

## Chapitre II: Paramètres de la ligne électrique

L'énergie électrique produite dans les centrales est transporté sur des lignes de transport à haute tension à des points consommations. La tendance d'utiliser des tensions plus élevées est motivée par la capacité de la ligne, tout en réduisant les pertes.

### II.1- Résistance de la ligne en courant continu

Partons de la loi d'Ohm locale :

$$\vec{j} = \sigma \cdot \vec{E} \quad (\text{II.1})$$

$\vec{j}$ : est la densité de courant ( $A/m^2$ );  
 $\sigma$ : est la conductivité électrique ( $\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$ );  
 $\vec{E}$ : est le champ électrique ( $V/m$ ).

$$R_{DC} = \rho \times \frac{l}{S} = \frac{l}{\sigma \times S} \quad (\text{II.2})$$

$\rho$ : est la résistivité du conducteur  $\Omega \cdot m$ .

- Effet de fréquence
- Effet de température

La résistivité d'un matériau croît avec la température selon la loi :

$$\rho_\theta = \rho_0 \cdot (1 + \alpha * T) \quad (\text{II.3})$$

$\rho_0$ : est la résistivité du conducteur à  $20^\circ C$ ;  
 $\alpha$ : est le coefficient de température ;  $\alpha = 4 * 10^{-4}$  pour le Cu et AL  
 $T$ : est l'écart de température par rapport à  $20^\circ C$ .

Ou bien

$$R_2 = R_1 \frac{C^{te} + T_2}{C^{te} + T_1} \quad (\text{II.4})$$

$\{C^{te} = 228^\circ C\}$

### II.2- Réactance longitudinale (inductance)

Une inductance (supposée linéaire) est toujours le quotient d'un flux, embrassé par le contour, par le courant qui en est la cause. Elle est déterminée par la relation :

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (\text{II.5})$$

$\phi$ : est le flux d'induction ;  
 $I$ : est le courant circulant dans le conducteur.

Nous avons deux types d'inductances :

- Inductance propre : La self-inductance d'un conducteur électrique parcouru par un courant.
- Inductance mutuelle : L'inductance mutuelle se manifeste par l'interaction entre les conducteurs.

II.2.1- Inductance interne d'un conducteur

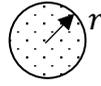


Figure II-1 Conducteur électrique isolé

D'après la loi physique le flux à l'intérieur du conducteur :

$$d\phi_{int-x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} x dx \tag{II.6}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} H/m$ : La perméabilité du vide.

Le rapport de la section transversale à l'intérieur du cercle de rayon  $x$  de la section totale du conducteur peut être exprimé comme fraction des deux flux.

$$d\lambda_x = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\phi_{int-x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} x^3 dx \tag{II.7}$$

$$\lambda_x = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \int_0^x x^3 dx \tag{II.8}$$

L'intégration d'équation (II.8) de 0 à  $r$ , on obtient la liaison de flux interne :

$$\lambda_{int} = \frac{\mu_0 I}{8\pi} \tag{II.9}$$

Puis à partir d'équation (II.9) de nous obtenons l'inductance interne par unité de longueur :

$$L_{int} = \frac{\mu_0}{8\pi} = \frac{1}{2} 10^{-7} H/m \tag{II.10}$$

II.2.2- Inductance externe

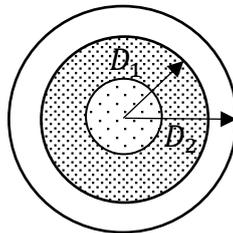


Figure II-2 Conducteur isolé

De la même façon le flux à l'extérieur du conducteur :

$$d\phi_{ext-x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^2} \frac{1}{x} dx \tag{II.11}$$

D'où

$$d\lambda_x = d\phi_{ext-x} = \frac{\mu_0 I}{2\pi r^4} \frac{1}{x} dx \tag{II.12}$$

