

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Université d'EL-Oued
Faculté des Sciences et de Technologie

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

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et de Technologies
Filière : Génie Électrique
Spécialité : Réseaux Électriques

Thème

CALCUL DES PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES
ET MÉCANIQUE D'UNE LIGNE HAUTE TENSION

Devant le jury composé

Dr. Zellouma Laid - President

Dr. Gacem Abdelmalek - Examineur

Pr. Ben Attous Djilani - Encadrure

Réaliser par :

Chetehouna Taha

Aouadj Ilyes

Othmani Abdelatif

2021/2022

Remerciements

Toute la Gratitude, tout d'abord à Dieu qui nous a donné la force Pour Terminer ce modeste travail. Toutes nos infinies gratitudes à notre promoteur

Pr. Ben Attous Djilani

Pour son encadrement et ses aides précieuses. Nous remercions aussi les membres de jury qui nous ont fait l'honneur d'accepter le jugement de notre travail. Nous tenons à remercier sincèrement corps professoral et administratif du département : Réseaux électriques à la qualité de leurs enseignements et qui déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée. Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribués de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail, trouvent ici l'expression de notre profondes gratitudes et respects.

Chetehouna Taha

Aouadj Ilyes

Othmani Abdelatif

Résumé

Les réseaux de transport jouent un rôle primordial dans l'acheminement de l'énergie électrique des centres de production vers les centres de consommation. Ils sont en général en haute et très haute tension et de type aérien. L'étude d'une ligne aérienne permet d'optimiser son fonctionnement. Sa modélisation et calcul des caractéristiques électriques et mécanique nous permettent d'obtenir des indicateurs assez précis afin d'évaluer son comportement vis-à-vis des puissances transportées. L'objectif de ce mémoire est le calcul des paramètres et caractéristiques d'une ligne de transport électrique à l'aide d'un programme sous MATLAB.

Mots clés : Ligne de transmission, Résistance, Inductance, Capacitance, Conducteurs toronnés

ملخص

لشبكات النقل دورًا رئيسيًا في نقل الطاقة الكهربائية من مراكز الإنتاج إلى مراكز الاستهلاك. وهي بشكل عام ذات جهد عالٍ وعالي جدًا ومن النوع الجوي. تسمح دراسة الخط الجوي بتحسين تشغيله. وتسمح لنا نمذجة وحساب الخصائص الكهربائية والميكانيكية بالحصول على مؤشرات دقيقة إلى حد ما من أجل تقييم سلوكها فيما يتعلق بالقوى المنقولة. الهدف من هذه الأطروحة هو حساب معلمات وخصائص خط النقل الكهربائي باستخدام برنامج الماتلاب

كلمات مفتاحية : خطوط النقل , المقاومة , الممانعة

سعة الكهربائية , الموصلات الملتوية

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Sommaire	
Liste des Figures	
Liste des tableaux	
Liste des Symboles	
Introduction générale	

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.1- Introduction	1
I.2- Production de L'énergie électrique	2
I.3- Les sous-systèmes de transformation	3
I.4- Description des réseaux électriques	3
I.5- Les niveaux de tensions	4
I.6-Structure et fonction du système électrique	5
I.6-1- Réseau de transport.....	5
I.6-2- Réseau de répartition	6
I.6-3- Réseau de distribution	6
I.7- Architecture des réseaux électriques	6
I.7.1- Les réseaux arborescents ou en antenne	6
I.7.2- Les réseaux bouclés ou en coupure d'artère	7
I.7.3- Les réseaux maillés	7
I.8- Les postes d'interconnexion et de transformation	7
I .8.1- Poste de transformation HTA/BT	8
I.8.2- Postes sources	8
I.9- Lignes aériennes et câbles souterrains	9
I.9.1- Réseaux HTA aériens	9
I.9.2- Réseaux HTA souterrains	9
I.10- Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles souterrains	10
I.10.1- Lignes aériennes	10
I.10.2. Câbles souterrains	11
I.11- Conclusion	11

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

II.1 Introduction	12
II.1.1 Les paramètres longitudinaux.....	12
II.1.1.1 la résistance de la ligne.....	12
A) Effet de spiralage du conducteur.....	12
B) Effet de température.....	12
C) Effet pelliculaire ou effet Kelvin	13
II.1.1.2 Inductance de la ligne	14
II.1.1.2.1 Définition	14
II.1.1.2.2 Inductance d'un conducteur	14
A) Inductance d'un conducteur due au flux intérieur	14
B) Inductance d'un conducteur due au flux extérieur	16
C) L'inductance d'un conducteur due au flux total	17
II.1.1.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant.	18
II.1.1.2.4 Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés	20
II.1.1.2.5 Inductance des lignes triphasées	21
A) Disposition triangle équilatéral (espacements égaux).....	21
B) Disposition quelconque.....	22
II.1.1.2.6 Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux	24
II.1.1.2.7 Inductance linéique d'une ligne triphasée à deux ternes	25
II.1.2 Les paramètres transversaux	25
II.1.2.1 Conductance	25
II.1.2.2 La capacité de la ligne	25
II.1.2.2.1 Capacité d'une ligne monophasée	26
II.1.2.2.2 Capacité d'une ligne triphasée	26
A) Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase égal	26
B) Capacité d'une ligne triphasée avec espacement de phase inégal	27
II.1.2.2.3 capacité des conducteurs en faisceaux	28
II.1.2.2.4 Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée	29
II.2 Conclusion.....	29

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

III.1 Introduction.....	30
III.2 Rappels.....	31
III.3 les élément des lignes électrique	32
III.3.1 les conducteurs	32
A) Critère de courant nominal	32
B) Critère du courant de court-circuit.....	33
C) Critère de la chute de tension	34
D) Critère économique	34
III.4 Les Supports	36
III.5 Les Condition Climatique De Référence	37
III.5.1 effet de Température	37
III.5.2 effet de Vent.....	38
A) Dans le conducteur.....	38
B) Dans le pylône.....	39
III.5.3 effet de givre.....	38
A) Dans le conducteur et câbles de terre	40
B) Dans les supports	40
III.6 Angle d'inclinaison du câble et Poids équivalent	40
III.7 Portée critique et choix de la constante « a »	41
III.8 Détermination de la longueur de la chaîne de suspension	42
A) Règle de bonne pratique	43
B) Méthode développée par le Service de TDEE de l'ULg4	43
C) Degré de salinité	44
D) Ligne de fuite des isolateurs	44
E) Choix de la chaîne d'isolateurs	45
F) Distance phase/phase et phase/terre	46
G) géométrie des pylônes	48
H) Calcul des efforts en tête de pylône	49
K) Evaluation du coût des supports	49
L) Effet couronne	50
III.9 Flèche maximale et hauteur des conducteurs	51
III.10 Conclusion.....	52

Chapitre IV : Calcul et application

IV.1 Introduction.....	53
IV.2. calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée	53
IV.2.1 Algorithmes de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée	53
IV.2. 2 Application a une ligne contenant un conducteur par phase ($n=1$).....	55
IV.2.3 Application a une ligne a conducteur de phase en fiscaux de 3 cordes.....	56
IV.3 Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée.....	57
IV.3.1 Calcul des caractéristiques de la ligne longue.....	57
IV.3.1.1- Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue.....	57
IV.4 Conclusion	60
Conclusion générale	61
Bibliographie	63

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1.Schéma du réseau de transport.....	2
Figure I.2. Schéma d'un réseau électrique.....	3
Figure I.3 Vue globale du réseau électrique.....	5
Figure I.4. Un réseau arborescent.....	6
Figure I.5. Un réseau bouclé.....	7
Figure I.6. Un réseau maillé.....	7
Figure I.7 :Poste HTB/HTA Oued EL Alanda.....	8
Figure I.8 :Réseau de type aérien	9

Chapitre II :

Figure II.1 : Champ magnétique dans la conducteur.....	14
Figure. II.2 : Un conducteur massif.....	15
Figure. II.3 : Conducteur de section circulaire plein.....	16
Figure.II.4 :flux d'un ensemble de conducteurs en parallèles.....	18
Figure. II.5 : Disposition des conducteurs en triangle équilatéral.....	21
Figure. II.6 : Transposition de la ligne.....	22
Figure. II.7 : Liaisons triphasé à disposition quelconque.....	23
Figure. II.8 : Conducteurs en faisceaux.....	24

Figure. II.9 : Liaison monophasée.....	26
Figure. II.10 : Liaison triphasée avec espacement de phase égal.....	26
Figure. II.11 : Liaison triphasée avec espacement de phase inégal	27
Figure. II.12 : Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux.....	28
Figure. II.13 : La configuration des conducteurs en faisceaux.....	28
Figure. II.14 effet partielle à la terre.....	29

Chapitre III :

Figure III.1: Modèle réduit de la liaison.....	34
Figure II.2 Fonction coût du conducteur.....	35
Figure III.3 : Types de supports à phases étagées.....	36
Figure III.4 : Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute.....	37
Figure III.5 : Efforts appliqués.....	42

Chapitre IV :

Figure IV.1 : organigramme de calcul des paramètres de la ligne.....	54
Figure IV.2 : les données de la ligne contenant un conducteur par phase.....	55
Figure IV.3 : les données de la ligne en faisceau	56
Figure IV.4 : les données de la ligne longue.....	57
Figure. IV.5. Organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue.....	58

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau I.1 Des Domaines de tension en Algérie.....	4
Tableau I.2 La norme CEI (Commission Electrotechnique Internationale).....	4

Chapitre II :

Tableau II-1: les températures de certain conducteur.....	13
Tableau II-2: valeurs du RMG selon le nombre de brins.....	20

Chapitre III :

Tableau III.1 : Classification des niveaux de tension.....	31
Tableau III.2 : Puissance et courant de court-circuit.....	33
Tableau III.3: Vitesse du vent et pression dynamique en fct de la hauteur.....	39
Tableau III.4 : Choix du nombre d'assiettes en fonction du niveau de tension.....	44
Tableau III.5 :Tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL ».....	44

Tableau III.6 : Tension nominale de tenue aux chocs de foudre.....	45
Tableau III.7:Caractristiques d'assiettes standard.....	46
Tableau III.8:BIL vs Nbre d'assiettes (standard).....	47
Tableau III.9:Caractéristiques d'assiettes antibrouillard.....	47
Tableau III.10:BIL vs Nbre d'assiettes (Antifog).....	48

Chapitre IV :

Tab. IV 1: résultats de calcul des paramètres d'une ligne sans faisceau	55
Tab. IV 2: résultats de calcul d'une lignes avec 3 cordes en faisceau.....	56
Tableau.IV.4. Les caractéristiques de la ligne longue.....	59
Tab. IV.4: les caractéristiques de la ligne longue.....	59

Liste des abréviations

T.H.T : Très Haute Tension
 H.T : Haute Tension
 HTA : Haute Tension A
 HTB : Haute Tension B
 BTA : Basse Tension A
 BTB : Basse Tension B
 TBT : Très Basse Tension
 GRD : Gestionnaire de Réseau de Distribution.
 CEI : Commission Electrotechnique Internationale
 RMG : Rayon moyen géométrique

Liste des Symboles

R : résistance linéique (Ω/km)
L : inductance linéique (H/km)
C : capacité linéique (F/km)
 ρ : résistivité du matériau ($\Omega.\text{mm}^2 / \text{m}$)
S : Section des conducteurs (mm^2)
l : Longueur de la ligne ou câble (km)
 t_1, t_2 : les températures en $^{\circ}\text{C}$ à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur.
 R_1, R_2 : les résistances du conducteur respectivement aux températures t_1 et t_2 .
T : température paramétrique ($^{\circ}\text{C}$).
K : le coefficient du spiralge du conducteur.

q: facteur de Kelvin

f : fréquence du réseau (Hz).

B : induction magnétique (T)

H : champ magnétique (At/m)

Ψ : Flux (Wb.t/m)

μ_0 : La perméabilité du vide ou de l'air (H/m) Nomenclature

G11: Rayon moyen géométrique du faisceau.

g11: Rayon moyen géométrique d'une corde.

n : Nombre de corde dans un faisceau.

rT: Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

Dég: Distance géométrique moyenne (GMD)

Y : Admittance de la ligne (S)

Z : Impédance de la ligne (Ω)

ZC: Impédance caractéristique (Ω)

γ : Coefficient de propagation

θ : Angle de propagation

VR: Tension du récepteur (kV)

IR: Courant du récepteur (A)

Cos (ϕ_R) : facteur de puissance du récepteur

VS: Tension de la source (kV)

IS: Courant de la source (A)

SS: Puissance apparente de la source

PS: Puissance active de la source (MW)

QS: Puissance réactive de la source (MVAR)

QC: Puissance réactive fournie par la capacité (MVAR)

Cos (ϕ_S) : Facteur de puissance de la source

η : Le rendement de la ligne (%)

ΔU : La chute de tension dans la ligne

Introduction Générale

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

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

Les réseaux électriques sont considérés comme des infrastructures conçus traditionnellement d'une manière verticale où les transferts de l'énergie suivent le schéma dit « du haut en bas » : production –transport-distribution.

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

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

Dans ce contexte ont élaboré un ensemble de programme pour le calcul des paramètres et des caractéristiques de différent type de lignes.

Notre travail est organisé de la manière suivante :

Le premier chapitre est consacré à généralités sur les lignes électriques dans le deuxième chapitre sont présentées et description théorique de calcul des paramètres des lignes électriques. mentionnant aussi les effets créés par les paramètres transversales (R & L) et longitudinale (C & G) tout au long de la ligne.

Le troisième chapitre présente et calcul les paramètres mécaniques de lignes de transport de l'énergie électrique.

Quatre -ème chapitre applique le relation et les équation

Finalement une conclusion générale achèvera notre présent mémoire

Chapitre I

I.1- Introduction

Un réseau d'énergie électrique est un système d'éléments interconnectés qui est conçu :

- Pour convertir d'une façon continue l'énergie qui n'est pas sous forme électrique en énergie électrique,
- Pour transporter l'énergie électrique sur de longues distances,
- Pour transformer l'énergie électrique sous des formes spécifiques soumises à des contraintes bien déterminées.

Pour un consommateur, le réseau devrait être idéalement vu, de l'endroit où il prend son énergie électrique, comme une source de tension alternative parfaite : c'est-à-dire une source dont la fréquence et l'amplitude sont constantes quelle que soit la charge connectée. [1]

Pour satisfaire leur clientèle, les compagnies d'électricité doivent donc s'efforcer de maintenir l'amplitude et la fréquence de la tension constantes (valeurs nominales). Donc, il est important de maintenir le niveau de tension près de sa valeur nominale aux différents nœuds du réseau .

