Liste des symboles

P = puissance active absorbée par la charge.

P_J : puissance active dissipée dans la ligne par effet Joule.

Q_L : puissance réactive absorbée par la ligne.

Q_C : puissance réactive générée par la ligne.

ρ: résistivité des matériaux utilisés pour les lignes (Ω.m)

n : nombre de brins dans le conducteur

k: facteur donné par le constructeur.

d: diamètre de chaque brin (m).

R_θ :La résistance linéique à courant continu à la température d'exploitation (θ)

Θ : la température d'exploitation

ϕ : Est le flux de liaison, en weber. Tours

H_x : L'intensité de champ magnétique

B_x : Induction magnétique

$\mu_{0:}$ la perméabilité de vide (ou de l'air)

I_x : le courant cerné à l'intérieur de cylindre de rayon x

$L_{int:}$ L'inductance due au flux de liaison intérieur

DMG: la distance moyenne géométrique (m)

a: Le pas du faisceau (cm)

r_c: Le rayon du conducteur (cm)

r_{eq}: le rayon équivalent du faisceau (cm)

b_0: La susceptance

r_0 : résistance linéique

g_0 : conductance linéique

x_0 :inductance linéique

z_c : impédance caractéristique

R : rayon du faisceau.

a: distance entre deux conducteur consécutifs

R_{eq}: rayon équivalent du faisceau qui représente le rayon d'un conducteur cylindrique unique

E_{moy} : gradient moyen

C:la capacité linéique de fonctionnement de la ligne (F/m).

U_n : Latension nominale de la ligne (kV)

ε_0: la permittivité dans le vide (F/m)

k: le degré d'irrégularité du champ électrique

r : Résistance longitudinale par unité de longueur.

ℓ : L'inductance longitudinale par unité de longueur.

c : La capacité transversale par unité de longueur.

g : La conductance transversale par unité de longueur.

γ : la constante de propagations

γ1: le coefficient d'atténuation d'amplitude.

γ2 : le coefficient de retard de phase.

D : distance des conducteurs.

a : diamètre des conducteurs

Z : impédance totale

Y : l'admittance totale

I_G : courant de générateur

V_G : tension de générateur

I_R :courant de charge

V_G : tension de charge

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE 11
CHAPITRE I 13
GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES 13
I.1 Introduction 14
I.2 Historique 14
I.3Rôle du réseau électrique 15
I.4 Les niveaux de tensions des réseaux 17
I.5Description des réseaux électriques 17
I.5.1 Le réseau de transport THT 17
I.5.2 Le réseau de transport HT 18
I.5.3 Le réseau de répartition MT : 19
I.5.4 Le réseau de distribution BT 19
I.6 Les structures topologiques des réseaux électriques : 20
I.6.1Les réseaux radiaux : 20
I.6.2 Les réseaux bouclés : 20
I.6.3 Les réseaux maillés : 20
I.7 Les postes électriques 21
I.7.1 Types de postes 21
I.7.2 Les différents éléments de poste électrique 22
I.8 Description des réseaux modernes 23
I.8.1 Production: 23
I.8.2 Le transport et la répartition : 24
I.8.3 Distribution: 25
I.8.4 Les charges: 25
I.9 Tensions normalisées 27
I.10 Le système de protection 28
I.11 Disjoncteur à haute tension 29
I.12 Les transformateurs et les autotransformateurs 29

I.12.1 Les transformateurs 29
I.12.2 L'autotransformateur 30
I.12 Le centre de contrôle ou dispatching 31
I.13 Conclusion 32
CHAPITRE II 33
DEFINITION ET PROPRIETES DE LA LIGNE 33
II.1 Introduction 34
II.2 L'utilité de la HT 34
II.3 La ligne à haute tension 34
II.4 Composants d'une ligne 35
II.4.1Conducteurs 35
II.4.2 Isolateurs 36
II.4.3 Supports 38
II.4.4 Câbles de garde 39
II.5 Construction d'une ligne 39
II.6 Lignes galopantes 40
II.7 Effet couronne - interférences radiophoniques 40
II.8 Pollution 41
II.9 Mise à la terre des pylônes 41
II.10 Conclusion 41
CHAPITRE III 42
ÉTUDE ELECTRIQUE ET MODELISATION DE LA LIGNE 42
III.1 Introduction 43
III.2 Exigences d'une ligne de transport 43
III.3 Paramètres de la ligne 43
III.3.1 Circuit équivalent d'une ligne 43
III.3.2 Résistance de la ligne 45
III.3.3 Inductance de la ligne 46
III.3.4Réactance de la ligne 49
III.3.5 Capacité de la ligne 49
III.3.6 Susceptance de la ligne 50
III.3.7 Impédance caractéristique 50

III.3.8 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs 50
III.4 Modélisation des lignes et des câbles électriques 52
III.4.1 La ligne en tant que composant distribué 52
III.5 Méthodes approchées - Lignes en T et en π 59
III.6 Conclusion 61
CHAPITRE IV 62
SIMULATION D'UNE LIGNE DE TRANSPORT 62
IV.1 Introduction 63
IV.2 Caractéristiques de la ligne 63
IV.3 Variation de la distance 64
IV.3.1 Organigramme de calcul 65
IV.3.2 Résultats 66
IV.3.3 Interprétation des résultats 68
IV.4 Variation de la température 69
IV.4.1 Organigramme de calcul 69
IV.4.2 Résultats 70
IV.4.3 Interprétation des résultats 71
IV.5 Conclusion 71
Conclusion générale 72
Bibliographie 74
Annexe: 76

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'étude d'implantation d'une ligne aérienne de transport électrique exige préalablement des études techniques et l'examen des procédures administratives en vigueur dans le pays (le processus complet dépend des règles en usages dans chaque pays. Notons, cependant, que cette façon de procéder n'est pas figée et subit des modifications continuelles.

L'objectif poursuivi est bien entendu de réaliser une ligne électrique performante, fiable et à moindre coût. Le tracé de la ligne électrique doit tenir compte :

-du respect de l'environnement

-des obstacles à éviter ou à contourner

Pour ces raisons le tracé suit rarement une ligne droite.

En Algérie le respect des procédures administratives est garanti par l'Etat par l'intermédiaire :

-des ministères concernés (énergie, urbanisme, agriculture, etc …)

-des autorités locales (wilayates, dairates, etc…)

-des entreprises (Sonelgaz, etc…)

D'autre part le réseau électrique doit répondre à certaines exigences, telles la stabilité du courant et la continuité de l'alimentation électrique aux consommateurs.

Les lignes de transport et les postes de transformations HT constituent une partie essentielle d'un réseau électrique.

Notre étude porte sur une ligne aérienne de haute tension (220 KV) de moyenne distance.

Le présent mémoire est structuré comme suit :

-Le premier chapitre présente des généralités sur le réseau électrique

-Le deuxième chapitre défini la ligne de transport et ces paramètres

-Le troisième chapitre traite les paramètres et le modèle électrique de la ligne

-Dans le dernier chapitre, on présente les résultats de notre simulation et leur évaluation

Ce travail se termine par une conclusion générale dans laquelle on résume les principaux résultats obtenus et on énumérera les perspectives à ce travail.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES RESEAUX ELECTRIQUES

I.1 Introduction

A notre époque sans électricité, la vie quotidienne serait difficilement envisageable. Il est donc nécessaire de savoir la produire de manière efficace et continue. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu construire des centrales électriques capables de produire de l'électricité en grande quantité. Une fois le courant produit, il doit être amené jusqu' au consommateur.

En Algérie, ce service est assuré par la SONELGAZ qui est une société nationalisée à cet effet, SONELGAZ a une triple mission :

- Produire l'énergie dans des centrales (thermiques).
- Transporter cette énergie par des lignes à haute tension ou très haute tension.
- Distribuer cette énergie aux usagers en basse tension.

I.2 Historique

XIX^{e} siècle

- En 1882, la première transmission à haute tension se fait entre Munich et Bad Brook.
- En 1891, le premier usage de courant alternatif triphasé sur lignes aériennes se fait à l'occasion du Salon international de l'électricité, à Francfort.
- En 1892, la ligne aérienne triphasée du Salon international de l'électricité sera prolongée jusqu'à Heilbronn. C'est donc la première ville au monde à être alimenter en électricité par des lignes aériennes longue distance.

XX^{e} siècle

- En 1912, la première ligne à haute tension 110 kventre en service.
- En 1921,la première ligne de 120 kV pour desservir les aciéries de Saint-Chamond.
- Dans les années 1920, l'Énergie électrique du littoral méditerranéen bâtit une ligne de 170 km et 160 kV.
- En 1923, pour la première fois, c'est une tension de 220 kV qui est appliquée à la ligne.
- En 1957, la première ligne de 380 kV entre en service. Dans la même année, la ligne aérienne traversant le détroit de Messine a été mise en service en Italie.
- En 1965, au Québec (Canada), Hydro-Québec met en service la première ligne au mondede 735 kV.

- Dès 1967 en Russie et aux États-Unis, des lignes à haute tension de 765 kV sont construites.
- En 1982, des lignes sont construites en Union soviétique, près de Moscou alimentées par un courant alternatif triphasé à 1 200 kV.

XXI^{e} siècle

- En 2003, la construction de la plus grande ligne à haute tension a débuté en Chine

I.3Rôle du réseau électrique

Le courant alternatif s'est généralisé avec l'évolution technologique qui a permis d'adapter les tensions à des puissances importantes grâce aux transformateurs.

Le réseau électrique est 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 de réseau électrique ces frontières sont assurées par les postes sources et les transformateurs. [2]

(Figure I.1).

Clicours.COM

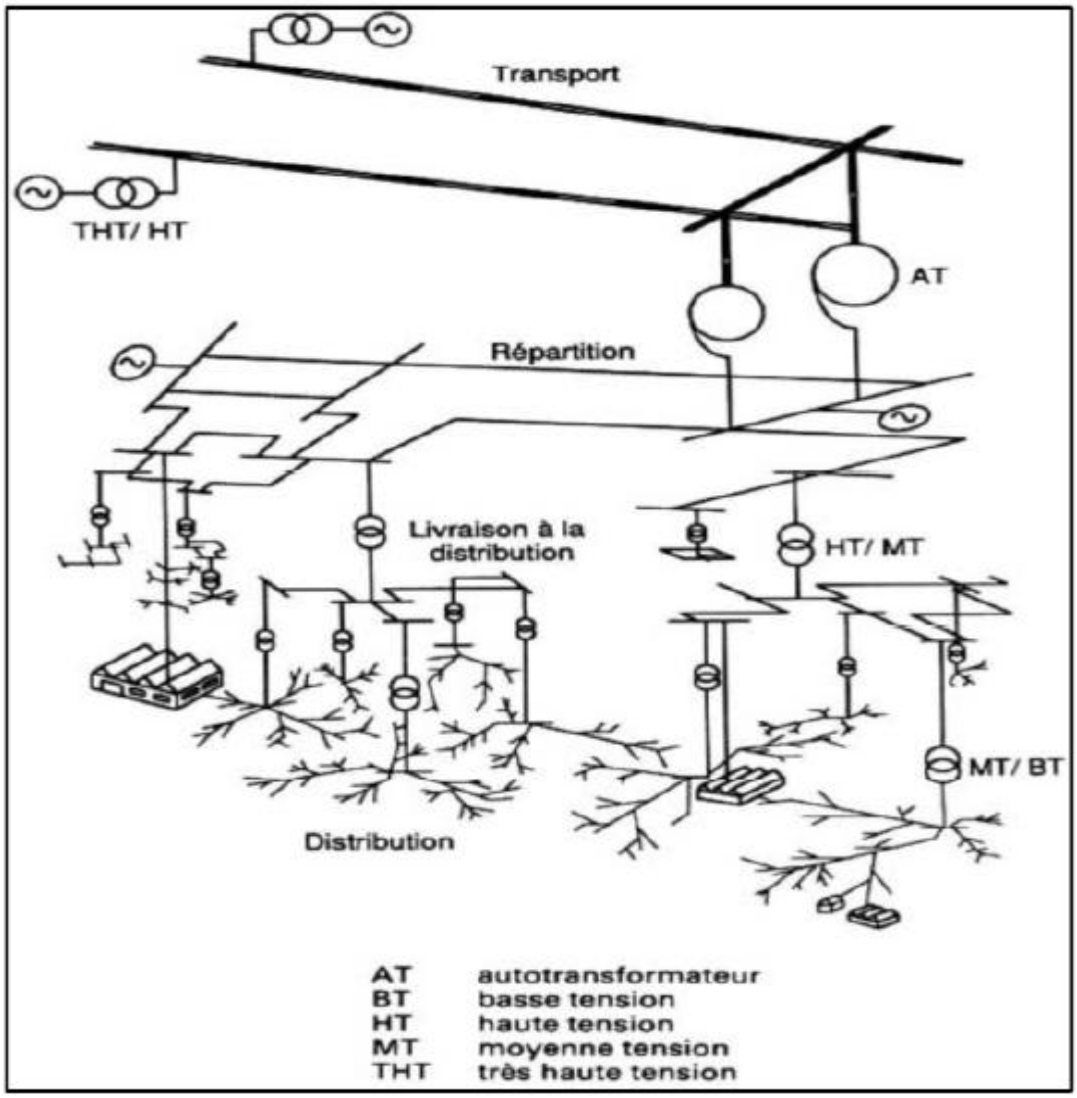

Figure I.1 : Le réseau électrique

Le réseau électrique est exploité de manière à assurer trois principaux objectifs :

1. La distribution d'électricité doit pouvoir être garantie et ce malgré les aléas du réseau. En effet, celle-ci est un enjeu à la fois financier et de sécurité pour les biens matériels et des personnes. Ainsi l'opérateur du réseau doit être capable de faire face à ces aléas et d'éviter les dégâts potentiels ainsi que leurs propagations. Cet enjeu de sureté de fonctionnement en régime normal et en régime perturbé est un des premiers objectifs.
2. L'onde de tension fait l'objet d'engagement contractuel que l'opérateur se doit de tenir en respectant une règle d'égalité c'est-à-dire une impartialité entre clients en conservant une continuité de service maximale.

3. Le dernier objectif d'exploitation est un objectif économique, l'exploitation doit être menée de manière optimale dans le but de réduire les pertes ainsi que les coûts de maintenance et d'investissement. D'autre part l'exploitation doit favoriser l'ouverture du marché de l'électricité.

I.4 Les niveaux de tensions des réseaux

Les tensions normalisées selon la CEI (Commission électrotechnique internationale):

La nouvelle norme CEI (ainsi que les textes législatifs en vigueur en Algérie depuis juin 2002) définissent les niveaux de tension alternative comme suit (Figures I.2.et I.3) :

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

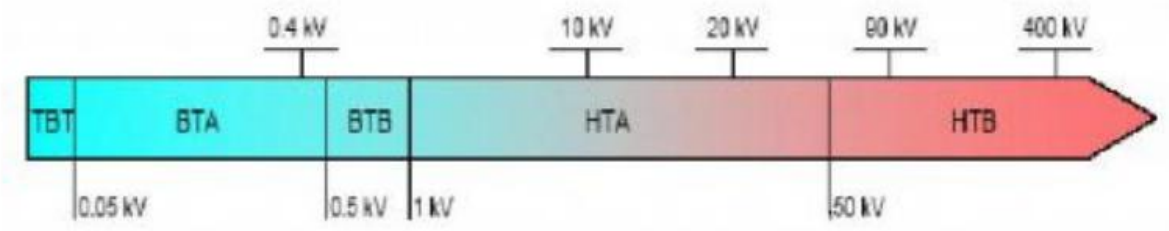

Figure I.2: Niveaux de tension normalisés

Nous prendrons par convention dans ce qui suit :

- HTB désignera la Haute Tension HT.
- HTA désignera la Moyenne Tension MT.
- BTB et BTA désignerons le domaine de la Basse Tension BT.

I.5Description des réseaux électriques [4][5]

I.5.1 Le réseau de transport THT

C'est généralement le réseau qui permet le transport de l'énergie depuis lescentres éloignés de production vers les centres de consommation. C'est sur le réseau THT que sont en principe branchées les centrales de grandes puissances(> 300 MW).

Les réseaux de transport constituent une vaste grille couvrant le territoire, à laquelle sont raccordées les sources et les utilisations (groupes, transformateurs).Chaque nœud A, B et C(Fig. I.4) constitue un « poste d'interconnexion ». Ce poste est en généralconstitué par un collecteur principal appelé « jeu de barres » sur lequel seraccordent les lignes, au moyen d'appareils.

Les protections de ces réseaux doivent être très performantes. Quant à leurexploitation, elle est assurée au niveau national par un centre de conduite oudispatching à partir duquel l'énergie électrique est surveillée et gérée en permanence [3].

