

Chapitre 3 : LIGNES DE TRANSMISSION

I. Introduction

Une ligne électrique à haute tension peut être soit une ligne aérienne, soit un câble souterrain ou sous-marin. Son rôle est de transporter l'énergie électrique.

D'après le principe de conservation de puissance, la haute tension est pour deux raisons :

- L'augmentation de la tension permet de diminuer le courant.
- La réduction du courant permet d'utiliser de plus petites tailles de conducteurs.

Les lignes de transmissions utilisent plusieurs conducteurs par phase appelée faisceaux. L'objectif de cette dernière est pour augmenter la capacité de transport d'énergie d'une ligne électrique.

II. Ligne Electriques Aérienne

Une ligne aérienne se compose des conducteurs de phase, suspendus au moyen de chaînes d'isolateurs à des pylônes mise à la terre, elle dispose également d'un ou plusieurs conducteurs supplémentaires appelés câbles de garde, connectés à la terre par chaque pylône assurant principalement la protection contre les coups de foudre sur les conducteurs de phase.

III. Distances d'isolements requises

Le dimensionnement des lignes aériennes repose essentiellement sur les paramètres suivants :

- La hauteur minimale des conducteurs par rapport au sol.
- La distance entre les conducteurs de phase.
- La distance entre le conducteur de phase la plus extérieure et les bâtiments voisins.

IV. Types de lignes de transmission

Le type de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

1. puissance active à transporter
2. distance de transport
3. coût
4. esthétique, encombrement et facilité d'installation.

Nous distinguons quatre types de lignes :

IV.1 Lignes de distribution BT

Ce sont des lignes basses tension qui acheminent l'électricité vers les consommateurs BT. Avec une tension comprise entre 230 et 400 volts, pour alimenter les moteurs, cuisinières, lampes,... etc.

IV. 2 Lignes de distribution MT

Ce sont des lignes qui relient les clients MT aux postes de transformation HT/MT de la compagnie d'électricité. Leur tension est comprise entre 1 kV et 50 kV.

IV. 3 Lignes de transport HT

Les lignes haute tension acheminent l'électricité sur des distances plus courtes et relient les régions et les agglomérations entre elles, à des tensions comprise entre 50 et 150 kV.

IV.4 Lignes de transport THT

Les lignes THT permettent de transporter des quantités d'électricité très importantes sur de longues distances avec des pertes minimales. Elles relient les régions et les pays entre eux et alimentent directement certaines grandes zones industrielles. Elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 kV.

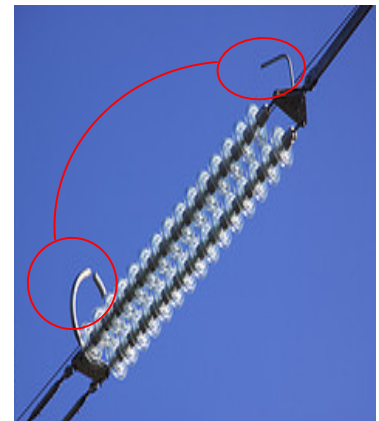
V. Éléments constitutifs d'une ligne aérienne

V.1 Les conducteurs de phase

Les conducteurs sont «nus» c'est-à-dire que leur isolation électrique est assurée par l'air. La distance des conducteurs entre eux et avec le sol garantit la bonne tenue de l'isolement. Cette distance augmente avec l'augmentation du niveau de tension. On général on utilise des conducteurs en aluminium, ou en alliage aluminium – acier.

V.2 Les Eclateurs

L'éclateur est généralement constitué de deux électrodes, l'une reliée à l'élément à protéger et l'autre à la terre. Leur distance est généralement réglable de façon à ajuster la tension d'amorçage. Son écartement est réglé pour provoquer l'amorçage si les surtensions des réseaux sont importantes.



V.3 Les Pylônes

Le rôle des pylônes est de maintenir les câbles à une distance minimale de sécurité du sol et des obstacles environnants, afin d'assurer la sécurité des personnes et des installations situées aux voisinages des lignes. Le choix des pylônes se fait en fonction des lignes à réaliser, de leur environnement et des contraintes mécaniques liées au terrain et aux conditions climatiques de la zone. Leur silhouette est caractérisée par la disposition des câbles conducteurs.

