilise le système d'équation (II. 58):

$$\begin{bmatrix} V_{1n} \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{2n} \\ I_2 \end{bmatrix}$$

V_{1n} : la tension simple à l'entrée de la ligne.

I_1 : le courant à l'entrée de la ligne.

$$\begin{bmatrix} V_{1n} \\ I_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.9477 \angle 0.2479^\circ & 157.5683 \angle 85.5466^\circ \\ 0.000647 \angle 90.1102^\circ & 0.9477 \angle 0.2479^\circ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 127017.1 \angle 0^\circ \\ 131.2160 \angle -31.8^\circ \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned} V_{1n} &= (0.9477 \angle 0.2479^\circ)(127017.1 \angle 0^\circ) + (157.5683 \angle 85.5466^\circ)(131.2160 \angle -31.8^\circ) \\ &= 120374.1057 \angle 0.2479^\circ + 20675.4820 \angle 53.7466^\circ \end{aligned}$$

$$V_{1n} = 133709.6587 \angle 7.3881^\circ \text{ V}$$

$$|V_1| = 231.5919 \text{ kv entre phase}$$

- le courant d'entrée:

$$\begin{aligned} I_1 &= (0.000647 \angle 90.1102^\circ)(127017.1 \angle 0^\circ) + (0.9477 \angle 0.2479^\circ)(131.2160 \angle -31.8^\circ) \\ &= 82.18 \angle 90.1102^\circ + 124.3534 \angle -31.5521^\circ \end{aligned}$$

$$I_1 = 107.1859 \angle 9.1848^\circ \text{ A}$$

III.6. 13- Calcule de la chute de tension:

$$\Delta V = |V_1| - |V_2|$$

$$|V_1| = 231.5919 \text{ kv}$$

$$|V_2| = 220 \text{ kv}$$

$$\Delta V = 231.5919 - 220 = 11.5919 \text{ kv}$$

III.6. 14- Calcule de la puissance active et réactive d'entrée et de sortie:

- Le facteur de puissance à l'entrée de la ligne:

$$\Phi_1 = 9.1848^\circ - 7.3881^\circ = 1.7967^\circ$$

$$\cos\Phi_1 = 0.9995$$

- la puissance active à l'entrée de la ligne:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 I_1 \cdot \cos\Phi_1$$

$$P_1 = \sqrt{3} \times 231591.9 \times 107.1859 \times 0.9995 = 42973.8685 \text{ W}$$

$$P_1 = 42.9739 \text{ MW}$$

- la puissance active à la sortie de la ligne:

$$P_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 I_2 \cdot \cos\Phi_2$$

$$P_2 = \sqrt{3} \times 220000 \times 131.2160 \times 0.85 = 42500009.63 \text{ W}$$

$$P_2 = 42.5000 \text{ MW}$$

- la puissance réactive à l'entrée de la ligne:

$$Q_1 = \sqrt{3} \cdot V_1 I_1 \cdot \sin\Phi_1$$

$$Q_1 = \sqrt{3} \times 231591.9 \times 107.1859 \times 0.0314 = 1350054.498 \text{ W}$$

$$Q_1 = 1.35 \text{ MVAR}$$

- la puissance réactive à la sortie de la ligne:

$$Q_2 = \sqrt{3} \cdot V_2 I_2 \cdot \sin\Phi_2$$

$$Q_2 = \sqrt{3} \times 220000 \times 131.2160 \times 0.5268 = 26340005.97 \text{ VAR}$$

$$Q_2 = 26.34 \text{ MVAR}$$

III.6. 15- Calcule des pertes de puissance:

à travers les equation nous trouvons:

- perte de puissance active P_L :

$$P_L = P_1 - P_2$$

$$P_L = 42.9739 - 42.5000 = 0.4739 \text{ MW}$$

- perte de puissance réactive Q_L :

$$Q_L = Q_1 - Q_2$$

$$Q_L = 1.35 - 26.34 = -24.99 \text{ MVAR}$$

Le signe moins signifie qu'il ya un excès du puissance réactive.

III.6. 16- Le rendement de la ligne:

à travers la règle (II. 15):

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \times 100 = \frac{42.5000}{42.9739} \times 100 = 98.9\%$$

III.7-Conclusion:

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée. C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales. [10]

Pour transporter de grandes quantités d'énergie sur de longues distances, il est avantageux de le faire en plus haute tension. Cette technologie permet à la fois de réduire les pertes électriques, les coûts de transport et les impacts sur l'environnement.

Conclusion générale

Nous avons présenté les différents composants de la ligne de transport haute tension et nous avons calculé les grandeurs électriques (la résistance R , l'inductance L , et la capacité C), puis déterminé les paramètres $A B C D$ de la ligne.

En effet, l'étude de la ligne de transport haute tension est basée sur les calculs des grandeurs $R.L.C$. Et c'est parce qu'elle a une incidence sur la performance de la ligne en termes électriques. Les calculs des grandeurs $R.L.C$ permettent de modéliser les lignes aériennes et représentent la ligne à forme de quadripôle comportant une entrée et une sortie.

A partir de notre étude sur la ligne de transport électrique haute tension, son rôle qui se présente dans le transfert de la puissance électrique de son centrale de production au poste de répartition. On a vu qu'il existe des facteurs qui influencent le fonctionnement de la ligne, soit de la part géométrique, comme la distance entre les conducteurs, leurs hauteurs de la terre ainsi que leurs sections, soit de la part électrique qui se manifeste dans la puissance réactive demandée où son transfert négativement influence sur le niveau de tension en provoquant une chute de tension. On trouve aussi parmi les effets des facteurs, la résistivité qui se dépend de la construction de la matière de conducteur et la température où il influence principalement sur la résistance dont elle s'intervient dans le calcul de la perte principale par effet de Joule. Ainsi, il y a des pertes secondaires comme la perte par effet couronne et les pertes shunt.