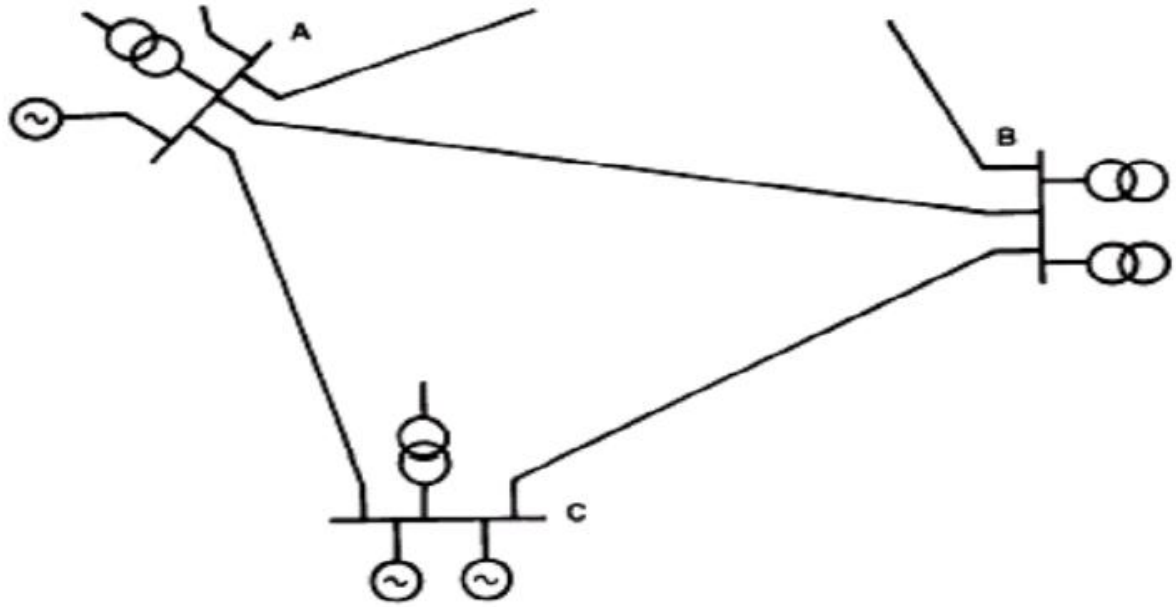

Figure I.3 : Exemple d'une partie d'un réseau de transport

I.5.2 Le réseau de transport HT

La finalité de ce réseau est avant tout d'acheminer l'électricité du réseau de transport vers

Les grands centres de consommation qui sont :

- Soit du domaine public avec l'accès au réseau de distribution MT,
- Soit du domaine privé avec l'accès aux abonnés à grande consommation (supérieure à 10 MV A) livrés directement en HT. Il s'agit essentiellement d'industriels tels la sidérurgie, la cimenterie, la chimie, le transport ferroviaire,... [4]

La structure de ces réseaux est généralement de type aérien (parfois souterrain à proximité de sites urbains).Les protections sont de même nature que celles utilisées sur les réseaux de transport, les centres de conduite étant régionaux [3].

I.5.3 Le réseau de répartition MT :

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense comme dansles villes ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moinsgrandes comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau dedistribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant decentrales éloignées, par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition etalimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zoneà desservir; ces postes de transformation abaissent la tension à une valeurconvenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sontraccordés par des branchements [3].

I.5.4 Le réseau de distribution BT

C'est le réseau qui nous est en principe familier puisqu'il s'agit de la tension 220/380 Ven Algérie. Nous le rencontrons dans nosmaisons via la chaîne : compteur, disjoncteur, fusibles (micro disjoncteurs).

La finalité de ce réseau est d'acheminer l'électricité du réseau de distributionMT aux points de faible consommation dans le domaine public avec l'accès auxabonnés BT. Il représente le dernier niveau dans une structure électrique [4].

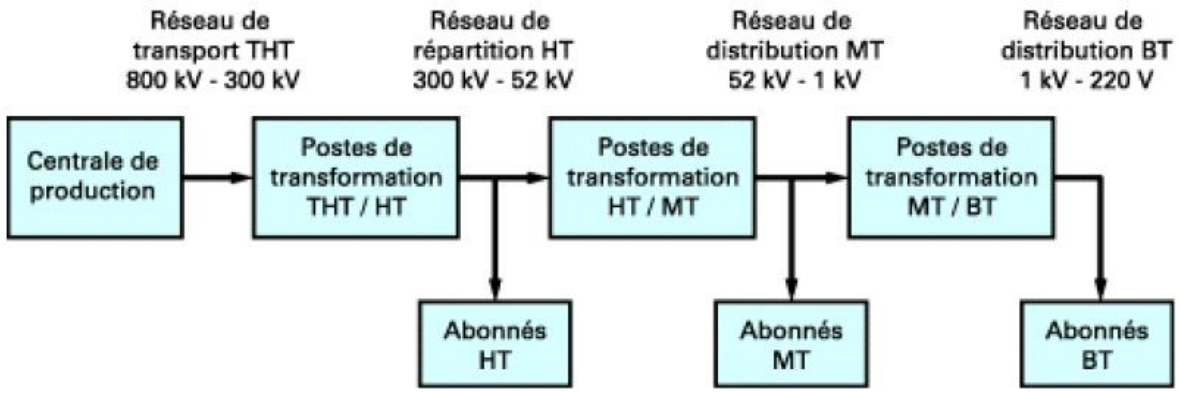

Figure I.4 :Schéma de description des réseaux électriques

I.6 Les structures topologiques des réseaux électriques : [6]

I.6.1Les réseaux radiaux :

Sont, à partir d'un poste d'alimentation, constituées de plusieurs artères (figure I.5). En pratique si l'on regarde une carte de tel réseau, on aperçoit des points communs. Mais ces réseau sont en fait ≪ bouclables mais non bouclés ≫ car en ces points est toujours placés un appareil de coupure, ouvert en exploitation normale. Cette disposition, permet en cas d'incident sur une artère de reprendre l'alimentation de certaines dérivations par les artères voisines.

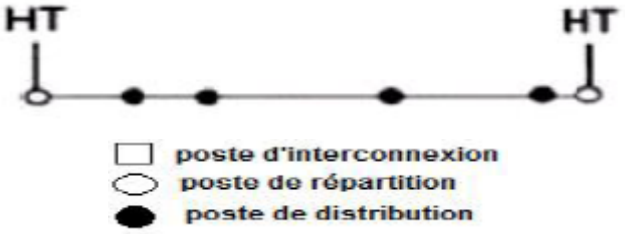

Figure I.5 : Exemple d'une structure d'un réseau radial

I.6.2 Les réseaux bouclés :

Sont alimenté à la fois par plusieurs source (en général 2 ou 3 rarement plus).

L'existence de plusieurs sources en parallèle (figure I.6.) augmente la sécurité d'alimentation, en cas d'avarie de l'une d'elles (transformateur) ou sur une boucle.

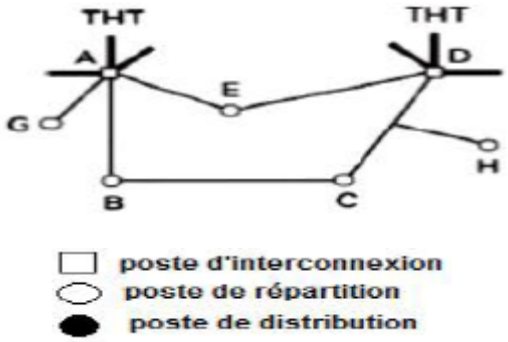

Figure I.6: Exemple d'une structure d'un réseau bouclé

I.6.3 Les réseaux maillés :

Sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Cette structure (figure I.7) nécessite que tous les tronçons de lignes soient capables de surcharges permanentes, et qu'il soit muni, a leurs deux extrémités, d'appareils de coupure. On obtient ainsi la meilleure sécurité, mais au prix le plus élevé.

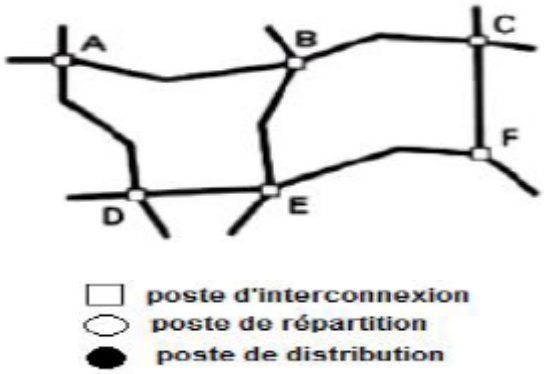

Figure I.7 : Exemple d'une structure d'un réseau maillé

I.7 Les postes électriques

I.7.1 Types de postes [7]

On distingue, suivant les fonctions qu'ils assurent, plusieurs types de postes :

•**Les postes à fonction d'interconnexion**, qui comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés ;

• **Les postes de transformation**, dans lesquels il existe au moins deux jeux debarres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs;

•**Les postes mixtes**, les plus fréquents, qui assurent une fonction dans leréseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation.

Les actions élémentaires inhérentes aux fonctions à remplir sont réalisées parl'appareillage à haute et très haute tension installé dans le poste et qui permet :

•D'établir ou d'interrompre le passage du courant, grâce aux disjoncteurs ;

•D'assurer la continuité ou l'isolement d'un circuit grâce aux sectionneurs ;

•De modifier la tension de l'énergie électrique, grâce aux transformateurs de puissance.

Un ensemble de protections et d'automates contrôle les grandeurs électriques réduites, élaborées par des réducteurs de mesure (tension et courant principalement)et agit sur l'appareillage à haute tension afin d'assurer les conditions d'exploitationpour lesquelles le réseau a été conçu.

Nous retiendrons donc que, par définition, les appareils de coupure, ainsi quel'appareillage de mesure et de protection propre à un départ, sont regroupés dans une cellule.

Un poste comporte donc autant de cellules que de départs qui sont raccordésà ses jeux de barres.

En outre, les jeux de barres sont susceptibles de constituer plusieurs nœuds électriques par l'ouverture de disjoncteurs ; on appelle alors sommet le jeu debarres ou le tronçon de jeu de barres ainsi constitué. Le nombre des sommets d'unposte caractérise ainsi son aptitude à former des nœuds électriques [5].

I.7.2 Les différents éléments de poste électrique

On distingue parfois les éléments d'un poste en "éléments primaires" (les équipements moyennetension) et "éléments secondaires" (équipements basse tension)

Parmi les équipements primaires, on peut citer [5] :

- ✓ Transformateur électrique,
- ✓ Autotransformateur électrique,
- ✓ Disjoncteur à haute tension,
- ✓ Sectionneur,
- ✓ Sectionneur de mise à la terre,
- ✓ Parafoudre.
- ✓ Transformateur de courant.
- ✓ Transformateur de tension.
- ✓ Combiné de mesure (courant + tension).
- ✓ Jeux de barres.
- ✓ Parmi les éléments secondaires on peut citer :
- ✓ Relais de protection.
- ✓ Équipements de surveillance.
- ✓ Équipements de contrôle.

- ✓ Système de télé conduite.
- ✓ Équipements de télécommunication.
- ✓ Comptage d'énergie.

I.8 Description des réseaux modernes

Un réseau d'énergie électrique est aujourd'hui un ensemble de circuits complexes interconnectés comme le montre le schéma de principe de la figure I.9.

Le réseau électrique peut être subdivisé en quatre parties essentielles :[8]

- ➢ La production d'énergie électrique
- ➢ Le transport et la répartition
- ➢ La distribution
- ➢ Les charges

I.8.1 Production:

Quand elle n'est pas d'origine chimique (batteries et accumulateurs), ou photovoltaïque (énergie solaire), l'électricité "industrielle" est toujours produite selon le même principe la transformation d'une énergie mécanique en énergie électrique, provenant de la mise en mouvement d'un aimant dans un bobinage de fil conducteur. Ce principe de l'alternateur (comparable à la dynamo des éclairages de bicyclettes) fonctionne à partir de diverses sources motrices : force de l'eau (barrages), force du vent (éoliennes), force de la vapeur d'eau (centrales nucléaires et centrales thermiques à flamme) qui vont toutes entraîner la rotation de l'alternateur.

Une très grande partie de l'énergie électrique est produite par trois types de centrales :

a) Les centrales hydrauliques
b) Les centrales thermiques
c) Les centrales nucléaires

Bien qu'on commence à exploiter le vent, les marées et l'énergie rayonnante du soleil, ces sources d'énergie ne représenteront, pour les années à venir, qu'une petite partie de l'énergie totale dont nous aurons besoin. Tout semble indiquer qu'au niveau mondial nous continuerons à exploiter les ressources fossiles (charbon, gaz naturel) et nucléaires.

L'électricité ne se stocke pas à l'échelle industrielle : à tout instant, la production d'électricité doit être égale à celle qui est consommée.

En Algérie, la société **«Sonelgaz»**veille donc à assurer, en permanence, un équilibre entre les offres de production et les besoins de consommation qui varient avec la saison, la météo du jour, de l'heure…etc. Des prévisions définissent les besoins théoriques nécessaires et les ajustements ont lieu en permanence pendant la journée.

I.8.2 Le transport et la répartition :

Le rôle du réseau aérien de transport est d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales situées à différents endroit 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.

Les niveaux de tension utilisés pour le transport sont différents d'un pays à un autre, mais une tendance à une normalisation existe. Font partie du réseau de transport toutes les lignes dont le niveau de tension est supérieur à 60 kV. En Algérie les tensions usitées pour le transport sont de 60 KV, 90 KV, 150 KV, 220 KV et en cours de réalisation 400 KV. Aux Etats-Unis, les tensions sont normalisées à 69 KV, 115 KV, 138 KV, 1161 KV, 230 KV, 345 KV, 500 KV, et 756 KV. Les lignes de transport dont la tension est supérieure à 500 KV sont dites à ultra haute tension, celles dont la tension est supérieure à 150 KV, mais inférieure à 500 KV, sont dites à très haute tension (THT). Ces seuils varient d'un pays à un autre.

Toutes les lignes de transport aboutissent toutes à des sources dites de répartition. Ces dernières permettent d'assurer la commutation des lignes d'une part, et d'abaisser la tension à des niveaux permettent la répartition de l'énergie électrique d'autre part. Il est à noter que de très grands centres de consommation industriels sont directement alimentés à partir du réseau de transport.

Comme indiqué sur la Figure I.9, la portion de réseau reliant les postes sources de répartition aux postes sources de distribution, au travers de transformateurs abaisseurs est dite réseau de répartition. Nous remarquerons qu'il n'existe pas de délimitation franche des niveaux de tension entre les réseaux de transport et de répartition. Il est communément

admis, que pour le réseau de répartition, les tensions situées sont comprises entre 60 KV et 150 KV. Notons aussi que, de grandes unités industrielles sont alimentées par le réseau de répartition.

I.8.3 Distribution:

Le réseau de distribution est la partie de réseau reliant les postes sources de distribution aux postes de consommateurs. Les lignes du réseau primaire de distribution sont d'un niveau de tension compris entre 5.5 kV et 36 kV et alimentent les charges d'une zone géographique bien précise.

Certaines petites unités industrielles sont directement alimentées par le réseau primaire moyenne tension (MT). Le réseau secondaire de distribution est généralement à basse tension pour un usage commercial et résidentiel. En Algérie, la basse tension est de 380/220V triphasé-4 conducteurs. Dans certains pays, elle est encore en triphasé 220/127V-4 conducteurs.

Le réseau de distribution est à la fois, aérien et souterrain. Ce dernier a connu ces dernières décennies un accroissement rapide qui fait qu'il représente aujourd'hui la majeure partie du réseau de distribution.

Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doit satisfaire les exigences suivantes :

1. Assurer au client la puissance dont il a besoin.
2. Fournir une tension stable dont les variations n'excèdent pas $\pm$ 10% de la tension nominale.
3. Fournir une fréquence stable dont les variations n'excèdent pas $\pm$ 0.1 Hz.
4. Fournir l'énergie à un prix acceptable.
5. Maintenir des normes de sécurité rigoureuses.
6. Veiller à la protection de l'environnement.

I.8.4 Les charges:

Les charges sont à caractère industriel, commercial et résidentiel. Si de très grandes charges industrielles peuvent être directement alimentées par le réseau de transport, les petites charges le sont par le réseau primaire de distribution.

Les charges industrielles sont des charges composées où les moteurs représentent la plus grande part. Ces charges composées sont fonction de la fréquence et de la tension et constituent la majeure partie de la chargetotale d'un réseau électrique. Les charges à caractère commercial et résidentiel sont celles liées essentiellement à l'éclairage, le chauffage et la climatisation. Elles sont indépendantes de la tension et de la fréquence et absorbent très peu d'énergie réactive. La puissance active fournie à la charge s'exprime en kilowatts ou en mégawatts. L'amplitude de la puissance totale fournie, varie durant une journée et doit être à chaque instant, adaptée à la demande du consommateur.

Le diagramme journalier de l'évolution de la charge Figure I.8, étant la sommation des consommations, exprimées par différents types de consommateurs pendant 24 heures, renseigne sur les habitudes de consommation de ces derniers. La plus grande valeur de la charge durant 24 heures est dite « pointe de charge » ou « pic de charge ». Les plages horaires durant lesquelles elle est atteinte sont dites «heures de pointe ». De petites centrales à démarrage rapide sont utilisées en appoint pour faire face à la demande pendant ces quelques heures.