➤ Type des Pylônes

V.3.a Pylônes nappe



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

V.3.b Pylônes Triangle



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

V.3.c Pylône Double drapeaux



Courant sur le réseau 400 kV. Installé depuis les années 1960.

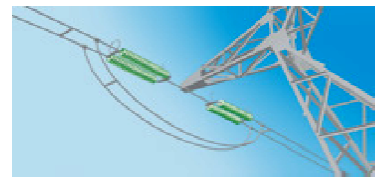
V.4 Isolateur

Les isolateurs assurent l'isolement électrique entre les câbles conducteurs et les supports. Sur le réseau de transport, les isolateurs sont utilisés en chaîne, dont la longueur augmente avec le niveau de tension. La chaîne d'isolateurs joue également un rôle mécanique, elle doit être capable de résister aux efforts dus aux conducteurs, qui subissent les effets du vent, de la neige.

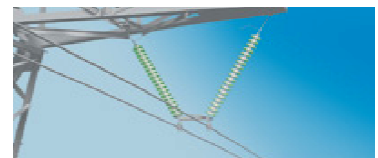
Les isolateurs ont deux fonctions principales :

- Ils empêchent le courant électrique qui circule dans les conducteurs de phase de passer dans les pylônes.
- Ils accrochent les conducteurs de phase au pylône.

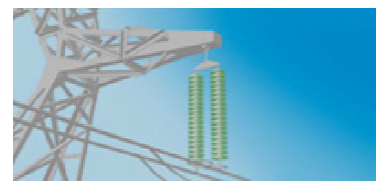
V.4.a Chaînes d'ancrage: Les chaînes d'ancrage sont utilisées dans le cas de pylône d'ancrage. Ce type de chaîne se distingue par sa position quasi horizontale.



V.4.b Chaînes V: Les chaînes d'isolateurs en V sont utilisées pour les pylônes de suspension lorsque que l'on souhaite limiter le balancement latéral des conducteurs.

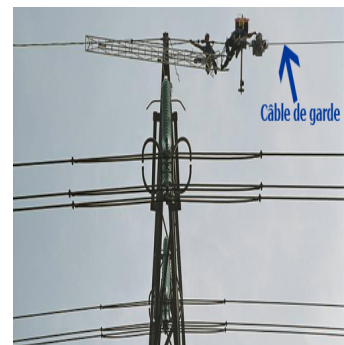


V.4.c Chaînes droite : Les chaînes de suspension droite sont la solution de base pour les pylônes de suspension. Ce type d'isolation est le plus fréquemment utilisé.



V.5 Câbles de garde

Les câbles de gardes ne conduisent pas le courant. Ils sont situés au-dessus des conducteurs de phase. Ils jouent un rôle de paratonnerre au-dessus de la ligne, en attirant les coups de foudre, et en évitent le foudroiement des conducteurs. Ils sont en général réalisés en acier. Au centre du câble d'acier on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant.



V.6 Prises de terre des pylônes

Les pylônes des lignes de transport d'énergie sont reliés à des prises de terre conçues avec grande précaution afin de leur assurer une faible résistance effectivement. Il ne faut pas que la chute de tension

dans la prise de terre provoquée par un courant de foudre qui frappe le pylône dépasse la tension de contournement des isolateurs. Sinon les trois phases de la ligne se mettent en court-circuit entre elles et à la terre.

VI. Nature de la ligne

Nous allons intéresser à modéliser une ligne, ce qui signifie que nous allons chercher un circuit, basé sur des composants simples (résistances, inductances et capacités), capable de reproduire fidèlement le comportement de la ligne.

La présence d'un champ statique entre les conducteurs est la conséquence de la capacité entre ces conducteurs, quant au champ magnétique, il est dû à l'inductance propre des conducteurs formant la ligne. Nous aurons donc besoin d'inductances et de capacités pour notre modèle. Les conducteurs eux-mêmes ont une résistance propre, cette résistance étant en série dans les conducteurs, dans notre modèle.

