



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Amar Thelidji- Laghouat**

**Faculté de Technologie Département  
D'Electrotechnique**

**MEMOIRE DE MASTER**

**Option : Electromécanique**

**Présenté par**

**ETTIR AOUNALLAH**

**BOUKRARA WALID**

**Thème**

**CALCUL MECANIQUE ET ELECTRIQUE DES LIGNES AERIANES  
DE TRANSPORT ELECTRIQUE HAUTE TENSION**

**Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
BENSSEDIK Sid Ahmed	Pr	Président
KOUIDRI Mohammed Ali	MCA	Examinateur
DJEKIDEL Rabah	Pr	Encadreur

**Promotion : 2021/2022**

## ملخص:

تلعب شبكة النقل الكهربائي الهوائية دورًا رئيسيًا في نقل الطاقة الكهربائية من معمل الإنتاج إلى مكان الاستهلاك بجهد عالٍ وعالي جدًا. يجب أن تفي الموصلات المكونة للخط الهوائي بالعديد من معايير التصميم. تتعلق هذه المذكرة بدراسة الأبعاد الميكانيكية والكهربائية لخط علوي عالي الجهد. تم إجراء تحديد الأبعاد الميكانيكية، وهي عادةً تتكون من تحديد معالم التثبيت، الترخيم، قوة الشد الميكانيكي على الموصل أفقياً، وزن الموصل، البحر، وحساب مختلف الأحمال التي تؤثر على الموصل بسبب القيود المناخية. تم أيضًا إجراء تحديد الأبعاد الكهربائية من أجل حساب المقادير الكهربائية المختلفة لموصل الطور، بناءً على نمذجة رياضية لأداء خط علوي من خلال حساب تدفق الطاقة عبر خط النقل، و تمت عملية تقييم المجالات الكهربائية والمغناطيسية لخط النقل، وكذلك حساب تأثير الهالة والخسائر الناتجة.

**الكلمات المفتاحية:** خط كهربائي علوي ، موصل ، جهد عالي جدا ، حساب ميكانيكي ، حساب كهربائي.

## Résumé :

Le réseau de transport aérien joue un rôle primordial dans l'acheminement de l'énergie électrique à partir de la centrale de production vers le lieu de consommation en haute et très haute tension. Les conducteurs doivent répondre à plusieurs critères de conception. Le présent mémoire porte sur une étude de dimensionnement mécanique et électrique d'une ligne aérienne à très haute tension. Un dimensionnement mécanique a été effectué, il consiste à déterminer les paramètres de pose, tels que la flèche maximale, la tension mécanique du conducteur, les charges agissantes sur le conducteur dues aux contraintes climatiques. Un dimensionnement électrique a été également réalisé dans le but de calculer les différents paramètres électriques du conducteur de phase, en basant sur une modélisation mathématique de la performance d'une ligne aérienne à partir de l'écoulement de puissance à travers cette ligne de transport, le calcul des champs électrique et magnétique, ainsi l'évaluation de l'effet de couronne et les pertes produites.

**Mots clés:** Ligne électrique aérienne, Conducteur, Très Haute Tension (THT), Calcul mécanique, Calcul électrique.

### **Abstract:**

The overhead transport network plays a key role in the transport of electrical energy from the production center to the consumption place at high and very high voltage. Conductors must meet several design criteria. This memory deals with a study of mechanical and electrical dimensioning of a very high voltage overhead line. A mechanical dimensioning was carried out; it consists in determining the installation parameters, such as the maximum sag, the mechanical tension of the conductor, the charges acting on the conductor due to climatic constraints. An electrical dimensioning was also carried out in order to calculate the different electrical parameters of the phase conductor, based on a mathematical modeling of the performance of an overhead line from the power flow through this transmission line, the calculation of the electric and magnetic fields, as well as the evaluation of the corona effect and the losses produced.

**Keywords:** overhead power line, conductor, very high voltage (VHV), mechanical calculation, electrical calculation.

# *Remerciements*

Je tiens à remercier sincèrement et profondément en Premier lieu mon Dieux «Allah » Qui nous donne la vie.

Je tiens en premier lieu à remercier Monsieur :**Djekidel Rabah**, Professeur à l'Université Amar Thelidji Laghouat, qui a encadré ce mémoire, m'a accompagné au quotidien dans la préparation de ce travail avec la plus grande assiduité ainsi qu'avec des qualités humaines remarquables, et dont la présence au quotidien fut un atout majeur pour la réalisation de ce travail, tant d'un point de vue scientifique que moral.

Je remercier également le président du jury Monsieur :

**Bessedik sid Ahmed** Professeur à l'université Amar thelidji Laghouat, pour l'honneur qu'il nous fait par sa présence et d'avoir présider notre jury de mémoire.

Je remercier également l'examineur du jury Monsieur : **Koudri Mohammed Ali** Docteur à l'Université Amar Thelidji Laghouat par leur présence et d'avoir accepté de juger ce modeste travail.

# *Dedicaces*

*A ceux qui ont sacrifié leur vie entière pour faire de moi ce que  
je suis aujourd'hui, qui m'ont toujours soutenu et guidé à travers les  
moments difficiles et à qui je dois mon succès : mes chers, ma mère  
et mon père*

*Je dédie ce modeste travail à mes frères qui m'ont toujours aimé,  
mes sœurs et toute ma famille,*

*Jeunes et moins jeunes.*

*Et à mes fidèles amis dont l'amitié compte beaucoup pour moi et qui  
m'ont soulagé dans les moments difficiles.*

*Merci Beaucoup*

**ETTIR AOUNALLAH**

# *Dédicaces*

*Tout d'abord, nous remercions Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la volonté et, surtout, le courage d'accomplir cette humble mémoire.*

*A l'homme de ma vie, mon exemple éternel, mon soutien moral et Source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père Belkasem.*

*A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; ma mère Omkhalifa que j'adore.*

*A mon grand père et ma grande mère*

*A tous mes frères : Ali, Abdelatif et mon frère Zaki .*

*Et ma sœur : Amina*

*Nous tenons à adresser nos sincères remerciements à notre promoteur Pr: **Djekidel Rabah** pour sa confiance en nous, sa présence, ses encouragements, son suivi, et ses conseils avisés pendant toute la durée de ce travail qui nous a permis de continuer notre humble travail.*

*Nous tenons également à remercier les membres du jury pour leur présence et pour le temps qu'ils ont eu la gentillesse de consacrer à l'évaluation de ce travail.*

*Aux personnes qui m'ont toujours aidé et encouragé, qui étaient toujours à mes côtés, et qui m'ont accompagnées durant mon chemin d'études supérieures, mes aimables amis*

*À tous les étudiants de la promotion 2021/2022*

*A tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer .....*

*Walid,*

**Sommaire**

<b>Introduction générale .....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les réseaux électriques</b>	
<b>I.1.Introduction .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2. Réseau électrique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.1. Définition du réseau électrique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.2. Production de l'énergie électrique .....</b>	<b>3</b>
<b>I.2.3. Structure générale du réseau électrique .....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.4. Réseau de Transport et d'interconnexions de l'énergie électrique.....</b>	<b>4</b>
<b>I.2.5. Réseau de répartition et de distribution de l'énergie électrique.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2.6. Niveaux de tensions.....</b>	<b>6</b>
<b>I.3. Structure topologique du réseau électrique .....</b>	<b>7</b>
<b>I.3.1. Réseaux maillés.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.2. Réseaux bouclés.....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.3. Réseaux radiaux.....</b>	<b>8</b>
<b>I.4. Eléments indispensables du réseau électrique.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4. Eléments indispensables du réseau électrique.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.1. Pylônes.....</b>	<b>9</b>
<b>I.4.2. Lignes aériennes.....</b>	<b>11</b>
<b>I.4.3. Isolateurs.....</b>	<b>12</b>
<b>I.4.4. Câbles de garde.....</b>	<b>12</b>
<b>I.4.5. Câbles souterrains.....</b>	<b>13</b>
<b>I.4.6. Postes électriques.....</b>	<b>13</b>
<b>I.4.7. Transformateurs.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.8. Appareillage électrique.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5. Avantages et inconvénients des lignes aériennes et des câbles souterrains.....</b>	<b>15</b>

<b>I.5.1. Lignes aériennes de transport d'énergie électrique.....</b>	<b>15</b>
a) Avantages.....	15
b) Inconvénients.....	15
<b>I.5.2. Câbles souterraines de transport d'énergie électrique.....</b>	<b>16</b>
a) Avantages.....	16
b) Inconvénients.....	16
<b>I.6. Conclusion.....</b>	<b>16</b>
<b>Chapitre II : Calcul mécanique d'une ligne aérienne</b>	
<b>II.1. Introduction.....</b>	<b>17</b>
<b>II.2. Définitions des éléments indispensables dans l'étude mécanique.....</b>	<b>17</b>
II.2.1. La portée.....	17
II.2.2. La flèche.....	17
II.2.3. Le paramètre.....	18
II.2.4. Le canton.....	18
II.2.5. La caténaire.....	18
II.2.6. La parabole.....	18
<b>II.3. Calcul mécanique d'une ligne aérienne HT.....</b>	<b>19</b>
II.3.1. La Courbe d'équilibre d'un conducteur.....	20
II.3.2. Coefficient de sécurité.....	21
II.3.3. La flèche d'un conducteur .....	21
II.3.4. La longueur du câble.....	22
II.3.5. Tension mécanique en un point quelconque du câble.....	23
<b>II.4. La flèche d'un conducteur dans le cas d'une portée dénivelée.....</b>	<b>24</b>
<b>II.5. L'effet des contraintes environnementales.....</b>	<b>26</b>
II.5.1. Équation de changement d'état.....	26
II.5.2. L'effet du vent sur les lignes électriques aériennes.....	26
II.5.3. L'effet du givre sur les lignes électriques aériennes.....	28

<b>II.5.4. L'effet de la Température sur les lignes électriques aériennes.....</b>	<b>30</b>
<b>II.5.5. Calcul de la portée équivalente.....</b>	<b>32</b>
<b>II.6. Espacement entre les conducteurs.....</b>	<b>33</b>
<b>II.6.1. Distance minimale entre les conducteurs de phase.....</b>	<b>33</b>
<b>II.6.2. Hauteur minimal d'un conducteur de phase au dessus du sol.....</b>	<b>34</b>
<b>II.7. Conclusion.....</b>	<b>34</b>

**Chapitre III: Calcul électrique d'une ligne aérienne**

<b>III.1. Introduction.....</b>	<b>35</b>
<b>III.2. Les lignes aériennes.....</b>	<b>35</b>
<b>III.3. Détermination des paramètres linéiques d'une ligne.....</b>	<b>36</b>
<b>III.3.1. Résistance de la ligne.....</b>	<b>36</b>
<b>III.3.2. Réactance inductive.....</b>	<b>37</b>
<b>III.3.3. Capacité linéique de la ligne.....</b>	<b>40</b>
<b>III.3.4. Réactance capacitive (Susceptance).....</b>	<b>43</b>
<b>III.3.5. Conductance.....</b>	<b>44</b>
<b>III.3.6. Impédance propre de la ligne.....</b>	<b>44</b>
<b>III.3.7. Admittance de la ligne.....</b>	<b>45</b>
<b>III. 4. La modélisation des lignes électriques.....</b>	<b>45</b>
<b>III. 5. Calcul du champ électrique d'une ligne aérienne.....</b>	<b>47</b>
<b>III.6. L'effet de couronne.....</b>	<b>50</b>
<b>III.8. Conclusion.....</b>	<b>53</b>

**Chapitre IV : Résultat et discussion**

<b>IV.1. Introduction.....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2. Calcul mécanique d'une ligne aérienne.....</b>	<b>54</b>
<b>IV.2.1. Tracé de la caténaire (chaînette) et de la parabole.....</b>	<b>56</b>
<b>IV.2.2. Comparaison entre la parabole et la chaînette.....</b>	<b>57</b>
<b>IV.2.2.1. Calcul de la flèche d'un conducteur.....</b>	<b>57</b>
<b>IV.2.2.2. Calcul de la longueur du conducteur .....</b>	<b>58</b>
<b>IV.2.2.3. Calcul de la tension mécanique maximum du conducteur.....</b>	<b>60</b>
<b>IV.2.3. Calcul de la flèche et la longueur d'un conducteur dans le cas d'une portée dénivelée.....</b>	<b>61</b>
<b>IV.3. Effet des contraintes climatiques et météorologiques.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.3.1. Calcul de la flèche en fonction du vent et du givre.....</b>	<b>62</b>
<b>IV.3.2. Calcul de la flèche en fonction de la variation de la température.....</b>	<b>65</b>
<b>IV.3.3. Calcul de la portée équivalente .....</b>	<b>66</b>
<b>IV.3.4. Ecartement minimal entre les conducteurs .....</b>	<b>67</b>
<b>IV.4. Calcul électrique d'une ligne aérienne.....</b>	<b>68</b>
<b>IV.4.1. Calcul des constantes électriques de la ligne.....</b>	<b>69</b>
<b>IV.4.1.1. Calcul de la résistance du conducteur.....</b>	<b>69</b>
<b>IV.4.1.2. Calcul de la réactance inductive.....</b>	<b>71</b>
<b>IV.4.1.3. Calcul de la réactance capacitive.....</b>	<b>73</b>
<b>IV.4.1.4. Calcul de la susceptance de la ligne.....</b>	<b>75</b>
<b>IV.4.1.5. Calcul de la conductance.....</b>	<b>76</b>
<b>IV.4.1.7. Calcul de l'admittance de la ligne.....</b>	<b>77</b>
<b>IV.4.2. Calcul des constantes auxiliaires de la ligne (ABCD) .....</b>	<b>78</b>

<b>IV.4.3. Modélisation en Pi d'une ligne électrique longue.....</b>	<b>81</b>
<b>IV.4.4. Calcul des pertes de puissance .....</b>	<b>81</b>
<b>IV.4.5. Calcul du champ électrique d'une ligne électrique aérienne .....</b>	<b>82</b>
<b>IV.4.6. Effet de couronne .....</b>	<b>83</b>
<b>IV.4.6.1. Tension disruptive critique.....</b>	<b>83</b>
<b>IV.4.6.2. Pertes par effet de couronne .....</b>	<b>85</b>
<b>IV.4.7. Calcul du champ magnétique d'une ligne électrique aérienne .....</b>	<b>86</b>
<b>IV.5. Conclusion .....</b>	<b>88</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>89</b>

**Liste des Figures  
Chapitre I**

Figure I. 1: Schéma simplifié d'un réseau électrique.....	6
Figure I. 2: Structure d'un réseau électrique de transport et de distribution.....	6
Figure I. 3: Niveaux de tension normalisés.....	6
Figure I. 4: Structure maillée d'un réseau de transport.....	8
Figure I. 5: Structure bouclée d'un réseau de transport.....	8
Figure I. 6: Structure radiale d'un réseau de transport.....	9
Figure I.7 : Pylône THT pour une ligne de 400kV.....	10
Figure I.8 : Ligne aérienne triphasée de transport d'énergie à double circuit.....	11
Figure I.9 : Conducteurs ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced) conventionnels (à gauche) et à noyau de carbone moderne (à droite) .....	11
Figure I.10 : Chaîne d'isolateurs à long fût.....	12
Figure I.11: Section d'un câble de transport d'énergie HT à isolation synthétique.....	13
Figure I.12 : Poste de distribution sur support.....	14
Figure I.13. Transformateur de puissance d'un poste électrique HT.....	15

**Chapitre II**

Figure II. 1: Représentation paramètre d'un conducteur.....	18
Figure II. 2: Câble suspendu entre deux points fixes au même niveau.....	19
Figure II.3: Représentation de la chaînette.....	20
Figure II.4: Représentation de la parabole et de la chaînette.....	20
Figure II.5 : Calcul des dimensions géométriques d'une portée dénivelée.....	25
Figure II.6 : L'effet du vent sur un conducteur.....	27
Figure II.7 : L'effet de la glace sur un conducteur.....	28
Figure II.8: Calcul du poids de la glace.....	29
Figure II.9 : Surcharge du vent et de glace sur un conducteur.....	29

Figure II.10 : Paramètres d'une ligne, Flèche (f), Portée (L), Longueur d'arc (s).....	31
Figure II-11 : Calcul de la portée équivalente moyenne du canton de pose.....	33

### Chapitre III

Figure III.1: Schéma simplifié d'une ligne de transport aérien.....	36
Figure III.2: Ligne triphasé arrangée symétriquement.....	38
Figure III.3: Ligne monophasé a deux conducteurs.....	39
Figure III.4: Ligne triphasé avec arrangement symétrique.....	39
Figure III.5: Ligne triphasé avec arrangement asymétrique.....	39
Figure III.6: Conducteurs en faisceau (4 sous-conducteurs) .....	40
Figure III.7: faisceau de Conducteurs.....	40
Figure III.8: Représentation de la capacité entre les conducteurs et entre les conducteurs et le sol.....	41
Figure III.9: Ligne de transport triphasé transposée.....	41
Figure III.10: Schémas équivalent d'une ligne en ( $\pi$ ) .....	45
Figure III.11: Schémas équivalent d'une ligne en (T) .....	45
Figure III.12: Modèle simplifié des lignes de transmission électriques.....	46
Figure III.13: Modèle simplifié d'une ligne électrique H.T.....	46
Figure III.14: Faisceau de conducteurs.....	49
Figure III.15: Calcul du champ électrique produit par une ligne aérienne.....	49
Figure III.16: Champ magnétique généré par un conducteur électrique.....	52

### Chapitre IV

Figure IV.1 : Description globale de la géométrie d'une ligne aérienne THT.....	56
Figure IV.2 : Différence entre la géométrie de la chaînette et de la parabole.....	56
Figure IV.3 : Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la portée longitudinale.....	57

Figure IV.4: Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la tension horizontale du conducteur.....	57
Figure IV.5 : Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur.....	58
Figure IV.6 : Calcul de la longueur du conducteur en fonction de la portée longitudinale..	59
Figure IV.7 : Calcul de la longueur du conducteur en fonction de la tension horizontale du conducteur.....	59
Figure IV.8 : Calcul de la longueur du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur.....	60
Figure IV.9 : Calcul de la tension mécanique maximum à l'extrémité du pylône en fonction de la portée longitudinale.....	60
Figure IV.10 : Calcul des dimensions géométriques d'une portée dénivelée.....	61
Figure IV.11: Effort de glace sur le conducteur.....	63
Figure IV.12: Effort du vent sur le conducteur.....	63
Figure IV.13: Force résultante des efforts exercés sur le conducteur.....	63
Figure IV.14 : Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction des conditions climatiques .....	65
Figure IV.15 : Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la température.....	66
Figure IV.16 : Calcul de la portée équivalente moyenne du canton de pose.....	66
Figure IV.17: Espacement des conducteurs et des câbles de garde au milieu de la portée..	68
Figure IV.18 : Configuration d'une ligne à simple circuit en faisceaux de deux conducteurs par phase.....	69
Figure IV.19 : Variation résistance du conducteur en fonction de la température.....	70
Figure IV.20 : Variation résistance du conducteur en fonction de la fréquence.....	71
Figure IV.21 : Variation de la réactance inductive en fonction de la distance géométrique moyenne.....	72
Figure IV.22 : Variation de la réactance inductive en fonction du rayon géométrique	72

moyen.....	
Figure IV.23 : Variation de la réactance inductive en fonction de la fréquence du réseau.....	73
Figure IV.24: Variation de la réactance capacitive en fonction de la distance géométrique moyenne.....	74
Figure IV.25 : Variation de la réactance capacitive en fonction du rayon géométrique moyen.....	75
Figure IV.26 : Variation de la réactance capacitive en fonction de la fréquence du réseau.....	75
Figure IV.27 : Variation de l'impédance de la ligne en fonction de la fréquence du réseau.....	77
Figure IV.27 : Variation de l'admittance de la ligne en fonction de la fréquence du réseau.....	78
Figure IV.28 : Représentation du circuit à deux ports d'une ligne pour la matrice ABCD..	78
Figure IV.29: Circuit équivalent d'une longue ligne en $\Pi$ ( $\pi$ ).....	81
Figure IV.30: Profil du champ électrique généré par la ligne aérienne triphasée.....	83
Figure IV.31 : Variation de l'intensité de la tension disruptive critique avec la distance géométrique moyenne.....	84
Figure IV.32 : Variation de l'intensité de la tension disruptive critique en fonction du rayon géométrique moyen.....	85
Figure IV.33: Pertes par effet de couronne en fonction de la distance géométrique moyenne.....	86
Figure IV.34 : Pertes par effet de couronne en fonction du rayon géométrique moyen.....	86
Figure IV.35: Profil du champ magnétique généré par la ligne aérienne triphasée.....	87

**Liste des Tableaux**

Tableau I-1 : Tableau des domaines de tension en vigueur en Algérie (SONELGAZ)	7
Tableau III.1: Résistivité et Coefficient de Température de quelques matériaux	37
Tableau IV.1 : Caractéristiques et dimensions de la ligne électrique	67

## **Introduction générale**

La production de l'énergie électrique se fait au niveau des centrales électriques (thermiques, nucléaires, hydrauliques,...), elles sont généralement éloignées des lieux de consommations, d'où la nécessité de la transporter sur de longues distances grâce à un réseau électrique hautement planifié afin de la distribuer aux entreprises et aux consommateurs. Ce transport de l'énergie électrique est réalisé au moyen de lignes électriques qui peuvent être, aériennes ou souterraines exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques, ce réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de la production.

De nos jours, toutes les activités sont souvent liées à l'énergie électrique. L'avènement de l'énergie électrique dans une zone joue un grand rôle sur l'amélioration et la promotion du niveau de vie quotidienne de la population humaine. Une fois l'énergie électrique transportée vers les centres de distributions et de consommation, c'est aux gestionnaires de réseaux de la fournir avec excellent niveau de qualité, au meilleur coût et dans des conditions de sécurité optimales.

Dans le réseau électrique la ligne électrique joue un rôle très important dans le transport de l'énergie électrique sur l'ensemble d'un territoire, elle représente dans le système électrique ce que représente une veine dans le corps humain. Selon la longueur on distingue trois types de ligne, la ligne longue; la ligne moyenne et la ligne courte. Cependant, la conception et la réalisation d'une ligne électrique aérienne doit répondre à certaines paramètres, selon la nature du trajet, la détermination des caractéristiques mécaniques et électriques des conducteurs en lignes à utiliser, du choix du type de support à utiliser, du dimensionnement et du calcul judicieux des matériaux et éléments entrant dans cette réalisation.

L'objectif de ce mémoire est de calculer les paramètres électriques et mécaniques d'une ligne aérienne de transport d'énergie en basant sur un outil informatique sous l'environnement MATLAB.

Dans ce contexte, notre mémoire sera structuré en quatre chapitres présentés comme suit :

- Le premier chapitre traite des définitions et des généralités concernant le réseau électrique, l'architecture et l'exploitation de différents types de réseaux électriques.

- Le deuxième chapitre est consacré aux formules de la détermination des principaux paramètres mécaniques des conducteurs (calcul de la flèche et de la tension mécanique), en utilisant les méthodes de la chaînette et de la parabole.
- Le troisième chapitre est destiné à la formulation mathématique des différents caractéristiques et paramètres définissant une ligne électrique.
- Le quatrième chapitre présente les résultats obtenus des simulations, divers résultats ont été discutés et analysés.

Ce travail se termine par une conclusion générale et des perspectives.

# **Chapitre I:**

## **Généralités sur les réseaux électriques**

## **I.1.Introduction**

L'exploitation du réseau électrique consiste à produire, transporter et distribuer l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux consommateurs. Cette énergie doit être fournie sous tension et fréquence dans de limites acceptables afin de garantir un bon fonctionnement des charges et des équipements du réseau électrique et la bonne qualité de l'énergie, la continuité de l'alimentation sans coupure. Un réseau électrique est constitué généralement d'un ensemble de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tensions, connectées entre elles dans des postes électriques, qui permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs.

Dans ce chapitre, nous allons voir une généralité sur le réseau électrique, la procédure de la production et de transport de l'énergie électrique, les éléments électriques principaux constituant un réseau électrique.

## **I.2. Réseau électrique**

### **I.2.1. Définition du réseau électrique**

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de génération jusqu'aux clients les plus éloignés.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation.

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'énergie électrique, mettant en œuvre des appareillages électriques ayant pour but d'assurer la stabilité et la protection de l'ensemble du réseau [1-4].

### **I.2.2. Production de l'énergie électrique**

L'énergie électrique est produite dans des usines appelées centrales. Celles-ci transforment l'énergie primaire en énergie électrique que l'on appelle énergie secondaire. L'énergie électrique est consommée au moment où elle est produite. Une centrale électrique est un système complexe de production d'énergie électrique. Elle comporte différents composants:

- Un convertisseur d'énergie qui assure la conversion d'une forme d'énergie en une ou plusieurs autres.

- Un groupe turbo-alternateur dont les aimants constitutifs solidaires de pales, se mettent en mouvement sous l'effet de la vapeur d'eau sous pression injectée au niveau des pales. Les bobines entourant les aimants sont le lieu de la création d'une tension électrique.

Le groupe turbo-alternateur est destinée à produire de l'électricité avec la moyenne tension , puis elle sera élevée à une valeur entre 63 et 400 kV à l'aides des transformateurs situés dans un poste de départ placé au voisinage immédiat de la centrale pour un transport économique de l'énergie. Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, les centrales seront capables de produire l'électricité en grande quantité. Les trois principaux modes de production sont les centrales nucléaires, les centrales à combustibles fossiles et les centrales hydroélectriques. Les centres de production sont répartis presque uniformément dans l'ensemble du réseau interconnecté, d'autres modes de production existent tels que l'éolien, solaire, marémotrice, géothermale,...etc [1-4].

### **I.2.3. Structure générale du réseau électrique**

Pour réaliser la connexion entre la centrale de production de l'énergie électrique et les centres de consommation, il est nécessaire d'établir des lignes aériennes et des canalisations souterraines. Les lignes sont connectées à des nœuds appelés Postes. Ces sous-stations, particulièrement importants, comportent habituellement des transformateurs avec dispositif de contrôle, de réglage et de protection [4-6].

Les lignes reliant les nœuds forment les branches, ces dernières suivant le cas, elles disposent d'antenne ou de mailles.

Les compagnies d'électricité divisent leurs réseaux en quatre catégories :

1. Réseaux d'interconnexions
2. Réseaux de transports
3. Réseaux de répartitions
4. Réseaux de distributions

### **I.2.4. Réseau de Transport et d'interconnexions de l'énergie électrique**

Le réseau principal de transport et d'interconnexion vise à transporter de grandes quantités d'électricité sur de longues distances et a une tension de 400 000 volts et plus.

Le réseau de transport est constitué de lignes à très haute tension (THT) et haute tension (HT) vise à transporter cette grande quantité d'électricité sur de longues distances et de l'acheminer vers les zones de consommation [4-6].

Pour transporter une énergie électrique à grande distance, il est essentiel, sur le plan économique, de minimiser l'énergie gaspillée par effet Joule de long de la ligne de transport, la solution la plus rentable consiste à élever le niveau de tension au départ pour le ramener à une tension plus basse, éventuellement la tension de départ, au point d'utilisation. Les deux opérations de changement de tension sont effectuées par des transformateurs qui permettent d'élever ou d'abaisser la tension électrique à différents points du réseau [4-6].

Le réseau d'interconnexion assure la liaison permanente entre les centres de production, et permet l'échange de l'énergie électrique entre les différentes régions et même avec des pays voisins.

Ce réseau est organisé de façon que toutes les lignes à très haute tension soient reliées par des postes de transformations assurant la continuité entre les lignes de différents niveaux de tension [4-6].

### I.2.5. Réseau de répartition et de distribution de l'énergie électrique

Le réseau de répartition comporte généralement les lignes à haute tension jouent le rôle d'intermédiaire entre le réseau de transport et le réseau de distribution. 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 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. La distribution sert à alimenter les consommateurs en moyenne ou en basse tension (typiquement 400 V), grâce à des postes de transformation MT/BT [4-6].

Le réseau de distribution transfère l'énergie électrique des centres de distribution aux consommateurs. La tension électrique des réseaux de distribution se situe normalement entre 2 et 50 kV. Ils comprennent des postes électriques de transformation, des lignes aériennes et un réseau de conducteurs les reliant aux transformateurs.

