

وزارة التربية الوطنية
MINISTERE DE L'EDUCATION NATIONALE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT

Genie Electrique

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

*Etude et Analyse de la
stabilité transitoire des réseaux
électrique en présence
des défauts non symétrique.*

Proposé par :
BENSENOUCI A

Etudié par :
Y. MECHERI
M. BEZZI

Dirigé par
BENSENOUCI A

PROMOTION
1994



: GENIE ELECTRIQUE

*Etude et analyse de la
stabilité transitoire des reseaux
electriques en présence de
défauts non symetriques .*

A. BENSENOUCI

Y. MECHERI
H. BEZZI

A. BENSENOUCI

JUIN 1994

DEDICACES

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Je dédie ce modeste travail à :

- *MES PARENTS;*
- *MES FRERES;*
- *MA SOEUR ;*
- *TOUTE LA FAMILLE*
- *MES AMIS:*

ABDELHAFIDH, MOHAMED, AHMED, ALI

- *TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.*

Y.MECHERI

Je dédie ce modeste travail à :

- *MES PARENTS;*
- *TOUTE LA FAMILLE*
- *MES AMIS, EN PARTICULIER CHOUAIB;*
- *TOUS CEUX QUI ME SONT CHERS.*

A.E.H BEZZI

REMERCIEMENTS

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE - المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

Nous tenons à remercier les membres du jury pour avoir accepté de juger notre travail, Monsieur A.BENSENOUCI pour nous avoir suivi et diriger tout au long de l'élaboration de ce travail.

Nos remerciements vont également à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Nous remercions vivement toutes les personnes qui nous ont aidé de près ou de loin par leurs contributions matériels et leur soutien moral.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE I: MODELISATION DES DEFAUTS,.....	3
I.1 MODELE TRIPHASE.....	3
I.2 COMPOSANTES SYMETRIQUES.....	3
I.3 MODELISATION DES COMPOSANTS DU RESEAU PAR LA TRANSFORMATION DES COMPOSANTES SYMETRIQUES.....	8
I.3.1 Ligne de transmission.....	8
I.3.2 Machine synchrone.....	11
I.3.3 Modélisation d'un transformateur.....	17
I.4 APPLICATION DE TCS AUX DEFAUTS.....	22
I.5 CALCUL DES GRANDEURS DU RESEAU DANS LE CAS DE DEFAUTS NON SYMETRIQUES.....	48
I.6 EXEMPLE D'APPLICATION	49
CHAPITRE II ETUDE DE LA STABILITE TRANSITOIRE.....	50
II.1 INTRODUCTION.....	50
II.2 MODELISATION DES ELEMENTS DU RESEAU.....	52
II.3 ALGORITHME.....	57
CHAPITRE III INCLUSION DES DEFAUTS NON SYMETRIQUES DANS LES LOGICIELS DE STABILITE TRANSITOIRE.....	58
III.1 INTRODUCTION	58
III.2 MODIFICATION DE Y^+ DUE AU DEFAUTS SHUNTS, SERIE, ET SIMULTANE.....	58
III.2.1 Modification de Y^+ due au défaut shunt.....	58
III.2.2 Modification de Y^+ due au défaut série.....	61
III.2.3 Modification de Y^+ due au défaut simultané...	62
CHAPITRE IV APPLICATIONS ET RESULTATS DE SIMULATION	64
IV.1 RESEAU ETUDIE.....	64
IV.2 DONNEES DU RESEAU.....	65
IV.3 RESULTATS OBTENUS PAR SIMULATION.....	67
IV.3.1 Application des différents types de défauts...	67
IV.3.2 Commentaires et interprétations des résultats.	68
CONCLUSION GENERALE.....	69
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	

INTRODUCTION

INTRODUCTION GENERALE :

La fonction principale d'un réseau électrique est de satisfaire la demande en énergie électrique tout en assurant la continuité de la fourniture d'énergie dans les limites de puissance demandée, et le maintien de la tension et de la fréquence dans les limites correspondant aux besoins des consommateurs, et au bon fonctionnement des réseaux.

Face à une consommation d'électricité qui ne cesse d'augmenter, les réseaux électriques ont tendance à s'accroître et deviennent de plus en plus maillés et interconnectés. Cette complexité de structure pose des problèmes sérieux aux exploitants des réseaux électriques en présence des défauts.

Les réseaux électriques ne sont pas toujours saints, ils sont le siège d'incidents et de perturbations prévisibles et non prévisibles, dus au déséquilibre production-consommation à la suite d'une perte importante de la production, ou d'une variation de la charge (un excès de production causant une élévation de la fréquence, par contre l'excès de la charge cause une baisse de fréquence), en plus de ces perturbations, des défauts (courts-circuits, ouverture de lignes, .., etc), peuvent survenir sur le réseau. Ces derniers ont des conséquences néfastes (les courants de courts-circuits peuvent atteindre dix fois les courants nominaux) [1], s'ils ne sont pas éliminés par les dispositifs de protection dans des délais adéquats.

Dans le cas du déséquilibre production-consommation, et si les réserves tournantes dans le système et les possibilités d'importer de l'énergie des réseaux voisins n'arrivent pas à rétablir l'équilibre, et si encore tous les moyens ont été épuisés, à ce moment le recours au délestage est une solution nécessaire.

L'apparition des défauts dans un réseau d'énergie électrique, nous amène à l'étude de la stabilité transitoire, non seulement des défauts symétriques (triphasés), mais aussi, des défauts non symétriques qui peuvent survenir sur le réseau où l'étude de leur influence s'avère primordiale.

Les défauts (symétriques et non symétriques) peuvent être du type shunt, série ou simultané. Les défauts shunts résultent d'une connexion des phases du réseau entre elles et le noeud de référence

à travers une impédance nulle ou de valeur finie. Ces défauts peuvent apparaître sur les jeux de barre monophasé-terre, biphasé-isolé, biphasé-terre, et triphasé.

Les défauts séries résultent de l'ouverture des phases d'une ligne par l'effet du déclenchement du disjuncteur, sont rencontrés dans les trois cas suivants : une ligne ouverte, deux lignes ouvertes, trois lignes ouvertes.

Les défauts simultanés résultent de l'apparition simultanée des défauts shunts et séries.

L'étude des défauts non symétriques est d'une importance primordiale pour les exploitants des réseaux électriques, à cause de leurs fréquences élevées et pour une meilleure gestion des neutres. Cette étude nous permet de dimensionner le matériel constituant les postes, essentiellement les disjoncteurs. Ainsi, la détermination de la temporisation à afficher au niveau des protections, est une tâche fondamentale.

Un certain nombre de méthodologies de prise en compte des défauts non symétriques dans les logiciels d'analyse de la stabilité transitoire sont mentionnées dans la littérature. Nous pouvons citer les méthodes matricielles, les méthodes basées sur les topologies des réseaux et celles basées sur la résolution des trois réseaux (direct, inverse, et homopolaire), .., etc [7].

Dans ce mémoire, on s'intéressera à l'étude des défauts non symétriques et leur influence sur la stabilité des réseaux électriques.

Dans le chapitre I, nous présentons la modélisation des composants du réseau et les défauts par la transformation des composantes symétriques.

Le chapitre II est consacré au problème de la stabilité transitoire.

Dans le chapitre III, nous abordons l'implémentation des défauts non symétriques dans les logiciels d'analyse de la stabilité transitoire basée sur la modification de la matrice directe des admittances.

Dans le chapitre IV, nous présentons les résultats obtenus par intégration numérique des équations du modèle adopté.

CHAPITRE I

MODELISATION

DES

DEFAUTS

I. MODELISATION DES DEFAUTS:

I.1 MODELE TRIPHASE:

La plupart des réseaux électriques sont du type triphasé. le réseau en régime équilibré peut être représenté par un schéma unifilaire où une seule phase est utilisée, le comportement des autres phases se déduit du premier par un décalage angulaire de 120° . Ceci est valable même durant la présence d'un défaut symétrique triphasé.

Quoique les défauts triphasés sont les moins rencontrés mais, les plus étudiés, il existe d'autres conditions où le fonctionnement déséquilibré doit être analysé, dans ce cas, la méthode d'analyse par phase n'est plus valable, par contre le modèle triphasé peut être utilisé mais, vu ses limitations et sa complexité, il est devenue moins attirant.

I.2 COMPOSANTES SYMETRIQUES:

Dans des conditions de fonctionnement déséquilibré, l'approche pratique la plus utilisée est celle basée sur l'utilisation de la transformation des composantes symétriques, laquelle transforme les variables du système de phase (a, b, c) vers un système formé des composantes symétriques dénomées: positif ou direct, négatif ou inverse et homolaire ou zéro (1, 2, 0). Les réseaux ainsi formés, sont indépendants et ne sont connectés qu'aux points de défauts (pour le cas d'un défaut non symétrique).

Les charges ainsi que les lignes de transport peuvent être représenté par des éléments passifs, les machines synchrones sont des sources de tensions, leur fem interne est du type direct (pas de production de fem inverse ou homopolaire). il n'ya aucune puissance résultante de la combinaison des tensions directes avec les courants inverses et homopolaires, et par suite la puissance produite par la machine et la puissance synchronisante entre chaque paire de machine synchrone du réseau sont du type directe.

En conséquence, le réseau direct est d'un intérêt primordial dans l'étude de la stabilité, alors que les autres réseaux (négatifs et zéros) sont d'intérêt secondaire [8].