Une grande majorité des lignes de transport d'énergie électrique sont à courant alternatif, fonctionnant à plusieurs valeurs de tension (10 kV à 800 kV), Les réseaux de distribution fonctionnent généralement au-dessous de 100 kV, tandis que la puissance est transmise à des tensions très élevées. Les lignes fonctionnant à différentes tensions sont reliées par les transformateurs qui fonctionnent au rendement élevé. Traditionnellement, les lignes à courant alternatif ne prévoient aucune commande du flux de puissance. Les disjoncteurs actionnés mécaniquement sont utilisés pour la protection contre les défauts. Un disjoncteur actionné mécaniquement est utilisé pour un nombre d'opérations d'ouverture et de fermeture limité à un moment défini et ne peut pas être employé pour la commande (à la différence des commutateurs de l'électronique de puissance à fréquence de commutation très élevée tel que le thyristor, le GTO, l'IGBT, l'IGCT, etc.) de flux de puissances.

Le but premier d'un réseau électrique est de pouvoir satisfaire la demande des consommateurs. Comme l'énergie électrique ne peut être stockée, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité : Production = consommation + pertes

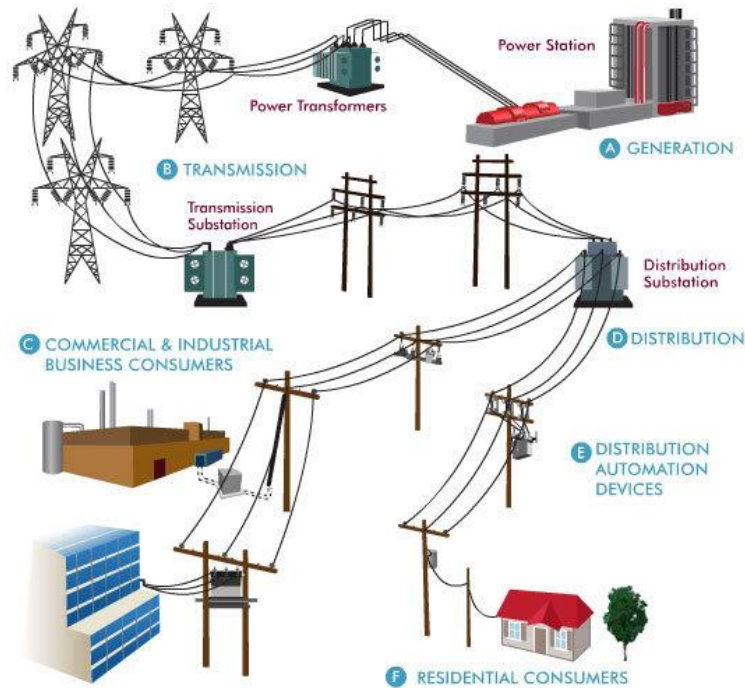


Figure I.1. Schéma du réseau de transport [2]

I.2- Production de l'énergie électrique

La production de l'électricité constitue entre 35 et 50% du coût total de l'électricité fournie aux consommateurs, elle fait appel à différents types de principes.

Le principe de conversion où la centrale de production de l'électricité convertit une source d'énergie primaire en énergie électrique. La source d'énergie primaire est un élément déterminant qui permet de distinguer entre les différentes centrales de production. Ces principes varient aussi selon leurs structures de coût, leurs économies d'échelle et leurs capacités à réaliser leurs fonctions. Il est à noter que l'énergie électrique n'est pas stockable .

I.3- Les sous-systèmes de transformation

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique de minimiser l'énergie perdue par effet Joule le long de la ligne de transport. La solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension et de l'abaisser à l'utilisation. Les deux opérations de changement de niveau de tension sont effectuées par des transformateurs.

Ces sous-systèmes sont formés d'un ensemble de transformateurs (élevateurs ou abaisseurs) placé en série dont la capacité ou bien la performance totale est la somme des différentes versions et type de transformateur.

I.4- Description des réseaux électriques

Les réseaux électriques (figure. I.2) présentent des caractéristiques spécifiques propres à la technologie actuelle de l'industrie électrique et indépendante des formes institutionnelles d'organisation (le monopole ou la concurrence).

le choix et la conception des formes organisationnelle et les performances inhérentes dépendent de la manière dont ses caractéristiques spécifiques sont prises en compte.

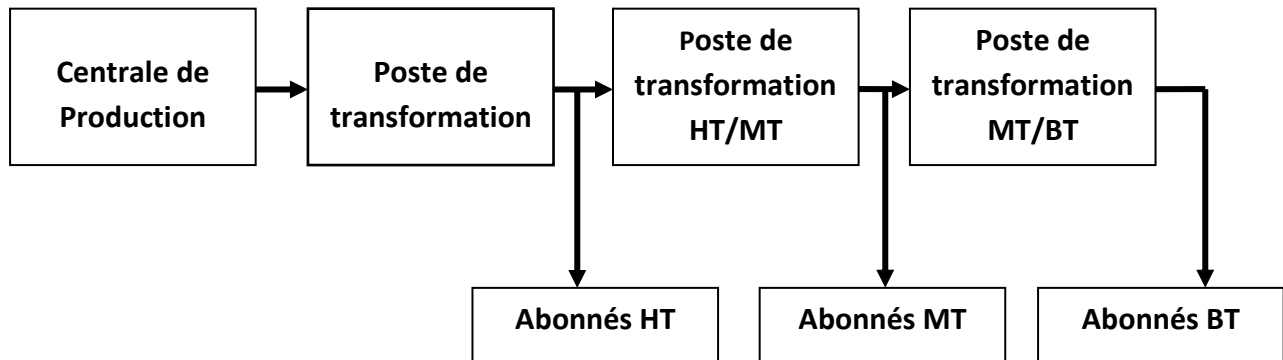


Figure I.2. Schéma d'un réseau électrique [3]

I.5- Les niveaux de tensions [4]

La nouvelle norme en vigueur en Algérie (Sonelgaz) définit les niveaux de tension en courant alternatif et continue comme suit :

Domaine De Tension		Valeur de la tension Nominal (U en Volts)	
		Courant Alternatif	Courant Continue
Très Basse Tension (TBT)		$U_n \leq 50$	$U_n \leq 120$
Basse Tension (BT)	BTA	$50 < U_n \leq 500$	$120 < U_n \leq 750$
	BTB	$500 < U_n \leq 1000$	$750 < U_n \leq 1500$
Haute Tension (HT)	HTA	$1000 < U_n \leq 50000$	$1500 < U_n \leq 75000$
	HTB	$U_n > 50000$	$U_n > 75000$

Tableau I-1 Des Domaines de tension en Algérie

Domaine de tension		Tension	Valeurs usuelles
Basse tension	BT	$100 < U \leq 1000 \text{ V}$	400 – 690 – 1000 V
Moyenne tension	MT	$1 < U \leq 35 \text{ kV}$	3.3 – 6.6 – 11 – 22 – 33 Kv
Haute tension	HT	$35 < U \leq 230 \text{ kV}$	45 – 66 – 110 – 132 – 150 – 220 kV

Tableau I-2 La norme CEI (Commission Electrotechnique Internationale)

I.6- Structure et fonction du système électrique

Le réseau électrique est hiérarchisé en trois parties dont les fonctions actuelles sont très différentes. Tout d'abord, le réseau de transport a pour rôle de transporter l'énergie en très haute tension depuis les centres de productions jusqu'aux premières zones de consommation. Le réseau de répartition alimente directement les gros consommateurs industriels puis achemine l'énergie jusqu'aux réseaux de distribution chargés d'approvisionner les consommateurs moyenne et basse tension

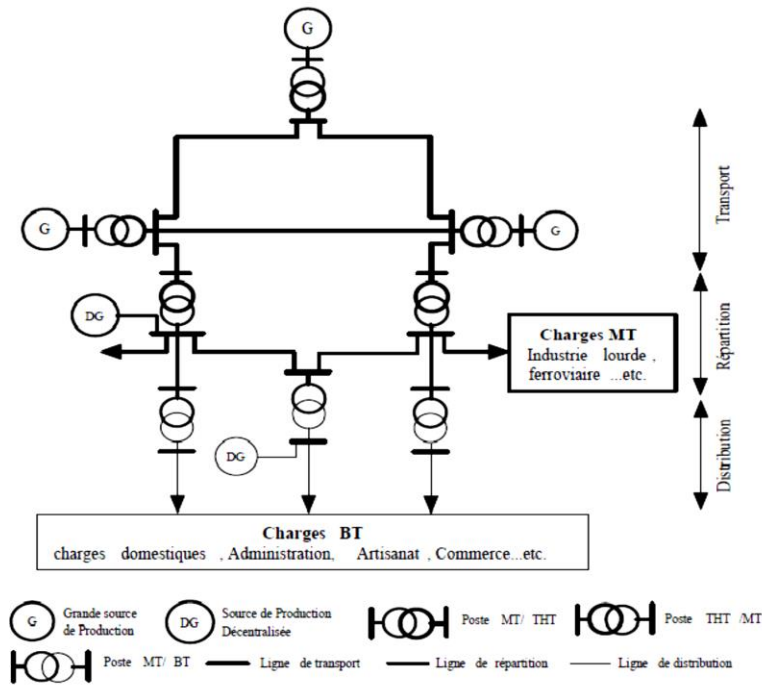


Figure I.3 Vue globale du réseau électrique [5]

I.6.1- Réseau de transport

Un alternateur produit la puissance électrique sous moyenne tension (12 à 15 kV), et elle est injectée dans le réseau de transport à travers des postes de transformation pour être transmise sous haute ou très haute tension afin de réduire les pertes dans les lignes. Le niveau de la tension de transport varie selon les distances et les puissances transportées, plus les distances sont grandes plus la tension doit être élevée, la même chose pour la puissance. Par exemple, le réseau de transport en Algérie utilise une tension de 220 kV (voir 400 kV pour certaines lignes dans le sud notamment), le réseau européen utilise 400 kV, et le réseau nord-américain 735 kV

I.6.2- Réseau de répartition

Le réseau de répartition prend sa source dans le réseau de transport à partir des postes d'interconnexion THT/HT(MT) et sert à fournir les gros consommateurs industriels sous haute ou moyenne tension, et à répartir les puissances dans différentes régions rurales ou urbaines. Ce type de réseau utilise des typiques 60 et 30 kV.

I.6.3- Réseau de distribution

La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400V), grâce à des postes de transformation MT/BT

I.7- Architecture des réseaux électriques

La conception du réseau électrique implique des choix, en termes de coût et d'architecture, pour permettre une desserte maximale, tout en tenant rigoureusement compte des critères techniques et économiques, et en cherchant à garantir la sécurité et la continuité du service électrique. On distingue trois types d'architecture de réseau :

I.7.1- Les réseaux arborescents ou en antenne[6]

Ces réseaux sont constitués de plusieurs artères se ramifiant, mais sans jamais retrouver de point commun. Lorsqu'un défaut survient, l'ensemble des clients en aval sont coupés.

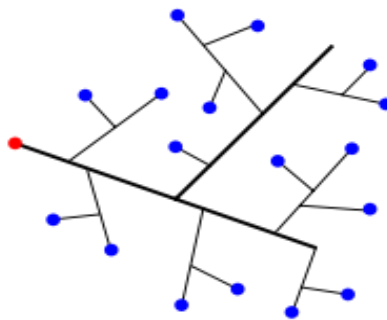


Figure I.4. Un réseau arborescent

I.7.2- Les réseaux radiale ou bouclés [6]

Les charges sont alimentées par différentes sources pouvant servir immédiatement de secours en cas d'indisponibilité d'une source. Ils s'appliquent principalement aux réseaux de transports et de répartition.



Figure I.5. Un réseau radiale

I.7.3- Les réseaux maillés [6]

Les réseaux maillés sont des réseaux où toutes les lignes sont bouclées. Les postes sont reliés entre eux par de nombreuses lignes, apportant une grande sécurité d'alimentation.

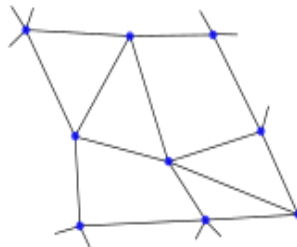


Figure I.6. Un réseau maillé

I.8. Les postes d'interconnexion et de transformation

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

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

.

I.8.1 Poste de transformation HTA/BT [8]

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

I.8.2 Postes sources [8]

- ✓ Les postes HTB/HTA, appelés aussi les postes sources, en général alimentés par le réseau de répartition à 63 kV ou 90 kV (quelquefois directement par le réseau de transport à 225 kV) constituent l'interface entre les réseaux de transport/répartition HTB et les réseaux de distribution HTA (figure.1.7).
Leurs fonctions essentielles sont :
- ✓ la transformation de la tension du niveau HTB vers le niveau HTA, depuis une ou plusieurs lignes HTB et par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs transformateurs HTB/HTA ;
- ✓ la répartition de l'énergie électrique avec un ou plusieurs tableaux de répartition HTA,
- ✓ la protection du réseau HTA par des disjoncteurs actionnés par différents types de protections définies selon le plan de protection retenu sur le réseau .



Figure I.7 : Poste HTB/HTA Oued EL Alanda [6]

I.9- Lignes aériennes et câbles souterrains

Le transport de l'énergie électrique se fait par des conducteurs tels que les lignes aériennes et les câbles souterrains. Malgré leurs simplicités apparentes, les conducteurs cachent des propriétés importantes qui influent grandement sur le transport d'énergie électrique.

I.9.1- Réseaux HTA aériens

Dans des zones géographiques de faible densité de charge (zones rurales, petites villes ou villages), on utilise majoritairement des lignes aériennes. Ils sont constitués par des lignes à trois conducteurs – trois phases – ou quatre conducteurs – trois phases et neutre, selon que le neutre est distribué ou non, et par des antennes triphasées ou monophasées à deux ou à un seul conducteur. En France, on n'utilise que des lignes triphasées à trois conducteurs (le neutre n'est pas distribué) .

