

ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT **Genie Electrique**

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDES

S U J E T

**CALCUL DES COURANTS DE COURT-
CIRCUIT TRIPHASE DANS UN
RESEAU DE TRANSPORT**

220 / 400 kV

Proposé par :

MAHFOUDI M.D

Etudié par :

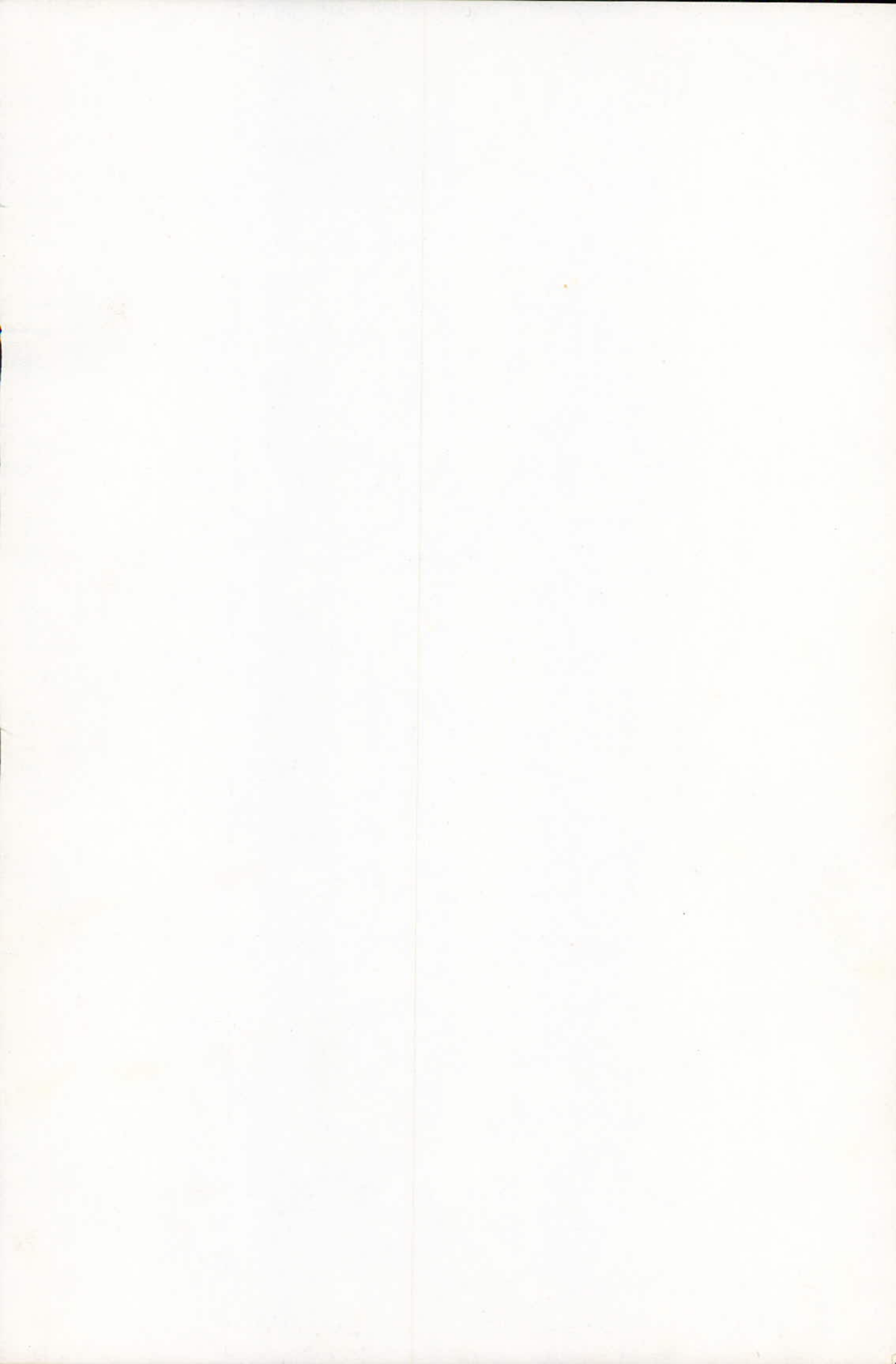
BARÇA Abdelghani

TALBI Abdelkrim

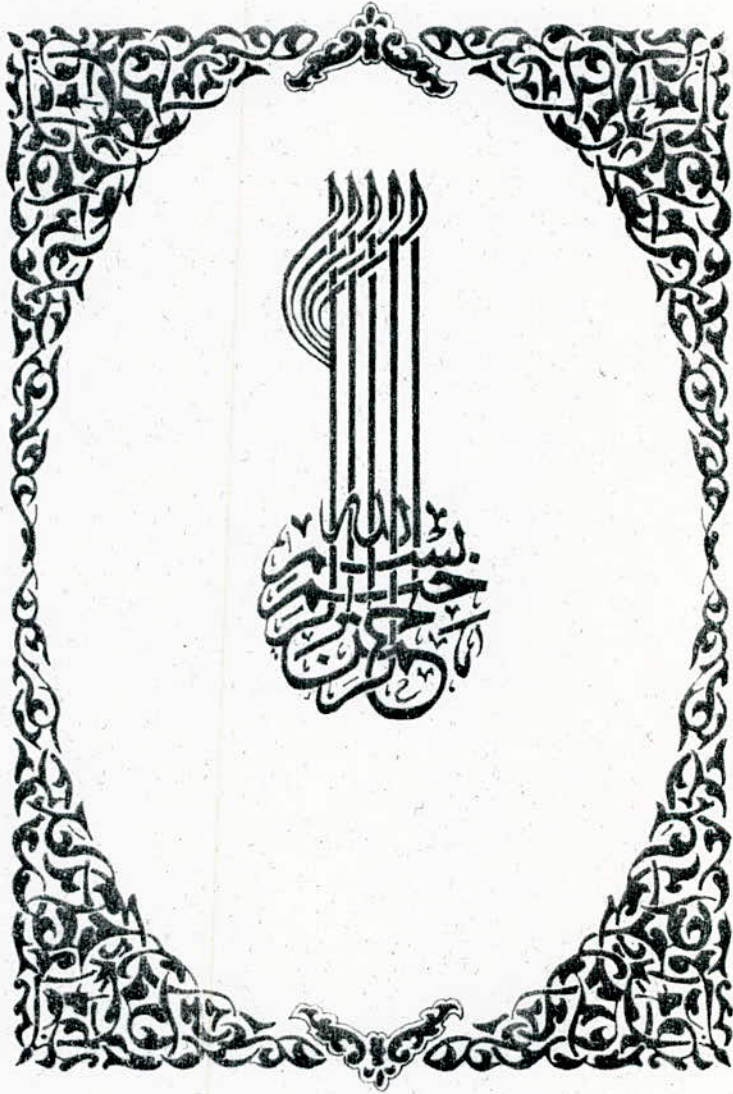
Dirigé par :

MAHFOUDI M.D

PROMOTION : **JAN 88**



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique



DEDICACES.

Je dédie ce modeste travail

- A mon père , à ma mère
- A la mémoire de mes grands-pères
- A mes grands-mères.
- A mes sœurs
- A mes oncles et tantes
- A mes cousins et cousines
- A Dalila.
- A tous mes amis(es).

BARÇA Abdelghani

Je dédie ce modeste travail

- A la mémoire de mon père
- A ma mère
- A ma femme Naïma.
- A mes frères
- A toute ma famille.
- A tous mes amis(es)

TALBI Abdelkrim.

Remerciements .

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements à notre promoteur M^E MAHFOUDI Djaffar pour son encadrement .

Nous tenons à remercier Dr. S. AHMED-ZAÏD pour sa présence lors de la soutenance. (spécialiste en réseau).

Nous tenons à exprimer plus particulièrement toute notre gratitude et nos remerciements à M^{lle} JEBBOUR Dalila pour sa précieuse aide et surtout son soutien moral.

Nous tenons à remercier M^E NAÏMI Saïd pour toute son aide lors du tirage .

Nous tenons à remercier tous les enseignants qui ont contribué à notre formation .

Nous remercions tous ceux qui de près ou de loin nous ont aidé dans ce travail .

SOMMAIRE

Introduction	1
I. Présentation du réseau	3
- Introduction	4
- Caractéristiques des éléments du réseau	5
- Types de conducteurs	10
II. Calcul des paramètres	13
- Introduction	14
- Inductance des lignes	15
- Capacité des lignes	33
III. Modélisation	40
- Systèmes des valeurs réduites (per unit system)	41
- Applications	42
- Modèle de l'alternateur	44
- Modèle du transformateur	47
- Modèle des lignes aériennes	56
IV. Méthode de calcul	69
- Equivalence des sources (loi des noeuds)	70
- Principe de la méthode (élimination des noeuds)	72
- Résolution par élimination des noeuds	77
- Organigramme	79
- Résultats	
V. Introduction aux disjoncteurs	101
Conclusion	

INTRODUCTION.

Les réseaux de transport d'énergie modernes sont maillés, les éléments le constituant étant d'un coût élevé, la protection de ses équipements devient nécessaire.

Dans un réseau de transport d'énergie, peuvent se produire plusieurs phénomènes provoquant des régimes anormaux dans le fonctionnement du réseau. Ces régimes anormaux causent généralement des avaries que sont les surtensions, les surintensités et les chutes de tension. L'étude de ces phénomènes permet la maîtrise du fonctionnement global du réseau.

Parmi ces phénomènes, le court-circuit qui revêt une importance capitale, quant aux calculs du réseau tout en tenant compte du côté optimisation, dans le but de réaliser une protection adéquate du réseau.

L'origine du court-circuit peut être le contournement des isolateurs ou la chute des lignes.

Les types de court-circuit sont:

- monophasé
- biphasé et biphasé terre.
- triphasé et triphasé terre.

Le court-circuit monophasé est le plus redoutable car il engendre des courants intenses. De plus, c'est le cas le plus fréquent.

Par contre le court-circuit triphasé est le cas le moins fréquent et le moins sévère, environ 5% des cas de court-circuit.

L'étude et le calcul des courants de court-circuit triphasé permettent le dimensionnement des différents appareils de protection et de contrôle. Un disjoncteur dimensionné dans le cas d'un court-circuit triphasé réagira automatiquement aux autres types de court-circuit.

Notre étude consiste à calculer, en premier lieu, les paramètres du réseau. Dans une deuxième étape, on procédera à une modélisation du réseau, chose facilitée par l'emploi du système des valeurs réduites (per unit system). De là, on formulera l'écriture matricielle des équations du réseau qui régissent son fonctionnement. Après quoi, on calculera le courant et la puissance de court-circuit dans tous les jeux de barres.

Le réseau étant complexe, l'utilisation des méthodes numériques nous évitera les calculs fastidieux.

Chapitre I.

Présentation du réseau.

- I.1. Introduction
- I.2. Caractéristiques des éléments du réseau.
- I.3 Types de conducteurs

I. PRESENTATION DU RESEAU.

I. 1. Introduction.

Le réseau considéré est un réseau E.D.F. comportant seize postes d'interconnexions, de transformations et dix centrales électriques équipées de générateurs synchrones. Le choix de ce réseau est justifié par le fait que la société SONELGAZ projette d'élever le niveau de tension du réseau à 400 kv, ainsi notre étude pourra être étendue au futur réseau algérien 220/400 kv.

En plus, ce réseau comporte la majorité des lignes pouvant être utilisées dans les réseaux de transport d'énergie du point de vue longueur de ligne et de leur disposition, ce qui rend notre étude plus générale et plus complète.

Il convient de signaler que les transformateurs élévateurs sont disposés dans le poste de plus basse tension et inversement, les transformateurs abaisseurs sont disposés dans les postes de plus haute tension, car le transport d'énergie électrique se fait en haute tension pour diminuer les pertes éventuelles sur les lignes.

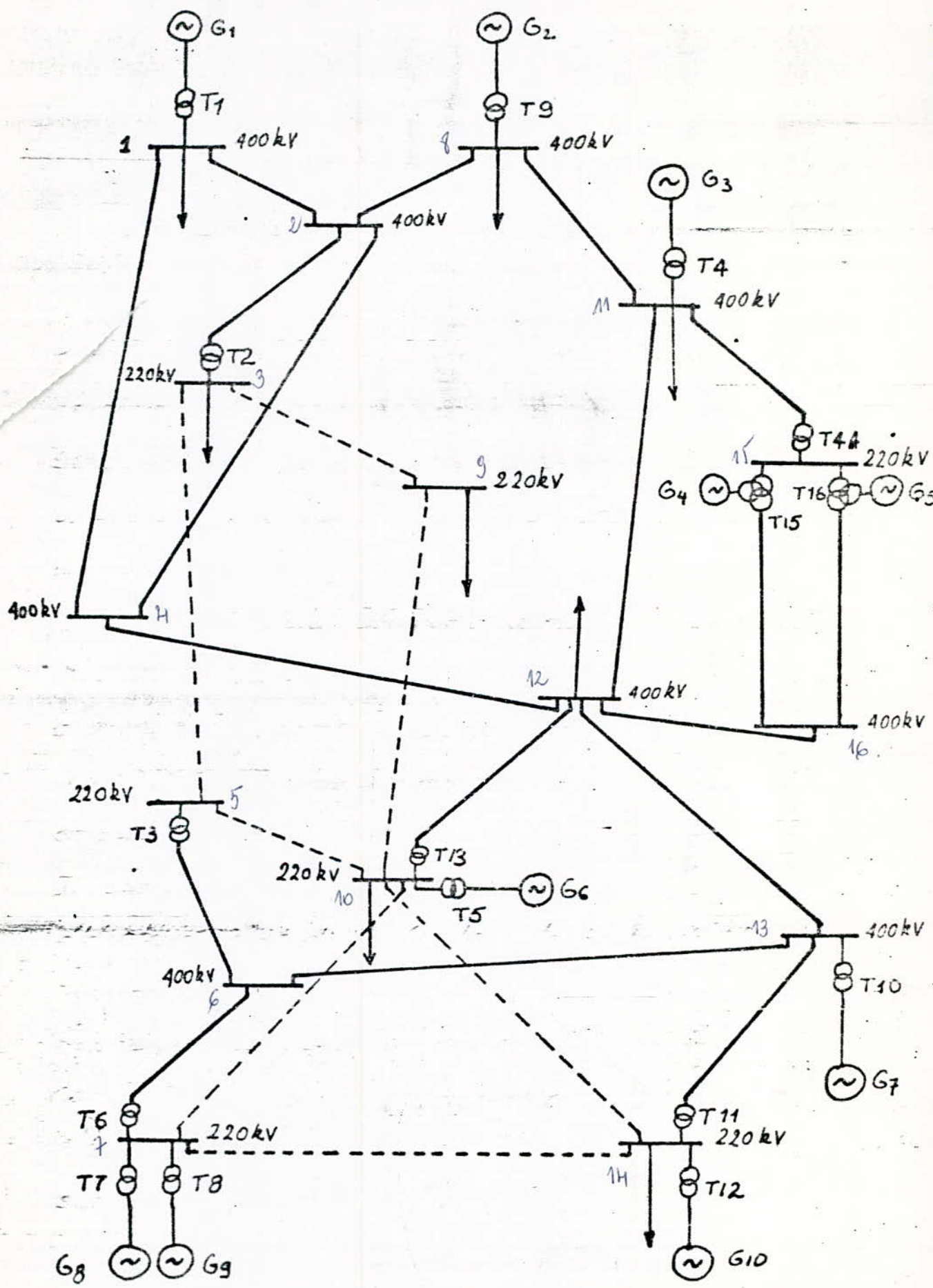


Schéma du réseau.

— Ligne 400kV.
 - - - Ligne 220kV.
 → charge.

Ligne	Code word	Couches d'Al	Al/steel	Dext (mm)	GMR (m)	Longueur (km)	Tension (kV)	Disposition. (m)
1-2	Ostrich	2	26/7	17.27	0.007	70	400	
2-3	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	170	400	
2-4	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	40	400	
2-8	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	200	400	
1-4	Merlin	2	18/1	17.37	0.0068	100	400	

Ligne	Code word	Couche Al	Al/Steel	Dext (mm)	GMR (m)	Longueur (km)	Tension (kV)	Disposition (m)
3-5	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	90	220	
3-9	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	100	220	
4-12	Ostrich	2	26/7	17.27	0.0070	180	400	
5-6	Merlin	2	18/1	17.37	0.0068	100	400	
5-10	Ostrich	2	26/7	17.27	0.0070	100	220	
6-7	Merlin	2	18/1	17.27	0.0070	50	400	

Ligne	Code Word	Couches AE	A ₂ /steel	Dext (mm)	GMR (m)	Longueur (km)	Tension (kV)	Disposition (m)
6-13	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	250	400	
7-10	Flicker	2	24/7	21.49	0.0087	130	220	
11-12	Cardinal	3	54/7	30.38	0.0123	150	400	
7-14	Linnet	2	26/7	18.31	0.0074	210	220	
8-11	Cardinal	3	54/7	30.38	0.0123	40	400	
9-10	Flicker	2	24/7	21.49	0.0087	150	220	

Ligne	Code Word	Couches Al	Al/steel	Dext (mm)	GMR (m)	Longueur (km)	Tension (kV)	Disposition (m)
10-12	Osperge	2	18/1	22.33	0.0087	70	400	
10-14	Bittern	3	45/7	34.16	0.0133	125	220	
11-15	Pelican	2	18/1	20.68	0.0080	50	400	
12-13	Bluebird	4	84/19	44.75	0.0179	200	400	
12-16	Plover	3	54/19	37.21	0.0151	200	400	

I.3. Types de conducteurs

Auparavant, le transport d'énergie électrique se faisait par des conducteurs en cuivre. L'apparition de l'aluminium et son application industrielle a permis de remplacer les conducteurs en cuivre par des conducteurs en aluminium, car l'aluminium présente l'avantage d'être bon marché et plus léger que le cuivre pour les mêmes caractéristiques de la ligne à savoir sa résistance.

Cependant et pour une même résistance, un conducteur en aluminium a une section supérieure à celle d'un conducteur en cuivre, ainsi, et pour un même niveau de tension, l'onde traissante dans le conducteur en aluminium se propage mieux qu'avec un conducteur en cuivre, ce qui a pour effet de diminuer le gradient de potentiel à la surface du conducteur et, à une tendance moindre, à ioniser l'air entourant le conducteur ce qui réduit les effets indésirables de cette ionisation appelée "effet couronné".

On distingue une variété de conducteurs à base d'aluminium identifiés par les symboles suivants :

AAC : Conducteurs en aluminium (All. Aluminium Conductors)

AAAC : Conducteurs en alliage d'aluminium

(All. Aluminium Alloy Conductors).

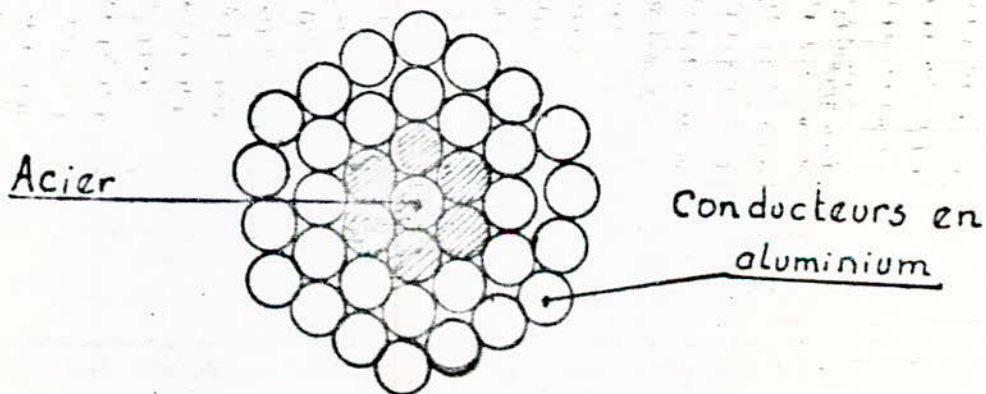
ACSR : Conducteurs en aluminium, renforcés d'acier.

(Aluminium Conductors, Steel - Reinforced).

ACAR : Conducteurs en Aluminium, Renforcés d'alliage en

aluminium (Aluminium Conductors, Alloy - Reinforced).

Tous ces conducteurs sont formés de couches torsadées en spirales opposées, ce qui empêche le déroulement du câble et rend le rayon de la couche supérieure équivalent au rayon de la couche la plus proche. Le nombre de couches détermine la flexibilité du câble. La figure ci-dessous donne un exemple d'un conducteur en aluminium renforcé d'acier.



Le type de câble le plus répandu est l'ACSR, car il offre une bonne rigidité. De plus, les brins d'acier sont généralement entourés de papier imprégné, ce qui augmente encore le diamètre global du câble diminuant ainsi l'effet couronne. Ce type de câble est utilisé généralement en très haute tension (THT).

Chapitre II.

Calcul des paramètres.

II. 1. Introduction.

II. 2. Inductance des lignes.

II. 2. 1. Inductance d'un conducteur due au flux interne.

II. 2. 2. Inductance d'un conducteur due au flux externe.

II. 2. 3. Flux magnétique dû à un groupe de conducteurs.

II. 2. 4. Inductance d'une ligne composée de conducteurs.

II. 2. 4. 1. Ligne monophasée composée de deux conducteurs.

II. 2. 4. 2. Ligne triphasée asymétrique.

II. 2. 4. 3. Double ligne triphasée en parallèle.

II. 2. 5. Conducteurs en faisceau.

II. 3. Capacité des lignes.

II. 3. 1. Capacité d'une ligne triphasée asymétrique.

II. 3. 2. Conducteurs en faisceau.

II. CALCUL DES PARAMETRES.

II. 1. Introduction.

Dans le réseau de transport d'énergie, on distingue trois types de lignes en fonction de leur longueur :

- Ligne courte.
- Ligne moyenne
- Ligne longue.

Il est important de signaler que pour les lignes courtes et moyennes, on néglige la capacité de la ligne par rapport à la terre. Par contre, pour les lignes longues une correction tenant compte de la capacité de la ligne et portant sur son impédance devra être faite pour tenir compte du phénomène de la propagation de l'onde le long de la ligne.