I.2.1 Transformation des composantes symétriques: (TCS)

Le principal intérêt des composantes symétriques résulte de ce qu'elles permettent de représenter un réseau déséquilibré par trois systèmes (séquences) équilibrés.

a- système direct (positif): Il comporte trois phases égales en module et décalées entre elles de 120° , et possède la même séquence de phase que celui du système réel déséquilibré.

b- système inverse (négatif): Il comporte trois phases égales en module et décalées entre elles d'un angle de 120° , la séquence de phase que possède ce système est inverse par rapport au système réel déséquilibré.

c- système homopolaire (zéro): Ce système comporte trois phases géométriquement parallèle, égales en tension:

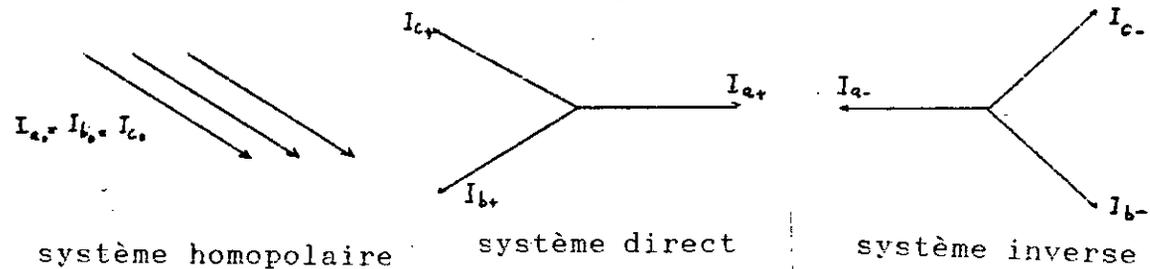


FIG I.1 Représentation vectorielle des composantes symétriques

On définit par I_a, I_b et I_c les courants de phases du système déséquilibré, La détermination de ces courants est donnée par la résolution du système d'équations suivant

$$\begin{aligned}
 I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\
 I_b &= I_{b1} + I_{b2} + I_{b0} \\
 I_c &= I_{c1} + I_{c2} + I_{c0}
 \end{aligned}
 \tag{I .1}$$

Avec:

$$\begin{aligned} I_{b1} &= I_{a1} e^{-j2\frac{\pi}{3}} \\ I_{b2} &= I_{a2} e^{j2\frac{\pi}{3}} \\ I_{c1} &= I_{a1} e^{j2\frac{\pi}{3}} \\ I_{c2} &= I_{a2} e^{-j2\frac{\pi}{3}} \\ I_{a0} &= I_{b0} = I_{c0} \end{aligned}$$

On définit l'opérateur α par le nombre complexe $e^{j2\pi/3}$

$$\begin{aligned} \alpha &= e^{j2\frac{\pi}{3}} = \cos\left(2\frac{\pi}{3}\right) + j\sin\left(2\frac{\pi}{3}\right) = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \alpha^2 &= e^{j4\frac{\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \alpha^3 &= e^{j2\pi} = 1 \end{aligned}$$

Remarque:

$$\begin{aligned} \alpha^2 + \alpha + 1 &= 0 \\ \alpha^2 &= \alpha^* \\ (\alpha^2)^* &= \alpha \end{aligned}$$

En utilisant l'opérateur α et les remarques citées ci-dessus le système d'équations (I.1) devient:

$$\begin{aligned} I_a &= I_{a1} + I_{a2} + I_{a0} \\ I_b &= \alpha^2 I_{a1} + \alpha I_{a2} + I_{a0} \\ I_c &= \alpha I_{a1} + \alpha^2 I_{a2} + I_{a0} \end{aligned} \quad (\text{I.2})$$

On définit la transformation des composantes symétriques par la matrice T et son inverse par la matrice T^{-1}

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \end{bmatrix} \quad T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

T représente donc le passage entre les variables de phases "p" et symétriques "s".

$$I_p = T I_s$$

Avec:

$$\begin{aligned} I_p &= [I_a \ I_b \ I_c]^t \\ I_s &= [I_1 \ I_2 \ I_0]^t \end{aligned} \quad (I .3)$$

De même :

$$\begin{aligned} V_p &= T V_s \\ V_p &= [V_a \ V_b \ V_c]^t \\ V_s &= [V_1 \ V_2 \ V_0]^t \end{aligned} \quad (I .4)$$

Où "v" représente la tension nodale, "I" le courant de ligne et "t" le transposé.

I.2.2 Propriétés de TSC:

En général, dans un réseau électrique (supposé lineaire), on peut écrire :

$$V_p = Z_p I_p \quad (I .5)$$

De (I.1) à (I.5), on peut avoir:

$$V_s = Z_s I_s \quad (I.6)$$

Où

$$Z_s = T^{-1} Z_p T$$

Dans le cas où la matrice admittance du réseau électrique est utilisée, on obtient

$$I_p = Y_p V_p \quad (I.7)$$

$$I_s = Y_s V_s \quad (I.8)$$

Où

$$Y_s = T^{-1} Y_p T$$

Remarque:

L'avantage principal de la transformation des composantes symétriques T est que Zs et Ys sont diagonales, chose qui rend les composantes symétriques (1,2,0) découplées.

I.2.3 Application de TCS sur les équations de puissance:

L'étude et l'analyse du fonctionnement du réseau électrique sont basés sur le calcul de la puissance transmise dans les lignes.

$$S = P + jQ = V_a I_a^* + V_b I_b^* + V_c I_c^* = V_p^t I_p^* \quad (I.9)$$

En écriture matricielle on a:

$$S = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}^t \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}^*$$

En substituant les équations (I.2) et (I.4) dans (I.9), on obtient :

$$S = P + jQ = (T V_B)^t (T I_B)^* = V_B^t T^t T^* I_B^* \quad (I .10)$$

Calculons le produit $T^t T^*$

$$T^t T^* = \begin{bmatrix} 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ \alpha & \alpha^2 & 1 \\ \alpha^2 & \alpha & 1 \end{bmatrix} = 3 \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = 3I \quad (I .11)$$

La formule de la puissance total S devient :

$$S = 3V_B^t I_B^*$$

I.3 MODELISATION DES COMPOSANTS DU RESEAU PAR LA TRANSFORMATION DES COMPOSANTES SYMETRIQUES :

I.3.1 Ligne de transmission :

Considérons une ligne de transmission reliant deux noeuds quelconques du réseau électrique, la ligne est modélisée par une impédance Z_L (La mutuelle inductance des lignes est négligée dans notre étude).

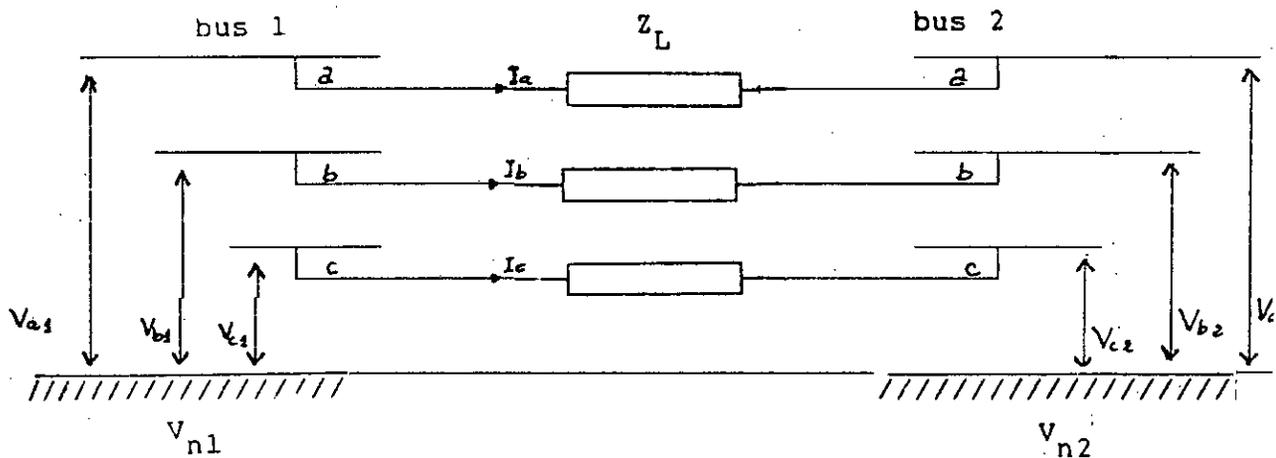


FIG I.2 Modélisation de la ligne de transmission .

En fonctionnement équilibré, la terre constitue une référence équipotentiel $V_{n1} = V_{n2}$. En fonctionnement déséquilibré, les courants et les tensions forment un système déséquilibré, et la somme des trois courants de phases est égal au courant de neutre I_n .

$$I_a + I_b + I_c - I_n \quad (I.13)$$

Ce courant provoque une chute de tension dans la terre à travers une impédance Z_n de neutre, et la terre ne devient plus une référence équipotentielle.