Le flux externe entre deux points  $D1$  et  $D2$  :

$$L_{ext} = \int_{D1}^{D2} \frac{\mu_0 I}{2\pi} \frac{1}{x} dx \tag{II.13}$$

On obtient :

$$L_{ext} = \frac{\mu_0}{2\pi} \ln\left(\frac{D2}{D1}\right) = 2 \times 10^{-7} \ln\left(\frac{D2}{D1}\right) H/m \tag{II.14}$$

On peut écrire l'inductance à un point de distance  $D$  d'un conducteur de rayon  $r$  :

$$L = L_{ext} + L_{int} = 2 \times 10^{-7} \left( \ln\left(\frac{D}{r}\right) + \ln(e^{1/4}) \right) = 2 \times 10^{-7} \left( \ln(D) + \ln\left(\frac{1}{r \times e^{-1/4}}\right) \right)$$

$$L = L_{11} + L_{12} \begin{cases} L_{11} = 2 \times 10^{-7} \times \ln(D) \\ L_{12} = 2 \times 10^{-7} \times \ln\left(\frac{1}{r \times e^{-1/4}}\right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$v_1 = j\omega L_{11}I_1 + j\omega L_{12}I_2 \quad (\text{II.16})$$

$$v_2 = j\omega L_{21}I_1 + j\omega L_{22}I_2 \quad (\text{II.17})$$

$L_{11}$  et  $L_{22}$  Correspondre à l'inductance propre

$L_{12}$  et  $L_{21}$  Correspondre à l'inductance propre

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{D}{r e^{-1/4}}\right) \quad (\text{II.18})$$

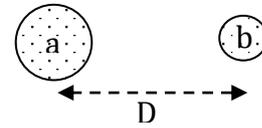
D'une manière générale l'inductance d'un conducteur est :

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{GMD}{GMR}\right) \quad (\text{II.19})$$

### II.2.3- Inductance d'une ligne monophasée

#### II.2.3.1- Un conducteur par phase

Considérons deux conducteurs ronds solides avec des rayons de  $r_a$  et  $r_b$  comme indiqué dans



la Figure II-3, l'un des conducteurs est le circuit de retour de l'autre.

Figure II-3 Ligne monophasée à un conducteur par phase

$$N_a = N_b = 1$$

$$GMD = D_{ab} = D$$

$$GMR_a = r_a \cdot e^{-1/4} \quad ; \quad GMR_b = r_b \cdot e^{-1/4}$$

$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{r_a \cdot e^{-1/4}}\right) \quad (\text{II.20})$$

$$L_b = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{r_b \cdot e^{-1/4}}\right) \quad (\text{II.21})$$

Par conséquent, l'inductance du circuit complet est :

$$L = L_a + L_b = 4 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{\sqrt{GMR_a GMR_b}}\right) \quad (\text{II.22})$$

#### II.2.3.2- Deux conducteurs par phase

Soit la ligne monophasée décrite à la Figure II-4, composée de deux faisceaux à deux conducteurs. (Les conducteurs sont identiques)

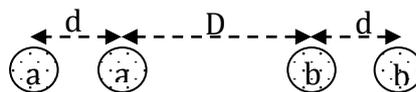


Figure II-4 Ligne monophasée à deux conducteurs par phase

$$a = b = 2$$

$$GMD = ((D_{a1b1} D_{a1b2})(D_{a2b1} D_{a2b2}))^{\frac{1}{ab}} = (D \cdot (D + d) \cdot (D - d) \cdot D)^{\frac{1}{4}} = (D^2(D^2 - d^2))^{1/4}$$

$$GMR_a = (D_s \cdot d.)^{1/4} \quad ; \quad GMR_b = (D_s \cdot d.)^{1/4}$$

$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{(D^2(D^2 - d^2))^{1/4}}{(D_s \cdot d.)^{1/4}}\right) \quad (\text{II.23})$$

### II.2.3.3- Ligne monophasée à multiconducteurs par phase

Considérons les deux groupes de conducteurs représentés sur Figure II-5. Ces deux groupes de conducteurs (faisceaux) de n & m conducteurs par phase.