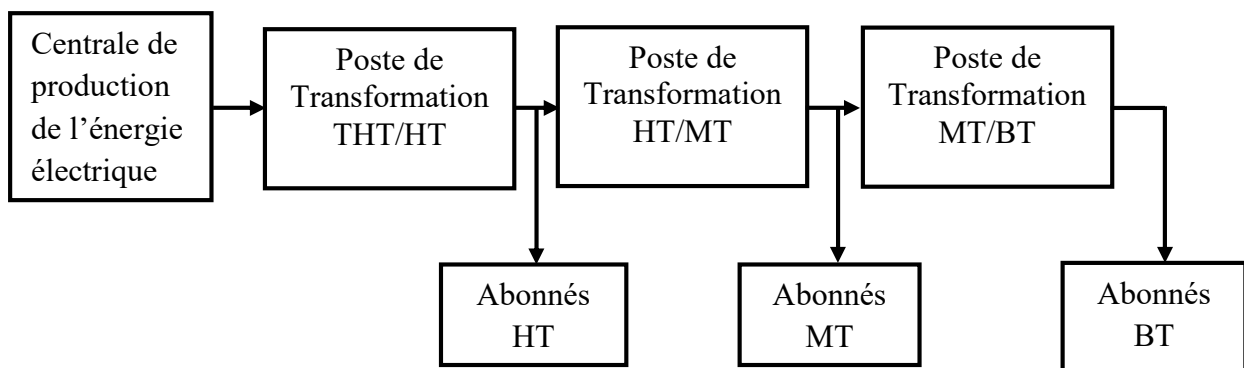
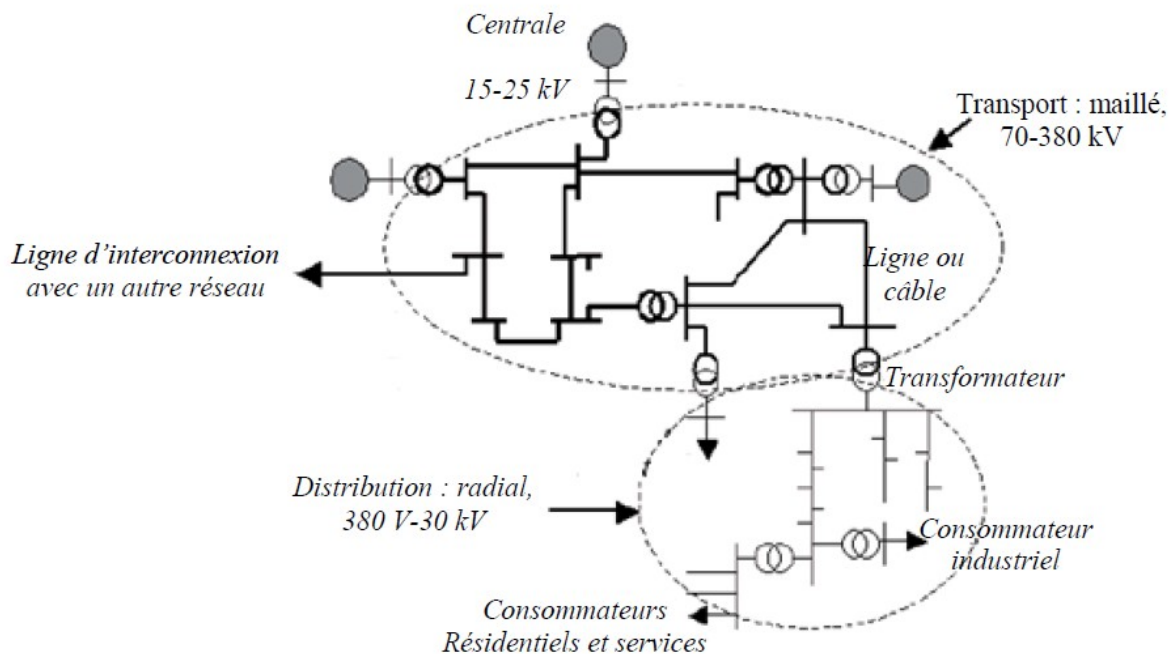


Figure I. 1: Schéma simplifié d'un réseau électrique

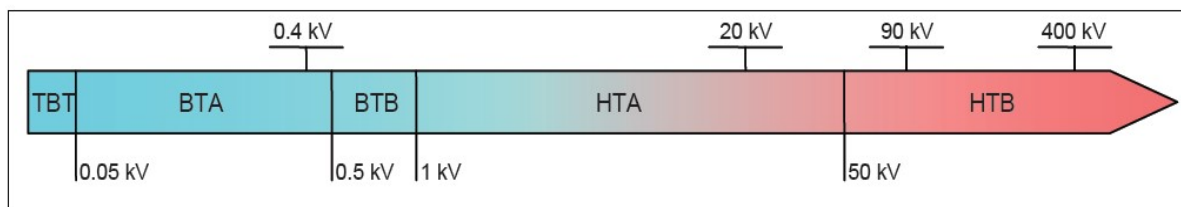


**Figure I. 2:** Structure d'un réseau électrique de transport et de distribution

### I.2.6. Niveaux de tensions

Les niveaux de tension utilisés diffèrent d'un type de réseau à un autre et diffèrent d'un pays ou d'une région à une autre. Selon la norme en vigueur en France UTE C18-510 qui définit les niveaux de tension alternative comme suit [4-6]:

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



**Figure I. 3:** Niveaux de tension normalisés

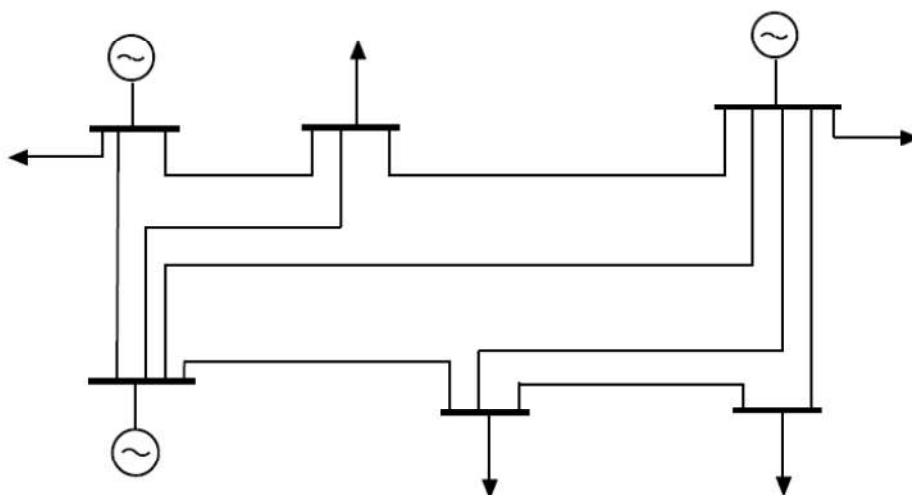
La nouvelle norme en vigueur en Algérie définit les niveaux de tension alternative comme suit [6,7]:

Domaines de tension		Valeur de la tension composée nominale (V)	
		Tension Alternative	Tension 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 ou MT	$1000 < U_n \leq 50\ 000$	$1500 < U_n \leq 75\ 000$
	HTB	$U_n > 50\ 000$	$U_n > 75\ 000$

**Tableau I-1 :** Tableau des domaines de tension en vigueur en Algérie (SONELGAZ)

### I.3. Structure topologique du réseau électrique

Le réseau électrique peut être présenté selon différents types de structures et d'architectures d'un qui sont définis suivant le niveau de tension, la puissance demandée et la sûreté requise. A partir de ces trois paramètres, on définit trois types de structures pour un réseau électrique. On utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieure, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution [8-10].



**Figure I. 4:** Structure maillée d'un réseau de transport

#### I.3.1. Réseaux maillés

Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux sous forme des boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet, les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques apportant une grande sécurité d'alimentation et une meilleure continuité de service (Figure I. 4).

### I.3.2. Réseaux bouclés

C'est un réseau maillé simplifié, présentant un certain nombre de boucles fermées. Chacune de ces boucles contient un nombre limité de sources.

Le réseau de répartition, qu'il alimente a une structure bouclée (Figure I.5) et peut alors être exploité soit en boucle fermée, soit en boucle ouverte. Certaines alimentations se font aussi en antenne ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes différents.

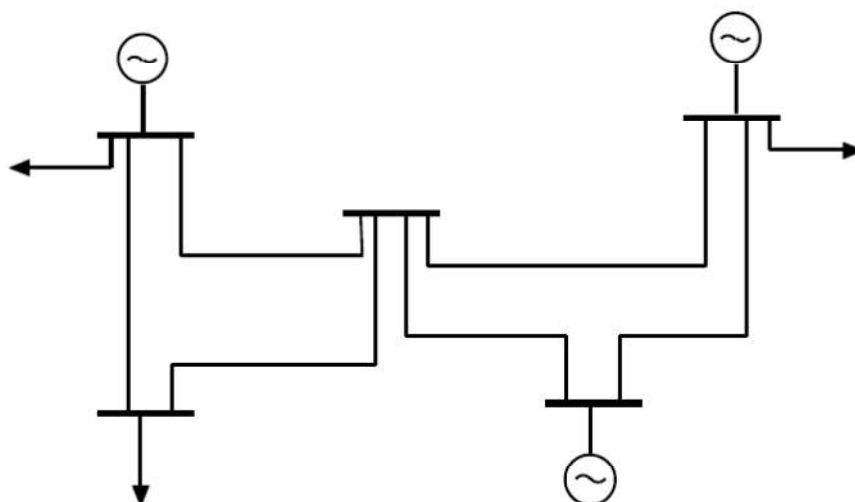
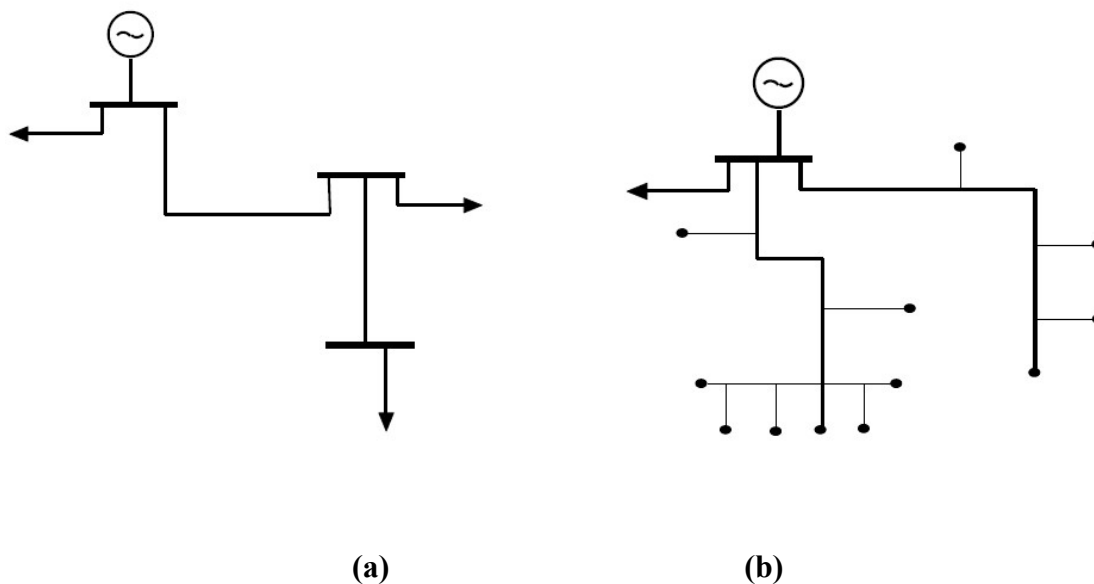


Figure I. 5: Structure bouclée d'un réseau de transport

### I.3.3. Réseaux radiaux

Leur configuration est celle rencontrée dans l'exploitation des réseaux de distribution à moyenne tension qui assurent l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs, dont les sources de tension sont constituées d'un ou plusieurs transformateur(s) abaisseur(s). On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux aux structures en antenne (Figure I.6.a) ou radiale (Figure I.6.b).



**Figure I. 6:** Structure radiale d'un réseau de transport

#### I.4. Eléments indispensables du réseau électrique

L'énergie électrique est généralement transportée à l'aide d'un groupe d'éléments de base tels que des conducteurs qui forment les lignes aériennes et les câbles souterrains, les pylônes et les isolateurs.

##### I.4.1. Pylônes

Le rôle des pylônes est de maintenir les conducteurs des lignes aériennes à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées au voisinage des lignes. Ils sont généralement réalisés en treillis d'acier. Il en existe plusieurs sortes, dont le choix dépend des lignes à installer, de l'environnement, de la tension de fonctionnement et du terrain et des conditions climatiques locales [10-12].

##### I.4.2. Lignes aériennes

Les lignes aériennes servent à acheminer l'électricité. Le courant utilisé étant triphasé, il y a trois phases par circuit. Chacune des phases peut utiliser 1, 2, 3 ou 4 câbles conducteurs, appelés faisceaux. Ces câbles sont «nus» car isolés par l'air. Une distance suffisante est maintenue entre les câbles et le sol pour assurer cette isolation. Plus le niveau de tension est élevé, plus cette distance est importante. On utilise en général des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium-acier ; on trouve aussi des conducteurs composés d'une âme centrale

en acier sur laquelle sont tressés des brins d'aluminium. Les lignes aériennes sont fixes à des supports de formes et d'importances très variées, la fixation se fait par l'intermédiaire d'isolateurs suspendus [10-12].



**Figure I.7 :** Pylône THT pour une ligne de 400kV



**Figure I.8 :** Ligne aérienne triphasée de transport d'énergie à doublé circuit

Les lignes électriques aériennes sont soumises à de nombreuses contraintes électriques, mécaniques et atmosphériques qui affectent leur conception. Elles doivent donc satisfaire certaines conditions de sécurité déterminées suivant le lieu de leur implantation.

La trajectoire de la ligne électrique aérienne suit rarement une ligne droite car elle prend en compte de différents paramètres :

- environnementaux : les forêts, les parcs naturels... ;
- humains : les villages, les exploitations agricoles, etc.



**Figure I.9** : Conducteurs ACSR (Aluminium Conductors Steel Reinforced) conventionnels (à gauche) et à noyau de carbone moderne (à droite)

### I.4.3. Isolateurs

Le rôle d'un isolateur de ligne aérienne est de relier mécaniquement les conducteurs sous tensions aux structures qui les supportent, et d'assurer l'isolement électrique entre ces deux parties. Celui-ci est réalisé en verre, en céramique, ou en matériau synthétique. Les isolateurs en verre ou céramique ont en général la forme d'une assiette. On les associe entre eux pour former des chaînes d'isolateurs. Plus la tension de la ligne est élevée, plus le nombre d'isolateurs dans la chaîne est important. On distingue deux principaux types d'isolateurs : les isolateurs rigides et les éléments de chaîne [10-12].



**Figure I.10 :** Chaîne d'isolateurs à long fût

#### **I.4.4. Câbles de garde**

Ils ne transportent pas le courant. Ils sont placés au-dessus des conducteurs. Ils sont plus tendus que ceux-ci pour assurer une bonne protection contre la foudre. Ils sont en général réalisés en almélec-acier. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant [10-12].

#### **I.4.5. Câbles souterrains**

Les câbles souterrains de très haute tension THT sont principalement employés pour le transport et la distribution de l'énergie électrique dans les zones fortement urbanisées.

La mise en souterrain des lignes de transport présente notamment l'avantage de protéger les lignes des effets du climat (tempêtes, chutes de neige, foudre ...) et de respecter certaines exigences environnementales, elles peuvent être posées de plusieurs façons, selon le terrain et l'environnement : en fourreaux PVC enrobé de béton, en ville, ou en fourreaux , à la campagne, en galerie, dans les grandes villes, en caniveau, elles sont alors recouvertes de béton armé, en sous-œuvre ou en micro tunnels, pour franchir un obstacle comme une voie ferrée ou un fleuve [10-12].

Les principales composantes d'un câble souterrain sont : une âme conductrice au permet de transporter l'électricité, puis une isolation électrique (polyéthylène) pour empêcher le courant

de s'écouler vers la terre, le tout est entouré d'une gaine métallique afin de confiner le champ électrique à l'intérieur du câble et d'une protection extérieure qui assure de bonnes propriétés mécaniques et le protège des agressions extérieures [10-12].



**Figure I.11:** Section d'un câble de transport d'énergie HT à isolation synthétique

#### **I.4.6. Postes électriques**

Un poste électrique est un élément du réseau électrique servant à la fois à la transmission et à la distribution d'électricité. Les postes électriques reçoivent l'énergie électrique puis la transforment pour passer d'une tension à une autre, avant de la répartir vers d'autres lignes jusqu'aux distributeurs et aux clients industriels. Chaque poste se compose de transformateurs, de disjoncteurs et de sectionneurs. Il en existe 3 types : Les postes aériens, dits «classiques» que l'on trouve surtout à la campagne, les Postes Intérieurs Modulaires (PIM), dont la tension est limitée à 63 000 ou 90 000 volts, implantés en milieu rural et à la périphérie des villes, les postes en bâtiments, plus puissants, qui sont implantés dans les grandes agglomérations [10-12].

#### **II.4.7. Transformateurs**

Les transformateurs ont un rôle essentiel dans la distribution électrique en adaptant la tension de distribution de la centrale de production à l'utilisateur. C'est une machine électrique statique qui permet de faire transiter la puissance électrique en courant alternatif depuis la centrale de production d'électricité jusqu'à son utilisateur final avec un minimum de pertes, à différents niveaux de tensions. Il sert à augmenter ou diminuer la tension électrique, il est

utilisé dans les centrales électriques, les sous-stations, les quartiers d'habitation et les zones industrielles, selon l'endroit du réseau où ils se trouvent [10-12].



**Figure I.12 :** Poste de distribution sur support



**Figure I.13.** Transformateur de puissance d'un poste électrique HT

#### **I.4.8. Appareillage électrique**

On désigne sous le terme appareillage électrique l'ensemble du matériel permettant la protection et l'exploitation sûre et ininterrompue d'un réseau électrique. L'appareillage électrique permet d'adapter, à chaque instant, la structure du réseau aux besoins de ses

utilisateurs, producteurs et consommateurs d'électricité, et de préserver, totalement ou partiellement, cette fonction en cas d'incident. On peut citer les sectionneurs, les fusibles, les contacteurs et les relais thermiques.

Selon la Commission électrotechnique internationale (CEI), l'appareillage électrique est un terme général applicable aux appareils de connexion et à leur combinaison avec des appareils de commande, de mesure, de protection et de réglage qui leur sont associés [10-12].

### **I.5. Avantages et inconvénients des lignes aériennes et des câbles souterrains**

Les avantages et les inconvénients de l'utilisation des lignes aériennes et des câbles souterrains dans les réseaux électriques sont présentés comme suit [13,14] :

#### **I.5.1. Lignes aériennes de transport d'énergie électrique**

##### **a) Avantages**

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

##### **b) Inconvénients**

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

#### **I.5.2. Câbles souterrains de transport d'énergie électrique**

##### **a) Avantages**

- Constituent la seule solution possible dans les agglomérations denses;
-

- Sont soustraites aux surtensions d'origine atmosphérique ;
- Ne causent pas d'interférences avec les circuits de télécommunications et les réceptions de radiodiffusion et télévision;
- Seule solution possible pour traverser de larges fleuves ou des bras de mer lorsque la distance franchir dépasse 3 km.

**b) Inconvénients**

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

**I.6. Conclusion**

Ce premier chapitre consacré aux généralités comporte d'abord quelques notions sur la production, le transport et la distribution de l'énergie, la classification des tensions selon les normes de la Commission Electrotechnique Internationale (CEI) et les différentes structures topologiques des réseaux électriques et leurs différents éléments constitutifs. Les lignes et les câbles constituent des circuits de transmissions de l'énergie électrique des centres de productions (centrale électrique) jusqu' aux consommateurs. On a mentionné leurs avantages et inconvénients sous forme de comparaison entre les deux moyennes de transport de l'énergie électrique.

# **Chapitre II:**

## **Calcul mécanique d'une ligne aérienne**

## **II.1. Introduction**

Les lignes aériennes de transport d'énergie électrique à haute tension et très haute tension parcourent souvent de longues distances afin d'assurer la fonction "transport de l'énergie" sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs. Elles traversent en général des régions très différentes, de par leur relief (topographie du terrain, altitude, etc.), leur climat (température, pression, vent, etc.), leur environnement (zones industrielles, régions côtières, etc.). De ce fait, les équipements de transport d'énergie électrique sont exposés à diverses formes et degrés de contraintes et à des surcharges accidentelles en cas de givre ainsi qu'à des balancements dissymétriques par fort vent qui pourrait les amener en contact si l'on ne prévoyait pas une distance suffisante entre conducteurs.

Le présent chapitre porte d'un rappel sur le calcul mécanique et l'influence des variations des conditions environnementales sur les valeurs de la tension mécanique des conducteurs de phases de la ligne aérienne, ainsi ce chapitre consiste à citer les différents types de surcharges.

## **II.2. Définitions des éléments indispensables dans l'étude mécanique**

### **II.2.1. La portée**

La portée est la distance parcourue sur un axe horizontal entre deux appuis successifs et s'exprime en mètres. Cela dépend du type de ligne électrique selon les zones urbaines et rurales, soit dans le transport et dans la distribution de l'électricité. C'est une référence essentielle pour la conception de la ligne car des calculs mécaniques sont effectués pour chaque portée. Les portées peuvent être souvent irrégulières dans un même canton (ne sont pas de longueurs égales) [15,16].

### **II.2.2. La flèche**

La flèche est considérée comme la distance verticale maximale entre la droite joignant les deux attaches et les conducteurs de la ligne aérienne, elle dépend de la tension de réglage de la ligne aérienne et varie ensuite sous l'influence de la température et des surcharges sur la ligne aérienne. La flèche est choisie en fonction de la température maximale de conducteurs qui est généralement pris à 55 °C, c'est le cas considéré comme le plus défavorable. Pratiquement, quand les deux points d'attache sont à même hauteur, la flèche correspond à la « flèche au milieu de la portée » ou, plus brièvement, « flèche à mi-portée » [15,16].

---

### II.2.3. Le paramètre

C'est une notion mathématique, exprimé en mètre, elle ne peut pas être mesurée directement sur le terrain. Pour les lignes aériennes, la courbe formée par le conducteur peut être assimilée à une parabole. Sur le schéma ci-dessous, le paramètre  $P$  représente le rayon de courbure du cercle tangent au sommet de la parabole [15,16]:

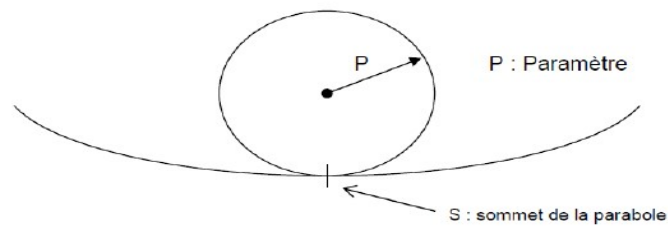


Figure II. 1: Représentation paramètre d'un conducteur

### II.2.4. Le canton

Un canton est une succession des portées tant que les armements sont en alignement, autre sens, une partie de ligne aérienne entre 2 supports d'arrêts avec ancrage du câble, le support a un comportement mécanique qui est considéré soit souple, soit rigide selon sa nature et son orientation. Les fonctions Arrêt-Simple, Arrêt-Double et Semi-Arrêt représentent les limites des cantons. Une limite de canton permet d'éviter une rupture en cascade de toute la ligne en cas d'incident. Selon la norme NFC 11-201, un canton ne doit pas dépasser 15 portées [15,16].

### II.2.5. La caténaire

Dans la physique et la géométrie, une caténaire (chaînette) est la courbe qu'une suspension idéalisée chaîne ou câble assume sous son propre poids lorsqu'il est supporté seulement à ses extrémités. Les lignes électriques aériennes à suspension libre forment également une caténaire (surtout visible avec les lignes à haute tension, et avec quelques imperfections à proximité des isolateurs). La courbure de la caténaire a une forme en U [15,16].

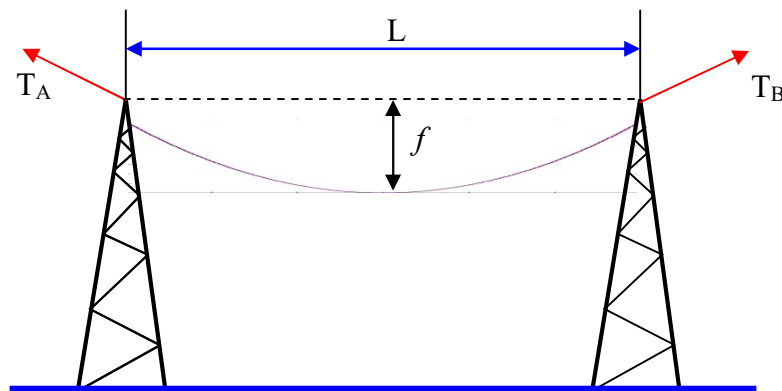
### II.2.6. La parabole

Elle peut se définir mathématiquement de plusieurs façons, équivalentes. Le plus souvent, la parabole est définie comme une courbe plane et symétrique par rapport à un axe fixe, tous les

points sur la parabole sont à même distance d'un point fixe appelé foyer de la parabole et d'une droite fixe, appelée directrice [15,16].

### II.3. Calcul mécanique d'une ligne aérienne HT

Les lignes de transport aériennes se constituent d'une série de portées continues où les câbles, soit conducteurs, soit de garde, restent suspendus au moyen de supports. Les conducteurs aériens de transmission sont en général flexibles, et de poids réparti uniformément le long de la longueur du câble. En raison de ces caractéristiques, ils prennent la forme d'une caténaire entre deux points fixes de soutien. Par conséquent, Le calcul mécanique est la détermination des contraintes mécaniques et des flèches de soutien des câbles. Ce calcul doit être en termes de module d'élasticité et coefficient de dilatation, correspondant à la proportion dans laquelle ils sont en aluminium ou en acier [17-20].



**Figure II. 2:** Câble suspendu entre deux points fixes au même niveau

Avec :

$T$  : La projection horizontale de la tension du conducteur (kg);

$f$  : La flèche du conducteur (m)

$L$  : La portée longitudinal du conducteur (m)

Dans l'établissement d'un projet de ligne, il faut en premier lieu, définir les conditions climatiques suivantes :

- Les températures,
- L'action du vent,
- Les surcharges éventuelles de givre.

Pour la pose d'un conducteur, ces conditions sont nécessaires à prendre en compte pour déterminer les contraintes suivantes :

- La garde au sol et distance réglementaire

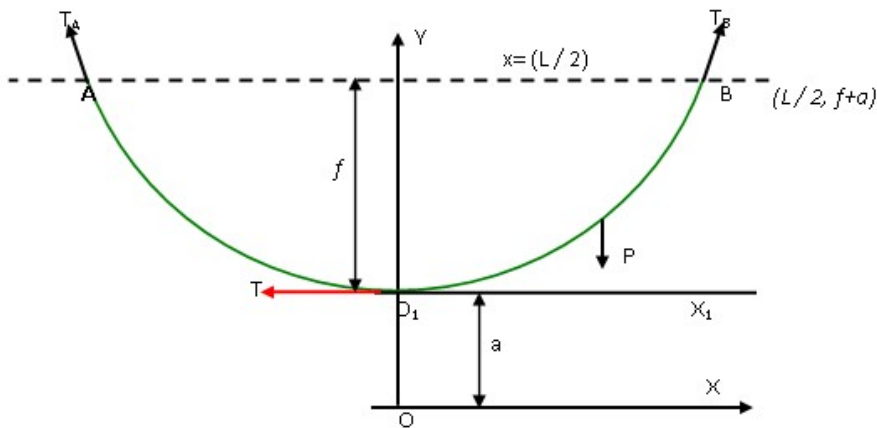
- la tension de rupture
- la portée maximale

Dans le but d'assurer que, les variations des flèches n'entraînent pas un rapprochement dangereux des conducteurs vers le sol ou vers tous les autres obstacles, la tension mécanique au cours des variations qu'elle subit ne dépasse pas le maximum admissible et la résistance de la rupture du conducteur n'est pas excédée [17-20].