Les équations modélisant la ligne de transmission sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_{a1} \\ V_{b1} \\ V_{c1} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} V_{a2} \\ V_{b2} \\ V_{c2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_1 + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_1 + Z_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (I.14)$$

En écriture matricielle on a :

$$\Delta V_p = V_{p1} - V_{p2} = \begin{bmatrix} \Delta V_a \\ \Delta V_b \\ \Delta V_c \end{bmatrix} \quad (I.15)$$

$$\Delta V_p = Z_p I_p$$

avec :

$$V_{p1} = [V_{a1} \ V_{b1} \ V_{c1}]^t$$

$$V_{p2} = [V_{a2} \ V_{b2} \ V_{c2}]^t$$

$$I_p = [I_a \ I_b \ I_c]^t$$

V_{p1} et V_{p2} sont mesurées par rapport à la tension de référence (neutre).

$$Z_p = \begin{bmatrix} Z_1 + Z_n & Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_1 + Z_n & Z_n \\ Z_n & Z_n & Z_1 + Z_n \end{bmatrix}$$

pour passer aux composantes symétriques ,on fait appel à la matrice inverse T^{-1} à savoir :

$$\begin{aligned} \Delta V_s &= T^{-1} \Delta V_p \\ I_s &= T^{-1} I_p \\ \Delta V_s &= Z_s I_s \end{aligned} \tag{I .16}$$

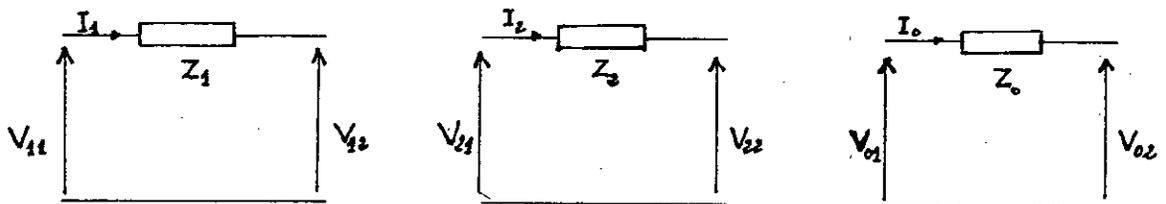
où

$$\begin{aligned} \Delta V_s &= V_{s1} - V_{s2} \\ Z_s &= T^{-1} Z_p T = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_1 & 0 \\ 0 & 0 & Z_1 + 3Z_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix} \end{aligned} \tag{I .17}$$

Les séquences d'impédances sont définis comme suit:

- $Z_1 = Z_1$: impédance directe (positive)
- $Z_2 = Z_1$: impédance inverse (négative)
- $Z_0 = Z_1 + 3Z_n$: impédance homopolaire (zéro)

En conclusion on obtient le circuit équivalent suivant :



$$\begin{aligned} V_{11} - V_{12} &= Z_1 I_1 \\ V_{21} - V_{22} &= Z_2 I_2 \\ V_{01} - V_{02} &= Z_0 I_0 \end{aligned}$$

Fig I.3 Représentation des trois séquences pour une ligne de transmission

I.3.2 Machine synchrone :

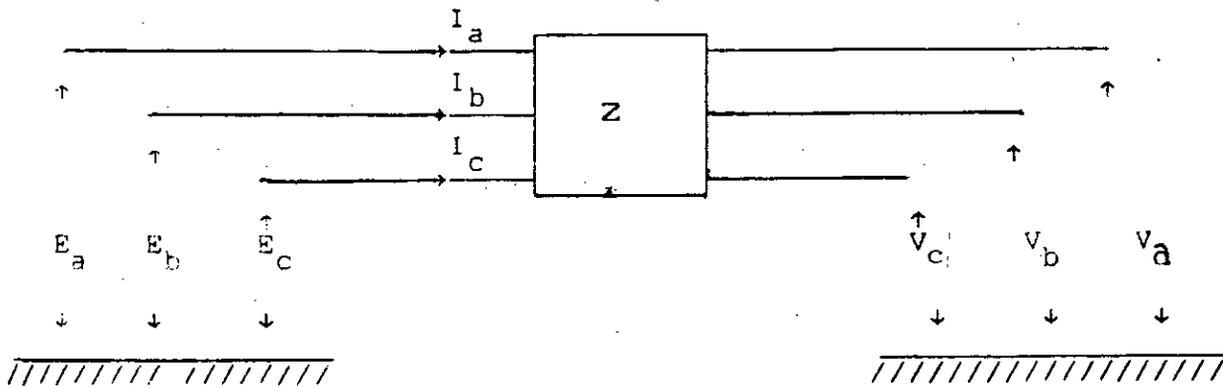


FIG I.4 Modélisation de la machine synchrone .

En régime équilibré, la machine synchrone est modélisée par un système d'équations découplé [1].

Les équations modélisants la machine synchrone sont données par:

$$\begin{aligned} V_a - E_a - jX_d I_a \\ V_b - E_b - jX_d I_b \\ V_c - E_c - jX_d I_c \end{aligned} \quad (I.18)$$

En écriture matricielle on peut écrire:

Où
$$V_p = E_p - Z_p I_p$$

$$E_p = [E_a \ E_b \ E_c]^t$$

$$Z_p = \begin{bmatrix} jX_d & 0 & 0 \\ 0 & jX_d & 0 \\ 0 & 0 & jX_d \end{bmatrix}$$

X_d étant la réactance synchrone de la machine.

En fonctionnement déséquilibré, la matrice Z_p modélisant la machine synchrone présente une forme complexe (matrice non diagonale)

Cette matrice est donnée par:

$$Z_p = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_3 & z_1 & z_2 \\ z_2 & z_3 & z_1 \end{bmatrix}$$

Où les éléments z_1, z_2 et z_3 sont fonctions des paramètres inductances de la machine.

Appliquons la transformation T :

$$TV_s - E_p - Z_p TI_s$$

on obtient :

$$V_s - T^{-1}E_p - T^{-1}Z_p TI_s - T^{-1}E_p - Z_s I_s$$

$$V_s - E_s - Z_s I_s \quad (I .19)$$

où :

$$\begin{aligned} E_s &= [E_1 \ E_2 \ E_0]^t \\ E_s &= T^{-1}E_p \\ Z_s &= T^{-1}Z_p T \end{aligned}$$

$$E_s - T^{-1}E_p = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_a \\ \alpha^2 E_a \\ \alpha E_a \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} E_a(1+\alpha^2+\alpha^3) \\ E_a(1+\alpha^4+\alpha^3) \\ E_a(1+\alpha^2+\alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (I .20)$$

$$Z_s = T^{-1} \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & z_3 \\ z_3 & z_1 & z_2 \\ z_2 & z_3 & z_1 \end{bmatrix} T = \begin{bmatrix} Z_1 & 0 & 0 \\ 0 & Z_2 & 0 \\ 0 & 0 & Z_0 \end{bmatrix}$$

On définit les séquences d'impédances comme suit :

impédance directe (positive) : $Z_1 = z_1 + a^2 z_2 + a z_3$

impédance inverse (négatif) : $Z_2 = z_1 + a z_2 + a^2 z_3$

impédance homopolaire (zéro) : $Z_0 = z_1 + z_2 + z_3$

En conclusion, on obtient le circuit équivalent suivant :

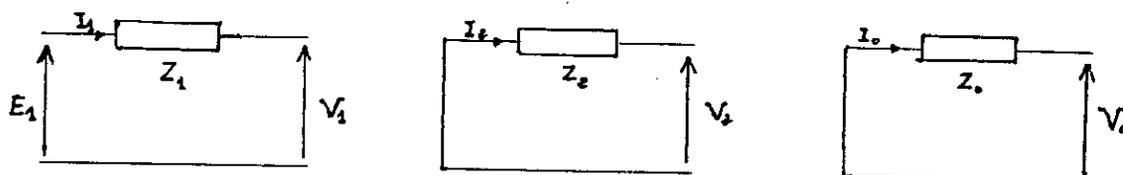


FIG I.5 Représentation des trois séquences pour une machine synchrone.

$$\begin{aligned} E_1 &= V_1 + Z_1 I_1 \\ 0 &= V_2 + Z_2 I_2 \\ 0 &= V_0 + Z_0 I_0 \end{aligned}$$

On remarque que le système obtenu est découplé, et la machine synchrone ne possède qu'une f.e.m directe, les f.e.m inverses et homopolaires sont nulles.

I.3.2.1 Composantes symétriques de ZS de la machine synchrone :

Pour la machine synchrone, toutes les séquences de l'impédance Z_s sont purement réactives.

1-Composantes positives de ZS :

Du comportement de la machine juste après l'apparition du défaut, on distingue trois régimes qui se suivent chronologiquement dans le temps [4].

* Régime subtransitoire : représenté par l'impédance subtransitoire $j X_d'$, à ce moment $Z_1 = j X_d'$ (cas où le 1^{er} cycle après l'apparition du défaut est d'intérêt).

* Régime transitoire : représenté par l'impédance $j X_d$, à ce moment $Z_1 = j X_d$ (cas où les 3 ou 4 premiers cycles après l'apparition du défaut sont d'intérêt).

*Régime Permanent : représenté par l'impédance en régime permanent du défaut et $Z_1 = j X_d$ (cas où le régime permanent est atteint après l'apparition du défaut).

La composante Z_1 de la machine synchrone peut être obtenue expérimentalement et ceci en court-circuitant le stator de la machine en fonctionnement à vide sous une excitation de $E=1p.u$, la mesure du courant pour chaque régime permet de calculer les différentes valeurs de la reactance[1].

$$X_d = \frac{1}{|I_d|} pu$$

$$X'_d = \frac{1}{|I'_d|} pu$$

$$X''_d = \frac{1}{|I''_d|} pu$$

2- Composante négative de Z_s

La composante inverse ou négative de Z_s est généralement déterminée expérimentalement en alimentant la machine par un système de tension inverse acb et en court circuitant le rotor (excitation nulle).

L'impédance inverse Z_2 est donnée par

$$Z_2 = \frac{V_a}{I_a}$$

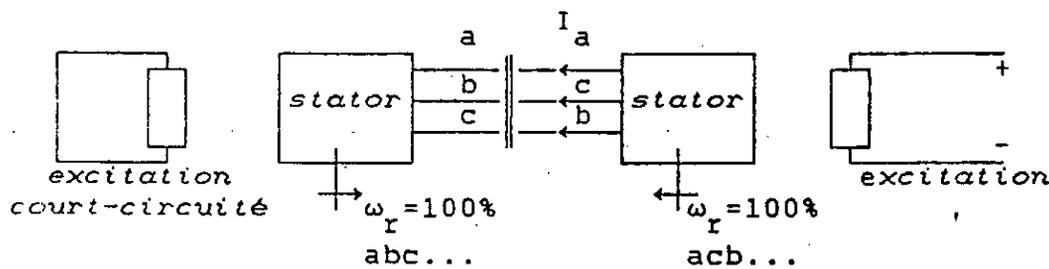


FIG I.6 Schéma illustrant la détermination de Z_2 par essai.