Dans ce chapitre, on abordera le calcul des inductances et des capacités des lignes.

Pour l'étude des courants de court-circuit, on se limitera seulement au calcul des réactances des lignes et éventuellement, on procédera aux corrections pour les lignes longues. De ce fait, on négligera la résistance des lignes qui est inférieure à leur réactance.

II.2. Inductance des lignes

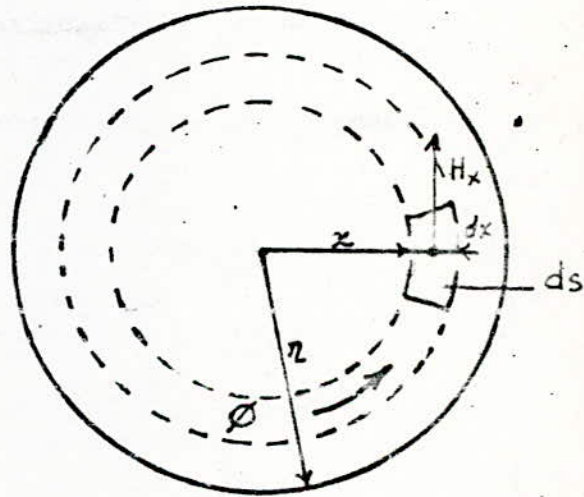
II.2.1. Inductance d'un conducteur due au flux interne

En tenant compte de l'effet de peau dans les conducteurs, il existe, en plus du champ magnétique externe, un champ magnétique à l'intérieur du conducteur. L'inductance résultant de ce champ interne contribue à l'inductance de la ligne.

En prenant un anneau du conducteur d'épaisseur dx et en considérant l'élément de surface ds dans lequel circule un courant I_x .

La force magnétomotrice sur un contour fermé est égale au courant circulant dans ce contour ainsi

$$I_x = \oint H_x ds$$



La composante H_x est tangente à ds en chaque point du contour d'où :

$$2\pi x H_x = I_x$$

Le courant I_x est égal à :

$$I_x = \frac{ds}{s} \cdot I = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} \cdot I = \left(\frac{x}{r}\right)^2 \cdot I$$

d'où : $H_x = \frac{x}{2\pi r^2} \cdot I$ (At/m)

L'induction magnétique B est égale à :

$$B_x = \mu H_x = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} \quad (\text{Wb/m}^2)$$

μ : perméabilité du conducteur

d'où :

$$d\phi = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} \cdot ds$$

pour un élément tubulaire de longueur 1m et d'épaisseur dx on aura :

$$d\phi = \frac{\mu x I}{2\pi r^2} \cdot dx$$

Le flux traversant la surface ds est :

$$d\psi = \frac{ds}{S} \cdot d\phi = \frac{\pi x^2}{\pi r^2} d\phi = \left(\frac{x}{r}\right)^2 d\phi$$

$$d\psi = \mu \frac{I x^3}{2\pi r^4} \cdot dx$$

D'où le flux total dans le conducteur de rayon r est:

$$\psi_{int} = \int_0^r \mu \frac{I x^3}{2\pi r^4} \cdot dx = \frac{\mu I}{8\pi} \quad (\text{wb / m})$$

En considérant la perméabilité du conducteur $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$

on a:

$$\psi_{int} = \frac{I}{2} 10^{-7} \quad \text{wb / m.}$$

avec:

$$\psi_{int} = L_{int} \cdot I \Rightarrow L_{int} = \frac{1}{2} 10^{-7} \text{ H/m}$$

En prenant $\mu = 4\pi 10^{-7}$, on a assimilé ce conducteur à un conducteur creux, car, et par l'effet de peau, la majorité du courant traversant le conducteur circule à la périphérie. De plus, on néglige cette épaisseur par rapport à la longueur du conducteur.

II. 2. 2. Inductance d'un conducteur due au flux externe

Considérons deux points extérieurs au conducteur P_1, P_2 distants du centre du conducteur de D_1, D_2 , comme indiqué sur la figure suivante :

Prenons un anneau distant du centre du conducteur de x et d'épaisseur dx .

D'où :

$$\oint Hx \cdot ds = I$$

$$2\pi x \cdot Hx = I.$$

D'où :

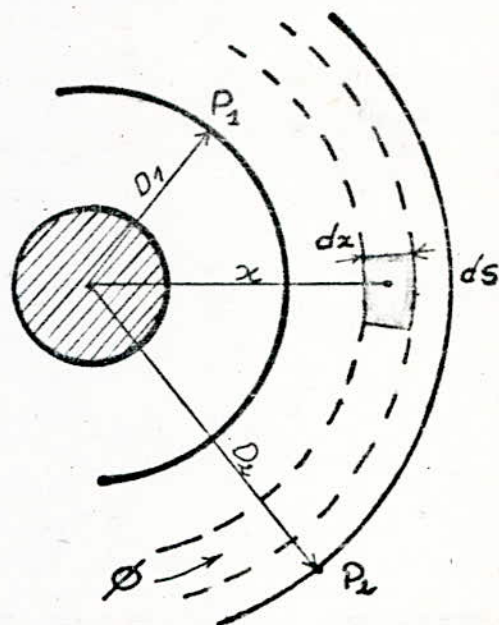
$$Bx = \mu \frac{I}{2\pi x}.$$

En considérant l'élément tubulaire de longueur unité (1m) et d'épaisseur dx on a le flux circulant à travers cet élément

$$d\phi = Bx ds = \mu \frac{I}{2\pi x} ds = \mu \frac{I}{2\pi x} dx$$

d'où :

$$\phi_{12} = \int d\phi = \int_{D_1}^{D_2} d\phi = \int_{D_1}^{D_2} \mu \frac{I}{2\pi x} dx = \mu \frac{I}{2\pi} \ln \frac{D_2}{D_1}$$



En considérant la perméabilité de l'air entourant le conducteur $\mu = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$.

On a:

$$\Phi_{\text{ext}} = \frac{4\pi \cdot 10^{-7}}{2\pi} \cdot I \cdot \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right)$$

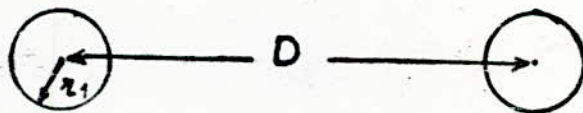
D'où l'inductance L_{ext} due au flux externe

$$L_{\text{ext}} = 2 \cdot 10^{-7} \ln\left(\frac{D_2}{D_1}\right) \text{ H/m}$$

D'où l'inductance totale du conducteur est:

$$L = L_{\text{int}} + L_{\text{ext}} = \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D_2}{D_1}\right) \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$$

On considère les deux points P_1, P_2 l'un sur la surface du conducteur, l'autre sur le conducteur le plus proche.



$$\begin{aligned} L &= \left(\frac{1}{2} + 2 \ln \frac{D}{r_1}\right) \cdot 10^{-7} \text{ H/m} \\ &= 2 \cdot 10^{-7} \left(\ln e^{1/4} + \ln \frac{D}{r_1}\right) = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{r_1 e^{-1/4}} \end{aligned}$$

En notant $r_1' = r_1 e^{-1/4}$

on tire

$$L = 2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{D}{r_1'} \quad \text{H/m}$$

D est appelé : diamètre géométrique moyen, noté G.M.D.

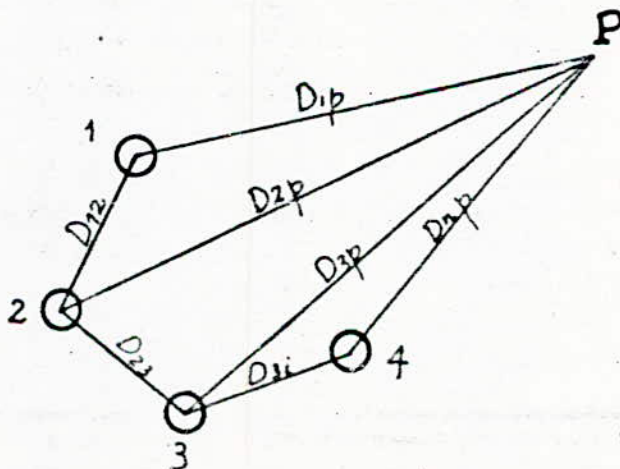
r_1' est appelé : rayon fictif du conducteur.

G.M.D. : (géométrie mean diameter)

G.M.R. : (géométrie mean radius), caractéristique du conducteur tenant compte du rayon fictif r_1' et donnée par le constructeur.

II. 2.3 Flux magnétique dû à un groupe de conducteurs

Soit n conducteurs parcourus par n courants I_1, I_2, \dots, I_n disposés comme l'indique la figure ci-dessous :



Considérons un point P éloigné du groupe de conducteurs de $D_{1P}, D_{2P}, D_{3P}, \dots, D_{nP}$

Le flux dû au conducteur 1 entre le conducteur et le point P est:

$$\Psi_{1P} = 2 \cdot 10^{-7} I_1 \ln \frac{D_{1P}}{r_1}$$

Le flux dû au conducteur 2 parcouru par un courant I_2 entre le conducteur 1 et le point P est:

$$\Psi_{1P} = 2 \cdot 10^{-7} I_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{12}}$$

En généralisant aux n conducteurs on aura le flux :

$$\Psi_{1P} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_1 \ln \frac{D_{1P}}{r_1} + I_2 \ln \frac{D_{2P}}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{D_{3P}}{D_{13}} + \dots + I_n \ln \frac{D_{nP}}{D_{1n}} \right)$$

d'où:

$$\Psi_{1P} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_1 \ln \frac{1}{r_1} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}} \right. \\ \left. + I_1 \ln D_{1P} + I_2 \ln D_{2P} + \dots + I_n \ln D_{nP} \right) \quad (1)$$

Le système étant équilibré on aura :

$$I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = 0 \quad (2)$$

En résolvant nous obtenons :

$$I_n = -(I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_{n-1})$$

En substituant (2) dans (1) on aura :

$$\begin{aligned} \Psi_{1p} = 2 \cdot 10^{-7} & \left(I_1 \ln \frac{1}{r_1} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}} \right. \\ & \left. + I_1 \ln \frac{D_{1p}}{D_{np}} + I_2 \ln \frac{D_{2p}}{D_{np}} + I_3 \ln \frac{D_{3p}}{D_{np}} + \dots + I_n \ln \frac{D_{np}}{D_{np}} \right) \end{aligned}$$

Etant donné que le point P est éloigné des conducteurs, nous avons les rapports :

$$\frac{D_{1p}}{D_{np}}, \frac{D_{2p}}{D_{np}}, \frac{D_{3p}}{D_{np}}, \dots, \frac{D_{n-1p}}{D_{np}} \text{ qui sont proches de } 1.$$

on aura :

$$\Psi_{1p} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_1 \ln \frac{1}{r_1} + I_2 \ln \frac{1}{D_{12}} + I_3 \ln \frac{1}{D_{13}} + \dots + I_n \ln \frac{1}{D_{1n}} \right) \quad (3)$$

(wb/m)

II. 2. 4. Inductance d'une ligne composée de conducteurs

Les fils torsadés sont compris en général dans la classe des conducteurs composés de deux ou de plusieurs éléments ou brins en parallèle.

Nous nous limiterons aux cas où les brins sont identiques et parcourus par un même courant. La méthode mise en évidence s'applique pour tous les types de conducteurs qui contiennent des brins de conductivité et de grandeur différentes. Mais cela se fait à partir du GMR, paramètre donné par le constructeur, généralement disponible dans les manuels.

La méthode développée constitue une approche à des problèmes plus complexes ; où la nonhomogénéité des conducteurs et la répartition du courant dans les brins est inégale.

II. 2. 4. 1. Ligne monophasée composée de deux conducteurs.

Le conducteur est constitué de n brins cylindriques parcourus par des courants égaux.

Le conducteur X est composé de n brins identiques en

parallèle où transite un courant $\frac{I}{n}$. Le conducteur Y , circuit de retour du conducteur X , est composé de m brins en parallèle identiques où transite un courant $\frac{I}{m}$. Les distances entre les brins sont désignées par D avec l'indice approprié. On applique l'équation (3) au brin "a" du conducteur X et on obtient le flux du conducteur "a".

$$\Psi_a = 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{n} \left(\ln \frac{1}{r_a} + \ln \frac{1}{D_{ab}} + \ln \frac{1}{D_{ac}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{an}} \right) - 2 \cdot 10^{-7} \frac{I}{m} \left(\ln \frac{1}{D_{aa'}} + \ln \frac{1}{D_{ab'}} + \ln \frac{1}{D_{ac'}} + \dots + \ln \frac{1}{D_{am}} \right)$$

d'où la relation:

$$\Psi_a = 2 \cdot 10^{-7} I \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r_a D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad \text{wb/m. (4)}$$

En divisant (4) par $\frac{I}{n}$ on obtient:

$$L_a = \frac{\Psi_a}{I/n} = 2 \cdot n \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[m]{D_{aa'} D_{ab'} D_{ac'} \dots D_{am}}}{\sqrt[n]{r_a D_{ab} D_{ac} \dots D_{an}}} \quad \text{H/m}$$

On procède de la même manière pour le brin "b" d'où

$$L_b = \frac{\psi_b}{I/n} = 2 n 10^{-7} L_n \frac{\sqrt[n]{D_{ba}' D_{bb}' D_{bc}' \dots D_{bn}}}{\sqrt[n]{D_{ba} r_b' D_{bc} \dots D_{bn}}} \quad \text{H/m}$$

De même pour tous les brins du conducteur on tire :

$$L_{av} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n}$$

L_{av} : Inductance moyenne du conducteur "a"

Le conducteur X est composé de n brins en parallèle. Si tous les brins ont la même inductance, l'inductance du conducteur X est égale à $\frac{1}{n}$ fois l'inductance L_{av} .

D'où

$$L_x = \frac{L_{av}}{n} = \frac{L_a + L_b + L_c + \dots + L_n}{n^2} \quad (5)$$

En substituant les expressions des inductances des brins dans l'équation (5) on obtient:

$$L_x = 2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{\sqrt[n^2]{(D_{aa}' D_{ab}' D_{ac}' \dots D_{an}') (D_{ba}' D_{bb}' \dots D_{bn}') \dots (D_{na}' D_{nb}' \dots D_{nn}')}}{\sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an}) (D_{ba} D_{bb} \dots D_{bn}) \dots (D_{an} D_{bn} \dots D_{nn})}}$$

Dans cette expression on a remplacé r_a, r_b, \dots, r_n par $D_{aa}, D_{bb}, \dots, D_{nn}$.

On définit:

$$GMD = \sqrt[mn]{(D_{aa}' D_{ab}' \dots D_{am})(D_{ba}' D_{bb}' \dots D_{bm}) \dots (D_{na}' D_{nb}' \dots D_{nm})}$$

$$GMR = \sqrt[n^2]{(D_{aa} D_{ab} \dots D_{an})(D_{ba} D_{bb} \dots D_{bn}) \dots (D_{an} D_{bn} \dots D_{nn})}$$

On note aussi le GMD et le GMR respectivement D_m et D_s .

L'expression (6) devient:

$$L_x = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_m}{D_s} \quad (\text{H/m}). \quad (7)$$

L'inductance dans le conducteur y est déterminée de manière similaire.

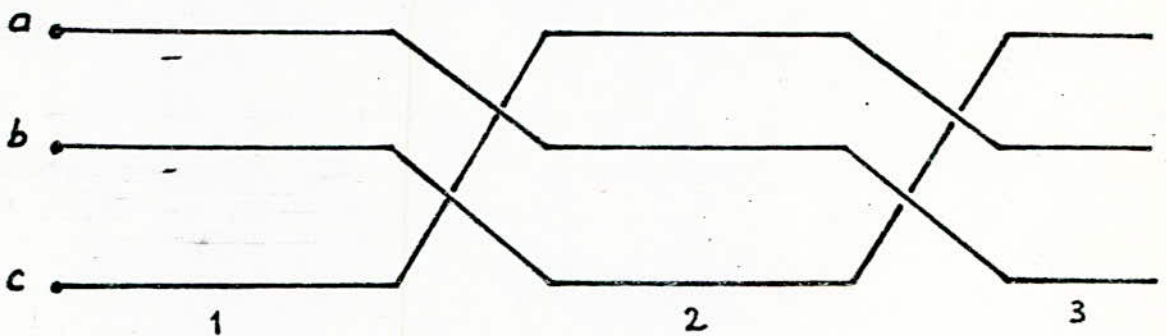
L'inductance de la ligne sera donc:

$$L = L_x + L_y.$$

II. 2.4.2 Ligne triphasée asymétrique

Dans le cas d'une ligne asymétrique l'inductance de chaque phase est différente. Cette différence résulte du déséquilibre géométrique de la ligne. Pour uniformiser son inductance globale, on effectue une transposition des phases a, b, c le long de la ligne.

On donne le cycle de transposition complet de la transposition sur la figure ci-dessous :



On applique la formule (3) à l'exemple et on obtient :

$$\Psi_{a1} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{12}} + I_c \ln \frac{1}{D_{13}} \right) \quad \text{wb/m}$$

$$\Psi_{a2} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{23}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12}} \right) \quad \text{wb/m}$$

$$\Psi_{a3} = 2 \cdot 10^{-7} \left(I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{13}} + I_c \ln \frac{1}{D_{23}} \right) \quad \text{wb/m}$$

La valeur du flux de la phase "a" est :

$$\begin{aligned}\Psi_a &= \frac{\Psi_{a1} + \Psi_{a2} + \Psi_{a3}}{3} \\ &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3} \left(3 I_a \ln \frac{1}{D_s} + I_b \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} + I_c \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} \right)\end{aligned}$$

Nous avons $I_a + I_b + I_c = 0 \Rightarrow I_a = -(I_b + I_c)$

d'où :

$$\begin{aligned}\Psi_a &= \frac{2 \cdot 10^{-7}}{3} \left(3 I_a \ln \frac{1}{D_s} - I_a \ln \frac{1}{D_{12} D_{23} D_{13}} \right) \\ &= 2 \cdot 10^{-7} I_a \ln \frac{\sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}}{D_s} \quad \text{Wb/m.}\end{aligned}$$

d'où l'inductance :

$$\begin{aligned}L_a &= 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad (\text{H/m}) \quad (9) \\ D_{eq} &= \sqrt[3]{D_{12} D_{23} D_{13}}\end{aligned}$$

Les distances D_{12} , D_{23} , D_{13} représentent l'intervalle entre les conducteurs.

* Conducteurs disposés en triangle équilatéral.

Nous avons

$$D_{12} = D_{23} = D_{13} = D \quad \text{donc} \quad D_{eq} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot D} = D = \text{GMD}$$

d'où:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D}{D_s} \quad (\text{H/m}).$$

* Conducteurs disposés en nappe

Nous avons

$$D_{12} = D_{23} = D \quad \text{et} \quad D_{13} = 2D$$

$$\text{donc} \quad D_{eq} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = \sqrt[3]{2} \cdot D = \text{GMD}$$

d'où:

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\text{GMD}}{\text{GMR}} = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{\sqrt[3]{2} \cdot D}{D_s} \quad (\text{H/m}).$$

II.2.4.3 Double ligne triphasée en parallèle.

Ces deux circuits triphasés sont identiques et mis en parallèle. Ils ont la même réactance.

Pour le calcul du D_{eq} , la méthode du GMD requiert l'utilisation de D_{ab} , D_{bc} et D_{ca} . Le D_{ab} est la distance entre le conducteur "a" et le conducteur "b". De même pour D_{bc} et D_{ca} .

En appliquant l'équation (9), on a

$$L = 2 \cdot 10^{-7} \ln \frac{D_{eq}}{D_s} \quad (\text{H/m})$$

avec :

$$D_{eq} = \sqrt[3]{D_{ab} \cdot D_{bc} \cdot D_{ca}}$$

$D_s = \sqrt[3]{D_{aa'} \cdot D_{bb'} \cdot D_{cc'}}$: moyenne géométrique des GMR des conducteurs de la même phase.

$$D_{aa'} = \sqrt{GMR_1 * (aa')}$$

$$D_{bb'} = \sqrt{GMR_1 * (bb')}$$

$$D_{cc'} = \sqrt{GMR_1 * (cc')}$$

GMR_1 : valeur donnée par le constructeur.

Ces deux circuits triphasés sont rétroalimentés et mis

II. 2.5 Conducteurs en faisceau

En très haute tension (T.H.T), tensions supérieures à 230 kv, l'effet couronne cause des pertes sur la ligne et particulièrement des interférences sur les communications. Pour diminuer ces effets, on dispose des conducteurs en faisceau de deux, trois ou quatre conducteurs par phase. Quand le faisceau est constitué de trois conducteurs, ils sont disposés en triangle équilatéral. Pour le cas de quatre conducteurs ils sont disposés en carré.

Le courant n'est pas divisé équitablement entre les conducteurs du même faisceau, mais cette différence n'a pas d'importance pratique et le calcul du GMD ne tient pas compte du nombre de conducteurs par faisceau.

En disposant des conducteurs en faisceau on augmente le GMR d'où réduction de la réactance totale de la ligne. L'augmentation du nombre de conducteurs dans un faisceau réduit l'effet couronne.

Le calcul du GMR du faisceau dépend du GMR du conducteur et de la distance entre deux conducteurs

du faisceau.

Pour un faisceau à deux conducteurs on a :

$$D_s' = \sqrt[4]{(D_s * d)^2} = \sqrt{D_s * d}$$

Pour un faisceau à trois conducteurs on a :

$$D_s' = \sqrt[6]{(D_s * d * d)^3} = \sqrt[3]{D_s * d^2}$$

Pour un faisceau à quatre conducteurs on a :

$$D_s' = \sqrt[16]{(D_s * d * d * d * 2^{1/2})^4} = 1.09 \sqrt[4]{D_s * d^3}$$

D_s représente le GMR donné par les tables.