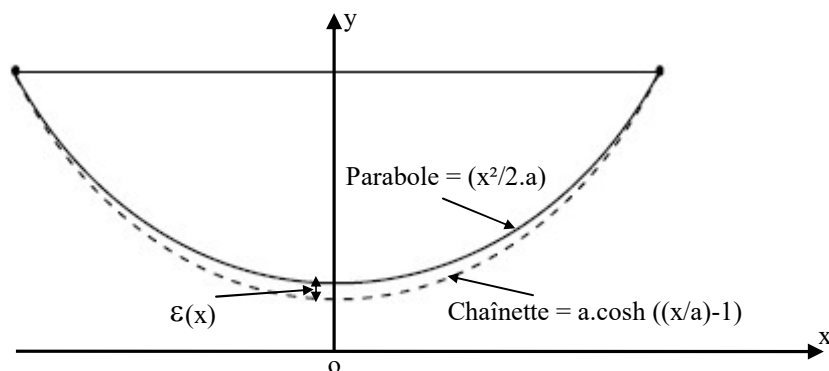
**II.3.1. La Courbe d'équilibre d'un conducteur**

L'équation de la chaînette rapportée à la géométrie de la ligne aux axes OX et OY peut être représentée par la formule suivante) [17-20]:

$$y(x) = a \cdot \left[ \cosh\left(\frac{x}{a}\right) - 1 \right] \tag{II-1}$$



**Figure II.3:** Représentation de la chaînette



**Figure II.4:** Représentation de la parabole et de la chaînette

Où : a est une quantité définie comme étant le rapport entre la projection horizontale de la

Tension mécanique  $T$  et son poids linéique  $p_c$ . Elle est appelée "paramètre" du conducteur et est exprimée selon l'équation donnée ci dessous [17-20]:

$$a = \frac{T}{p_c} \quad (\text{II-2})$$

Nous adoptons les notations suivantes :

$T$  : la projection horizontale de la tension du conducteur (kg);

$p_c$  : poids linéique du conducteur sur une longueur de 1 mètre (kg/m);

$a$  : le paramètre du conducteur (m).

Dans cette équation le paramètre  $a$  est représenté par la distance  $OO_1$  entre l'origine des axes De coordonnées  $O$  et le sommet de la courbe  $O_1$  (figure II.3). Le paramètre  $a$  est compris entre plusieurs centaines de mètres et deux à trois mille mètres [17-20].

La chaînette est souvent assimilée approximativement à une parabole (figure II.4), ce qui simplifie les formules, et est valable pratiquement dans toutes les applications. L'équation d'équilibre de la parabole rapportée à son axe  $Oy$  et à sa tangente au sommet  $O_1x_1$  est :

$$y(x) = \frac{x^2}{2 \cdot a} \quad (\text{II-3})$$

### II.3.2. Coefficient de sécurité

Le coefficient de sécurité  $C_s$  est un facteur multiplicateur qui représente le rapport de la charge de rupture du conducteur par l'effort sur le conducteur au cas le plus défavorable donc le réglage des conducteurs est déterminé de manière que, dans la plus défavorable des deux hypothèses réglementaires, soit [17-20].

$$C_s = \frac{CRN}{T} \quad (\text{II-4})$$

Avec :

$T$ : tension de l'effort appliquée sur le conducteur -

$CRN$ : charge de rupture nominale du conducteur

D'après la norme NF C 11-201, le coefficient de sécurité (CS) est pris égal à :

➤  $C_s = 3$  pour les pièces travaillant à la traction (conducteurs, chaînes d'isolateurs, accessoires, etc.).

➤  $C_s = 2.1$  pour les pièces travaillant à la flexion (supports métalliques, ferrures, etc.).

### II.3.3. La flèche d'un conducteur

La flèche des conducteurs joue un rôle très important dans la conception mécanique et l'entretien des lignes de transport d'électricité. Du côté pratique n'est pas souhaitable de prévoir un affaissement trop élevé ou trop faible [17-20].

La flèche  $f$  est la distance verticale qui sépare un point d'abscisse  $x$  de la droite joignant les points d'accrochage A et B (figure II.3). Elle a un rôle important dans l'étude et la construction d'une ligne pour une portée de niveau, la flèche  $f$  de la parabole au milieu de la portée

s'obtient en fonction de la portée  $x$ , en faisant dans l'équation (II.2)  $x = \frac{L}{2}$ , d'où :

$$f = \frac{L^2}{8.a} \quad (\text{II-5})$$

Avec:

$L$  : portée de la ligne (m)

$f$  : flèche de la ligne (m)

Passons à la chaînette, on obtient la flèche en opérant comme ci-dessus et en soustrayant le paramètre  $a = OO_1$ , soit [17-20] :

$$f = a \left[ \cosh\left(\frac{L}{2.a}\right) \right] \quad (\text{II-6})$$

### II.3.4. La longueur du câble

L'arc de chaînette  $AB$  (figure.II. 3) s'obtient en intégrant l'élément différentiel de longueur d'arc  $d\ell$  [17-20]:

$$d\ell = \left( \sqrt{1 + y'^2} \right) dx \quad (\text{II-7})$$

Où :  $y'$  est la dérivée de la fonction  $y(x) = a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right)$  qui représente la chaînette.

$$y' = \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (\text{II-8})$$

Et l'élément différentiel devient :

$$d\ell = \left( \sqrt{\cosh^2\left(\frac{x}{a}\right)} \right) dx \quad (\text{II-9})$$

Pour une portée de niveau, la longueur d'arc est ainsi :

$$\ell = 2 \cdot \int_0^{L/2} \cosh\left(\frac{x}{a}\right) dx = 2.a \cdot \sinh\left(\frac{L}{2.a}\right) \quad (\text{II-10})$$

Où : L est la portée du conducteur entre les points A et B supposés de niveau (symétriques par rapport à Oy).

La longueur d'un arc de la parabole se déduit On retient, en fait, les deux premiers termes de du développement en série du sinus hyperbolique [17-20].

$$\ell = L + \frac{L^3}{24 \cdot a^2} \quad (\text{II-11})$$

### II.3.5. Tension mécanique en un point quelconque du câble

La tension  $T_x$  dans le conducteur à une distance x du point bas de la chaînette est [17-20]:

$$T_x = \frac{T_0}{\cos \theta} = T_0 \cdot \sqrt{(1 + y')^2} \quad (\text{II-12})$$

D'où :

$$T_x = T_0 \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \quad (\text{II-13})$$

Et, avec la relation (II.1) :

$$T_x = P_c \cdot a \cdot \cosh\left(\frac{x}{a}\right) = P_c \cdot y \quad (\text{II-14})$$

Cette dernière relation signifie que la tension tangentielle en un point A d'abscisse  $x_A$  a pour valeur soit le poids d'un câble identique dont la longueur est égale à l'ordonnée  $y_A$  du point A, soit la tension  $T_0$  au point bas augmenté du poids d'un câble identique dont la longueur est égale à la différence des ordonnées du point A et du point bas de la chaînette [17-20].

La tension du câble au droit des appuis A et B (points de suspension) [17-20].

Sachant que

$$T_x = T_0 \cdot \cosh\left(\frac{x \cdot P_c}{T_0}\right) \quad (\text{II-15})$$

En faisant dans l'équation (2)  $x = \frac{a}{2}$ , d'où

$$T_A = T_B = T_0 \cdot \cosh\left(\frac{a \cdot P_c}{2 \cdot T_0}\right) \quad (\text{II-16})$$

La tension du câble au droit des appuis A et B pour un arc de la parabole s'écrit comme suit:

$$T_A = T_B = \sqrt{T_0^2 + \left(a \cdot \frac{P_c}{2}\right)^2} \quad (\text{II-17})$$

#### II.4. La flèche d'un conducteur dans le cas d'une portée dénivelée

Considérons tout d'abord une portée inclinée (figure II.5). Pour obtenir une bonne approximation de la courbe d'équilibre de la portée inclinée, on peut simplement considérer une chaînette dont le point le plus bas coïncide avec le point le plus bas de la portée [17-20].

On suppose, pour plus de commodité, que le câble est soumis uniquement au champ de la pesanteur. Si  $x_a$  et  $x_b$  sont respectivement les abscisses des extrémités A et B de la portée et  $x_m$  celle de son point milieu M, on a :

$$x_b - x_a = L = \text{portée}$$

$x_a, y_a$  : coordonnées du point A : extrémité aval de la portée

$x_b, y_b$  : coordonnées du point B : extrémité amont de la portée

$h = y_b - y_a$  : dénivelée de la portée.

Pour une portée dénivelée, d'après la figure II.5, on la relation :

$$x_m = \frac{x_a + x_b}{2} \quad (\text{II-18})$$

La flèche au point d'abscisse  $x_m$  est :

$$f = NM = y_N - y_M = \frac{y_a + y_b}{2} - y_M \quad (\text{II-19})$$

On substitue l'équation de la chaînette dans la relation précédente, on a alors :

$$f = \frac{a}{2} \left[ \cosh\left(\frac{x_a}{a}\right) + \cosh\left(\frac{x_b}{a}\right) \right] - a \cdot \cosh\left(\frac{x_M}{a}\right) \quad (\text{II-20})$$

La flèche en fonction de  $x_M$  sera:

$$f = a \cdot \cosh\left(\frac{x_M}{a}\right) \cdot \left[ \cosh\left(\frac{L}{2a}\right) - 1 \right] \quad (\text{II-21})$$

La flèche en fonction de  $x_a$  sera:

$$f = a \cdot \left[ \cosh\left(\frac{x_a}{a}\right) - \cosh\left(\frac{L/2 - x_a}{a}\right) \right] + \frac{h}{2} \quad (\text{II-22})$$

La formule approchée de la flèche (parabole), en portée dénivelée, devient [17-20] :

$$f \approx \frac{L^2}{8.a} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2} \quad (\text{II-23})$$

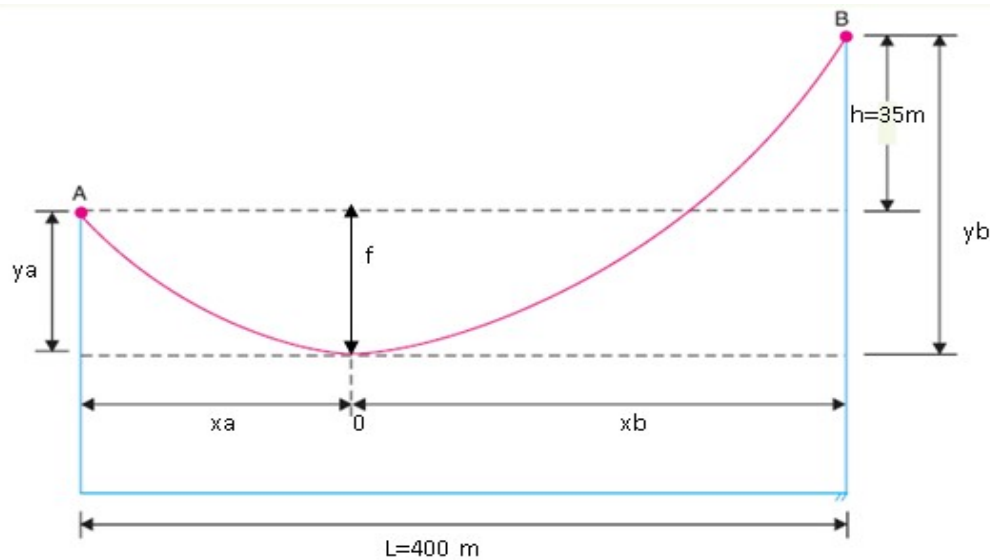


Figure II.5 : Calcul des dimensions géométriques d'une portée dénivelée

La longueur d'un arc de chaînette se déduit aisément de la relation [17-20]:

$$dl = \left(\sqrt{1 + y'^2}\right) \cdot dx = \cosh\left(\frac{x}{a}\right) \cdot dx \quad (\text{II-24})$$

Soit :

$$l_{AB} = \left[ a \cdot \sinh\left(\frac{x}{a}\right) \right] \cdot \left( \frac{x_b}{x_a} \right) = 2.a \cdot \sinh\left(\frac{L}{2.a}\right) \cdot \cosh\left(\frac{x_M}{a}\right) \quad (\text{II-25})$$

Pour la formule approximative de la parabole, la longueur est calculée suivant la formule donnée ci-dessous [17-20]:

$$l_{AB} \approx \frac{L}{\cos \psi} + \frac{8 \times f^2 \times \cos^3 \psi}{3 \times L} \quad (\text{II-26})$$

Avec:

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2}} \quad (\text{II-27})$$

Les coordonnées cartésiennes des extrémités, peuvent être déterminées comme suit [17-20]:

- Pour la chaînette :

$$x_a = -a \cdot \left[ \sinh^{-1} \left( \frac{h/d}{\left[ \sinh\left(\frac{L}{a}\right) \right]^2 - \left[ \cosh\left(\frac{L}{a}\right) - 1 \right]^2} \right) - \operatorname{tgh}^{-1} \left( \frac{\cosh\left(\frac{L}{a}\right) - 1}{\sinh\left(\frac{L}{a}\right)} \right) \right] \quad (\text{II-28})$$

- Pour la parabole :

$$\begin{aligned} x_a &= \frac{L}{2} - \frac{a \cdot h}{L} \\ x_b &= L - x_a \end{aligned} \quad (\text{II-29})$$

## II.5. L'effet des contraintes environnementales

Généralement, le conducteur électrique aérien est soumis à l'action des facteurs atmosphériques et météorologiques tels que la température, vent, pluie et le givre et doivent par conséquent être choisis de façon à résister à toutes ces intempéries [17-20].

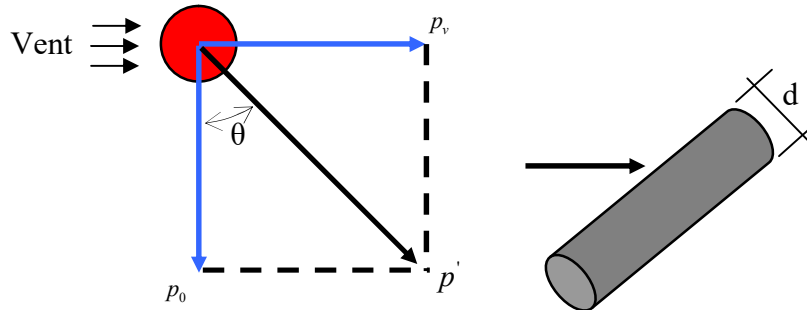
### II.5.1. Équation de changement d'état

Les expressions de la flèche et de longueur d'arc établies au paragraphe précédent ont été établies pour un conducteur à l'équilibre, avec une portée de niveau, soumis uniquement à l'action de son poids propre. Dans la réalité, Toutes les modifications à prévoir dans le fonctionnement mécanique des lignes se reflètent dans une relation appelée (équation du changement d'état). Pour effectuer le calcul mécanique d'un conducteur est nécessaire de connaître les forces agissant sur elle. Le premier fait à considérer est le propre poids du câble, mais aussi en raison de surcharges importantes existent des intempéries (givre et / ou du vent). De plus, le vent, la neige ou le givre, quand ils agissent uniformément sur toute la portée, changent le poids linéique du câble, le poids de la neige ou du givre s'ajoutant arithmétiquement au poids propre du câble et l'effet du vent s'ajoutant géométriquement [17-20].

### II.5.2. L'effet du vent sur les lignes électriques aériennes

Le vent influe sur les lignes électriques aériennes en exerçant une pression sur les conducteurs, qui est proportionnelle au carré de la vitesse du vent et la surface exposé, pour un vent horizontal de vitesse  $v$  constante, agissant perpendiculairement à la portée, et pose donc une force par unité de longueur, chaque mètre de conducteur est soumis à une poussée

$\overline{p_s}$  de direction horizontale. Il est soumis d'autre part au poids  $\overline{p_0}$  de direction verticale, la (figure II.6) montre l'effet du vent sur un conducteur [17-20].



**Figure II.6 :** l'effet du vent sur un conducteur

D'après le triangle formé à la (figure II.6), ces deux forces se composent en une résultante ( $p_c$ ) de module [17-20]:

$$p_c = \sqrt{p_0^2 + p_v^2} \quad (\text{II-30})$$

Faisant avec la verticale un angle ( $\theta$ ) défini par :

$$\text{tg}(\theta) = \frac{p_v}{p_0} \quad (\text{II-31})$$

$p_c$  est appelé poids apparent du câble par unité de longueur (kg / m).

La force ( $p_v$ ) par unité de longueur en Kg / m, peut être calculée par la suivante expression [17-20] :

$$p_v = P.d = 0.007.K.V^2.d. \quad \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}} \right) \quad (\text{II-32})$$

Où:

P : Pression du vent

V : la vitesse relative du vent par rapport au conducteur (km / h)

d : le diamètre du conducteur (m).

K : Facteur de correction.

Par exemple, pour une surface plane, la constante K est égal à 1. Si la surface exposée au vent a une certaine forme aérodynamique, tels que pour un conducteur électrique de forme cylindrique [17-20].

$K = 0,6$  pour les câbles d'un diamètre égal ou inférieur à 16 mm ;

$K = 0,5$  pour les câbles dont le diamètre dépasse 16 mm.

La relation entre le poids ( $p_c$ ) apparent et le poids du conducteur ( $p_0$ ) est appelée Coefficient de surcharge ( $m$ ) , elle est exprimé par [17-20] :

$$m = \frac{P_c}{p_0} \quad (\text{II-33})$$

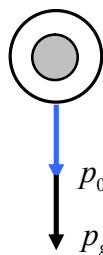
Le conducteur est encore soumis à un champ de forces uniforme et prend la forme d'une chaînette dans le plan P défini par les deux points d'accrochage A et B et par la direction de  $\vec{p}$  pour une portée de niveau le paramètre de la chaînette est alors [17-20] :

$$a' = \frac{T'}{P_c} \quad (\text{II-34})$$

$T'$  : étant la tension (de valeur minimale) au point du conducteur où la tangente est perpendiculaire à  $\vec{P}$  . Cette tangente n'est horizontale que pour les portées de niveau et correspond alors au milieu M du conducteur.

### II.5.3. L'effet du givre sur les lignes électriques aériennes

On désigne sous le nom givre l'une quelconque des formes de l'eau, neige collante, verglas, La glace peut se former autour du conducteur augmente sensiblement le même poids, donc la tension monte et peut atteindre d'endommagé les câbles. , cette condition s'applique à des zones géographiques basses température [17-20].



**Figure II.7** : l'effet de la glace sur un conducteur

Avec:

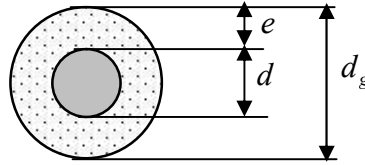
$p_g$  = Poids de la glace (kg / m)

La glace agit verticalement comme le poids propre du câble, afin que les deux forces doivent être additionnées [17-20].

$$p_c = p_0 + p_g \quad (\text{II-35})$$

$p_c$  : Le poids apparent du câble.

Le poids de la glace peut être calculé en utilisant le critère de l'épaisseur de la glace [17-20].



**Figure II.8:** calcul du poids de la glace

$$p_g = \rho_g \cdot \frac{\pi}{4} (d_g^2 - d^2) = \rho_g \cdot \frac{\pi}{4} ((d + 2.e)^2 - d^2) \quad (\text{II-36})$$

$$p_g = \rho_g \cdot \pi \cdot e \cdot (d + e) \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}} \right]$$

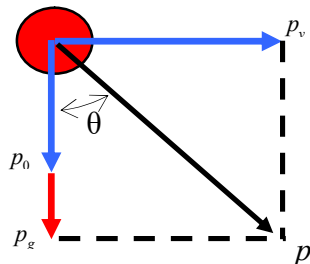
Où :

$\rho_g$  = Poids spécifique de la glace ( $\text{kg} / \text{m}^3$ )

$e$  = épaisseur de la gaine de glace (m)

$d$  = Diamètre du câble (m)

Également, si le câble simultanément est soumis à l'action des surcharges du vent et de la neige (glace), ce qui augmente le poids apparent [17-20].



**Figure II.9 :** Surcharge du vent et de glace sur un conducteur

La force résultante est la somme vectorielle de toutes les forces que subit le câble, elle est calculée comme suit [17-20]:

$$p_c = \sqrt{(p_0 + p_g)^2 + p_v^2} \quad (\text{II-37})$$

Avec :

$$p_v = P.(d + 2.e) \quad (\text{II-38})$$

#### II.5.4. L'effet de la Température sur les lignes électriques aériennes

L'accroissement de la température va provoquer un allongement du conducteur et donc une détente de sa tension, pour une portée de niveau, dont les appuis sont rigoureusement fixes, Pour ce faire, nous allons supposer que le conducteur est homogène, c'est-à-dire que le module d'élasticité E (module de Young) et le coefficient de dilatation linéaire sont constants. Nous connaissons la température du conducteur, le poids apparent du conducteur et la tension du conducteur dans un état initial qui correspond respectivement à [17-20].

Soit un conducteur homogène passant de l'état 1 à un autre l'état 2.

##### L'État initial

$\theta_1$  : Température du conducteur du première état

$T_1$  : tension du conducteur du premier état

$a_1$  : paramètre du conducteur du premier état

On veut déterminer quelle sera la tension dans le conducteur dans un autre état final caractérisé par [17-20]:

##### L'état final

$\theta_2$  : Température du conducteur du deuxième état

$T_2$  : tension du conducteur du deuxième état

$a_2$  : paramètre du conducteur du deuxième état

On sait que la longueur d'arc d'une portée de niveau (sous l'hypothèse d'un arc de forme parabolique)<sup>2</sup> qui correspondent aux deux états sont données respectivement [17-20]:

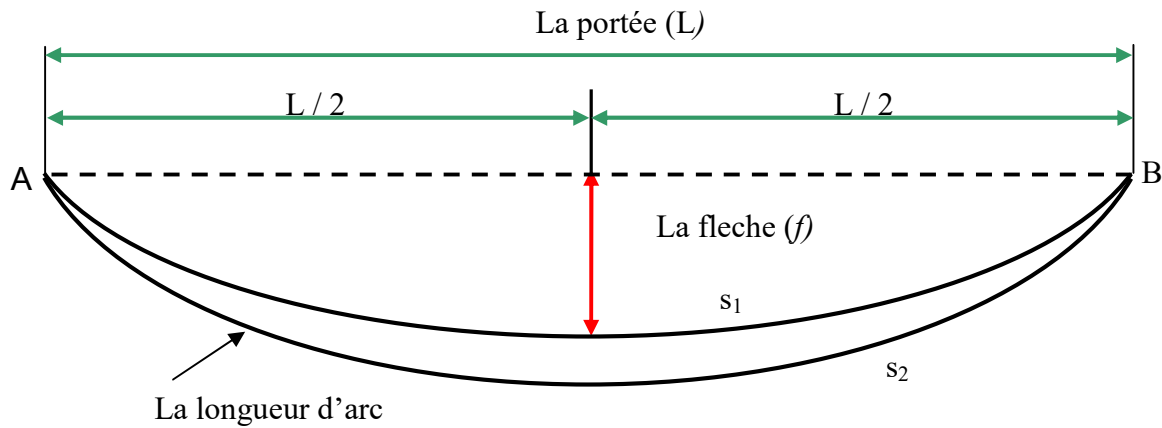
$$s_{1AB} = L + \frac{L^3}{24.a_1^2} \quad (\text{II-39})$$

$$s_{2AB} = L + \frac{L^3}{24.a_2^2} \quad (\text{II-40})$$

Où :

L: est la longueur de la portée ;

a: le rapport de la tension du conducteur sur son poids apparent  $\mu$ .



**Figure II.10 :** Paramètres d'une ligne, Flèche ( $f$ ), Portée ( $L$ ), Longueur d'arc ( $s$ )

Pour obtenir l'expression de l'équation d'état, il suffit de remarquer la différence de longueur d'arc entre l'état final et l'état initial, notée  $\Delta s_{AB}$  peut se déterminer aussi bien par la somme algébrique de (calcul) [17-20]:

$$\Delta s_{AB} = s_{2AB} - s_{1AB} = \frac{L^3}{24} \left( \frac{1}{a_2^2} - \frac{1}{a_1^2} \right) \quad (\text{II-41})$$

La différence de longueur est la somme de l'allongement élastique et de l'allongement thermique De l'allongement élastique [17-20].

$$s_{1AB} \cdot \frac{T_2 - T_1}{E \cdot S} \quad (\text{II-42})$$

Et de l'allongement thermique.

$$s_{1AB} \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{II-43})$$

Où :

$E$  est le module de Young du conducteur ( $\text{N/m}^2$ ) ;

$\alpha$  : le coefficient de dilatation linéaire du conducteur ( $1/\text{m.Kelvin}$ ) ;

$S$  : la section du conducteur.

Tandis que géométriquement, par définition de la parabole et de la longueur d'une courbe, il vient [17-20]:

$$\frac{L^3}{24} \left( \frac{m_2^2 \cdot p_c^2}{T_2^2} - \frac{m_1^2 \cdot p_c^2}{T_1^2} \right) = s_{AB} \cdot \frac{(T_2 - T_1)}{E \cdot S} + s_{AB} \cdot \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{II-44})$$

Où:

$m_1$  : L'état de charge du conducteur défini par le coefficient de surcharge;

$m_2$  : Le nouvel état de charge du conducteur défini par le coefficient de surcharge;

$p_c$  : Poids linéique du conducteur sur une longueur de 1 mètre.

En divisant les deux membres de l'équation par L, et en faisant l'hypothèse que  $s_{AB} \approx L$ , on obtient l'équation d'état [17-20]:

$$\frac{L^2}{24} \left( \frac{m_2^2 \cdot p_c^2}{T_2^2} - \frac{m_1^2 \cdot p_c^2}{T_1^2} \right) = \frac{(T_2 - T_1)}{E \cdot S} + \alpha \cdot (\theta_2 - \theta_1) \quad (\text{II-45})$$

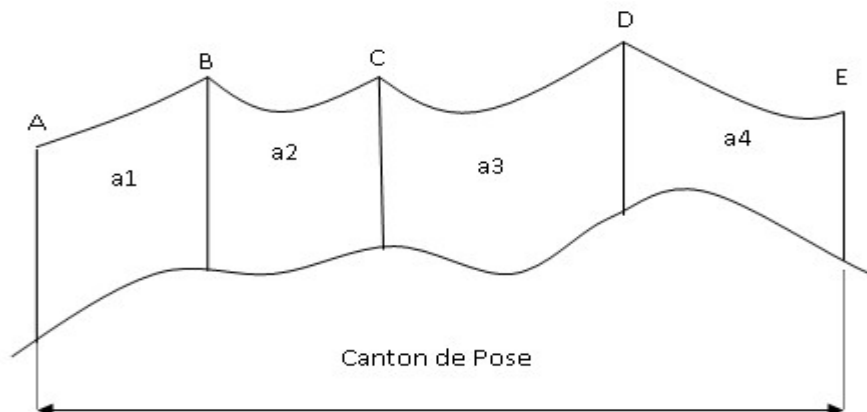
Cette équation est souvent écrite sous la forme suivante [17-20]:

$$\left[ \frac{m_2^2 \cdot p_c^2 \cdot L^2}{24 \cdot T_2^2} - \frac{T_2}{E \cdot S} - \alpha \cdot \theta_2 \right] = \left[ \frac{m_1^2 \cdot p_c^2 \cdot L^2}{24 \cdot T_1^2} - \frac{T_1}{E \cdot S} - \alpha \cdot \theta_1 \right] \quad (\text{II-46})$$

Cette équation (II-46) est nommée par l'équation de M. Blondel [17-20].

### II.5.5. Calcul de la portée équivalente

Les portées peuvent être souvent irrégulières dans un même canton, comme est montré sur la figure II-11[17-20].