L'impédance négative (inverse) est obtenue en utilisant les équations de PARK [1] et en tenant compte du fait que I_p est triphasé inverse:

$$\begin{aligned}
 i_a &= i_{\max} \cos(\omega t) \\
 i_b &= i_{\max} \cos(\omega t + 120) \\
 i_c &= i_{\max} \cos(\omega t - 120)
 \end{aligned}
 \tag{I.21}$$

L'application de la transformation de Blondel [1] permet d'écrire:

$$\begin{aligned}
 i_d &= i_{\max} \cos(2\omega t) \\
 i_q &= -i_{\max} \sin(2\omega t) \\
 i_o &= 0
 \end{aligned}
 \tag{I.22}$$

Par substitution dans les équations de tensions on obtient:

$$\begin{aligned}
 v_d &= -(x_q - 2x_d') i_{\max} \sin(2\omega t) \\
 v_q &= -(x_d' - 2x_q) i_{\max} \cos(2\omega t)
 \end{aligned}
 \tag{I.23}$$

La transformation inverse de blondel [1] donne:

$$v_a = -\frac{(x_q + x_d)}{2} i_{\max} \cos(\omega t + 90^\circ) - \frac{3}{2} (x_q - x_d) i_{\max} \sin 3\omega t
 \tag{I.24}$$

Si le terme 3ω est négligé on peut prendre:

$$Z_2 = j \frac{x_q + x_d}{2}$$

Les amortisseurs jouent un rôle important, au lieu de sentir X_d (réactance directe transitoire) on sent X_d' (réactance subtransitoire dans l'axe d), et au lieu de sentir X_q (réactance synchrone quadratique), on sent X_q' (réactance subtransitoire dans l'axe q). En conclusion on peut prendre :

$$Z_2 = j \frac{X''_q + X''_d}{2}$$

3-Composante homopolaire de Z_s :

La composante homopolaire ou zéro de Z_s est généralement déterminée en alimentant la machine par un système de tensions égales et en court-circuitant le rotor.

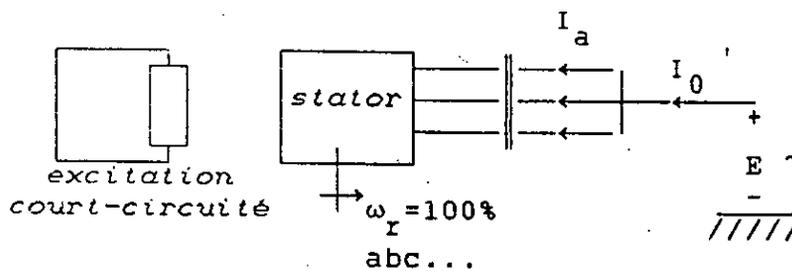


FIG I.7 Schéma illustrant la détermination de Z_0 par essai.

L'impédance homopolaire est donnée par:

$$Z_0 = \frac{E}{I_0} \tag{I.25}$$

Z_0 peut être déterminée analytiquement, en utilisant les équations de PARK et en tenant compte du fait que I_p est monophasé.

$$\begin{aligned} i_a - i_b - i_c &= i_{\max} \cos(\omega t) \\ i_d - i_q &= 0 \\ i_0 &= i_{\max} \cos(\omega t) \end{aligned} \tag{I.26}$$

En substituant dans les équations de tensions, on obtient :

$$\begin{aligned} V_d - V_q &= 0 \\ V_0 &= -L_0 \frac{di_0}{dt} = -L_0 \omega i_{\max} \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{I.27}$$

La transformation inverse de BLONDEL donne :

$$\begin{aligned}
 V_a - V_0 - L_0 \omega i_{\max} \sin(\omega t) - L_0 \omega i_{\max} \cos(\omega t + 90) \\
 V_a - X_0 i_{\max} \cos(\omega t + 90) \\
 Z_0 = jL_0 \omega - jX_0
 \end{aligned}
 \tag{I.28}$$

I.3.3 Modélisation d'un transformateur :

I.3.3.1 Transformateur à deux enroulements :

Le circuit électrique modélisant le transformateur à deux enroulements est donné par la figure I.8

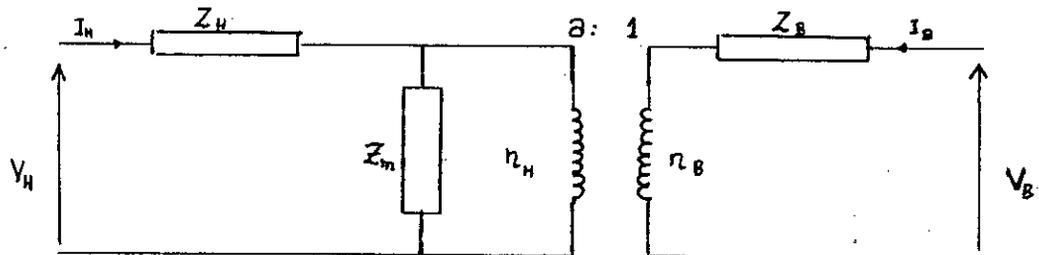


FIG I.8 Schéma électrique d'un transformateur.

- V_H : étant la tension de l'enroulement HT.
- V_B : étant la tension de l'enroulement BT.
- Z_H, Z_B : représentent respectivement l'impédance de fuite des enroulements HT et BT.
- Z_m : étant l'impédance magnétisante.
- a : étant le rapport de transformation.

$$a = \frac{N_H}{N_B}$$

Si on ramène l'impédance de fuite Z_H au secondaire, et en négligeant le courant magnétisant I_m , le circuit électrique devient :

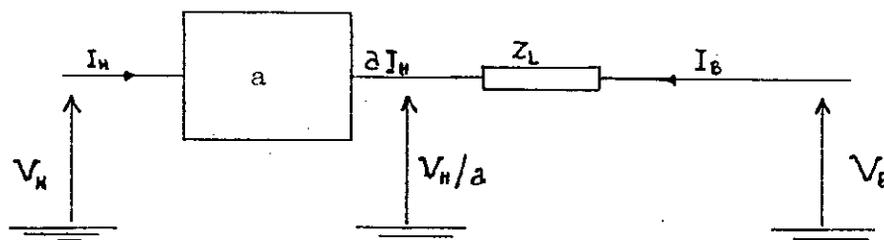


FIG I.9 Schéma équivalent d'un transformateur ramené au secondaire.

Où Z_L : impédance de fuite totale ramenée au secondaire.
 Les équations modélisant un transformateur sont données par:

$$V_1 - Z_L I_1 = V_2 \quad (I.29)$$

Où

$$V_1 = \frac{1}{a} \begin{bmatrix} V_H^a \\ V_H^b \\ V_H^c \end{bmatrix}, \quad I_1 = a \begin{bmatrix} I_H^a \\ I_H^b \\ I_H^c \end{bmatrix}, \quad V_2 = \begin{bmatrix} V_B^a \\ V_B^b \\ V_B^c \end{bmatrix} \quad (I.30)$$

$$Z_L = \begin{bmatrix} Z_L & 0 & 0 \\ 0 & Z_L & 0 \\ 0 & 0 & Z_L \end{bmatrix}$$

Z_L étant la matrice des impédances de fuite.
 Notons que la la matrice Z_L du transformateur est diagonale.

Remarque :

En grandeur réduite (p.u) le circuit électrique modélisant un transformateur couplé en (Y-Y) est donné par la figure I.10.

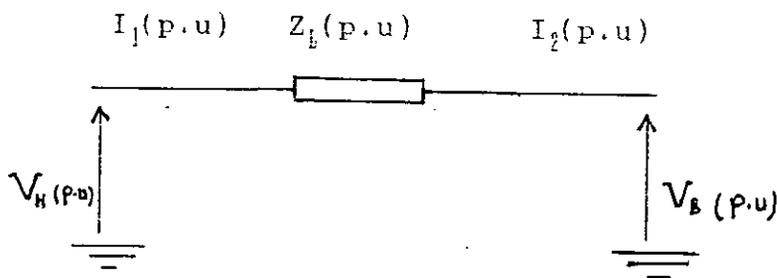


FIG I.10 Schéma équivalent d'un transformateur couplé en Y-Y

I.3.3.A Composantes symétriques de Z_s d'un transformateur :

A.1 Composantes positives et négatives :

Les composantes positives (directes) et négatives (inverses) sont obtenues par un essai en court-circuit.

$$Z_1 - Z_2 - jX_1$$

Où X_1 : est la réactance de fuite (ou de court-circuit du transformateur)

Notons que les composantes Z_1 et Z_2 sont indépendantes du couplage du transformateur.

A-2 Composante homopolaire de Z_s :

La composante homopolaire Z_0 dépend des connexions du primaire et du secondaire du transformateur (Y , Δ , ...).

Expérimentalement, elle est obtenue en alimentant les trois phases de l'un des deux cotés par une même tension sinusoïdale E , et en court-circuitant ou en ouvrant l'autre côté, selon le type de connexion du transformateur [1].