Figure I.8 : Exemple de courbe journalière de la charge

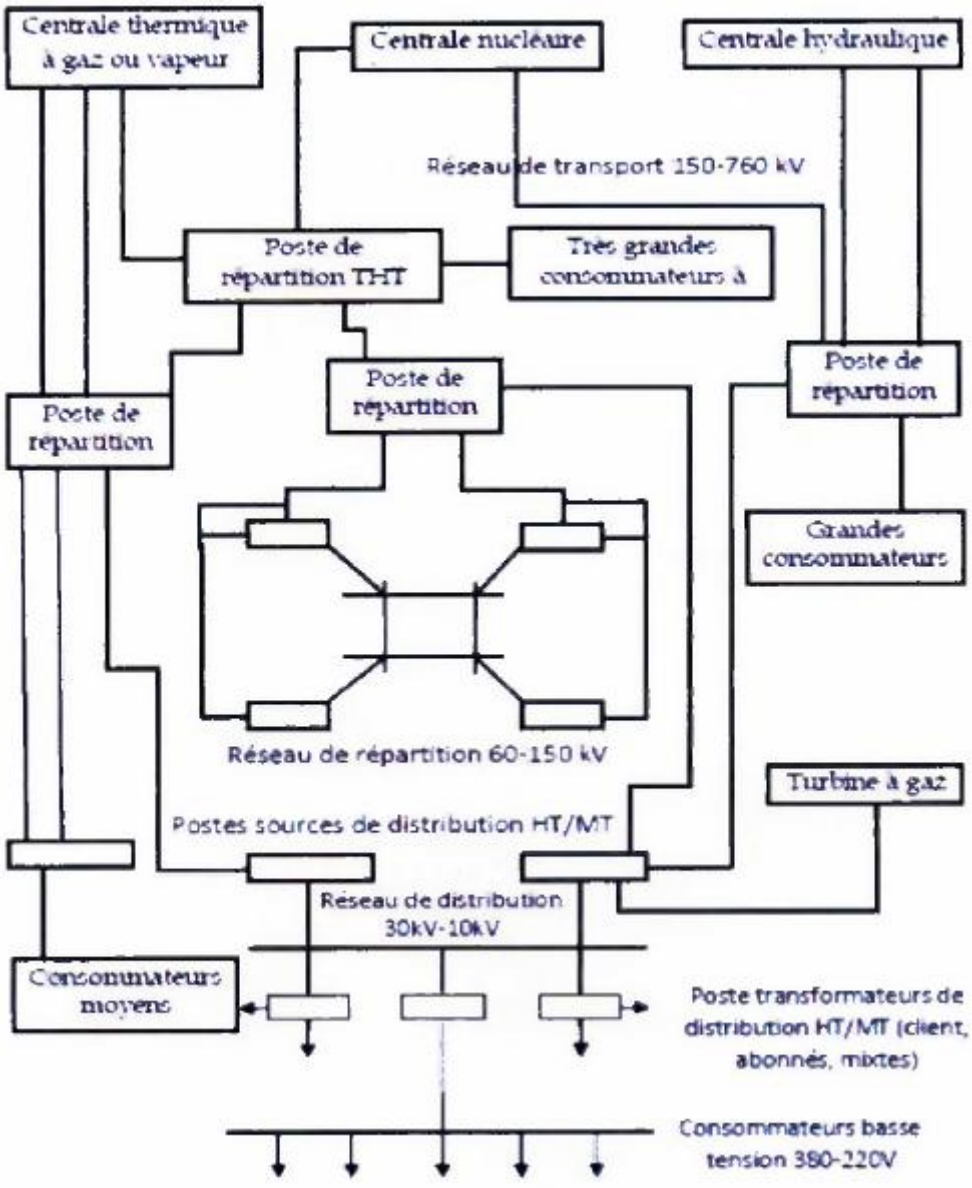

Figure I.9 : Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique

I.9 Tensions normalisées

La recherche de la tension à adopter pour un réseau est fortement conditionnée par ce qui préexiste, et qui a fait l'objet de normalisation. En effet, à l'intérieur d'une très large gamme qu'il faut faire porter la décision, gamme qui va d'environ 125(V) à environ 730(kV). L'utilisation d'une gamme aussi large est liée à l'existence d'un vaste domaine de puissances : environ 10(W) pour le rasoir électrique à environ 2 milliards de watts pour les

centrales électriques les plus puissantes. Les raisons du choix sont essentiellement économiques, car le coût annuel d'exploitation est influencé par la tension d'utilisation. On peut le constater dans le tableau suivant où figure les puissances que peuvent transiter les lignes :[9]

Tension (kV)	Puissance (MW)	Distance (km)
63	20	80
150	80	100
225	200	200
400	700	400
	1200	1000
750	2500	2000
	10000	3000

Tableau I.1 : Les puissances transitées dans les lignes et les transformateurs en fonction de la tension d'utilisation

I.10 Le système de protection

A l'instar des alternateurs, des transformateurs et des lignes, d'autres dispositifs existent pour assurer, non seulement un fonctionnement normal, mais aussi, la protection des équipements et du personnel d'exploitation du réseau. Cela englobe, les transformateurs de mesures, les disjoncteurs, les interrupteurs, les sectionneurs, les fusibles, les éclateurs et sont directement reliés au réseau. Ces dispositifs permettent d'interrompre volontairement, et à tout moment, la fourniture d'énergie électrique, mais aussi, automatiquement à la survenance d'une quelconque perturbation (défaut). Les équipements de contrôle associés à ces dispositifs ainsi que les relais de protection sont installés dans des salles de contrôle. [10]

I.11 Disjoncteur à haute tension

Est destiné à établir, supporter et interrompre des courants sous sa tension assignée à la fois :[10]

- dans des conditions normales de service, par exemple pour connecter ou déconnecter une ligne dans un réseau électrique. Figure I.10
- dans des conditions anormales spécifiées, en particulier pour éliminer un court-circuit, ou les conséquences de la foudre.

De par ses caractéristiques, un disjoncteur est l'appareil de protection essentiel d'un réseau à haute tension, car il est seul capable d'interrompre un courant de court-circuit et donc d'éviter que le matériel connecté sur le réseau soit endommagé par ce court-circuit.

La coupure d'un courant électrique par un disjoncteur à haute tension est obtenue en séparant des contacts dans un gaz (air, SF_6..) ou dans un milieu isolant (par exemple l'huile ou le vide). Après séparation des contacts, le courant continue de circuler dans le circuit à travers un arc électrique qui s'est établi entre les contacts du disjoncteur.

Figure I.10 : Disjoncteur 800 KV

I.12 Les transformateurs et les autotransformateurs

I.12.1 Les transformateurs

Le second composant essentiel des réseaux électriques est le transformateur Figures I.11. Il permet le transfert de puissance avec un rendement élevé d'un niveau de tension vers un autre. La puissance transmise au secondaire est à peu près celle du primaire et en conséquence le produit tension courant (V.I) au secondaire est approximativement égal à celui du primaire. Ainsi, dans un transformateur élévateur, toute élévation de tension au secondaire, s'accompagne d'une diminution dans le même rapport, du courant du secondaire, ce qui entraine la diminution des pertes dans les lignes et rend possible l'acheminement de l'énergie électrique sur de longues distances. Des contraintes d'isolation, ainsi que d'autres liées à des problèmes techniques de conception ne permettent pas pour l'heure de générer au niveau des alternateurs, des tensions supérieures à 30(KV). Ainsi, un transformateur élévateur est nécessaire pour pouvoir transporter l'énergie électrique. Aux extrémités réceptrices des lignes, un transformateur abaisseur est utilisé pour ramener la tension à un niveau acceptable pour la distribution et l'utilisation.[10]

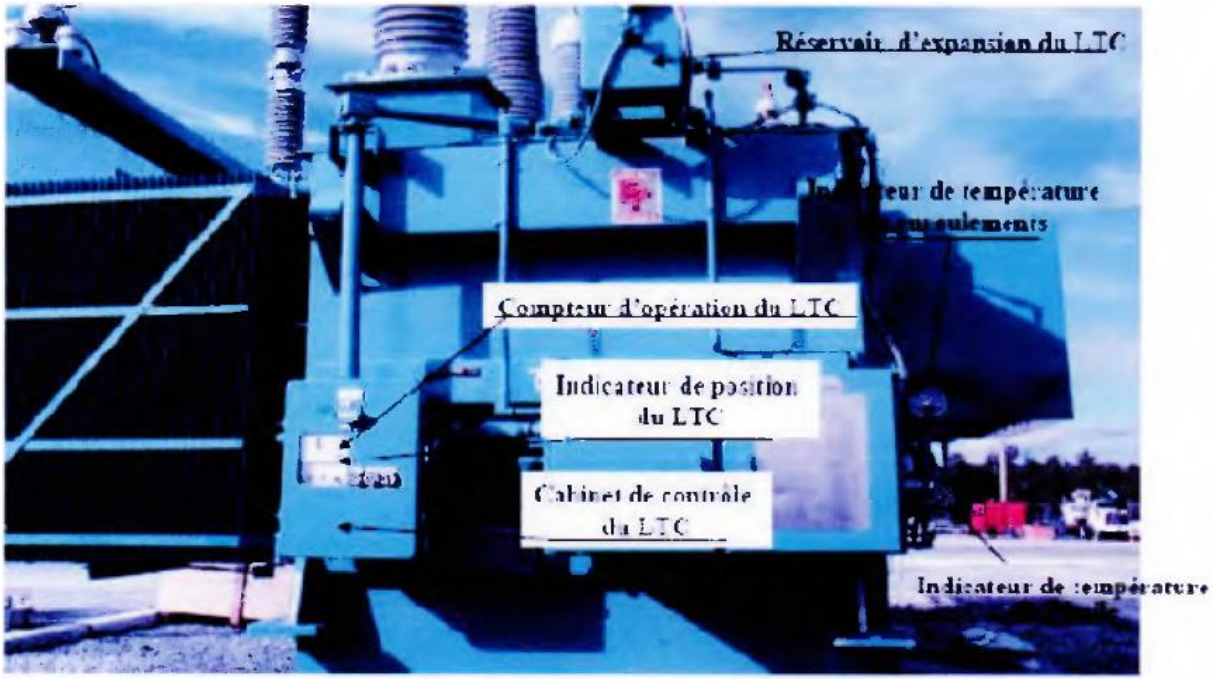

Figure I.11 : Transformateur régleur en charge

I.12.2 L'autotransformateur

L'autotransformateur est un appareil statique à induction électromagnétique destiné à transformer un système de courant alternatif en un système de courant alternatif de même fréquence, d'intensité et de tension efficaces généralement différents, sans assurant un isolement galvanique.

L'autotransformateur présente des avantages et des inconvénients par rapport au transformateur. A performances égales, l'autotransformateur présente un encombrement moindre et une masse inférieure (moins de cuivre et moins de fer), ainsi que des pertes plus petites (pertes par effet Joule et pertes ferromagnétiques). Le principal inconvénient de l'autotransformateur est l'absence d'isolation galvanique entre primaire et secondaire, ce qui l'élimine de certaines applications.[11]

I.12 Le centre de contrôle ou dispatching

Pour un fonctionnement fiable et économique d'un réseau d'énergie électrique, il est indispensable de surveiller, contrôler le réseau, dans sa globalité à partir d'un centre de contrôle ou centre de conduite ou encore dispatching Figure I.12. Les dispatchings modernes sont dits centres de contrôle de l'énergie. Ces derniers sont équipés d'ordinateurs traitants en temps réel les signaux provenant d'un dispositif d'acquisition de données.

Ces ordinateurs effectuent leurs traitements de données selon une structure hiérarchique permettant de coordonner, et de répondre, aux différentes exigences, liées aussi bien au fonctionnement normal du réseau, qu'aux situations d'urgences. Ils alertent les opérateurs, dès que toute situation normale de fonctionnement est décelée, leur permettant ainsi, d'apprécier l'événement, et de prendre les mesures adéquates, en agissant par l'intermédiaire de leur console sur les éléments du réseau et ainsi remédier à cette situation. Des outils de simulation ainsi qu'un ensemble de logiciels, écrit dans un langage de haut niveau, sont implémentés pour assurer un fonctionnement efficace et un contrôle fiable du réseau. [10]

Clicours.COM

Figure I.12 : Centre de contrôle ou dispatching

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons vu des généralités sur les réseaux électriques, en débutant par leurs descriptions, leurs classifications et leurs différentes fonctions, en passant à décrire leurs structures topologiques, les systèmes utilisés et le choix entre les différents types des réseaux électriques, en finissant par donner un petit aperçu sur les transformateurs et les autotransformateurs.

cliCours.com

CHAPITRE II

DEFINITION ET PROPRIETES DE LA LIGNE

II.1 Introduction

Le transport de l'énergie électrique est un coefficient fondamental dans la structure du réseau électrique. Le rôle fondamentale d'une ligne est de transporté l'énergie électrique. Les conducteurs aériens son soumis à l'action des facteurs atmosphérique : température, vent, pluie, etc.

Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur électrique (matériaux et géométrie), hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximum sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante etc. Ce chapitre vise à déterminer ces caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs), l'étude générale sur la ligne en cas générale.

II.2 L'utilité de la HT

L'énergie électrique n'est généralement pas produite à proximité immédiate des lieux d'utilisation massive. II faut donc la transporter par des lignes ou des câbles.

Pour une puissance donnée, le courant à transporter sera inversement proportionnel à la tension de transport. Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 KV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. C'est pour ces raisons-là, qu'on est conduit à augmenter la tension des réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isolements **[12]**.

II.3 La ligne à haute tension

La ligne à haute tension constitue l'élément essentiel dans les infrastructures énergétiques de transport d'électricité. Elle permet l'acheminement de l'électricité des centrales électriques vers les centres de consommation. Les lignes peuvent être aériennes, souterraines, et parfois sous-marines.

Dans notre étude, nous nous intéressons exclusivement à la ligne à haute tension aérienne.

Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux. Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée.

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 765 kV. Les lignes à courant continu haute tension permettent de transporter l'énergie avec moins de pertes sur de très grandes distances et éventuellement sous l'eau.

II.4 Composants d'une ligne

Une ligne de transport se compose de conducteurs, d'isolateurs, de supports et de câbles de garde.

II.4.1Conducteurs

Les conducteursdes lignes aériennes à très haute tension sont toujours nus. Onemploie presque exclusivement des câbles en cuivre et des câbles en aluminium avecâme en acier, ces derniers sont généralement les plus économiques. Pour le domainede la THT, le mode d'utilisation des conducteurs est identifié selon des causestechnico-économiques pour remédier à plusieurs phénomènes, qu'ils sont souventrencontrés en vue le transport de l'énergie électrique, comme les pertes par effetcouronne, les pertes réactives de la ligne, les pertes par effet Joules…etc

Afin de réduire l'effet couronne par exemple, il est préférable d'utiliser latechnologie des lignes en faisceau de conducteurs. Le faisceau est composé de 2, 3 ou4 conducteurs (figure II-01). Parmi les effets de l'utilisation des faisceaux, l'augmentation de rayon équivalent de la phase et la réduction de l'intensité du champélectrique aux alentours du conducteur. «L'avantage le plus important de l'utilisationdu faisceau de conducteurs est la réduction de la réactance de la ligne et des pertes par effet couronne » **[13]**.

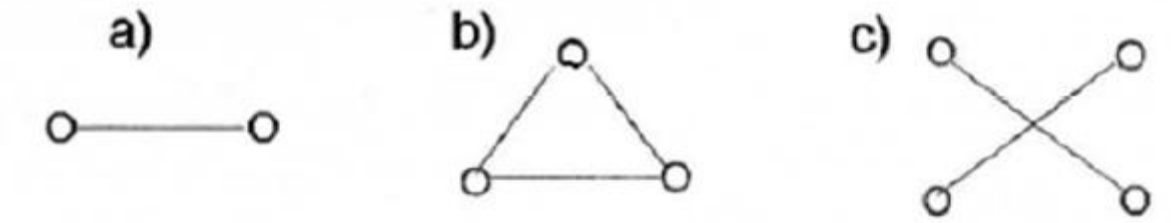

Figure II.1 : conducteurs en faisceau : a) à 2 conducteurs. b) à 3. c) à 4.

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

Les conducteurs aériens sont soumis à l'action des facteurs atmosphériques : température, vent, pluie, verglas etc. Ces facteurs interviennent de façon importante dans le choix des paramètres d'une ligne haute-tension : type de conducteur, hauteur et distance des pylônes, tension mécanique maximale sur le conducteur afin de maintenir une garde au sol suffisante, etc. Le choix de ces paramètres a une grande influence sur les coûts de construction et d'entretien d'une ligne de transport, ainsi que sur sa fiabilité et sur sa longévité. Pour toutes choses égales par ailleurs la position des conducteurs influe sur l'intensité et la disposition du champ électromagnétique. [14]

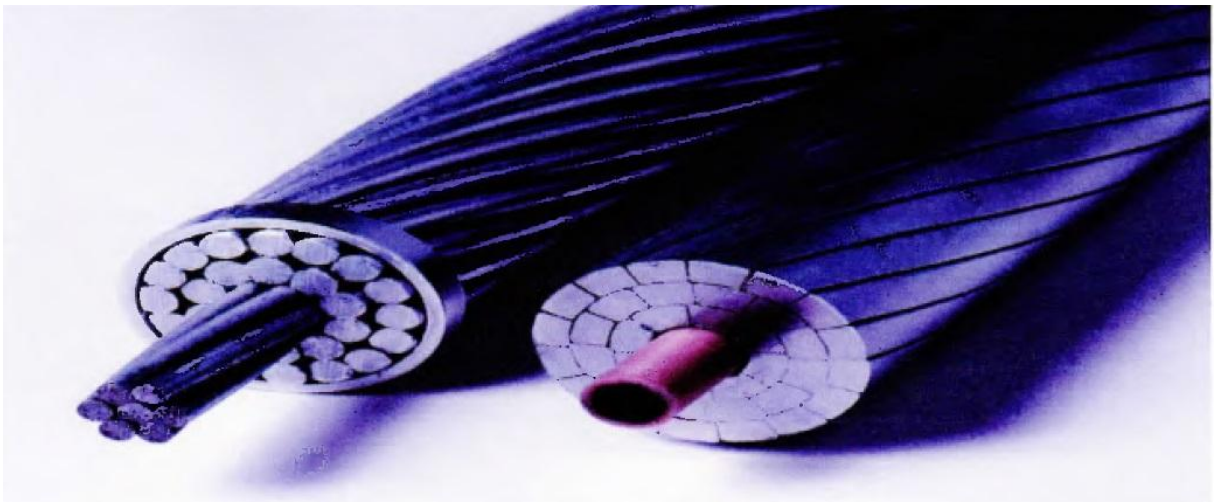

Figure II.2: Conducteur conventionnel sur la gauche et à âme en fibre composite à droite, l'âme au centre assure les propriétés mécaniques, l'aluminium à l'extérieur les propriétés électriques du conducteur.