**Figure II-11 : Calcul de la portée équivalente moyenne du canton de pose**

La portée équivalente du canton est calculée à partir de la formule suivante [17-20] :

$$l_{\text{éq}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n l_i^3}}{\sum_{i=1}^n l_i} \quad (\text{II-47})$$

**II.6. Espacement entre les conducteurs**

Avant de dimensionner le support des conducteurs, on doit calculer ses deux distances. Les distances verticale et horizontale entre deux conducteurs voisins et la hauteur d'un conducteur au dessus du sol [21].

**II.6.1. Distance minimale entre les conducteurs de phase**

L'écartement minimal entre les conducteurs voisins de phase pour une ligne HT est imposé par le type de pylône choisi. Pour une tension exprimée en kilovolt, l'écartement peut être calculé par la formule empirique suivante [21]:

$$Ec = \frac{U_N}{150} + k_c \sqrt{f + l_c} \quad (\text{II-48})$$

Dans laquelle:

Ec est l'écartement minimal horizontal entre conducteurs (m) ;

kc est un coefficient dépendant de la nature du conducteur, cuivre = 0,75 ; alu-acier = 0,80 ;

almélec = 0,90 ;

f est la flèche à la température maximale à 40 °C sans vent pour la portée considérée ;

L est longueur libre de la chaîne d'isolateurs (mètre) ;

L = 0.60 m pour une chaîne d'alignement à 4 éléments ;

L = 0.50 m pour une chaîne d'alignement à 3 éléments ;

L = 0.40 m pour une chaîne d'alignement à 2 éléments ;

$U_N$  : Tension complexe entre phases en Kv.

L'écartement minimal calculé par la relation précédente est diminué de 20% quand les deux conducteurs sont placés dans un plan horizontal, cette relation devient dans ce cas sous la forme [21]:

$$Eh = 0.8 \times \left( \frac{U_N}{150} + k_c \sqrt{f + l_c} \right) \quad (\text{II-49})$$

L'écartement minimal entre un conducteur de phase et un câble de garde doit être calculé suivant la relation ci-dessous [21]:

$$Epg = \sqrt{f} + \frac{U_N}{150} \quad (\text{II-50})$$

### II.6.2. Hauteur minimal d'un conducteur de phase au dessus du sol

La distance minimale de sécurité CL à respecter entre un conducteur de phase sous tension par rapport à la terre dépend de la tension de la ligne est calculée à partir de la formule empirique suivante [21]:

$$CL = 5.182 + 0.305 \times K \quad (\text{II-51})$$

Le coefficient K est donné par :

$$K = \left( \frac{U_N - 33}{33} \right) \quad (\text{II-52})$$

### II.7. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la partie de calcul des paramètres mécaniques de la ligne aérienne tout en prenant en considération la forme caténaire de la géométrie réelle de la ligne électrique et de la forme parabolique. Les conducteurs aériens sont influencés par des facteurs environnementaux (température, vent, givre,...etc.) et par la charge transitaire dans la ligne qui engendre des variations de la tension mécanique. Dans la partie mécanique, en prenant en considération les hypothèses climatiques et grâce à l'équation de changement d'état, on peut calculer plusieurs paramètres de la ligne (tensions, flèche.....etc.).

# **Chapitre III:**

## **Calcul électrique d'une ligne aérienne**

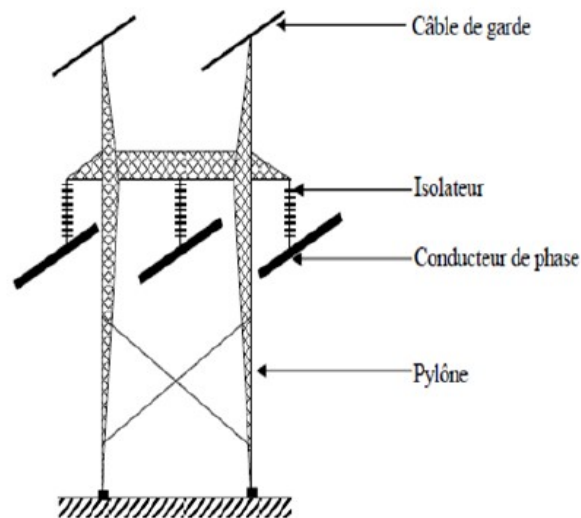
### III.1. Introduction

Le but des lignes aériennes est de transporter l'énergie électrique à partir des centrales électriques jusqu'au réseau de consommation (villes, quartier, maison, ensemble industriel). Les lignes électriques aériennes de transport constituent les artères d'un système d'énergie électrique. Elles sont caractérisées par des propriétés électriques (la résistance, l'inductance, la capacité et la conductance). L'inductance et la capacité sont dues aux effets de champ magnétiques et électriques autour du conducteur. Ces paramètres sont essentiels pour le développement le modèle de la ligne de transport, utilisé dans l'analyse de système énergétique. La conductance shunt justifie les courants de fuite coulant à travers les isolateurs et les voies ionisées dans l'air.

Ce chapitre est consacré à la détermination des paramètres électriques (résistance, l'inductance et de la capacité des lignes aériennes), également les paramètres caractéristiques et les constantes ABCD. Le champ électrique et l'induction magnétique, l'effet et les pertes dus au phénomène de couronne produit par les lignes aériennes ont été également discutés.

### III.2. Les lignes aériennes

Une ligne aérienne de transport sont constituées de conducteurs nus en aluminium (souvent un alliage pour renforcer les propriétés mécaniques), parfois avec une âme en acier, d'isolateurs et souvent d'un câble de garde, voir la figure (III-1). Les lignes de transport sont souvent portées sur des pylônes en acier, en bois ou en béton renforcé, ces lignes ont ces propres emprises (Right-of-way) qui sert généralement à installer, d'ajouter, d'entretenir et d'exploiter des ouvrages nécessaires au bon fonctionnement du système électrique [15,16].



**Figure III.1:** Schéma simplifié d'une ligne de transport aérien

Les pylônes en acier peuvent être à circuit simple ou à double circuit, ils sont destinés à supporter le poids des conducteurs et les charges extérieures. Une ligne de transport électrique a quatre paramètres, à savoir la résistance, l'inductance, la capacité et la conductance shunt. Ces derniers sont répartis uniformément sur toute la ligne électrique.

### III.3. Détermination des paramètres linéiques d'une ligne

Une ligne de transport d'énergie possède quatre paramètres importants qui affectent parfaitement sa capacité à fonctionner dans le cadre d'un système d'alimentation. À savoir, la résistance  $R$ , l'inductance  $L$ , la capacité  $C$  et la conductance  $G$ , cette dernière existe entre les conducteurs ou entre les conducteurs et le sol. La conductance tient compte du courant de fuite provient de la mauvaise isolation de la ligne aérienne. Souvent le système d'isolation est en bon état et les fuites sur les isolateurs des lignes aériennes sont très faibles, la conductance entre les conducteurs d'une ligne aérienne est généralement négligée [22-26].

#### III.3.1. La résistance de la ligne

La résistance des conducteurs de ligne de transmission est la cause la plus importante de perte de puissance de la ligne de transport, elle est un facteur très important dans le calcul de rendement du transport et dans les études économiques concernant les lignes de transport. La relation donnant la résistance  $R$  d'un conducteur cylindrique plein en courant continu de section constante (mais de forme quelconque), à une température spécifiée, est déterminée par [22-26]:

$$R_0 = \frac{\rho \times l}{S} \quad (\text{III-1})$$

Avec :

$\rho$ : la résistivité de conducteur ( $\Omega\text{m}$ )

$l$ : la longueur de conducteur (m)

$S$ : la section de conducteur ( $\text{m}^2$ )

La résistivité  $\rho$  est un coefficient qui caractérise la nature du conducteur ; plus la valeur de la résistivité est faible, plus le matériau est conducteur. En générale le constructeur donne la résistance linéique  $R_0$  du conducteur en ( $\Omega/\text{Km}$ ) à  $20^\circ\text{C}$ , d'où la résistance de la ligne devient:

$$R = R_0 \times l \quad (\Omega) \quad (\text{III-2})$$

La résistance de la ligne également de la température :

$$R_t = R \times (1 + \alpha(t - 20)) \quad (\text{III-3})$$

$\alpha$  est une constante de la température qui dépend du matériau de conducteur. Pour l'aluminium  $T = 228.1$

Matériau	Résistivité $\rho$ à 20 C° ( $\Omega \cdot m$ )	Coefficient de température $\alpha$ C°
Cuivre recuit	$1,72 \cdot 10^{-8}$	234.5
Cuivre écroui	$1,77 \cdot 10^{-8}$	241.5
Aluminium	$2.83 \cdot 10^{-8}$	228.1
Argent	$1,59 \cdot 10^{-8}$	243
Fer	$10 \cdot 10^{-8}$	180
Sodium	$4,3 \cdot 10^{-8}$	207
Acier	$(12-88) \cdot 10^{-8}$	(180-980)

**Tableau III.1:** Résistivité et Coefficient de Température de quelques matériaux

La résistance de la ligne dépend également de l'effet de la fréquence, 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 appelé l'effet de peau électromagnétique  $\delta$ , telle que [22-26]:

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot \pi \cdot f}} \quad (\text{III-4})$$

Avec :  $\delta$  est l'épaisseur de peau [m] ;  $\rho$  est la résistivité du métal [ $\Omega m$ ] ;  $f$  est la fréquence du réseau [Hz].

Pour un conducteur de diamètre considérable, la résistance effective à une fréquence donnée n'est prise que par la partie réelle de l'épaisseur  $\delta$ , pour un conducteur cylindrique de rayon  $R_c$ , la section utile du conducteur vaut:

$$S_u = \pi (R_c^2 - (R_c - \delta)^2) \quad (\text{III-5})$$

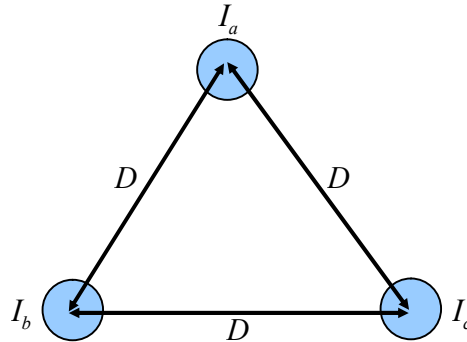
### III.3.2. Réactance inductive

Elle dépend du flux de la force magnétique qui dépend à son tour de la configuration de la ligne. La réactance inductive linéique de la ligne aérienne pour une température nominale est déterminée par la formule suivante [22-26]:

$$X = L \times \omega = L \times (2 \cdot \pi \cdot f) \quad (\text{III-6})$$

L: l'inductance de la ligne en (H), c'est est la grandeur du circuit qui relie la tension induite à la vitesse de la variation du courant.

Considérer une ligne triphasée d'une longueur d'un mètre, composée de trois conducteurs chacun a un rayon  $r$ , ces conducteurs sont arrangés symétriquement (triangle équilatérale), comme montrée dans la figure III.2 [22-26].



**Figure III.2:** Ligne triphasé arrangée symétriquement

Si on suppose que le système est équilibré, on a

$$I_a + I_b + I_c = 0 \quad (\text{III-7})$$

Le flux de liaison total de la phase a est:

$$\phi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( I_a \ln \frac{1}{r'} + I_b \ln \frac{1}{D} + I_c \ln \frac{1}{D} \right) \quad (\text{III-8})$$

Remplacer  $I_b + I_c = -I_a$

$$\phi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( I_a \ln \frac{1}{r'} - I_a \ln \frac{1}{D} \right) \quad (\text{III-9})$$

$$\phi_a = \frac{\mu_0}{2\pi} \left( I_a \ln \frac{D}{r'} \right) \quad (\text{III-10})$$

A cause de la symétrie,  $\theta_a = \theta_b = \theta_c$ , ainsi les trois inductances sont identiques. Donc l'inductance par phase exprimé en en Henries par mètre est [22-26]:

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{r'} \quad (\text{III-11})$$

Avec,  $r'$  est le rayon géométrique moyen GMR.

- L'inductance des lignes monophasées :

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{GMR} \quad (\text{III-12})$$

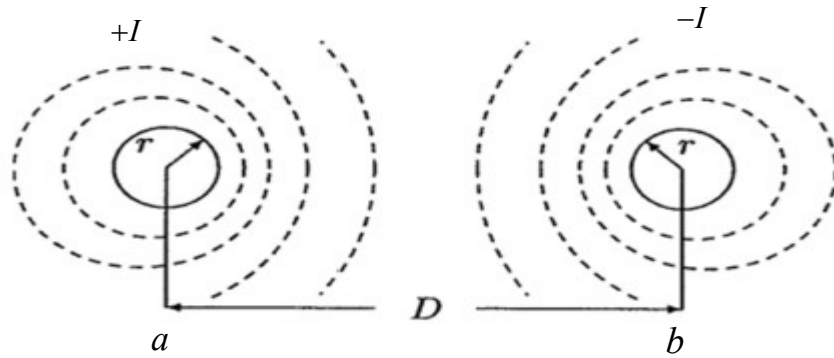


Figure III.3: Ligne monophasé a deux conducteurs

GMR c'est le rayon moyen géométrique

$$GMR = r \cdot e^{\frac{-1}{4}} \quad (\text{III-13})$$

- L'inductance des lignes triphasées

a- Espacement symétrique des lignes

$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{D}{GMR} \quad (\text{III-14})$$

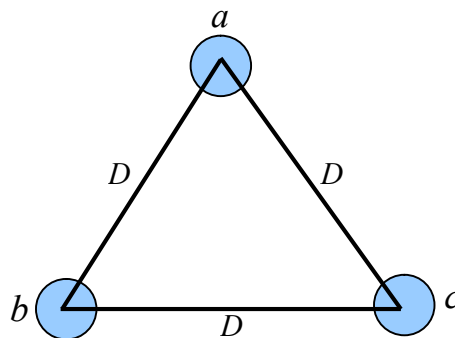


Figure III.4: Ligne triphasé avec arrangement symétrique

b- Espacement asymétrique des lignes

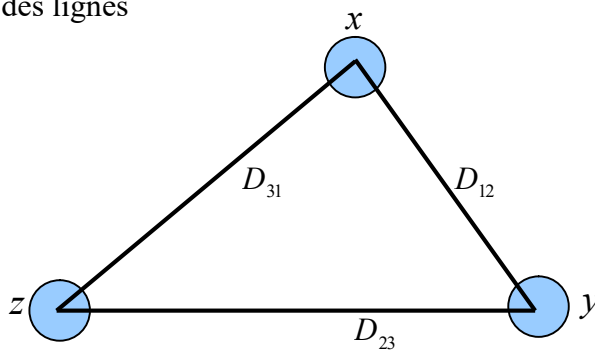


Figure III.5: Ligne triphasé avec arrangement asymétrique

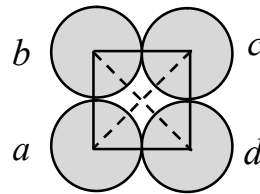
$$L = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{GMD}{GMR} \quad (H/m) \quad (III-15)$$

GMD est la distance géométrique moyenne (entre les conducteurs) ;

$$GMD = \sqrt[3]{(D_{12} \times D_{13} \times D_{23})} \quad (III-16)$$

#### - Conducteurs en faisceaux :

Afin d'augmenter la capacité de transport des lignes haute tension, on utilise généralement un certain nombre de conducteurs par phase: Conducteurs en faisceaux Soit pour un conducteur en faisceaux, dans le cas général [22-26] :



**Figure III.6:** Conducteurs en faisceau (4 sous-conducteurs)

$$GMR = (r \times d_{12} \times d_{13} \times \dots \times d_{1n})^{\frac{1}{n}} \quad (III-17)$$

Pour 2 faisceaux :

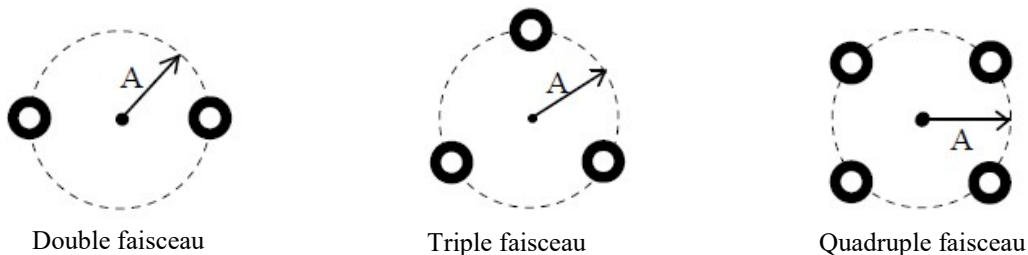
$$GMR = \sqrt{r \times (d)} \quad (III-18)$$

Pour 3 faisceaux :

$$GMR = \sqrt[3]{r \times (d^2)} \quad (III-19)$$

Pour 4 faisceaux :

$$GMR = 1.09 \times \sqrt[4]{r \times (d)^3} \quad (III-20)$$



**Figure III.7 :** Faisceau de conducteurs

### III.3.3. Capacité linéique de la ligne

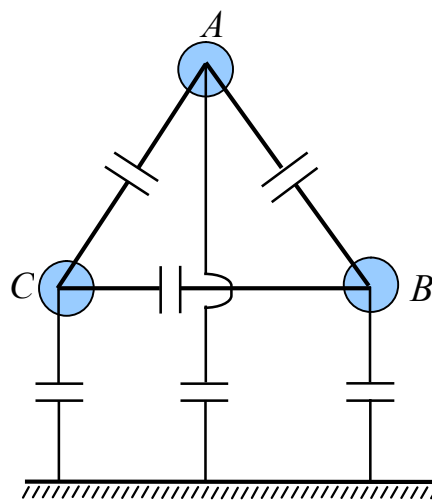
Les charges superficielles sur le conducteur de la ligne créent un champ électrique perpendiculaire à la surface du conducteur et un courant capacitif. Ce phénomène est

représenté par la capacité linéique  $C$  de la ligne. Pour son calcul, Que ce soit la nature du conducteur creux ou plein ne joue plus aucun rôle puisque la charge se concentre à la périphérie (loi de faraday) [22-26].

La capacité linéique est un paramètre qui peut dépendre des éléments suivant :

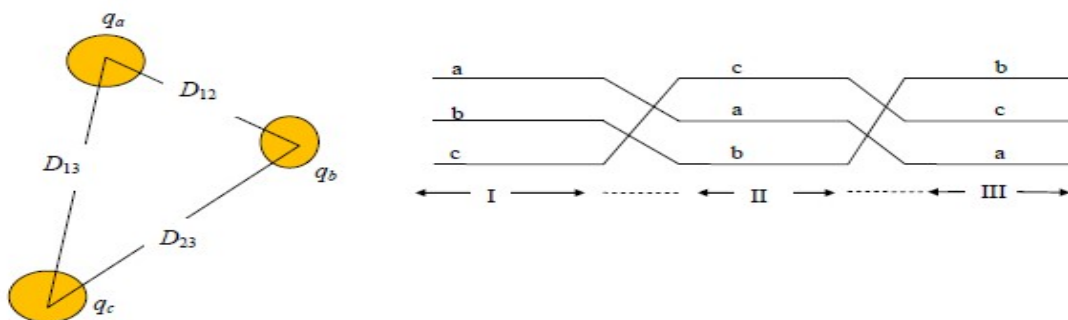
- Le rayon du conducteur ;
- La hauteur moyenne du conducteur au dessus du sol ;
- La distance géométrique entre phase.

La capacité totale dans les différentes configurations de la ligne est déterminée par la capacité linéique entre les conducteurs et entre les conducteurs et la terre. Comme il est montré dans la figure suivante [22-26]:



**Figure III.8:** Représentation de la capacité entre les conducteurs et entre les conducteurs et le sol

Considérer une ligne triphasée d'une longueur d'un mètre, composée de trois conducteurs chacun a un rayon  $r$ , ces conducteurs sont arrangés comme montrée dans la figure III.9.



**Figure III.9:** Ligne de transport triphasé transposée

La différence de potentielle entre les cylindres de rayon  $1 D$  et  $2 D$  respectivement, est le travail effectué en déplaçant une charge unitaire de  $1 D$  à  $2 D$  a travers le champ électrique produit par la charge de conducteur. Ce travail est donné par [22-26] :

$$V_{ab} = \int_{D_1}^{D_2} \bar{E} \cdot dr = \int_{D_1}^{D_2} \frac{q_l}{2\pi\epsilon_o r} \cdot dr = \frac{q_l}{2\pi\epsilon_o} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \quad (\text{III-21})$$

La notation  $V_{ab}$  veut dire la chute de tension de a relativement à b, c'est-à-dire que a doit être positif relativement à b. La charge  $q$  porte son propre signe.

Avec un système triphasé équilibré, on a [22-26]:

$$q_a + q_b + q_c = 0 \quad (\text{III-22})$$

On néglige l'effet de la terre et de l'effet câble de garde (en cas de présence). Supposant que la ligne est transposée. On calcule de la différence de potentielle entre les phases a et b pour chaque intervalle de transposition. On applique le principe de la superposition de l'équation précédente sur le premier intervalle de la transposition pour calculer  $V_{ab}$  comme suivant [22-26] :

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

De la même façon, pour le deuxième intervalle de la transposition, on a :

$$V_{ab(II)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left( q_a \ln\left(\frac{D_{23}}{r}\right) + q_b \ln\left(\frac{r}{D_{23}}\right) + q_c \ln\left(\frac{D_{13}}{D_{12}}\right) \right) \quad (\text{III-24})$$

Et pour le dernier intervalle:

$$V_{ab(III)} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left( q_a \ln\left(\frac{D_{13}}{r}\right) + q_b \ln\left(\frac{r}{D_{13}}\right) + q_c \ln\left(\frac{D_{12}}{D_{23}}\right) \right) \quad (\text{III-25})$$

La valeur moyenne de  $V_{ab}$  est :

$$V_{ab} = \frac{1}{(3)2\pi\epsilon_o} \left( q_a \ln\left(\frac{D_{13}D_{23}D_{13}}{r^3}\right) + q_b \ln\left(\frac{r^3}{D_{13}D_{23}D_{13}}\right) + q_c \ln\left(\frac{D_{13}D_{23}D_{13}}{D_{13}D_{23}D_{13}}\right) \right) \quad (\text{III-26})$$

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_o} \left( q_a \ln\left(\frac{(D_{13}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}}{r}\right) + q_b \ln\left(\frac{r}{(D_{13}D_{23}D_{13})^{\frac{1}{3}}}\right) \right) \quad (\text{III-27})$$

Noter que le  $GMR$  du conducteur apparaît dans les arguments de logarithme et qui est donné par [22-26] :

$$GMD = \sqrt[3]{D_{13}D_{23}D_{13}} \quad (\text{III-28})$$

Donc,  $V_{ab}$  est :

$$V_{ab} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \left( \frac{GMD}{r} \right) + q_b \ln \left( \frac{r}{GMD} \right) \right) \quad (\text{III-29})$$

Similairement, on peut trouver la tension moyenne  $V_{ac}$  :

$$V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( q_a \ln \left( \frac{GMD}{r} \right) + q_c \ln \left( \frac{r}{GMD} \right) \right) \quad (\text{III-30})$$

Additionnant les équations (III.29) et (III.30) et remplaçant  $q_b + q_c = -q_a$ , on aura:

$$V_{ab} + V_{ac} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left( 2 \cdot q_a \ln \left( \frac{GMD}{r} \right) - q_a \ln \left( \frac{r}{GMD} \right) \right) = \frac{3 \cdot q_a}{2\pi\epsilon_0} \ln \left( \frac{GMD}{r} \right) \quad (\text{III-31})$$

Pour un système triphasé des trois tensions équilibré, on a :

$$V_{ab} = V_{an} \angle (0^\circ) - V_{an} \angle (-120^\circ) \quad (\text{III-32})$$

$$V_{ac} = V_{an} \angle (0^\circ) - V_{an} \angle (-240^\circ) \quad (\text{III-33})$$

Et :

$$V_{ab} + V_{ac} = 3 \cdot V_{an} \quad (\text{III-34})$$

Après substitution de l'équation (III-34) dans l'équation (III-31), on peut trouver la capacité entre phase-neutre, exprimée en F par mètre comme suivant:

$$C = \frac{q_a}{V_{an}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \quad (F/m) \quad (\text{III-35})$$

Généralement, la capacité est obtenue grâce à la formule suivante :

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} \quad (F/m) \quad (\text{III-36})$$

Conducteurs en faisceaux:

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}} \quad (\text{III-37})$$

### III.3.4. Réactance capacitive (Susceptance)

La réactance capacitive dans les différentes configurations de la ligne est déterminée par la capacité entre les fils (conducteurs) et entre les conducteurs et la terre. Elle dépend de [25-28]:

- La capacité ;

- La longueur de la ligne ;
- La fréquence du courant alternatif.

La réactance capacitive est égale :

$$B = C \times \omega = C \times (2.\pi.f) \quad (\text{III-38})$$

Son unité est l'inverse de l'ohm (S, siemens).

### III.3.5. Conductance

Les pertes de la puissance active  $\Delta P$  dans l'isolement provoqué par l'effet couronne G (par l'intensité du champ électrique) la conductance linéique de la ligne aérienne est déterminé par [25-28]:

$$G_0 = \frac{\Delta P}{U_N^2} \quad (\text{III-39})$$

$\Delta P$ : Les pertes de puissance linéique sous l'effet couronne.  $U_n$  : la tension nominale de la ligne électrique. La conductance totale de la ligne aérienne est égale à :

$$G_L = G_0 \times L \quad (\text{III-40})$$

### III.3.6. Impédance propre de la ligne

C'est une grandeur complexe dans laquelle interviennent la résistance linéique et la réactance inductive linéique de la ligne [25-28].

$$Z_L = R_L + j.X_L \quad (\Omega) \quad (\text{III-41})$$

Avec :

$Z_L$  : impédance linéique d'une phase de la ligne ( $\Omega/\text{Km}$ ) ;  $R_L$  : résistance linéique d'une phase de la ligne ( $\Omega/\text{Km}$ ) ;  $X_L$  : réactance linéique d'une phase de la ligne ( $\Omega/\text{Km}$ ).

Pour la très basse fréquence (fréquence industrielle), l'impédance propre de la ligne s'écrit comme suit [25-28] :

$$Z_L = R_L + j.\frac{\mu_0.\omega}{2.\pi} \ln\left(\frac{\delta}{R_c}\right) \quad (\text{III-42})$$

Avec :  $R_c$  c'est le rayon du conducteur ou rayon équivalent pour les conducteurs en faisceau  
 $\Delta$  c'est la profondeur de pénétration (l'effet de peau).

### III.3.7. Admittance de la ligne

De la même façon que l'impédance, l'admittance est une grandeur complexe définie par [25-28] :

$$Y = G_L + j.B_L \quad (\text{III-43})$$

Le circuit équivalent d'une ligne longue se compose de R, X et B et très rarement de G parce que en pratique la conductance due à l'effet couronne n'existe pas on utilise le schéma en (T) et on ( $\pi$ ) comme suite [25-28]:

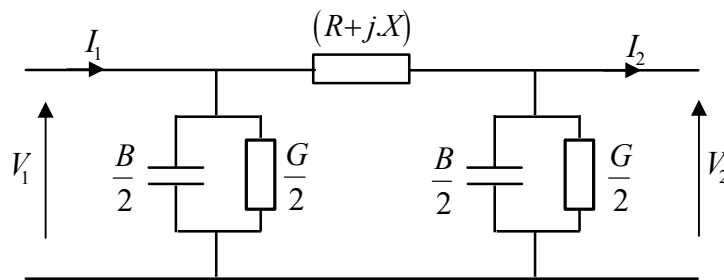


Figure III.10: Schémas équivalent d'une ligne en ( $\pi$ )

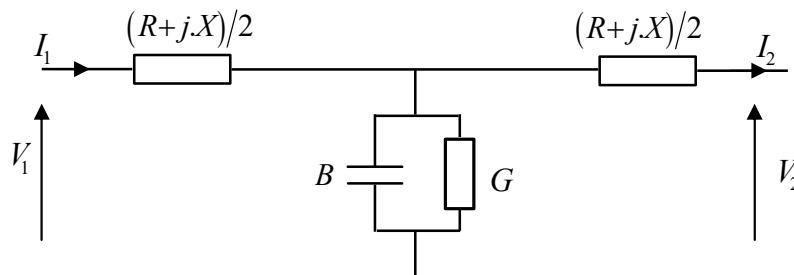


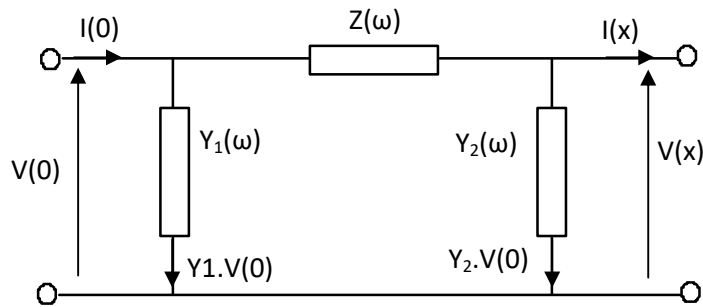
Figure III.11: Schémas équivalent d'une ligne en (T)

## III. 4. La modélisation des lignes électriques

Les lignes électriques et les câbles sont des systèmes à constantes réparties, c'est à dire que les grandeurs physiques (résistances, inductances, capacités) sont réparties sur toute la longueur de la ligne et ne sont donc pas localisées. La complexité du schéma électrique représentant une ligne de transmission et de transport de l'énergie dépend de la longueur de la ligne [25-28].