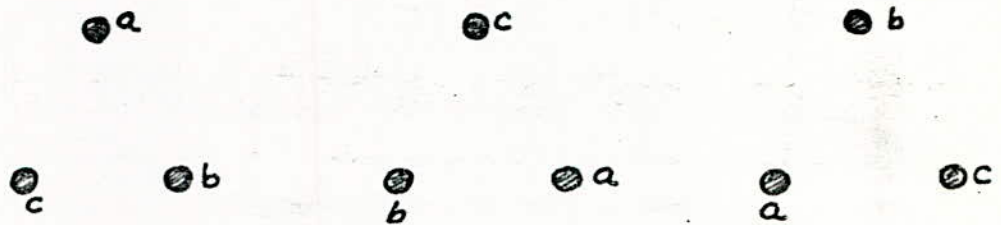
On calcule le GMD à partir des distances mesurées du centre du faisceau de conducteurs entre phases.

II. 3. Capacité des lignes

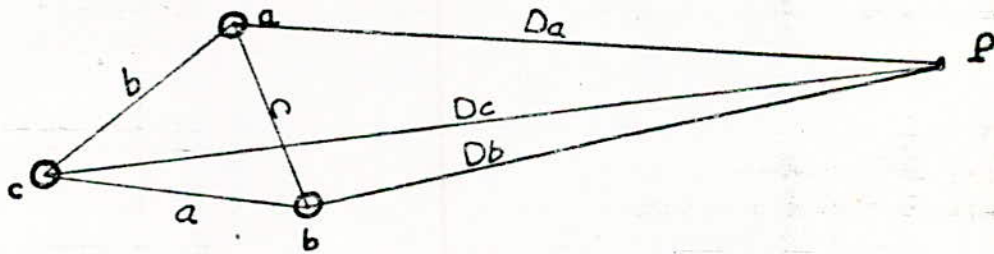
II. 3.1 Capacité d'une ligne triphasée asymétrique

La capacité entre conducteur et neutre pour une ligne non transposée n'est pas la même pour les trois phases. En transposant les trois phases, on aura la capacité moyenne de chaque conducteur avec le neutre qui sera la même pour n'importe quelle phase.

La transposition s'effectue de la manière suivante:



Soit une ligne asymétrique désignée par la figure :



Soit le point P situé à des distances D_a , D_b , D_c . On calcule le potentiel du conducteur dû aux charges Q_a , Q_b , Q_c par unité de longueur.

Pour un système triphasé équilibré on prend

$$Q_A = q_a \quad Q_B = q_a \frac{120^\circ}{r} \quad Q_C = q_a \frac{120^\circ}{r}$$

Le potentiel au point P dû au conducteur "a" est :

$$V_{aP} = \frac{Q_A}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_a}{r}$$

Le potentiel au point P dû au conducteur "b" est :

$$V_{bP} = \frac{Q_B}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_b}{c}$$

Le potentiel au point P dû au conducteur "c" est :

$$V_{cP} = \frac{Q_C}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{D_c}{b}$$

Ainsi le potentiel total au point P créé par le conducteur "a" est :

$$V'_a = V_{aP} + V_{bP} + V_{cP} = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left[Q_A \ln \frac{D_a}{r} + Q_B \ln \frac{D_b}{c} + Q_C \ln \frac{D_c}{b} \right]$$

De la même manière on détermine le potentiel du conducteur "a" dans les autres cas de la transposition.

D'où:

$$V_a'' = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(Q_A \ln \frac{D_b}{r} + Q_B \ln \frac{D_c}{a} + Q_C \ln \frac{D_a}{c} \right)$$

$$V_a''' = \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(Q_A \ln \frac{D_c}{r} + Q_B \ln \frac{D_a}{b} + Q_C \ln \frac{D_b}{a} \right)$$

Le potentiel moyen de la phase "a" crée au point P est:

$$V_a = \frac{V_a' + V_a'' + V_a'''}{3}$$

$$= \frac{1}{2\pi\epsilon_0} \left(Q_A \ln \frac{D_a D_b D_c}{r^3} + Q_B \ln \frac{D_a D_b D_c}{abc} + Q_C \ln \frac{D_a D_b D_c}{abc} \right)$$

En posant $Q_A + Q_B + Q_C = 0$ on aura: $Q_B + Q_C = -Q_A$
en substituant dans la relation

$$V_a = \frac{1}{6\pi\epsilon_0} \left(Q_A \ln \frac{D_a D_b D_c}{r^3} + (Q_B + Q_C) \ln \frac{D_a D_b D_c}{abc} \right)$$

$$= \frac{Q_A}{6\pi\epsilon_0} \ln \frac{abc}{r^3} = \frac{Q_A}{2\pi\epsilon_0} \ln \frac{\sqrt[3]{abc}}{r}$$

D'où:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{\sqrt[3]{abc}}{r}} \quad F/m$$

* triangle équilatéral

Nous avons $D_{12} = D_{23} = D_{31} = D$

d'où $a = b = c = D$

$$D_{eq} = \sqrt[3]{a \cdot b \cdot c} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot D} = D.$$

$$\text{d'où: } C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{D}{r}} \quad (F/m)$$

* nappe.

Nous avons:

$$D_{12} = D, D_{13} = 2D, D_{23} = D$$

$$\text{d'où: } D_{eq} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{13} \cdot D_{23}} = \sqrt[3]{D \cdot D \cdot 2D} = \sqrt[3]{2} \cdot D = 1.26 \cdot D$$

d'où:

$$C = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{GMD}{r}} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln \frac{1.26 D}{r}} \quad (F/m)$$

II. 3. 2 Conducteurs en faisceau

Pour des conducteurs en faisceau le rayon géométrique moyen change comme suit:

Pour un faisceau de deux conducteurs

$$D_s = \sqrt[4]{(r \cdot d)^2} = \sqrt{r \cdot d}$$

Pour un faisceau de trois conducteurs



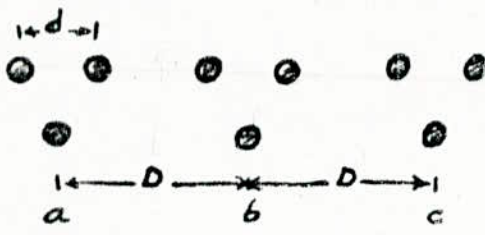
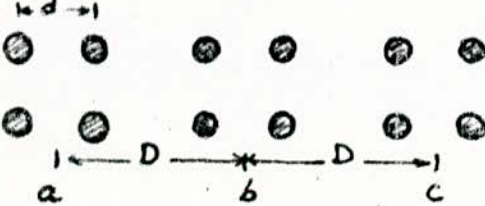
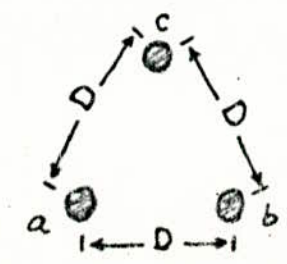
$$D_s = \sqrt[9]{(r \cdot d \cdot d)^3} = \sqrt[3]{r d^2}$$

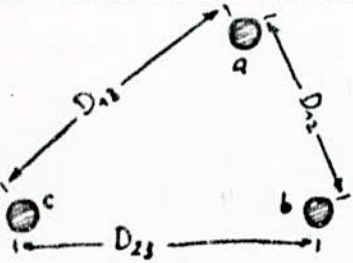
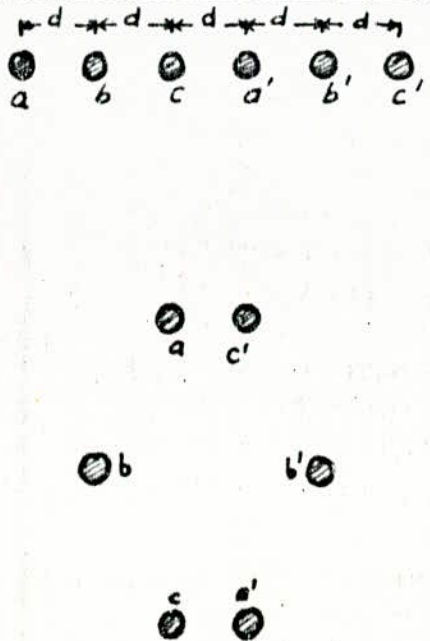
Pour un faisceau de quatre conducteurs

$$D_s = \sqrt[16]{(r \cdot d \cdot d \cdot d \cdot 2^{1/2})^4} = 1,09 \sqrt{r d^3}$$

r : représente le rayon du conducteur = $\frac{D_{ext}}{2}$

Remarque: Il convient de noter que l'effet de la terre sur la ligne est négligeable car les distances entre conducteurs et terre est très grande par rapport aux distances entre conducteurs.

Disposition	D_s	GMD	GMR	L (H/m)	C (F/m)
	2	$D \cdot \sqrt[3]{2}$	GMR_1	$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{GMR_1}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\text{Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{D_s}}$
	$\sqrt{2} \cdot d$	$D \cdot \sqrt[3]{2}$	$\sqrt{GMR_1 \cdot d}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{\sqrt{GMR_1 \cdot d}}$	$\frac{2 \pi \cdot \epsilon_0}{\text{Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{\sqrt{2} \cdot d}}$
	$\sqrt[3]{2} \cdot d^2$	$D \cdot \sqrt[3]{2}$	$\sqrt[3]{GMR_1 \cdot d^2}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{GMR_1 \cdot d^2}}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\text{Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{\sqrt[3]{2} \cdot d^2}}$
	$1.09 \sqrt[4]{2} \cdot d^3$	$D \cdot \sqrt[3]{2}$	$1.09 \sqrt[4]{GMR_1 \cdot d^3}$	$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{1.09 \sqrt[4]{GMR_1 \cdot d^3}}$	$\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0}{\text{Ln } \frac{D \cdot \sqrt[3]{2}}{1.09 \sqrt[4]{2} \cdot d^3}}$
	2	D	GMR_1	$2 \cdot 10^{-7} \text{ Ln } \frac{D}{GMR_1}$	$\frac{2 \pi \epsilon_0}{\text{Ln } \frac{D}{2}}$

Disposition	D_s	GMD	GMR	L (H/m)	C (F/m)
	π	$\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}$	GMR_1	$2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}{GMR_1}$	$\frac{2\pi \cdot E_0}{L_n \frac{\sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}}}{\pi}}$
Disposition	GMD	GMR	L (H/m)	C (F/m)	
	$GMD_1 = \sqrt[4]{40 \cdot d}$ $GMD_2 = d \cdot \sqrt[4]{6}$ $GMD_3 = d \cdot \sqrt[4]{6}$	$GMR_a = \sqrt{GMR_1 \cdot 3d}$ $GMR_b = \sqrt{GMR_1 \cdot 4d}$ $GMR_c = \sqrt{GMR_1 \cdot 2d}$	$2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{\sqrt[3]{GMD_1 \cdot GMD_2 \cdot GMD_3}}{\sqrt{GMR_a \cdot GMR_b \cdot GMR_c}}$		
	$GMD_1 = \sqrt[4]{(D_{ab} \cdot D_{cb'})^2}$ $GMD_2 = \sqrt[4]{(D_{aa} \cdot D_{a'c'})^2}$ $GMD_3 = \sqrt[4]{(D_{bc} \cdot D_{b'a'})^2}$	$GMR_a = \sqrt{GMR_1 \cdot D_{ab}}$ $GMR_b = \sqrt{GMR_1 \cdot D_{bb'}}$ $GMR_c = \sqrt{GMR_1 \cdot D_{cc'}}$	$2 \cdot 10^{-7} L_n \frac{\sqrt[3]{GMD_1 \cdot GMD_2 \cdot GMD_3}}{\sqrt{GMR_a \cdot GMR_b \cdot GMR_c}}$		

Chapitre III.

Modélisation.

III.1. Systèmes des valeurs réduites (per unit system).

III.2. Applications.

III.2.1 cas du monophasé.

III.2.2 cas du triphasé.

III.2.3 Changement de base.

III.3. Modèle de l'alternateur.

III.4. Modèle du transformateur.

III.4.1. Transformateur monophasé.

III.4.2 Transformateur à trois enroulements.

III.5. Modèle des lignes aériennes.

III.5.1. Lignes courtes et moyennes.

III.5.2 Lignes longues

III.5.3 Correction d'une ligne longue.

III MODELISATION.

Dans la modélisation des différents éléments du réseau, il est avantageux d'utiliser le per unit system ou système des valeurs réduites.

III.1. Système des valeurs réduites (per unit system)

Ce système consiste à remplacer les grandeurs physiques réelles par des grandeurs adimensionnelles, obtenues en divisant les grandeurs réelles par des grandeurs de base choisies comme référence. De cette manière une comparaison des différentes grandeurs : puissance, courant, tension est rendue plus commode.

$$X (pu) = \frac{X (réelle)}{X (base)}$$

Généralement, on choisit deux grandeurs seulement les autres en découlent. Ces deux grandeurs sont S_b, U_b .

On prend $S_b = 100 \text{ MVA}$ $U_b = 13,8 \text{ kV}$.

III. 2. Applications

III. 2. 1. Cas du monophasé'

$$S_b = V_b \cdot I_b \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{V_b}$$

$$V_b = Z_b \cdot I_b \Rightarrow Z_b = \frac{V_b^2}{S_b}$$

En p.u.

$$I(\text{pu}) = \frac{I}{I_b} = I \frac{V_b}{S_b}$$

$$Z(\text{pu}) = \frac{Z}{Z_b} = Z \frac{S_b}{V_b^2}$$

III. 2. 2. Cas du triphasé'

$$S_b = \sqrt{3} \cdot U_b \cdot I_b \Rightarrow I_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} U_b}$$

$$U_b = \sqrt{3} \cdot Z_b \cdot I_b \Rightarrow Z_b = \frac{U_b}{\sqrt{3} I_b}$$

$$\text{D'où: } Z_b = \frac{U_b^2}{S_b}$$

En comparant le cas du monophasé' et du triphasé', on déduit que l'étude des circuits électriques est identique aussi bien en monophasé' qu'en triphasé' en p.u.

III. 2.3. Changement de base

Soit une grandeur réduite $x_1(\text{pu})$ dans un système donné à ramener à un autre système de référence noté $x_2(\text{pu})$.

$$x_1(\text{pu}) = \frac{X_1}{X_{b1}}$$

$$x_2(\text{pu}) = \frac{X_1}{X_{b2}}$$

D'où :

$$\frac{x_1(\text{pu})}{x_2(\text{pu})} = \frac{X_{b2}}{X_{b1}} \Rightarrow x_2(\text{pu}) = x_1(\text{pu}) \left(\frac{X_{b1}}{X_{b2}} \right)$$

Exemple :

$$z_1(\text{pu}) = z \frac{S_{b1}}{U_{b1}^2}$$

$$z_2(\text{pu}) = z \frac{S_{b2}}{U_{b2}^2}$$

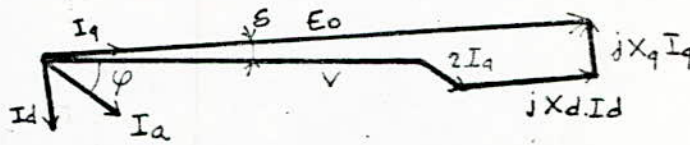
$$z_2(\text{pu}) = z_1(\text{pu}) \cdot \frac{S_{b2}}{S_{b1}} \left(\frac{U_{b1}^2}{U_{b2}^2} \right)$$

III.3. Modèle de l'alternateur

Les alternateurs considérés sont des générateurs synchrones à pôles lisses et à pôles saillants.

Le diagramme des tensions des machines synchrones est représenté ci-dessous :

$$E_0 = V + r I_a + j X_d I_d + j X_q I_q$$



avec :

E_0 : f.e.m à vide

V : tension en charge

φ : déphasage entre la tension V et le courant de charge I_a

I_a : Courant de charge

r : résistance interne du générateur

X_q : réactance transversale de la machine

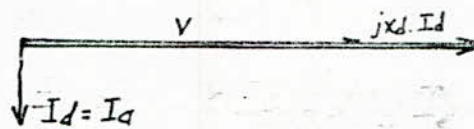
X_d : réactance longitudinale de la machine

δ : angle interne de la machine. Il dépend de la charge.

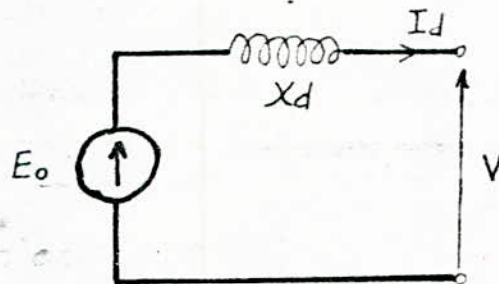
Pour les machines à pôles lisses $X_q \ll X_d$, $I_q \ll I_d$.

Dans notre étude, on néglige les résistances. La charge des différents alternateurs est purement inductive d'où $\varphi = \frac{\pi}{2}$.

La résistance de l'alternateur est négligée d'où $\delta = 0$.



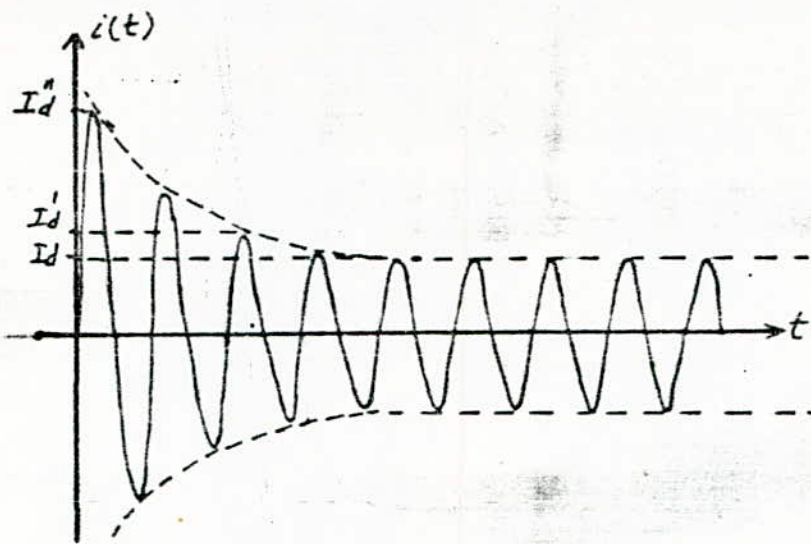
D'où le schéma équivalent du générateur dans notre cas est :



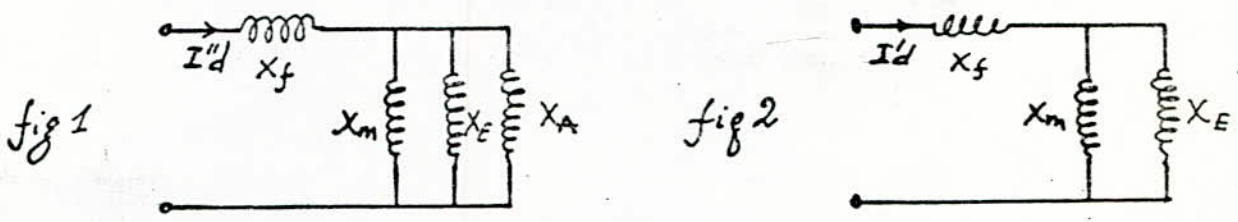
Il est à noter que le modèle de la machine synchrone à pôles lisses et à pôles saillants est le même dans l'étude des courants de court-circuits. De plus, dans une telle étude on s'intéresse toujours à l'amplitude du courant au début du régime transitoire, ainsi, seule la réactance subtransitoire de la machine sera prise en compte, car le temps de réponse du disjoncteur est très faible.

Régime transitoire de la machine

Le régime transitoire affecte le fonctionnement de la machine lors des court-circuits. Ce régime est très court en raison de la constante de temps de la machine. Juste au début du court-circuit le courant statorique augmente soudainement, cette variation subite du courant induit dans les enroulements d'excitation et les amortisseurs des courants qui vont s'opposés à cette variation du courant statorique (loi de Lenz). Cette action des amortisseurs et de l'enroulements d'excitation détermine le régime subtransitoire. La constante de temps des amortisseurs étant très faible par rapport à celle de l'excitation et celle du stator. L'extinction du courants dans les amortisseurs est très rapide (environ pendant trois cycles). Le courant statorique étant toujours en variation seul l'action mutuelle des flux statorique et rotorique détermine la durée du régime transitoire, cela dure jusqu'à ce que le système atteint le régime de régime permanent de court-circuit.



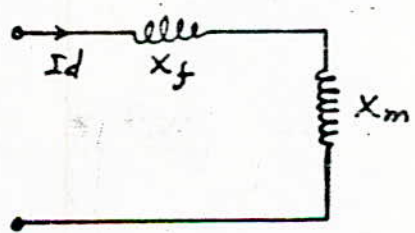
Le régime subtransitoire est caractérisé par la réactance subtransitoire de la machine X_d'' définie par la figure 1



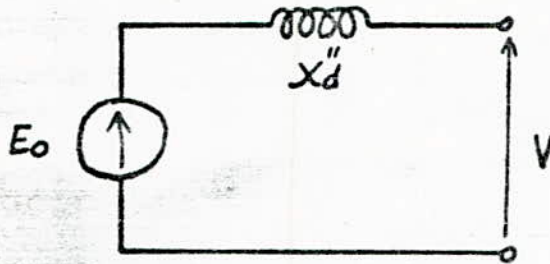
- X_m = réactance due à la réaction magnétique d'induit
- X_E = réactance du circuit d'excitation
- X_A = réactance due aux amortisseurs
- X_f = réactance de fuite du stator

Le régime transitoire est caractérisé par la réactance transitoire de la machine X_d' définie par la figure 2

En régime permanent on a le schéma suivant:



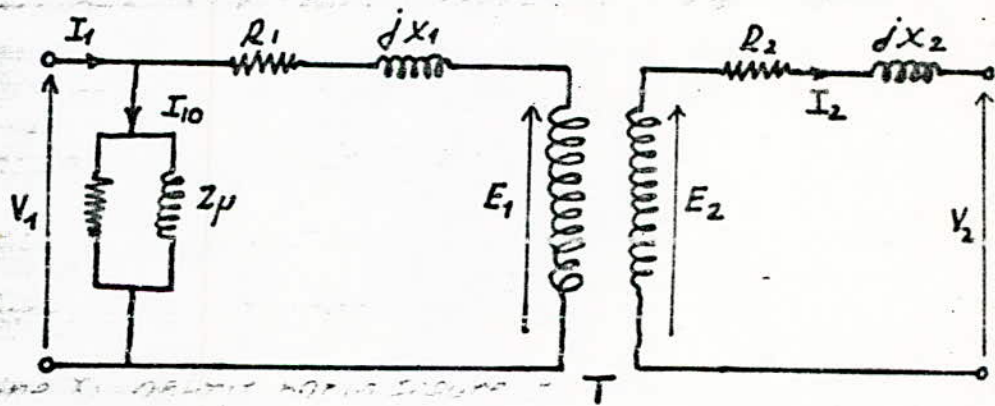
D'où le modèle définitif de la machine



III.4. Modèle du transformateur.