II.4.2 Isolateurs

Les isolateurs servent à supporter et à amarrer les conducteurs et à les isoler entre eux et de la terre. Ils sont presque toujours en porcelaine .Au point de vue électrique, les isolateurs doivent offrir une grande résistance d'isolement afin qu'ils ne soient ni contournés en surface, ni perforés à travers leur masse par les tensions élevées qu'ils ont à supporter normalement. Afin d'augmenter leur distance de contournement, on leur donne une forme de jupe. Au point de vue mécanique, ils doivent être assez résistants pour supporter les

forces énormes dues au poids et à la tension mécanique des conducteurs. Les isolateurs sont de deux types principaux : rigides et à chaîne. La partie supérieure des isolateurs rigides sur laquelle est fixé le conducteur est constituée d'une ou de plusieurs jupes en porcelaine. Une tige vissée à l'intérieur des isolateurs permet de les fixer à un support. Pour des tensions supérieures à 70 kV, on emploie toujours des chaînes d'isolateurs constituées d'un certain nombre d'éléments en porcelaine réunis par des pièces métalliques. Le nombre d'éléments varie avec la tension: pour une tension de 110 (kV), on en admet de 4 à 7, pour une tension de 230 (kV), de 13 à 16, comme il le montre le tableau II.1. En porcelaine réunis par des pièces métalliques. Le nombre d'éléments varie avec la tension: pour une tension de 110 (kV), on en admet de 4 à 7, pour une tension de 230 (kV), de 13 à 16, comme il le montre le tableau II.1.

Type de Ligne	230 /400 (420) kV	130/225 (245) kV	52/90 (100) kV	36/63 (72,5) kV	12/20 (24) kV	230/400 V
appellation	400 kV	225 kV	90 kV	63 kV	20 kV	400 V
Classification	THT (HTB transport national)		HT (HTB transport régional)		MT (HTA Distribut-ion)	BT (consom-mation)
Nombre d'isolateurs	19	12 à 14	9	4 à 6	2 à 3	1

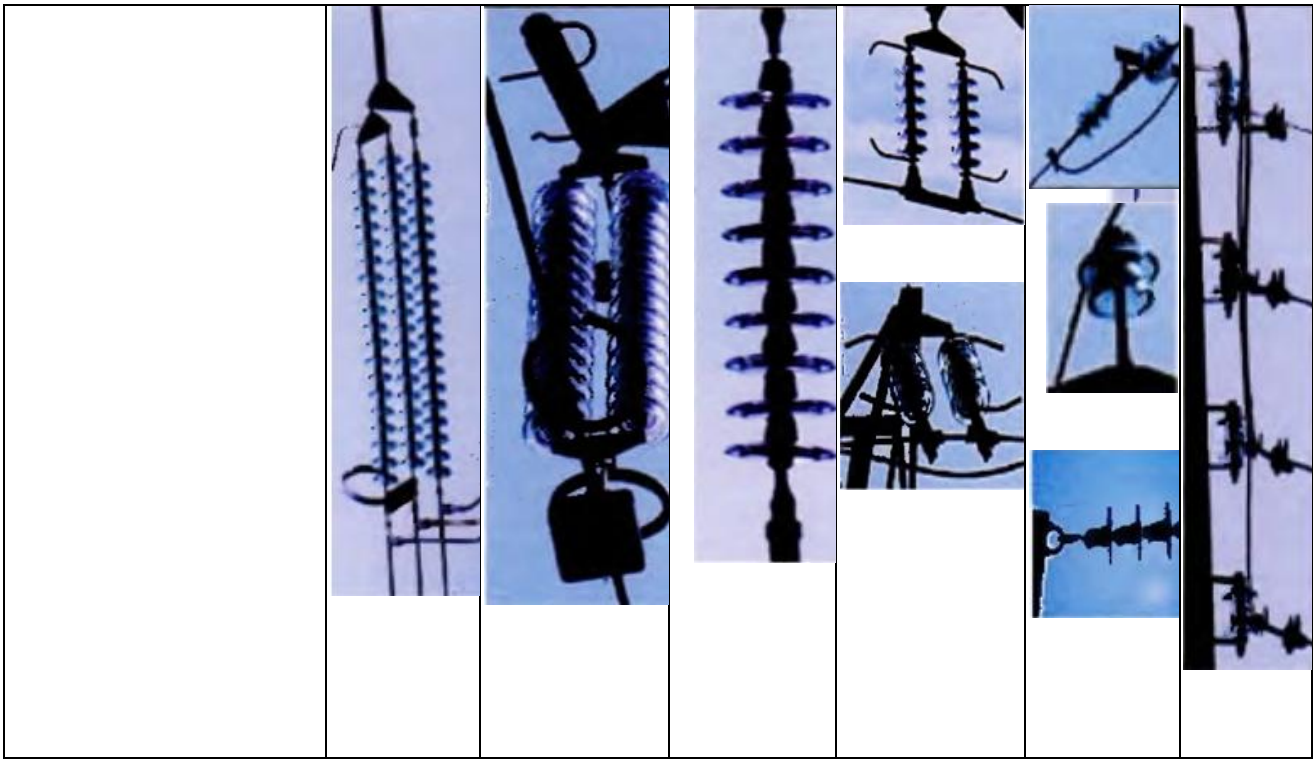

Tableau. II.1:Isolateurs utilisés pour les différentes lignes [1]

II.4.3 Supports

Pour les lignes aériennes, des pylônes, généralement réalisés en treillis d'acier supportent et maintiennent les conducteurs à une distance suffisante du sol et des obstacles : ceci permet de garantir la sécurité et l'isolement par rapport à la terre, les câbles étant nus (non isolés) pour en limiter le poids et le cout. L'inconvénient est leur exposition aux intempéries (embruns salés, tempêtes, poids de la glace qui peut les endommager).

La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, même sous l'action d'un vent violent. L'écartement entre les fils doit être d'autant plus grand que la distance entre les pylônes est plus grande et que la tension de la ligne est plus élevée. Par exemple, l'écartement entre les phases est habituellement de 12 m sur les lignes à 735 kV.

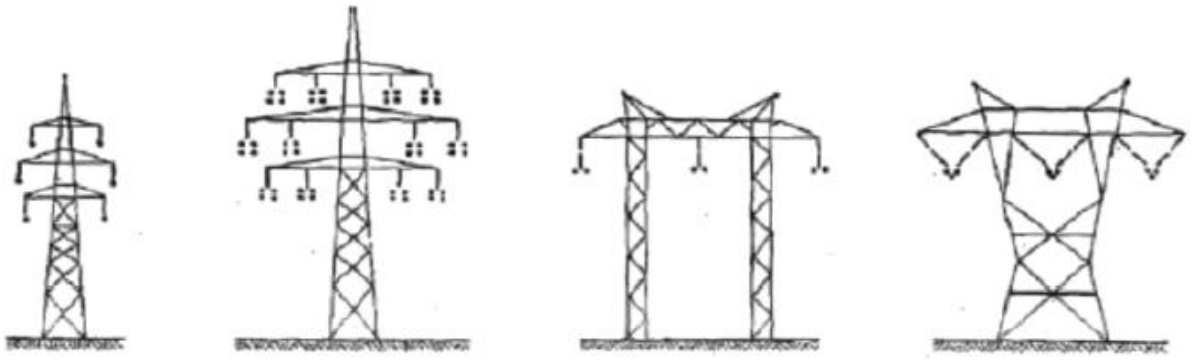

Figure II.3 : Types usuels de pylônes en treillis pour lignes à deux ou plusieurs ternes

II.4.4 Câbles de garde

Les câbles de garde sont posés au sommet des pylônes en treillis. Ces câbles de gardes protègent les conducteurs d'électricité de la foudre. Ils relient en outre les pylônes isolés les uns avec les autres et améliorent ainsi la mise à la terre globale de l'ensemble des lignes aériennes.

Malgré leur faible section, ils doivent présenter une sécurité mécanique équivalente à celle des conducteurs en cas de vent violent ou de surcharge de givre ou de neige. Il est donc impératif qu'ils soient calculés avec les mêmes hypothèses climatiques que les conducteurs et que les efforts qu'ils génèrent dans les supports soient pris en compte dans leur totalité. Cette condition est contraignante car la faible longueur des suspensions sur les supports d'alignement ne permet qu'un faible amortissement, dans les portées adjacentes, d'une surtension mécanique provoquée par une surcharge localisée.

Électriquement, ils doivent assurer l'interconnexion des mises à terre des supports et tolérer les échauffements provoqués par les courants de court-circuit et les courants générés par la foudre.

Pour satisfaire à ces conditions, les câbles de garde comportent toujours une section importante d'acier et, autour de l'âme d'acier, une couche ou exceptionnellement deux couches de fils d'almélec.

Deux types de câbles de garde sont utilisés :

— des câbles almélec-acier normaux ;

— des câbles almélec-acier comportant à l'intérieur des circuits de télécommunication.

II.5 Construction d'une ligne

Une fois que la section des conducteurs, la hauteur des pylônes et la distance entre les pylônes (portée) ont été déterminées, on peut procéder à la pose des conducteurs. Un fil supporté et tendu entre deux pylônes n'est pas horizontal ; il prend plutôt une forme d'une chainette. La distance verticale entre la droite qui joint les deux points de support et le point le plus bas d'un fil porte le nom de flèche. Plus le fil est tendu, plus la flèche est courte. Avant d'entreprendre la construction d'une ligne, il importe d'en faire le calcul mécanique pour déterminer la flèche et la tension mécanique admissibles. Entre autres, on doit tenir compte de la température maximale d'été. D'une part, la flèche ne doit pas être trop longue à ce moment, car autrement, le fil s'allongera durant les chaleurs d'été et la distance entre son point le plus bas et le sol ne sera plus suffisante au point de vue sécuritaire. D'autre part, la tension mécanique ne doit pas être trop grande, car autrement, le fil peut se contracter pendant les froids d'hiver et devenir dangereusement tendu. De plus, le vent et le verglas peuvent créer des efforts supplémentaires qui risquent d'entraîner sa rupture.[8]

II.6 Lignes galopantes

Lorsqu'une couche de verglas se dépose sur une ligne en présence de vent, la ligne se met à osciller. Si les conditions sont favorables, ces oscillations peuvent devenir très grandes; on dit alors que la ligne se met à «galoper». Ce phénomène peut produire des courts circuits entre les phases ou la rupture des conducteurs. Pour éviter ces problèmes, on pose parfois sur les conducteurs des amortisseurs qui empêchent les oscillations de se développer.[8]

II.7 Effet couronne - interférences radiophoniques

Les très hautes tensions électriques créent des décharges importantes autour des conducteurs (effet couronne).Ces décharges produisent des pertes le long de la ligne et, de plus, elles possèdent un spectre de fréquences radiophoniques qui brouil1e la réception sur les postes de radio et les téléviseurs situés dans le voisinage de la ligne. Pour réduire l'effet couronne, on diminue le champ électrique créé par les conducteurs en grossissant leur diamètre ou en les arrangeant en faisceaux de deux, trois ou quatre conducteurs par phase.

Comme cet arrangement diminue aussi l'inductance de la ligne, on augmente du même coup la puissance qu'elle peut transporter.[8]

II.8 Pollution

La poussière, les acides, le sel et les autres polluants qu'on retrouve dans l'atmosphère se déposent sur les isolateurs et diminuent leurs propriétés isolantes. Cette pollution des isolateurs risque de produire des court-circuits pendant les orages ou lors de surtensions momentanées. L'interruption du service et la nécessité de nettoyer ou de remplacer les isolateurs sont donc un souci constant créé par la pollution.[8]

II.9 Mise à la terre des pylônes

On relie les pylônes des lignes de transport à des prises de terre exécutées avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance. En effet, si la foudre frappe un pylône, il ne faut pas que la chute de tension provoquée par le courant dans la prise de terre dépasse la tension de contournement des isolateurs.[8]

II.10 Conclusion

Les lignes de transport aériennes sont constituées de conducteurs en aluminium (ACSR), d'isolateurs sur les lignes HT. On utilise généralement, pour chaque phase, des conducteurs en faisceaux afin de diminuer les pertes d'énergie et les interférences radiophoniques dues à l'effet couronne. Des fils de garde en acier protègent la ligne contre la foudre. De plus, afin d'éviter les surtensions résultantes des courants de décharges de foudre, chaque pylône est solidement mis à la terre.

CHAPITRE III

ÉTUDE ELECTRIQUE ET MODELISATION DE LA LIGNE

clicours.com

III.1 Introduction

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter une puissance active. Si elle doit également transporter une puissance réactive, celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active.

III.2 Exigences d'une ligne de transport

Une ligne de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes:

a) La tension doit demeurer assez constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale
b) les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement
c) les pertes Joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs
d) Si la ligne ne peut d'elle-même répondre à ces exigences, on doit alors ajouter de l'équipement supplémentaire afin de réaliser toutes ces conditions.

III.3 Paramètres de la ligne

III.3.1 Circuit équivalent d'une ligne

Malgré leur grande diversité, les lignes possèdent des propriétés électriques communes.

En effet, toute ligne possède une résistance, une réactance inductive et une réactance capacitive. Ces impédances sont réparties uniformément sur toute la longueur de la ligne si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de sections R, L, C identiques (Figure III.1). Chaque section représente un tronçon de ligne d'une longueur donnée (1 km, par exemple) et les éléments r, x_L ,$x_C$représentent les impédances correspondantes pour cette longueur. [8]

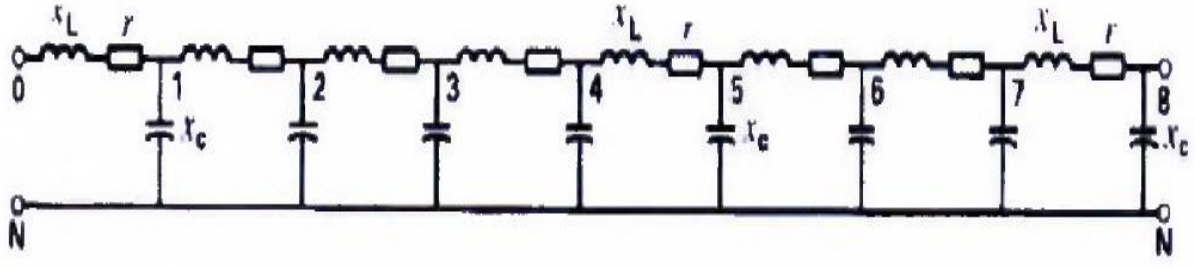

Figure III.1 : Circuit équivalent d'une ligne

On peut simplifier le circuit de la Figure III.1 en additionnant les résistances individuelles pour former une résistance totale R. De la même façon, on obtient une réactance inductive totale X_L et une réactance capacitive totale X_C (en dérivation). On divise la réactance capacitive X_{Cen}deux éléments de valeurs 2 X_C localisés aux deux extrémités de la ligne.

Parfois, on peut simplifier le circuit davantage en éliminant un, deux ou tous les éléments de la Figure III.1. On obtient alors un circuit en π simplifié (circuit à paramètres concentrés) La validité de cette simplification dépend de l'importance relative des puissances P_J, Q_L, O_C associées à chacun des éléments par rapport à la puissance active P fournie à la charge. En se référant à la Figure III.2, ces puissances sont :

P = puissance active absorbée par la charge.

$P_J = R.i^2$, puissance active dissipée dans la ligne par effet Joule.

$Q_L = X_L.i.z$, puissance réactive absorbée par la ligne.

$Q_C = E^2 / X_C$, puissance réactive générée par la ligne.

Si l'une de ces puissances est négligeable par rapport à la puissance active (P) transportée, on peut négliger l'élément de circuit correspondant.