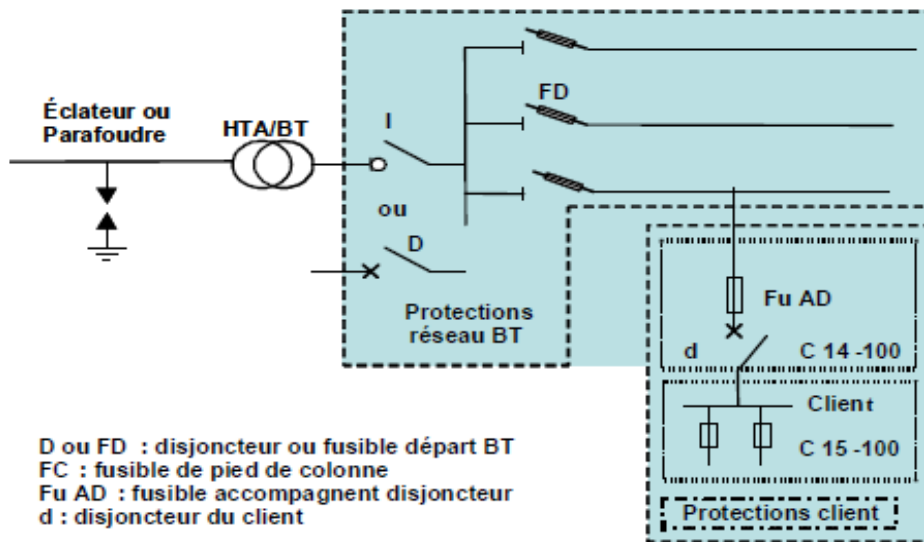


Figure I.8 : Réseau de type aérien

I.9.2 Réseaux HTA souterrains [5]

Les zones urbaines ou mixtes à forte densité de charge sont alimentées par des câbles HTA enterrés en double dérivation ou en coupure d'artère. En double dérivation, les postes HTA/BT sont normalement alimentés par le câble de

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

travail(CT), le câble de secours (CS) permet de garantir une bonne continuité de service en cas de défaut.

La technique en coupure d'artère est moins couteuse que la précédente et permet une isolation rapide des défauts, mais nécessite un temps d'intervention plus long.

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

I.10- Avantages et inconvénients respectifs des lignes aériennes et câbles Souterrains :

I.10.1- Lignes aériennes

Avantage :

- Les lignes aériennes sont moins coûteuses,
- Permettent une surveillance aisée de leur état et un repérage facile des accidents et défauts,
- Les lignes aériennes sont beaucoup plus rapides à réparer,
- Peuvent être surchargées en intensité de courant sans trop de danger.

Inconvénients :

- Les lignes aériennes sont soumises plus fréquemment que les câbles souterrains à des interruptions de courte durée,
- La génération des champs électromagnétiques,
- Sont susceptibles de produire des perturbations radioélectriques,
- La rupture de leurs conducteurs est susceptible de présenter des dangers pour l'environnement,
- Les champs électriques et magnétiques peuvent exercer une influence néfaste sur la santé.

Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques

I.10.2. Câbles souterrains

Avantage :

- Le transit et la tenue de tension ;
- Elle présente un impact visuel moindre que la ligne aérienne,
- Une moindre sensibilité aux variations climatique,
- Les pertes par «effet Joule» sont plus faibles dans la ligne souterraine d'un facteur 2 ou 3 environ,
- Génèrent moins de champs électromagnétiques.

Inconvénients :

- Le principal inconvénient de la liaison souterraine est son coût extrêmement élevé,
- La liaison souterraine présente une impédance trois fois moindre que celle d'une ligne aérienne,
- Un impact environnemental non négligeable (Les travaux de construction d'une liaison souterraine),

Le terrain au-dessus de l '**ouvrage** doit être laissé vierge de toute plantation d'arbres et d'arbustes et de toute habitation après la mise en service,

- Les câbles souterrains sont beaucoup plus longs à réparer que les lignes aériennes.

I.11- Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vision globale sur les réseaux électriques et ses différents composants nécessaires (Structure et fonction du système électrique, poste de transformation, architecture des réseaux électriques...).

Le but premier d'un réseau électrique est de pouvoir satisfaire la demande des consommateurs.

Comme l'énergie électrique ne peut être stockée, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité : $\text{Production} = \text{consommation} + \text{pertes}$.

Chapitre II

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

II.1 Introduction

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

II.1.1. Les paramètres longitudinaux

II.1.1.1. la résistance de la ligne

Les résistances a courant continue d'un conducteur homogène de longueur l en (m) , de section uniforme s (mm²) et de résistivité ρ a 20 °C ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) est donnée par la Formule :

$$R = \rho \frac{l}{s} \quad (\Omega / \text{km}) \quad (II.1)$$

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

a- Effet de spirilage de conducteur

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

b- Effet de température

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

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

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

- ♦ t_1 et t_2 sont les températures en °C à l'Etat initiale et à l'état final du conducteur
- ♦ R_1 et R_2 sont les résistances du conducteur respectivement aux températures t_1 et t_2
- ♦ T est une température paramétrique en °C lie à la nature du matériau du conducteur.

T(°C)	Nature de conducteur
234.5	Pour le cuivre recuit ayant 100% de conductivité
241	Pour le cuivre étiré ayant 97.3% de la conductivité du cuivre recuit
228	Pour l'aluminium étiré (et ses alliages) ayant 61% de la conductivité du reçu

Tableau. II-1: les températures de certain conducteur

c- Effet pelliculaire ou effet kelvin

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

La densité de courant va en croissant vers la périphérie du conducteur ce phénomène appelle "effet pelliculaire" ou "effet kelvin" Ou "effet de peau", modifie la valeur de la résistance et l'inductance du conducteur.

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

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

d : diamètre de conducteur en cm.

f : fréquence du réseau en Hz

ρ : résistivité du métal ($\Omega \cdot mm^2/km$)

II.1.1.2. Inductance de la ligne

II.1.1.2.1. Définition

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

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

$$e = -\frac{d}{dt} = -L \frac{said}{dt} \quad (II.4)$$

II.1.1.2.2. Inductance d'un conducteurs

a. Inductance d'un conducteur due au flux intérieur

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

D'après la loi de Maxwell, l'intégrale linéique de l'intensité de champ magnétique est égale au courant entouré [12]

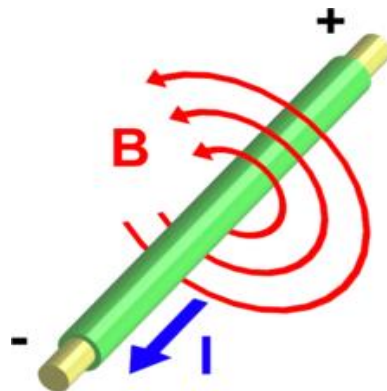


Figure II.1 : Champ magnétique dans la conducteur

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

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

$$H2\pi X = I_x$$

$$H = \frac{I_x}{2\pi X} (AT/m)$$

$$B0 = \mu H (web/m^2)$$

$$B = \mu_0 \frac{I_x}{2\pi X} \quad (II.5)$$

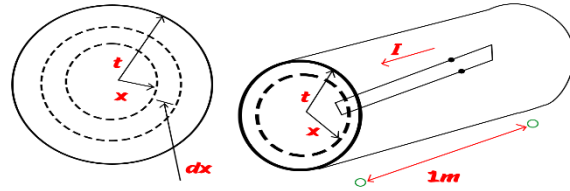


Figure. II.2 : Un conducteur massif [12]

Le flux travers une section d'épaisseur dx et dz longueur de lm est :

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

Supposant que la densité du courant est uniforme :

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

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

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

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

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

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

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

$$\Psi_{int} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} I (\text{wb. t/m}) \quad (II.6)$$

μ_0 : ($\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$: La permittivité du vide ou de l'air

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

b. Inductance d'un conducteur due au flux extérieur

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

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

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

$$H = \frac{1}{2\pi x} (At/m) \quad x > r$$

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

$$B = \mu_0 \frac{1}{2\pi x}$$

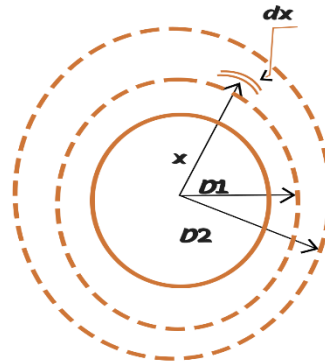


Figure. II.3 : Conducteur de section circulaire plein [12]

Le flux à travers un cylindre d'épaisseur et de longueur de l m est :

$$d\Phi = B \cdot ds = B \cdot dx \cdot l$$

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

$$d\Phi = 2 \cdot 10^{-7} I \frac{dx}{x} \quad (II.8)$$

Le flux crée entre deux contours $D1$ et $D2$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

$$\Psi_{12} = 2.10^{-7} I \ln \frac{D_2}{D_1} (Wb.t/m)$$

$$Si D_1 = r \text{ et } D_2 = D$$

$$\Psi_{ext} = 2.10^{-7} I \ln \frac{D}{r} \quad (II.9)$$

L'inductance d'un conducteur due au flux extérieure

$$L_{ext} = 2.10^{-7} \ln \frac{D}{r} (H/m) \quad (II.10)$$

C. L'inductance d'un conducteur due au flux total

Le flux de liaison total est :

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

$$\Psi = \frac{1}{2} \cdot 10^{-7} I + 2.10^{-7} \ln \frac{D}{r}$$

Sachant que:

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

$$\Psi = 2.10^{-7} I \left[\ln e^{\frac{1}{4}} + \ln \frac{D}{r} \right]$$

$$\Psi = 2.10^{-7} I \ln \frac{D}{r e^{\frac{-1}{4}}} \quad (II.11)$$

En posant:

$$r e^{\frac{-1}{4}} = r$$

Le flux crée par un conducteur est

$$\Psi = 2.10^{-7} I \ln \frac{D}{r} (wb.t/m) \quad (II.12)$$

L'inductance du conducteur est:

$$L = \frac{\Psi}{I} = 2.10^{-7} \ln \frac{D}{r} (H/m) \quad (II.13)$$

II.1.1.2.3 Inductance d'un ensemble de n conducteur en parallèles parcourus chacun par un courant

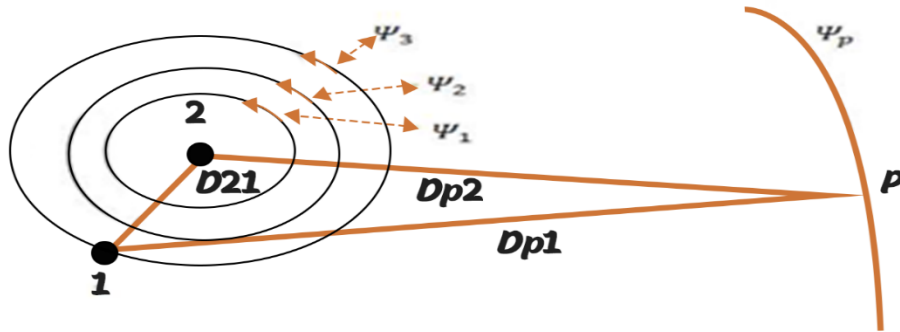


Figure.II.4:flux d'un ensemble de conducteurs en parallèles [12]

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

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

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

Les ligne ψ_1 du flux, n'en toure pas le conducteur 1

Les lignes et du flux crée par le conducteur 2 entourent le conducteur 1

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

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

$$\Psi_{12} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 L n \frac{D_{12}}{D_{12}}$$

De la même manière, le flux crée par le conducteur 3 autour du conducteur 1 est

$$\Psi_{13} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 L n \frac{D_{p3}}{D_{13}}$$

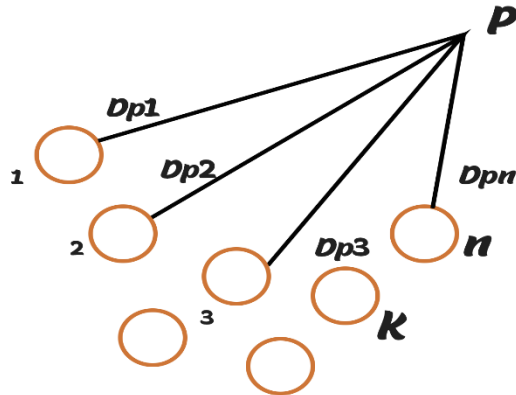
$$\Psi_{1n} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 L n \frac{D_{pn}}{D_{1n}} \quad (II.14)$$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

Le flux total crée autour du conducteur 1 a un point p distant de du centre du conducteur 1 est :

$$\Psi_1 = \Psi_{11} + \Psi_{12} + \dots + \Psi_{1n}$$

$$\Psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{1j}}$$



D'une manière générale , le flux total crée autour d'un conducteur k a un point p disant de . du centre du conducteur k est :

$$\Psi_k = \Psi_{k1} + \Psi_{k2} + \dots + \Psi_{kj} + \dots + \Psi_{kn}$$

Est le flux erée par le conducteur j autour de k , c'est le flux mutuel

$$\Psi_K = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{kj}}$$

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

$D_{kk} = r_k$ est le rayon du conducteur k .

$$\Psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \left[\sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} + \sum_{j=1}^n I_j \ln D_{pj} \right]$$

$$I_n = -(I_1 + I_2 + \dots + I_{n+1}) = \sum_{j=1}^{n-1} I_j \quad (II.15)$$

D'où

$$\Psi_k = 2 \cdot 10^{-7} \left[\sum_{j=1}^{n-1} I_j \ln \frac{1}{D_{kj}} + \sum_{j=1}^{n-1} I_j \ln \frac{D_{pj}}{D_{pn}} \right] \quad (II.16)$$

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

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

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

$$\Psi_K = 2 \cdot 10^{-7} \sum_{j=1}^n I_j \ln \frac{1}{D_{Kj}} \text{ (Wb.t/m)} \quad (II.17)$$

II.1.1.2.4. Rayon moyen géométrique (RMG) des conducteurs toronnés

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

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

Type	$g_{11} = \text{RMG}$
Conducteur de section circulaire pleine	$0.4394 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 7 brins	$0.4642 S^{\frac{1}{2}}$
Corde à 13 brins sans âme centrale	$0.4750 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 19 brins	$0.4902 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 37 brins	$0.4982 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 61 brins	$0.5020 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 91 brins	$0.5038 S^{\frac{1}{2}}$
Corde circulaire à 127 brins	$0.5046 S^{\frac{1}{2}}$

II.1.1.2.5. Inductance des lignes triphasées [11]

a. Disposition triangle équilatéral (espacements égaux)

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

Les courants dans les conducteurs satisfont la relation :

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0$$

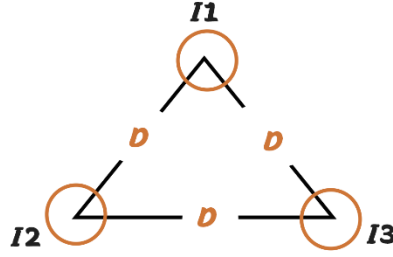


Figure. II.5 : Disposition des conducteurs en triangle équilatéral

En appliquant la relation (II.18), on peut déterminer le flux du conducteur 1 du au courants

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

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

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

On à :

$$I_1 = -(I_2 + I_3)$$

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

$$\psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{D}{r} \quad (\text{II.18})$$

L'inductance du conducteur 1 est :

$$L_1 = \frac{\psi_1}{I_1} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r} \text{ (D/m)} \quad (\text{II.19})$$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

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

L'inductance linéique par phase de la ligne est :

$$L = 2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{D}{g_{11}}$$

est le rayon moyen géométrique du conducteur (RMG).

b. Disposition quelconque

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

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

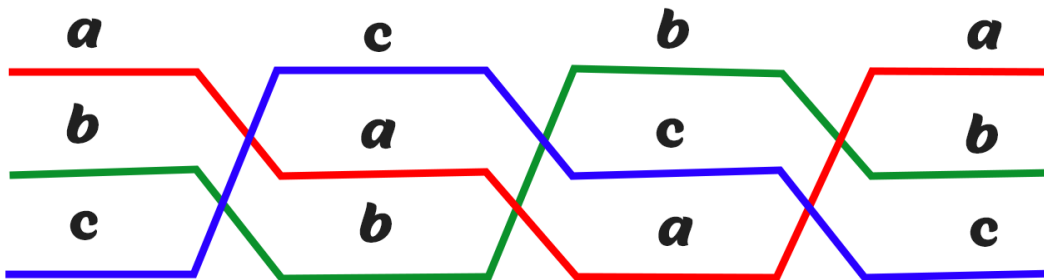


Figure. II.6 : Transposition de la ligne

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

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

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

En appliquant la relation on peut déterminer le flux du conducteur 1 du aux Courants et dans les positions I, II et III.