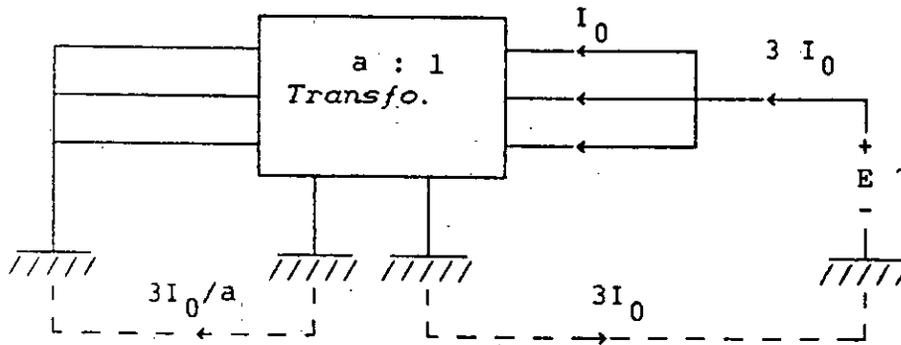


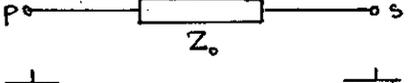
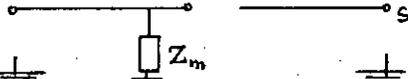
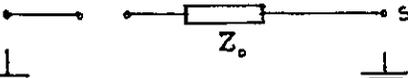
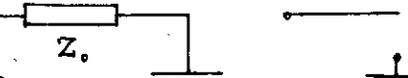
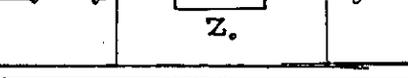
FIG I.11 Schéma illustrant la détermination de Z_0 par essai

Z_0 est donnée par:

$$Z_0 = \frac{E}{I_0}$$

Z_0 peut ou ne peut pas avoir la même valeur en mesurant d'un côté ou d'un autre [1].

La composante homopolaire des différents couplages est donnée par le tableau ci-dessous :

type de connexion		representation homopolaire
P	S	
		
		
		
		
		

I.3.3.2 Transformateur à trois enroulements:

Certains transformateurs utilisés dans les réseaux électriques sont à trois enroulements. La figure I.12 montre la représentation de ce type de transformateurs.

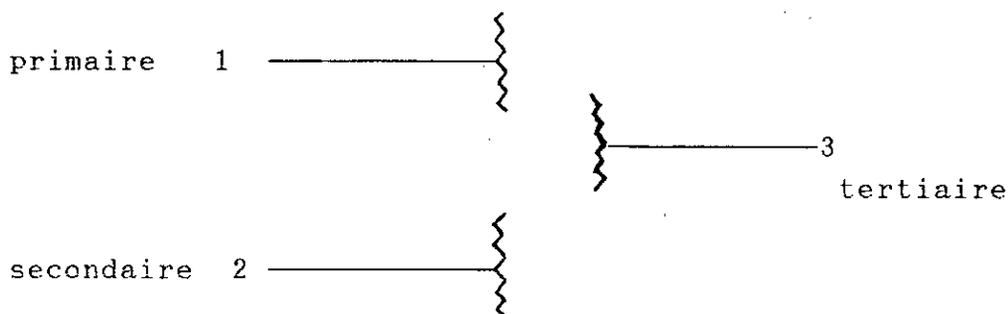


FIG I.12 Représentation d'un transformateur à 3 enroulements

En régime équilibré, ce type de transformateurs est modélisé par un schéma unifilaire contenant trois impédances connectées en étoile comme le montre la figure I.13 [6].

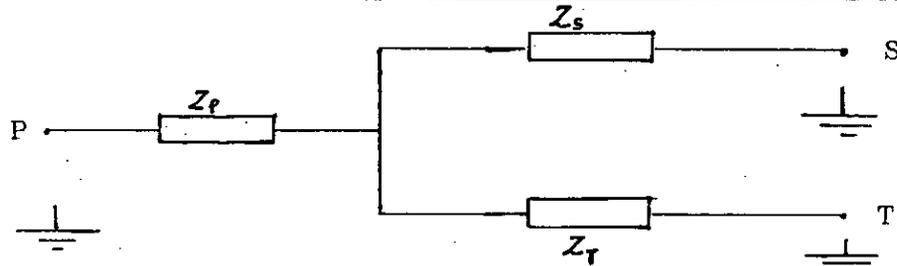


FIG I.13 Schéma unifilaire d'un transformateur à trois enroulements

Les valeurs de Z_p , Z_s , et Z_t sont obtenues en soumettant chaque paire d'enroulement à un essai de court-circuit.

on définit :

Z_{ps} : l'impédance de court-circuit obtenue en alimentant le primaire, en court-circuitant le secondaire et en ouvrant le tertiaire.

Z_{pt} : P : alimenté
T : court-circuité
S : ouvert

Z_{st} : S : alimenté
T : court-circuité
p : ouvert

on a :

$$\begin{aligned} Z_{ps} &= Z_p + Z_s \\ Z_{pt} &= Z_p + Z_t \\ Z_{st} &= Z_s + Z_t \end{aligned}$$

Les impédances Z_p , Z_s et Z_t sont données par :

$$Z_p = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{pt} - Z_{st})$$

$$Z_s = \frac{1}{2} (Z_{ps} + Z_{st} - Z_{pt})$$

$$Z_t = \frac{1}{2} (Z_{pt} + Z_{st} - Z_{ps})$$

Composantes symétriques de Z_s d'un transformateur à trois enroulements :

Le circuit équivalent représentant la composante positive et négative est illustré par la figure I.13.

Quant à la composante homopolaire des différents types de connexion, elle est donnée par le tableau suivant.

type de connexion			représentation homopolaire
P	S	T	

I.4 APPLICATION DE TCS AUX DEFAUTS :

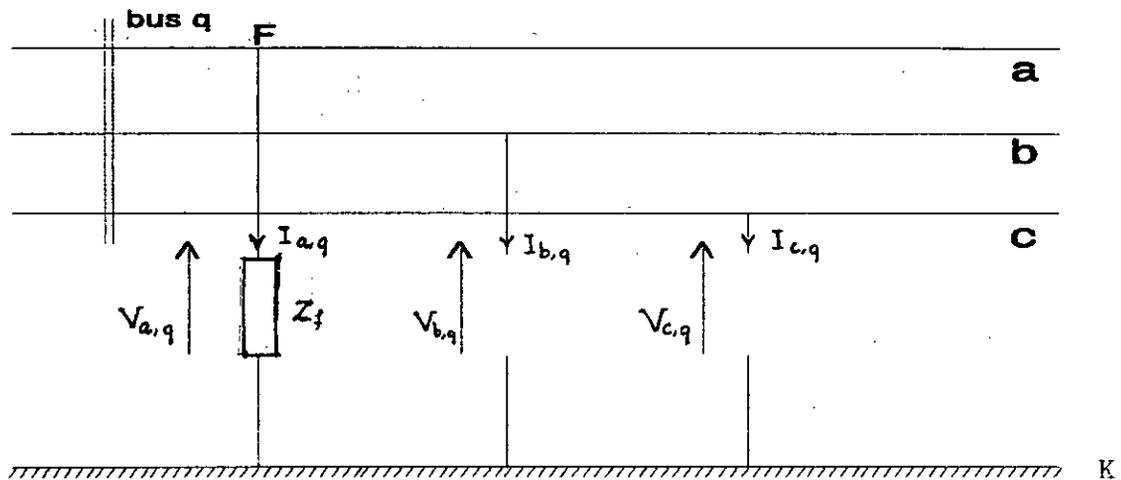
Dans cette partie on présentera les différents types de défauts non symétriques par la méthode des composantes symétriques. Notre objectif est de déterminer les connexions des trois séquences du réseau, pour cela on procède par les étapes suivantes :

- 1 - Etablir un schéma représentant le type de défaut, en mentionnant les noeuds et les phases en défauts.
- 2 - Ecrire les équations caractérisant les conditions de défaut.
- 3 - Appliquer la transformation des composantes symétriques aux conditions de défaut.
- 4 - Etablir le circuit équivalent qui représente l'interconnexion des trois séquences du réseau reflétant les conditions de défaut.

I.4.A DEFAUTS SHUNTS :

1. Défaut phase-terre (SLGF) :

Le court-circuit phase " a " - terre " single line to ground fault " au bus q (jeu de barre q ou noeud q en défaut) peut être schématisé par :



Où Z_f : est l'impédance de court-circuit.

K : étant le noeud de référence (neutre ou terre).

conditions de défaut :

$$\begin{aligned} V_{a,q} &= Z_f I_{a,q} \\ I_{b,q} &= 0 \\ I_{c,q} &= 0 \end{aligned}$$

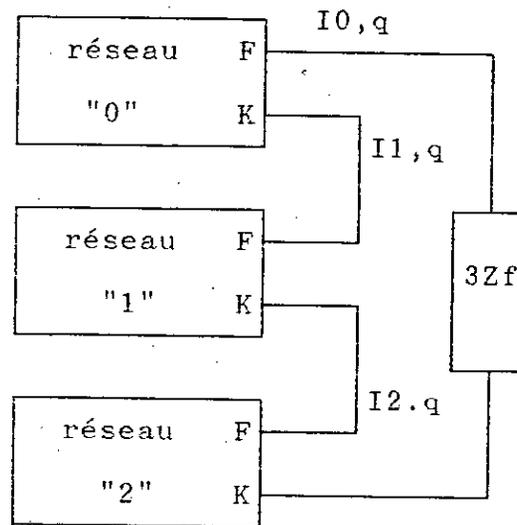
En appliquant la transformation des composantes symétriques T au bus " q ", on obtient :

$$\begin{aligned} V_{a,q} &= Z_f (I_{1,q} + I_{2,q} + I_{0,q}) = V_{1,q} + V_{2,q} + V_{0,q} \\ I_{b,q} = 0 &= \alpha^2 I_{1,q} + \alpha I_{2,q} + I_{0,q} \\ I_{c,q} = 0 &= \alpha I_{1,q} + \alpha^2 I_{2,q} + I_{0,q} \end{aligned}$$

En combinant ces trois dernières équations, on obtient :

$$\begin{aligned} V_{1,q} + V_{2,q} + V_{0,q} &= (3Z_f) I_{0,q} \\ I_{0,q} &= I_{1,q} = I_{2,q} \end{aligned}$$

Le circuit équivalent est alors :



Où F : est le noeud en défaut.

K : est le noeud de référence (neutre ou terre).