VII. Grandeurs caractéristiques de la ligne

VII.1 Impédance de la ligne

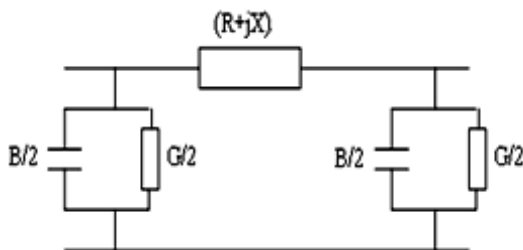
C'est une grandeur complexe dans laquelle interviennent la résistance et la réactance inductive de la ligne.

$$\bar{Z}_L = R_L + jX_L \quad (\Omega) \quad (\text{III.3})$$

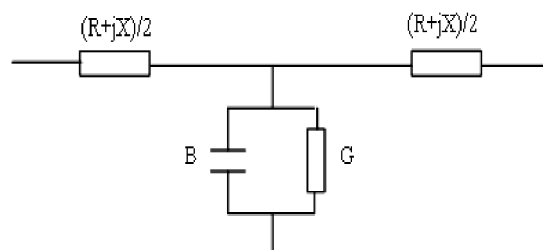
VII.2 Admittance de la ligne

De la même façon c'est une grandeur complexe définie par :

$$\bar{Y}_L = G_L + jB_L \quad (S) \quad (\text{III.2})$$



Schémas équivalent en (π)



Schémas équivalent en (T)

VII.3 Détermination analytique R L C G :

VII.3.1 résistance d'une ligne

La résistance ohmique R , exprimée en Ω , en courant continu et en basse fréquence, d'un conducteur homogène de longueur l (en m), de section uniforme S (en m^2) et de résistivité ρ ($\Omega.m$) en fonction de la température est donnée par la formule :

$$R = \frac{\rho(T) l}{S} \quad [\Omega] \quad \text{Avec : } \rho(T) = \rho(T_0)(1 + \alpha(T - T_0))$$

Où : $\rho(T_0)$ est la résistivité du conducteur à 20 °C [Ωm]

α : est le coefficient de température [$^{\circ}C^{-1}$] ($\alpha=0.004 \text{ }^{\circ}C^{-1}$ pour le Cu et Al)

VII.3.2 Inductance d'une ligne monophasé

L'inductance propre d'un circuit est la somme de deux termes :

Un terme du flux interne de conducteur est appelé inductance interne.

Un autre terme du flux extérieur est appelé inductance externe ;

$$L_p = L_{int} + L_{ext}$$

✓ **Inductance interne L_{int}**

$$J = \frac{I}{S} = \frac{I}{\pi a^2} \quad \text{La densité de courant}$$

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_x = H_x 2\pi x \quad \text{L'induction magnétique}$$

$$I_x = J \pi x^2 = \frac{I}{\pi a^2} \cdot \pi x^2 = I \frac{x^2}{a^2}$$

$$\text{Donc : } H_x 2\pi x = \frac{x^2}{a^2} I \Rightarrow H_x = \frac{x}{2\pi a^2} I$$

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x}{2\pi a^2} I \quad \text{Le champ magnétique}$$

$$d\phi_x = B_x ds \quad ds = dx \cdot l = dx \cdot 1m = dx \quad d\phi_x = B_x dx = \frac{\mu x}{2\pi a^2} I dx$$

Le flux total entre 0 et x

$$\left. \begin{array}{l} I/s_t \text{ ----- } \rightarrow d\phi_t \\ I_x/s_x \text{ ----- } \rightarrow d\phi_x \end{array} \right\} d\phi_t = \frac{s_x}{s_t} d\phi_x = \frac{x^2}{a^2} d\phi_x \Rightarrow d\phi_t = \frac{\mu x^3}{2\pi a^4} I dx$$

$$\phi_t = \int_0^a \frac{\mu x^3}{2\pi a^4} I dx = \left[\frac{\mu x^4}{8\pi a^4} I \right]_0^a = \frac{\mu}{8\pi} I$$

L'inductance interne est :

$$L_{int} = \frac{\phi_t}{I} = \frac{\mu}{8\pi}$$

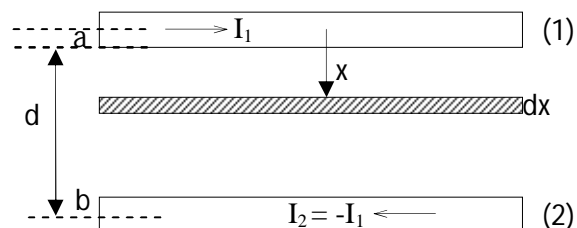
[H/m] ;

Remarque :

L_{int} est indépendant de la propriété géométrique (section du conducteur...).