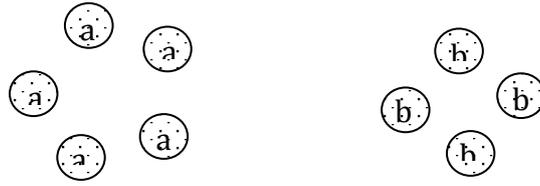


Figure II-5 Ligne monophasée à multiconducteurs par phase

$$GMR_a = \left( (D_{a1a1} D_{a1a2} \dots D_{a1an}) \dots (D_{ana1} D_{ana2} \dots D_{anan}) \right)^{\frac{1}{n^2}}$$

$$GMR_b = \left( (D_{b1b1} D_{b1b2} \dots D_{b1bn}) \dots (D_{bnb1} D_{bnb2} \dots D_{bmbm}) \right)^{\frac{1}{m^2}}$$

$$D_{a1a1} = D_{a2a2} = \dots = D_{anan} = D_{sa} = r_a \cdot e^{-\frac{1}{4}}$$

$$D_{b1b1} = D_{b2b2} = \dots = D_{bmbm} = D_{sb} = r_b \cdot e^{-\frac{1}{4}}$$

$$GMD = \left( (D_{a1b1} D_{a1b2} D_{a1b3} \dots D_{a1bm}) \dots (D_{anb1} D_{anb2} \dots D_{anbm}) \right)^{\frac{1}{mn}}$$

$$L_a = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left( \frac{GMD_{ab}}{GMR_a} \right) \quad (II.24)$$

$$L_b = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left( \frac{GMD_{ab}}{GMR_b} \right) \quad (II.25)$$

### II.2.3.4- Inductance d'une ligne triphasée asymétrique

Considérons la ligne triphasée asymétrique montrée à la Figure II-9.

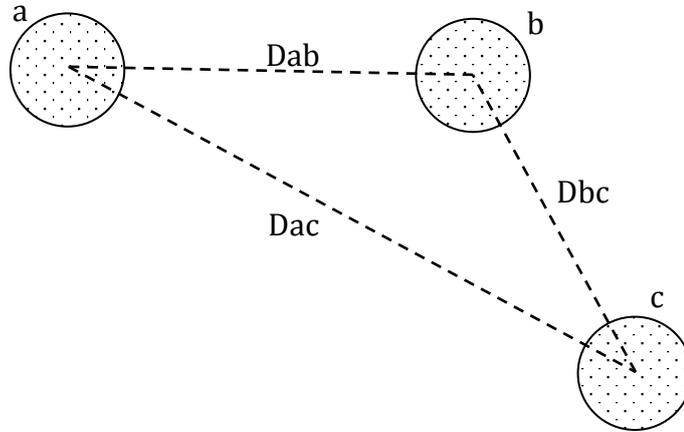


Figure II-6 Ligne triphasée asymétrique (1Cph)

$$\Phi_a = \Phi_{int} + \Phi_{ext} = 2 \times 10^{-7} \left( I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{ac}} \right)$$

$$I_b = a^2 \times I_a = \left( -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times I_a$$

$$I_c = a \times I_a = \left( -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \times I_a$$

$$L_a = \frac{\Phi_a}{I_a} = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{D_s} + a^2 \times \ln \frac{1}{D_{ab}} + a \times \ln \frac{1}{D_{ac}} \right)$$

$$L_a = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{D_s} + \frac{1}{2} \ln D_{ab} D_{ac} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{ac}}{D_{ab}} \right) \quad (II.26)$$

$$\Phi_b = \Phi_{int} + \Phi_{ext} = 2 \times 10^{-7} \left( I_b \ln \frac{1}{D_s} + I_a \ln \frac{1}{D_{ab}} + I_c \ln \frac{1}{D_{bc}} \right)$$