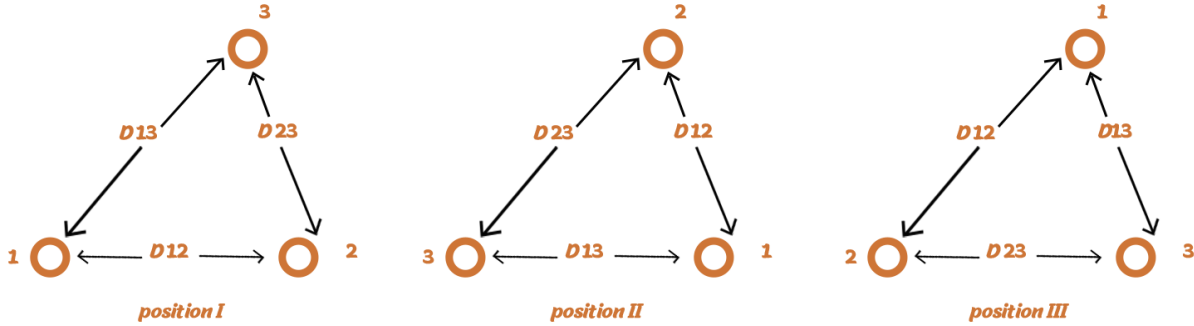


Figure. II.7 : Liaisons triphasé à disposition quelconque

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

Le flux moyen de la phase 1 on utilise les équation :

$$\Psi_1 = \frac{\Psi_{1I} + \Psi_{2II} + \Psi_{3III}}{3}$$

$$\Psi_1 = \frac{2}{3} \cdot 10^{-7} \left(3 \cdot I_1 \ln \frac{1}{r} + (I_2 + I_3) \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} \right)$$

Comme

$$I_1 = -(I_2 + I_3)$$

$$\Psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_1 \ln \frac{1}{r} - I_1 \ln \frac{1}{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}} \right)$$

$$\Psi_1 = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{r} \quad (II.20)$$

L' Inductance linéique d'une de la ligne est :

$$L = \frac{\Psi_1}{I}$$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

$$L = 2.10^{-7} Ln \frac{\sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}}}{g_{11}} (H/m)$$

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

Donc

$$L = 2.10^{-7} Ln \frac{D_{\text{eq}}}{g_{11}} (H/m) \quad (\text{II.21})$$

II.1.1.2.6. Inductance des lignes triphasées avec des conducteurs en faisceaux

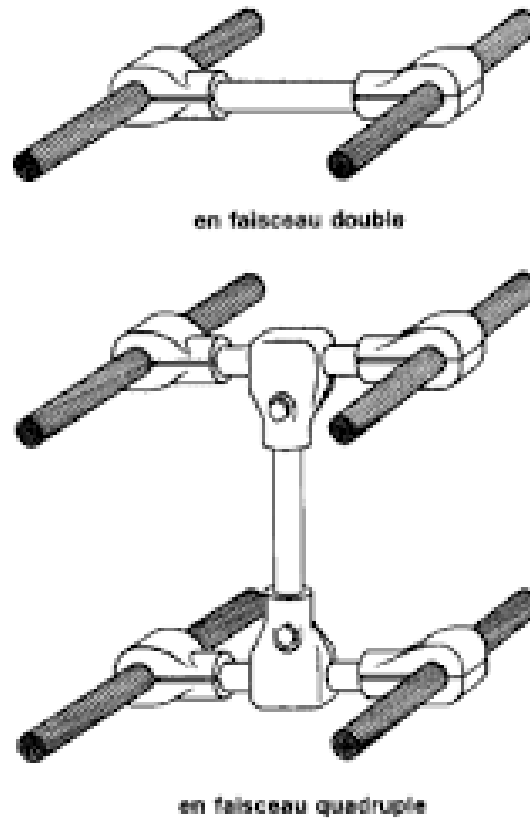


Figure. II.8 : Conducteurs en faisceaux

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

$$L = 2.10^{-7} Ln \frac{D_{\text{eq}}}{g_{11}} (H/m)$$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

Avec

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

g_{11} Rayon moyen géométrique du faisceau

G_{11} Rayon moyen géométrique d'une corde

Γ_T n Nombre de corde dans un faisceau.

Rayon du cercle passant par les centres des cordes.

II.1.1.2.4. Inductance linéique d une ligne triphasée à deux ternes

$$L' = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{eq} \cdot D_n}{g_{11} \cdot D_n} (H/m) \quad (II.22)$$

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

$$D_n = \sqrt[3]{D_{Ab} D_{AC} D_{Bc}}$$

II.1.2. Les paramètres transversaux

II.1.2.1. Conductance

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

II.1.2.2. La capacité de la ligne

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

II.1.2.2.1. Capacité d une ligne monophasée

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

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

$$V_{xn} = V_{yn} = \frac{V_{xy}}{2} \quad (II.23)$$

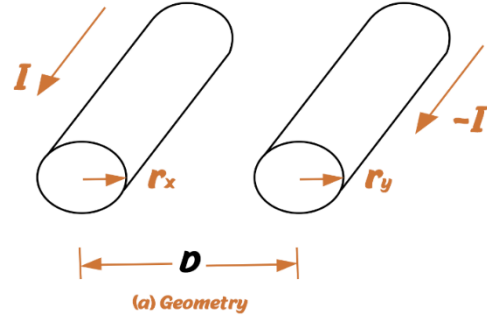


Figure. II.9 : Liaison monophasée

II.1.2.2.2 Capacité d'une ligne triphasée

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

On montre les trois conducteurs A, B et C de la ligne triphasée de transport aérienne ayant des charges Q_A , Q_B et Q_C par mètre de longueur, respectivement. Que les conducteurs soient équidistants (mètres d) de l'autre. Nous allons trouver la capacité de conducteur de ligne à neutre dans cette ligne espacés symétriquement. En se référant à la (Figure II.10)

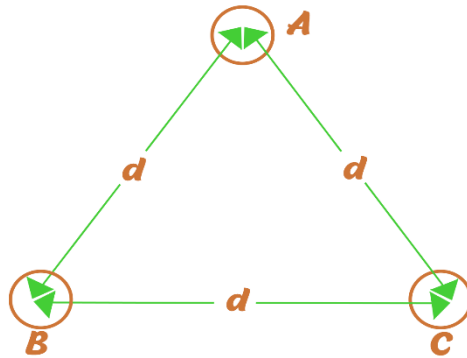


Figure. II.10: Liaison triphasée avec espacement de phase égal

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

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

$$V_{ab} = \frac{1}{2 \times \pi \times \epsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_b \ln \frac{r}{D} \right]$$

Chapitre II : caractéristique de ligne électrique

$$\begin{aligned}
 V_{ac} &= \frac{1}{2 \times \pi \times \varepsilon} \left[q_a \ln \frac{D}{r} + q_c \ln \frac{r}{D} \right] \\
 V_{an} &= \frac{q_a \ln \frac{D}{r}}{2 \times \pi \times \varepsilon} \\
 C_{an} &= \frac{2 \times \pi \times \varepsilon}{\ln \frac{D}{r}} (F/m) \quad (II.24)
 \end{aligned}$$

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

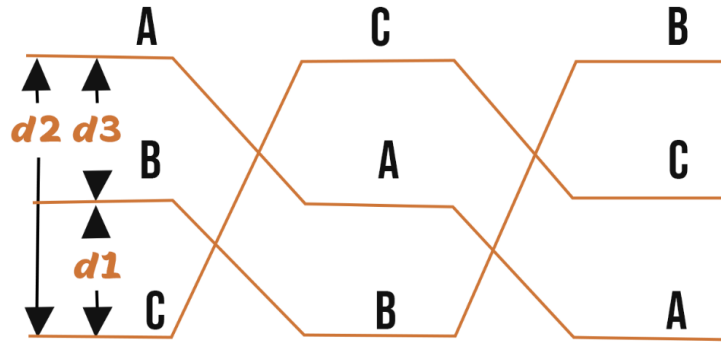


Figure. II.11 : Liaison triphasée avec espacement de phase inégal

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

$$\begin{aligned}
 V_{ab} &= \frac{1}{2 \times \pi \times \varepsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_b \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \\
 V_{ac} &= \frac{1}{2 \times \pi \times \varepsilon} \left[q_a \ln \frac{D_{eq}}{r} + q_c \ln \frac{r}{D_{eq}} \right] \\
 V_{an} &= \frac{q_a \ln \frac{D_{eq}}{r}}{2 \times \pi \times \varepsilon} \\
 C_{an} &= \frac{2 \times \pi \times \varepsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{r}} (F/M) \quad (II.25) \\
 \text{Ou } D_{eq} &= \sqrt[3]{D_{ab} D_{bc} D_{ca}}
 \end{aligned}$$

II.1.2.2.3. capacité des conducteurs en faisceaux

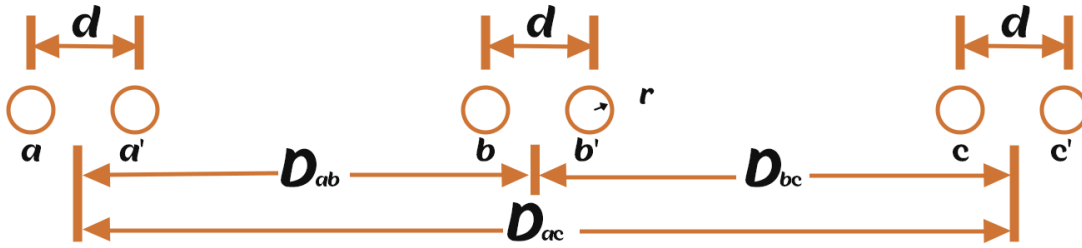


Figure. II.12 : Ligne triphasée avec deux conducteurs en faisceaux

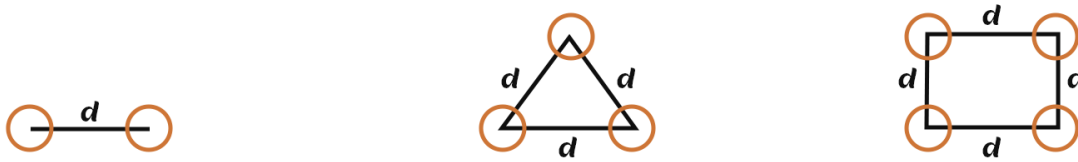


Figure. II.13 : La configuration des conducteurs en faisceaux

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

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

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

$$C_{an} = \frac{2 \times \pi \times \epsilon}{\ln \frac{D_{eq}}{D_{sc}}} \quad (F/M) \quad (II.26)$$

conducteurs en faisceaux

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

Pour quatre conducteurs en faisceaux.

$$D_{sc} = 1.091 \times \sqrt[4]{rd^3}$$

II.1.2.2.4. Effet de la terre sur la capacité de la ligne triphasée

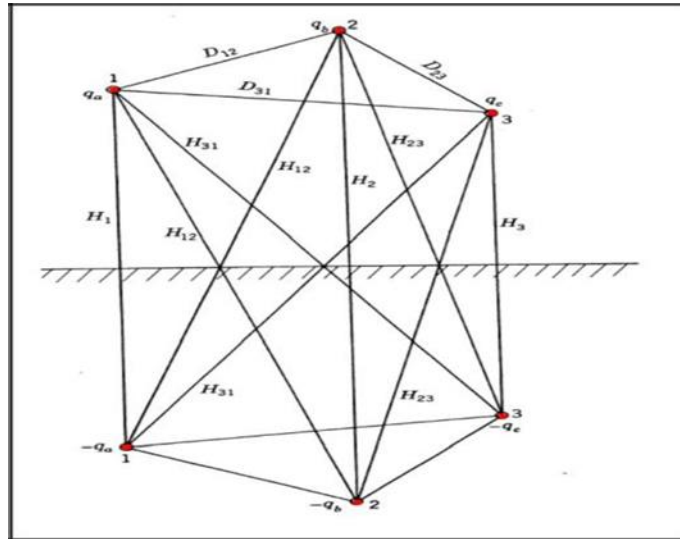


Figure. II.14 effet partielle à la terre

$$C_n = \frac{2\pi k}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) - \ln\left(\frac{\sqrt[3]{H_{13}H_{23}H_{31}}}{\sqrt[3]{H_1H_2H_3}}\right)} \quad (II.27)$$

II.2.Conclusion

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

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

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

Chapitre III

III.1 Introduction

Le dimensionnement d'une ligne aérienne dans cadre d'un régime permanent se fait en deux parties : choix de la section du conducteur et choix du gabarit des pylônes.

Le choix de la section du conducteur dépend de considérations électriques et économiques tandis que le choix du gabarit des pylônes fait intervenir plutôt les aspects mécaniques. Ces considérations ont déjà été abordées dans le cadre du calcul d'une liaison souterraine.

Afin de choisir la section du câble, nous devons vérifier trois choses : Quel est le courant nominal qui circule dans le câble ?

Supporte-t-il la puissance de court-circuit ?

La chute de tension est-elle bien inférieure à la limite ?