Afin de simuler le défaut au noeud q, on doit résoudre simultanément les trois systèmes d'équations (S.1) , (S.2) et (S.3) suivants :

Noeuds sans défaut " i " :

$$\sum_{j=1}^n Y_{0,ij} V_{0,j} = 0$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{1,ij} V_{1,j} - Y_{gi} E_{gi} = 0 \quad (S.1)$$

$$\sum_{j=1}^n Y_{2,ij} V_{2,j} = 0$$

$$i=1,2,\dots,N$$

$i \neq q$

Y_{gi} : L'admittance interne de la machine synchrone.

Noeuds en défaut " q " :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n Y_{0,qj} V_{0,j} + I_{0,q} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{1,qj} V_{1,j} + I_{1,q} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{2,qj} V_{2,j} + I_{2,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.2)$$

conditions de défaut :

$$\begin{aligned} F_1 - I_{0,q} - I_{2,q} &= 0 \\ F_2 - I_{0,q} - I_{1,q} &= 0 \\ F_3 - V_{1,q} + V_{2,q} + V_{0,q} - 3 Z_f I_{0,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

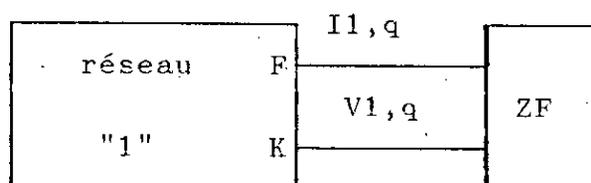
Où N : nombre totale de noeuds du réseau.

Y_0 , Y_1 , Y_2 : matrices admittances homopolaire , directe et inverse.

En d'autres termes, au noeud de défaut q, le circuit direct voit une impédance passive équivalente représentant les circuits " 0 " et " 2 " .

Dans le cas du défaut monophasé, l'impédance équivalente vue par le réseau positif est composée de $Z_{2,qq}$ en série avec ($Z_{0,qq} + 3 Z_f$).

Ainsi, le circuit équivalent devient :

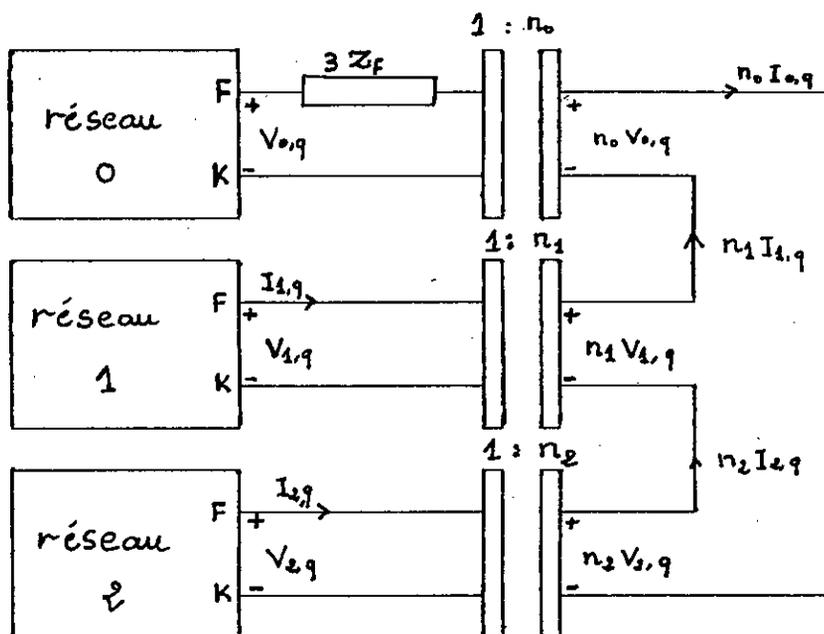


avec :

$$Z_F = Z_{eq} = Z_{0,qq} + Z_{2,qq} + 3 Z_f$$

GENERALISATION :

En résumé le court-circuit phase (a , b ou c) - terre (ou neutre) peut être représenté par le schéma suivant :



Les valeurs des angles de décalage de phases sont données en annexe A.3

Si on tient compte des angles de décalage de phases, l'impédance équivalente vue par le circuit direct au noeud de défaut est la même que celle trouvée dans le cas du défaut SLGF - phase a. Ce résultat est obtenu en utilisant les relations caractérisant le défaut :

$$n_1 V_{1,q} + n_2 V_{2,q} + n_0 V_{0,q} = 0 \quad (1)$$

$$n_1 I_{1,q} - n_2 I_{2,q} - n_0 I_{0,q} \quad (2)$$

de (1) on tire :

$$n_1 V_{1,q} = -(n_2 V_{2,q} + n_0 V_{0,q})$$

Avec :

$$V_{2,q} = -Z_{2,qq} I_{2,q}$$

$$V_{0,q} = -(Z_{0,qq} + 3Z_f) I_{0,q}$$

On obtient :

$$n_1 V_{1,q} - Z_{2,qq} n_2 I_{2,q} + (Z_{0,qq} + 3 Z_f) n_0 I_{0,q}$$

de (2) on peut écrire :

$$\begin{aligned} n_1 V_{1,q} &= (Z_{2,qq} + Z_{0,qq} + 3 Z_f) n_1 I_{1,q} \\ V_{1,q} &= (Z_{2,qq} + Z_{0,qq} + 3 Z_f) I_{1,q} \\ Z_f &= \frac{V_{1,q}}{I_{1,q}} = Z_{2,qq} + Z_{0,qq} + 3 Z_f \end{aligned}$$

REMARQUE :

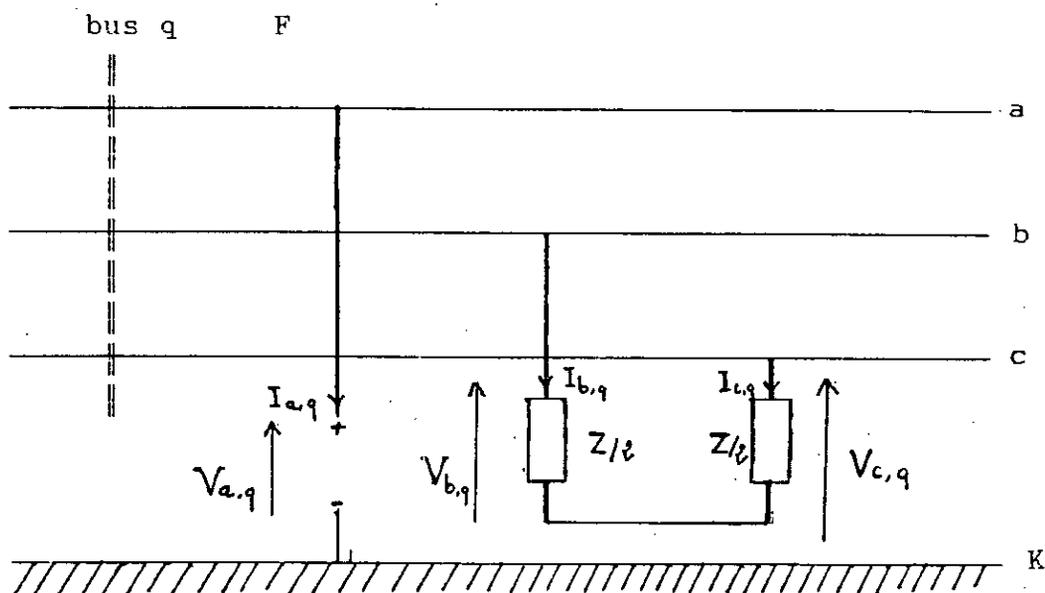
L'impédance Z_f vue par le circuit direct au noeud de défaut ne dépend pas des angles de décalage de phases.

Le système (S.3) devient :

$$\begin{aligned} F_1 - n_0 I_{0,q} - n_2 I_{2,q} &= 0 \\ F_2 - n_0 I_{0,q} - n_1 I_{1,q} &= 0 \\ F_3 - n_1 V_{1,q} + n_2 V_{2,q} + n_0 V_{0,q} - 3 Z_f (n_0 I_{0,q}) &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

2. Défaut phase-phase (LLF) :

Le court-circuit phase " b " - phase " c " à travers l'impédance Z " line to line fault " au bus q peut être schématisé par :



conditions de défaut :

$$\begin{aligned} I_{2,q} &= 0 \\ V_{b,q} &= V_{c,q} + Z I_{b,q} \\ I_{c,q} &= -I_{b,q} \end{aligned}$$

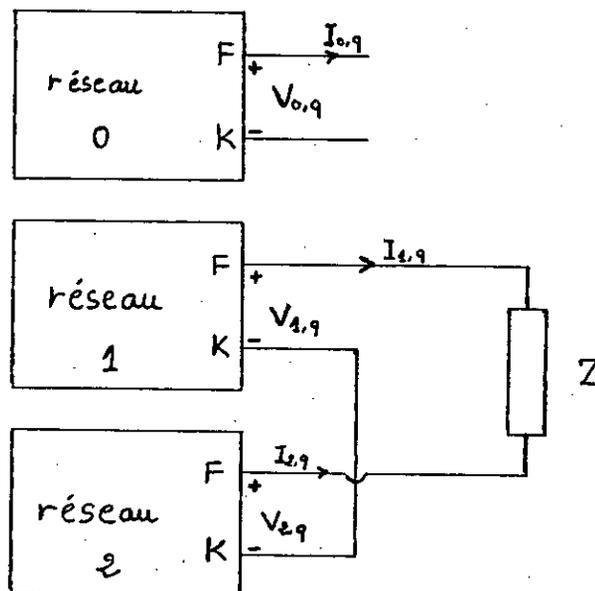
En appliquant la transformation T au bus " q ", on obtient

$$I_{0,q} = 0$$

$$I_{1,q} = -I_{2,q}$$

$$V_{1,q} = V_{2,q} + Z I_{1,q}$$

Le circuit équivalent sera :



pour simuler le défaut LLF, on doit résoudre les systèmes (S.1) et (S.2), en plus du système (S.3) modifié suivant :