III.4.1. Transformateur à deux enroulements

Le schéma équivalent d'un transformateur est donné comme suit:



avec

R_1 : résistance du circuit primaire

R_2 : résistance du circuit secondaire

X_1 : réactance du primaire

X_2 : réactance du secondaire

Z_p : impédance magnétisante.

V_1 : tension d'alimentation.

V_2 : tension de sortie.

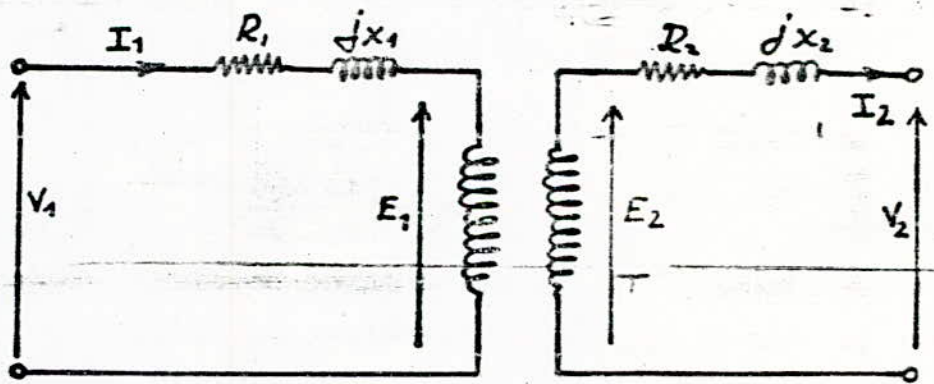
E_1 : tension induite dans le primaire.

E_2 : tension induite dans le secondaire.

T : transformateur idéal.

Pour les transformateurs de grande puissance, on néglige généralement le courant magnétisant (courant à vide). (Hypothèse de Kapp.)

D'où le schéma



Les équations sont les suivantes

$$N_1 I_1 = N_2 I_2 \Rightarrow \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1} = n$$

$$E_1 \bar{I}_1 = E_2 \bar{I}_2 \quad n: \text{rapport de transformation.}$$

En négligeant les chutes de tensions $(R_1 + jX_1)\bar{I}_1$ et $(R_2 + jX_2)\bar{I}_2$ par rapport à V_1, V_2 on a:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{E_1}{E_2} = \frac{I_2}{I_1} = n$$

De plus

$$Z_{eq_1} = \left(\frac{V_1}{I_1} \right)_{V_2=0}$$

$$Z_{eq_2} = \left(\frac{V_2}{I_2} \right)_{V_1=0}$$

D'où:

$$Z_{eq_1} = n^2 Z_{eq_2}$$

Z_{eq_1} : impédance équivalente vue du primaire.

Z_{eq_2} : impédance équivalente vue du secondaire.

en per unit :

$$Z_{eq_1}(\text{pu}) = Z_{eq_1} \frac{S_b}{V_{b1}^2}$$

$$Z_{eq_2}(\text{pu}) = Z_{eq_2} \frac{S_b}{V_{b2}^2}$$

$$\text{or } V_{b2} = \frac{V_{b1}}{n}$$

$$\text{D'où } Z_{eq_1}(\text{pu}) = Z_{eq_2}(\text{pu}) = Z_{pu}$$

De plus

$$S_b = \sqrt{3} \cdot \bar{I}_b \cdot V_b$$

$$\bar{I}_b = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_b}$$

$$\bar{I}_{b1} = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_{b1}}$$

$$\text{et } \bar{I}_{b2} = \frac{S_b}{\sqrt{3} V_{b2}}$$

en p.u.

$$\bar{I}_1 (\text{pu}) = \frac{\bar{I}_1}{\bar{I}_{b1}} = \bar{I}_1 \frac{\sqrt{3} V_{b1}}{S_b}$$

$$\bar{I}_2 (\text{pu}) = \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_{b2}} = \bar{I}_2 \frac{\sqrt{3} V_{b2}}{S_b}$$

$$\text{mais } \frac{\bar{I}_2}{\bar{I}_1} = \frac{V_1}{V_2} = n$$

$$\bar{I}_1 (\text{pu}) = \frac{\bar{I}_2}{n} \cdot \frac{\sqrt{3} V_{b2} \cdot n}{S_b} = \bar{I}_2 \cdot \frac{\sqrt{3} \cdot V_{b2}}{S_b} = \bar{I}_2 (\text{pu})$$

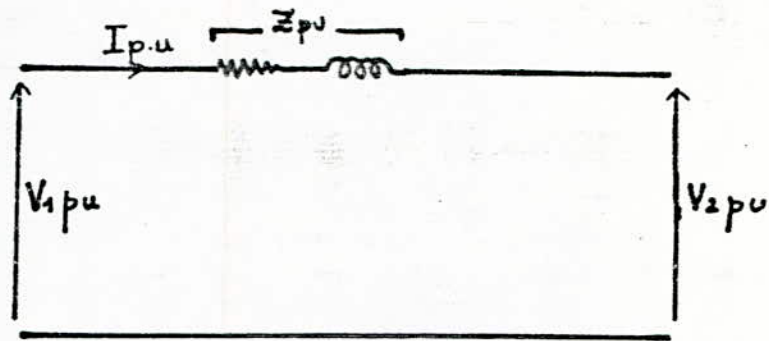
$$\text{Done } \bar{I}_1 (\text{pu}) = \bar{I}_2 (\text{pu}) = \bar{I} (\text{pu})$$

$$Z_{eq1} (\text{pu}) = \frac{V_1 (\text{pu})}{\bar{I}_1 (\text{pu})}$$

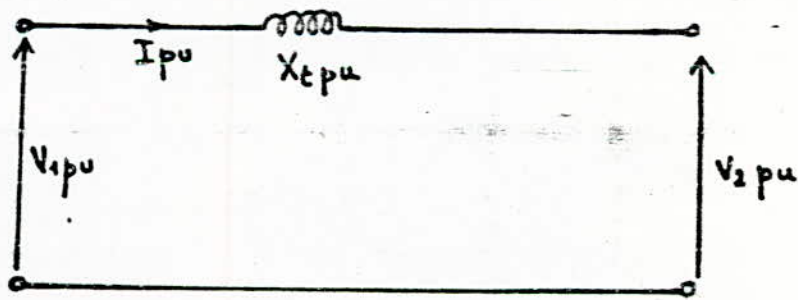
$$Z_{eq2} (\text{pu}) = \frac{V_2 (\text{pu})}{\bar{I}_2 (\text{pu})}$$

De là, on en déduit que l'impédance du transformateur exprimé en p.u., vue du primaire et du secondaire est la même.

D'où le modèle du transformateur en per unit



Le modèle définitif du transformateur adopté dans l'étude du court-circuit, est obtenu en négligeant la résistance du transformateur:

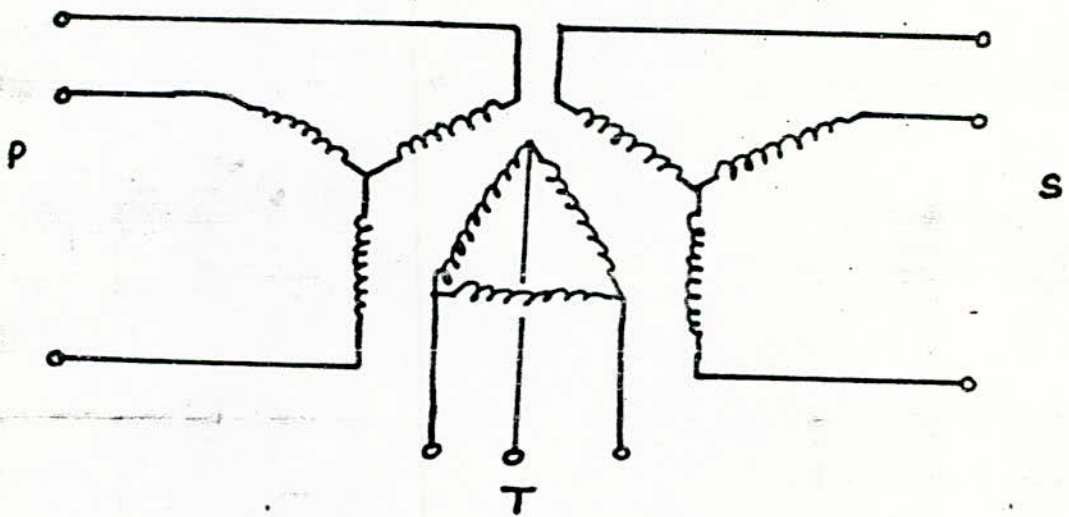


Pour le transformateur triphasé, l'étude sera faite par phase. Ce qui nous ramène à la même étude que

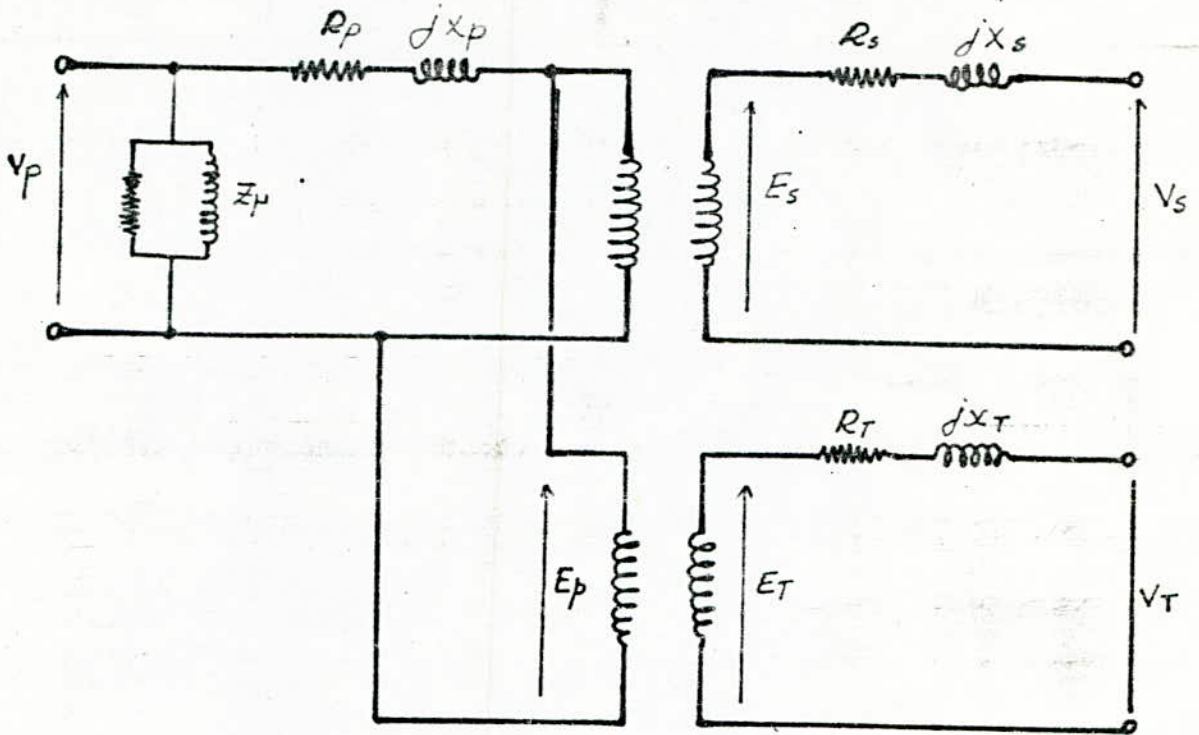
précédemment. Ainsi le modèle du transformateur triphasé par phase est analogue à celui du transformateur monophasé.

III. 4.2. Transformateur à trois enroulements.

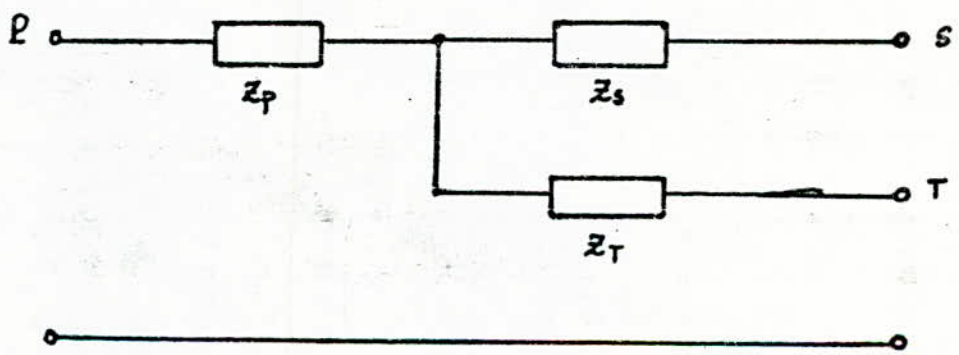
Le transformateur à trois enroulements permet d'avoir deux niveaux de tension différents à partir d'un seul niveau de tension. Les transformateurs considérés sont indiqués par la figure :



Son schéma électrique par phase est :



L'indice P désigne le circuit primaire, S désigne le circuit secondaire et T désigne le circuit tertiaire.
En négligeant la branche magnétisante et en transformant en p.u. le schéma précédent on a :



Les essais de tels transformateurs en court-circuit permettent de déterminer les impédances Z_{ps} , Z_{pt} et Z_{st} définies comme suit :

Z_{ps} : impédance de fuite au primaire avec secondaire en court-circuit et tertiaire ouvert.

Z_{pt} : impédance de fuite au primaire avec tertiaire en court-circuit et secondaire ouvert.

Z_{st} : impédance de fuite au secondaire avec tertiaire en court-circuit et primaire ouvert.

$Z_{ps} = \left(\frac{V_p}{I_p} \right)_{V_s=0}$ impédance équivalente vue du primaire
secondaire en court-circuit et tertiaire ouvert.

$Z_{pt} = \left(\frac{V_p}{I_p} \right)_{V_t=0}$ impédance équivalente vue du primaire
tertiaire en court-circuit et secondaire ouvert.

$Z_{st} = \left(\frac{V_s}{I_s} \right)_{V_t=0}$ impédance équivalente vue du secondaire
tertiaire en court-circuit et primaire ouvert.

D'où

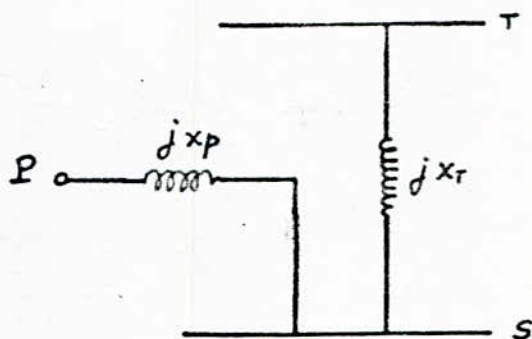
$$S \begin{cases} Z_{ps} = Z_p + Z_s \\ Z_{pt} = Z_p + Z_t \\ Z_{st} = Z_s + Z_t \end{cases}$$

De ce système, on tire Z_s , Z_p et Z_t données par les relations suivantes :

$$\begin{cases} Z_p = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st}) \\ Z_s = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt}) \\ Z_t = \frac{1}{2} (Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps}) \end{cases}$$

Les transformateurs à trois enroulements, utilisés dans le transport d'énergie électrique, sont étudiés et construits de manière à avoir une impédance Z_s très faible par rapport à Z_p et Z_t car de tels transformateurs ne doivent pas introduire de nœuds supplémentaires dans les équations lors de l'étude du court-circuit.

Le modèle définitif du transformateur à trois enroulements est obtenu en négligeant les résistances du primaire, du secondaire et du tertiaire.



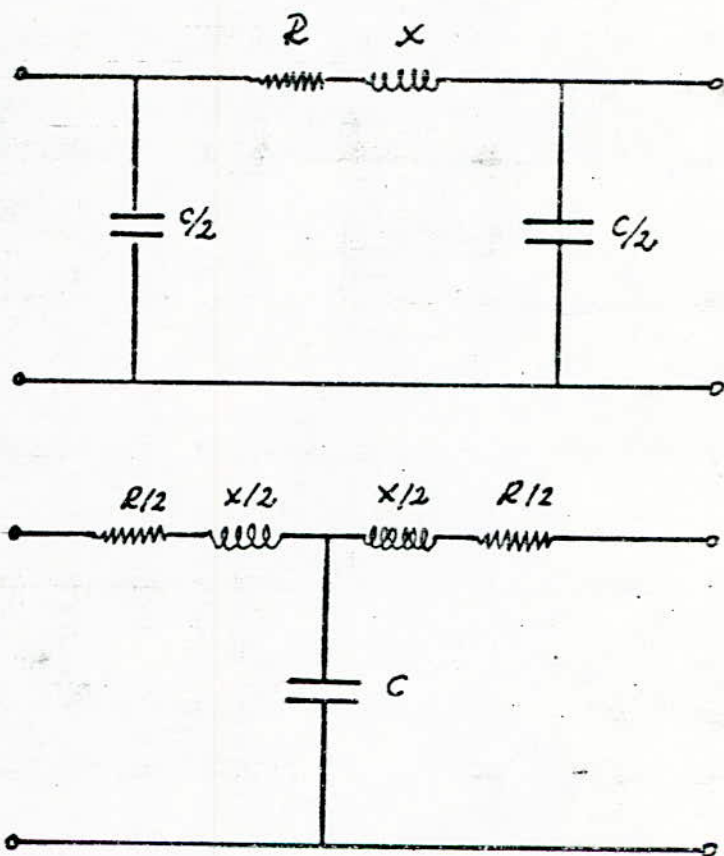
III. 5. Modèle des lignes aériennes

Une ligne de transport d'énergie possède une résistance liée à la nature du conducteur donc à sa résistivité, une inductance liée à sa configuration, une capacité liée à sa configuration et à sa hauteur par rapport à la terre.

Les lignes sont classées en trois catégories d'après leur longueur.

- Ligne courte : ligne dont la longueur n'excède pas 80 km.
- Ligne moyenne : ligne dont la longueur est comprise entre 80 et 160 km.

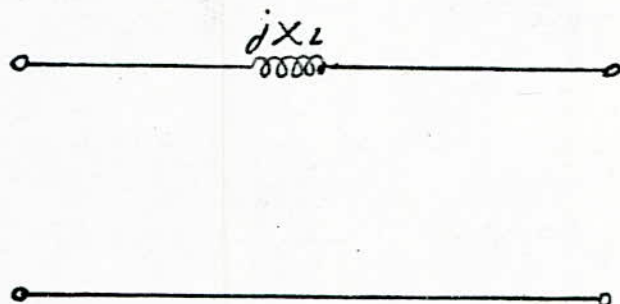
- Ligne longue : ligne dont la longueur dépasse 160 km.
Une ligne peut être représentée par les deux schémas en Π ou T.



Dans les calculs des réseaux, il est judicieux de prendre le schéma en Π , car il offre une meilleure commodité de calcul.

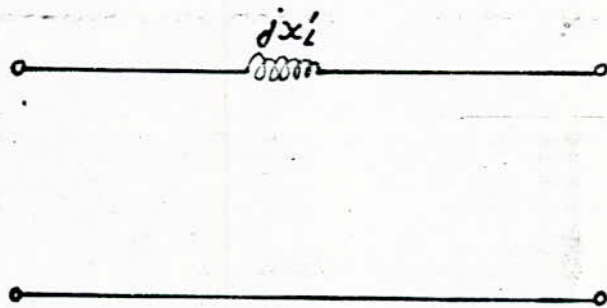
III. 5.1. Lignes courtes et moyennes

Dans le cadre de l'étude du court-circuit, pour les lignes courtes et moyennes, on adoptera le modèle désigné par la figure ci-dessous dans lequel on a négligé le courant traversant la capacité shunt C ainsi que la résistance de la ligne.



III. 5.2. Lignes longues

Pour les lignes longues une correction, portant sur l'impédance de la ligne devra être faite pour tenir compte de la propagation de l'onde le long de la ligne.

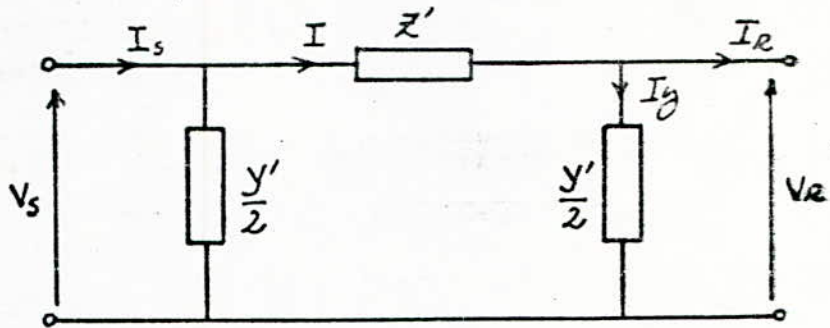


x_L : réactance de la ligne corrigée.

III. 5.3. Correction des lignes longues.

La correction des lignes longues tient compte de la capacité entre conducteurs.