$$\begin{aligned}
 I_a &= a \times I_b = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times I_b \\
 I_c &= a^2 \times I_b = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times I_b \\
 L_b &= \frac{\Phi_b}{I_b} = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{r'} + a \times \ln \frac{1}{D_{ab}} + a^2 \times \ln \frac{1}{D_{ac}} \right) \\
 L_b &= 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{r'} + \frac{1}{2} \ln D_{ab} D_{bc} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{ba}}{D_{bc}} \right) \\
 \Phi_c &= \Phi_{int} + \Phi_{ext} = 2 \times 10^{-7} \left( I_a \ln \frac{1}{r'} + I_a \ln \frac{1}{D_{ca}} + I_b \ln \frac{1}{D_{cb}} \right)
 \end{aligned} \tag{II.27}$$

$$\begin{aligned}
 I_a &= a \times I_c = \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times I_c \\
 I_b &= a \times I_c = \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}\right) \times I_c \\
 L_c &= \frac{\Phi_c}{I_c} = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{r'} + a \times \ln \frac{1}{D_{ca}} + a^2 \times \ln \frac{1}{D_{cb}} \right) \\
 L_c &= 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{r'} + \frac{1}{2} \ln D_{ca} D_{cb} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{cb}}{D_{ca}} \right)
 \end{aligned} \tag{II.28}$$

### II.2.3.5- Inductance d'une ligne triphasée symétrique

Considérons la ligne triphasée montrée dans la Figure II-7 , chacun des conducteurs a un rayon r et de leurs centres forment un triangle équilatéral de distance D. En supposant que les courants sont équilibrés.

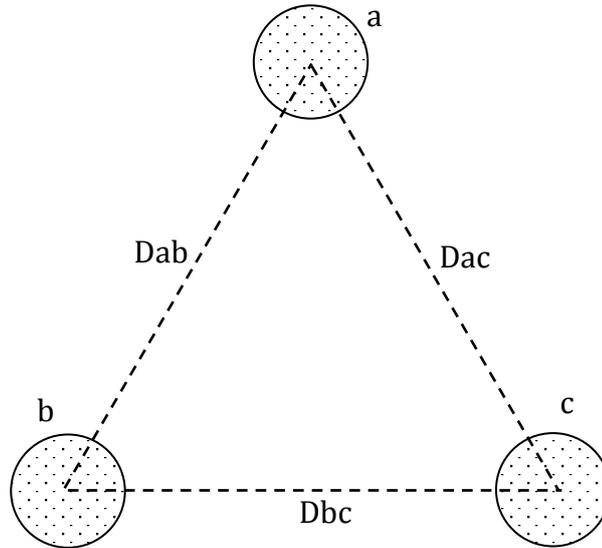


Figure II-7 Ligne triphasée symétrique (1Cph)

$$D_{ab} = D_{ac} = D_{bc}$$

D'après l'équation (II.26) on a :

$$\begin{aligned}
 L_a &= 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{1}{D_s} + \frac{1}{2} \ln D_{ab} D_{ac} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \ln \frac{D_{ac}}{D_{ab}} \right) = 2 \times 10^{-7} \left( \ln \frac{D}{D_s} \right) \\
 L_a &= L_b = L_c = 2 * 10^{-7} * \ln \left( \frac{D}{D_s} \right)
 \end{aligned} \tag{II.29}$$

**II.2.3.6- Transposition de la ligne**

Les inductances calculées par les équations (II.26), (II.27) et (II.28) engendrent un système déséquilibré. Pour revenir à l'état équilibré on échange des positions des conducteurs à des intervalles réguliers. Ceci est appelé la transposition de la ligne Figure II-8 . Dans ce chaque segment de la ligne est divisée en trois sous-segments égaux pour l'échange.