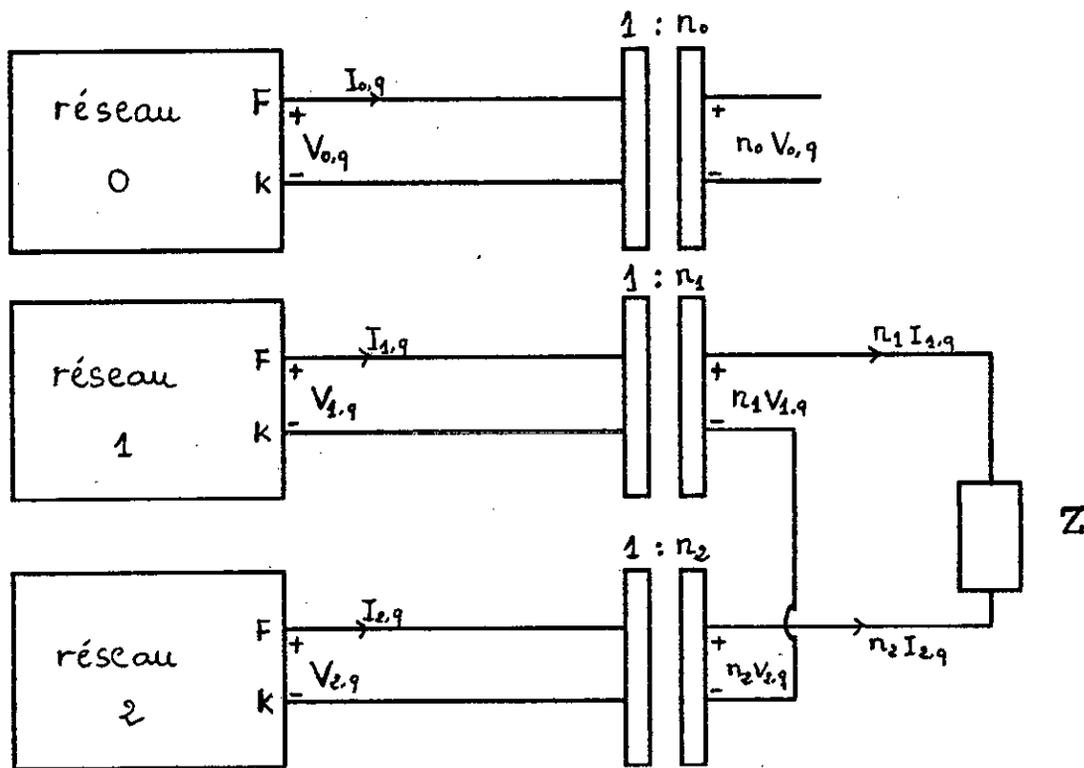
$$\begin{aligned} F_1 - I_{0,q} &= 0 \\ F_2 - I_{1,q} + I_{2,q} &= 0 \\ F_3 - V_{1,q} - V_{2,q} - Z I_{1,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

En d'autres termes, au noeud de défaut q, le circuit direct voit une impédance passive équivalente représentant le circuit " 2 " et l'impédance Z.

Dans le cas du défaut phase - phase, l'impédance équivalente vue par le réseau positif est composée de $Z_{2,qq}$ en série avec Z.

$$Z_F = Z_{0q} + Z_{2,qq} + Z$$

En résumé, le circuit phase - phase "bc", "ca" ou "ab" peut être représenté par le schéma suivant :



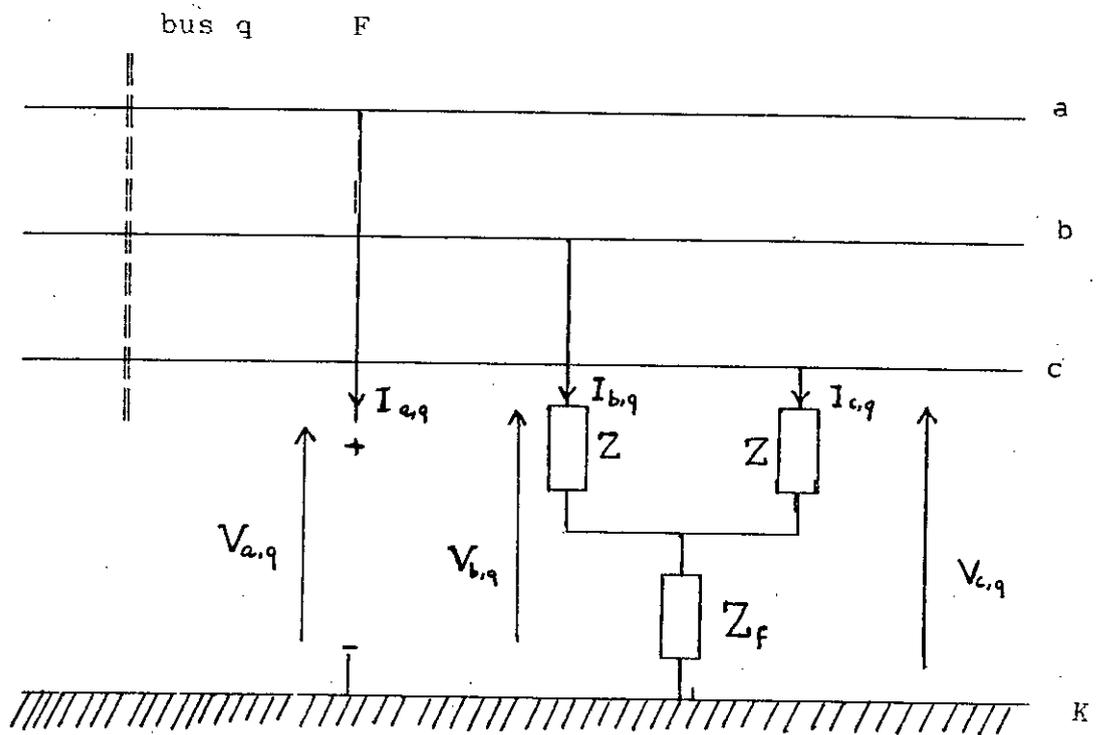
Les valeurs des angles de décalage des phases sont données en annexe A.3.

Ainsi le système (S.3) devient :

$$\begin{aligned} F_1 - n_0 I_{0,q} &= 0 \\ F_2 - n_1 I_{1,q} + n_2 I_{2,q} &= 0 \\ F_3 - n_1 V_{1,q} - n_2 V_{2,q} - Z n_1 I_{1,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

3. Défaut phase -phase-terre (LLGF) :

Le court-circuit phase " b " - phase " c " - terre "line to line to ground fault " LLGF au bus q peut être schématisé par :



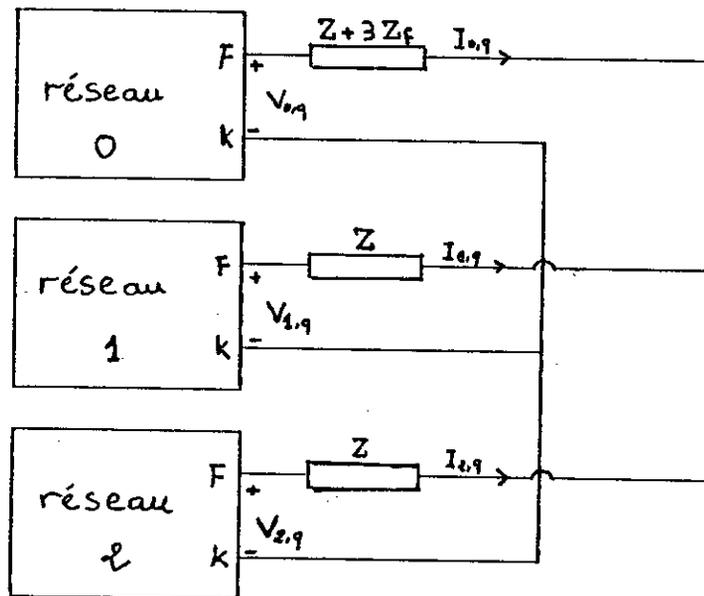
conditions de défaut :

$$\begin{aligned} I_{2,q} &= 0 \\ V_{b,q} - Z I_{b,q} + Z_f (I_{b,q} + I_{c,q}) &= 0 \\ V_{c,q} - Z I_{c,q} + Z_f (I_{b,q} + I_{c,q}) &= 0 \end{aligned}$$

En appliquant la transformation T au bus q, on obtient :

$$\begin{aligned} I_{1,q} + I_{2,q} + I_{0,q} &= 0 \\ V_{1,q} - Z I_{1,q} - V_{2,q} - Z I_{2,q} - V_{0,q} - (Z + 3Z_f) I_{0,q} &= 0 \end{aligned}$$

Le circuit équivalent sera :



Afin de simuler le défaut LLGF, on doit résoudre les systèmes (s.1) et (S.2), en plus du système (S.3) modifié suivant :

$$\begin{aligned} F_1 - I_{1,q} + I_{2,q} + I_{0,q} &= 0 \\ F_2 - (V_{1,q} - Z I_{1,q}) - (V_{2,q} - Z I_{2,q}) &= 0 \\ F_3 - (V_{1,q} - Z I_{1,q}) - (V_{0,q} - (Z + 3Z_f) I_{0,q}) &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

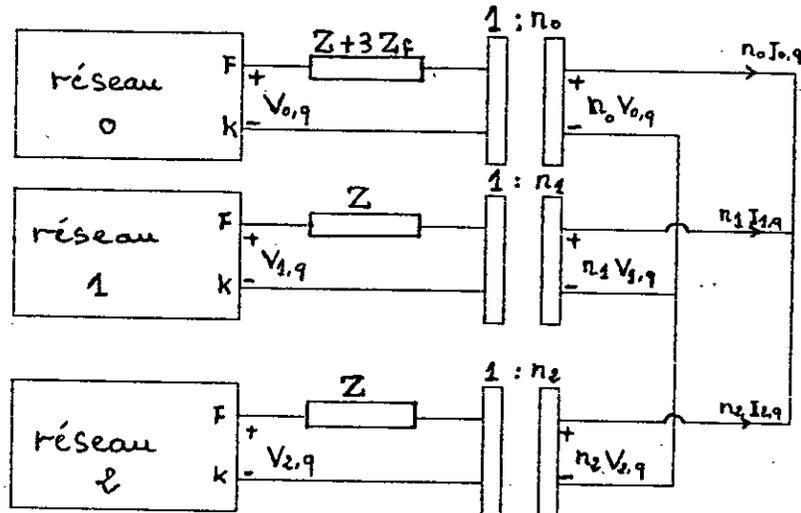
Au noeud de défaut q, le circuit direct voit une impédance passive équivalente représentant les circuits "2" et "0" et les impédances Z_f et Z .