Le modèle mathématique d'une ligne aérienne, pour des longueurs de lignes pas trop élevées ( $l \leq 100$  km) et à la fréquence du réseau, être représenté sous la forme d'un schéma 'pi' (figure III.10). Ce schéma en 'pi' possède une impédance longitudinale comprenant la résistance

linéique et la réactance linéique de la ligne et deux admittances transversales d'extrémité reprenant chacune la moitié de la susceptance totale. Ce schéma se met donc sous la forme :



**Figure III.12:** Modèle simplifié des lignes de transmission électriques

Avec :

$$Z(\omega) = Z_{\omega} \cdot \sinh(Y_{\omega} \cdot x) \tag{III-44}$$

$$Y_1(\omega) = Y_2(\omega) = \frac{1}{Z_{\omega}} \cdot \tanh\left(\frac{Y_{\omega} \cdot x}{2}\right) \tag{III-45}$$

Où :

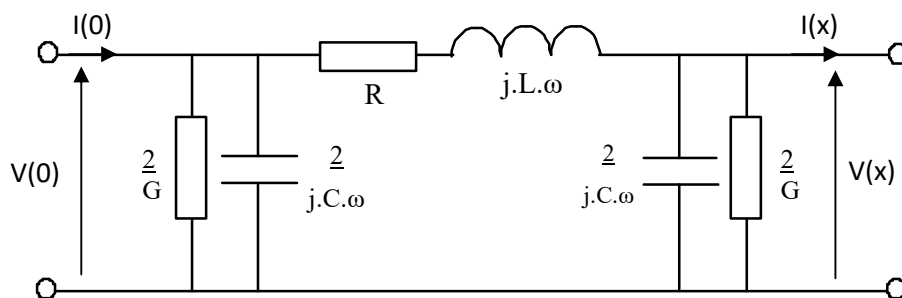
$Z_{\omega}$  l'impédance caractéristique et  $Y_{\omega}$  la constante de propagation sont définies par les expressions suivantes [25-28]:

$$Z_{\omega} = \sqrt{\frac{R + j.L.\omega}{G + j.C.\omega}} = \sqrt{\frac{Z_l}{Y_t}} \tag{III-46}$$

$$Y_{\omega} = \sqrt{(R + j.L.\omega) \cdot (G + j.C.\omega)} = \sqrt{Z_l \cdot Y_t} \tag{III-47}$$

Où :

$Z_l$  est l'impédance longitudinale par unité de longueur, et  $Y_t$  est l'admittance transversale par unité de longueur, si on ne tient pas compte de la propagation, nous pouvons simplifier les formules hyperboliques et faire l'approximation suivante [25-28]:



**Figure III.13:** Modèle simplifié d'une ligne électrique HT

Avec,  $R$ ,  $L$ ,  $C$  et  $G$ , les caractéristiques physiques des lignes électriques H.T.

Le fonctionnement de la ligne bifilaire par unité de longueur est modélisé par un tronçon de ligne où la tension  $V_S$  et le courant d'entrée (source)  $I_S$  sont reliés à la tension  $V_R$  et le courant de sortie (récepteur)  $I_R$  à travers les paramètres d'un quadripôle  $A$ ,  $B$ ,  $C$  et  $D$ , tel que [25-28] :

$$\begin{aligned} V_S &= A.V_R + B.I_R & (V) \\ I_S &= C.V_R + D.I_R & (A) \end{aligned} \quad \text{(III-48)}$$

Les paramètres ABCD de la longue ligne de transmission peuvent être écrits comme suit [25-28] :

$$A = D = \cosh \gamma l \quad \text{(III-49)}$$

$$B = Z_C \sinh \gamma l \quad \text{(III-50)}$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_C} \quad \text{(III-51)}$$

### III. 5. Calcul du champ électrique d'une ligne aérienne

L'intensité du champ électrique produite par une ligne aérienne est le résultat de la tension appliquée sur cette ligne, elle est déterminée en régime électrostatique en utilisant le théorème de Gauss et le principe superposition des tensions électriques de la ligne. Les conducteurs d'une ligne de transport sont considérés comme des charges linéiques infinies.

La relation générale que l'on utilise pour calculer les charges portées par les conducteurs d'une ligne multifilaire est l'équation matricielle suivante [29]:

$$[q] = [P]^{-1} \cdot [V] \quad \text{(III.52)}$$

Avec:

[q]: la matrice des charges des conducteurs ;

[V]: la matrice des potentiels ;

[P] : la matrice carrée des coefficients de capacités propres et mutuelles des conducteurs.

Les coefficients mutuels de potentiel des conducteurs.

$$P_{ij} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0} \cdot \log_e \frac{D'_{ij}}{D_{ij}} \quad \text{(III.53)}$$

Les coefficients propres de potentiel des conducteurs

$$P_{ij} = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \cdot \log_e \frac{2 \cdot h_i}{r_i} \quad (\text{III.54})$$

Avec :

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (\text{III.55})$$

$$D_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} \quad (\text{III.56})$$

Où :

Re: rayon équivalent du conducteur

$x_i$  : Abscisse du conducteur (i) .

$x_j$  : Abscisse du conducteur (j) .

$y_i$  : la hauteur du conducteur (i) à partir du sol.

$y_j$  : la hauteur du conducteur (j) à partir du sol.

$h_i$  : la hauteur moyenne du conducteur (i) à partir du sol.

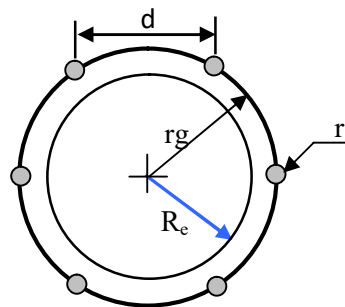
$\epsilon_0$ : permittivité de l'air.

Dans le cas où le conducteur phase est constitué d'un faisceau de 2 ou de plusieurs conducteurs de rayon  $r$  situés sur une circonférence de rayon  $R$  est équivalent à un conducteur fictif de rayon (voir figure III.14) [29].

$$R_e = r_g \cdot n \sqrt{\frac{n \cdot r}{r_g}} \quad (\text{III.57})$$

Où :  $n$  : nombre de sous conducteurs du faisceau ;  $r$  : rayon moyen du conducteur élémentaire du faisceau ;  $r_g$ : rayon géométrique du faisceau ;  $d$  : la distance entre deux sous conducteurs consécutives.

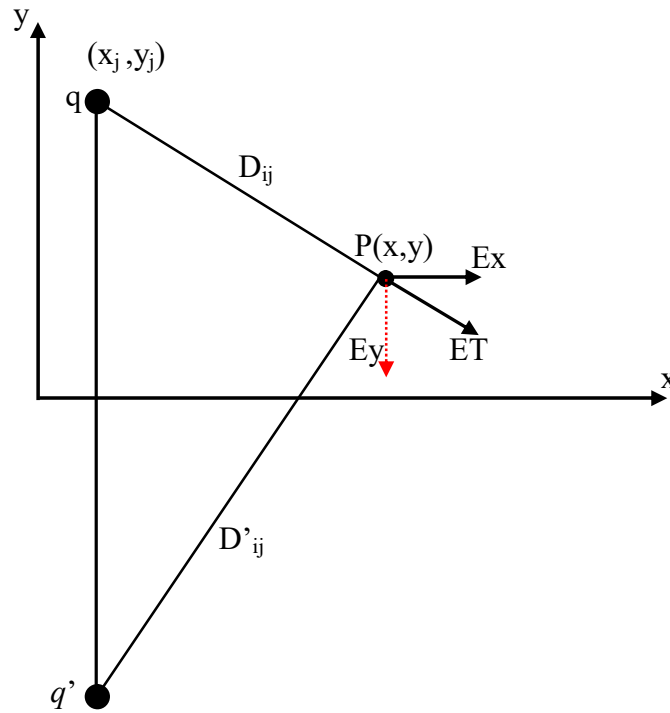
Le rayon équivalent du faisceau est le rayon d'un conducteur cylindrique unique, fictif, qui aurait les mêmes capacités que le faisceau réel par rapport à tous les autres conducteurs avoisinants [29].



**Figure III.14:** Faisceau de conducteurs

Les coordonnées du conducteur sont  $(x_j, y_j)$ , les coordonnées de son image sont  $(x_j, -y_j)$ .

Connaissant les charges linéiques portées par les conducteurs (ou les faisceaux), qui sont disposées perpendiculairement au plan  $xy$ , il est très aisé d'obtenir l'intensité du champ électrique total issu des trois champs électriques partiels générés par les conducteurs en un point via le théorème de Gauss [29].



**Figure III.15:** Calcul du champ électrique produit par une ligne aérienne

Les composantes horizontales et verticales de l'intensité du champ électrique en tout point  $(x,y)$  suivant le principe de superposition en coordonnées cartésiennes s'expriment par les relations suivantes (voir figure III.15) [29] :

$$E_x = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \left\{ \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{x - x_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (\text{III.58})$$

$$E_y = \frac{1}{2\pi \cdot \epsilon_0} \sum_{i=1}^n q_i \left\{ \frac{y - y_i}{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} - \frac{y + y_i}{(x - x_i)^2 + (y + y_i)^2} \right\} \quad (\text{III.59})$$

La résultante des composantes  $E_x$  et  $E_y$  de l'intensité du champ électrique en  $(x,y)$  est donnée par la relation suivante [29] :

$$E_T = \sqrt{E_x^2 + E_y^2} \quad (\text{III.60})$$

### III.6. L'effet de couronne

Si le gradient de potentiel de la surface d'un conducteur dépasse la tension de claquage diélectrique de l'air ambiant, la zone proche de la surface du conducteur sera ionisé. Cette ionisation partielle est connue sous le nom de couronne (Corona). D'après Peek, la tension de claquage diélectrique de l'air lors de beau temps et aux conditions de (25 ° C et 70 cm de Hg) est d'environ 30 kV / cm. Pour déterminer le champ critique (champ d'apparition de l'effet couronne) d'un conducteur en faisceaux, on emploie généralement la formule de Peek, qui est la plus connue. Elle a pour expression [30]:

$$U_d = \sqrt{3} g_0 \cdot m_d \cdot \delta_t \cdot m_t \left( \frac{r}{\beta} \right) \cdot \ln \left( \frac{GMD_0}{r} \right) \quad (\text{III-61})$$

Avec :

$$\beta = \frac{1 + (n-1) \frac{r}{R_H}}{n} \quad (\text{III-62})$$

Et :

$$R_H = \frac{d}{2 \cdot \sin \left( \frac{\pi}{n} \right)} \quad (\text{III-63})$$

Où :

$m_d$  est le coefficient de rugosité du conducteur, facteur tenant compte l'état de surface des conducteurs, il varie entre 0,83 et 0,87.

$m_t$  est le coefficient météorologique, facteur tenant compte les conditions climatiques : pluie, neige,...

$m_t = 1$  pour le temps sec.

$m_t = 0,8$  pour temps humide

$r$  est le rayon du sous-conducteur en cm.

$GMD$  est la séparation moyenne entre les phases en cm

$\beta$  est le facteur qui recueille l'effet de la disposition des conducteurs

$n$  est le nombre de sous-conducteurs par phase

$d$  est la séparation entre les sous-conducteurs.

$g_0$  le champ d'ionisation de l'air  $\approx 30$  kV/cm où 21.2 kV/cm en valeur efficace

$\delta_t$  est le facteur de densité de l'air, Dans des conditions standard (pour  $p = 76$  cm Hg et  $t = 25$  °C), la valeur de  $\delta = 1$ .

$$\delta_t = \frac{3.92 \times b}{273 + t} \quad (\text{III-64})$$

L'effet couronne produit une perte de puissance, un bruit de sifflement audible à proximité de la ligne et des interférences radio. L'effet couronne dépend du diamètre de conducteur, de la configuration de ligne, de type de conducteur et l'état de sa surface. Les conditions atmosphériques telles que la densité de l'air, l'humidité et le vent influence sur génération de l'effet couronne [30].

Les pertes de puissance due à l'effet de couronne dans les temps de pluie ou de neige, sont beaucoup plus élevées que les pertes dans le beau temps. Sur une surface irrégulière de conducteur telle qu'une particule polluante, peut causer un gradient de tension qui peut devenir la source d'une décharge. L'effet corona peut être réduit en augmentant la taille de conducteur et l'utilisation des faisceaux de conducteurs.

Peek a étudié l'effet de divers paramètres sur la perte de couronne et il en déduit une relation empirique [30]:

$$P = \frac{242.2}{\delta_t} \times (f + 25) \times \sqrt{\frac{r}{GMD}} \times (U_s - U_d)^2 \times 10^{-5} \text{ kW/km} \quad (\text{III-65})$$

Où :

f est la fréquence du réseau (Hz),  $\delta$  le facteur de correction de la densité de l'air,  $U_s$  la tension de fonctionnement en kV,  $U_d$  la tension disruptive critique (kV), r est le rayon des conducteurs (m) et GMD est la distance équivalente entre les conducteurs (m).

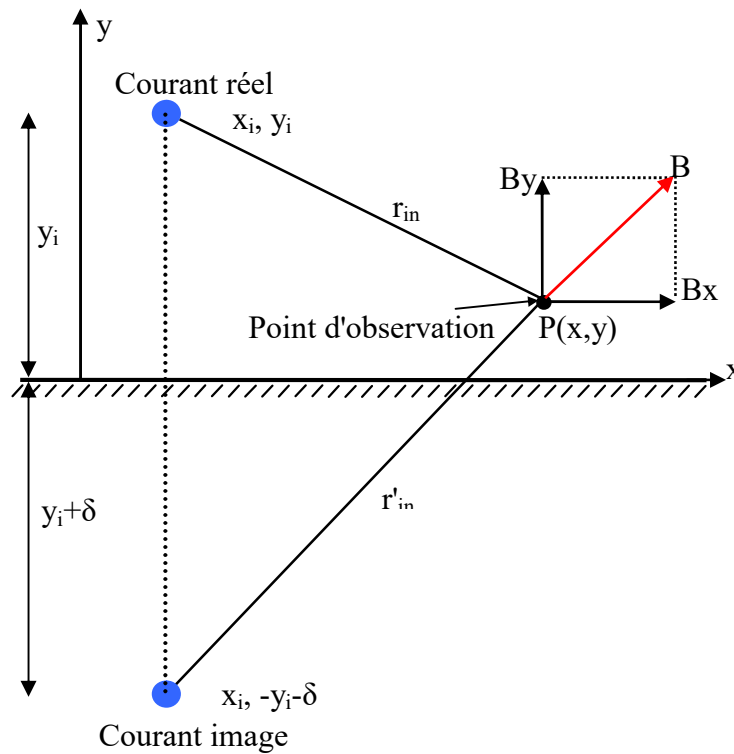
### III.7. Calcul du champ magnétique sous une ligne aérienne

Le champ magnétique en régime magnétostatique d'une ligne aérienne de transport est engendré par le passage du courant. Une simple application de la loi d'ampère le principe de superposition permettent de calculer la valeur de l'intensité du champ magnétique autour d'une ligne aérienne [29].

On considère une ligne électrique aérienne longue et rectiligne parcourue par un courant électrique, un cercle de rayon (r) dans un plan perpendiculaire à l'axe du conducteur, centré sur celui-ci, comme montrée par la figure III.16. Un courant électrique d'intensité I au point  $(x_i, y_i)$  créé au point p (x, y) de l'espace un champ magnétique, l'induction magnétique est définie par la relation [29] :

$$B_i = \frac{I_i}{2.\pi.r_{ij}} \quad (\text{III-66})$$

Le champ magnétique alternatif que la ligne génère induit des courants de retour dans le sol et ceux-ci, dans le même temps génèrent un champ magnétique qui est superposé sur celui produit par la ligne. Le champ magnétique généré par un conducteur transportant un courant d'un sol parfaitement conducteur, peut être représenté par les champs combinés du conducteur et de son image. Les images sont situées à une profondeur, dans le sol, bien plus grande que la hauteur des conducteurs de phase [29].



**Figure III.16:** Champ magnétique généré par un conducteur électrique

Dans le cas d'une ligne triphasée, les composantes horizontales et verticales du champ magnétique total  $B$  en coordonnées cartésiennes sont données comme suit [29]:

$$B_x = -\frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \hat{I}_i \left[ \frac{y - y_i}{r_{in}^2} - \frac{y + y_i + \delta}{r'_{in}{}^2} \right]$$

$$B_y = \frac{\mu_0}{2.\pi} \cdot \sum_{i=1}^n \hat{I}_i \left[ \frac{x - x_i}{r_{in}^2} - \frac{x - x_i}{r'_{in}{}^2} \right] \quad (\text{III-67})$$

Avec :

$$\begin{aligned}
 r_{in} &= \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \\
 r_{in}' &= \sqrt{(x-x_i)^2 + (y+y_i+\delta)^2}
 \end{aligned}
 \tag{III-68}$$

Le champ magnétique résultant est exprimé par la relation suivante [29]:

$$B_T = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} \tag{III-69}$$

### III.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté la théorie de calcul des paramètres d'une ligne électrique aérienne, nous avons rappelé les différentes caractéristiques longitudinales (les résistances et les inductances des conducteurs) et les caractéristiques transversales (la capacité des conducteurs), la connaissance de ces paramètres est très importante pour l'analyse des réseaux électriques ce qui nous permet de par la suite de modéliser les lignes de transport pour établir les équations mathématiques qui régissent leur fonctionnement en régime permanent. Enfin, Nous avons exposé une modélisation analytique pour le calcul des champs électrique et magnétique, ainsi l'effet et les pertes de couronne générées par une ligne aérienne dont les expressions sont données en coordonnées cartésiennes.

# **Chapitre IV:**

## **Résultat et discussion**

## IV.1. Introduction

Dans la conception et le dimensionnement d'une ligne aérienne du réseau électrique à très haute tension, il est important de bien mener judicieusement les calculs mécanique et électrique de ces lignes, aussi bien au niveau des conducteurs, des supports que des armements. Aussi, cela nécessite la connaissance de nombreux facteurs, techniques et économiques, et de l'impact de divers facteurs environnementaux, afin d'exploiter correctement et précisément le réseau électrique dans les meilleures conditions, de maintenir la continuité de la fourniture énergétique en bonne niveau qualité, de bien assurer la sécurité des personnes et des biens et rétablir rapidement la distribution de l'électricité lorsqu'elle est interrompue brutalement sous l'influence de divers perturbations. Une ligne électrique de transport doit posséder les caractéristiques de base suivantes:

- a) la tension mécanique au cours des variations qu'elle subit ne dépasse pas le maximum admissible.
- a) les variations des flèches n'entraînent pas un rapprochement dangereux des conducteurs vers le sol ou vers tous les autres obstacles.
- a) La tension doit demeurer assez constante sur toute la longueur de la ligne et pour toutes les charges comprises entre zéro et la charge nominale
- b) les pertes doivent être faibles afin que la ligne possède un bon rendement
- c) les pertes Joule ne doivent pas faire surchauffer les conducteurs

L'objectif dans ce chapitre est de calculer judicieusement les paramètres mécaniques et électriques d'une ligne aérienne à haute tension supposée longue.

## IV.2. Calcul mécanique d'une ligne aérienne

Soit un conducteur en faisceaux de très haute tension type ACSR porté sur une longueur L, pour une portée de 300 m et avec un coefficient de sécurité de 2,5. Le conducteur en Aluminium présente une tension de rupture (TR) de 4550 kg et un poids linéique (Pc) de 1.3 kg/m avec une résistance linéique de 0.05  $\Omega$ /km et un rayon de 14.31 mm, la hauteur maximale du conducteur au voisinage du pylône est 20 m.

Calcul du paramètre des conducteurs des lignes aériennes ( $\alpha$ ):

$$a = \frac{T_R}{C_c \times p_c}$$

Avec :

Charge de rupture du conducteur (Kg) ;

Poids linéique  $p_c$  (Kg/m) ;

Coefficient de sécurité  $C_s$ .

$$T_s = \frac{T_R}{C_c} = \frac{T_R}{C_c} = \frac{4550}{2.5} = 1820 \text{ kg}$$

$$a = \frac{T_s}{p_c} = \frac{T_R}{C_c \times p_c} = \frac{4550}{2.5 \times 1.3} = 1400 \text{ m}$$

a) Méthode de la caténaire:

La tension mécanique maximum à l'extrémité du pylône :

$$T_t = T_s \cosh \frac{p_c L}{2T_s} = 1820 \cosh \frac{1.3 \times 300}{2 \times 1820} = 1830.46 \text{ Kg}$$

La longueur du conducteur :

$$\ell = \frac{2T_s}{p_c} \sinh \frac{p_c L}{2T_s} = \frac{2 \times 1820}{1.3} \sinh \frac{1.3 \times 300}{2 \times 1820} = 300.57 \text{ m}$$

La flèche maximale du conducteur :

$$f = \frac{T_s}{p_c} \left( \cosh \frac{p_c L}{2T_s} - 1 \right) = \frac{1820}{1.3} \left( \cosh \frac{1.3 \times 300}{2 \times 1820} - 1 \right) = 8.04 \text{ m}$$

b) Méthode de la parabole:

La tension mécanique maximum à l'extrémité du pylône

$$T_t = T_s + \frac{p_c^2 \times L^2}{8 \times T_s} = 1820 + \frac{(1.3)^2 \times (300)^2}{8 \times 1820} = 1830.47 \text{ Kg}$$

La longueur du conducteur :

$$\ell = L + \frac{(p_c)^2 \times L^3}{24 \times (T_s)^2} = 300 + \frac{(1.3)^2 \times (300)^3}{24 \times (1820)^2} = 300.57 \text{ m}$$

La flèche maximale du conducteur :

$$f = \frac{p_c \times L^2}{8 \times T_s} = \frac{(1.3) \times (300)^2}{8 \times 1820} = 8.03 \text{ m}$$

Calcul de l'erreur absolue et relative

$$\text{Erreur} = \ell - L = 300.57 - 300 = 0.57 \text{ m (0.19\%)}$$

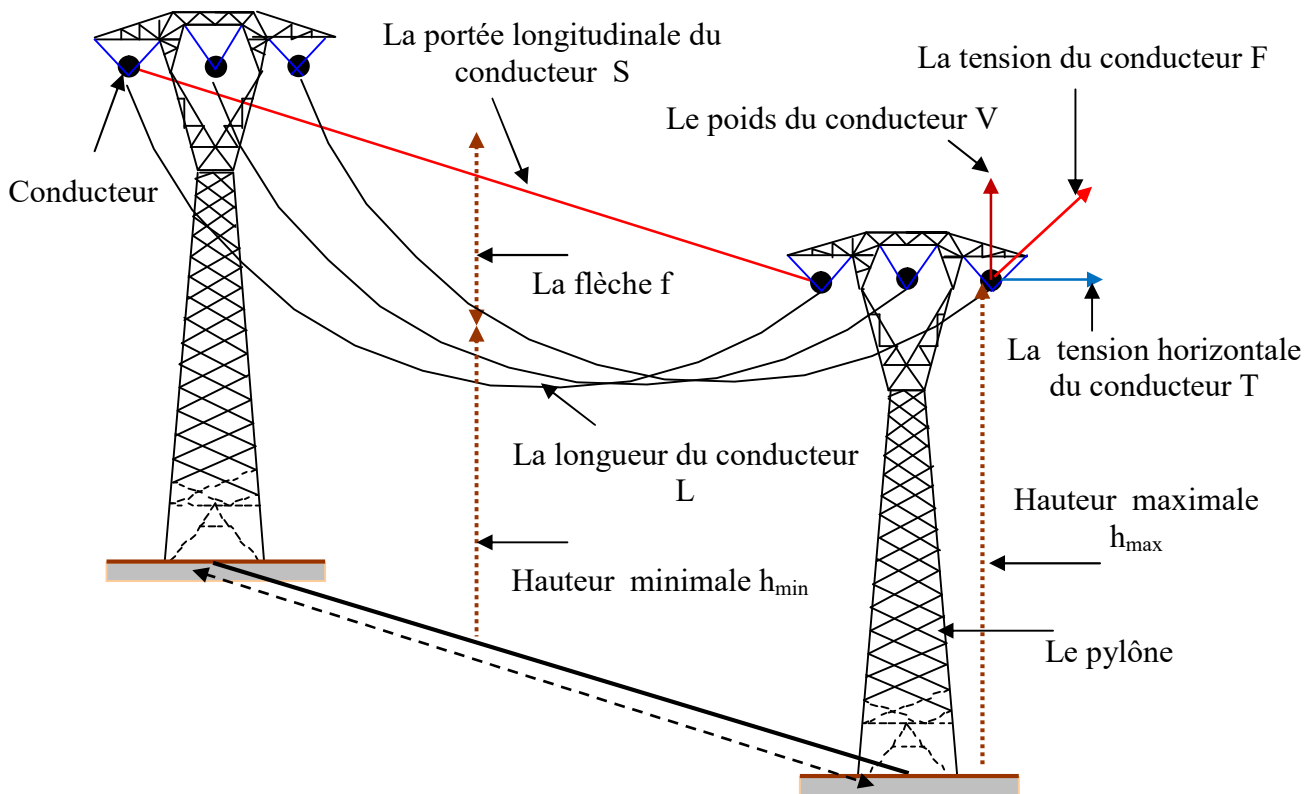


Figure IV.1 : Description globale de la géométrie d'une ligne aérienne THT

#### IV.2.1. Tracé de la caténaire (chaînette) et de la parabole

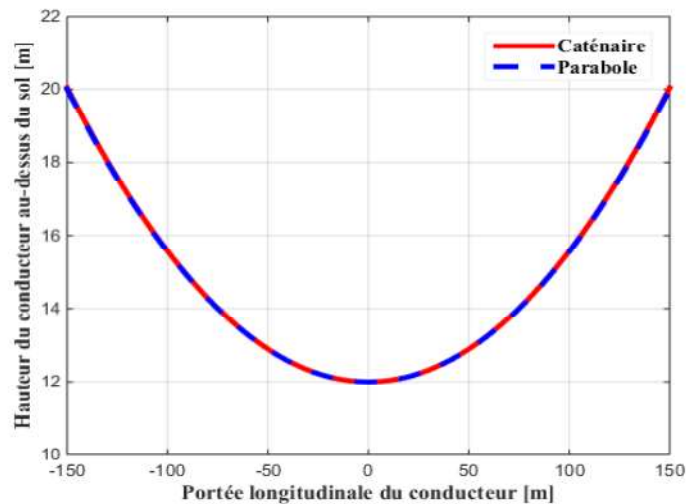


Figure IV.2 : Différence entre la géométrie de la chaînette et de la parabole

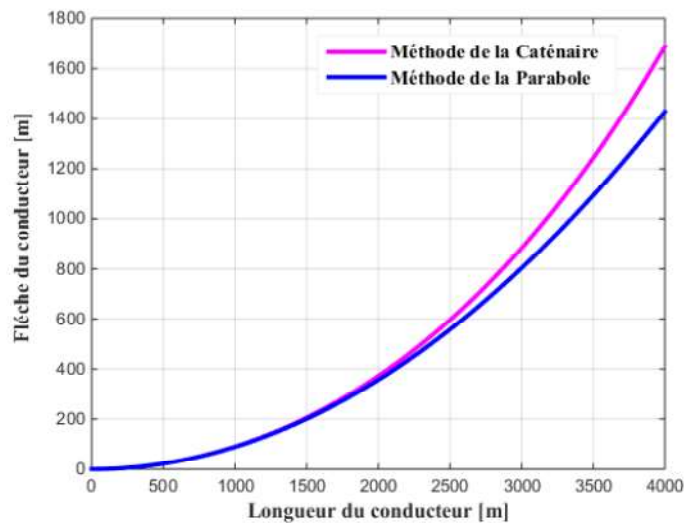
Une caténaire (chaînette) est une fonction cosinus hyperbolique, une forme que prend librement une chaîne suspendue entre deux extrémités d'un support sous l'effet de son poids. Si on compare le tracé d'une chaînette avec le tracé d'une parabole, comme montrée à la figure

IV.2 pour une portée  $L=300$  m et un paramètre du conducteur  $a=1400$  m, on remarque que la courbe de la chaînette est similaire à celle d'une parabole, la différence est presque négligeable.