Le schéma en π de la ligne longue devient:



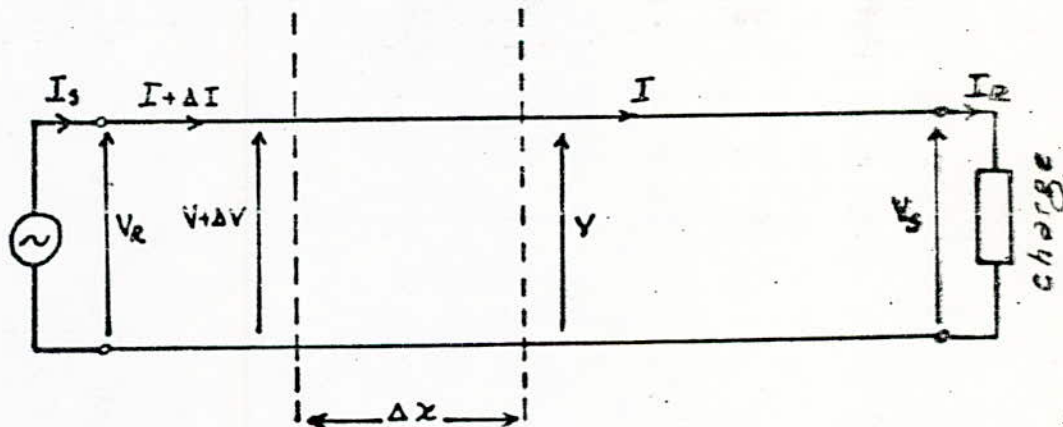
$$V_s = Z'I + V_r \quad \text{or} \quad I = I_r + I_y = I_r + V_r \frac{y'}{2}$$

Où

$$V_s = \left(\frac{Z'y'}{2} + 1 \right) V_r + Z'I_r \quad (D_1)$$

équations de propagation.

Soit le circuit suivant:



Soit un élément de la ligne de longueur Δx alimenté

par la tension $V + \Delta V$ et parcouru par le courant $I + \Delta I$.

ΔV sera la chute de tension sur la ligne.

ΔI sera le courant traversant la capacité shunt de la ligne.

Ainsi

$$\Delta V = I \cdot z \cdot \Delta x.$$

$$\Delta I = V \cdot y \cdot \Delta x.$$

z : impédance de la ligne par mètre.

y : admittance de la ligne par mètre.

Pour un élément infiniment petit on a :

$$\frac{dV}{dx} = I \cdot z \quad \text{et} \quad \frac{dI}{dx} = V \cdot y.$$

en différenciant une seconde fois par rapport à x on a :

$$\frac{d^2V}{dx^2} = z \frac{dI}{dx} \quad \text{et} \quad \frac{d^2I}{dx^2} = y \frac{dV}{dx}$$

Où en remplaçant $\frac{dI}{dx}$ et $\frac{dV}{dx}$

On obtient :

- 61 -

$$\frac{d^2 V}{dx^2} = y \cdot z \cdot V \quad \text{et} \quad \frac{d^2 I}{dx^2} = y \cdot z \cdot I$$

Les solutions de ces équations sont :

$$I = \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_1 \exp(\sqrt{y \cdot z} \cdot x) - \frac{1}{\sqrt{z/y}} A_2 \exp(-\sqrt{y \cdot z} \cdot x)$$

$$V = A_1 \exp(\sqrt{y \cdot z} \cdot x) + A_2 \exp(-\sqrt{y \cdot z} \cdot x)$$

Les constantes A_1 et A_2 sont déterminées par les conditions initiales.

$$x = 0 \quad V = V_r \quad , \quad I = I_r$$

Donc

$$V_r = A_1 + A_2 \quad \text{et} \quad I_r = \frac{1}{\sqrt{z/y}} (A_1 - A_2)$$

en remplaçant $\sqrt{z/y}$ par Z_c

on a :

$$A_1 = \frac{V_r + I_r \cdot Z_c}{2}$$

$$A_2 = \frac{V_r - I_r \cdot Z_c}{2}$$

D'où:

$$V = \frac{V_r + I_r \cdot Z_c}{2} \exp(\sqrt{y \cdot z} \cdot x) + \frac{V_r - I_r \cdot Z_c}{2} \exp(-\sqrt{y \cdot z} \cdot x)$$

$$I = \frac{V_r / Z_c + I_r}{2} \exp(\sqrt{y \cdot z} \cdot x) - \frac{V_r / Z_c - I_r}{2} \exp(-\sqrt{y \cdot z} \cdot x)$$

$Z_c = \sqrt{z/y}$: impédance caractéristique de la ligne.

$\gamma = \sqrt{y \cdot z}$: constante de propagation de l'onde le long de la ligne.

$\gamma = \alpha + j\beta$ α : constante d'atténuation.

β : constante de longueur d'onde.

D'où:

$$V = \frac{V_r + I_r \cdot Z_c}{2} e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x} + \frac{V_r - I_r \cdot Z_c}{2} e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x}$$

$$I = \frac{V_r / Z_c + I_r}{2} e^{\alpha x} \cdot e^{j\beta x} - \frac{V_r / Z_c - I_r}{2} e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x}$$

sachant que

$$\sinh \theta = \frac{e^\theta - e^{-\theta}}{2}, \quad \cosh \theta = \frac{e^\theta + e^{-\theta}}{2}$$

des équations (1) et (2) on tire:

$$V = V_r \cosh \gamma x + I_r Z_c \sinh \gamma x.$$

$$I = I_r \cosh \gamma x + \frac{V_r}{Z_c} \sinh \gamma x.$$

quand $x=l$ on a $V=V_s$ et $I=I_s$

$$S_1 \begin{cases} V_s = V_r \cosh \gamma l + I_r Z_c \sinh \gamma l \\ I_s = I_r \cosh \gamma l + \frac{V_r}{Z_c} \sinh \gamma l. \end{cases}$$

$$S_2 \begin{cases} V_s = A V_r + B I_r \\ I_s = C V_r + D I_r \end{cases}$$

En comparant les systèmes S_1 et S_2 on obtient:

$$A = \cosh \gamma l$$

$$C = \frac{\sinh \gamma l}{Z_c}$$

$$B = Z_c \sinh \gamma l$$

$$D = \cosh \gamma l$$

on remarque que les constantes A, B, C et D sont telles que :

$$A = D \quad \text{et} \quad A \cdot D - B \cdot C = 1 \quad (D_2)$$

Des équations (D_1) et (D_2) on tire :

$$s' \begin{cases} V_s = \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) V_r + Z' I_r \\ I_s = Y' \left(1 + \frac{Y'Z'}{4}\right) V_r + \left(1 + \frac{Y'Z'}{2}\right) I_r \end{cases}$$

En comparant les systèmes S et S' on tire :

$$Z' = Z_e \sinh \gamma l = \sqrt{Z/Y} \cdot \sinh \gamma l = Z \cdot l \cdot \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l}$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{Y}{2} \frac{\tanh \gamma l / 2}{\gamma l / 2}$$

Z' est l'impédance corrigée.

Sachant que

$$\sinh(\alpha l + j\beta l) = \sinh \alpha l \cdot \cos \beta l + j \cosh \alpha l \cdot \sin \beta l$$

Etant donné que l'on néglige la résistance de la ligne

on a $\alpha = 0$

d'où

$$\sinh(j\beta l) = j \sin \beta l$$

d'où

$$Z' = Z \frac{\sinh \gamma l}{\gamma l} = Z \frac{\sin \beta l}{\beta l}$$

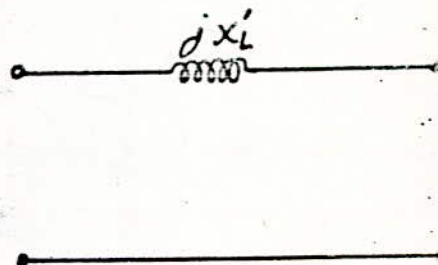
$$\text{avec } \beta = \sqrt{y \cdot z} = \sqrt{LC\omega^2}$$

C : capacité de la ligne par mètre.

L : Inductance de la ligne par mètre.

D'où le modèle de la ligne longue (figure ci-dessous)

$$X' = X \frac{\sin \beta l}{\beta l} = X \frac{\sin(\sqrt{LC\omega^2} \cdot l)}{\sqrt{LC\omega^2} \cdot l}$$



l : longueur totale de la ligne en mètre

Transformateur	S_n (MVA)	X_t (Valeur p.u.)	X_t (ramenée 100M)				
T1	60	0.10	0.1667				
T2	40	0.11	0.2750				
T3	30	0.12	0.4000				
T4	60	0.10	0.1667				
T5	65	0.12	0.1846				
T6	50	0.15	0.3000				
T7	60	0.14	0.2333				
T8	60	0.10	0.2333				
T9	60	0.10	0.1667				
T10	50	0.20	0.4000				
T11	60	0.18	0.3000				
T12	75	0.18	0.2400				
T13	60	0.13	0.2167				
T14	60	0.17	0.2833				
Transfo à trois enr	S_n (MVA)	X_{ps}	X_{pt}	X_{st}	X_p	X_t	X_s
T15		0.09	0.20	0.13	0.08	0.01	0.12
T16		0.09	0.20	0.13	0.08	0.01	0.12

	S_n (MVA)	X_d'' (p.u)	X_d'' (ramenée à 100MVA)
G_1	60	0.10	0.1667
G_2	60	0.18	0.3000
G_3	60	0.17	0.2833
G_4	15	0.11	0.7333
G_5	15	0.11	0.7333
G_6	60	0.15	0.2500
G_7	45	0.16	0.3556
G_8	60	0.17	0.2833
G_9	60	0.17	0.2833
G_{10}	75	0.18	0.2400

Caractéristique des alternateurs.

	X_{ps} (p.u)	X_{pt} (p.u)	X_{st} (p.u)
T_{15}	0.07	0.09	0.08
T_{16}	0.07	0.09	0.08

Caractéristique des transformateurs à trois enroulement.

Ligne	GMR	GMD	L	C (PF)	X (Ω)	X' (Ω)	X (p.u)
1-2	53	10.079	73.50	0.75	23.09	-	0.0144
1-4	6.8	8.000	141.50	0.81	44.45	-	0.0278
2-3	7.4	8.618	240.00	1.38	75.40	75.25	0.0470
2-4	160.0	8.189	31.44	0.57	9.88	-	0.0062
2-8	7.4	8.041	279.60	1.64	87.84	87.66	0.0548
3-5	240.0	4.894	54.54	1.51	17.73	-	0.0354
3-9	7.4	8.189	140.20	0.81	44.05	-	0.0910
4-12	53.0	10.079	189.0	1.59	59.38	58.26	0.0370
5-6	6.8	8.000	141.5	0.81	44.45	-	0.0278
5-10	100.0	8.189	87.37	0.81	27.61	-	0.0570
6-7	6.8	8.000	70.75	0.40	22.23	-	0.0139
6-13	7.4	8.041	349.5	1.53	109.80	109.58	0.0685
7-10	8.7	6.000	17.01	1.14	53.44	-	0.1104
7-14	7.4	8.189	294.30	1.28	92.16	92.08	0.1907
8-11	12.0	8.000	51.85	0.35	16.29	-	0.0102
9-10	110.0	8.189	128.9	1.97	40.50	-	0.0837
10-12	8.7	8.041	95.68	0.59	30.06	-	0.0188
10-14	73.0	8.189	118.0	1.51	37.00	-	0.0764
11-12	76.8	3.200	73.35	1.61	23.08	-	0.0144
11-15	160.0	10.079	41.17	0.68	12.93	-	0.0081
12-13	18.0	8.618	247.20	1.35	77.66	77.50	0.0484
12-16	190.0	10.079	158.42	2.44	49.88	49.78	0.0311
13-14	12.0	8.000	90.74	0.62	28.51		0.0178

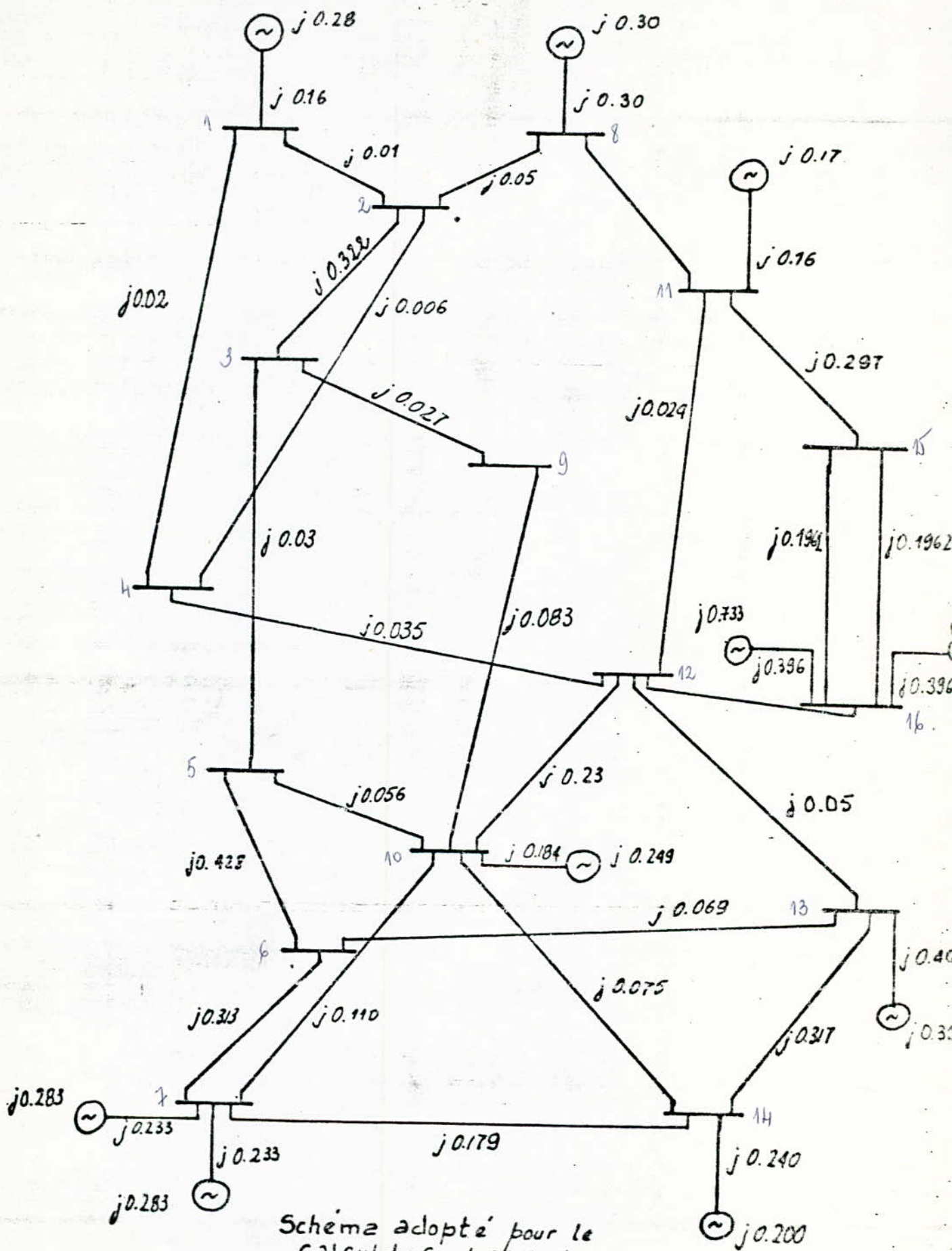


Schéma adopté pour le
 calcul du Court-circuit
 en per unit. (toutes les réactances sont en p.u
 ramenes a 100 MVA).

Chapitre IV.

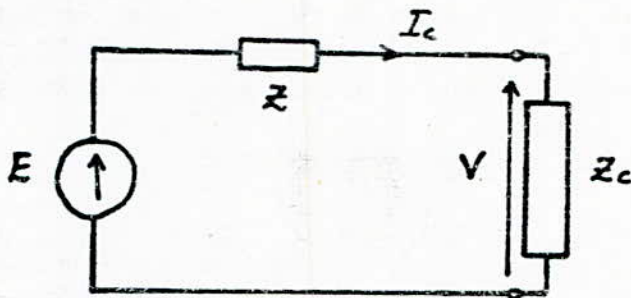
Méthode de calcul.

- IV. 1. Equivalence des sources (loi des noeuds).
- IV. 2. Principe de la méthode (Elimination des noeuds)
- IV. 3. Résolution
- IV. 4. Organigramme.
- IV. 5. Résultats.

IV. METHODE DE CALCUL

IV.1. Equivalence des sources (lois des noeuds)

Soit une source de tension en série avec une impédance Z comme indiqué par la figure :



$$- V = E - Z I_c \Rightarrow I_c = \frac{E - V}{Z} = \frac{E}{Z} - \frac{V}{Z}$$

d'où :

$$\frac{E}{Z} = I_c + \frac{V}{Z}$$

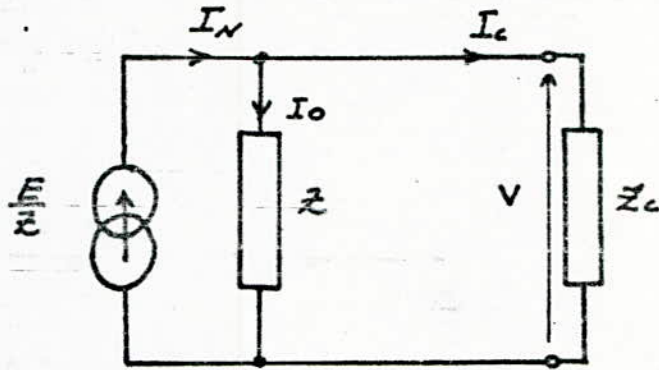
De cette équation on peut dire que

$$I_n = I_c + I_o$$

avec

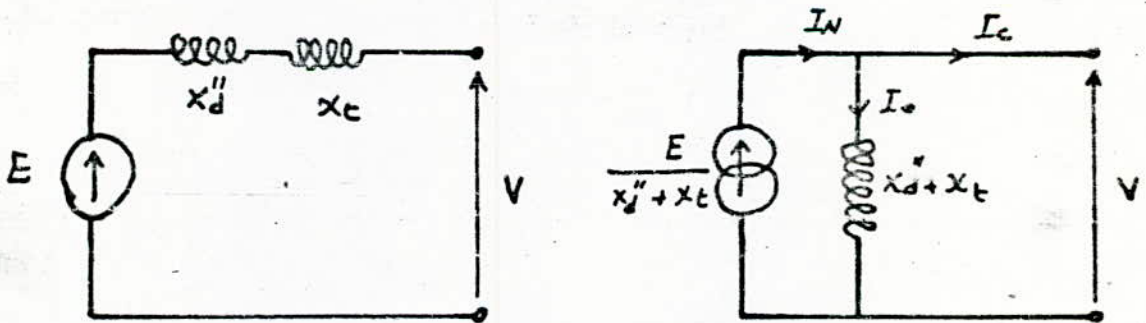
$$I_n = \frac{E}{Z} \quad \text{et} \quad I_o = \frac{V}{Z}$$

qui est illustrée par le schéma suivant



Cette transformation est appelée transformation Norton. On en déduit qu'une source de tension peut être remplacée par un générateur de courant suivant le principe énoncé.

En tenant compte de cela, on remplace toutes les sources de tension que sont les centrales électriques par des sources de courant.



x_d'' = réactance subtransitoire de l'alternateur

x_t = réactance du transformateur.

IV. 2. Principe de la méthode (Elimination des noeuds).

Le principe de cette méthode est de négliger en premier lieu les résistances

- des lignes
- des alternateurs
- des transformateurs.

Ainsi que les charges connectées au réseau, les courants traversant les branches parallèle des lignes.

Ensuite, on écrit les équations des courants dans chaque noeuds du réseau. Après quoi, on tire la matrice admittance de ce réseau.

Exemple.

Soit un réseau brut donné par la figure 1.

Après avoir calculé les paramètres du réseau

$X_{12}, X_{24}, X_{32}, X_{34}, X_{14}, X_{e_1}, X_{e_2}, X''_{d_1}, X''_{d_2}, X''_{d_3}$ en per unit, on aura le schéma donné par la figure 2.

En adoptant les considérations citées ci-dessus, on obtient le schéma Norton donné par la figure 3.

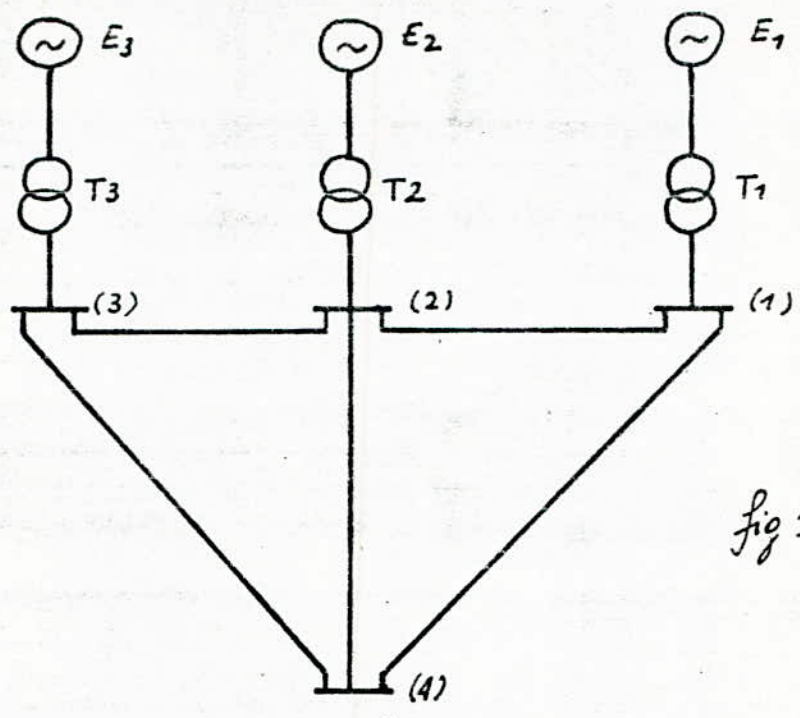


fig 1.