Bibliographie

- [1]: **A.HELLAL et M.BOUDOUR:** " Réseaux électriques-Fondamentaux et concepts de base", Pages Bleues 2010.
- [2]:**Turan Gönen**("ELECTRIC POWER TRANSMISSION SYSTEM Analysis and Design")- California State University Sacramento,California-1988.
- [3]:**JOHU J. GRAINGER et WILLIAM D.STEVENSON, JR.**"POWER SYSTEM ANALYSIS"International Editions 1994.
- [4]:**Théodore WILDI** "ELECTROTECHNIQUE" 3^eédition.
- [5]: **Mr LABED Djamel:**" *PRODUCTION DECENTRALISEE ET COUPLAGE AU RESEAU*" THESE Présenté pour obtenir le diplôme de DOCTORAT D'ETAT En Electrotechnique UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE Année 2008
- [6]: **Mr.Zellagui Mohamed**" étude des protections des réseaux Electriques MT (30&10 kv)".Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme magistère en électrotechnique 2010.
- [7]: **Rabah Chaarani**" étude de l'influence des caractéristiques des isolateurs sur leurs performances électriques dans des conditions de givrage".These présentée a l'université de Québec à Chicoutimi comme exigence partielle du doctorat en ingénierie .Hiver 2003
- [8]: **Boudjamaa M^{ed} Abdelhakim et Sabti Redouane** :Projet de fin d'études envue d'obtention du diplôme de master en Génie Electrique.
- [9]: **Asif HAMMOUD**," Etude des convertisseurs haute tension pour la protection et la coordination des réseaux de distribution" thèse présentée devant l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon pour obtenir le grade de DOCTEUR, Soutenue le : 21 Octobre 2010.
- [10]: **Oussama MAMMERI**" DIFFERENTES METHODES DE CALCUL DE LA PUISSANCE REACTIVE DANS UNE NOEUD A CHARGE NON LINEAIRE EN PRESENCE D'UN

SYSTEME DE COMPENSATION DE L'ENERGIE", Mémoire de Magister Université de Batna
2011/2012

[11]: Transport de l'électricité au Québec. <http://www.hydroquebec.com/comprendre/transport/types-pylones.html> 6:36 27/03/2013

[12] Cahier Chaarani " général-lignes aériennes HTB (CCG-LA)

[13]: **Jean-Louis** "TRANSPORT ET DISTRIBUTION DE L'ENERGIE "Manuel de travaux pratiques destiné au cours , Année académique 1999/2000.

[14] **Taylor & Francis** Group, LLC "Manuel Reta-Herna'ndez"- Universidad Auto'noma de Zacatecas-2006.

[15]: **Thierry VAN CUTSEM** "ANALYSE ET FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES D'ENERGIE ELECTRIQUE"-Notes du cours ELEC 0029- Université de lège-Département d'Electricité,Electronique et Informatique-janvier 2012

[16]: Hydro-Québec, Requête R-3401-98" MÉTHODOLOGIE DE CALCUL DU TAUX DE PERTES DE TRANSPORT", Original : 2000-08-15

[17]: <http://www.hydroquebec.com/comprendre/transport/lignes-pylones.html> 12:04 11/04/2013

[18] Article publié dans santé et développement durable <http://www.vedura.fr/social/sante/ligne-haut-tension-sante> 11:15 13/04/2013

ملخص

عند نقل الطاقة الكهربائية من محطات الإنتاج الى مراكز التوزيع نحتاج الى خطوط نقل كهربائية عالية التوتر، حيث تعمل هذه الخطوط على نقل الاستطاعة باقل ضياعات ممكنة.

في هذه المذكرة قمنا بدراسة عامة حول خطوط النقل عالية التوتر وذلك بعرض اهم مكونات الخط و بتحديد المعادلات التي تمكننا من حساب ثوابته وكذلك حساب الضياعات والهبوط في التوتر، ولتوضيح ذلك قمنا بتطبيق هذه المعادلات على مثال افتراضي عبارة عن خط نقل كهربائي عالي التوتر ٢٢٠ كف.

الكلمات المفتاحية:

مراكز التوزيع، ثوابت الخط، الضياعات، الهبوط في التوتر.

Résumé

Quand on transmet l'énergie électrique, à partir des centrales de production aux postes des répartitions on a besoin des lignes de transport d'haute tension, qui transporte la puissance avec moins des pertes possibles .

Dans cette thèse , nous avons fait une étude générale sur les lignes de transport à haute tension en décrivant les éléments les plus importants de lignes et de déterminer les équations qui nous permet de calculer les ses paramètres ainsi que les pertes et la chute de tension.

Pour mieux expliquer, on a appliqué ces équations sur un exemple hypothétique pour une ligne de transport électrique à haute tension de 220 KV.

Mots-clés:

postes de répartition, paramètres de la ligne, les pertes, la chute de tension.

Summary

When we make a power transmission from productions centers to distribution stations, we need electric transmission lignes with high voltage, where these lines one worling , they will be able to transfer lowest possible losses.

In this these , we did ol a general study on the transmission lignes of high voltage by showing the most important composents of the line and determin the equations which enable us of calculate its parameters as well as the losses voltage drop.

To clorify that we applied these equations on a hypothetical exemple of a transmission electric line with high voltage 220 kV.

Keywords:

distribution stations, line parameters, losses, voltage drop.