A partir d'un certain niveau de tension, nous devons aussi vérifier que l'effet couronne ne devient pas trop important. Nous aboutissons ainsi à une section techniquement optimale mais non normalisée. Il faut décider donc de prendre une section normalisée supérieure. Le calcul des différents coûts de la ligne nous aide à choisir celle qui convient le mieux.

En réalité, il faudrait optimiser le coût global (câble + pylône) en tenant compte des contraintes techniques et des pertes. C'est alors un calcul plus complexe auquel nous ajoutons le choix du niveau de tension et la longueur de portée moyenne. Dans ce cas, nous avons recours à une simulation par ordinateur.

Très souvent, le niveau de tension est imposé¹ et les longueurs de portée également (emplacement des pylônes imposé par la disponibilité du terrain). La démarche proposée permettra à l'étudiant de limiter le nombre de calculs à effectuer tout en incluant la majorité des critères et contraintes à respecter .

III.2 Rappels:

Les lignes assurent la continuité électrique entre deux nœuds du réseau et peuvent être classées selon les types suivants:

- lignes de grand transport : entre un centre de production et un centre de consommation ou un grand poste d'interconnexion;
- Lignes d'interconnexion : entre plusieurs régions ou plusieurs pays (secours mutuel);
- Lignes de répartition : entre grands postes et petits postes ou gros clients nationaux;
- Lignes de distribution : vers les consommateurs BT.

Les différentes classes de tension en courant alternatif sont définies, par le RGIE, de la manière décrite dans le tableau III.1 (unités : Volts).

Tableau III.1 : Classification des niveaux de tension

Très basse tension		$U \leq 50$
Basse tension	1 ^{ère} catégorie	$50 < U \leq 500$
	2 ^{ème} catégorie	$500 < U \leq 1000$
Haute tension	1 ^{ère} catégorie	$1000 < U \leq 50\,000$
	2 ^{ème} catégorie	$U > 50\,000$

Les principaux composants des lignes aériennes sont:

- Les conducteurs (Phases + câble(s) de garde);
- Les isolateurs;
- Le pylône;
- Les fondations;
- Autres accessoires (pinces de suspension, jonctions de connecteurs, amortisseurs , dynamiques....).

Concernant les portées des lignes, étant donné la possible irrégularité des distances entre pylônes, nous définissons les longueurs suivantes:

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

-Portée basique ou normale = La plus économique;

-Portée moyenne = Moyenne arithmétique des différentes portées ;

-Portée équivalente : $L_{eq} = \sqrt{\sum_{i=1}^n l / \sum_{i=1}^n li}$ Cette valeur se rapproche généralement de la Portée moyenne lorsque le nombre de portées augmente. C'est sur cette valeur que se calcule la tension horizontale à appliquer au canton -

Portée « de vent » = La somme des deux demi portées adjacentes au pylône. Elle correspond à la portée à considérer pour le calcul des efforts en tête du pylône;

-Portée « de poids » = La somme des distances entre le pylône et les points les plus bas des deux portées adjacentes. Cette valeur est utilisée pour déterminer le poids mort que représentent les conducteurs sur le support.

III.3 Les éléments des lignes électriques

III.3.1 Les conducteurs

Au niveau mécanique, le calcul de la résistance des conducteurs est soumis aux réglementations internationales.

Les conditions climatiques doivent être connues (givre, températures, intensité du vent,...).

Ce paragraphe explicite les critères électriques permettant le dimensionnement de la section des conducteurs des lignes aériennes. Ils sont fort similaires à ceux associés aux câbles, cfr.

a) Critère de courant nominal

Nous devons vérifier que le câble supporte le courant nominal sur toute sa durée de vie.

Vu P départ et a donnés, nous déterminons tout d'abord la puissance circulant dans le câble après les T années d'utilisation par la relation (III.1)

$$P_T = P_{départ} \cdot (1 + a)^T \quad [MW] \quad (III.1)$$

Nous en déduisons le courant circulant alors dans chaque phase du câble :

$$I_{NT} = \frac{P_T}{\sqrt{3}U \cos(\varphi)} \quad [A]$$

b) Critère du courant de court-circuit

Nous déduisons directement ce courant de la formule donnant la puissance de court-circuit:

$$I_{CC} = \frac{S_{CC}}{\sqrt{3}.u} \quad (\text{III.2})$$

La puissance de court-circuit S_{cc} est fonction du réseau environnant la ligne étudiée, mais du point de vue dimensionnement, nous retenons souvent les valeurs suivantes en fonction des principales tensions caractéristiques

Tension phase/phase U [kV]	Puissance de court-circuit S_{cc} [MVA]	Courant de court-circuit I_{cc} [kA]
150	8000	30,8
70	2500	20,6
15	350	13,5
6	120	11,6

Tableau III.2 : Puissance et courant de court-circuit

Afin de trouver la section minimum permettant de supporter ce courant durant le temps t_{cc} , nous disposons de la formule suivante, où a est un facteur dépendant du type de matériau constituant le câble:

$$S = \frac{I_{cc}\sqrt{t_{cc}}}{\sqrt{a}U} \quad [mm^2] \quad (\text{III.3})$$

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

Cette nouvelle valeur du courant conduit alors au choix d'une nouvelle section normalisée (celle qui lui est juste supérieure).

Remarques :

- le cuivre est toujours supérieur à l'aluminium pour une même section, étant donné sa meilleure capacité à évacuer la chaleur ;
- les valeurs du paramètre a sont les suivantes : $a = 105,3$ pour le cuivre, $a = 55,07$ pour l'aluminium et $a = 61,98$ pour l'AMS.

c) Critère de la chute de tension

Un rapide calcul nous donne la formule de la chute de tension:

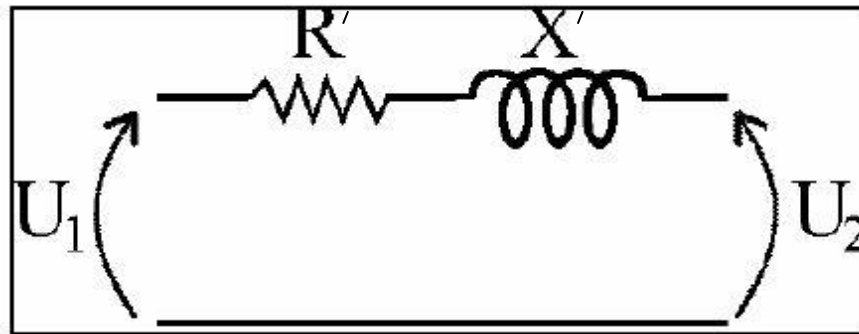


Figure III.1: Modèle réduit de la liaison

$$\frac{\Delta U}{U} \simeq \sqrt{3} \cdot \frac{I_N}{U_N} \cdot (R'_{70^\circ C} \cdot 1 \cdot \cos(\Phi) + X' \cdot 1 \cdot \sin(\Phi)) \quad (\text{III.4})$$

$$\text{Ou } \Delta U = |U_2| - |U_1| \neq |U_2 - U_1|$$

Nous pouvons alors déterminer la résistance maximale de la ligne à 20°C.

Dans le cas des lignes, nous négligeons les effets capacitifs car les valeurs sont approximativement 50 fois plus faibles pour les lignes que pour les câbles. Pour l'impédance longitudinale, nous prendrons, généralement, comme valeur de départ : 0.4Ω/Km.

d) Critère économique

La forme de la fonction coût de conducteur adoptée est la suivante :

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

$$T_1(S) = A + B + S + C/S \quad [\text{€}]$$

où A est relatif aux fixes (installation, pièces et accessoires, etc.) [€] , B.S

représente la partie du coût du câble qui est proportionnelle a la section 'S' [€/mm²] et C/S reflète les coût d'actualisation et des pertes [€.mm²]. Les pertes sont inversement proportionnelles à la section car une plus grosse section entraîne des pertes Joule moins élevées.

Cette fonction est loin d'être parfaite mais, dans le cadre d'une première approche du problème, elle est suffisante.

$$C = 3 \cdot \rho \cdot l \cdot I^2 \quad \text{N.début de vie} \cdot \text{N.p.f} \quad [\text{€.mm}^2]$$

Le facteur '3' permet de tenir compte des 3 phases ;

P = résistivité du matériau conducteur (généralement AMS) à 75° [Ω/mm]

l = longueur de la ligne (en millimètres) ;

$I_{N,\text{début de vie}}$ = courant nominal en début de vie de la ligne (en ampères) ;

N = nbre d'heures d'utilisation équivalant à la pleine charge au niveau des pertes [h/an];

P = prix du kWh de pertes , coût des pertes par kWh [€/W.h]

$$f = \frac{Q}{1 + \frac{i}{100}} \quad \text{ou} \quad \frac{1 - r^T}{1 - r} \quad \text{avec} \quad r = \frac{\left(1 + \frac{a}{100}\right) \cdot 2 \cdot \left(1 + \frac{b}{100}\right)}{\left(1 + \frac{i}{100}\right)} \quad (\text{III.5})$$

a section optimale économique (SOE) est celle qui annule la dérivée de T1(S). Vu la forme de T1(S), nous pouvons la déterminer directement :

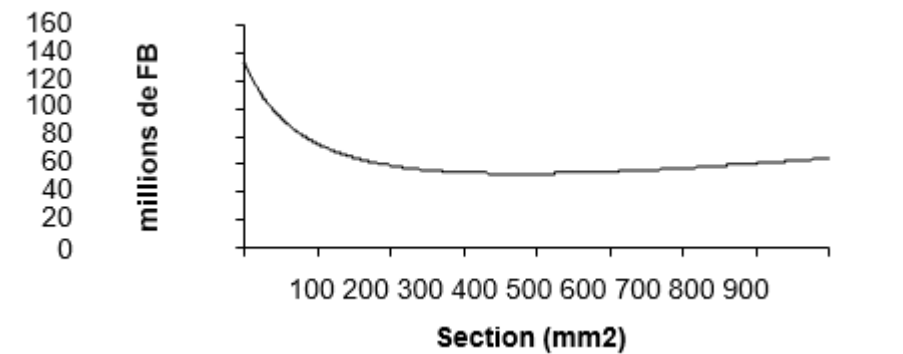


Figure II.2 Fonction coût du conducteur

III-4 Les Supports

Nous devons d'abord déterminer le poids équivalent et l'angle d'inclinaison des chaînes de suspension des câbles en s'appuyant sur deux hypothèses 'H1' et 'H2' (respectivement été et hiver).

Nous déterminerons ensuite la portée critique que nous comparerons avec la portée moyenne.

En fonction du résultat de cette comparaison, nous déterminerons, parmi 'H1' et 'H2', quelles sont les conditions météorologiques qui imposent les contraintes mécaniques les plus importantes sur notre portée. Nous en tirerons alors la constante « a » de l'équation d'état (dite de Blondel). Une fois cette constante obtenue, nous pourrions déterminer la tension mécanique dans les câbles quel que soient les paramètres météorologiques.

Nous déterminerons ensuite la flèche maximale et la hauteur d'accrochage des conducteurs, la longueur de la chaîne de suspension et les distances phase/phase et phase/neutre.

L'étape suivante consistera à calculer les gabarits des pylônes d'alignement, d'angle, III.3 et III.4. Ils se différencient principalement, entre ces deux figures, par la position verticale des conducteurs de puissance : dans la seconde figure, ces lignes sont suspendues à une hauteur qui peut être considérée relativement constante. [13]

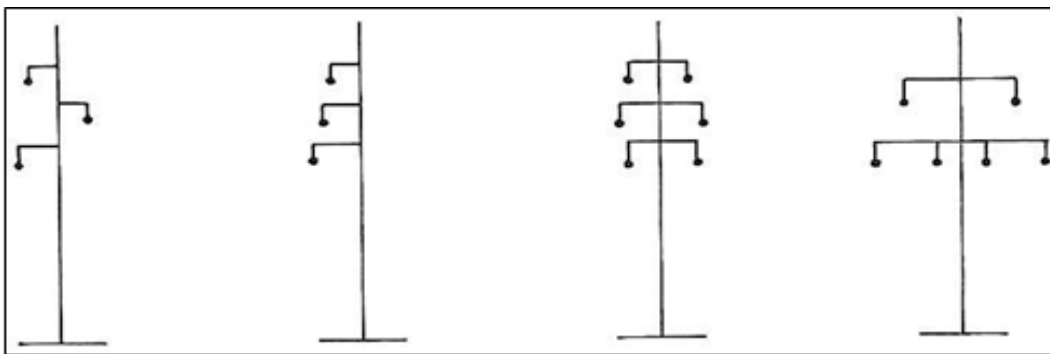


Figure III.3 : Types de supports à phases étagées

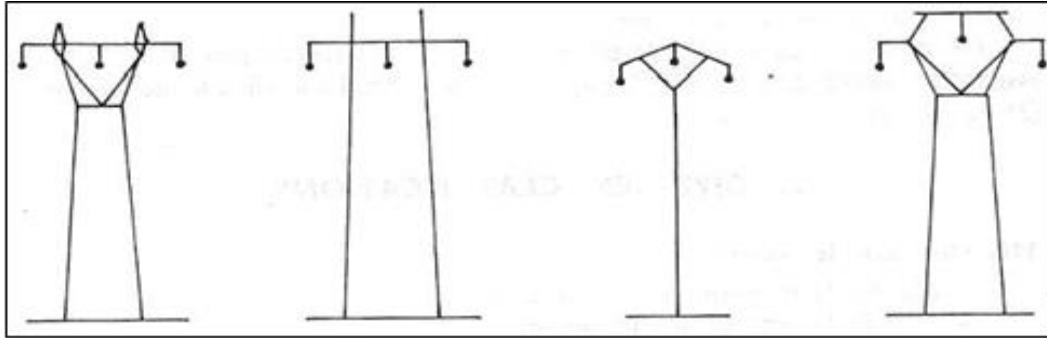


Figure III.4 : Pylônes ou portiques à armement nappe ou nappe-voute

Le calcul des efforts en tête de pylône nous permettra d'obtenir une estimation de cout des pylônes. Finalement, nous pourrons évaluer le coût global de la ligne.

III.5 Les Condition Climatique De Référence :

Dans l'établissement d'un projet de ligne, il faut, en premier lieu, définir les conditions climatiques retenir. Ces conditions jouent un rôle important dans l'étude des ouvrages et notamment dans celle des conducteurs, des supports et de leurs fondations. Elles concernent en particulier

- les températures
- l'action du vent
- les surcharges éventuelles de glace, de givre ou de neige.

En général des prescriptions relatives à ces conditions figurent dans les règlements administratifs .