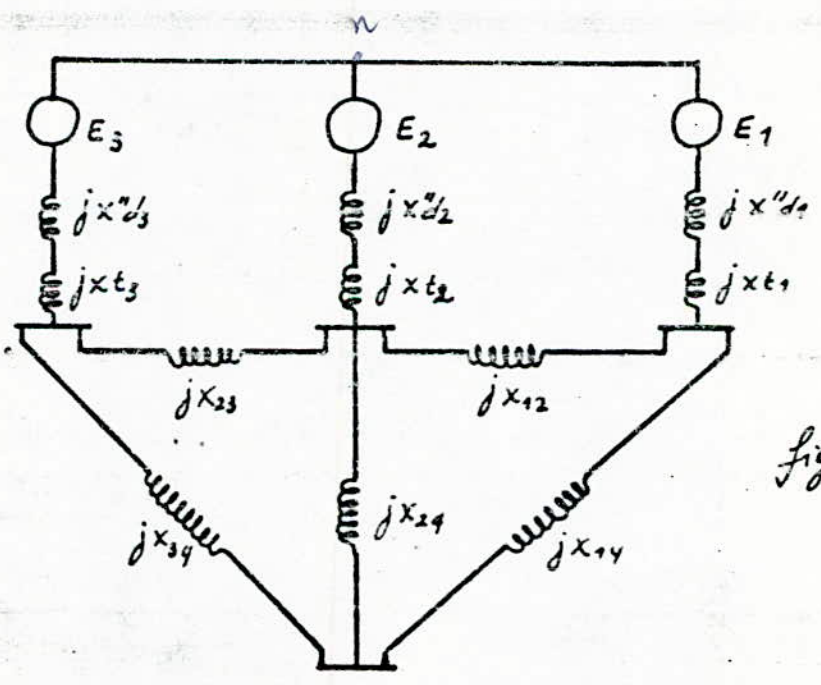


fig 2.

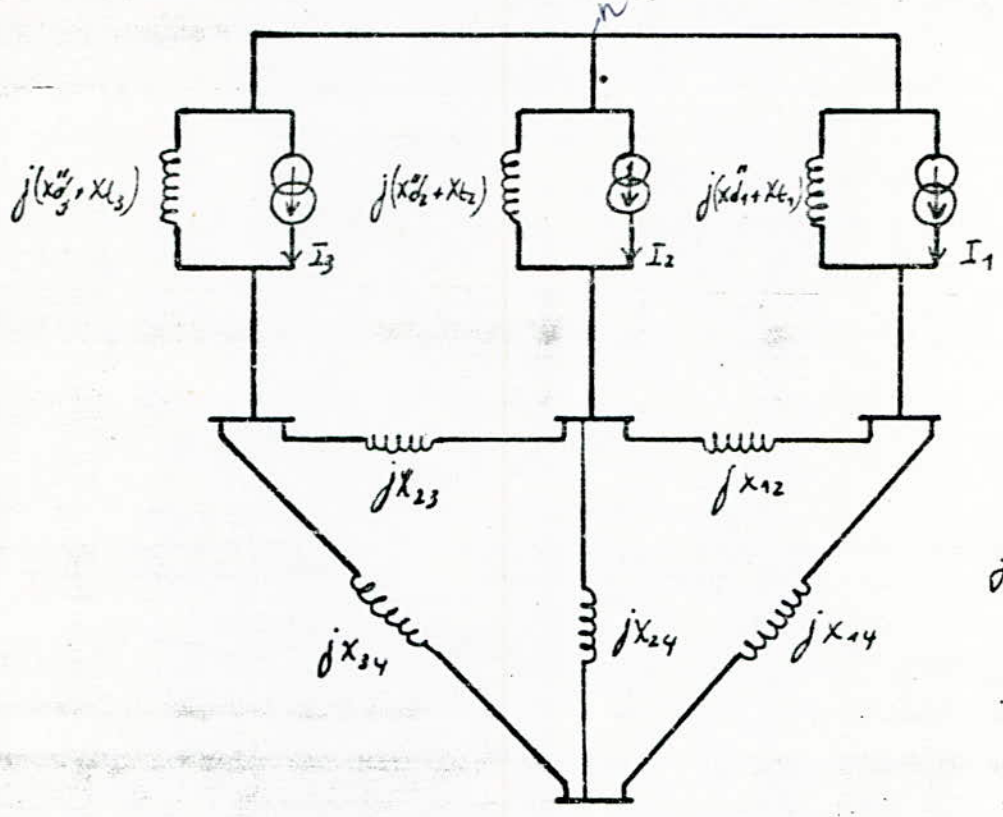


Fig 3

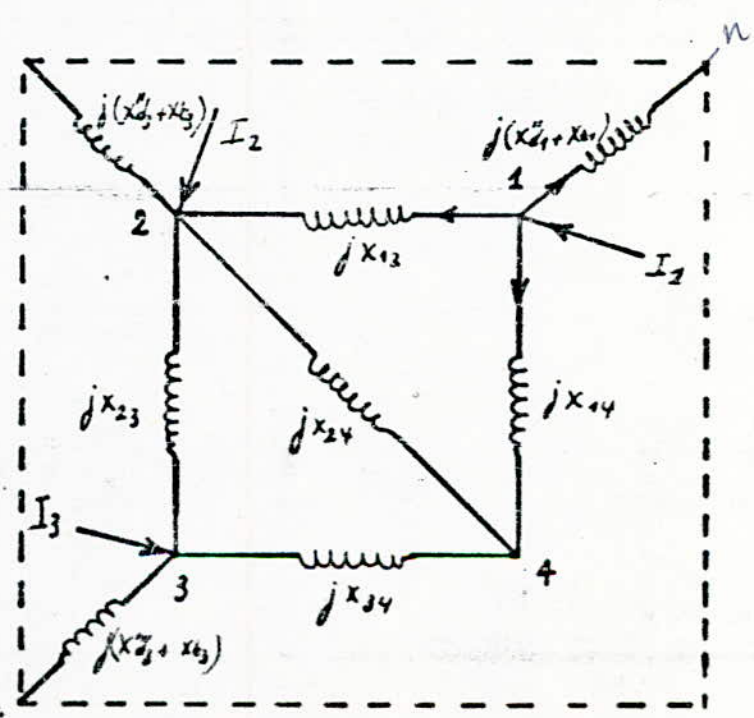


Fig 4.

$$\text{avec. } I_1 = \frac{E_1}{j(X_{e1}'' + X_{e1})}, \quad I_2 = \frac{E_2}{j(X_{e2}'' + X_{e2})}, \quad I_3 = \frac{E_3}{j(X_{e3}'' + X_{e3})}$$

$$\text{en désignant } y_{10} = \frac{1}{j(X_{e1}'' + X_{e1})}; \quad y_{20} = \frac{1}{j(X_{e2}'' + X_{e2})}, \quad y_{30} = \frac{1}{j(X_{e3}'' + X_{e3})}$$

les lois des noeuds s'écrivent :

$$I_1 = V_1 y_{10} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_4) y_{14}.$$

$$I_2 = V_2 y_{20} + (V_2 - V_1) y_{21} + (V_2 - V_3) y_{23} + (V_2 - V_4) y_{24}.$$

$$I_3 = V_3 y_{30} + (V_3 - V_2) y_{32} + (V_3 - V_4) y_{34}$$

$$0 = (V_4 - V_1) y_{41} + (V_4 - V_2) y_{24} + (V_4 - V_3) y_{43}$$

En ordonnant les équations on a :

$$-I_1 = V_1 (y_{10} + y_{12} + y_{14}) - V_2 y_{12} - V_4 y_{14}.$$

$$-I_2 = -V_1 y_{21} + V_2 (y_{20} + y_{21} + y_{23} + y_{24}) - V_3 y_{23} - V_4 y_{24}$$

$$-I_3 = -V_2 y_{32} + V_3 (y_{30} + y_{32} + y_{34}) - V_4 y_{34}.$$

$$-0 = -V_1 y_{41} - V_2 y_{42} - V_3 y_{43} + V_4 (y_{41} + y_{42} + y_{43})$$

sochant que $y_{ij} = y_{ji}$ et que $y_{ij} = \frac{1}{j x_{ij}}$

On peut écrire ce système d'équations sous forme matricielle.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{10} + y_{12} + y_{14} & -y_{12} & 0 & -y_{14} \\ -y_{12} & y_{20} + y_{21} + y_{23} + y_{24} & -y_{23} & -y_{24} \\ 0 & -y_{32} & y_{30} + y_{32} + y_{34} & -y_{34} \\ -y_{14} & -y_{24} & -y_{34} & y_{41} + y_{42} + y_{43} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ v_4 \end{bmatrix}$$

La forme générale est:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1i} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2i} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3i} & \dots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & Y_{i3} & \dots & Y_{ii} & \dots & Y_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{ni} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \\ \vdots \\ v_i \\ \vdots \\ v_n \end{bmatrix}$$

avec $Y_{11} = \sum_{i=0}^n y_{1i}$ $Y_{kk} = \sum_{i=0}^m y_{ki}$ $Y_{ij} = Y_{ji} = -y_{ij}$
 $k = 1, \dots, n$

Arrivé à ce stade, on procède au calcul des courants de court-circuit.

IV. 3. Résolution par élimination des nœuds.

Soit un court-circuit dans le $k^{\text{ième}}$ bus, sachant que la tension au $k^{\text{ième}}$ bus est nulle ($V_k = 0$), on remplace le courant I_k par un courant inconnu I_x . De cette manière on peut éliminer la $k^{\text{ième}}$ colonne et la $k^{\text{ième}}$ ligne de la matrice admittance. De même qu'on élimine le $k^{\text{ième}}$ élément du vecteur courant et du vecteur tension.

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_k \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & \dots & Y_{1k} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & \dots & Y_{2k} & \dots & Y_{2n} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & \dots & Y_{3k} & \dots & Y_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{k1} & Y_{k2} & Y_{k3} & \dots & Y_{kk} & \dots & Y_{kn} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & Y_{n3} & \dots & Y_{nk} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ \vdots \\ V_k \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix}$$

x

En effectuant cette opération, le système devient d'ordre $n-1$ et nous avons :

$$[I'] = [Y'] [V']$$

Ensuite, on fait une inversion de la matrice restante $[Y']$ en utilisant l'algorithme de Gauss-Jordan. Puis on effectue le produit matriciel de la matrice inverse de $[Y']$ et du vecteur courant $[I']$.

Ainsi, on détermine les différentes tensions dans les jeux de barre $[V']$. Puis, on reconstitue le vecteur $[V]$.

On détermine les courants de ligne en utilisant l'algorithme :

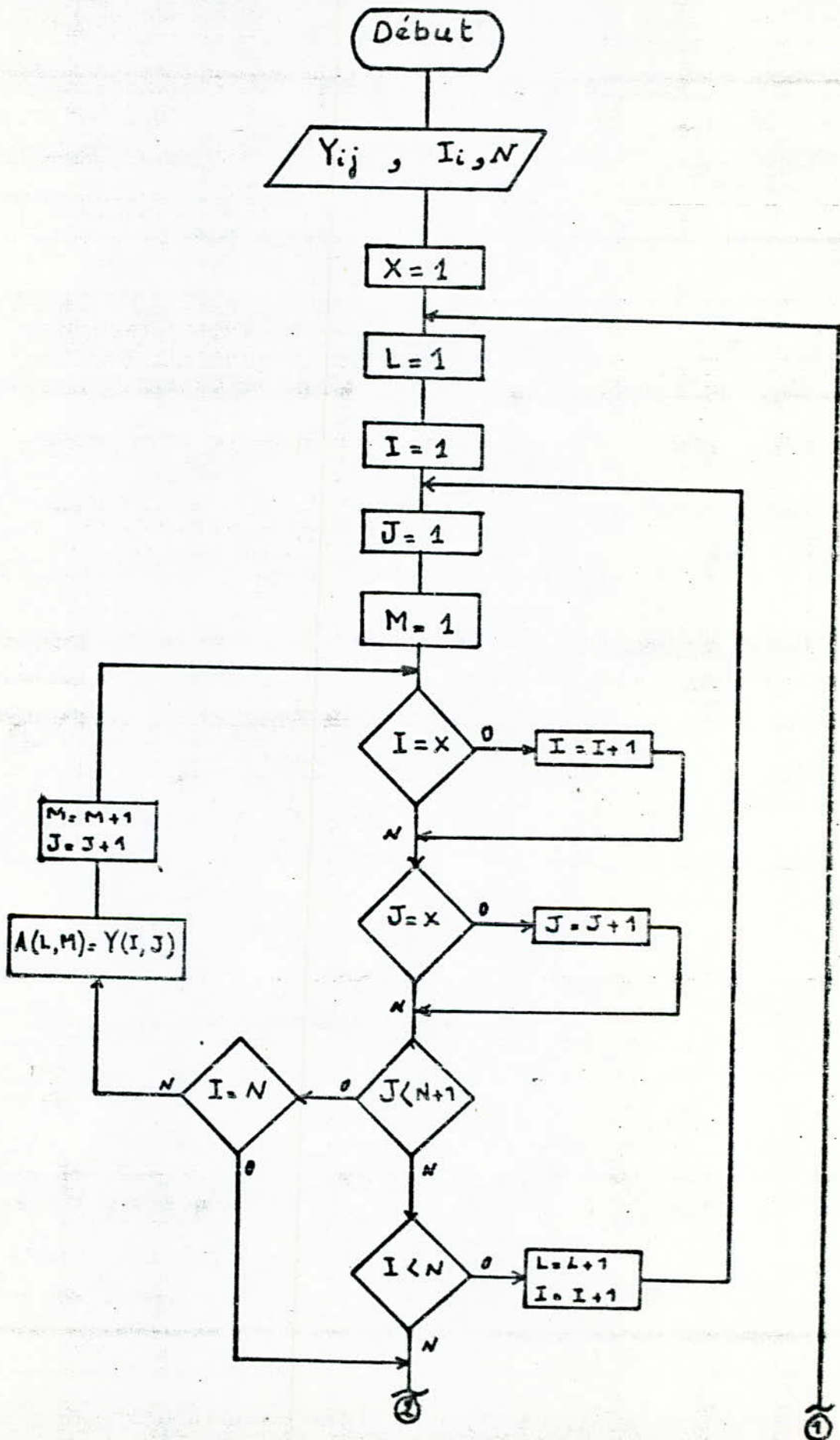
$$I_{ij} = (V_i - V_j) Y_{ij} \quad i=1, 16 ; j=1, 16$$

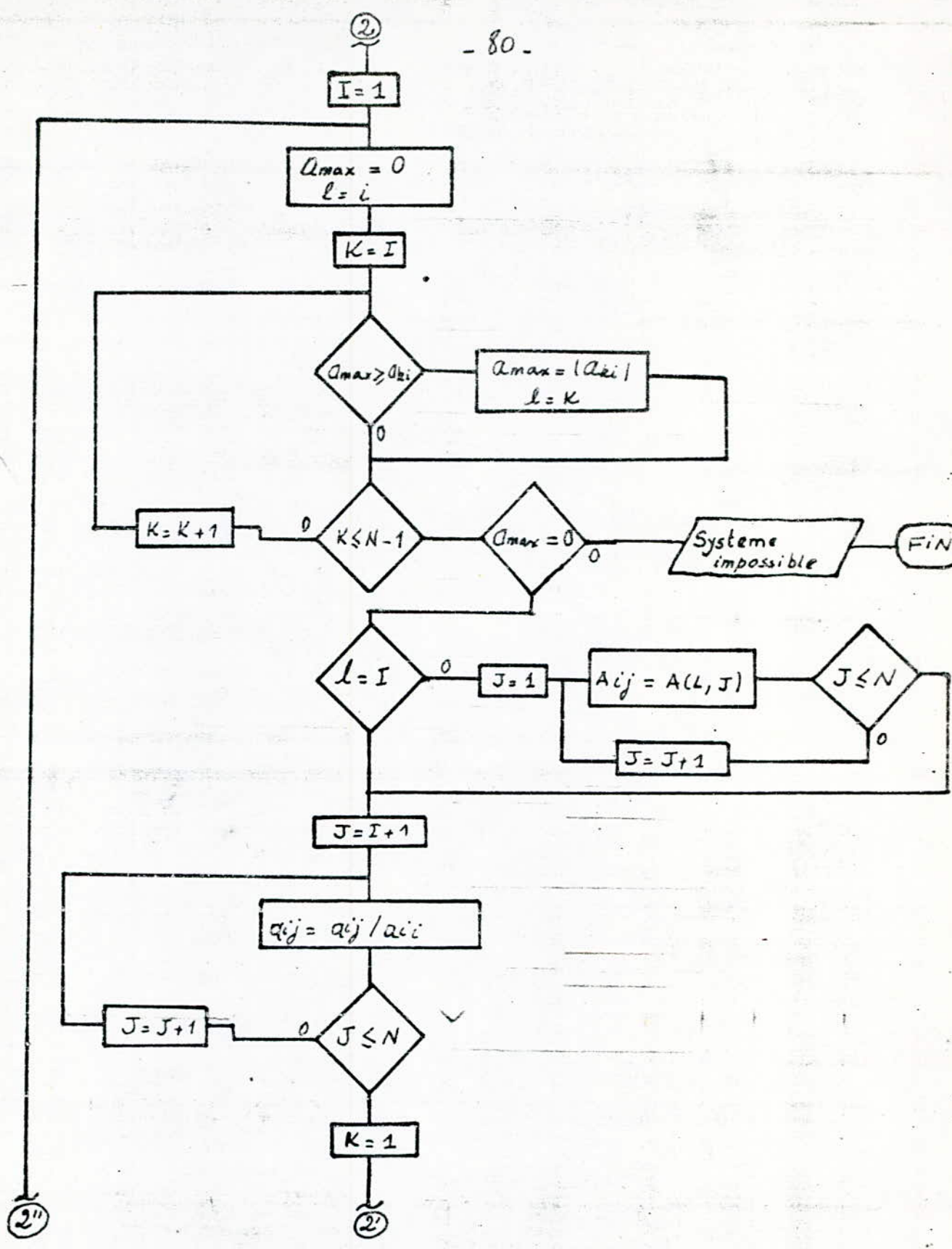
Le courant de court-circuit $I_{cc}(k)$ est déterminé d'après la loi des nœuds appliquée au nœud k .

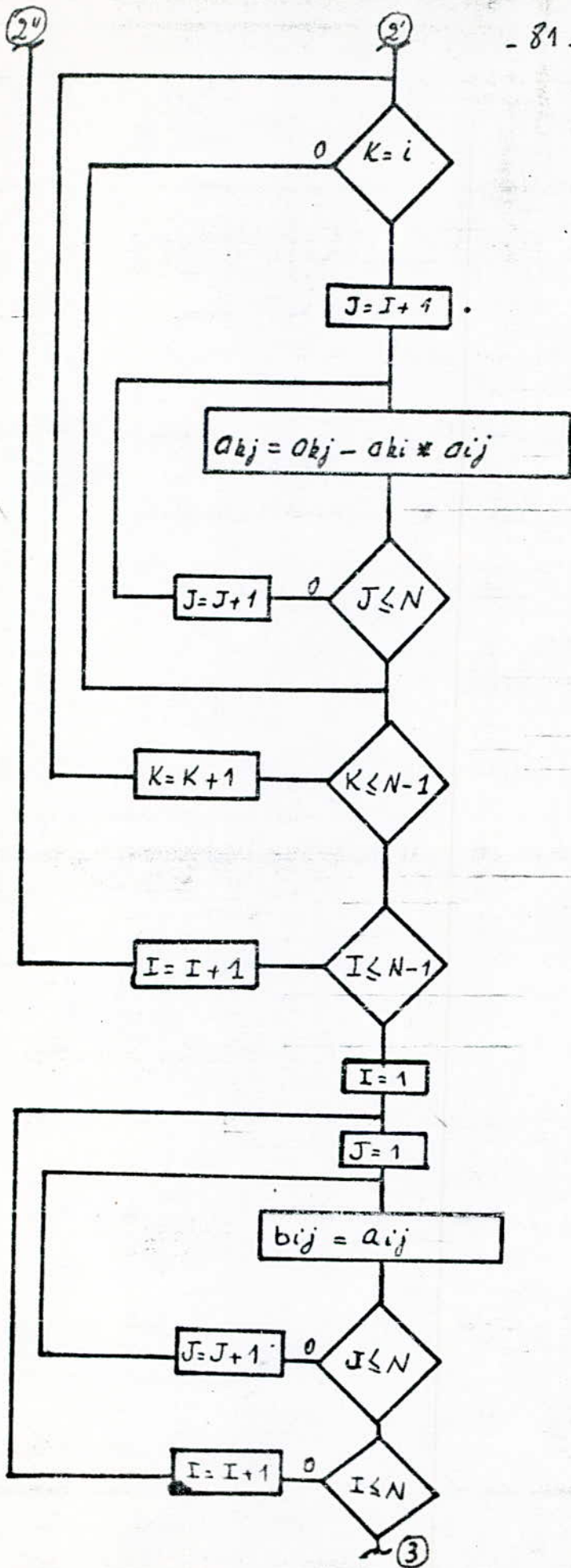
D'où

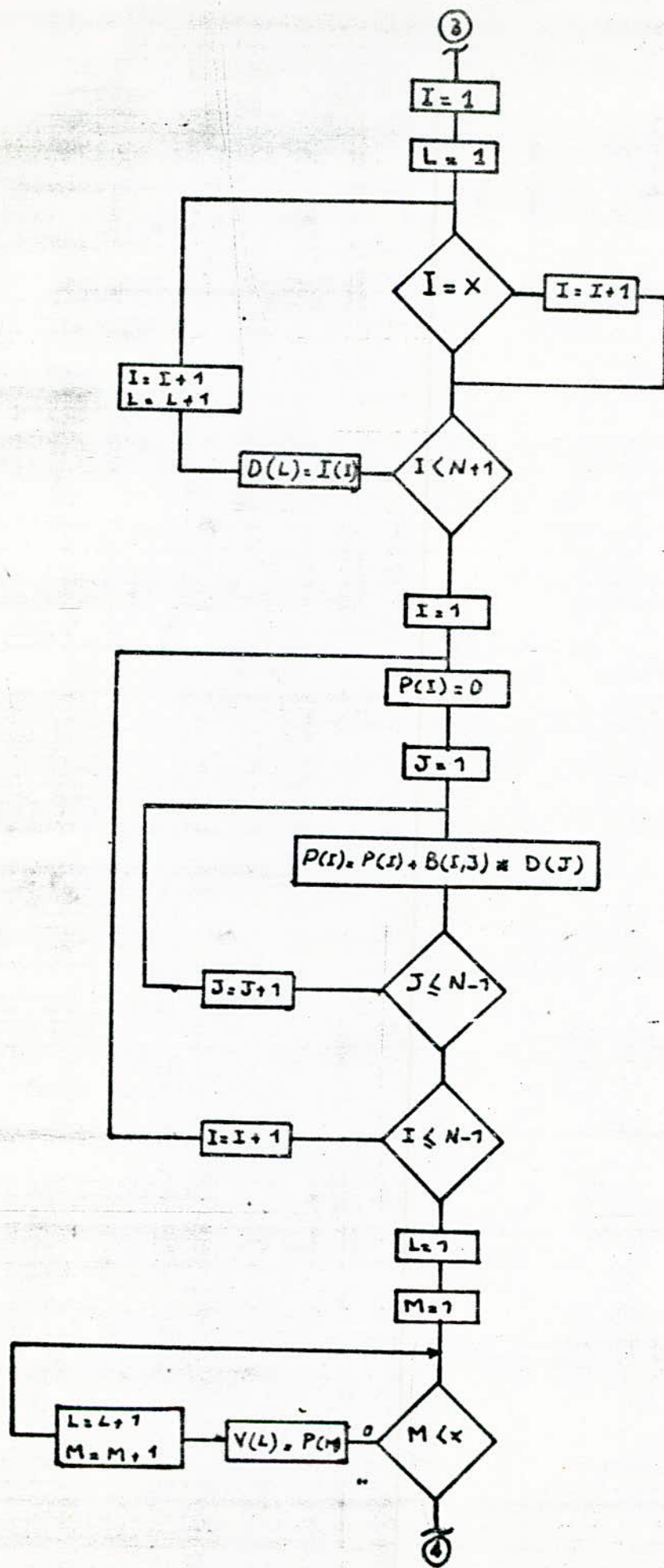
$$I_{cc}(k) = -I_k + \sum_{j=1}^n I_{kj}$$