✓ **Inductance externe L_{ext}**

Inductance partielle de conducteur (1)



$$\oint \vec{H}_{x1} \cdot d\vec{l} = I_1 = H_{x1} 2\pi x_1 \Rightarrow H_{x1} = \frac{I_1}{2\pi x_1} \Rightarrow B_{x1} = \frac{\mu I_1}{2\pi x_1}$$

$$\phi_1 = \int_a^d B_{x1} dx_1 = \int_a^d \frac{\mu I_1}{2\pi x_1} dx_1 = \frac{\mu I_1}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$$

$$L_{1ext} = \frac{\phi_1}{I_1} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right) \quad \text{donc : } L_{1ext} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right)$$

$$L_{P1} = L_{int} + L_{1ext}$$

$$L_{P1} = \frac{\mu}{8\pi} + \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a}\right) = \frac{\mu}{2\pi} \left(\frac{1}{4} + \ln\left(\frac{d}{a}\right) \right) = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln\left(e^{\frac{1}{4}}\right) + \ln\left(\frac{d}{a}\right) \right) = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a} e^{\frac{1}{4}}\right)$$

$$L_{P1} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{a'}\right) \quad [\text{H/m}] \quad \text{avec } a' = a e^{-\frac{1}{4}} = 0.7788a$$

a' : Rayon moyenne géométrique du conducteur a .

d : Distance entre les deux conducteurs

A la même manière on trouve :

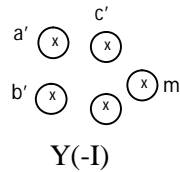
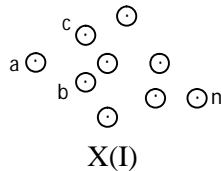
$$L_{P2} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d}{b'}\right) \quad [\text{H/m}]$$

L'inductance totale =

$$L_P = L_{P1} + L_{P2} = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{d^2}{a'b'}\right) \quad [\text{H/m}]$$

✓ Inductance d'une ligne monophasée composée :

Notion de DMG et RMG



Le conducteur X est constitué de n filaments identiques et parallèles, chacun est parcouru par un courant I/n

Chacun des filaments de groupe Y est parcouru par un courant $-I/m$

L'inductance de groupe X est :

$$L_x = \frac{\mu}{2\pi} \left(\ln \left(\frac{\sqrt[nm]{(D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am'}) (D_{ba'} D_{bb'} D_{bc'} \dots D_{bm'}) \dots (D_{na'} D_{nb'} D_{nc'} \dots D_{nm'})}}{n^2 \sqrt{(d_{aa} d_{ab} d_{ac} \dots d_{an}) (d_{ba} d_{bb} d_{bc} \dots d_{bn}) \dots (d_{na} d_{nb} d_{nc} \dots d_{nn})}} \right) \right)$$

$$L_x = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_m}{D_{sx}}\right) = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{DMG_{xy}}}{D_{RMG_x}}\right) \quad [\text{H/m}]$$

$$L_y = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_m}{D_{sy}}\right) = \frac{\mu}{2\pi} \ln\left(\frac{D_{DMG_{xy}}}{D_{RMG_y}}\right) \quad [\text{H/m}]$$

$$D_m = DMG = \left(\prod_i^n \prod_j^m D_{ij} \right)^{\frac{1}{nm}}$$

Distance Moyenne Géométrique

$$D_s = RMG = \left(\prod_i^n \prod_j^m d_{ij} \right)^{\frac{1}{n^2}}$$

Rayon Moyenne Géométrique

$$L = L_x + L_y = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{D_m}{D_{sx} D_{sy}} \right)$$

Inductance totale de la ligne composée

μ : La perméabilité magnétique relative du conducteur.