III.5.1 effet de Température :

Il est d'usage normal de choisir pour ces températures, les valeurs suivantes

Température maximale +45 °C

Température moyenne +15 °C

Température minimale —20

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

Ces températures maximales et minimales constituent une enveloppe des températures qui existent réellement dans la région. Elles sont valables dans les zones de climat tempéré les plus courantes. Elles peuvent varier cependant de 425 à 0°C environ, suivant les régions, selon l'altitude, la latitude et l'influence de la Merz .

III.5.2 effet du Vent :

A) Effet du vent sur les conducteurs :

Il est donné par la formule :

$$V_c = C_x \cdot \frac{p v^2}{20} \quad (\text{III.6})$$

dans laquelle les lettres ont la signification suivante :

V_c est la pression dynamique du vent en kg par m² de plan diamétral ;

C_x est le coefficient de traînée, fonction du nombre de Reynolds. Pour les valeurs les plus courantes du nombre de Reynolds C_x est peu près constant et égal 1,10 ;

p est la masse volumique de l'air sec, h la pression de 76 cm de mercure, 1,225 kg/m³

v est la vitesse du vent en mètres seconde .

Pour le calcul de l'effort du vent sur les conducteurs actif, de garde et de terre:

- Pour les portées inférieures à 100 m:
 - 0,7 -pour le vent horizontal normal;
 - 1,4 =pour le vent horizontal exceptionnel.
- Pour les portées supérieures à 100 m:
 - 0.5 pour le vent horizontal normal;
 - 1 pour le vent horizontal exceptionnel.

B) Effet du vent sur les pylônes :

La pression dynamique par m² de surface plane exposée au vent (profilés généralement constitués par des cornières) s'établit par une formule identique à celle du vent sur les conducteurs

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

$$V_s = C_t \cdot \frac{p v^2}{20} \quad (\text{III.7})$$

Cette formule s'applique la face au vent. Et l'on doit tenir compte, comme dans l'application des règles françaises, de l'effet d'écran présenté par la première face (au vent) sur la seconde, (sous le vent).

Pour le calcul de l'effort du vent sur les supports, traverses, isolateurs:

- 0,8 pour le vent horizontal maximum normal;
- 1,6 pour le vent horizontal maximum exceptionnel

Hauteur au-dessus du sol [m]	Vitesse du vent [m/s]	Pression dynamique de base (qb) [Pa]
Jusque 25	35	750
De 25 à 50	36,6	800
De 50 à 75	37,27	850
De 75 à 100	38,36	900
De 100 à 125	39,41	950
De 125 à 150	40,43	1000
De 150 à 175	41,43	1050
De 175 à 200	42,21	1100

Tableau III.3: Vitesse du vent et pression dynamique en fct de la hauteur

III.5.3 effet de Givre :

A) Effet du Givre sur les conducteurs

A la charge verticale constituée par le givre, qui souvent amène les conducteurs à entrer en contact avec le sol ou à s'en rapprocher, dangereusement, s'ajoute l'action du vent sur le conducteur givré. Comme le diamètre du manchon peut atteindre et même dépasser 5 à 10 fois le diamètre du conducteur nu, on conçoit que, dans ces conditions, les lignes P.T.T., les lignes de distribution à basse et moyenne tension ne puissent résister à l'action du givre, surtout s'il s'y ajoute l'effet du vent .

La présence de givre sur les conducteurs n'a pas seulement pour effet de constituer un risque de rupture de ces derniers. Les tensions mécaniques appliquées par les conducteurs sur les pylônes d'angle et d'arrêt sont quelque fois suffisantes pour en provoquer la rupture ou tout au moins de graves déformations, même en cas de surcharge de givre uniforme.

B) Effet du Givre sur les Supports

Ces différences de tension, souvent très importantes, sont transmises aux pylônes par l'intermédiaire des chaînes d'isolateurs et des bras d'armement, sous forme d'efforts statiques et souvent dynamiques, qui provoquent dans la structure du pylône, des contraintes simultanées de flexion et de torsion, auxquelles souvent les pylônes ne peuvent résister,

Le calcul des effets du givre sur les pylônes est très aléatoire, car il doit faire intervenir un grand nombre de paramètre

- poids de givre au mètre;
- longueur des portées;
- différence de tension entre les portées;
- dénivellations ;
- température du conducteur;
- déplacement des chaînes d'isolateurs ;

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

- décharge simultanée ou non, du givre sur un ou plusieurs conducteurs dans la même portée .
- intensité du vent;
- rebond du conducteur au moment de la décharge du givre.

III-6- Angle d'inclinaison du câble et Poids équivalent

L'idée se trouvant en amont du choix de ces hypothèses est que l'action d'une basse température est surtout dangereuse pour les portées courtes (contraction thermique, cumulée à une faible différence entre la longueur de la portée et la longueur du câble) tandis que l'action du vent est surtout dangereuse pour les portées longues (effort transversal proportionnel à la longueur).

Ces conditions sont définies par le R.G.I.E.2 de la manière suivante:

Tous les éléments constitutifs de la ligne aérienne, à savoir les supports, ancrages , ferrures et fondation éventuelles. Sont calculés en tenant compte de l'état de sollicitation résultant:

- de la traction des conducteurs actifs, de garde et de terre;
- du poids propre des conducteurs actifs, de garde et de terre, des isolateurs, des ferrures et du support;
- de la combinaison la plus défavorable des charges extrêmes résultant des circonstances de vent et de température déterminées ci-après.

Le vent souffle dans la direction horizontale la plus défavorable dans les conditions suivantes:

- à la température de +15°C avec sa force maximale normale ou exceptionnelle;
- à la température de -15°C avec une force réduite .

Ces valeurs varient en fonction de la situation géographiques et des conditions climatiques.

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

Nous calculons donc l'angle d'inclinaison $\langle 0 \rangle$ et le poids équivalent « péqu » (dans les plans des conducteurs) pour les deux hypothèses .

Effort du vent :

$$F = c.q.A \quad [N/m] \quad (III.8)$$

Dans cette équation. « c » est le coefficient aérodynamique d'ensemble dans la direction du vent, « A » la surface en m² des pleins que l'élément présente au vent, perpendiculairement à la direction dans laquelle il souffle et « q » est la pression dynamique (en pascal). Cette dernière se déduit de la pression dynamique de base, « gb », donnée, en fonction de la vitesse du vent (fonction de la hauteur au-dessus du sol), dans le tableau 6.3. Elle se calcule par la formule : $gb = aV^2/2g$, où « a » représente le poids spécifique de l'air (12 kg/m³) ; « V » est la vitesse du vent (en m/s) et « g » est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s²). L'équation IL.11 peut se réécrire, dans le cas des lignes, « $F = C_x \cdot q \cdot d$ », où ' C_x ' est le coefficient de traînée du câble et 'd', son diamètre.

Pour les conducteurs actifs, de garde et de terre, la hauteur à prendre en considération est la hauteur du point d'attache aux isolateurs ou au support.

La pression dynamique « q » se déduit de « gb » par 1 'application d'un facteur correctif : $q = f_e \cdot qb$. Les valeurs de ce facteur « f_c » sont les suivantes:

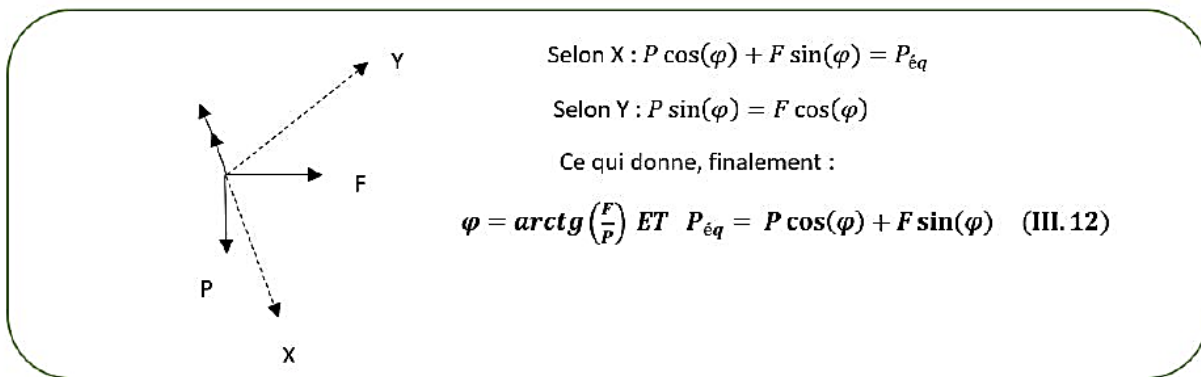


Figure III.5 : Efforts appliqués

III-6 Portée critique et choix de la constante « a »

Pour chaque type de conducteur, il existe une portée critique en dessous de laquelle l'hypothèse hiver sera plus défavorable, tandis qu'au-dessus ce

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

sera l'hypothèse été qui conduira aux contraintes les plus élevées. Cette portée critique se calcule à l'aide de l'équation d'état (dite de Blondel) en exprimant que les tensions dans le conducteur doivent être égales pour les deux hypothèses en utilisant la tension maximale admissible, c'est-à-dire un tiers de la tension de rupture. Nous avons alors :

$$P_c = \sqrt{\frac{24 \cdot \alpha \cdot (\theta_{MAX}) \cdot T_{hiver} - \theta_{été}^2}{P_{équ\ hiver}^2 - P_{équ\ été}^2}} \quad (M) \quad (III.9)$$

avec $T_{MAX} = 1/3 \text{ TRUPTURE}$ (imposé par le R.G.I.E.).

Dans le cas où la portée moyenne est inférieure à la portée critique, c'est la constante a associée à l'hypothèse hiver qui sera retenue, sinon ce sera celle associée à l'hypothèse été. Pour la calculer, c'est encore l'équation d'état que nous utiliserons :

$$\frac{P_{équ}^2 \cdot P^2}{24 \cdot T^2} - \frac{T}{E \cdot S} - \alpha \cdot \theta = 0 \quad (III.10)$$

où

« $P_{équ}$ » est le poids équivalent dans l'hypothèse retenue [N/m];

« P » la portée moyenne [m];

« T » = T_{MAX} l'effort de traction maximal admissible [N] ;

« E » est le module de Young [N/mm²];

« S » la section [mm²] ;

« α » le coefficient de dilatation thermique [°C⁻¹] et

« θ » la température dans l'hypothèse retenue [°C]. Ceci donne un paramètre « a » adimensionnel .

III-7 Détermination de la longueur de la chaîne de suspension

A. Règle de bonne pratique

Nous devons calculer le nombre d'assiettes nécessaires au maintien de la distance de contournement. Pour une approche rapide, nous utilisons le tableau suivant :

Tableau III.4 : Choix du nombre d'assiettes en fonction du niveau de tension

Tension UN (kV)	Nombre d'assiettes
15	1 à 2
90	5 à 6
120	6 à 7
150	7 à 8

B. Méthode développée par le Service de DEET de l'ULg4

Nous déterminons d'abord le degré de salinité, ensuite la tension de tenue aux chocs de foudre « BIL » et finalement la longueur de fuite "théorique" « Lf » qui devra être respectée par la chaîne de façon à protéger la ligne de façon correcte. [15]

En fonction de la zone de pollution retenue, nous allons pouvoir attribuer une valeur à la tension de contournement « β » [cm/kV] (cfr tableau II.5).

C. Degré de salinité :

Tableau III.5 :Tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL »

	Zones de pollution			
	I	II	III	
Salinité	7	20	80	[kg/m ³]
Niveau	faiblement polluée	moyennement polluée	fortement polluée	
Localisation	majeure partie du territoire	zones éloignées de quelques kilomètres du bord de mer	bord de mer et proximité d'industries	
B	1,48	1,83	2,34	[cm/kV]

Cette méthode, fait intervenir d'autres critères de dimensionnement (en plus de la tension nominale). Nous avons, d'une part, la tension la plus élevée admissible par le matériel (U_M) et, d'autre part, la tension nominale de tenue aux chocs de foudre « BIL » (basic insulation l'Exe). Les normes C.E.L. ont établi le tableau II.6:

Tableau III.6 : Tension nominale de tenue aux chocs de foudre

	Tension nominale de la ligne $U_N [kV_{eff}]$	Tension la plus élevée pour le matériel $U_M [kV_{eff}]$	Tension nominale de tenue aux chocs de foudre BIL [$kV_{crête}$]
Classe A : 1 $1 U_m \leq 52$	3	3.6	40
	6	7.2	60
	10	12	75
	15	17.5	95
	20	24	125
	30	36	170
Classe B : $52 \leq U_m \leq 300$	50	52	250
	70	72.5	325
	110	123	450
	130	145	550
	150	170	650
	220	245	750

D. Ligne de fuite des isolateurs:

La longueur de la ligne de fuite des isolateurs se calcule par la formule

$$L_f = L \cdot U_M \cdot \beta \quad (\text{mm}) \quad (\text{III.11})$$

E. Choix de la chaîne d'isolateurs:

- Nous déterminons le *BIL (à partir de Un, tableau IL6), le niveau de pollution (définit la valeur de 'β') et l'effort de traction maximal 'Tax' auquel la chaîne sera soumise
- Nous considérons d'abord des assiettes de type « standard ». En fonction de l'effort de traction * TMAX *: que la chaîne devra supporter, nous choisissons, parmi les modèles d'assiettes convenant, celui de pas le plus petit parmi la liste proposée au tableau III .7.
- En se référant au tableau IIL.8, nous déterminons le nombre 'N° d'assiettes nécessaires via le modèle d'assiette (le pas) et le 'BIL.’
- Nous déterminons le nombre *N2 en vérifiant que la longueur de la ligne de fuite est suffisante :

$$N_2 = \frac{L_f}{\text{longueur de fuite effective d'une assiette}} \quad (\text{m}) \quad (\text{III.12})$$

- Comparant N1 et N2, si le module de leur différence est inférieur à 5, alors le nombre d'assiettes est la plus grande des deux valeurs 'N1' et 'N2'. Dans le cas contraire, nous considérons que les conditions sont néfastes et avons recours à des assiettes de type
- Une fois les caractéristiques de pas et masse de l'assiette ainsi que le nombre d'assiettes déterminées, nous pouvons calculer la longueur « SL » et le poids de la chaîne d'isolateurs.