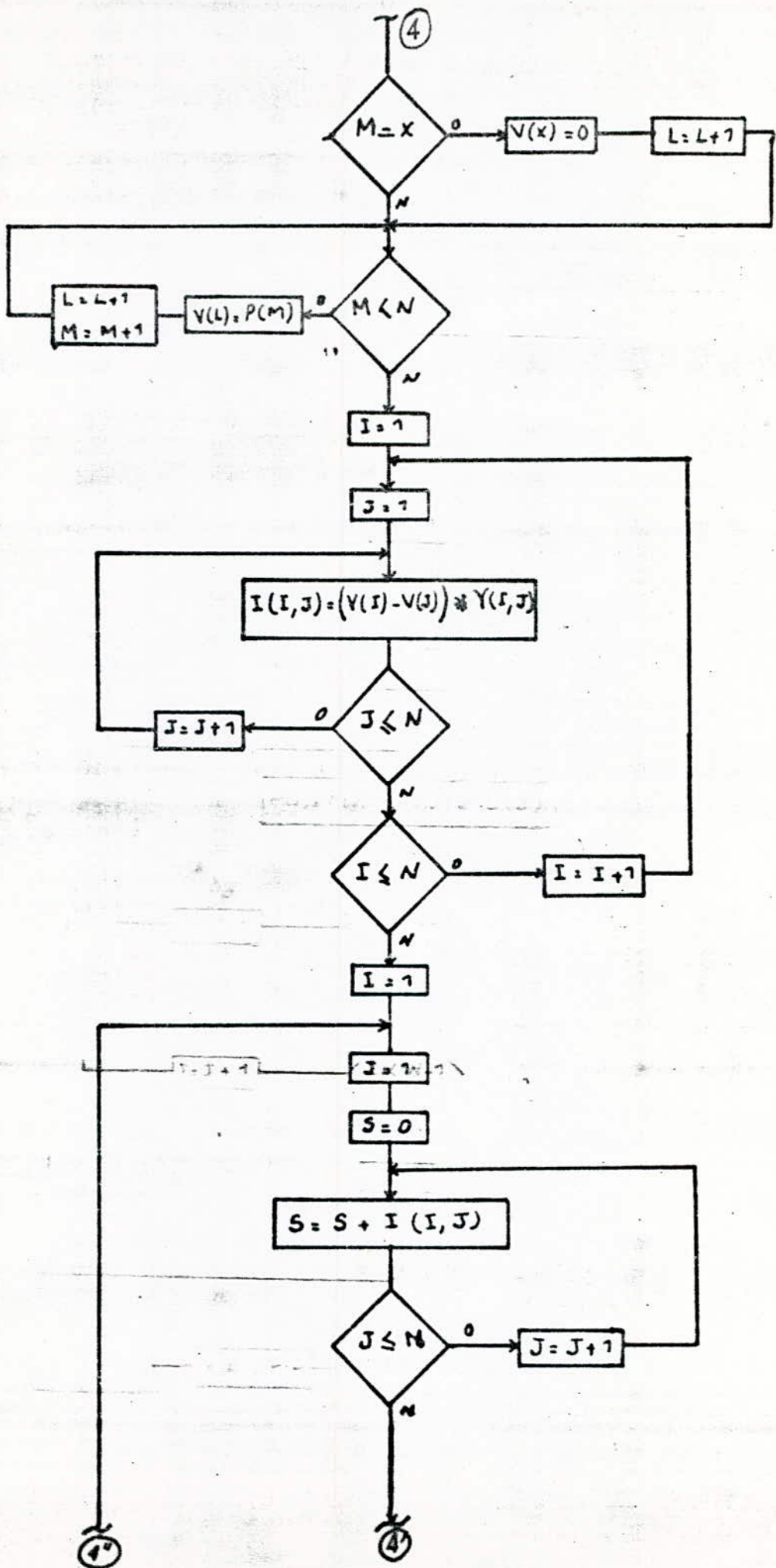
Cette méthode est la mieux adaptée car elle permet d'aller à un ordre supérieur.

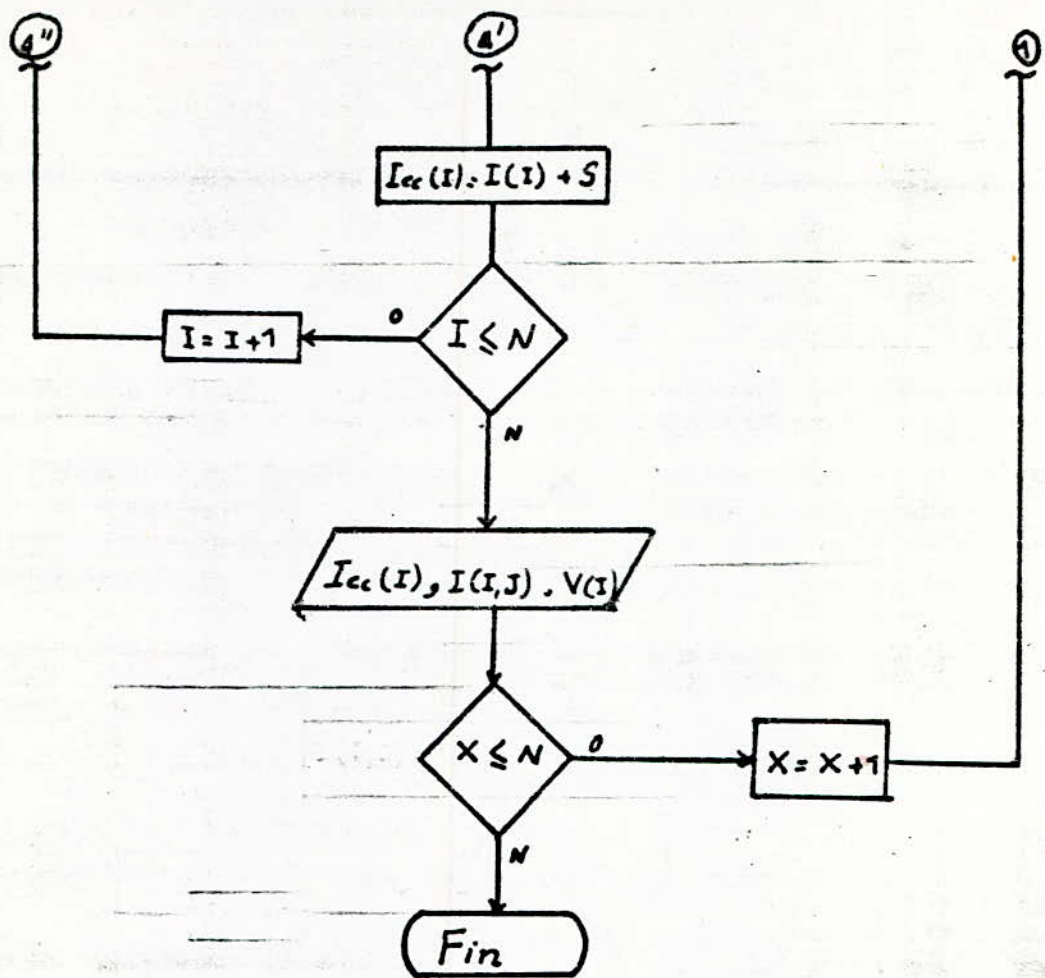












J = 1



-85-

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \\ I_7 \\ I_8 \\ I_9 \\ I_{10} \\ I_{11} \\ I_{12} \\ I_{13} \\ I_{14} \\ I_{15} \\ I_{16} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 107.52 & -69.29 & 0 & -35.97 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -69.29 & 252.59 & -3.11 & -161.94 & 0 & 0 & 0 & -18.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -3.11 & 42.35 & 0 & -28.25 & 0 & 0 & 0 & -10.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -35.97 & -161.94 & 0 & 224.91 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -27 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -28.25 & 0 & 48.12 & -234 & 0 & 0 & 0 & -17.53 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -234 & 20.13 & -3.19 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.60 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.19 & 21.38 & 0 & 0 & -9.06 & 0 & 0 & 0 & -5.25 & 0 & 0 \\ 0 & -18.25 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 118.14 & 0 & 0 & -98.22 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -10.99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 22.94 & -11.95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -17.53 & 0 & -9.06 & 0 & -11.95 & 58.18 & 0 & -4.16 & 0 & -13.08 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -98.22 & 0 & 0 & 173.93 & -69.32 & 0 & 0 & -3.44 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -27 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -4.16 & -69.32 & 153.36 & -20.64 & 0 & 0 & -32.14 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -14.60 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -20.64 & -59.71 & -3.15 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.25 & 0 & 0 & -13.08 & 0 & 0 & -3.15 & 23.75 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.44 & 0 & 0 & 0 & 28.44 & -25 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -32.14 & 0 & 0 & -25 & 59.18 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \\ V_5 \\ V_6 \\ V_7 \\ V_8 \\ V_9 \\ V_{10} \\ V_{11} \\ V_{12} \\ V_{13} \\ V_{14} \\ V_{15} \\ V_{16} \end{bmatrix}$$

Tableau des courants
de lignes maximums.

Courants	P.U	A
I2.1	5.9	851
I4.1	3.4	491
I3.2	1.84	265
I4.2	5.12	739
I8.2	3.64	525
I5.3	4.48	1175
I3.9	2.94	771
I12.4	5.74	828
I10.5	5.25	1378
I5.6	1.21	174
I7.6	1.8	260
I7.14	2.06	541
I8.11	8.43	1217
I9.10	4.68	1228
I10.12	2.12	306
I14.10	4.29	1126
I12.11	6.84	935
I11.15	1.57	227
I13.12	6.61	954
I12.16	8.12	1172
I13.14	1.64	237
I15.16	6.92	999
I10.7	3.35	878

Tableau des courants
de lignes minimums.

Courant	p.u	A
I ₁₂	0.522	75.34
I ₄₁	0.002	0.28
I ₃₂	0.152	21.93
I ₄₂	0.051	7.36
I ₈₂	0.032	4.61
I ₅₃	0.034	8.92
I _{3.9}	0.190	49.86
I _{12.4}	0.074	10.68
I _{10.5}	0.107	15.44
I _{5.6}	0.423	111.00
I _{7.6}	0.030	4.33
I _{3.14}	0.707	102.04
I _{8.11}	0.0280	7.34
I _{9.10}	0.088	23.09
I _{10.12}	0.014	2.02
I _{14.10}	0.190	49.86
I _{12.11}	0.085	12.26
I _{11.15}	0.032	8.39
I _{13.12}	0.117	16.88
I _{12.16}	0.005	0.71
I _{13.14}	0.565	81.55
I _{15.16}	0.714	103.05
I _{10.7}	0.286	41.28.

$I_{cc} (p.u.)$	$I_{cc} (kA)$	$S_{cc} (MVA)$
11.569	1.67	1157
12.247	1.77	1225
8.429	2.22	843
12.255	1.77	1225
9.065	2.38	906
8.339	1.21	834
10.615	2.79	1061
12.933	1.87	1293
7.626	2.00	762
11.924	3.13	1192
13.655	1.98	1365
14.147	2.04	1415
11.372	1.64	1137
10.274	2.69	1027
8.500	2.23	850
11.341	1.63	1134

Tableau des courants de court-circuit dans les seize jeux de barres.

Alternateur	I (pA)	I (A)
G ₁	2.26	325
G ₂	1.67	241
G ₃	3.03	437
G ₄	1.17	169
G ₅	1.17	169
G ₆	2.30	603
G ₇	1.32	109
G ₈	1.93	506
G ₉	1.93	506
G ₁₀	2.27	596

```

9  open 'fich2.dat' for output as file # 1
10 DIM A(15,15),b(15,15),c(16),v(16),w(16,16),va(15),d(15)
11 dim i(16,16)
20 MAT read w
50 data 107.52,-69.29,0,-35.97,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0
60 DATA -69.29,252.59,-3.11,-161.94,0,0,0,-18.25,0,0,0,0,0,0,0,0
70 data 0,-3.11,42.35,0,-28.25,0,0,0,-10.99,0,0,0,0,0,0,0
80 data -35.97,-161.94,0,224.91,0,0,0,0,0,0,0,-27,0,0,0,0
81 DATA 0,0,-28.25,0,48.12,-2.34,0,0,0,-17.53,0,0,0,0,0,0
82 DATA 0,0,0,0,-2.34,20.13,-3.19,0,0,0,0,0,-14.60,0,0,0
83 DATA 0,0,0,0,0,-3.19,21.38,0,0,-9.06,0,0,0,-5.25,0,0
84 DATA 0,-18.25,0,0,0,0,0,118.14,0,0,-98.22,0,0,0,0,0
85 DATA 0,0,-10.99,0,0,0,0,0,22.94,-11.95,0,0,0,0,0
86 DATA 0,0,0,0,-17.53,0,-9.06,0,-11.95,58.18,0,-4.26,0,-13.08,0,0
87 DATA 0,0,0,0,0,0,0,-98.22,0,0,173.93,-69.32,0,0,-3.44,0
88 DATA 0,0,0,-27,0,0,0,0,0,-4.26,-69.32,153.36,-20.64,0,0,-32.14
89 DATA 0,0,0,0,0,-14.60,0,0,0,0,0,-20.64,39.71,-3.15,0,0
90 DATA 0,0,0,0,0,0,-5.25,0,0,-13.08,0,0,-3.15,23.75,0,0
91 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-3.44,0,0,0,28.44,-25
92 DATA 0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,-32.14,0,0,-25,59.48
93 for x%=1% to 16%
96 rem
97
110 l=1
120 i=1
130 j=1
140 m=1
150 if i=x% goto 300
160 if j=x% goto 310
170 if j<17 goto 280
180 if i<16 goto 191
190 goto 320
191 l=L+1
261 I=I+1
270 goto 130
280 if l=16 then 190
281 A(l,m)=w(i,j)
282 j=j+1
283 m=m+1
290 GOTO 150
300 i=i+1
301 goto 160
310 j=j+1
311 goto 170
320 mat b=inv(A)
321 rem lecture des courants initiaux
589 mat read c
590 Data 2.26,0,0,0,0,0,3.88,1.667,0,2.304,2.9489,0,1.324,2.273,0,1.
599 mat print c;
600 i=1
601 l=1
602 if i=x% then 609
603 if i<17 then 605
604 goto 611
605 d(l)=c(i)
606 i=i+1

```

2.3
2.3

```
607 l=l+1
608 GOTO 602
609 i=i+1
610 goto 603
611 rem produit
612 mat print d;
613 print 'x%=';x%
630 FOR i%=1% to 15%
640 va(i%)=0
650 for j%=1% to 15%
660 va(i%)=va(i%)+b(i%,j%)*d(j%)
661 next j%
662 next i%
663 n=1
790 m=1
800 if m<x% then 840
810 if m=x% then 880
820 if m<16 then 840
830 goto 920
840 v(n)=va(m)
850 n=n+1
860 m=m+1
870 goto 800
880 v(x%)=0
890 n=n+1
910 goto 820
920 rem affichage des v(i)
990 print #1,"LES TENSIONS DANS LES BUS lors du c c du jdb :";x%
991 mat print #1, v;
993 for i%=1% to 16%
994 FOR J%=1% TO 16%
995 i(i%,j%)=(v(i%)-v(j%))*w(i%,j%)
996 next j%
997 next i%
998 print #1,"COURANTS DE LIGNE LORS DU C-C DU BUS :";x%
999 mat print #1,i;
1000 print #1,"*****"
1009 next x%
1010 close #1
1020 end
```

_DUA2:USER.AKROUNEFICH2.DAT;156

4-JAN-19

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 1

v(1) = 0	v(2) = .852077E-01	v(3) = .457207	v(4) = .946822E-01
v(5) = .483041	v(6) = .429586	v(7) = .611989	v(8) = .261251
v(9) = .496069	v(10) = .531809	v(11) = .281432	v(12) = .277647
v(13) = .381164	v(14) = .574428	v(15) = .317992	v(16) = .323022

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	5.90404	0	3.40572	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-5.90404	0	1.15692	1.53432	0	0	0	3.2128	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.15692	0	.729819	0	0	0	.427094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-3.40572	-1.53432	0	0	0	0	0	0	0	0	4.94004	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-7.29819	0	0	-1.25086	0	0	0	.854904	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.125086	0	.581866	0	0	0	0	0	-7.06951	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-5.81866	0	0	0	-7.26427	0	0	0	-1.97192	0	0	0	0	0	0
0	-3.2128	0	0	0	0	0	0	1.98209	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-4.27094	0	0	0	0	0	.427096	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-8.54904	0	.726427	0	-4.27096	0	0	-1.08273	0	.55746	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.98209	0	0	0	-2.262357	0	0	.125766	0	0	0	0	0
0	0	0	-4.94004	0	0	0	0	1.08273	.262357	0	2.1366	0	0	1.45836	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.706951	0	0	0	0	-2.1366	0	.608781	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.197192	0	0	-5.5746	0	0	-6.08781	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.25766	0	0	0	.125767	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.45836	0	0	-1.25767	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(1) = 11.5698 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 2

v(1) = .316166E-01	v(2) = 0	v(3) = .411286	v(4) = .316769E-01
v(5) = .439915	v(6) = .384511	v(7) = .580535	v(8) = .199876
v(9) = .454085	v(10) = .493445	v(11) = .223441	v(12) = .221748
v(13) = .332801	v(14) = .539932	v(15) = .264753	v(16) = .270440

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-2.19072	0	.216944E-02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.19072	0	1.2791	5.12976	0	0	0	3.64774	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.2791	0	.808747	0	0	0	.470354	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
-2.16944E-02	-5.12976	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.13193	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-8.08747	0	0	-1.29644	0	0	0	.938389	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.129644	0	.625318	0	0	0	0	0	-7.54963	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-6.25318	0	0	0	-7.89039	0	0	0	-2.13166	0	0	0	0	0	0
0	-3.64774	0	0	0	0	0	0	0	2.31454	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-4.70354	0	0	0	0	0	0	.470355	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-9.38389	0	.789039	0	-4.70355	0	0	-1.15743	0	.608055	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-2.31454	0	0	0	-1.17343	0	.142123	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-5.13193	0	0	0	0	1.15743	.117343	0	2.29213	0	0	1.56504	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.754963	0	0	0	0	-2.29213	0	.652463	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.213166	0	0	-6.08055	0	0	-6.52463	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.42128	0	0	0	.14213	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.56504	0	0	-1.4213	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(2) = 12.2473 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 3

v(1)= .604376	v(2)= .594673	v(3)= 0	v(4)= .59821
v(5)= .158834	v(6)= .526884	v(7)= .536117	v(8)= .627788
v(9)= .190486	v(10)= .365668	v(11)= .627643	v(12)= .611208
v(13)= .583856	v(14)= .49304	v(15)= .635685	v(16)= .636791

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.67232	0	-.221797	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.67232	0	-1.84943	.572753	0	0	0	0	.60435	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.84943	0	0	4.48705	0	0	0	2.09344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.221797	-.572753	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.350957	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-4.48705	0	0	.861239	0	0	0	3.62581	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.861239	0	.294516E-01	0	0	0	0	0	.831787	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.294516E-01	0	0	0	-1.54426	0	0	0	0	-.226153	0	0	0	0	0
0	-.60435	0	0	0	0	0	0	0	-.142378E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-2.09344	0	0	0	0	0	0	2.09344	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-3.62581	0	1.54426	0	-2.09344	0	0	1.046	0	1.66602	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	.142378E-01	0	0	0	-1.13927	0	0	.276636E-01	0	0	0	0	0
0	0	0	-.350957	0	0	0	0	0	-1.046	1.13927	0	-.564546	0	0	.822244	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.831787	0	0	0	0	0	.564546	0	-.28607	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.226153	0	0	-1.66602	0	0	.28607	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.276636E-01	0	0	0	0	.027664	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.822244	0	0	0	-.027664	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
Icc(3)= 8.42992 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 4

v(1)= .041036	v(2)= .310607E-01	v(3)= .416051	v(4)= 0
v(5)= .442662	v(6)= .380218	v(7)= .579901	v(8)= .203195
v(9)= .456594	v(10)= .493881	v(11)= .221662	v(12)= .212928
v(13)= .326581	v(14)= .539207	v(15)= .257771	v(16)= .26274