La réactance inductive totale de la ligne aérienne de longueur l est :

$$X = 2\pi f L l \quad (\Omega)$$

✓ Inductance d'une ligne triphasée :

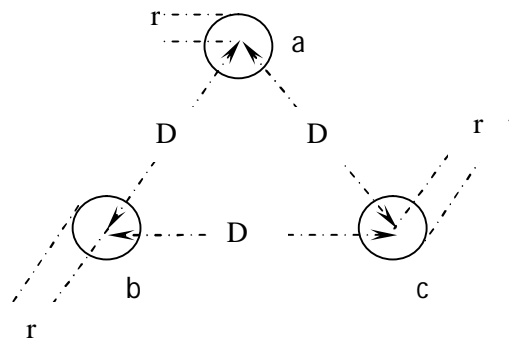
Espacement symétrique :

Soit trois groupe de conducteur A B C tel que

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$$

$$D_{ab} = D_{ac} = D_{bc} = D \quad r_a = r_b = r_c = r$$

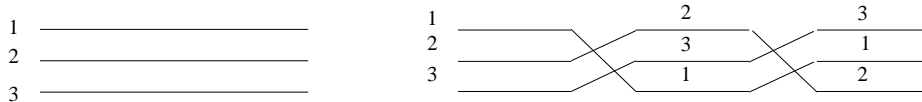
$$L_a = L_b = L_c = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{D}{r'} \right)$$



Espacement asymétrique :

Soit trois groupe de conducteur A B C tel que $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$ ($D_{ab} \neq D_{ac} \neq D_{bc}$)

Pour avoir un système équilibré sur la longueur de la ligne de transport, les conducteurs sont disposés de façon que chaque phase occupe une position pour la même distance



$$L_a = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{(D_{12} D_{13} D_{23})^{\frac{1}{3}}}{(r_1' r_2' r_3')^{\frac{1}{3}}} \right)$$

$$L_a = \frac{\mu}{2\pi} \ln \left(\frac{D_{eq}}{D_{seq}} \right)$$

L_a : L'inductance cyclique de la ligne par phase et par mètre ($L_a = L_b = L_c$)

Telle que $D_{eq} = (D_{12} D_{13} D_{23})^{\frac{1}{3}}$ Distance Moyenne Géométrique

$D_{sq} = (r_1' r_2' r_3')^{\frac{1}{3}}$ Rayon Moyenne Géométrique

$D_{sq} = r'$ si $r = r_1 = r_2 = r_3$

VII.3.3 Calcul des capacités linéiques :

On a vu pendant le calcul des inductances que l'élément le plus important est le champ magnétique alors pendant le calcul des capacités c'est le champ électrique.

Inductance :

$$I \xrightarrow{\text{ampaire}} H \xrightarrow{B = \mu H} B \xrightarrow{d\phi = Bds} \phi \xrightarrow{\text{-----}} L = \frac{\phi}{I}$$

Capacité :

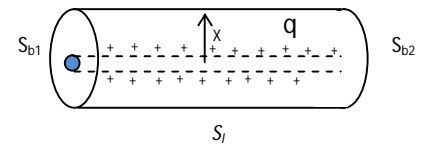
$$Q \xrightarrow{\text{Gauss}} E \xrightarrow{E = -\text{grad}v} v \xrightarrow{\text{-----}} C = \frac{Q}{v}$$

✓ Champ électrique d'un conducteur rectiligne :

- Le conducteur est supposé comme un conducteur de longueur infinie pour négliger les effets des extrémités
- Le conducteur est supposé chargé uniquement par une charge q
- Le conducteur supposé dans un espace libre

D'après le théorème de Gauss :

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_V \frac{\rho}{\epsilon} dv$$

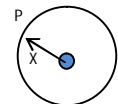


On peut calculer le champ électrique au point P₁.