Tableau III.7:Caractéristiques d'assiettes standard

type standard	Effort en tête						
	70	100	120	160	210	240	300
Caractéristiques d'une assiette	F70/127	F100/1 27	F120/1 27	F160/1 46	F210/1 70	F240/1 70	F300/ 195
Pas [mm]	127	127	127	146	170	170	195
Ligne de fuite [mm]	320	318	315	380	380	380	485
Masse [kg]	3,5	3,7	3,8	6,0	7,1	7,4	10,9

Tableau III.8: BIL vs Nbre d'assiettes (standard)

<i>type standard</i>	pas [mm]			
	127	146	170	195
nombre d'assiettes	BIL [kV]			
2	190	190	205	225
3	260	270	285	315
4	320	340	360	405
5	380	410	440	495
6	435	480	520	580
7	490	550	600	665
8	550	620	675	745
9	615	690	755	830
10	675	760	835	910
11	735	830	915	990
12	795	900	990	1070

Tableau III.9: Caractéristiques d'assiettes antibrouillard

<i>type antifog</i>	Effort en tête					
	100	120	160	210	240	300
Caractéristiques d'une assiette	F100P/146	F120P/146	F160P/170	F210P/170	F240P/170	F300P/195
Pas [mm]	146	146	170	170	170	195
Ligne de fuite [mm]	445	445	545	530	530	690
Masse [kg]	5,6	6,7	8,5	9,5	10,4	15,2

Tableau III.10: BIL vs Nbre d'assiettes (Antifog)

<i>type antifog</i>		Pas [mm]	
	146	170	195
Nombre d'assiettes		BIL [kV]	
2	235	270	280
3	320	370	390
4	390	450	495
5	465	540	600
6	545	625	700
7	620	710	810
8	695	800	910
9	775	890	1015
10	855	980	1120
11	935	1070	1230
12	1015	1170	1340

F. Distance phase/phase et phase/terre

L'écartement vertical entre phases $E_{\Phi\Phi}$, vaut :

$$E_{\Phi\Phi} = \frac{U_N}{150} + CFI \cdot \sqrt{f_{MAX}} + SL \quad (\text{m}) \quad (\text{III.13})$$

où U_N est la tension nominale [kV] ; CFI coefficient qui dépend de la nature du conducteur ; f_{MAX} la flèche maximale [m] ; SL la longueur de la chaîne d'isolateur [m].

La distance verticale min. entre phases et terre vaut :

$$E_{\Phi N} = U_N / 150 \text{ [m]}$$

Pour de pylônes d'angle quelconque $\langle \beta \rangle$, la distance horizontale minimale entre phases, imposée par le RGIE, est donnée par la formule III.14:

$$E_{Hmin} \geq EV \cdot 0.8 / \cos(\beta/2) \text{ [m]} \quad (\text{III.14})$$

G. géométrie des pylônes

Le design des lignes électrique est fonction de la tension de ligne, du nombre de circuits, du type de conducteurs et de la configuration des circuits. De plus, la protection contre la foudre par des conducteurs de terre, terrain et l'espace disponible sur site doivent être pris en considération.

Dans les régions fortement enneigées, il est recommandé de ne pas placer les conducteurs dans un même alignement vertical, afin d'éviter les chocs lorsqu'un amas se détache du conducteur supérieur.

Pour les niveaux basse- et moyenne-tension, un arrangement horizontal est préférable et les câbles de terres sont omis.

En haute et très haute tension, une grande variété de configurations peuvent être imaginées. Nous retiendrons la configuration dite « Danube » (dissymétrique : 1 phase d'un côté et deux de l'autre, alternées), couramment utilisée en raison de ses faibles encombrement et coût.

Nous limiterons notre étude à la proposition d'un modèle qui respecte toutes les conditions mécaniques et électriques pour chaque type de pylônes (alignement/suspension, angle, ancrage/arrêt).

Le but de ce paragraphe est de montrer que nous avons bien appréhendé la géométrie des pylônes. Ce genre de calcul est habituellement réservé au génie civil il s'agit donc de faire preuve d'ingéniosité, d'imagination et de bonne pratique tout en se rappelant qu'il n'y a pas qu'un seul modèle valable, mais une infinité

Il est difficile, à l'heure actuelle, de donner une méthode précise de cette recherche du gabarit idéal. Nous conseillerons donc au lecteur de se reporter à l'exercice résolu.

H. Calcul des efforts en tête de pylône

L'appui est soumis à trois moments:

M_1 = moment dû au poids propre de l'ensemble formé par les conducteurs, les chaînes d'isolateurs et la ferrure .

M_2 = moment dû à la force aérodynamique du vent s'exerçant sur les conducteurs .

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

M3 = moment dû à la force aérodynamique appliquée de façon répartie sur le support.

Pour obtenir l'effort en tête résultant, il suffit de diviser le moment résultant par la hauteur hors-sol .

Ces moments sont déterminés aisément à partir de la connaissance des conditions météorologiques dimensionnantes (H1 ou H2), permettant le calcul de la constante « a » de Blondel, de la tension de la ligne et des angles d'application des efforts

K. Evaluation du coût des supports

La fonction coût du pylône s'exprime comme une fonction de la hauteur et de l'effort en tête. Nous y incorporons le coût des fondations. Cette fonction peut être obtenue par régression des statistiques de l'ALE, par exemple : $-11500/40,3399 + 50/40,3399 h^{2,3} + 1,6/40,3399 E$ euros. Nous devons y ajouter le prix des chaînes de suspension ou des chaînes d'ancrage et obtenir finalement le coût des supports.

Dans ce coût, nous ne tenons pas compte des différents obstacles géographiques qui modifient les proportions entre pylônes d'alignement, d'angle et d'ancrage, ainsi que la garde au sol. Nous avons également omis le prix de la ferrure .

L. Effet couronne

L'effet couronne est un phénomène difficile à quantifier et une littérature abondante sur ce sujet est disponible dans les bibliothèques. Le critère souvent utilisé consiste à vérifier quelle champ superficiel reste bien inférieur à 18 kVeff/cm. Ce champ « EMAX » se calcule par la formule III.24 :

$$E_{MAX} = \frac{V_{eff}}{r \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot H_{MIN} \cdot EPH}{r \sqrt{4 \cdot H_{MIN}^2 + EPH^2}}\right)} \quad (\text{kveff/cm}) (m) \quad (III.15)$$

EPH représente l'écartement entre phases et HMIN la distance minimale entre un conducteur et le sol . [14]

III-9-Flèche maximale et hauteur des conducteurs

Nous l'obtenons par l'hypothèse H3, dite canicule. La température correspond généralement à une ambiance de 40°C plus 30°C d'échauffement. Le vent nul impose au fil d'être vertical.

Nous devons tout d'abord déterminer la tension qui règne dans notre portée. Pour cela nous prendrons l'équation d'état dans l'hypothèse H3, qui se réduit à une équation du 3e degré à 1 inconnue, « T ». Nous obtenons les trois racines (numériquement et/ou analytiquement).

$$\frac{P_{\text{équ}}^2 \cdot P^2}{24 \cdot T^2} - \frac{T}{E \cdot S} - \alpha \cdot \theta = \partial - (\partial + \alpha \cdot \theta) \cdot T^2 + \frac{P_{\text{équ}}^2 \cdot P^2}{24} = 0 \quad (\text{III.16})$$

Des trois racines obtenues, deux sont complexes et nous les rejeterons. La tension de référence dans notre câble est donc déterminée. Maintenant, grâce à l'équation d'état, nous pouvons calculer les tensions dans notre câble pour les hypothèses été et hiver.

Principe de la protection par éloignement : Les conducteurs des lignes aériennes sont écartés du sol des voies publiques, des cours, des jardins et terrains surplombés et des constructions d'une distance appelée < distance minimale d'éloignement > Ces distances sont calculées et contrôlées sous les hypothèses suivantes:

-pour les mesures dans le plan vertical : vent nul, t° du conducteur égale à 75°C (lignes HTB installées après le 01/01/83) ou 40°C (autres lignes) ;

-pour les mesures dans le plan horizontal : vent horizontal maximal défavorable, t° du conducteur égale à 15°C.

La formule qui suit exprime la flèche maximale en fonction de la tension, sous l'hypothèse de canicule (H3, la plus contraignante à ce niveau)

$$f_{\text{MAX}} \frac{P_{\text{équ}}^2 \cdot P^2}{8 \cdot f_{\text{H3}}}$$

Les conducteurs devront être accrochés à une hauteur supérieure à « fMAX + garde au sol ». Le R.G.I.E. impose, pour la garde au sol, une hauteur de base de 6 m (7 m pour une voie traversée). Une majoration de cette distance verticale doit être prise en compte

Chapitre III : Caractéristique mécanique de linge électrique

de la manière suivante : + 1 m par rapport à une voie publique (contrairement au cas des cours ,jardins et terrains), sauf dans le cas basse tension inférieure à 500 V

+ $(U - 50)/100$, terme proportionnel à la tension, dès que celle-ci devient supérieure à 50 kV .

Soit , pour une ligne HT 2ème catégorie, la garde au sol peut s'écrire

$$H_{MIN} = 6 + 1 + \frac{U - 50}{100}$$

Pour plus de détails , se référer à l'article 164 du RGIE .Il conviendra de normaliser la hauteur au ½ m supérieur.

Le R.G.I.E. impose également que le pylône bénéficie de fondations pour toute tension supérieure à 1 kV. La profondeur d'enfouissement est imposée par la NBN (normes belges):

$$H_{rof} = \frac{H}{10} + 1 \quad (\text{M})$$

avec un maximum de 3 m .

Le rapport entre la tension nominale dans le câble (sous l'hypothèse H4 : 15°C , sans vent), et la tension de rupture est un critère important de dimensionnement. Ce rapport doit être inférieur à approximativement 20%. Plus précisément, ce critère permet à notre câble de rester en dessous de la courbe de Wöhler, et donc de ne pas subir de rupture par fatigue au niveau des pinces d'ancrage .

Conclusion

Après toutes les hypothèses et simplifications que nous avons dû faire, il est évident que le coût total de notre ligne est sous-évalué. De toute façon, notre but était d'évaluer rapidement ce coût

Chapitre IV

Chapitre IV : Calcul et application

IV.1 Introduction

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

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

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

IV.2 calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

IV.2.1 Algorithmes de calcul des paramètres de la ligne électrique triphasée

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

Le calcul de la résistance de la ligne à courant continue a une température de 20 C° $\Omega_r = r_{au}.l/s$ (/ km) ;

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

Calcul du coefficient de kelvin :

$$q = \pi \cdot d \cdot \sqrt{\frac{2.f.10^{-5}}{r_{au}}} \quad q < 1 \rightarrow r_a = R \quad (IV.1)$$

Calcul de l'effet de température : $R_T = R \cdot \frac{T+t_2}{T+t_1}$ (IV.2)

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

Calcul de la distance moyen géométrique :

Chapitre IV : Calcul et application

$$D_{\text{eq}} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{13}} \quad (IV.3)$$

Calcul du rayon moyen géométrique g_{11} : Voir le tableau II.1

Calcul du Rayon moyen géométrique du faisceau :

$$G_{11} = \sqrt[n]{n \cdot g_{11} \cdot r_T^{n-1}} \quad L = 2 \cdot 10^{-7} L n \frac{D_{\text{eq}}}{G_{11}} \quad (IV.4)$$

Calcul de la capacité de la ligne :

$$C = 2\pi \cdot \varepsilon_0 \cdot \log \frac{D_{\text{eq}}}{G_{11}} \quad (IV.5)$$

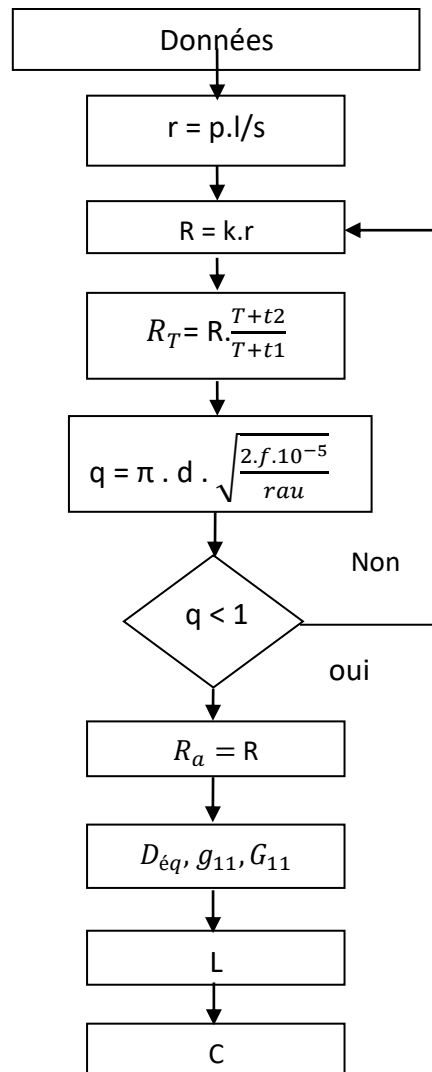


Fig. IV.1 : organigramme de calcul des paramètres de la ligne

Chapitre IV : Calcul et application

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

On va déterminer les résistances linéiques, en courant continu et en courant alternatif en des conducteurs de phase respectivement à 20°C et à 50°C. Ensuite les autres paramètres linéiques ; inductance et capacité respectivement en H/km et F/km.