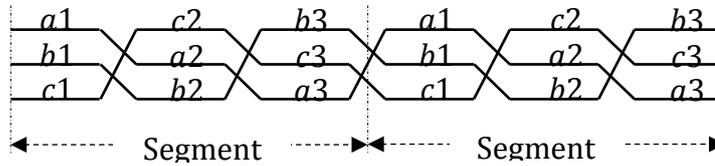


Figure II-8 Transposition de la ligne

Donc l'inductance par phase est la valeur moyenne des trois inductances calculées :

$$L = \frac{L_{a1} + L_{a2} + L_{a3}}{3} \tag{II.30}$$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \left[ \frac{\ln\left(\frac{GMD_1}{D_s}\right) + \ln\left(\frac{GMD_2}{D_s}\right) + \ln\left(\frac{GMD_3}{D_s}\right)}{3} \right] = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{\sqrt[3]{GMD_1 GMD_2 GMD_3}}{D_s}\right)$$

Par définition :  $GMD = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3}$

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{GMD}{GMR}\right) \tag{II.31}$$

**II.2.3.7- Ligne triphasée transposée disposition triangle**

Considérons la ligne triphasée asymétrique montrée à la Figure II-9.

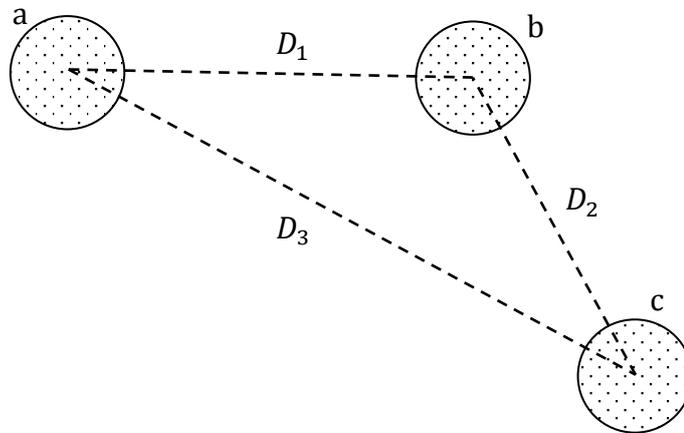


Figure II-9 Ligne triphasée asymétrique (1Cph)

$$L = L_a = L_b = L_c = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D}{D_s}\right) \tag{II.32}$$

**II.2.3.7.1- Ligne triphasée transposée à disposition horizontale**

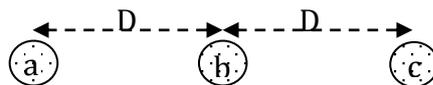


Figure II-10 Ligne triphasée transposée horizontale (1Cph)

$$N_a = N_b = N_c = 1 \quad ; \quad GMD = \sqrt[3]{D_1 D_2 D_3} = D \sqrt[3]{2} \quad ; \quad GMR_a = GMR_b = GMR_c = D_s$$

$$L = L_a = L_b = L_c = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{D \sqrt[3]{2}}{D_s}\right) \tag{II.33}$$

Attention : La ligne est transposée.

**II.2.3.8- Ligne triphasée à double circuit**

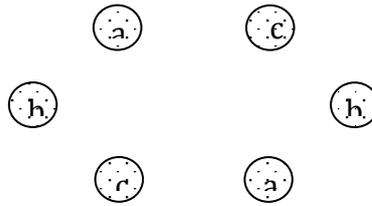


Figure II-11 Ligne triphasée à double circuit

$a = b = c = 2$

$$\begin{aligned}
 D_{ab} &= ((D_{a1b1}D_{a1b2})(D_{a2b1}D_{a2b2}))^{\frac{1}{4}} & GMR_a &= ((D_sD_{a1a2})(D_sD_{a1a2}))^{\frac{1}{4}} = (D_sD_{a1a2})^{\frac{1}{2}} \\
 D_{ac} &= ((D_{a1c1}D_{a1c2})(D_{a2c1}D_{a2c2}))^{\frac{1}{4}} & GMR_b &= ((D_sD_{b1b2})(D_sD_{b1b2}))^{\frac{1}{4}} = (D_sD_{b1b2})^{\frac{1}{2}} \\
 D_{bc} &= ((D_{b1c1}D_{b1c2})(D_{b2c1}D_{b2c2}))^{\frac{1}{4}} & GMR_c &= ((D_sD_{c1c2})(D_sD_{c1c2}))^{\frac{1}{4}} = (D_sD_{c1c2})^{\frac{1}{2}} \\
 GMD &= \sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}} & GMR &= \sqrt[3]{D_{SA}D_{SB}D_{SC}}
 \end{aligned}$$