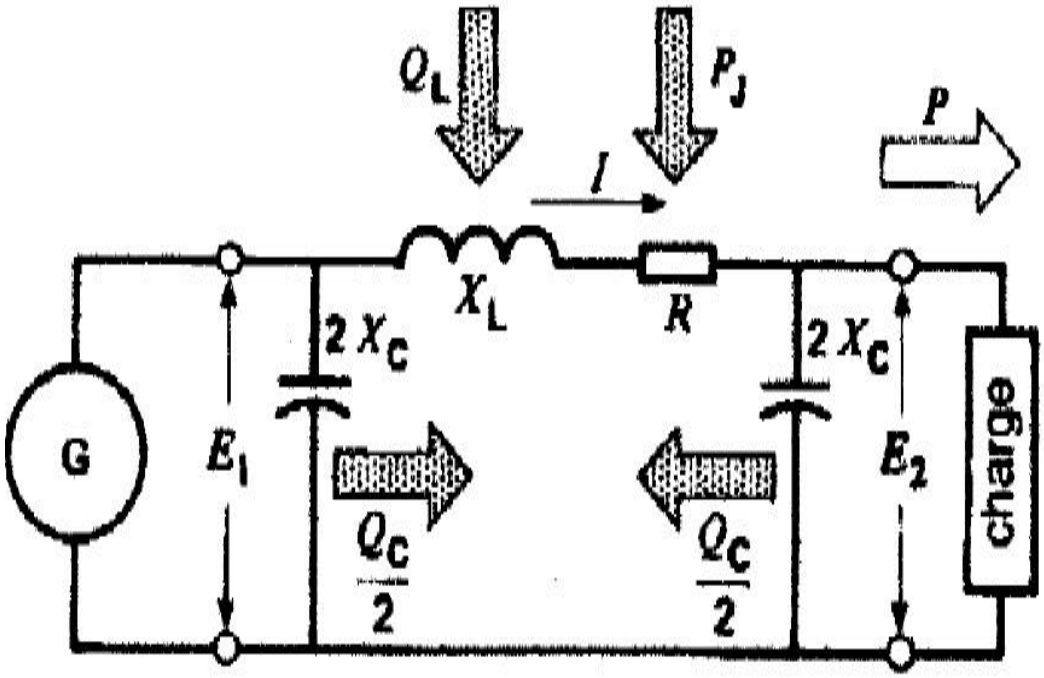

Figure III.2 : Circuit équivalent d'une ligne simplifié

III.3.2 Résistance de la ligne

La résistance linéique des conducteurs est habituellement fournie par les fabricants à 20°C en courant continu, et doit être déterminée à la température d'exploitation et à la fréquence utilisée. La résistance linéique à courant continu à la température d'exploitation (θ) s'exprime par: [6]

$R_\theta = R_{20}\,[1+\alpha\,(\theta - 20)]$ **(III.1)**

$R_{20} = \frac{\xi.p.l}{s} = \frac{p}{k(\pi\frac{d^2}{4}n)}$ **(III.2)**

p: résistivité des matériaux utilisés pour les lignes (Ω.m)

n : nombre de brins dans le conducteur (mm)

k: facteur donné par le constructeur.

d: diamètre de chaque brin (m).

Afin de limiter les pertes par effet Joule, on souhaite que la résistance R soit la plus faible. La longueur l de la ligne étant imposée, on ne peut jouer que sur la résistivité ρ du

matériau conducteur et sur sa section S. Le cuivre, dont la résistivité vaut $1.72.10^{-8}$(Ω.m), n'est pas utilisé car trop couteux, mais surtout trop lourd pour les lignes aériennes. On lui préfère des ensembles aluminium-acier ou des alliages aluminium, magnésium et silicium dont la résistivité est de l'ordre de 3.10^{-8}(Ω.m).

III.3.3 Inductance de la ligne

III.3.3.1 Inductance d'un seul conducteur

Tout mouvement d'électrons (courant) dans un conducteur (fil) donne la naissance d'un champ magnétique au tour de fil, formant des cercles concentriques proportionnels à l'intensité du courant qui traverse le conducteur.

La direction donnée par la règle de la main droite ~ avec le pouce se dirigeant dans la direction du courant, les doigts de la main indiquant la direction du champ magnétique.

Quand le courant change, le flux change ainsi que la tension induite dans le circuit. Par définition, pour un matériau non magnétique, l'inductance L est le rapport de flux magnétique de liaison totale **ϕ** et le courant I, donné par : [6]

$$L = \frac{\phi}{I} \qquad \textbf{(III.3)}$$

ϕ : Est le flux de liaison, en weber. Tours

Considérer un conducteur cylindrique long dont le rayon est (r), dans lequel circule un courant (I) représenté sur la figure III.3 :

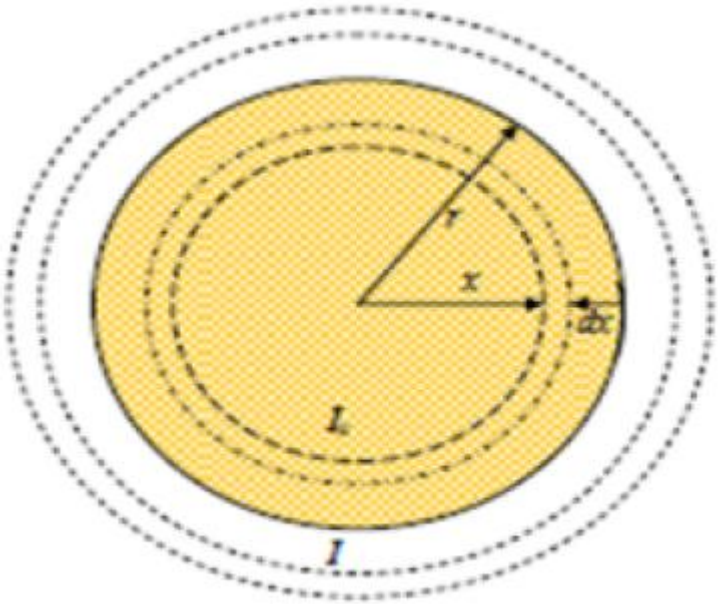

Figure III.3 : Flux de liaison d'un conducteur cylindrique long [13]

L'intensité de champ magnétique Hx. autour d'un cercle du rayon x, est constante et tangent à ce cercle, la loi d'ampère reliant H, au courant Ix est donnée près :

$$\int_0^{2\pi x} H_x dl = I_x \quad \textbf{(III.4)}$$

Ou bien:

$$H_x = \frac{I_x}{2.\pi.x} \quad \textbf{(III.5)}$$

I_x est le courant cerné à l'intérieur de cylindre de rayon x. L'inductance d'un conducteur peut être définie comme la somme des contributions du flux de liaison intérieur et extérieur du conducteur.

III.3.3.2 Inductance interne

Si on néglige l'effet de peau et en supposant une densité de courant uniforme dans toute la section du conducteur, on aura une simple expression pour le flux de liaison intérieur : [6]

$$\frac{I}{\pi r^2} = \frac{I_x}{\pi x^2} \quad \textbf{(III.6)}$$

En remplaçant I_x dans l'équation (II.5), on trouve :

$$H_x = \frac{I}{2\pi r^2} x \quad \textbf{(III.7)}$$

Pour un conducteur non magnétique d'une perméabilité constante μ_0 ; l'induction magnétique est donné par la relation:

$$B_x = \mu_0 . H_x \quad \textbf{(III.8)}$$

Ou bien:

$$B_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x \quad \textbf{(III.9)}$$

μ_0 est la perméabilité de vide (ou de l'air) et est égal à $4\pi.10^{-7}$H/m.

L'inductance due au flux de liaison intérieur est donné par:

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

Il est à noter que l'inductance interne L_{int} est indépendante du rayon r de conducteur. L'inductance entre deux points à l'extérieur de conducteur (voir la figure III.4) est donnée par:

$$L_{int} = 2.10^{-7} \ln \frac{D2}{D1} \text{(H/m)} \quad \textbf{(III.11)}$$

Clicours.COM

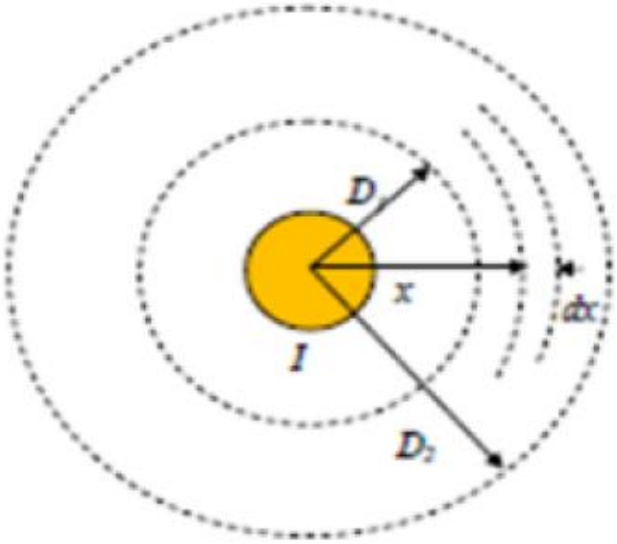

Figure III.4 : Flux de liaison entre D1et D2 [13]

III.3.3.3 Inductance d'une ligne de transport triphasée

Dans une ligne de transport triphasée il y a une interaction entre les phases et une interaction entre chaque phase et la terre.

Si on considère une ligne triphasée d'une longueur d'un mètre, composée de trois conducteurs chacun a un rayon r, ces conducteurs sont arrangés symétriquement (triangle équilatéral) ou bien en forme plane comme montrée dans la figure III.5:

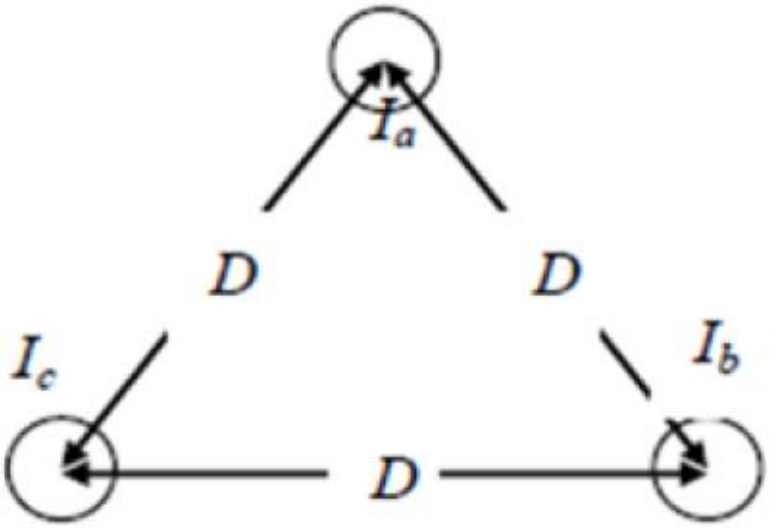

Figure III.5 : Ligne triphasé arrangée symétriquement [13]

L'inductance par phase par pour 1 ki1omètre de longueur est:

$L=0.2 \ln\frac{D}{GMR}$(m.H/km) **(III.12)**

$GMD=\sqrt[3]{D_{12}D_{13}D_{23}}$ (m**)** **(III.13)**

III.3.4Réactance de la ligne

Dans notre travail, l'inductance de la ligne est notée par X (appelée aussi la réactance de la ligne) ainsi que la réactance linéique est notée par x_0. [6]

D'où: $X=:x_0 l$; (l : la longueur de la ligne)

$X=0.1445 \log \frac{DMG}{r_{eq}} + \frac{0.0157}{n}$(Ω/km)**(III.14)**

$r_{eq}=\sqrt{a.\, r_c}$(cm) **(III.15)**

DMG: la distance moyenne géométrique (m)

n: nombre de conducteur par faisceaux

a: Le pas du faisceau (cm)

r_c: Le rayon du conducteur (cm)

r_{eq}: le rayon équivalent du faisceau (cm)

III.3.5 Capacité de la ligne

On peut assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre). A cause de la présence des charges, sur ces deux conducteurs, le potentiel a des valeurs différentes. Si on prend comme valeur du potentiel de la terre la valeur zéro (la référence), la valeur de la tension du conducteur de phase représente la différence de potentiel. [6]

La relation linéaire qui lie la charge électrique (q1, q2) sur les deux conducteurs et la différence de potentiel entre ceux-ci est donnée par :

C=q/u**(III.16)**

III.3.5.1 Capacité d'une ligne monophasée

On considère une ligne monophasée d'un mètre de longueur composée de deux conducteurs cylindriques pleins qui ont un rayon r (voir la figure III.6) :

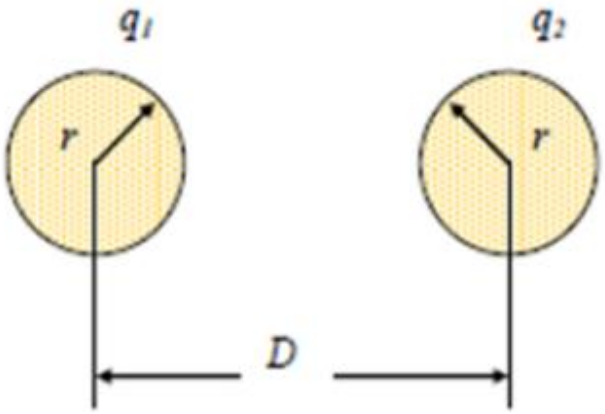

Figure III.6 : Ligne monophasé à deux fils [13]

III.3.5.2 Capacité d'une ligne triphasée

C'est la même forme que l'expression de la capacité d'une phase dans une ligne monophasée. Le DMG est la distance équivalente entre conducteurs. Pour une ligne triphasée le DMG est la racine cubique des produits des trois distances de phases

III.3.6 Susceptance de la ligne

La susceptance de la ligne due à l'effet capacitive entre chaque phase et la terre est déterminée par l'expression : [15]

$$b_0 = \frac{7.58}{\log \frac{DMG}{r_{eq}}} 10^{-6} (\Omega^{-1}/km) \qquad \textbf{(III.17)}$$

III.3.7 Impédance caractéristique

L'impédance caractéristique de la ligne sera calculée par la relation :

$$Z_c = \sqrt{\frac{r_0 + jx_0}{g_0 + jb_0}} (\Omega) \qquad \textbf{(III.18)}$$

La résistance r_0 et la conductance g_0 peuvent être négligées dans les lignes courtes (<80 km) par ce que $r_0 << x_0$ et $g_o << b_0$ donc : [15]

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} (\Omega) \quad \textbf{(III.19)}$$

III.3.8 Calcul du champ électrique superficiel des conducteurs

En haute tension, le diamètre du conducteur doit être suffisamment grand pour minimiser les pertes d'énergie dues à l'effet « couronne ». [15]

Un faisceau est caractérisé par les grandeurs suivantes :

n : nombre de conducteurs élémentaires.

R : rayon du faisceau.

a: distance entre deux conducteurs consécutifs

R donné par la relation :

$$R = \frac{a}{2\sin\frac{\pi}{n}}(cm) \qquad \textbf{(III.20)}$$

A est définie par la relation :

$$a = 2.R.\sin(\pi/n)(cm) \qquad \textbf{(III.21)}$$

R_{eq}: rayon équivalent du faisceau qui représente le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport àtous autres conducteurs avoisinants. Il est défini par la relation:

$$r_{eq} = \sqrt[n]{R^{(n-1)}.n.r_c}(cm) \qquad \textbf{(III.22)}$$

Pour le calcul du champ crée à la surface du conducteur d'un faisceau, on détermine d'abord la charge totale Q de celui-ci en introduisant son rayon équivalent dans les expressions des coefficients du potentiel.

La relation du gradient moyen d'un conducteur est donnée par :

$$E_{moy} = \frac{Q}{2.\pi.n.r_c.\varepsilon_0} \qquad (kV) \qquad \textbf{(III.23)}$$

Ou : $Q=C.U_n$ **(III.24)**

D'après les équations (III.17) et (III.23), on introduit la notion du champ moyen :

$$E_{moy} = \frac{0.354.U_n}{n.r_c.\log\frac{DMG}{r_{eq}}}\ (kV/cm) \qquad \textbf{(III.25)}$$

Avec :

C:la capacité linéique de fonctionnement de la ligne (F/m).

U_n : Latension nominale de la ligne (kV)

ε_0: la permittivité dans le vide (F/m)

Puisque la charge totale du faisceau se repartie uniformément sur les n conducteurs du faisceau, sous l'effet de blindage mutuel, le gradient réel est plus important vers l'extérieur et la relation du champ maximal des conducteur est donnée par :

$$E_{max} = E_{moy}\left(1 + \frac{(n-1).r_c}{R}\right) \quad (kV/cm) \qquad \textbf{(III.26)}$$

L'expression devient :

$$E_{max} = E_{moy} * k(kV/cm) \quad \textbf{(III.27)}$$

Avec :

$$k = 1 + \beta \frac{r_c}{a} \textbf{(III.28)}$$

$$\beta = 2(n-1)\sin(\frac{\pi}{n}) \textbf{(III.29)}$$

III.4 Modélisation des lignes et des câbles électriques

III.4.1 La ligne en tant que composant distribué

Les lignes électriques et les câbles sont des systèmes à constantes réparties, c'est àdire que les grandeurs physiques (résistances, inductances, capacités) sont réparties surtoute la longueur de la ligne et ne sont donc pas localisées. Comme on s'intéresse au régimepermanent équilibré, la ligne est représentée par un circuit équivalent monophasé (appelé aussi tronçon) (Fig.III.7). Ceci est illustré par un circuit équivalent d'une ligne longue de transportd'énergie électrique.[16]

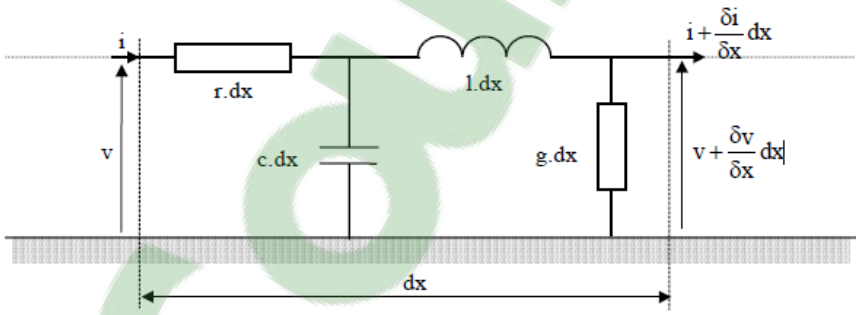

Fig.III.7. Modèle général d'une ligne électrique. [17]

III.4.1.1 Les équations des télégraphistes

Lorsque les distances entre conducteurs sont faibles vis-à-vis de leur longueur etque la fréquence est peu élevée, les équations qui lient le courant et la tension en chaquepoint d'une ligne monophasée sont données par les relations:

$$\frac{\delta v}{\delta x} = r.i + l.\frac{\delta i}{\delta t} \textbf{(III.30)}$$

$$\frac{\delta i}{\delta x} = g.v + c.\frac{\delta v}{\delta t}$$ **(III.31)**

Avec :

r : Résistance longitudinale par unité de longueur.