$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = \oint_S \vec{E} \cdot (\vec{ds}_l + \vec{ds}_{b1} + \vec{ds}_{b2}) = \oint_S (\vec{E} \cdot \vec{ds}_l + \vec{E} \cdot \vec{ds}_{b1} + \vec{E} \cdot \vec{ds}_{b2}) = \oint_S (\vec{E} \cdot \vec{ds}_l) = E 2\pi x l \quad (1)$$

$$\oint_V \frac{\rho}{\epsilon} dv = \frac{q}{\epsilon} \quad (2)$$

$$(1) \text{ Et } (2) \Rightarrow \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{s} = E 2\pi x l = \frac{q}{\epsilon} \Rightarrow E = \frac{q}{2\pi \epsilon x} \quad [V/m]$$

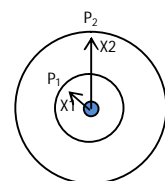
**✓ Potentielle entre 2 point :**

$$\vec{E} = -\text{grad} V = \frac{\partial V}{\partial x} \vec{U}_x \quad E = -\frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{avec } x \text{ la distance radiale}$$

$$\delta V = -E \delta x \Rightarrow \int_{P_1}^{P_2} dV = -\int_{x_1}^{x_2} E dx \Rightarrow V_2 - V_1 = -\int_{x_1}^{x_2} \frac{q}{2\pi \epsilon x} \frac{1}{x} dx$$

$$\Rightarrow V_2 - V_1 = \frac{-q}{2\pi \epsilon} \ln \frac{x_2}{x_1} = -V_{12}$$

$$\text{Donc : } V_{12} = \frac{q}{2\pi \epsilon} \ln \left(\frac{x_2}{x_1} \right)$$



✓ **Capacité d'une ligne bifilaire (monophasé) :**

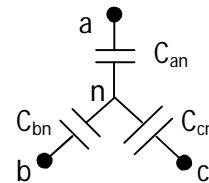
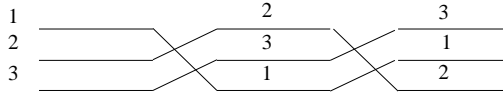
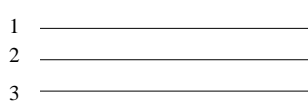
$$C_{ab} = \frac{q}{V_{ab}} = \frac{ql}{V_{ab}} = \frac{2\pi \varepsilon}{q \cdot \ln\left(\frac{d^2}{r_a r_b}\right)} l \quad [F]$$

$$C_{ab} = \frac{2\pi \varepsilon}{q \cdot \ln\left(\frac{d^2}{r_a r_b}\right)} \quad [F/m]$$

✓ **Ligne triphasé et équilatérale (symétrique) :**

$$V_{an} = \frac{q_a}{2\pi \varepsilon} \ln\left(\frac{d}{r}\right) \Rightarrow C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} \quad \text{La capacité nodale ou capacité cyclique}$$

Tronçon transversal de la ligne peut être représenté comme suite :

✓ **Capacité d'une ligne régulièrement transposée (asymétrique) :**

$$V_{an} = \frac{1}{2\pi \varepsilon} q_a \ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right) \quad [V] \quad C_{an} = C_{bn} = C_{cn} = \frac{2\pi \varepsilon}{\ln\left(\frac{D_{eq}}{r}\right)} \quad [F/m] \quad \text{Où : } D_{eq} = (d_{12} d_{23} d_{13})^{\frac{1}{3}}$$

$$r = r_a = r_b = r_c$$

La réactance capacitive (Susceptance linéique) est égale : $B = C_{an} w \quad \left[\frac{\text{siemens}}{m} \right]$

VII.3.4 La conductance due à l'effet couronne G

Les pertes de la puissance active ΔP 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 :

$$g_0 = \frac{\Delta P}{U_n^2} \quad \left(\frac{\text{siemens}}{km} \right) \quad (\text{III.7})$$

ΔP : 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 :

$$G = g_0 l \quad (\text{siemens}) \text{ ou } (\Omega^{-1}) \quad (\text{III.8})$$

VIII. Conclusion

Les lignes aériennes constituent des circuits de transmission des réseaux triphasés reliant des générateurs aux charges. Chacune possède ses propres caractéristiques résistive, inductive et capacitive. Ce chapitre est donné une description de la ligne de transmission. Il fait la distinction entre les caractéristiques longitudinales (résistances des conducteurs et les inductances entre les conducteurs) et les caractéristiques transversales (capacité des conducteurs).