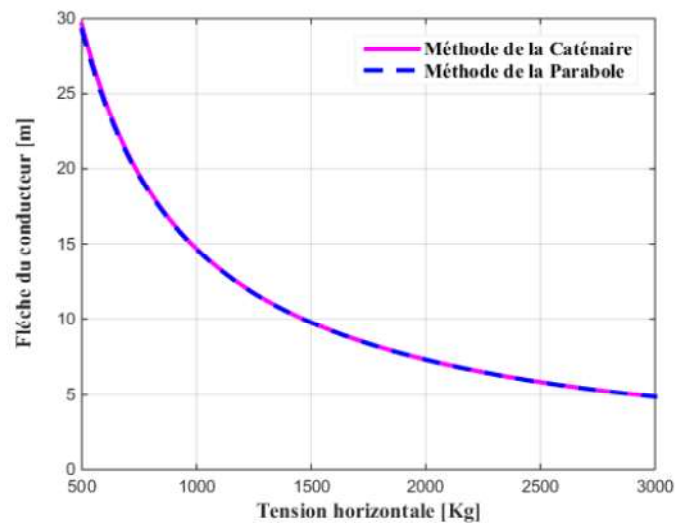
Pour analyser la précision de ces deux méthodes, nous pouvons faire un calcul d'erreur absolue en différenciant les relations de la chaînette et de la parabole.

## IV.2.2. Comparaison entre la parabole et la chaînette

### IV.2.2.1. Calcul de la flèche d'un conducteur



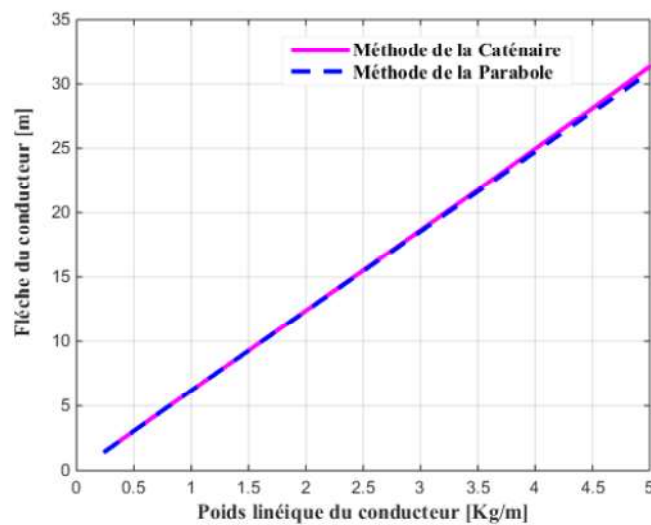
**Figure IV.3 :** Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la portée longitudinale



**Figure IV.4:** Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la tension horizontale du conducteur

Le résultat de calcul de la flèche du conducteur en fonction de longueur de la portée est illustré à la figure IV.3. On remarque que les valeurs de la flèche augmentent considérablement lorsque l'on augmente la portée longitudinale de la ligne, cette augmentation est presque proportionnelle.

Le résultat de calcul de la flèche du conducteur en fonction de la tension horizontale du conducteur est montré sur la figure IV.4. On remarque que les valeurs de la flèche diminuent avec l'augmentation de la tension horizontale du conducteur, par conséquent la flèche est inversement proportionnelle à la tension horizontale.



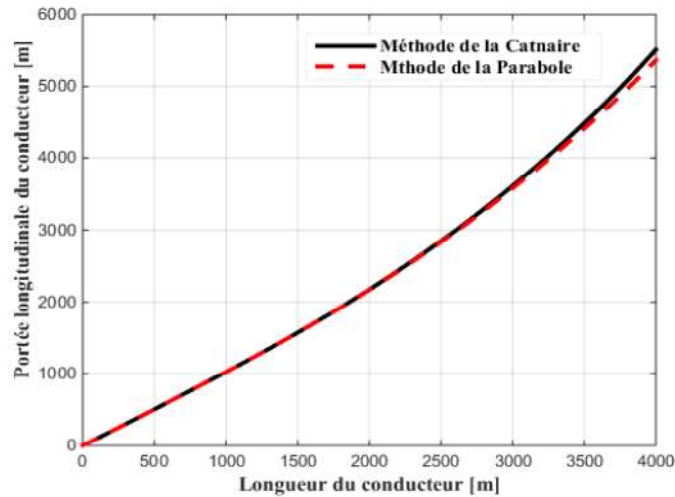
**Figure IV.5 :** Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur

La figure IV.5 met en évidence la variation du profil la flèche maximale du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur. On remarque une relation de proportionnalité entre les deux paramètres.

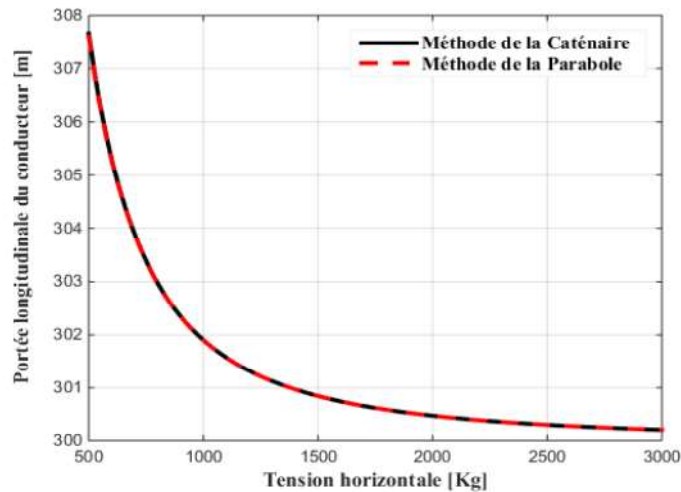
#### IV.2.2.2. Calcul de la longueur du conducteur

La figure IV.6 représente les résultats obtenus de la variation de la longueur du conducteur en fonction de la portée longitudinale. On remarque que les valeurs maximums de la longueur augmentent avec l'ordre croissant de la portée du conducteur, cette augmentation est approximativement proportionnelle.

La figure IV.7 montre la courbe de variation de la longueur du conducteur ACSR en fonction de la tension horizontale du conducteur, lorsque la tension horizontale augmente la longueur du conducteur décroît fortement de manière continue.



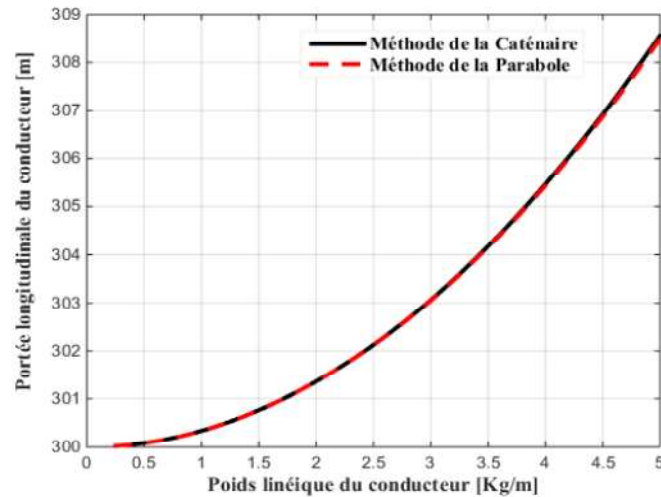
**Figure IV.6 :** Calcul de la longueur du conducteur en fonction de la portée longitudinale



**Figure IV.7 :** Calcul de la longueur du conducteur en fonction de la tension horizontale du conducteur

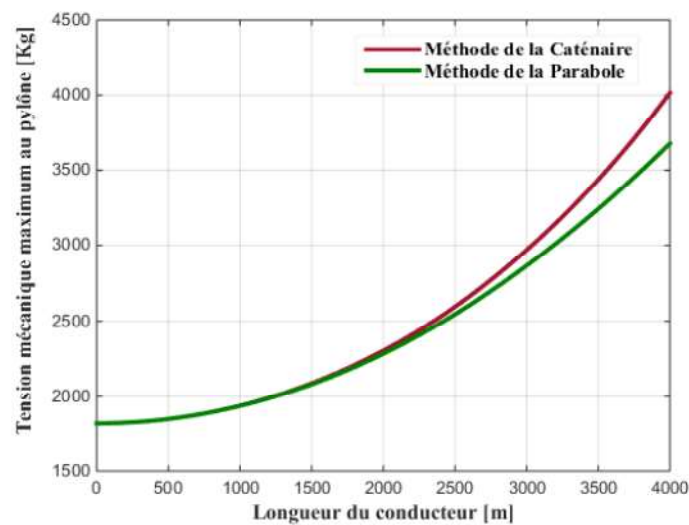
La figure IV.8 illustre les résultats de simulation de la variation la longueur du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur. Comme le montre le graphe de cette figure, la portée de la ligne augmente d'une façon presque proportionnelle, avec la croissance du poids linéique du conducteur

Les résultats comparatifs de la flèche maximale et de la longueur des conducteurs calculés avec les deux différentes méthodes utilisées celle de la chaînette (caténaire) et de la parabole, d'après ces résultats, on aperçoit que l'erreur absolue commise entre les deux formules est assez négligée. Le calcul est exactement identique, la courbe décrite par la chaînette peut être remplacée par une parabole.



**Figure IV.8 :** Calcul de la longueur du conducteur en fonction du poids linéique du conducteur

#### IV.2.2.3. Calcul de la tension mécanique maximum du conducteur



**Figure IV.9 :** Calcul de la tension mécanique maximum à l'extrémité du pylône en fonction de la portée longitudinale

La figure IV.9 décrit la variation du profil de la tension mécanique du conducteur aux points de suspension en fonction de la portée longitudinale. On remarque d'après cette figure que la tension mécanique augmente plus fortement de manière continue avec l'augmentation de la portée longitudinale. Les courbes obtenues par les deux méthodes sont semblables.

### IV.2.3. Calcul de la flèche et la longueur d'un conducteur dans le cas d'une portée dénivelée

Un conducteur suspendu entre deux pylônes placés à des niveaux différents, la longueur dénivelée (Figure IV.10) de la ligne est de 300 m, avec une hauteur de 20 m. Les caractéristiques du conducteur de phase sont les suivantes :

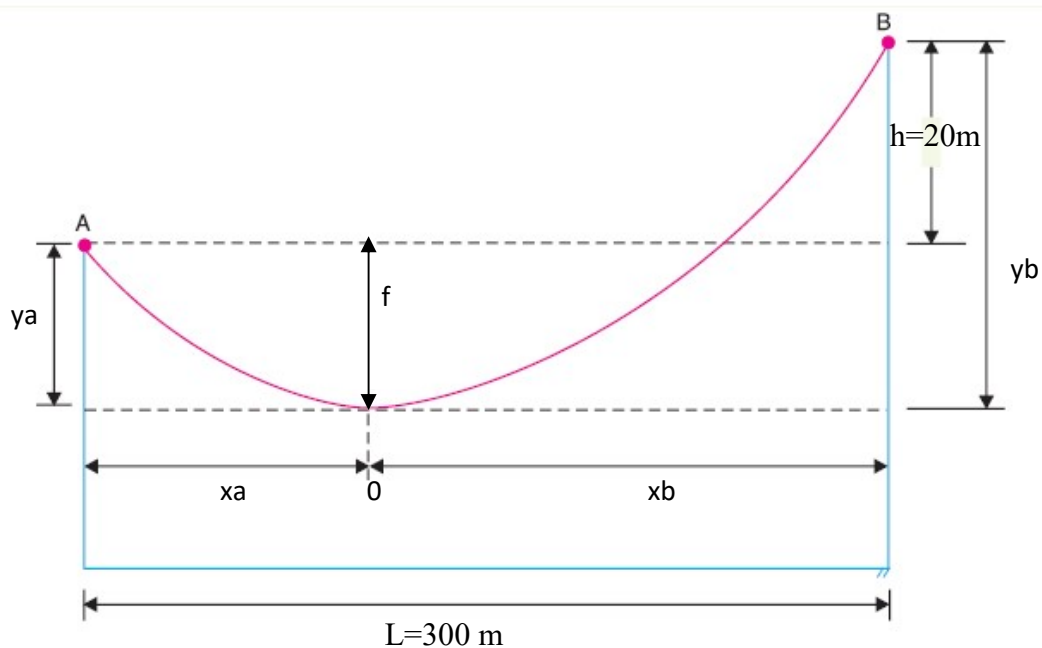
Diamètre: 28,62 mm

Poids unitaire: 1.3 kg/m

Tension de claquage: 4550 kg.

La contrainte de conception doit être considérée égale à 25% de la tension de rupture, la tension de conception sera égale:

$$T_0 = \frac{25 \times T_{rupture}}{100} = 0,25 \times 4550 = 1137.5 \text{ (Kg)}$$



**Figure IV.10 :** Calcul des dimensions géométriques d'une portée dénivelée

On peut remplacer la chaînette par une parabole, la valeur de l'abscisse  $x_a$  est donnée par :

$$x_a = \frac{L}{2} - \frac{T_0 \cdot h}{p_c \cdot L} = \frac{300}{2} - \frac{1137.5 \times 20}{1,3 \times 300} = 91.67 \text{ (m)}$$

Puis, on déduit l'abscisse  $x_b$ , il vient :

$$x_b = L - x_a = 300 - 91.67 = 208.33 \text{ (m)}$$

On calcule de nouveau les ordonnées  $y_a$  et  $y_b$  par leurs formules.

$$y_a = \frac{x_a^2 \times p_c}{2 \times T_0} = \frac{(91.68)^2 \times 1.3}{2 \times 1137.5} = 4.8 (m)$$

$$y_b = \frac{x_b^2 \times p_c}{2 \times T_0} = \frac{(208.33)^2 \times 1.3}{2 \times 1137.5} = 24.8 (m)$$

La flèche du conducteur sera calculée comme suit:

$$f \approx \frac{L^2 \times p_c}{8 \times T_0} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2} = \frac{(300)^2 \times 1.3}{8 \times 1137.5} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{20}{300}\right)^2} = 12.86 (m)$$

La Longueur du conducteur est:

$$\cos \psi = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{h}{L}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{20}{300}\right)^2}} = 0.9978 (m)$$

$$l_{AB} \approx \frac{L}{\cos \psi} + \frac{8 \times f^2 \times \cos^3 \psi}{3 \times L} = \frac{300}{0.9978} + \frac{8 \times (12.86)^2 \times (0.9978)^3}{3 \times 300} = 302.12 (m)$$

### IV.3. Effet des contraintes climatiques et météorologiques

Les conducteurs aériens sont influencés par des facteurs extérieurs dus aux modifications météo-logiques (température, vent, givre,...etc.) et par la charge transitaire dans la ligne qui engendre des variations de la tension mécanique.

#### IV.3.1. Calcul de la flèche en fonction du vent et du givre

Un conducteur aluminium en acier-renforcé (ACSR) supporté et tendu entre deux pylônes au même niveau avec une portée longitudinale de 300 m. Les caractéristiques du conducteur sont les suivantes:

Diamètre: 28,62 mm

Poids unitaire: 1.3 kg/m

Tension de rupture (claquage): 4550 kg.

Déterminer la flèche aux conditions de la contrainte (tension) maximale, avec une vitesse du vent 80 km / h et une couche de glace d'épaisseur de 1.5 cm.

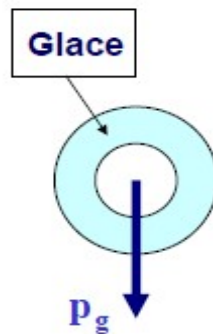
La tension de fonctionnement maximale est considérée égale à 75% de la tension de rupture.

- la force exercée en raison du poids de la glace :

La densité volumique de la glace est 920.8 kg/m<sup>3</sup>

$$p_g = \rho_g \cdot \pi \cdot e \cdot (d + e) = 920.8 \times 3.14 \times 15 \times 10^{-3} (28,62 \times 10^{-3} + 15 \times 10^{-3})$$

$$= 1.89 \text{ (kg/m)}$$



**Figure IV.11:** Effort de glace sur le conducteur

- la force exercée par le vent

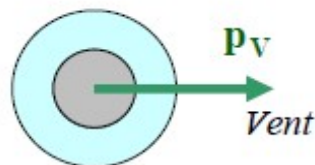
La pression du vent

$$p_r = 0,00471 \times V^2 = 0.00471 \times (80)^2$$

$$= 30.144 \text{ (kg/m}^2\text{)}$$

$$p_v = p_r \cdot (d + 2 \cdot e) = 30.144 \times (28,62 \times 10^{-3} + 2 \times 15 \times 10^{-3}) =$$

$$= 1,767 \text{ (kg/m)}$$

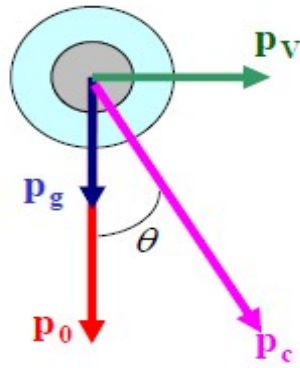


**Figure IV.12:** Effort du vent sur le conducteur

La force résultante suite aux efforts effectués par le givre et le vent est calculée comme suit :

$$p_{ct} = \sqrt{(p_0 + p_g)^2 + p_v^2} = \sqrt{(1,3 + 1.89)^2 + (1,767)^2}$$

$$= 3.65 \text{ (kg/m)}$$



**Figure IV.13:** Force résultante des efforts exercés sur le conducteur

Comme illustré sur la figure IV.13, l'angle existant entre les deux vecteurs représentant les forces exercées sur le conducteur est :

$$\theta = \operatorname{tg}^{-1} \frac{p_v}{p_0 + p_g} = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1,767}{1,3 + 1,89} \Rightarrow \theta = 29^\circ$$

La tension de conception sera égale:

$$T_0 = \frac{75 \times T_{\text{rupture}}}{100} = 0,75 \times 4550 = 3412,5 \text{ (Kg)}$$

La flèche du conducteur est donnée par :

Avec la glace et le vent :

$$f = \frac{L^2 \times p_{ct}}{8 \times T_0} = \frac{(300)^2 \times 3,65}{8 \times 3412,5} = 12 \text{ (m)}$$

Avec la glace :

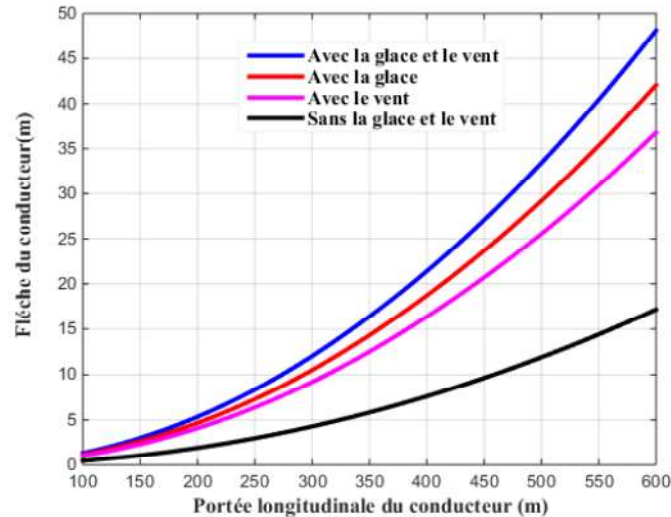
$$f = \frac{L^2 \times (p_0 + p_g)}{8 \times T_0} = \frac{(300)^2 \times (1,3 + 1,89)}{8 \times 3412,5} = 10,52 \text{ (m)}$$

Avec le vent :

$$f = \frac{L^2 \times \sqrt{(p_0)^2 + (p_v)^2}}{8 \times T_0} = \frac{(300)^2 \times 2,79}{8 \times 3412,5} = 9,2 \text{ (m)}$$

Sans la glace et le vent :

$$f = \frac{L^2 \times p_c}{8 \times T_0} = \frac{(300)^2 \times 1,3}{8 \times 3412,5} = 4,29 \text{ (m)}$$



**Figure IV.14 :** Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction des conditions climatiques

Il paraît clair à partir de ces résultats que la flèche d'un conducteur est fortement affectée par les charges imposées par la glace et le vent. La flèche varie significativement en fonction du poids de la glace et du vent.

En variant la portée de la ligne entre 100 et 600 m, on veut tracer l'allure de la flèche pour différentes contraintes climatiques, le résultat est montré par la figure IV.14, on constate que la flèche d'un conducteur augmente fortement avec la croissance des efforts de la glace et du vent.

#### IV.3.2. Calcul de la flèche en fonction de la variation de la température

Un conducteur homogène suspendu entre deux pylônes au même niveau avec une portée longitudinale de 300 m. Les caractéristiques du conducteur sont les suivantes:

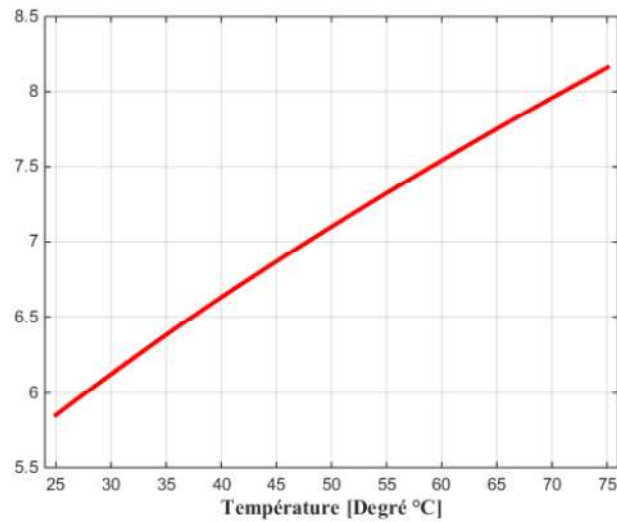
Poids unitaire: 1.302 kg / m ;

Tension de conception varie entre 3000 et 1000 kg ;

Température du conducteur varie entre 0 et 70 (°C) ;

Coefficient de dilatation thermique =  $19.1 \times 10^{-6}$  (°C<sup>-1</sup>).

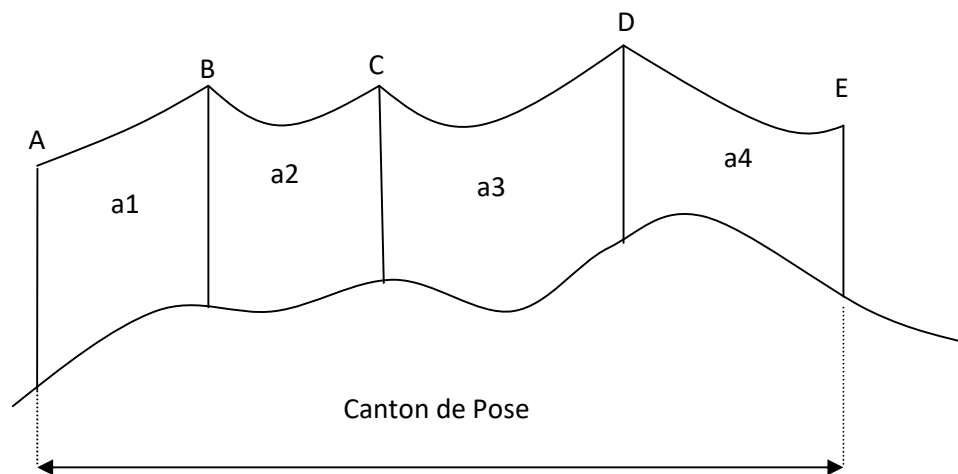
La Figure IV.15 présente l'évolution de la flèche en fonction de la température du conducteur. On remarque que les valeurs maximums de la flèche augmentent avec l'augmentation de la température, en effet la température dilate ou contracte l'acier du conducteur.



**Figure IV.15 :** Variation de la flèche maximale du conducteur en fonction de la température

### IV.3.3. Calcul de la portée équivalente

Les portées peuvent être souvent irrégulières dans un même canton, comme est montré sur la figure IV.16.



**Figure IV.16 :** Calcul de la portée équivalente moyenne du canton de pose

Un canton de ligne composé de 10 portées irrégulières, ces portées  $a_i$  sont mentionnées sur le tableau IV.1 :

Portées en (m)	
<b>a<sub>1</sub></b>	<b>320</b>
<b>a<sub>2</sub></b>	<b>370</b>
<b>a<sub>3</sub></b>	<b>330</b>
<b>a<sub>4</sub></b>	<b>350</b>
<b>a<sub>5</sub></b>	<b>380</b>
<b>a<sub>6</sub></b>	<b>360</b>
<b>a<sub>7</sub></b>	<b>390</b>
<b>a<sub>8</sub></b>	<b>340</b>
<b>a<sub>9</sub></b>	<b>300</b>
<b>a<sub>10</sub></b>	<b>310</b>

**Tableau IV.1** : Différentes portées d'un tronçon d'une ligne aérienne

La portée équivalente du canton est calculée à partir de la formule suivante :

$$l_{\text{éq}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n l_i^3}{\sum_{i=1}^n l_i}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{10} l_i^3}{\sum_{i=1}^{10} l_i}} = \sqrt{\frac{419175000}{3450}} = 348.57 \text{ (m)}$$

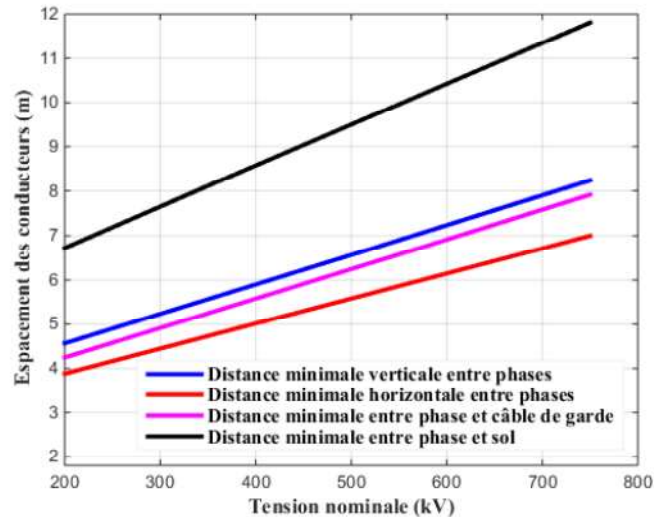
#### IV.3.4. Ecartement minimal entre les conducteurs

L'écartement minimal entre les phases pour une ligne HT est imposé par le type de pylône choisi.

Pour une tension maximale de 400 kV, pour plus de sécurité, pour la longueur de la chaîne d'isolateurs, nous retiendrons une chaîne de 21 éléments correspondant à 3066 mm pour un pas de 146 mm selon la norme CEI.

Pour des raisons de sécurité, les conducteurs électriques le long du parcours doit maintenir une distance suffisante minimale entre eux et entre les câbles de garde et entre le sol. La distance entre les fils conducteurs doit être suffisante pour empêcher leur contact, pour ne pas avoir des décharges entre les conducteurs et la terre il faut avoir des écartements horizontaux

(entre phase) et verticaux (entre terre et phase), ces distances sont proportionnelles à la tension transportée, ainsi que la hauteur et le gabarit des pylônes, comme le montre la figure IV.17.