$$L = 2 * 10^{-7} * \ln \left( \frac{\sqrt[3]{D_{ab}D_{ac}D_{bc}}}{\sqrt[3]{D_{SA}D_{SB}D_{SC}}} \right) \tag{II.34}$$

**II.3- Réactance transversale (capacité)**

Nous pouvons assimiler les lignes aériennes à un condensateur qui est constitué de deux conducteurs (les conducteurs de phase et la terre).

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

$$C = \frac{q}{u} \tag{II.35}$$

Par la loi de Gauss, la densité de flux électrique à un cylindre de rayon x quand le conducteur a une longueur de 1 m est égal à :

$$D = \frac{q}{A} = \frac{q}{2\pi x} \tag{II.36}$$

L'intensité électrique est définie comme le rapport de la densité de flux électrique à la permittivité du milieu. Donc

$$E = \frac{\frac{q}{2\pi x}}{\epsilon} \tag{II.37}$$

$\{\epsilon = 8,854. 10^{-12} \text{ F/m}$

Soient deux points P1 et P2 être situés à des distances D1 et D2, respectivement, dans le centre du conducteur.

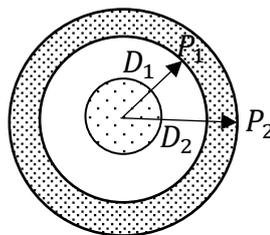


Figure II-12 Câble coaxiale

La différence du potentiel entre les points P1 et P2 peut être écrit par :

$$V_{12} = \int_{D1}^{D2} E = \frac{q}{2\pi\epsilon} \ln \frac{D2}{D1} \tag{II.38}$$

**II.3.1- Capacité d'un câble isolé**

Considérons maintenant un câble de de rayon intérieur  $r$  et rayon extérieur  $R$ . la capacité du câble d'après les équations (II.35) et (II.38) égale :

$$C = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{R}{r}} \quad (II.39)$$

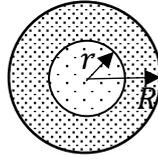


Figure II-13 Câble isolé

### II.3.2- Capacité de la ligne monophasée (un conducteur par phase)

Considérons la ligne monophasée composée de deux conducteurs ronds comme la montre la Figure II-14. La séparation entre les conducteurs est  $D$ .

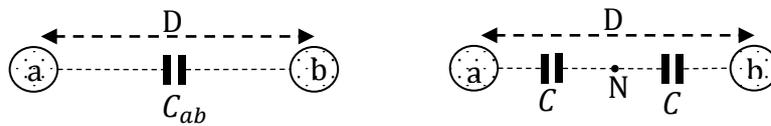


Figure II-14 Capacité de la ligne monophasée (1Cph)

### II.3.3- La capacité équivalente des deux conducteurs

$$V_a = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r_a} + Q_b \ln \frac{1}{D_{ab}} \right) \quad V_b = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{D_{ab}} + Q_b \ln \frac{1}{r_b} \right)$$

$$Q_a = -Q_b$$

$$V_{ab} = \frac{Q_a}{2\pi \times \epsilon} \left( \ln \frac{r_a}{D_{ab}} - \ln \frac{D_{ab}}{r_b} \right) = \frac{Q_a}{\pi \times \epsilon} \left( \ln \frac{D}{\sqrt{r_a \times r_b}} \right)$$

$$C_{ab} = \frac{Q_a}{V_{ab}} = \frac{\pi \cdot \epsilon}{\ln \frac{D}{\sqrt{r_a \times r_b}}} \quad (II.40)$$

Dans le cas de deux conducteurs identiques de rayon  $r$  la capacité par rapport au neutre :

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{r}} \quad (II.41)$$

### II.3.4- Capacité de la ligne triphasée

Considérons la ligne triphasée asymétrique montrée à la Figure II-9.