ℓ : L'inductance longitudinale par unité de longueur.

c : La capacité transversale par unité de longueur.

g : La conductance transversale par unité de longueur.

Dans ces équations *v* et *i* représentent la tension et le courant instantanés en un point de la ligne situé à une distance *x* comptée positivement à partir de la stationréceptrice *R* (Fig.III.8). Les équations précédentes sont établies dans le cas d'une lignecomportant deux conducteurs parallèles. Elles s'appliquent sans modification aux lignestriphasées, en cas de régime équilibré, à condition de prendre pour valeur de la tension *c*elle de la tension qui existe entre phase et neutre (tension simple). Dans le cas général, il faut considérer des relations matricielles.

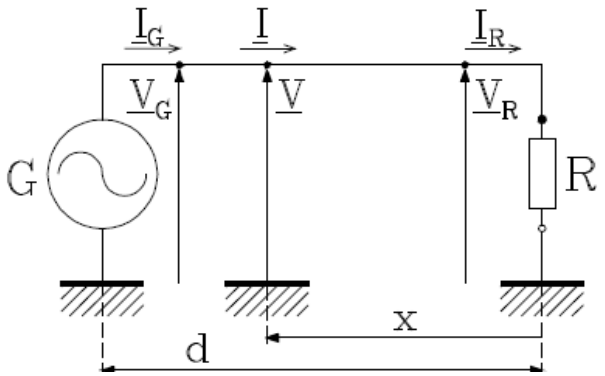

Fig.III.8. Schéma équivalent d'une ligne situé à une distance *x.*

Le courant *i* est le courant de ligne. Quant aux coefficients *r, l, g, c*, ce sont, dans lecas d'un régime sinusoïdal équilibré, les valeurs par unité de longueur de respectivement larésistance, l'inductance, la conductance de fuite et la capacité par phase, ce sont lescoefficients linéaires cycliques (dans lecas d'un régime sinusoïdal).

Les coefficients linéiques *l* et *c* tiennent bien compte des influences des autresphases sur la phase considérée. Si, en toute rigueur, l'on faisait intervenir l'effet pelliculaire, l'hystérésis magnétique, les courants de FOUCAULT, l'hystérésis diélectrique, l'effetcouronne, on s'apercevrait que les coefficients *r, l, g* et *c* ne dépendent pas uniquement de ces dimensions, de l'écartement et de la nature des conducteurs et isolants, mais sont encorefonctions du courant, de la tension et des conditions atmosphériques. Néanmoins, dans laplupart des calculs, on peut envisager que les différents phénomènes

dont il est question ci-dessus soient traduits d'une manière suffisamment approchée par des correctionsapportées aux valeurs de *r, l, g* et *c*, qui dès lors, elles peuvent être envisagées comme desimples constantes linéiques cycliques.

Dans les équations (III.31), la séparation des deux inconnues *v* et *i* conduit à deuxéquations de forme identique pour la tension et le courant :

$$\frac{\delta^2 v}{\delta^2 x} = r.g.v + (r.c + l.g)\frac{\delta v}{\delta t} + l.c\frac{\delta^2 v}{\delta^2 t} \quad \textbf{(III.32)}$$

$$\frac{\delta^2 i}{\delta^2 x} = r.g.i + (l.c + l.g)\frac{\delta i}{\delta t} + l.c\frac{\delta^2 i}{\delta^2 t} \quad \textbf{(III.33)}$$

Les équations (III-31) s'appliquent aussi bien à l'étude des régimes transitoires qu'àcelle du régime permanent, pourvu que dans l'un et l'autre cas, *r, l, g* et *c*, puissent êtreconsidérés avec suffisamment d'exactitude comme des constantes. Envisageantuniquement dès à présent le régime permanent, une tension et un courant purementsinusoïdaux, de pulsationω, nous reprendrons les équations (*III.30)* et, pouvant dans ce casfaire usage du mode de représentation symbolique, nous représenterons les fonctionssinusoïdales de la tension et du courant par les phraseur*s*et *I*. Ces équations deviennent :

$$\frac{dv(x)}{dx} = (r + jl.\omega).I(x) \quad \textbf{(III.34)}$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = (g + jc.\omega).v(x) \quad \textbf{(III.35)}$$

Si nous notons Z*l* l'impédance longitudinale par unité de longueur, et Yt l'admittancetransversale par unité de longueur, les équations (III-31) deviennent :

$$\frac{dv(x)}{dx} = Zl.I(x) \quad \textbf{(III.36)}$$

$$\frac{dI(x)}{dx} = Yt.V(x) \quad \textbf{(III.37)}$$

Par séparation des variables, nous obtenons deux équations différentielles dusecond ordre indépendantes :

$$\frac{dv^2}{dx^2} = Z1.Yt.V(x) \quad \textbf{(III.38)}$$

$$\frac{dI^2(x)}{dx^2} = Z1.Yt.I(x) \quad \textbf{(III.39)}$$

Notons maintenant Z l'impédance caractéristique et γ la constante de propagationsdéfinies par les expressions suivantes :

$$Z=\sqrt{\frac{(r+jl.\omega)}{(g+jc.\omega)}} = \sqrt{\frac{Z1}{Yt}} \quad \textbf{(III.40)}$$

$$\gamma=\sqrt{(r+jl.\omega)(g+jc.\omega)}=\sqrt{Z1.Yt} \quad \textbf{(III.41)}$$

Les deux équations différentielles indépendantes (*III.34)* deviennent alors :

$$\frac{dV^2(x)}{dx^2} = \gamma^2.V(x) \quad \textbf{(III.42)}$$

$$\frac{dI^2(x)}{dx^2} = \gamma^2.I(x) \quad \textbf{(III.43)}$$

Les équations différentielles s'intègrent en donnant un système d'équations couplées :

$$\begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.x) & -Z_0.\sinh(\gamma.x) \\ -\frac{1}{Z_0.}\sinh(\gamma.x) & \cosh(\gamma.x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_G \\ I_G \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.44)}$$

En inversant cette dernière équation, nous obtenons une matrice où tous les termessont positifs, appelée également matrice de transfert du quadripôle.

$$\begin{bmatrix} V_G \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.x) & Z_0.\sinh(\gamma.x) \\ \frac{1}{Z_0.}\sinh(\gamma.x) & \cosh(\gamma.x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.45)}$$

$$\begin{bmatrix} V_G \\ I_G \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.46)}$$

Considérons le modèle en π. Les équations qui correspondent à ce modèle sont :

$V(x)=V(0)-Z_s.(I(0)-Y_1.V(0))$ **(III.47)**

$I(x) =I(0)-Y_1.(V(0)-Y_2.V(0))$ **(III.48)**

Soit :

$V(x)=V(0).(1-Z_s.Y_1)-Z_s.I(0)$ **(III.49)**

I(x)=I(0).(1-$Z_s.Y_2$)-($Y_1 + Y_2 + Z_s.Y_1.Y_2$).V(0) **(III.50)**

En identifiant les termes à la solution analytique de l'équation :

$$\begin{bmatrix} V(x) \\ I(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma.x) & -Z_0.\sinh(\gamma.x) \\ -\frac{1}{Z_0}.\sinh(\gamma.x) & \cosh(\gamma.x) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V(0) \\ I(0) \end{bmatrix} \quad \textbf{(III.51)}$$

Nous obtenons que :

Z=Z_ω.sinh(γ.x) **(III.52)**

Y_1=Y_2=$\frac{1}{Z_\omega}$.tanh($\frac{\gamma.x}{2}$) **(III.53)**

III.4.1.2 Cas particulier de la ligne infinie

La discussion du cas de la ligne infinie nous fournit un moyen d'interpréterphysiquement les coefficients γ et Z_c. Si nous considérons une ligne infinie alimentée parun générateur sous une tension V_G absorbant un courant I_G, la tension étantnécessairement nulle à l'infini, il en résulte que le terme en *exp(γx)* doit avoir uncoefficient nul. Ceci impose que : VG =ZC.IG

L'impédance caractéristique est l'impédance présentée par une ligne de longueurinfinie. On déduit également les relations suivantes pour la tension et le courant en un point de la ligne situé à une distance *x'* du générateur.

V=V_G.exp(-γ.x') **(III.54)**

I=I_G.exp(-γ.x') **(III.55)**

Le rapport V/I (= impédance mesurée) est donc constant tout au long de la ligne etégal à Zc. On comprend que le comportement d'une ligne finie terminée sur son impédancecaractéristique soit identique à celui d'une ligne infinie.

En chaque point de la ligne, la valeur du courant est égale *V/Zc*; sa phase est en retard sur celle de la tension.

Les relations précédentes peuvent être mises sous la forme :

V=$V_G.exp(-\gamma_1.X')\angle -\gamma^2.x'$ **(III.56)**

I=I_G.exp(-$\gamma_1.X'$)$\angle -\gamma^2.x'$ **(III.57)**

Elles montrent que l'on a affaire tant pour la tension que pour le courant, à desondes sinusoïdales ayant dans l'espace une pulsation γ_2 et qui s'amortissent suivant une loiexponentielle dont le décrément logarithmique est proportionnel à γ_1.

La tension et le courant ont une amplitude qui décroît dans le rapport exp(-γ_1)par mètre, etleur phase subit un retard progressif, à raison de γ_2 radians/ m.

C'est pour cette raison que l'on nomme :

γ_1: le coefficient d'atténuation d'amplitude.

γ_2 : le coefficient de retard de phase.

Le long de la ligne, les maxima instantanés successifs de la tension ou du courantsont séparés par une distance égale à $x_1 = 2\pi/\gamma_2$ appelée longueur d'onde de la ligne.

III.4.1.3 Ordre de grandeur des valeurs de la longueur d'onde et de l'impédance caractéristique

Lignes aériennes : Dans les lignes aériennes *r* est, en général, petit devant *w.ℓ* et *g*devant *w.c*. On a donc, en première approximation, en négligeant *r* et *g* :

Pas d'atténuation.

γ_1=0

$\gamma_2=\omega.\sqrt{(l.c)}$ **(III.58)**

$Z_c=\sqrt{\left(\frac{l}{c}\right)}$**(III.59)**

En négligeant le champ magnétique à l'intérieur des conducteurs, les valeurs del'inductance et de la capacité sont, pour un conducteur de diamètre *a*, situé à une distance*D* de son conducteur de retour symétrique par rapport à la surface d'un sol parfaitementconducteur :

l=2.e-7. μ_r.ln(2D/a)_____H/m**(III.60)**

c=$\frac{10.e-9.\xi_r}{18.ln\frac{2D}{a}}$_____F/m **(III.61)**

Ces valeurs sont, exactement pour l'inductance et approximativement pour lacapacité, celles qui seraient obtenues pour une ligne triphasée symétrique constituée detrois

conducteurs de diamètre *a*situés aux sommets d'un triangle équilatéral de côté *D*(composante symétrique d'ordre direct).

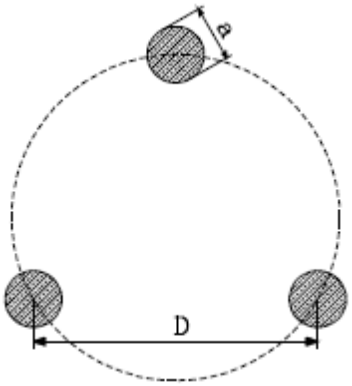

Fig.III.9. Géométrie d'une ligne triphasée symétrique.

Pour l'air, on a : $\mu_r = \varepsilon_r = 1$

Par conséquent :$\sqrt{l.c}$=1/300000_____s/km

D'où :γ_2=2Ωf/300000_____rad/km

La vitesse de propagation d'onde est donc, dans ces conditions, égale à celle de la lumière.

La longueur d'onde est : x_1=300000/f _____km

Pour une fréquence *f = 50 Hz*, on a donc *x1 = 6000 km*.

$Z_c$est une fonction du rapport *D/a* où :

D = distance des conducteurs.

a = diamètre des conducteurs.

Ces valeurs sont données par la courbe de la Figure III.10 :

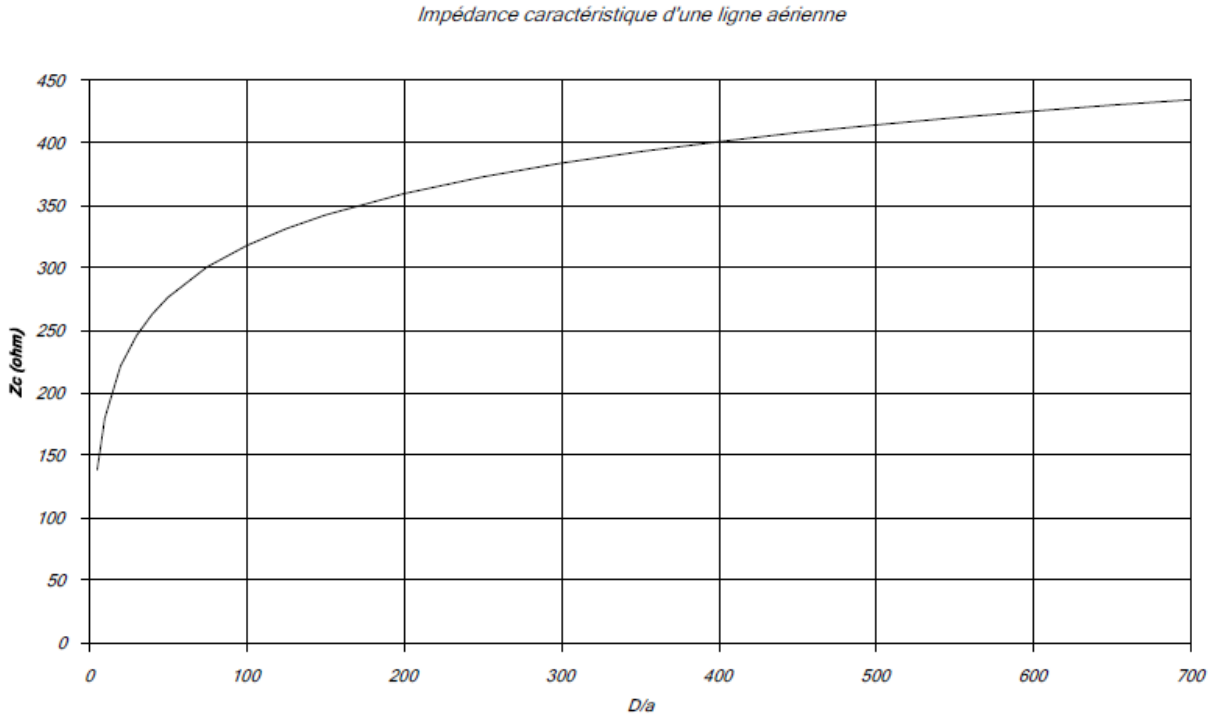

Fig.III.10. Ordre de grandeur de l'impédance caractéristique.

Pour les lignes de transport d'énergie exécutées jusqu'ici, le rapport *D/a* vari selon la tension entre 50 et 250kV, de sorte que l'impédance caractéristique ne varie elle-mêmequ'entre des limites rapprochées, environ 280 et 380 ohms. Dans le cas des lignes à trèshaute tension, on se rapproche de la valeur supérieure.

La conductance de fuite étant faible, l'argument _ ou déphasage caractéristique estnégatif; sa valeur est :

$$\varphi c = (-1/2)\arctan(r/(\omega.\ell)) \qquad \textbf{(III.62)}$$

Il en résulte que dans le cas d'une ligne aérienne infinie, le courant présente undéphasage en arrière de *(-1/2).arctan(r/(ω.ℓ))* par rapport à la tension. Il est doncdéphasé *en avant*. Si l'on reprenait les calculs développés précédemment en tenant comptedu champ à l'intérieur des conducteurs, on verrait que la vitesse de propagation devient,pour la plupart des lignes aériennes à haute tension : 295.000 km/s (légèrement inférieureà la vitesse de la lumière).

III.5 Méthodes approchées - Lignes en T et en π

Lorsqu'une ligne est relativement courte, on peut supposer toute la capacité et éventuellement toute la conductance de fuite concentrées en un ou plusieurs points le long de la ligne. Les calculs peuvent dès lors être conduits par les méthodes ordinaires sans faire appel aux lignes hyperboliques. Plus le nombre de tronçons (n) en lesquels la ligne se

trouvedécomposée est grand, plus on s'approchera de la solution exacte. Mais la plupart du temps on se contente de n'envisager qu'un seul tronçon.

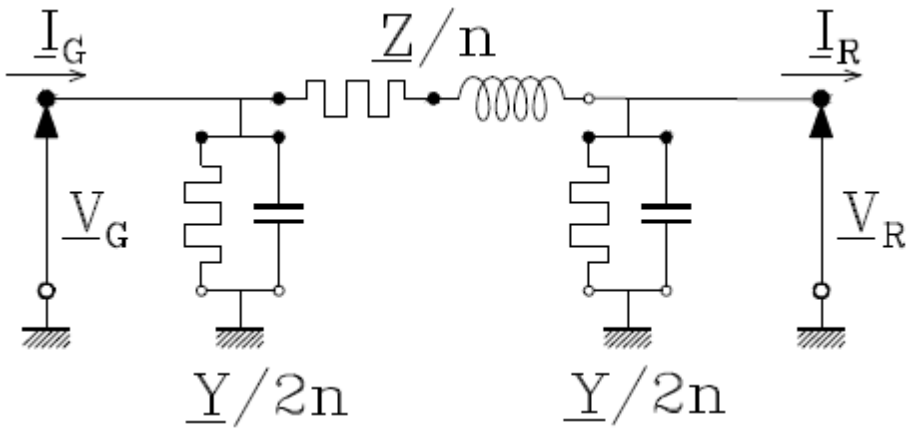

Fig.III.11. Représentions d'un tronçon en π d'une ligne de transport.