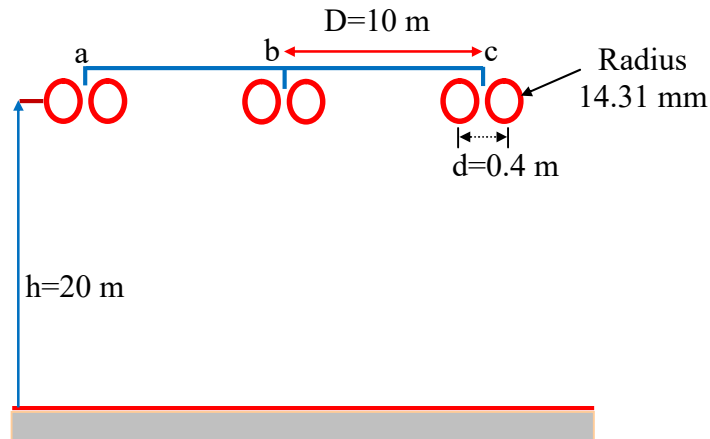
**Figure IV.17:** Espacement des conducteurs et des câbles de garde au milieu de la portée

#### IV.4. Calcul électrique d'une ligne aérienne

Considérons une ligne de transmission aérienne triphasée de 400 kV et d'une longueur de 200 Km, composée de trois conducteurs phases chacun a un rayon  $r$ , ces conducteurs sont arrangés horizontalement comme montrée dans la figure IV.18, avec les caractéristiques mentionnées au tableau donné ci-dessous. Aucun fil de terre n'est utilisé dans cette étude comme la montre la figure IV.18. Les conducteurs phases sont constituées d'un faisceau de deux conducteurs séparés.

Puissance apparente (nominale)	750 MVA
Tension de service	400 kV
Longueur du conducteur	200 Km
Type du conducteur	ACSR (Aluminum Conductors Steel Reinforced Conductor)
Rayon du sous-conducteur	0.01431 m
Résistance du conducteur à 20 °C	0.05 $\Omega$ / Km
Fréquence de service	50 Hz
Facteur de puissance	0.85

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques et dimensions de la ligne triphasée



**Figure IV.18 :** Configuration d'une ligne à simple circuit en faisceaux de deux conducteurs par phase

#### IV.4.1. Calcul des constantes électriques de la ligne

##### IV.4.1.1. Calcul de la résistance du conducteur

La résistance totale de la ligne est déterminée en connaissant la résistance linéique (par unité de longueur)  $R_L$  et la longueur  $L$  de la ligne. Chaque faisceau contient 2 sous-conducteurs dont la résistance à  $20^\circ\text{C}$  est  $0.05 \Omega/\text{km}$ . La résistance série  $R$  de la ligne est donc :

$$R = \frac{R_L}{n} \times L = \frac{0.05}{2} \times 200 = 0.025 \times 200 = 5 \Omega$$

Où :

$L$  : Longueur du conducteur de la ligne électrique en Km.

$n$  : Nombre des sous-conducteurs par phase.

La résistance électrique à la température de fonctionnement  $T$  de la ligne est doit prendre en compte le coefficient de variation  $\alpha$  de la résistance avec la température:

$$R_T = R_{20} \times \frac{(1 + \alpha \cdot \Delta t)}{n} = R_{20} \times \frac{(1 + \alpha \cdot (T - 20))}{n}$$

Où:

$\Delta t$  est la différence en degré entre la température et  $20^\circ\text{C}$

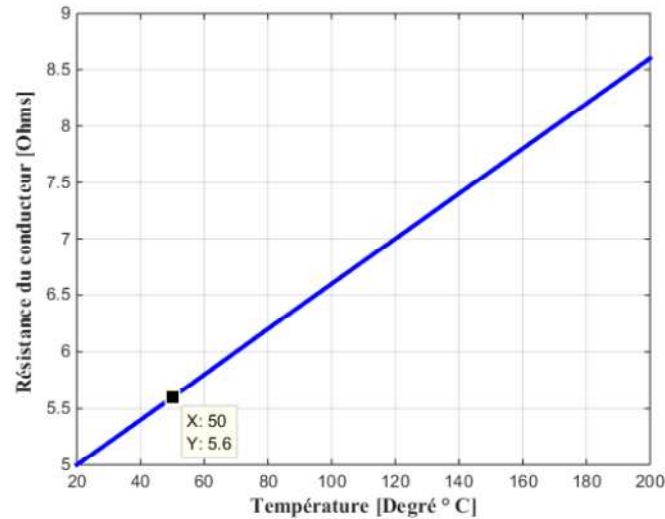
$R_{20}$  est la résistance du conducteur à  $20^\circ\text{C}$ .

$\alpha$  est le coefficient de température.

$T$  est la température à laquelle on veut trouver la valeur de la résistance.

La résistance pour ce conducteur à  $50^\circ\text{C}$  pour un coefficient de délitation égal à  $0.004 [^\circ\text{C}^{-1}]$

$$R_T = (5) \times (1 + 0.004 \cdot (50 - 20)) = 5.6 \Omega$$



**Figure IV.19 :** Variation résistance du conducteur en fonction de la température

Le résultat obtenu illustré par la figure IV.19, nous permet de voir une relation linéaire significative entre la résistance du conducteur et la variation de la température.

A la fréquence industrielle de 50 Hz, l'épaisseur de peau  $\delta$  est :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu_0 \cdot \pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{2.82 \times 10^{-8}}{4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 3.14 \times 50}} = 0.012 \text{ m}$$

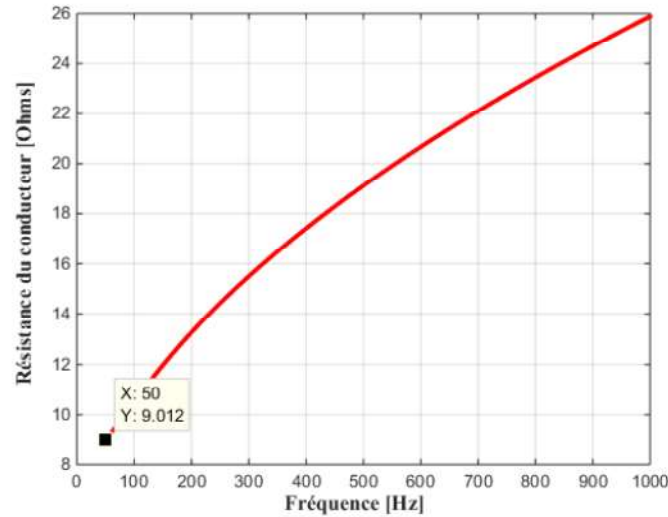
La nouvelle section utile sera :

$$S_u = \pi \times \delta (2 \times r - \delta) = 3.14 \times 0.012 \times (2 \times 0.01431 - 0.012) = 0.00062 \text{ m}^2$$

Et par conséquent :

$$R = \frac{\rho \times L}{S_u} = \frac{2.82 \times 10^{-8} \times 200000}{0.00062} = 9.09 \text{ } \Omega$$

Le résultat obtenu illustré par la figure IV.20, nous montre que la résistance du conducteur augmente avec l'augmentation de la fréquence.



**Figure IV.20 :** Variation résistance du conducteur en fonction de la fréquence

#### IV.4.1.2. Calcul de la réactance inductive

C'est l'un des paramètres les plus importants de la ligne électrique, car il influence fondamentalement dans sa capacité de transport. L'inductance série (séquence directe) par km:

$$L_{tot} = \frac{\mu_o}{2 \cdot \pi} \ln \frac{GMD}{GMR}$$

Avec :

GMD est la distance géométrique moyenne (entre les conducteurs) ;

GMR est le rayon géométrique moyen.

$$GMD = \sqrt[3]{(D_{ab} \times D_{ac} \times D_{bc})} = \sqrt[3]{(10 \times 20 \times 10)} = 12.6 \text{ m}$$

Pour un conducteur faisceau qui contient 2 sous-conducteurs, le rayon géométrique moyen est :

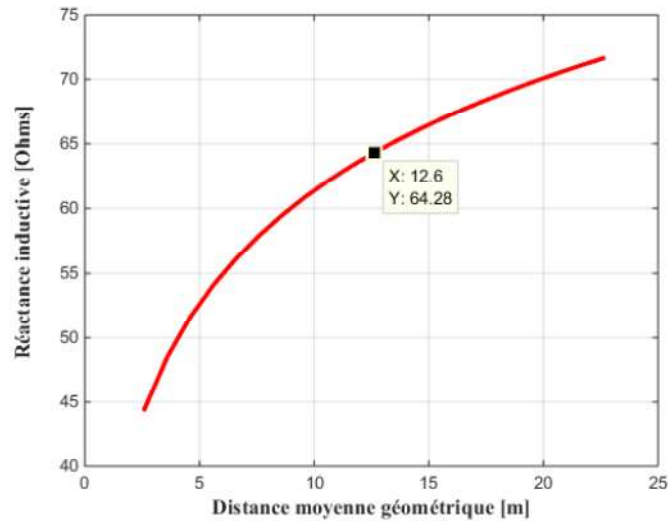
$$GMR = \sqrt[r \times (d)] = \sqrt[2]{0.01431 \times (0.4)} = 0.07566 \text{ m}$$

$$L_{tot} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot \pi} \ln \frac{12.6}{0.07566} = 10,23 \times 10^{-7} \text{ H/m} = 10,23 \times 10^{-4} \text{ H/Km}$$

La réactance série (séquence directe):

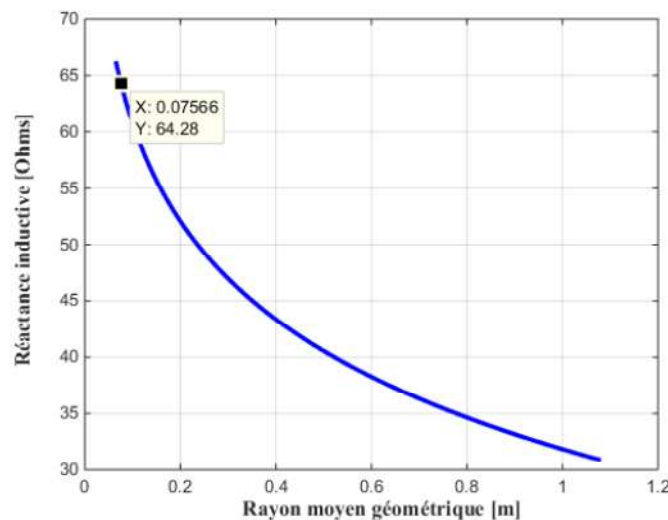
$$X_L = \omega \times L_{tot} \times L = (2.\pi.f) \times L_{tot} \times L =$$

$$= 2 \times 3.14 \times 50 \times 10,23 \times 10^{-4} \times 200 = 0.2936 \times 325 = 64,24 \Omega$$



**Figure IV.21 :** Variation de la réactance inductive en fonction de la distance géométrique moyenne

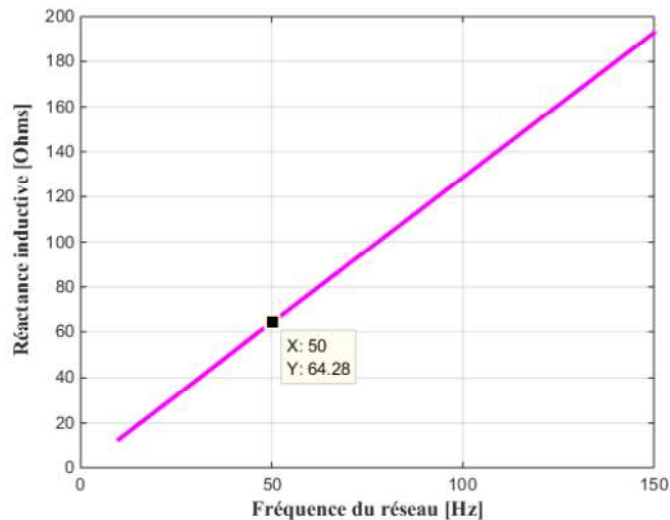
Le résultat de calcul de la réactance inductive en fonction de longueur de la distance géométrique moyenne est illustré à la figure IV.21. On remarque que les valeurs de la réactance augmentent considérablement lorsque l'on augmente la distance géométrique moyenne, cette augmentation est presque proportionnelle.



**Figure IV.22 :** Variation de la réactance inductive en fonction du rayon géométrique moyen

Le résultat de la variation de la réactance inductive en fonction du rayon géométrique moyen est montré à la figure IV.22. D'après le graphe de cette figure, on remarque si la valeur du

rayon augmente, la valeur de la réactance inductive diminue, par conséquent la réactance inductive est inversement proportionnelle au rayon.



**Figure IV.23 :** Variation de la réactance inductive en fonction de la fréquence du réseau

Le résultat de la variation de la réactance inductive en fonction de la fréquence du réseau est illustré par la figure IV.23. Le résultat obtenu nous permet de voir une relation parfaitement linéaire et significative entre la réactance inductive du conducteur et la fréquence.

#### IV.4.1.3. Calcul de la réactance capacitive

La capacité est obtenue grâce à la formule suivante en fonction de l'agencement (disposition) des conducteurs de la ligne:

La capacité shunt (séquence directe) :

$$C_0 = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}}$$

$$C_0 = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{GMR}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 8.85 \times 10^{-12}}{\ln \frac{12.6}{0.07566}} = 1.086 \times 10^{-11} \text{ F/m} = 1.086 \times 10^{-8} \text{ F/Km}$$

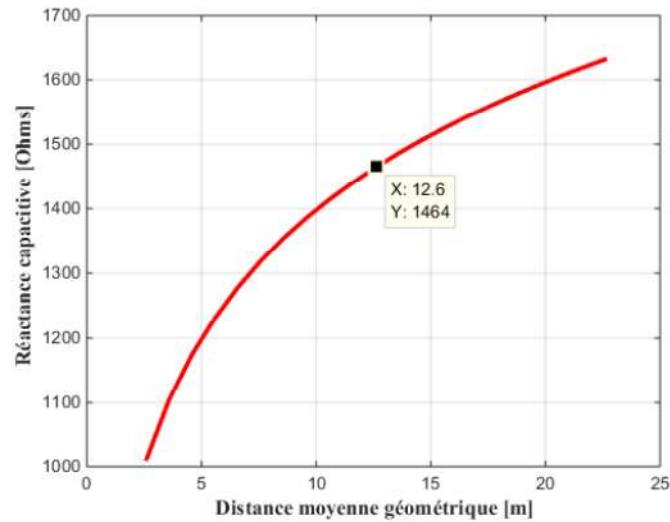
La capacité totale du conducteur:

$$C = C_0 \times L = 1.086 \times 10^{-8} \times 200 = 2.172 \times 10^{-6} \text{ F}$$

La réactance shunt (séquence directe) :

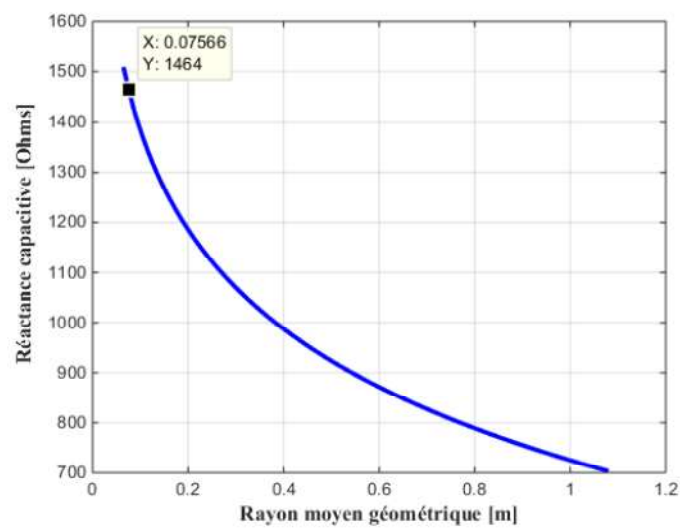
$$X_c = \frac{1}{\omega.C} = \frac{1}{(2.\pi.f) \times C}$$

$$= \frac{1}{(2 \times 3,14 \times 50) \times 2.172 \times 10^{-6}} = 1466,26 \Omega$$



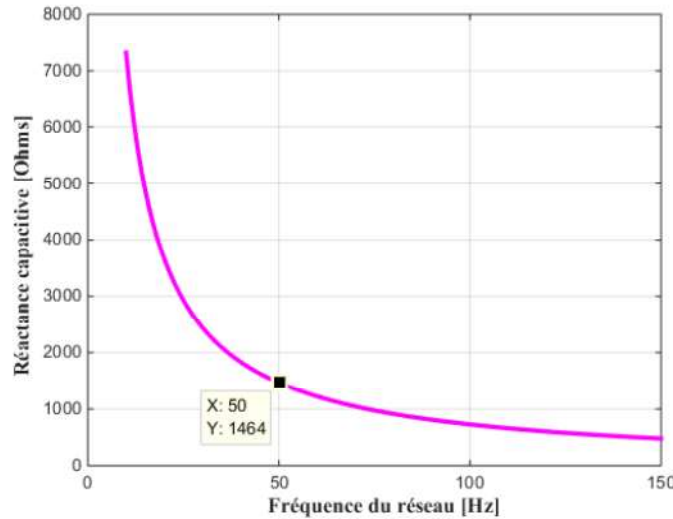
**Figure IV.24:** Variation de la réactance capacitive en fonction de la distance géométrique moyenne

La figure IV.24, représente les résultats obtenus de la variation de la de la réactance capacitive en fonction de la distance géométrique moyenne. On remarque que les valeurs maximums de la réactance augmentent avec l'ordre croissant de la distance géométrique moyenne, cette une augmentation est approximativement proportionnelle.



**Figure IV.25 :** Variation de la réactance capacitive en fonction du rayon géométrique moyen

La figure IV.25 illustre les résultats de simulation de la variation de la réactance capacitive en fonction du rayon géométrique moyen. Comme le montre le graphe de cette figure, le rayon du conducteur augmente, et par conséquent la réactance capacitive diminue fortement, la relation de cette variation est presque inversement proportionnelle.



**Figure IV.26 :** Variation de la réactance capacitive en fonction de la fréquence du réseau

Le résultat de simulation de la variation de la réactance capacitive en fonction de la fréquence du circuit est montré dans la figure IV.26. On constate clairement que la réactance capacitive est inversement proportionnelle à la fréquence.

#### IV.4.1.4. Calcul de la susceptance de la ligne

La susceptance de la ligne due à l'effet capacitive entre chaque phase et la terre. La susceptance notée B et est mesurée en siemens (S), elle est déterminée par l'expression:

$$B = \frac{1}{X_c}$$

$$B = \omega.C = \frac{1}{X_c} = \frac{1}{1466,26} = 6,82 \times 10^{-4} \text{ } \Omega$$

#### IV.4.1.5. Calcul de la conductance

La conductance est le dernier paramètre électrique important dans les circuits électriques. C'est un paramètre transversal, comme la capacité, elle est due au effet corona et aux fuites de courant, son unité est l'inverse de l'ohm (S, siemens).

Pour que la conductance existe, la tension la plus élevée dans le réseau doit être supérieure à la tension critique disruptive, la conductance est définie par l'équation suivante:

$$G = \frac{1}{R} = \frac{\Delta P}{U^2}$$

Où:

$\Delta P$  est les pertes par l'effet Corona en kW / km.

$U$  est la tension nominale de la ligne en kV.

Dans le cas de cette ligne, la tension critique disruptive est supérieure à la tension maximum du réseau, donc la conductance est négligée.

$$G = 0 \quad S / km$$

#### IV.4.1.6. Calcul de l'impédance de la ligne

Pour la fréquence industrielle), l'impédance propre de la ligne est calculée comme suit :

$$Z_L = R_L + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \ln \left( \frac{\delta}{R_c} \right)$$

Avec :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_s}{\mu_0 \cdot \pi \cdot f}} = \sqrt{\frac{100}{4 \times 3.14 \times 10^{-7} \times 3.14 \times 50}} = 712.12 \text{ m}$$

$$R_e = r_g \cdot n \sqrt{\frac{n \cdot r}{r_g}}$$

Avec :

$$r_g = \frac{d}{2 \times \sin(\pi / n)} = \frac{0.4}{2 \times \sin(\pi / 2)} = \frac{0.4}{2} = 0.2 \text{ m}$$

$$R_e = r_g \cdot n \sqrt{\frac{n \cdot r}{r_g}} = 0.2 \times 2 \sqrt{\frac{2 \times 0.01431}{0.2}} = 0.07566 \text{ m}$$

$$Z_L = \frac{0.05}{2} + j \cdot \frac{4 \times 3.14 \times 10^{-4} \times 2 \times 3.14 \times 50}{2 \times 3.14} \ln \left( \frac{712.12}{0.07566} \right) \left( \frac{\Omega}{Km} \right)$$

$$Z_L = 0.025 + j \cdot 0.575 \text{ } (\Omega)$$

$$Z = Z_L \times L = 5 + j \cdot 115 = 115.1 e^{j(87.51^\circ)} \text{ } (\Omega)$$

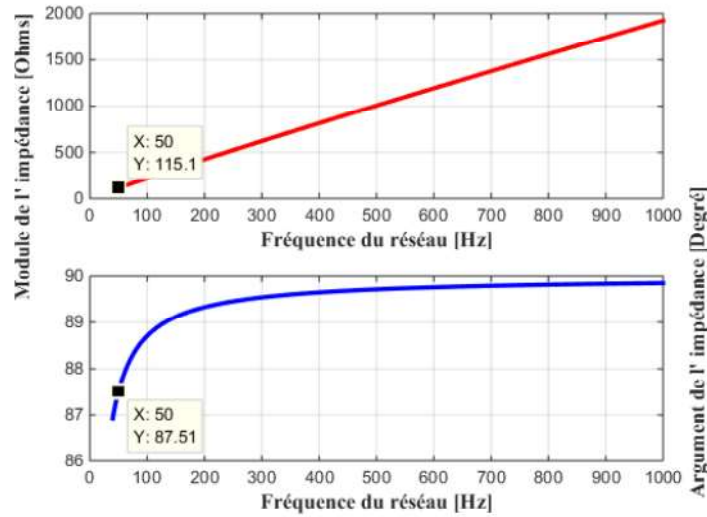


Figure IV.27 : Variation de l'impédance de la ligne en fonction de la fréquence du réseau

IV.4.1.7. Calcul de l'admittance de la ligne

Pour la fréquence industrielle), l'admittance  $Y$  est l'inverse de l'impédance propre de la ligne, son unité est le S (siemens). Elle est définie par :

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{R_L + j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_0}{2 \cdot \pi} \ln\left(\frac{\delta}{R_c}\right)}$$

$$Y_L = \frac{1}{Z_L} = \frac{1}{5 + j \cdot 115} = 0,0004 - j \cdot 0,0087 (S)$$

$$Y_L = 0.0087 \cdot e^{j(-87,51^\circ)} (S)$$

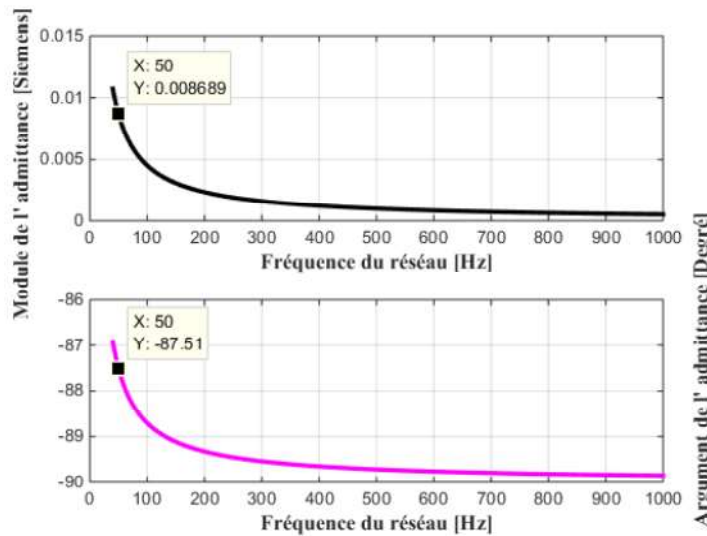
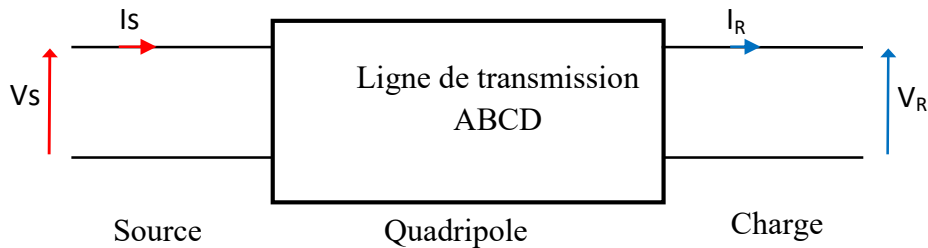


Figure IV.27 : Variation de l' admittance de la ligne en fonction de la fréquence du réseau

#### IV.4.2. Calcul des constantes auxiliaires de la ligne (ABCD)

Une ligne de transmission longue peut être représentée par un réseau à deux ports (quadripôle), comme indiqué sur la figure IV.28. Et les équations de courant et de tension peuvent être écrites en termes de constantes généralisées connues sous le nom de constantes ABCD, Ces Les coefficients sont utilisés pour l'analyse d'un réseau électrique, ils représentent les caractéristiques électriques du réseau.



**Figure IV.28 :** Représentation du circuit à deux ports d'une ligne pour la matrice ABCD

Les relations entre les tensions et les courants d'extrémité d'émission et de réception du circuit à deux ports (les bornes de sortie et d'entrée d'un réseau) sous forme de matrice sont données par les équations complexes ABCD ci-dessous:

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Les expressions de la tension et le courant en un point  $L$  pour une ligne longue sont :

$$V_S = V_R \cosh(\gamma L) + Z_C I_R \sinh(\gamma L) ,$$

$$I_S = \frac{V_R}{Z_C} \sinh(\gamma L) + I_R \cosh(\gamma L) .$$

$$V_S = A.V_R + B.I_R$$

$$I_S = C.V_R + D.I_R$$

Cependant, les constantes ABCD sont:

$$A = \cosh(\gamma L), B = Z_C \sinh(\gamma L), C = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma L), D = \cosh(\gamma L)$$

- Constante de propagation est donnée par l'équation :

$$\gamma_C = \sqrt{Y_L \cdot Z_L}$$

- Impédance caractéristique est exprimée par l'équation :

$$Z_C = \sqrt{\frac{Y_L}{Z_L}}$$

Avec, Y et Z sont en  $\Omega$ .

- Calcul de la constante de propagation de la ligne

$$\gamma_C = \sqrt{Y_L \cdot Z_L} = \sqrt{(0,0004 - j0,0087) \times (5 + j115)} = 1,0012 + j0,0013 = 1,0012 e^{j(0,1)^\circ}$$

- Calcul de l'impédance caractéristique de la ligne

$$Z_C = \sqrt{\frac{Z_L}{Y_L}} = \sqrt{\frac{(5 + j115)}{(0,0004 - j0,0087)}} = 5,1370 + j114,85 = 114,97 e^{j(87,44)^\circ} (\Omega)$$

En remplaçant ces valeurs obtenues et en déduisant les constantes ABCD, on trouve :

$$A = \cosh(\gamma_C) = \cosh(1,0012 + j0,0013) = 1,5445 + j0,0015 \\ = 1,5446 e^{j(0,055)^\circ}$$

$$B = Z_C \sinh(\gamma_C) = (5,1370 + j114,85) \times \sinh(1,0012 + j0,0013) = 5,8254 + j135,2 \\ = 135,33 e^{j(87,53)^\circ}$$

$$C = \frac{1}{Z_C} \sinh(\gamma_C) = \frac{1}{(5,1370 + j114,85)} \sinh(1,0012 + j0,0013) = 0,0005 - j0,0102 \\ = 0,0102 e^{j(-87,35)^\circ}$$

$$D = A = \cosh(\gamma_C) = 1,5445 + j0,0015 = 1,5446 e^{j(0,055)^\circ}$$

Modèle matriciel pour la ligne

$$\begin{bmatrix} V_S \\ I_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1,5446 e^{j(0,055)^\circ} & 135,33 e^{j(87,53)^\circ} \\ 0,0102 e^{j(-87,35)^\circ} & 1,5446 e^{j(0,055)^\circ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Calcul de la tension à la source de la ligne :

$$V_S = AV_R + BI_R = (1,5445 + j0,0015) \times V_R + (5,8254 + j135,2) \times I_R$$

La tension à la charge:

$$V_R = \frac{U_N}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \angle (0^\circ)$$

Le courant à la charge:

$$I_R = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N} = \frac{750 \times 10^6 (\cos(\theta) + j \cdot \sin(\theta))}{\sqrt{3} \cdot 400 \times 10^3} = \frac{750 \times 10^6 (0.85 + j \cdot 0.527)}{\sqrt{3} \cdot 400 \times 10^3} =$$

$$= 920,15 + j \cdot 570,5 = 1082,5 \angle (-31,79^\circ) \text{ (A)}$$

Avec :

$I_R$  : Intensité nominale (A) ;

$S$  : Puissance circulant dans le conducteur (kVA) ;

$U_N$ : Tension de service phase/phase (kV).