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

$D1 : 2.75\text{m} , D2 : 2.75 , D3 : 7.75\text{m} , d = 16.35 ,$
 $L= 1\text{km} , t=50 \text{ } a=37*10^{(-4)} , \text{rest} = 35.9*10^{(-9)} , f=50 , n=37$

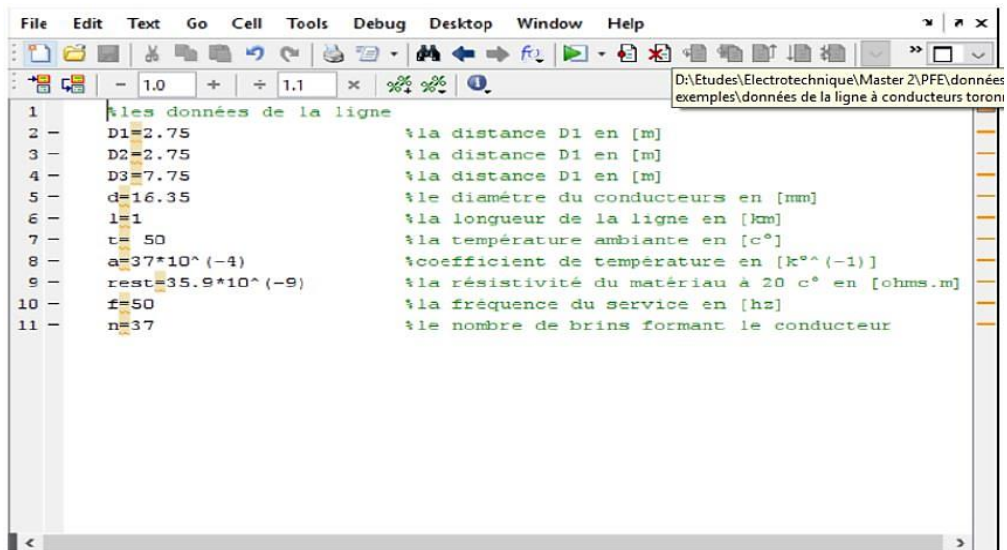


Fig. IV.2 : les données de la ligne contenant un conducteur par phase

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres longitudinales		Paramètres transversales	
R (Ω/km)		L (H/km)	C (F/Km)
La résistance en continu (20 c°)	0.1900	13×10^{-4}	9.0216×10^{-9}
Le facteur de kelvin k	1.0008		
L'effet du spiralage	0.02		
La résistance en alternatif	0.1940		

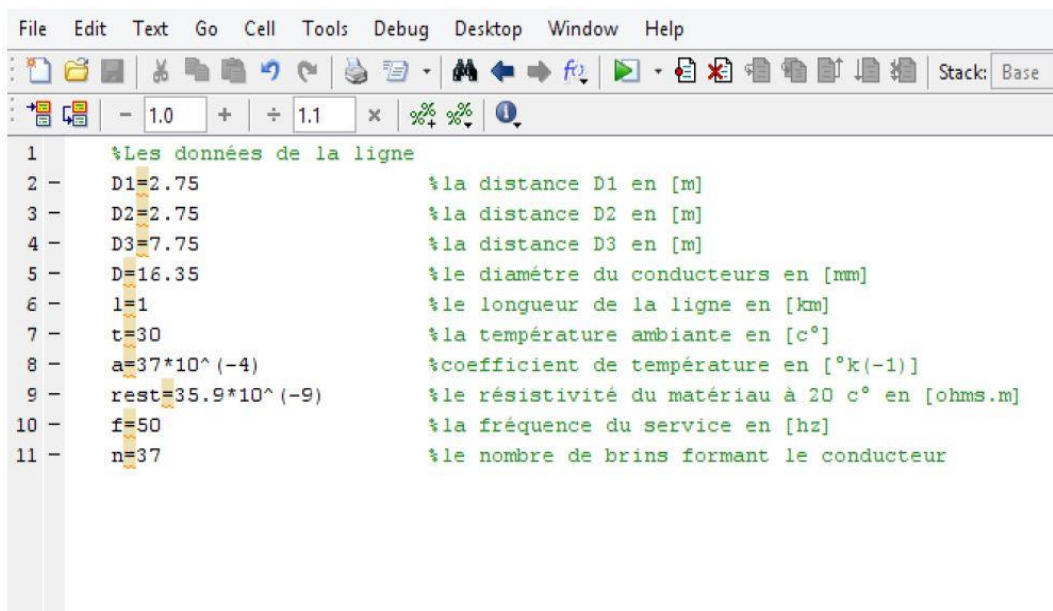
Tab. IV 1: résultats de calcul des paramètres d'une ligne sans faisceau

Chapitre IV : Calcul et application

IV.2.3 Application a une ligne a conducteur de phase en fiscaux de 3 cordes

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

D1 : 2.75m , D2 : 2.75 , D3 : 7.75m , d = 16.35 ,
L= 1km , t=30 a=37*10⁻⁴ rest = 35.9*10⁻⁹ , f=50 n=37



```
File Edit Text Go Cell Tools Debug Desktop Window Help
%Les données de la ligne
1 D1=2.75 %la distance D1 en [m]
2 D2=2.75 %la distance D2 en [m]
3 D3=7.75 %la distance D3 en [m]
4 d=16.35 %le diamètre du conducteurs en [mm]
5 l=1 %le longueur de la ligne en [km]
6 t=30 %la température ambiante en [c°]
7 a=37*10^(-4) %coefficient de température en [°k(-1)]
8 rest=35.9*10^(-9) %le résistivité du matériau à 20 c° en [ohms.m]
9 f=50 %la fréquence du service en [hz]
10 n=37 %le nombre de brins formant le conducteur
```

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

Les résultats de calculs sont présentés dans le tableau suivant :

Paramètres longitudinales		Paramètres transversales	
R (Ω/km)		L (H/km)	C (F/Km)
La résistance en continu (20 c°)	0.3123	15×10^{-4}	7.6691×10^{-9}
Le facteur de kelvin k	1.0041		
L'effet du spiralage	0.02		
La résistance en alternatif	0.3344		

Chapitre IV : Calcul et application

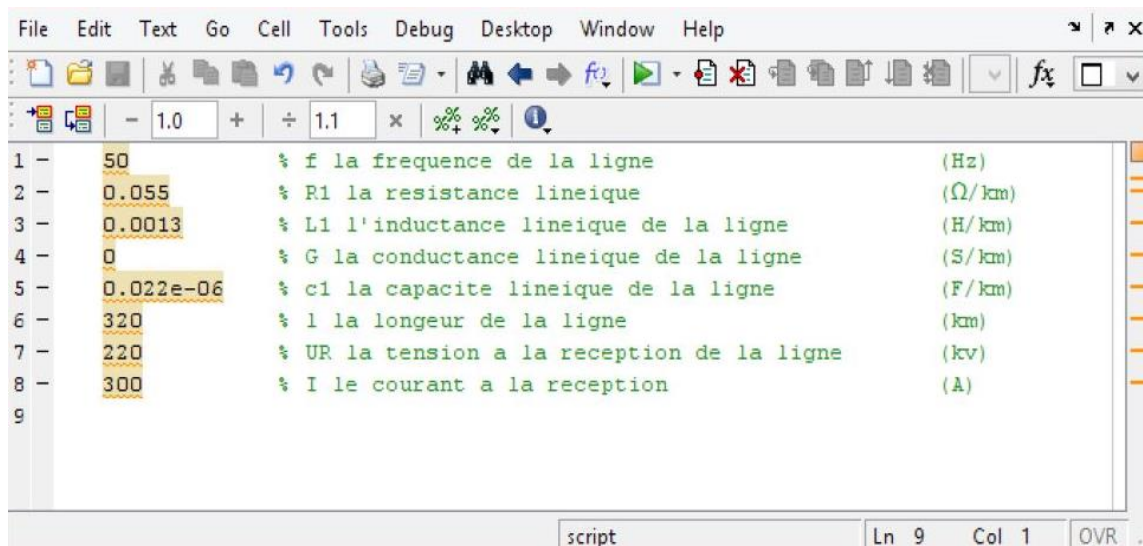
Tab. IV 2: résultats de calcul d'une ligne avec 3 cordes en faisceau

IV.3 Calcul des caractéristiques de la ligne électrique triphasée

IV.3.1 Calcul des caractéristiques de la ligne longue

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

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



IV.3.1.1- Algorithme de calcul des caractéristiques de ligne longue

$$IS = Y(1 + \frac{ZY}{2}) VR + (1 + \frac{ZY}{2}) IR \quad (IV.6)$$

La puissance maximale transmise dans la ligne :

$$P_{max} = \frac{V_s V_r}{Z_c \sinh(\beta l)}$$

Calcul du rendement avec la formule suivante :

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

Chapitre IV : Calcul et application

La régulation de la tension :

$$R\% = \frac{V_S - V_R}{V_R} \cdot 100\% = \frac{U_S - U_R}{U_R} \cdot 100\% \quad (\text{IV.7})$$

Calcul de la puissance réactive fournit par la ligne :

$$Q_c = \frac{Y}{2} U_R^2$$

Calcul de la chute de tension :

$$\Delta U = \frac{x_l \cdot p_r - R \cdot (Q_r - Q_c)}{U_R}$$

Calcul des pertes de puissance active et réactive :

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

$$\Delta Q = 3 \cdot X_l \cdot I_s^2 - Y (U_s^2 + U_R^2)$$

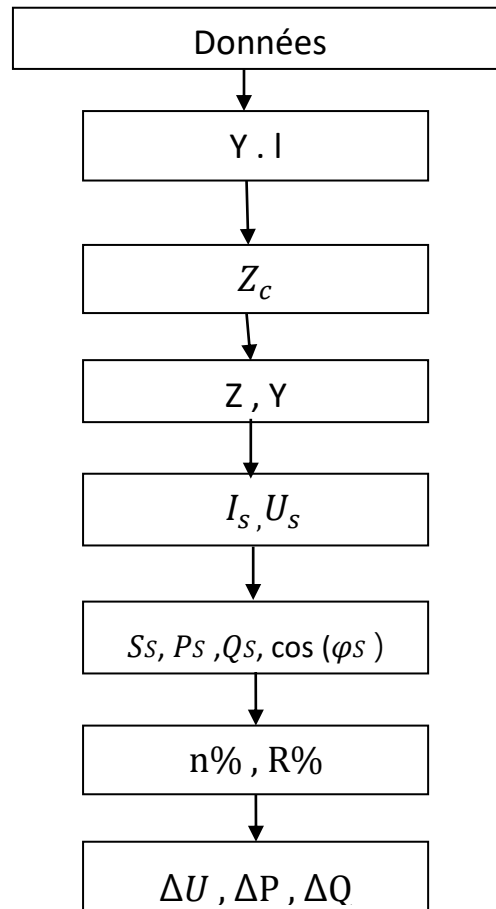


Figure. IV.5. Organigramme de calcul des caractéristiques de la ligne longue

Chapitre IV : Calcul et application

Les résultats de calculs sont présentés dans les tableaux suivants :

Impédance linéique z (Ω/Km)	$0.412e^{i82.3263}$
Admittance linéique y (Ω^{-1}/Km)	$6.908 \times 10^{-6}e^{i92}$
Coefficient de propagation γ	$0.0017e^{i86.1631}$
$\gamma \cdot l$	$0.544e^{i86.1631}$
Impédance caractéristique ZC (Ω)	$244.215e^{-i3.8368}$
Impédance de la ligne $Z(\Omega)$	$131.4044e^{i82.3263}$
Admittance de la ligne Y (Ω^{-1})	$0.002e^{i90}$

Tableau.IV.4. Les caractéristiques de la ligne longue

U_S (KV)	U_S (KV) $245.0309e^{i12.4160}$
I_S (A) $226.3e^{i22.1212}$	I_S (A) $226.3e^{i22.1212}$
S_S (MVA) $96.0431e^{i82.3262}$	S_S (MVA) $96.0431e^{i82.3262}$
P_S (MW) 94.6696	P_S (MW) 94.6696
Q_S (MVAR) 16.1832	Q_S (MVAR) 16.1832
$\cos(\varphi_S)$ 0.9857	$\cos(\varphi_S)$ 0.9857
ΔU (kV) 58.5155	ΔU (kV) 58.5155
P_{max} (MW) 219.5616	P_{max} (MW) 219.5616
ΔP (MW) 2.7039	ΔP (MW) 2.7039
ΔQ (MVAR) 20.0684	ΔQ (MVAR) 20.0684
$\eta\%$ 96.6015	$\eta\%$ 96.6015
$R\%$ 11.3778	$R\%$ 11.3778

Tab. IV.5: les caractéristiques de la ligne longue

Chapitre IV : Calcul et application

Conclusion

A travers ce travail on a réalisé un ensemble de programmes sous Matlab pour le Calcul des paramètres linéiques et des caractéristiques de la ligne électriques (tension, et courant à la source, chutes de tension, le rendement de la ligne et la régulation de la tension.

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

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire est le calcul des paramètres et des caractéristiques d'une ligne de transport électrique à l'aide du logiciel de programmation MATLAB nous permettant de réduire les temps de calcul. Notre travail a été scindé en deux volets. Dans la première partie, nous avons créé un programme afin de calculer les paramètres des lignes électriques que nous avons illustrés par deux exemples ; le premier présentant une ligne de transport électrique contenant un conducteur par phase et le second une ligne à conducteur de phase en faisceaux.

Le deuxième volet de notre travail a été consacré au calcul des caractéristiques d'une ligne longue, d'une ligne moyenne et d'une ligne courte en utilisant le modèle en π . A noter que la procédure de calcul diffère d'une ligne à une autre.

Bibliographie

- [1] **H.LAIB** « *Contribution à l'étude du Contrôle du Flux de Puissance Par l'UPFC* », Mémoire de Magister en Electrotechnique Université de Batna, 2009.
- [2] **L. BOUFENNECHE** , « Généralités sur les réseaux électriques », Cours donné à Université des Frères Mentouri Constantine 1, 2018.
- [3] **N.AOUZELLAG LAHAÇANI**, « Réseaux électriques », Polycopié de cours UEF 3111, Université de A.MIRA-BEJAIA
- [4] « MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES MINES »
- [5] **F. HAMOUDI** , «Réseaux de transport et de distribution électrique», Polycopié de cours UEF 13, Université de A.MIRA-BEJAIA.
- [6] **GUILLAUME Rami**, « contrôle de tension auto adaptatif pour des productions décentralisées d'énergies connectées au réseau électrique de distribution» Thèse de doctorat INPG, 2006
- [7] **H.BENCHIKH ELHOUCINE** « Les étages Moyenne Tension », Institut de Formation en Electricité et Gaz (IFEG), Centre Ain M'Lila, Groupe SONELGAZ, Avril 2004.
- [8] **G.VALENTIN, R.FONDEUR, B. JOYEUX-BOUILLON & J-C TURPAIN**, «Postes à moyenne tension», Techniques de l'Ingénieur D 4 600-7.
- [9] **THI MINH CHAU** , « Couplage onduleurs photovoltaïques et réseau, aspects contrôle commande et rejet de perturbations », Thèse de Doctorat de l'Université de Grenoble, 2012 .
- [10] **J-F DIDIER LAURENT**, « Lignes aériennes : matériels –Supports », Techniques de l'Ingénieur D 4 424 .
- [11] **L. BOUFENNECHE**, « Calcul des réseaux électriques », Cours donné à Université des Frères Mentouri Constantine, 2018.

[12] **A.ZEGAOUI**, « Cours de réseaux électriques », Polycopié de cours, Université Hassiba Ben Bouali de Chlef, 2020.

[13] **Germine Seide**, « planification d'un Réseau de Quatrième Génération à partir d'un Réseau de Troisième Génération », Université de Montréal, 2011.

[14] **Badr Benmammar**, « Agents et mobiles de 3ème et 4ème génération », Laboratoire Bordelais de Recherche en Informatique, France, publié dans Intelligence dans les réseaux (2005).

[15] **Samuel pierre**, « réseau et système de l'informatiques mobiles », école de polytechnique de Montréal, 2003.

[16] **David Amzallag**, Michael Livschitz, Joseph (Seffi) Naor, Danny Raz, « Cell Planning of 4G Cellular Network Algorithmic Techniques and Result».