En supposant la capacité et la conductance concentrées par moitié aux deux extrémités de chaque tronçon, selon le schéma de la figure précédente, on obtient une décomposition en tronçons en pi.

S'il n'y a qu'un seul tronçon, on obtient les relations :

$V_G = V_R.(1+\frac{1}{2}Z.Y)+I_R.Z$ **(III.63)**

$I_G = V_R.Y.(1+\frac{1}{4}Z.Y)+I_R(1+\frac{1}{2}Z.Y)$ **(III.64)**

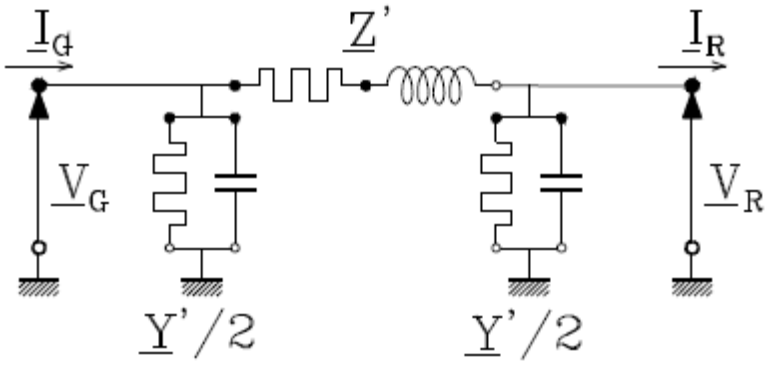

Fig.III.12. Schéma équivalent en π d'une ligne de transport.

Si l'on désire connaître les valeurs ***Z'*** et ***Y'*** de la ligne équivalente en π d'une ligne àconstantes réparties caractérisée par l'impédance totale ***Z*** et l'admittance totale ***Y***, il suffitd'identifier les relations :

A. du modèle en π :

$V_G = V_R.(1+\frac{1}{2}Z'.Y')+I_R.Z'$ **(III.65)**

Clicours.COM

$I_G = V_R.Y'.(1+\frac{1}{4}Z'.Y') + I_R.(1+\frac{1}{2}Z'.Y')$ **(III.66)**

B. de la ligne à constantes réparties :

$V_G = V_R.\cosh(\gamma.d) + I_R.Z\frac{\sinh(\gamma.d)}{\gamma.d}$ **(III.67)**

$I_G = V_R.Y.\frac{\sinh(\gamma.d)}{\gamma.d} + I_R.\cosh(\gamma.d)$ **(III.68)**

Ce qui conduit aux relations :

$\boldsymbol{Z' = Z.\frac{\sinh(\gamma.d)}{\gamma.d}}$ **(III.69)**

$\boldsymbol{Y' = Y.\frac{\tanh\frac{(\gamma.d)}{2}}{\frac{\gamma.d}{2}}}$ **(III.70)**

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle mathématique d'une ligne de transport qui va nous servir dans la simulation du chapitre quatre.

CHAPITRE IV

SIMULATION D'UNE LIGNE DE TRANSPORT

ClicCours.com

IV.1 Introduction

Pour mieux comprendre cette étude de fonctionnement des lignes longues distances, il est nécessaire d'effectuer une simulation numérique par un programme sous Matlab.

Notre choix c'est porté sur une ligne de 200 km et de tension de 220 kV avec une puissance de charge de 300MW.

IV.2 Caractéristiques de la ligne

Pour effectuer notre simulation nous avons choisi une ligne électrique dont le câble présente les caractéristiques suivantes:

s=547.11 mm^2; d_c=26 .4 mm; $r_{20°C}$ =0.103 Ω/Km; x_0 =0.405 Ω/Km;

b_0 =2.57.10^{-6} Siemens/Km; L=200 Km.

Interface grafique

Une interface graphique qu'on développée pour le calcul et le tracé des diagrammes.

L'interface permet d'évaluer :

- ✓ La tension d'entrée et Le courant d'entrée en fonction de la distance.
- ✓ La tension d'entrée et le courant d'entrée en fonction de la température.

Clicours.COM

Figure: Menu principale de l'interface

IV.3 Variation de la distance

IV.3.1 Organigramme de calcul

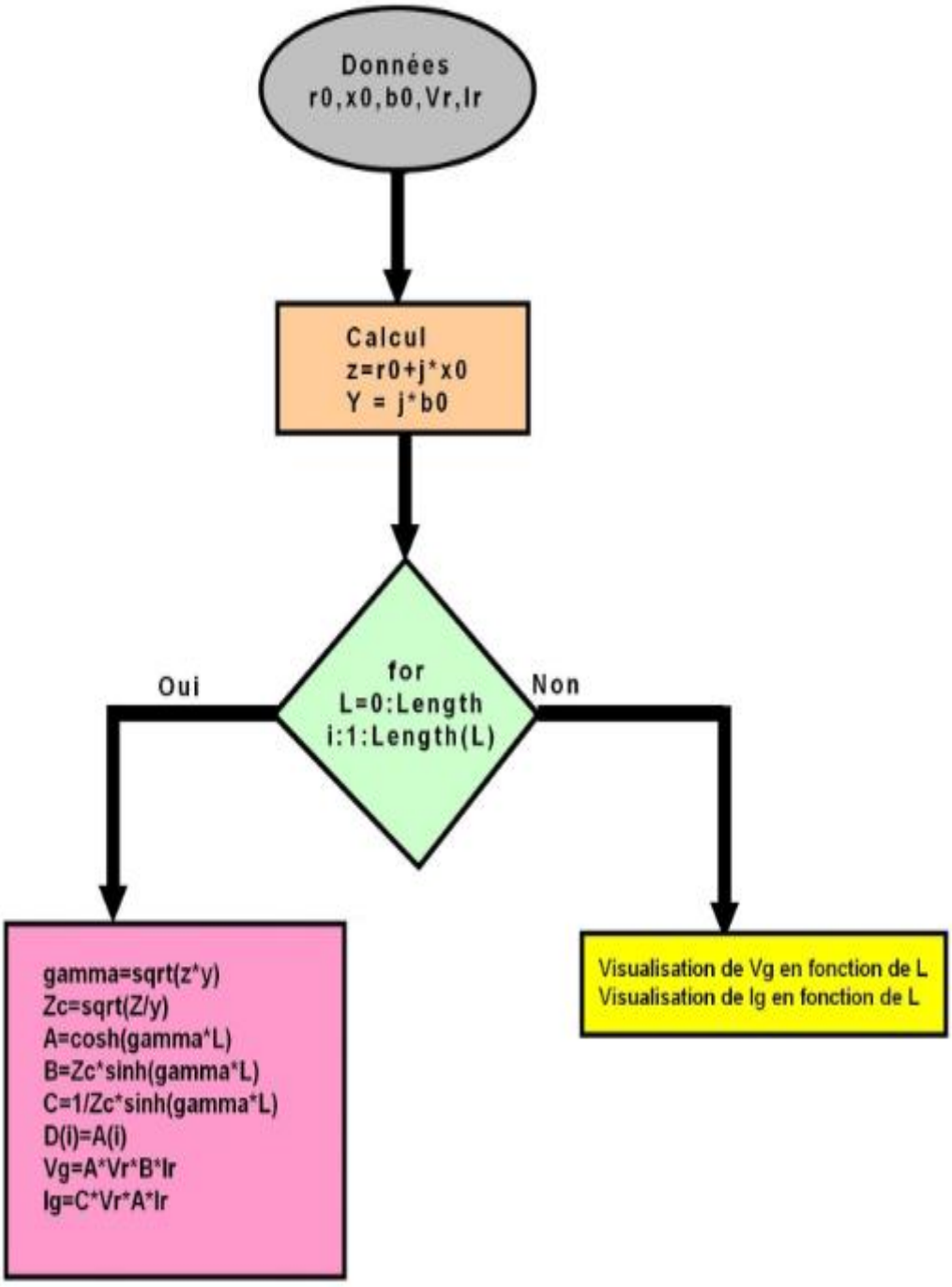

Figure IV.1 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la distance

IV.3.2Résultats

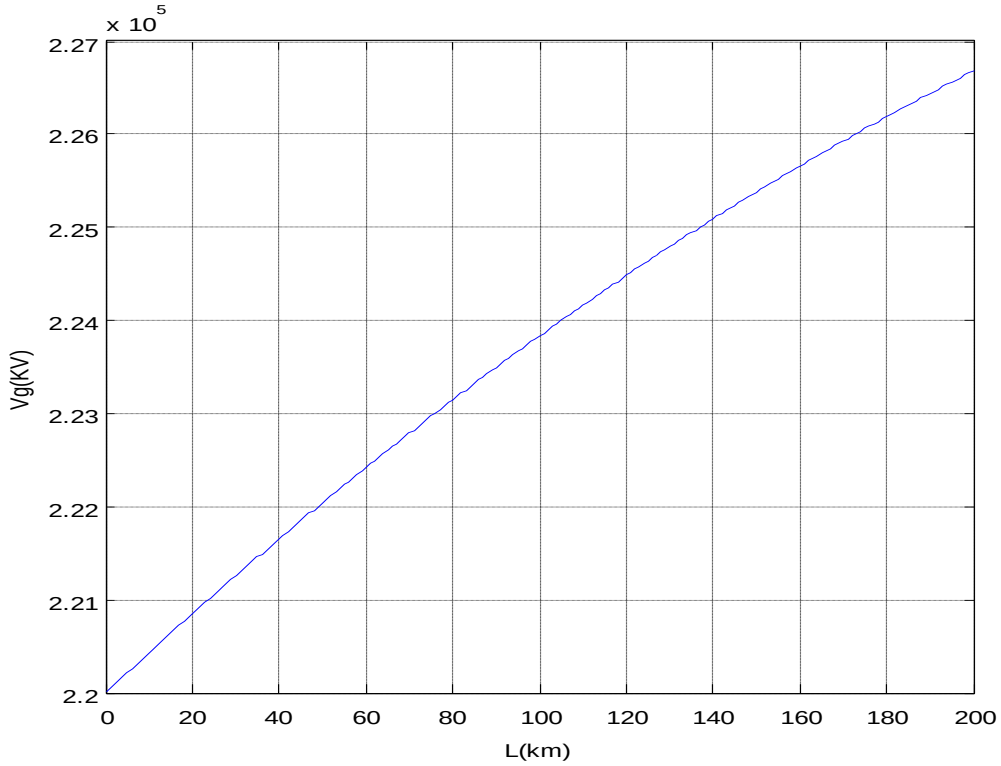

Figure IV.2 : Tension d'entrée de la ligne en fonction de la distance

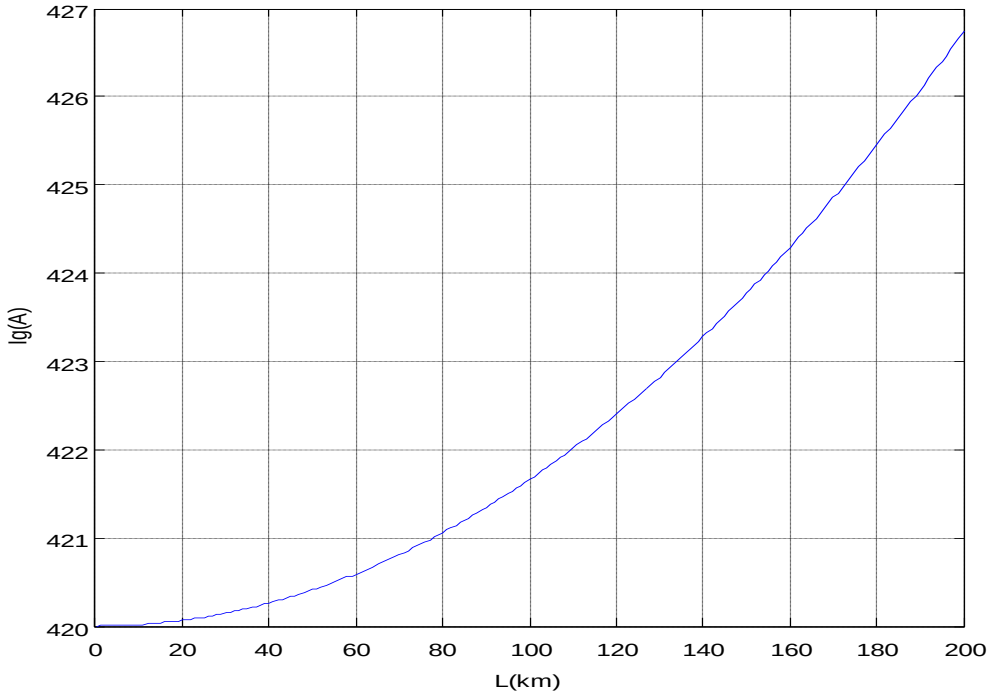

Figure IV.3 : Courant d'entrée de la ligne en fonction de la distance

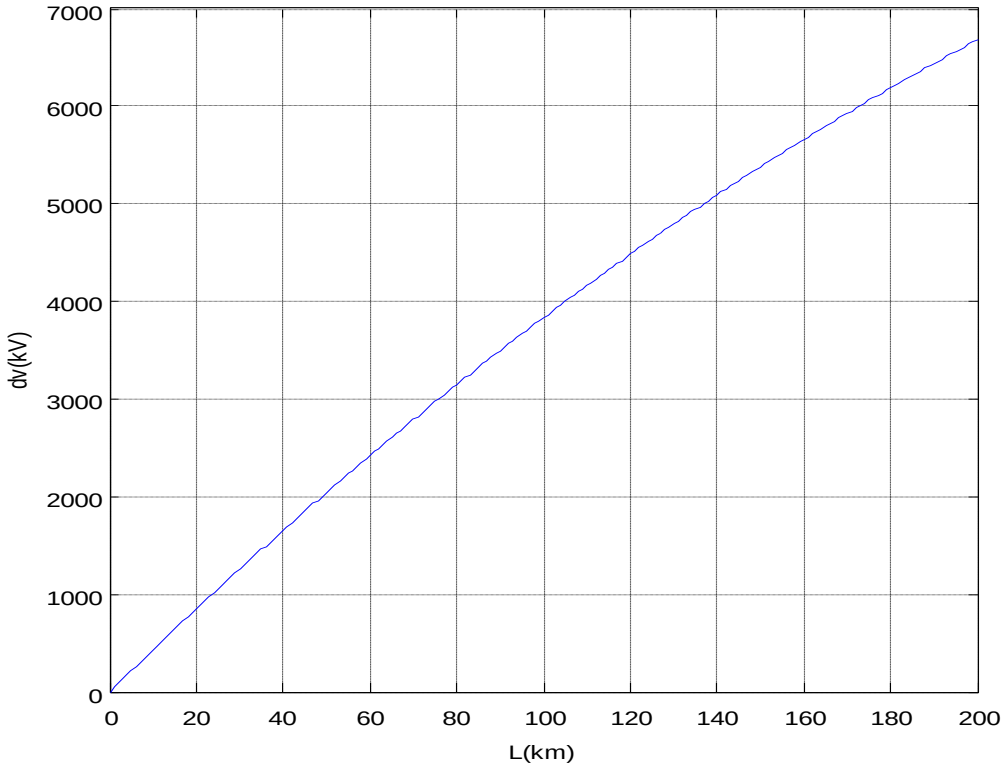

Figure IV.4 : Chute de tension en fonction de la distance

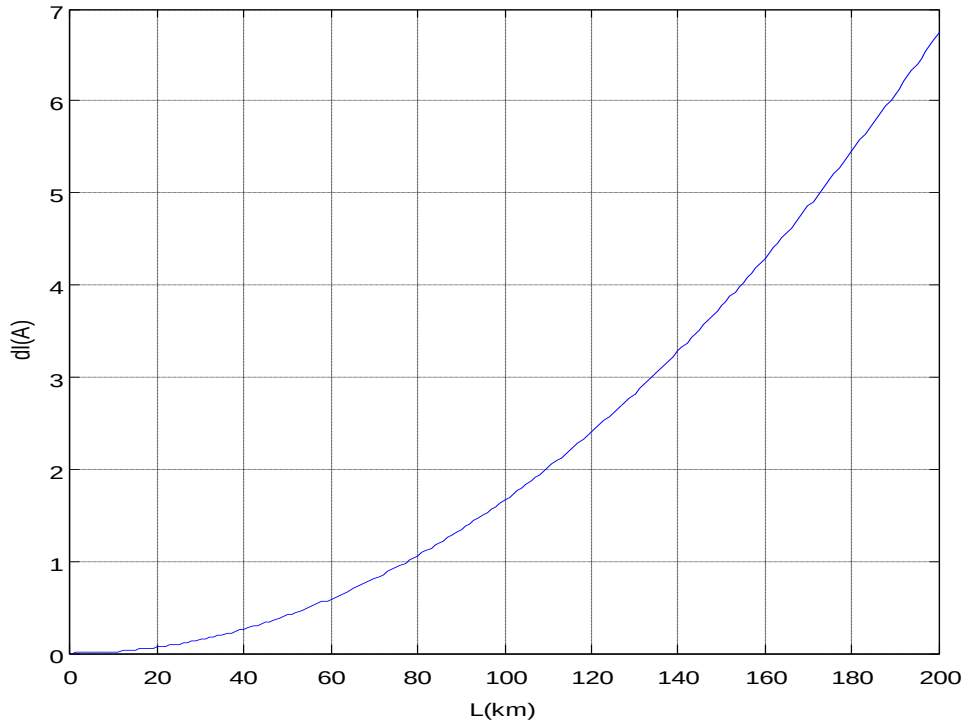

Figure IV.5 : Chute de courant en fonction de la distance

IV.3.3 Interprétation des résultats

IV.3.3.1 Tension d'entrée en fonction de la distance

Nous remarquons que la chute de tension provoquée par la ligne de longueur 200 km est de 7000 V ce qui correspond à un taux de 3.08 % de la tension de départ. Cette chute de tension présente un caractère non linéaire. Ce que nous considérons comme un résultat satisfaisant. (Figure IV.2)

IV.3.3.2 Courant d'entrée en fonction de la distance

Nous remarquons que la baisse de courant est de 7A sur un courant de 427A qui nous donne un taux de 1.64%, cette baisse présente une forme parabolique, qui est en concordance avec la chute de tension. (Figure IV.3)

IV.3.3.3 Pertes de puissance sur la ligne

La perte de puissance est de 2.989 MVA sur une puissance de

300MVA nous donne un taux de déperdition de puissance de 0.99%, ce qui est une valeur satisfaisante.