Par conséquent :

$$V_S = AV_R + BI_R = (1.5445 + j \cdot 0.0015) \times V_R + (5.8254 + j \cdot 135.2) \times I_R$$

$$V_S = (1.5445 + j \cdot 0.0015) \times 230,94 + (5.8254 + j \cdot 135.2) \times (920,15 + j \cdot 570,5)$$

$$V_S = 284,92 + j \cdot 128,07 = 312,38 \angle (24,21^\circ) \text{ kV}$$

Calcul du courant à la source:

$$I_S = CV_R + DI_R$$

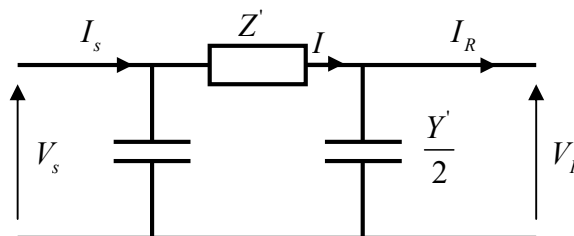
$$I_S = CV_R + DI_R = (0.0005 - j \cdot 0.0102) \times V_R + (1.5445 + j \cdot 0.0015) \times I_R$$

$$I_S = (0.0012j) \times 230,94 \times 10^3 + (0.9431 + 0.0022j) \times (920,15 + j \cdot 570,5)$$

$$I_S = 1,5316 - j \cdot 3,2415 = 3,59 \angle (-64,71^\circ) \text{ (kA)}$$

#### IV.4.3. Modélisation en Pi d'une ligne électrique longue

Le circuit équivalent pour un modèle d'une longue ligne, peut être présenté sous la forme donnée ci-dessous :



**Figure IV.29:** Circuit équivalent d'une longue ligne en Pi (pi)

En considérant les pertes, l'impédance  $Z'$  et l'admittance  $Y'$  se calcule comme suit:

$$Z' = \frac{Z_L \cdot \sinh(\gamma_C)}{\gamma_C}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y_L}{2} \times Th(\gamma_C)$$

Des paramètres ont été calculés précédemment.

$$\gamma L = 1.0012 + j. 0.0013$$

$$Y_L = 0,0004 - j.0,0087$$

$$Z_L = 5 + j.115$$

$$Z' = R' + j \times X'_L = \frac{(5 + j.115) \cdot \sinh(1.0012 + j. 0.0013)}{(1.0012 + j. 0.0013)} = 5,82 + j.135,2 = 135,33 \angle (87,54^\circ) (\Omega)$$

$$Y' = \frac{Y_L \times Th(\gamma_C / 2)}{(\gamma_C / 2)} = \frac{(0,0004 - j.0,0087) \times Th((1.0012 + j. 0.0013) / 2)}{((1.0012 + j. 0.0013) / 2)}$$

$$Y' = 0,0004 - j.0.008 = 0,008 \angle (-87,39^\circ) (S)$$

$$I = \frac{V_S - V_R}{Z'} = \frac{284,92 + j. 128,07 - 230,94}{5,82 + j.135,2} = 0.9673 - j. 0.3576 = 1.03 \angle (-20,29^\circ) (kA)$$

#### IV.4.4. Calcul des pertes de puissance

La perte de puissance active :

$$\Delta P_{per} = 3 \times I^2 \times R' = 3 \times (1.03)^2 \times 5,82 = 15,52 \text{ KW}$$

La perte de puissance réactive :

$$\Delta Q_{per} = 3 \cdot I^2 \cdot X'_L = 3 \times (1.03)^2 \times 135,2 = 430,3 \text{ KVAR}$$

La chute de tension relative (en %) :

$$\Delta V\% = \text{abs} \left| \frac{V_S - V_R}{V_S} \right| = \text{abs} \left| \frac{312,38 - 230.9401}{312,38} \right| = 26,07\%$$

Le rendement de la ligne électrique :

$$\eta\% = \frac{P_r}{P_r + \Delta P_{per}} = \frac{(750 \times 0.85)}{(750 \times 0.85) + 15,52} = 98.61\%$$

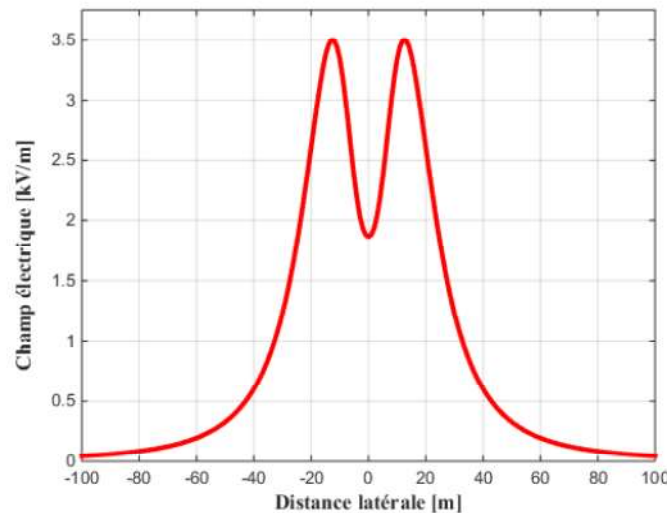
#### IV.4.5. Calcul du champ électrique d'une ligne électrique aérienne

On considère la ligne électrique aérienne triphasée en faisceau à haute tension ayant l'arrangement et les coordonnées géométriques montrés dans la figure IV.18 présentée ci dessus, la tension de ligne est de 400 KV.

Le champ électrique d'une ligne de transmissions affecte les objets métalliques aux proximités de la ligne, tels que les clôtures et les conduites enfouies, il peut induit des courants dans les objets qui sont aux proximités des champs électriques. Les effets des champs électriques deviennent plus importants à des tensions plus élevées. Dans certaines circonstances défavorables, ceux-ci donnent lieu à des courants de choc de diverses intensités. Le calcul du champ électrique est effectué à une hauteur de 1 m à partir du sol, en tenant en compte la hauteur moyenne des conducteurs qui est située entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la ligne.

La hauteur moyenne est définie par la relation suivante :

$$h_{moy} = h_{max} - \frac{2}{3} \times f = 20 - \frac{2}{3} \times 8 = 14.67 \text{ m}$$



**Figure IV.30:** Profil du champ électrique généré par la ligne aérienne triphasée

D'après la figure IV.30 qui montre l'allure du champ électrique en fonction de la distance latérale, on remarque que le champ électrique à 1 m au dessus du sol possède une valeur maximale  $E = 3,5 \text{ kV/m}$ . Le champ électrique est minimale sous la phase centrale puis augmente et atteint un maximum pour  $x = \pm 13 \text{ m}$ . Quand on s'éloigne de ce point, l'intensité

du champ électrique décroît exponentiellement en fonction du carré de la distance latérale pour atteindre des valeurs très faibles loin de la ligne.

A noter que la valeur de crête maximum obtenue est en dessous des valeurs limites d'exposition du champ électrique permmissible par les recommandations IRPA (Association Internationale pour la Protection contre les Radiations) et CENELEC (Comité Européen pour la Standardisation en Electrotechnique), qui sont respectivement 5.0 et 10.0 (kV/m) pour le public et les travailleurs en basse fréquence.

#### IV.4.6. Effet de couronne

##### IV.4.6.1. Tension disruptive critique

Lorsque la tension appliquée aux conducteurs dépasse une certaine valeur, appelée tension disruptive critique, les conducteurs sont entourés d'une faible lueur violette appelée couronne. Une ligne de transmission triphasée, 220 kV, 50 Hz est constituée d'un conducteur de 1,5 cm de rayon espacés de 2 mètres dans une formation triangulaire équilatérale. Si la température est de 40°C et la pression atmosphérique de 76 cm.

Tension de claquage

$$V_c = g_0 \cdot m_c \cdot m_t \cdot \delta_t \cdot \left( \frac{RMG}{\beta} \right) \cdot \ln \frac{DMG}{RMG}$$

$$\beta = \frac{1 + (n-1) \frac{r}{r_g}}{n} \text{ avec } r_g = \frac{d}{2 \times \sin(\pi/n)}$$

Avec :

$g_0$  est le champ d'ionisation de l'air (claquage)  $\approx 30 \text{ kV/cm} = 21.2 \text{ kV/cm}$  en valeur efficace ;

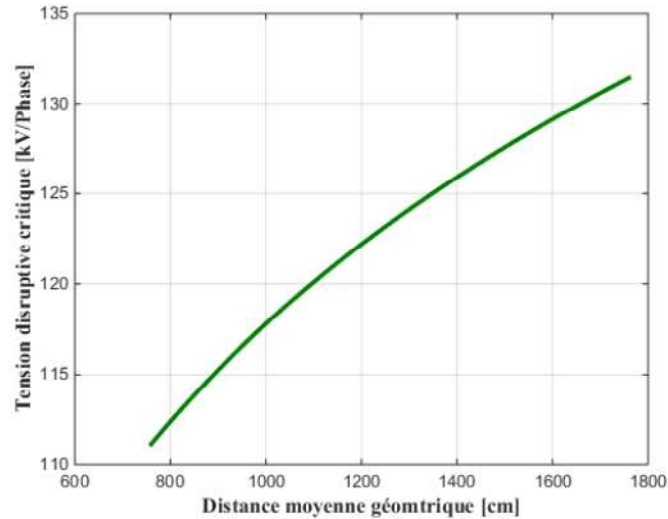
$m_c = 0.85$  c'est le facteur d'irrégularité ;  $m_t = 1$  pour le temps sec.

Calcul du facteur de densité de l'air.

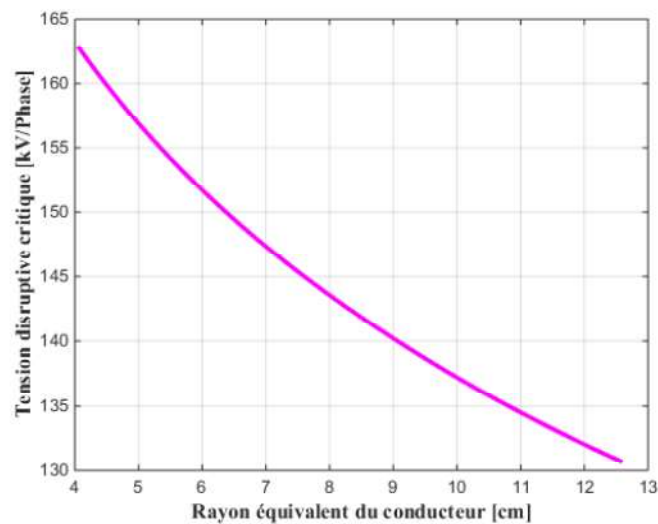
$$\delta_t = \frac{3.92 \times b}{273 + t} = \frac{3.92 \times 76}{273 + 40} = 0.952$$

$$V_c = g_0 \cdot m_c \cdot m_t \cdot \delta_t \cdot \left( \frac{r_0}{\beta} \right) \cdot \ln \frac{DMG}{RMG} = 0.85 \times 21.2 \times 0.9997 \times 1 \times \left( \frac{1.431}{0.4642} \right) \times \log_{10} \frac{1259.92}{7.57}$$

$$= 123.35 \text{ kV/par phase}$$



**Figure IV.31 :** Variation de l'intensité de la tension disruptive critique avec la distance géométrique moyenne



**Figure IV.32 :** Variation de l'intensité de la tension disruptive critique en fonction du rayon géométrique moyen

Les résultats de simulation de l'effet de couronne en fonction de la distance géométrique entre les conducteurs et en fonction du rayon du conducteur sont montrés par les figures IV. 31 et 32 respectivement.

Le résultat obtenu nous permet de voir presque une relation linéaire significative entre l'intensité de l'effet de couronne et la distance géométrique entre les conducteurs, également, on constate que l'effet de couronne diminue fortement avec la croissance de la distance et du rayon.

#### IV.4.6.2. Pertes par effet de couronne

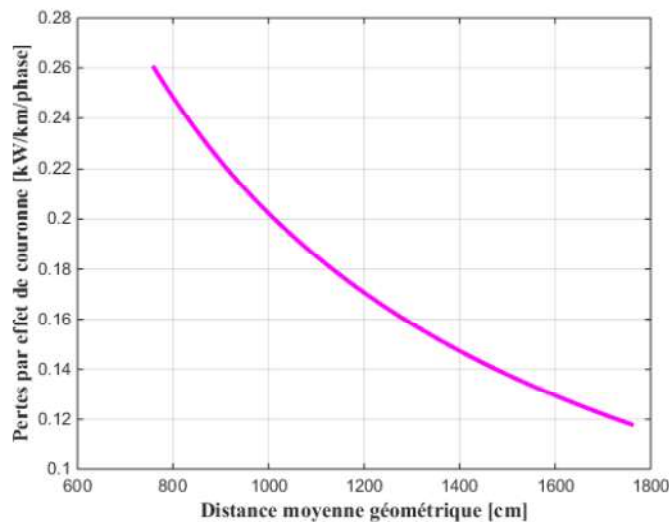
La tension d'alimentation par phase est :

$$V_s = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ kV}$$

En substituant les valeurs ci-dessus dans la formule donnée ci-dessous, nous avons une perte de couronne de:

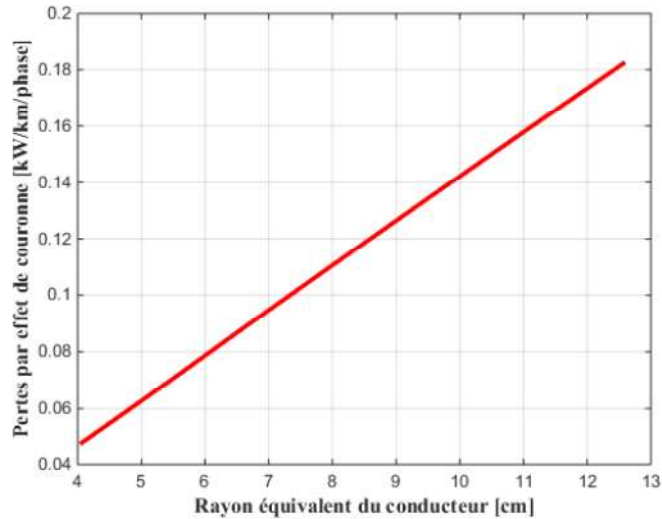
$$P = \frac{242.2}{\delta_i} \times (f + 25) \times \sqrt{\frac{RMG}{DMG}} \times (V_s - V_c)^2 \times 10^{-5} \text{ kW/km/phase}$$

$$\begin{aligned} P &= \frac{242.2}{0.9997} \times (50 + 25) \times \sqrt{\frac{7.5657}{1259.92}} \times (231 - 123.35)^2 \times 10^{-8} \\ &= 0.1632 \text{ kW/phase/km} \end{aligned}$$



**Figure IV.33:** Pertes par effet de couronne en fonction de la distance géométrique moyenne

Les résultats de simulation de la perte par effet de couronne en fonction de la distance géométrique entre les conducteurs et en fonction du rayon du conducteur sont montrés par les figures IV. 33 et 34 respectivement. Dans un premier temps, on constate une diminution augmentation très légère de la perte par effet de couronne avec l'augmentation fonction de la distance géométrique entre les conducteurs, tandis que la perte par effet de couronne augmente linéairement avec l'augmentation du rayon équivalent des conducteurs.



**Figure IV.34 :** Pertes par effet de couronne en fonction du rayon géométrique moyen

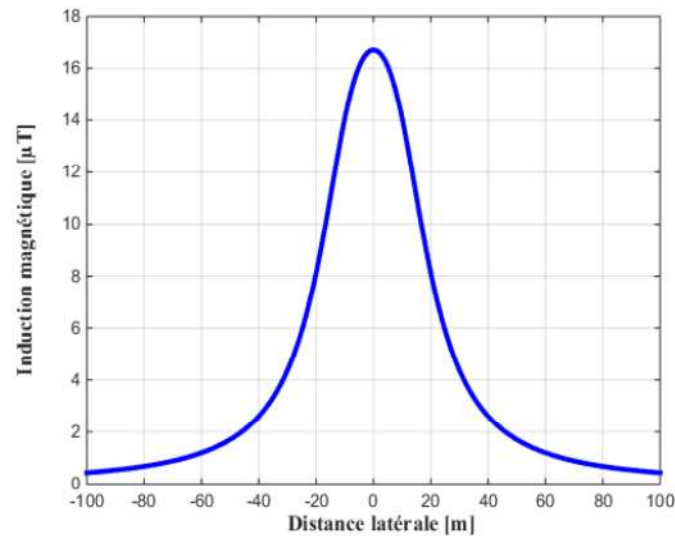
#### IV.4.7. Calcul du champ magnétique d'une ligne électrique aérienne

On considère la même ligne électrique aérienne triphasée montrée dans la figure IV.18 présentée ci dessus, la tension de ligne est de 400 KV. Les courants circulant dans les conducteurs de phase sont la source de champs magnétiques créés autour des lignes de transmission à haute tension. La connaissance de la valeur du champ magnétique des lignes électriques aériennes haute et très haute tension est une tâche importante visant l'intérêt particulier aux effets négatifs et biologiques possibles pour la santé et l'environnement du champ magnétique engendré par les lignes électriques aériennes à haute tension, il peut induit des courants et des tensions dans les objets qui sont situés au voisinage et sous ces lignes électriques. Le calcul du champ électrique est effectué à une hauteur de 1 m à partir du sol, en tenant en compte la hauteur moyenne des conducteurs qui est située entre la hauteur maximale et la hauteur minimale de la ligne. La valeur efficace (le module) du courant électrique de la ligne se calcule à l'aide de l'expression suivante:

$$I_R = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_N \cdot \cos(\theta)} = \frac{750 \times 10^6}{\sqrt{3} \times 400 \times 10^3 \times 0.85} = 1273.57 \text{ A}$$

La figure IV.23 montre l'allure du champ magnétique à 1 m au dessus du sol, on remarque que le champ magnétique à 1 m au dessus du sol situé directement sous la phase centrale avec une valeur de 16.7  $\mu\text{T}$ , à partir de ce point le champ décroît latéralement de manière continue pour atteindre à une distance de 100 mètres, loin du conducteur une valeur environ

dix fois plus faible que la valeur maximale rencontrée sous le conducteur de phase centrale de la ligne électrique.



**Figure IV.35:** Profil du champ magnétique généré par la ligne aérienne triphasée

On remarque que la recommandation de l'IRPA (Association Internationale pour la Protection contre les Radiations) et CENELEC (Comité Européen pour la Standardisation en Electrotechnique) concernant que les valeurs de l'induction magnétique limites permises qui sont  $100 \mu\text{T}$  pour l'exposition publique et à  $500 \mu\text{T}$  pour l'exposition professionnelle est bien respectée.

#### IV.5. Conclusion

A travers ce travail on a réalisé un ensemble de programmes sous Matlab pour le calcul mécanique et électrique d'une ligne aérienne à très haute tension.

Dans un premier temps, une série d'analyses appliquée à l'évaluation de la flèche, la longueur du conducteur et la tension mécanique de conception avec les différentes méthodes (chainette et parabole). Il est supposé que la forme de la chainette peut être remplacée exactement par une parabole pour les longueur adoptées dans les lignes a tres haute tension, Le calcul des paramètres géométriques d'une portée dénivelée et l'influence des différents facteurs environnementaux (température ambiante, vitesse du vent, surcharge de givre ou de neige) ont été également discutés.

Dans un deuxième temps, le calcul des paramètres et des caractéristiques électriques de la ligne électriques à haute tension (impédance et admittance, constantes du circuit ABCD, tension, et courant à la source et à la charge, champ électrique, le champ magnétique et l'effet

de couronne). D'après l'interprétation de ces résultats, ces programmes ont donné des résultats satisfaisants qui pourront être utilisés dans un projet de conception d'une ligne aérienne du réseau électrique de longue distance.

### Conclusion générale

Une ligne de transmission aérienne est un ensemble d'un deux ou plusieurs conducteurs acheminant l'énergie électrique, d'une source vers une charge. Le réseau électrique dépend de certains paramètres mécaniques et électriques pour pouvoir répondre à des exigences contraintes essentielles pour un bon fonctionnement d'une liaison électrique, telles que la stabilité, l'optimisation du coût global, et la continuité de service.

L'objectif de cette étude est de calculer les paramètres mécaniques et électriques et les propriétés d'une ligne de transport d'énergie à très haute tension.

Le premier chapitre était consacré pour connaître les différentes parties composantes du réseau électrique ainsi que tous les appareillages qui entrent dans le transport entre les centrales électriques de production et les lieux de consommation.

Dans le deuxième chapitre, nous avons défini la base de calcul mécanique d'une ligne de transport THT, l'étude est basée sur l'évaluation de plusieurs paramètres de la ligne (la flèche, la tension mécanique, la longueur du conducteur), une comparaison entre les deux méthodes, la caténaire et la parabole. Dans ce calcul, la prise en considération des hypothèses climatiques, sans oublier les efforts mécaniques appliqués sur les conducteurs a été discutée, en basant sur une formulation mathématique bien appropriée.

Dans le troisième chapitre, nous avons défini les paramètres et les différentes caractéristiques de la ligne ( $R$ ,  $L$ ,  $C$ ,  $Z$ ,  $Y$ ) et la modélisation d'une ligne aérienne de transport à très haute tension, également le calcul du champ électrique, l'effet de couronne et le champ magnétique, en basant sur un modèle mathématique qui décrit les relations entre les différents paramètres de la ligne électrique.

Dans le dernier chapitre, nous avons procédé à la simulation et à la modélisation d'une ligne électrique en prenant un exemple d'une ligne aérienne à très haute tension avec des conducteurs de phase en faisceau, en dimensionnant cette ligne aérienne à travers un calcul des différentes caractéristiques et paramètres mécaniques et électriques de la ligne de transport d'électricité, nous avons utilisé des programmes informatiques de programmation sous l'environnement MATLAB 2014b.

Ce travail pourra être élargi à d'autres calculs comme les pylônes et les armements, une étude complète concernant le dimensionnement, la conception et la construction d'une ligne aérienne à très haute tension. Enfin, nous espérons que notre travail sera utile et que d'autres futurs étudiants seront va encore évoluer pour l'intégrer dans le logiciel Matlab.

- [1] Mohamed Boumehraz, Énergies et Environnements, Université Mohamed Khider de Biskra, Support de cours, 2ème année Licence GE, Année Universitaire 2015/2016.
- [2] Labeled Djamel, Production décentralisée et couplage au réseau, Thèse de doctorats d'états de l'Université de mentouri de Constantine, 2008.
- [3] Olivier Richardot , Réglage Coordonné de Tension dans les Réseaux de Distribution à l'aide de la Production Décentralisée, Thèse doctorat de Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, 10 octobre 2006
- [4] Boutaba Samia, Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC, Thèse de Magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, 2009
- [5] Bellamouchi Abdelhai, Bekkouche Moussa, Bekkouche ELhadi, Conception et simulation de lignes électriques à haute tension, Mémoire de Mémoire, Université Hamma Lakhdar. El Oued, 2021.
- [6] N. Lahaçani Aouzellag, Contribution à l'Amélioration de la Flexibilité dans les Réseaux Electriques liée à l'Intégration des Générateurs Eoliens, Thèse de doctorat de l'université A.MIRA de Bejaïa, 2011.
- [7] Tebani Hocine, Production de l'Energie Electrique, Département d'Electrotechnique. Polycopié de Cours. Licence 2 année ST, Université Hassiba Benbouali Chlef, 2019/2020.
- [8] Farid Hamoudi, Réseaux de transport et de distribution électrique, Cours Génie électrique, université A/Mira- Bejaia, 2016.
- [9] Madani Nora, Menai Dahiba , Etude des protections de réseau électrique THT à SONELGAZ, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012
- [10] Aouzellag Lahcani Narimen, Reseaux Électriques, Polycopié de cours UEF 3111 (3ème Année Licence ELT), université de bejaia, 2020/2021.
- [11] Achou Nadia, Contribution à l'amélioration des protections d'un réseau électrique de distribution, Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf USTOMB, 2020
- [12] J. L. Lilien, Transport et Distribution de l'énergie Electrique, cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore université de Liège 2006
- [13] Haddad Lyazid, Hami Khodir, Calcul des paramètres et caractéristiques des lignes électriques triphasées, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira – Bejaia, 2015.
- [14 ] Oussama Messad, Nouh Agguni, Calcul des paramètres et caractéristiques des

lignes électriques triphasées, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2021.

[15] Alioum Moustapha , Construction d'une ligne HTA 33kV et du réseau HTA/BTA de Yaba, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou,2011

[16] Houssamatou Doudoua, Maman Kabirou, Étude de la construction d'une ligne haute tension catégorie A (20 kV) et la conception d'un réseau HTA/BT pour l'alimentation en énergie électrique de la cité MAOUREY, Mémoire de Master, Institut International d'Ingénierie Rue de la Science Ouagadougou,2018.

[17] Nebair Hamza, Chabira Djamel Eddine, Calculs Mécaniques des Lignes Electriques, Mémoire de Master, Université Amar Thelidji- Laghouat,2017.

[18] Graff Jean Jacques. Transport et Distribution : Calcul mécanique des lignes aériennes , Cours, Institut International Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Ouagadougou, Vol. 78, 2010.

[19] Charles Avril, Construction des lignes aériennes à haute tension, Technique française d'études et de réalisation, édition Eyrolles ,1974.

[20] André Chanal, Lignes aériennes, Présentation et calcul des lignes, base documentaire scientifique et technique - Techniques de l'Ingénieur, D4420

[21] Khencha Boulerbah, FERHAT Lotfi Mabrouk, Calculs Mécaniques des Lignes Aériennes MT , Tensions (A , B , G) et Efforts , Mémoire de Master, Université Amar Thelidji- Laghouat,2015.

[22] Chibane Samira, Dimensionnement d'une Ligne Aérienne à Haute Tension, Mémoire de fin d'études, Option : Machines électriques, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou 2012.

[23] Brahmia Tareq , Kouadria Faris, Modélisation des paramètres des lignes électriques, Mémoire de Master, université 8 Mai 1945, Guelma, 2020.

[24] Yacine Hammoudi, Khelifa Tabellout , Contribution au dimensionnement des lignes électriques haute tension, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2017.

[25] Chanay Khaled, Calcul des paramètres et caractéristique des lignes électriques triphasées, Mémoire de Master, Université Amar Telidji Laghouat, 2018.

[26] Bellaredj Amina et Gaouar Youcef, Conception et simulation d'une ligne aérienne de transport électrique 220KV, thèse master, Université Aboubakr Belkaïd, Tlemcen, 2016.

- [27] Thierry Debu ,ligne aériennes, paramètres électriques ,Techniques de l'Ingénieur D4435.
- [28] P-A Chamorel, Energie Electrique II : paramètres électriques des lignes, Ecole d'ingénieur Lausanne (EIL), 1994.
- [29] Taha Benaceur, L'étude des champs électromagnétiques générés par les lignes haute tension et moyen de mitigation, Mémoire de Master, Université Amar Telidji Laghouat, 2011.
- [30] Claude Gary, Effet couronne sur les réseaux électriques aériens, Techniques de l'Ingénieur D4440, traité Génie électrique.