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.691193	0	-1.47607	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.691193	0	1.19732	-5.02997	0	0	0	0	3.14145	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1.19732	0	0	.75175	0	0	0	.445571	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.47607	5.02997	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.74905	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.75175	0	0	-.146118	0	0	0	.897867	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	.146118	0	.63699	0	0	0	0	0	-.783107	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.63699	0	0	-.779349	0	0	0	0	-.213645	0	0	0	0	0	0
0	-3.14145	0	0	0	0	0	0	0	1.81379	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.445571	0	0	0	0	0	.44557	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.897867	0	.779349	0	-.44557	0	0	-1.19686	0	.59287	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	-1.81379	0	0	0	-1.60543	0	0	.124218	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-5.74905	0	0	0	0	0	1.19686	.60543	0	2.34579	0	0	1.60097	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.783107	0	0	0	0	-2.34579	0	.669773	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.213645	0	0	-.59287	0	0	-.669773	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.124218	0	0	0	.124218	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.60097	0	0	-.124218

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
Icc(4)= 12.2551 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 5

v(1)= .594759 v(2)= .585273 v(3)= .953561E-01 v(4)= .58757
v(5)= 0 v(6)= .477352 v(7)= .488227 v(8)= .612358
v(9)= .201832 v(10)= .299754 v(11)= .61083 v(12)= .591773
v(13)= .551483 v(14)= .441859 v(15)= .617819 v(16)= .61378

-----COURANTS DE LIGNE-----

0 -.657282 0 -.25857 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
.657282 0 -1.52364 .372051 0 0 0 .404307 0 0 0 0 0 0 0 0
0 1.52364 0 0 -2.69381 0 0 0 1.17017 0 0 0 0 0 0 0
.25857 -.372051 0 0 0 0 0 0 0 0 0 .113475 0 0 0 0
0 0 2.69381 0 0 1.117 0 0 0 5.25469 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 -1.117 0 .346904E-01 0 0 0 0 0 1.08231 0 0 0
0 0 0 0 0 -.346904E-01 0 0 0 -1.70756 0 0 0 -.243431 0 0
0 -.494307 0 0 0 0 0 0 0 -.150047 0 0 0 0 0 0
0 0 -1.17017 0 0 0 0 0 0 1.17017 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 -5.25469 0 1.70756 0 -1.17017 0 0 1.244 0 1.85873 0 0
0 0 0 0 0 0 .150047 0 0 0 -1.32106 0 0 .240397E-01 0
0 0 0 -.113475 0 0 0 0 -1.244 1.32106 0 -.831586 0 0 .868014
0 0 0 0 0 -1.08231 0 0 0 0 .831586 0 -.345316 0 0
0 0 0 0 0 0 .243431 0 0 -1.85873 0 0 .345316 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 -.240397E-01 0 0 0 0 .02404
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -0.868014 0 0 -.02404 0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----

Icc(5)= 9.0655 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 6

v(1)= .588775 v(2)= .580852 v(3)= .532042 v(4)= .578199
v(5)= .519342 v(6)= 0 v(7)= .565147 v(8)= .582629
v(9)= .550877 v(10)= .568199 v(11)= .575894 v(12)= .548198
v(13)= .364437 v(14)= .581896 v(15)= .578291 v(16)= .578621

-----COURANTS DE LIGNE-----

0 -.548965 0 -.380404 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
.548965 0 -.151798 -.429608 0 0 0 .324356E-01 0 0 0 0 0 0 0 0
0 .151798 0 0 -.358792 0 0 0 .206993 0 0 0 0 0 0 0
.380404 .429608 0 0 0 0 0 0 0 0 -.81002 0 0 0 0
0 0 .358792 0 0 -1.21526 0 0 0 .856464 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1.21526 0 1.80282 0 0 0 0 5.32078 0 0 0
0 0 0 0 -1.80282 0 0 0 .2765E-01 0 0 0 .979352E-01 0 0
0 -.324356E-01 0 0 0 0 0 0 -.661573 0 0 0 0 0 0
0 0 -.206993 0 0 0 0 0 .206994 0 0 0 0 0 0
0 0 0 -.856464 0 -.2765E-01 0 -.206994 0 0 -.8520E-01 0 .1792 0 0
0 0 0 0 0 0 .661573 0 0 0 -1.91984 0 0 .824671E-02 0
0 0 0 .81002 0 0 0 0 .8520E-01 1.91984 0 -3.79284 0 0 .977777
0 0 0 0 0 -5.32078 0 0 0 0 3.79284 0 .684997 0 0
0 0 0 0 0 0 -.879352E-01 0 0 -1.792 0 0 -.684997 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 -.824671E-02 0 0 0 0 .82463E-02
0 0 0 0 0 0 0 0 0 -.977777 0 0 -.82463E-02 0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----

Icc(6)= 8.33885 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D R : 9

v(1) = .667705	v(2) = .659962	v(3) = .267667	v(4) = .661742
v(5) = .328609	v(6) = .589223	v(7) = .563352	v(8) = .681624
v(9) = 0	v(10) = .39203	v(11) = .680266	v(12) = .664472
v(13) = .636645	v(14) = .520581	v(15) = .685904	v(16) = .68668

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.5365	0	-.214494	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.5365	0	-1.22004	.288201	0	0	0	.395328	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.22004	0	0	1.72162	0	0	0	-2.94166	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.214494	-.288201	0	0	0	0	0	0	0	0	0	.73709E-01	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-1.72162	0	0	.609837	0	0	0	1.11178	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.609837	0	-.825286E-01	0	0	0	0	0	.692365	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	.825286E-01	0	0	0	-1.55217	0	0	0	0	0	-.224549	0	0	0	0	0
0	-.395328	0	0	0	0	0	0	0	-.133357	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2.94166	0	0	0	0	0	0	4.68476	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1.11178	0	1.55217	0	-4.68476	0	0	1.1606	0	1.68144	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.133357	0	0	0	-1.09487	0	0	.193945E-01	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-.73709E-01	0	0	0	0	0	-1.1606	1.09487	0	-.57433	0	0	.713772	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.692365	0	0	0	0	.5743	0	-.365603	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.224549	0	0	-1.68144	0	0	.365603	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.193945E-01	0	0	0	0	.193954E-01	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.713772	0	0	-.193954E-01	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----

Icc(9) = 7.62642 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D R : 10

v(1) = .517125	v(2) = .506505	v(3) = .102453	v(4) = .507244
v(5) = .787337E-01	v(6) = .382211	v(7) = .292557	v(8) = .528481
v(9) = .490827E-01	v(10) = 0	v(11) = .524578	v(12) = .498512
v(13) = .450439	v(14) = .220118	v(15) = .531017	v(16) = .531902

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.735876	0	-.355431	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.735876	0	-1.2566	.119661	0	0	0	.401066	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	1.2566	0	0	-.670065	0	0	0	-.586538	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.355431	-.119661	0	0	0	0	0	0	0	0	-.235769	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	.670065	0	.710137	0	0	0	-1.3802	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.710137	0	-.285995	0	0	0	0	0	.996132	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	.285995	0	0	0	-2.65057	0	0	0	-.380304	0	0	0	0	0	0	0
0	-.401066	0	0	0	0	0	0	0	-.383373	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	.586538	0	0	0	0	0	0	-.586538	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.3802	0	2.65057	0	.586538	0	0	2.12366	0	2.87915	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.383373	0	0	-1.80691	0	0	.221503E-01	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.235769	0	0	0	0	-2.12366	1.80691	0	-.992223	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.996132	0	0	0	0	.992223	0	-.725511	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.380304	0	0	-2.87915	0	0	.725511	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.221503E-01	0	0	0	0	.221491E-01	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.0732	0	0	-.221491E-01	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----

Icc(10) = 11.9241 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 11

v(1)= .151919	v(2)= .1342	v(3)= .397023	v(4)= .132768
v(5)= .414027	v(6)= .305651	v(7)= .542583	v(8)= .348412E-01
v(9)= .427691	v(10)= .455805	v(11)= 0	v(12)= .986658E-01
v(13)= .236514	v(14)= .498092	v(15)= .129174	v(16)= .146948

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-1.22779	0	-.688876	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.22779	0	.817382	-.231879	0	0	0	0	-1.81329	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-.817382	0	.480347	0	0	0	0	.337035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.688876	.231879	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.920753	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.480347	0	0	-.253599	0	0	0	.733942	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.253599	0	.733942	0	0	0	0	0	0	-1.00941	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.733942	0	0	0	-.785393	0	0	0	-.233577	0	0	0	0	0	0
0	1.81329	0	0	0	0	0	0	0	-3.42211	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.337035	0	0	0	0	0	0	.337035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.733942	0	.785393	0	-.337035	0	0	-1.52179	0	.551938	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	3.42211	0	0	0	6.83952	0	0	.444357	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.920753	0	0	0	0	0	1.52179	-6.83952	0	2.84518	0	0	1.55178	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.00941	0	0	0	0	0	-2.84518	0	.823971	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.233577	0	0	-.551938	0	0	-.823971	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.444357	0	0	0	.444357	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.55178	0	0	-.444357	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(11)= 13.6549 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 12

v(1)= .116631	v(2)= .100948	v(3)= .347585	v(4)= .913379E-01
v(5)= .363049	v(6)= .233513	v(7)= .49846	v(8)= .846562E-01
v(9)= .377629	v(10)= .40526	v(11)= .660963E-01	v(12)= 0
v(13)= .154863	v(14)= .449623	v(15)= .067526	v(16)= .67723E-01

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-1.08663	0	-.909786	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.08663	0	.767039	-1.55634	0	0	0	0	-.297334	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-.767039	0	.436852	0	0	0	0	.330188	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.909786	1.55634	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.46612	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.436852	0	0	-.303113	0	0	0	.739965	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.303113	0	.845181	0	0	0	0	0	0	-1.14829	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.845181	0	0	0	-.7844395	0	0	0	-.256398	0	0	0	0	0	0
0	.297334	0	0	0	0	0	0	0	-1.82296	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.330188	0	0	0	0	0	0	.330187	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.739965	0	.844395	0	-.330187	0	0	-1.72641	0	.580262	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1.82296	0	0	0	-4.58179	0	0	.49183E-02	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2.46612	0	0	0	0	0	1.72641	4.58179	0	3.19637	0	0	2.17661	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.14829	0	0	0	0	0	-3.19637	0	.928493	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.256398	0	0	-.580262	0	0	0	-.928493	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.49183E-02	0	0	0	0	.491831E-02	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-2.17661	0	0	-.491831E-02	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(12)= 14.1473 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 13

v(1) = .391524	v(2) = .380297	v(3) = .438509	v(4) = .37492
v(5) = .437318	v(6) = .133098	v(7) = .519103	v(8) = .375466
v(9) = .458043	v(10) = .476008	v(11) = .363981	v(12) = .320548
v(13) = 0	v(14) = .472609	v(15) = .366145	v(16) = .366443

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.777909	0	-.597249	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.777909	0	.181038	-.870789	0	0	0	-.881628E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-.181038	0	0	-.336421E-01	0	0	0	.21468	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.597249	.870789	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.46804	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	.336421E-01	0	0	-.711875	0	0	0	0	.678232	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.711875	0	1.23135	0	0	0	0	0	-1.94323	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-1.23135	0	0	0	-.390439	0	0	0	-.244089	0	0	0	0	0	0	0
0	.881628E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.12813	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.214678	0	0	0	0	0	.214681	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.678232	0	.390439	0	-.21468	0	0	-.66226	0	-.44452E-01	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1.12813	0	0	0	-3.01074	0	0	.744715E-02	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.46804	0	0	0	0	.66226	3.01074	0	-6.61611	0	0	1.47508	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.94323	0	0	0	0	6.61611	0	1.48872	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.244089	0	0	.44452E-01	0	0	-1.48872	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.744715E-02	0	0	0	0	.74476E-02	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.47508	0	0	0	-.74476E-02	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL-----

Icc(13) = 11.3721 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 14

v(1) = .621768	v(2) = .613771	v(3) = .381878	v(4) = .61341
v(5) = .367259	v(6) = .484564	v(7) = .392789	v(8) = .626125
v(9) = .353834	v(10) = .328042	v(11) = .622094	v(12) = .60011
v(13) = .523417	v(14) = 0	v(15) = .62626	v(16) = .626833

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.554156	0	-.300657	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.554156	0	-.721185	-.584451E-01	0	0	0	.225467	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	.721185	0	0	-.412979	0	0	0	-.308208	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.300657	.584451E-01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.359098	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	.412979	0	0	.274493	0	0	0	-.687474	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.274493	0	-.292763	0	0	0	0	.567255	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.292763	0	0	0	-.586603	0	0	0	-2.06214	0	0	0	0	0	0
0	-.225467	0	0	0	0	0	0	0	0	-.395908	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	.308208	0	0	0	0	0	0	-.308207	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	.687474	0	.586603	0	.308207	0	0	1.15901	0	-4.29079	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	.395908	0	0	0	-1.52396	0	0	.143292E-01	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.359098	0	0	0	0	-1.15901	1.52396	0	-1.58293	0	0	.858878	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	-.567255	0	0	0	0	1.58293	0	-1.64876	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2.06214	0	0	4.29079	0	0	1.64876	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.143292E-01	0	0	0	.014329	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-.858878	0

-----COURANT DE C-C TOTAL-----

Icc(14) = 10.2747 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 15

v(1) = .498974 v(2) = .489761 v(3) = .632899 v(4) = .485241
 v(5) = .641937 v(6) = .570337 v(7) = .718552 v(8) = .470498
 v(9) = .650173 v(10) = .666059 v(11) = .457947 v(12) = .439836
 v(13) = .526477 v(14) = .691194 v(15) = 0 v(16) = .277006

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.63835	0	-.493966	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.63835	0	.445159	-.731969	0	0	0	0	-.351548	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-.445159	0	0	.255319	0	0	0	.189838	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.493966	.731969	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.22594	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.255319	0	0	-.167545	0	0	0	.422861	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.167545	0	.472807	0	0	0	0	0	0	-.640353	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.472807	0	0	0	-.475583	0	0	0	-.143629	0	0	0	0	0	0	0
0	.351548	0	0	0	0	0	0	0	-1.23282	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.189838	0	0	0	0	0	.189841	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.422861	0	.475583	0	-.189841	0	0	-.963711	0	.328761	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	1.23282	0	0	0	-1.25544	0	0	-1.57534	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	1.22594	0	0	0	.963711	1.25544	0	1.78826	0	0	-5.23335	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.640353	0	0	0	0	-1.78826	0	.518859	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.143629	0	0	-.328761	0	0	-.518859	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1.57534	0	0	0	0	6.92516	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5.23335	0	0	-6.92516	0	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(15) = 8.50049 p.u

LES TENSIONS DANS LES BUS LORS DU CC DANS LE J D B : 16

v(1) = .336351 v(2) = .324391 v(3) = .311507 v(4) = .317693
 v(5) = .523274 v(6) = .427006 v(7) = .6349 v(8) = .30653
 v(9) = .534209 v(10) = .555088 v(11) = .291451 v(12) = .252862
 v(13) = .368338 v(14) = .588402 v(15) = .352529E-01 v(16) = 0

-----COURANTS DE LIGNE-----

0	-.828715	0	-.671136	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.828715	0	.581931	-1.0847	0	0	0	0	-.325959	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-.581931	0	0	.332432	0	0	0	.249501	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
.671136	1.0847	0	0	0	0	0	0	0	0	-1.75583	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.332432	0	0	-.225269	0	0	.557696	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	.225269	0	.631282	0	0	0	0	0	-.856551	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	-.631282	0	0	0	-.632493	0	0	-.191615	0	0	0	0	0	0	0	0
0	.325959	0	0	0	0	0	0	0	-1.48105	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	-.249501	0	0	0	0	0	.249501	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	-.557696	0	.632493	0	-.249501	0	0	-1.28833	0	.435742	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1.48105	0	0	0	-2.68886	0	0	-.881322	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1.75583	0	0	0	0	1.28833	2.68886	0	2.38755	0	0	-8.12056	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.856551	0	0	0	0	-2.38755	0	.693201	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	.191615	0	0	-.435742	0	0	-.693201	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	.881322	0	0	0	0	-.881322	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	8.12056	0	0	.881322	0	0	0	0	0	0	0

-----COURANT DE C-C TOTAL -----
 Icc(16) = 11.3419 p.u

REMARQUE: TOUTES CES VALEURS SONT EXPRIMEES EN VALEURS REDUITES (P.U).

V. INTRODUCTION AUX DISJONCTEURS

Un disjoncteurs, par construction, a pour rôle de séparer dans un fluide deux contacts en cas de défaut. Cette séparation se fait généralement sous tension. Le fluide dans lequel les contacts sont immergés joue deux rôles :

- Eteindre l'arc électrique de coupure entre contacts au début de l'ouverture.
- Isoler de manière adéquate les contacts après ouverture du circuit.

Plusieurs fluide d'isolation sont utilisés pour l'extinction de l'arc. Ils dépendent du régime et du type de disjoncteurs.

Les fluides les plus utilisés sont :

- L'air comprimé : utilisé pour séparer les contacts et le soufflage de l'arc.
- L'huile qui produit de l'hydrogène à l'extinction
- L'hexafluore de soufre.

Les propriétés requises pour les fluides utilisés sont :

- Haute rigidité diélectrique.
- stabilité chimique et thermique.
- Ininflammabilité.
- Haute conductivité thermique.

La conductivité thermique favorise le refroidissement des contacts immergés dans le fluide et facilite le processus d'extinction de l'arc et de déionisation.

Pouvoir d'extinction de l'arc

Quand les contacts viennent juste de s'ouvrir, la résistance entre eux est très faible d'où apparition d'une différence de potentiel. Durant cet instant un fort gradient de potentiel s'installe entre les contacts et provoque une ionisation des particules entre eux. Il est connu que les contacts en cuivre, généralement utilisés dans les disjoncteurs, ont une faible tendance à une ionisation thermique. Ainsi, la température des contacts ne risque pas d'atteindre le point de fusion de ces derniers. Le champ électrique créé par ce gradient de potentiel atteint 10^6 V/cm, ainsi il est clair que l'arc prend naissance à partir de ce champ plutôt qu'à partir d'une ionisation thermique.

Théorie de l'interruption de l'arc

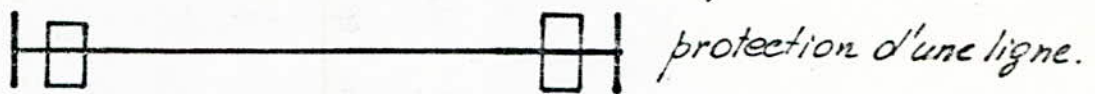
En cas de court-circuit dans un réseau, les relais détectent le défaut et donnent le signal au disjoncteur d'ouvrir le circuit concerné, car le défaut risque de produire des dégâts considérables dans le réseau. L'arc naissant entre les contacts augmente la durée d'ouverture et risque de ce maintenir. D'où, la nécessité d'interrompre l'arc (extinction de l'arc).

- Méthode d'interruption à courant nul.

Cette méthode est utilisée en courant alternatif, car en fréquence industrielle (50Hz), le courant s'annule 100 fois par seconde. Cette propriété est exploitée pour l'interruption du courant. De cette manière le courant ne risque pas d'augmenter après son passage à zéro. Aussi il n'est pas avantageux d'interrompre le courant en d'autres instants (autre que zéro) car cela induit des surtensions dans le circuit.

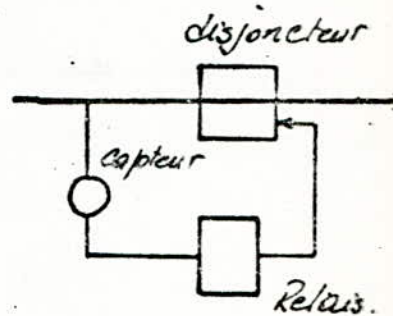
Protection du réseau.

Dans les réseaux de transport d'énergie, la protection s'effectue en amont et en aval des lignes et des transformateurs. Ainsi, on dispose dans un poste de deux protections l'une à l'extrême, l'autre à la sortie comme indiqué ci-dessous :



Installation à disjoncteurs: un disjoncteur est toujours commandé par un relais à travers un capteur.

Les relais sont dimensionnés à partir du courant minimal dans la ligne pendant le court-circuit (Tab. n°1). Cependant les disjoncteurs sont dimensionnés à partir du courant maximal dans la ligne pendant le court-circuit (Tab. n°2).



Pour le dimensionnement des relais et des disjoncteurs les courants des tableaux 1 et 2 doivent être multipliés par une constante correctrice qui dépend du temps de réponse du disjoncteur choisi.

- Réponse du disjoncteur à 8 cycles on multiplie par $K=1$.
- Réponse du disjoncteur à 3 cycles on multiplie par $K=1,2$.
- Réponse du disjoncteur à 2 cycles on multiplie par $K=1,4$.

On prend $K=1,2$.

CONCLUSION

Dans cette étude, il nous a été possible d'approfondir nos connaissances dans le domaine des réseaux de transport d'énergie. Cette étude permet de dimensionner les disjoncteurs, de calibrer les relais et les fusibles. Cela confère au réseau un fonctionnement correct lors des défauts. Les résultats trouvés traduisent l'importance du maillage des réseaux lors des court-circuits et assure l'alimentation de certaines régions même en cas de défauts. La méthode de calcul des courants de court-circuits dépend de la complexité du réseau à étudier. Celle utilisée dans cette étude est la plus appropriée, car elle permet d'aller à un ordre assez grand. Vu les problèmes rencontrés dans la programmation, le langage BASIC n'est pas adapté à ce genre de calcul en raison de sa capacité de calcul relativement faible, cependant le FORTRAN, langage qui nous conseillons, est le plus efficace.

De plus, les résultats trouvés ne donnent qu'un ordre de grandeur des courants réels, de ce fait, ces courants doivent être multipliés par un coefficient de correction qui dépend du temps de réponse du disjoncteur choisi.

Bibliographie.

- Modern Power Systems

John R. Neuenswander.

International Textbook Company - 1971

- Electrical Power Systems

C.L. Wadhwa.

John Wiley and Sons - 1983

- Elements of Power System Analysis

W.D. Stevenson.

International Student company - 1982.

- Installations électriques à haute et basse tension.

A. Mauduit

DUNOD - Paris 1959.