IV.4 Variation de la température

IV.4.1 Organigramme de calcul

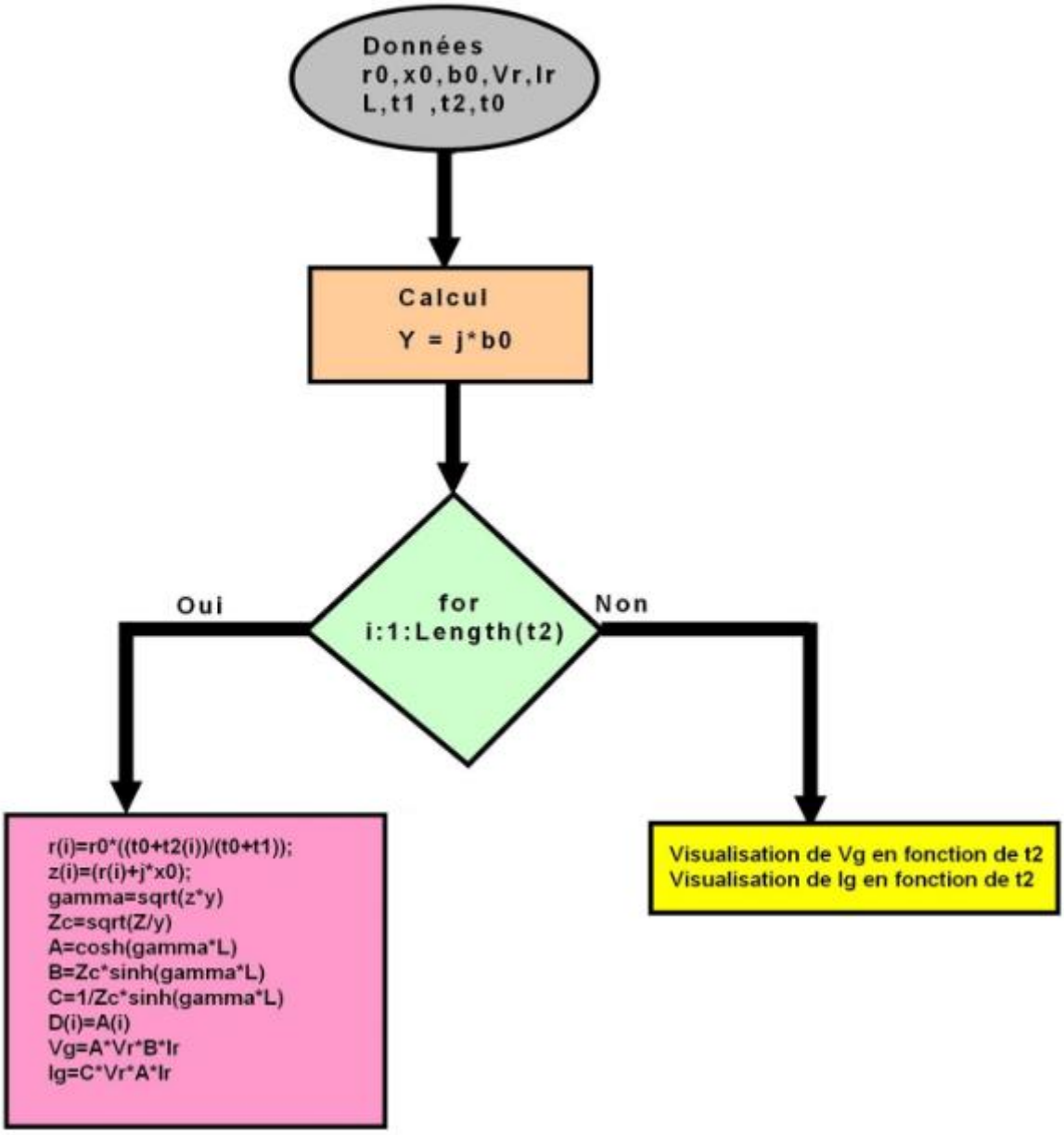

Figure IV.6 : Organigramme de calcul de tension et courant d'entrée en fonction de la température

IV.4.2 Résultats

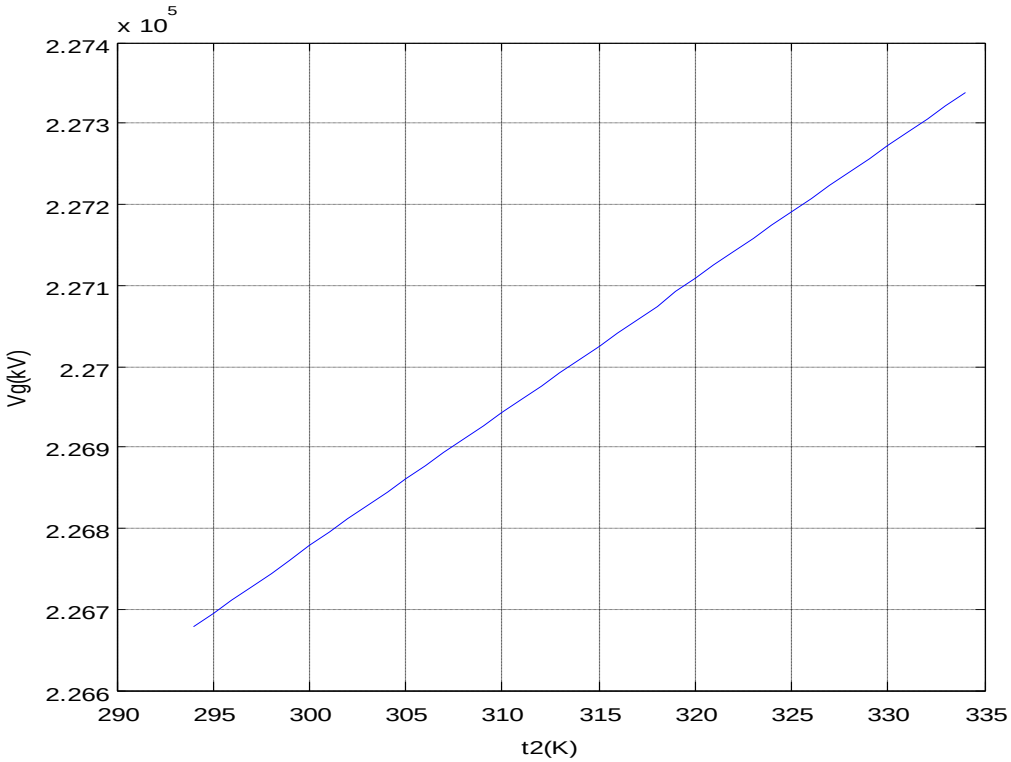

Figure IV.7 : Tension d'entrée en fonction de la température

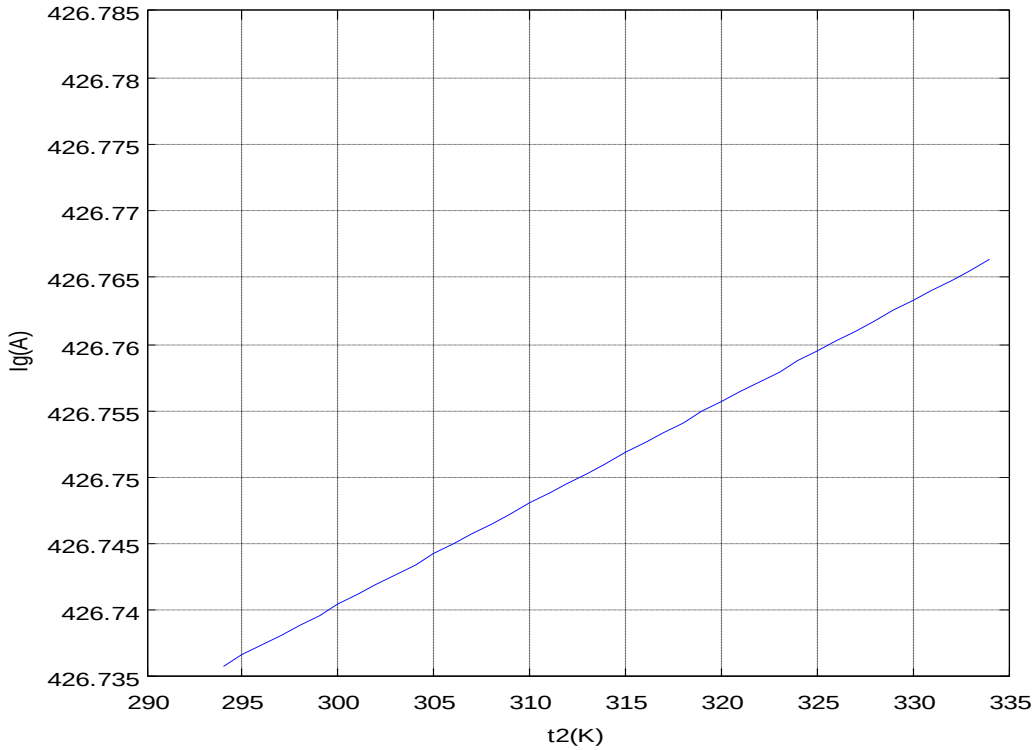

Figure IV.8 : Courant d'entrée en fonction de la température

IV.4.3 Interprétation des résultats

IV.4.3.1 Tension d'entrée en fonction de la température

L'augmentation de la température provoque une diminution de la variation de la tension de 800V, ce qui correspond à un taux de 11.43%. (Figure IV.7)

IV.4.3.2 courant d'entrée en fonction de la température

L'augmentation de la température provoque une augmentation très légère de (0.04A) qui peut être due à la variation de la capacité. (Figure IV.8)

IV.5 Conclusion

D'après l'interprétation de nos résultats notre programme a donné des résultats satisfaisants qui pourront êtreappliqué à un projet de construction de ligne de moyenne distance.

Conclusion générale

cliCours.com

Conclusion générale

L'étude d'une ligne aérienne présentée dans ce travail nous a permis de connaitre les difficultés que présente le transport de l'énergie électrique.

Le chapitre I nous a permis de connaitre les différentes parties composants le réseau électrique ainsi que toute la chaine d'appareillages qui entre dans le transport entre les centrales électriques et les lieux de consommation.

Dans le chapitre II nous avons défini les propriétés d'une ligne de haute tension et l'utilité de la HT, nous avons aussi mis exergue les composants entrant dans la construction de la ligne ainsi que quelques effets comme l'effet « couronne »ou l'effet d'interférence radiophonique.

Dans le chapitre IIInous avons modélisé une ligne de transport en haute tension.

Cela nous a permis d'obtenir un modèle mathématique qui décrit les relations entre les différents paramètres de la ligne.

Dans le chapitre IV nous avons procédé à la simulation d'une ligne dont les paramètres ont été choisis suivant un catalogue de fabricant de câble.

D'après les courbes obtenues en fonction de certains paramètres (distance et température) les résultats de simulation nous paraissent conformes à la réalité sur le terrain.

En perspective on peut proposer un travail similaire mais en fonction de l'humidité et voir le vieillissement de la ligne.

Bibliographie

[1] Ligne à haute tension (Article Wikipedia)http://fr.wikipedia.org/wiki/ligne_à_haute_tension

[2]KOUADRA FOUED « Etude des Variations Rapides de Tension Pour le Raccordement d'une Production Décentralisée dans un Réseau MT » (Pfe 2003/2004) UNIVERSITE MENTOURI DE CANSTANTINE

[3]CHERIF Med Foudhil et CHERIF Khayr Eddine « CALCUL DES PROTECTIONS D'UNE LIGNE DE TRANSPORT ELECTRIQUE HTB-220KV», Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH – OUARGLA

[4] Guillaume RAMI « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées
d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de doctorat INPG, 2006

[5] J.M. DELBARRE « Postes à HT et THT - Rôle et Structure », Techniques del'Ingénieur, Traité Génie électrique, D 4570, 2004.

[6] P-A CHAMOREL « Energie Electrique II : paramètres électriques des lignes » Ecole d'ingénieur LAUSANE (EIL), 1994.

[7] Ph. CARRIVE « Réseaux de Distribution - Structure et Planification », Techniques
de l'Ingénieur, Traité Génie électrique D 4210, 2006.

[8] T.WILDI « Electrotechnique ». Avec la collaboration de Gilbert Sybille (ingénieur, institut de recherche d'Hydro-Québec) 4ème édition : de boeck, 2005

[9] Ligne et Réseaux Electrique 1 « Ligne d'énergie électrique » Jean-ClaudesSabonnadière et Noureddine Hadj Saïd

[10] BENOUZZA Abdellah et BAKHTI Jihad<< Etude d'une interconnexion des lignes de transport 500 kV et 220 kV>> Mémoire master, université Mohamed BOUDIAF, ORAN

[11] P. MAYE« Aide –mémoire Electrotechnique » 3ème édition : DUNOD, 2006.

[12] **J. PASTEAU** « **Cahier Technique Merlin Gerin.** N°127 : Introduction àl'appareillage très haute tension » édition juin 1984.

[13] **Dr. Farid BENHAMIDA** « Système per unit, Calcul des paramètres des lignes de transport, Modélisation des lignes électriques » polycopie de cours etexercices corrigés, Département d'électrotechnique, Université Djilali LIABESde Sidi Bel Abbes

[14]André CHANAL Lignes Aériennes Présentation Et Calcul Des Lignes

[15]Note De Cours« Transport de l'énergie électrique à grande distance en courant alternatif » L.KONTI

[16] T. Gönen « Electric Power System Engineering: Analysis and Design » John Wiley & Sons, Edition 1988.

[17] J.D. Glover, M. Sarma « Power System Analysis and Design » PWS Publisher company, 1994.

Annexe:

Programme 01 : variation de la tension et courant d'entré en fonction de la distance

```
clc,
clear all,
close all,

r0=0.103; %résistance linéique
x0=0.405;%inductance linéique
b0=2.57e-6;%la suceptance
Vr=2.2*10^5;
Ir=420;
Length =200; % LONGUEUR DE LIGNE.
L=0:Length;
z = r0+ j*x0; % L'IMPEDANCE SERIE.
y = j*b0; % L'ADMITTANCE SHUNT.
gamma = sqrt(z*y); % CONSTTANTE DE PROBAGATION.
Zc = sqrt(z/y); % IMPEDANCE CARACTTERSTIQUE.
A = cosh(gamma*L);
B = Zc*sinh(gamma*L);
C = 1/Zc * sinh(gamma*L);
fori=1:length(L)
D = A(i);
ABCD = [A(i) B(i); C(i) D];

Vg=A*Vr+B*Ir;
Ig=C*Vr+A*Ir;
end



figure(1),plot(L,abs(Vg))
figure(2),plot(L,abs(Ig))

figure(3),plot(L,abs(Vg)-Vr)
grid
```

programe 02 : variation de la tension et courant d'entrée en fanction de la température

```
clc,
clear all,
close all,
r0=0.103;%résistance linéique
x0=0.405;%inductance linéique
b0=2.57e-6;% la suceptance linéique
L=200; % LONGUEUR DE LIGNE.
t0=228.1;
t2=294:1:334;
t1=294;

Vr=2.2*10^5;%tension de sortie
Ir=420;%courant de sortie


y = j*b0; % L'ADMITTANCE SHUNT.




fori=1:length(t2)
r(i)=r0*((t0+t2(i))/(t0+t1));
z(i)=(r(i)+j*x0);

gamma(i) = sqrt(z(i)*y); % CONSTTANTE DE PROBAGATION.
Zc(i) = sqrt(z(i)/y); % IMPEDANCE CARACTTERSTIQUE.

A(i) = cosh(gamma(i)*L);
B(i) = Zc(i)*sinh(gamma(i)*L);
C(i) = 1/Zc(i) * sinh(gamma(i)*L);
D(i) = A(i);
ABCD = [A(i) B(i); C(i) D(i)];

Vg(i)=A(i)*Vr+B(i)*Ir;% tension d'entrée
Ig(i)=C(i)*Vr+A(i)*Ir;%courant d'entrée

end




figure(1),plot(t2,abs(Vg))
figure(2),plot(t2,abs(Ig))
```