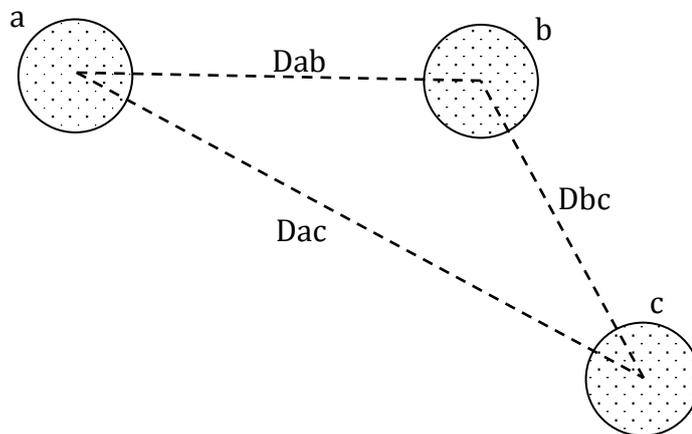


Figure II-15 Ligne triphasée asymétrique (1Cph)

$$V_a = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + Q_c \ln \frac{1}{D_{ac}} \right) \quad (II.42)$$

$$V_b = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{D_{ab}} + Q_b \ln \frac{1}{r} + Q_c \ln \frac{1}{D_{bc}} \right) \quad (II.43)$$

$$V_c = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{D_{ac}} + Q_b \ln \frac{1}{D_{bc}} + Q_c \ln \frac{1}{r} \right) \quad (II.44)$$

$$Q_a + Q_b + Q_c = 0 \quad (II.45)$$

**II.3.4.1- Capacité de la ligne triphasé symétrique**

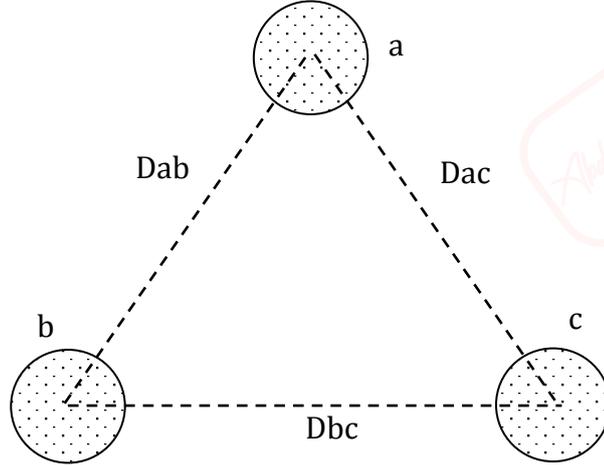


Figure II-16 Ligne triphasée asymétrique (1Cph)

$$D_{ab} = D_{ac} = D_{bc} = D$$

$$V_a = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D} + Q_c \ln \frac{1}{D} \right) = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} - Q_a \ln \frac{1}{D} \right)$$

$$C_a = \frac{Q_a}{V_a} = \frac{2\pi \times \epsilon}{\ln \frac{D}{r}}$$

De la même manière pour b et c

$$C = \frac{2\pi \times \epsilon}{\ln (D/r)} \quad (II.46)$$

**II.3.4.2- Capacité de la ligne triphasée transposée**

Par définition on a :

$$V_a = \frac{1}{2\pi \times \epsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_{ab}} + Q_c \ln \frac{1}{D_{ac}} \right)$$

La phase a pris trois positions sur un segment :

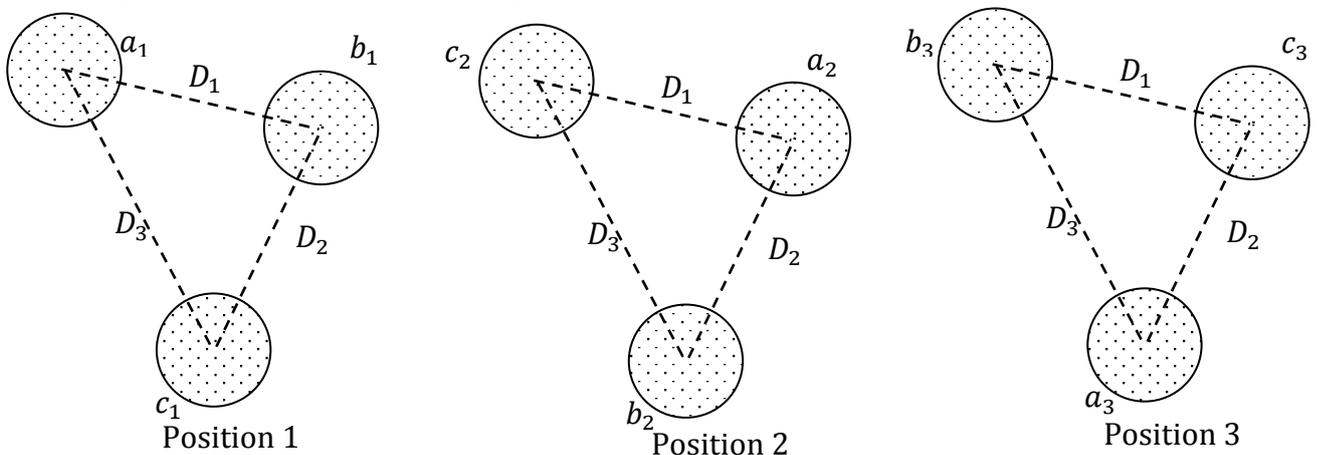


Figure II-17 Ligne triphasée asymétrique (1Cph)

$$\begin{aligned}
 V_{a1} &= \frac{1}{2\pi \times \varepsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_1} + Q_c \ln \frac{1}{D_3} \right) \\
 V_{a2} &= \frac{1}{2\pi \times \varepsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_2} + Q_c \ln \frac{1}{D_1} \right) \\
 V_{a3} &= \frac{1}{2\pi \times \varepsilon} \left( Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_3} + Q_c \ln \frac{1}{D_2} \right) \\
 V_a &= \frac{V_{a1} + V_{a2} + V_{a3}}{3} = \frac{1/3}{2\pi \times \varepsilon} \left( 3 \times Q_a \ln \frac{1}{r} + Q_b \ln \frac{1}{D_1 D_2 D_3} + Q_c \ln \frac{1}{D_1 D_2 D_3} \right) \\
 Q_b + Q_c &= -Q_a \\
 C &= \frac{Q_a}{V_a} = \frac{1}{2\pi \times \varepsilon} \left( \ln \frac{1}{r} - \frac{1}{3} \ln \frac{1}{D_1 D_2 D_3} \right) \\
 C &= \frac{2\pi \times \varepsilon}{\ln \frac{\sqrt{D_1 D_2 D_3}}{r}} \tag{II.47}
 \end{aligned}$$

**II.3.4.3- Capacité ligne triphasé multiconducteur par phase**

D'une manière générale la capacité d'un faisceau de conducteurs :

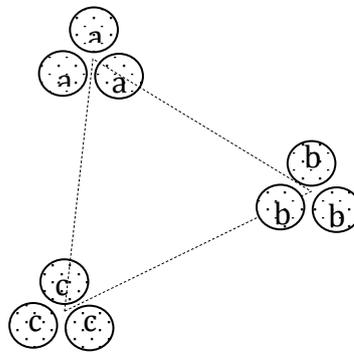


Figure II-18 Capacité ligne triphasé (n Cph)

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon}{\log \frac{GMD}{GMR}} = \frac{55.63 \times 10^{-9}}{\log \frac{GMD}{GMR_c}} \text{ F/km} \tag{II.48}$$