Dans le cas du défaut phase b - phase c - terre, l'impédance équivalente vue par le réseau positif est composée de $(Z_{2,qq} + Z)$ en parallèle avec $(Z_{0,qq} + Z + 3Z_f)$.

Ainsi l'impédance équivalente Z_p est donnée par :

$$Z_{eq} = \frac{(Z_{2,qq} + Z)(Z_{0,qq} + Z + 3Z_f)}{Z_{2,qq} + 2Z + Z_{0,qq} + 3Z_f}$$

En résumé, le court-circuit phase-phase-terre "bc", "ca" ou "ab" peut être représenté par le schéma suivant :



Les valeurs des angles de décalage de phases sont données en annexe A.3

Ainsi le système (S.3) devient :

$$F_1 = n_1 I_{1,q} + n_2 I_{2,q} + n_0 I_{0,q} = 0$$

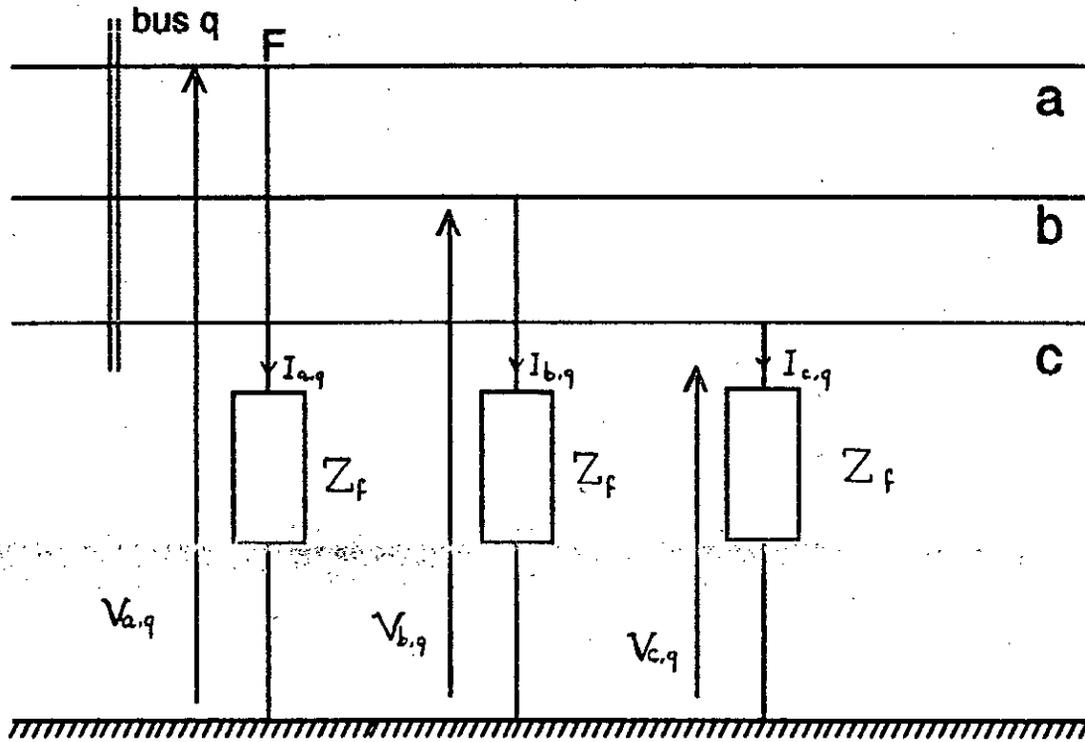
$$F_2 = n_1 (V_{1,q} - Z I_{1,q}) - n_2 (V_{2,q} - Z I_{2,q}) = 0 \tag{S.3}$$

$$F_3 = n_1 (V_{1,q} - Z I_{1,q}) - n_0 (V_{0,q} - (Z + 3Z_f) I_{0,q}) = 0$$

4. Défaut triphasé - terre (3LGF) :

Le court-circuit phase "a" - phase "b" - phase "c" - terre "three line to ground fault" 3LGF, au bus q peut être

shématisé par:



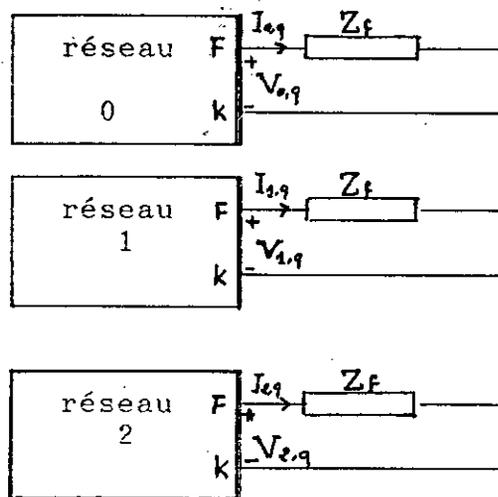
Conditions de défaut :

$$\begin{aligned} V_{a,q} - Z_f I_{a,q} &= 0 \\ V_{b,q} - Z_f I_{b,q} &= 0 \\ V_{c,q} - Z_f I_{c,q} &= 0 \end{aligned}$$

En appliquant la transformation T au bus q , on obtient :

$$\begin{aligned} V_{0,q} - Z_f I_{0,q} &= 0 \\ V_{1,q} - Z_f I_{1,q} - V_{2,q} - Z_f I_{2,q} - V_{0,q} - Z_f I_{0,q} &= 0 \end{aligned}$$

Le circuit équivalent sera :



Afin de simuler le défaut triphasé, on doit résoudre la deuxième équation de (S.1) et (S.2) et l'équation suivante du système (S.3) modifié :

$$F_1 - V_{1,q} - Z_f I_{1,q} = 0 \quad (S.3)$$

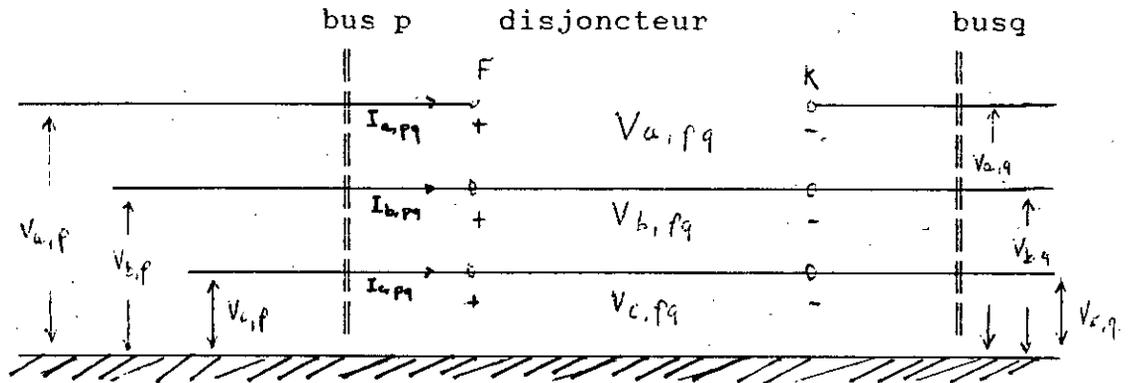
Au noeud de défaut q, le circuit direct voit une impédance passive équivalente représentant l'impédance Z_f .

$$Z_F = Z_{0q} + Z_f$$

I.4.B DEFAUTS SERIES:

1. Ouverture d'une phase (1LO) :

L'ouverture d'une ligne ou phase "one line open ", représente un défaut qui est la conséquence de l'ouverture d'une phase d'un disjoncteur, les deux extrémités de la ligne ouverte sont représentées par deux bus " p=F " et " q=q ", ce défaut peut être schématisé par :



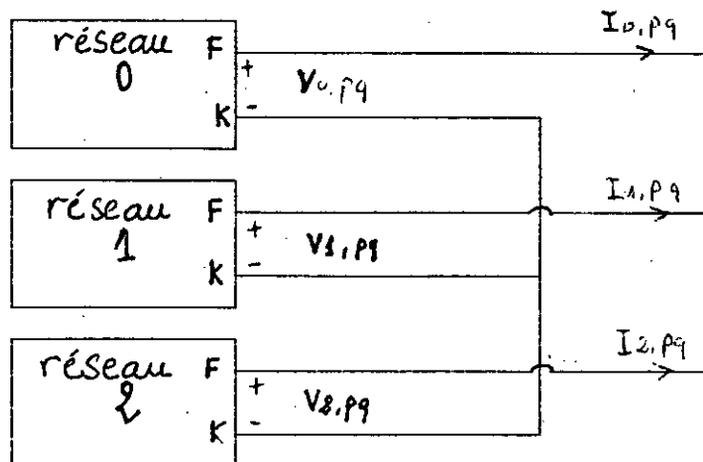
conditions de défaut :

$$I_{a,pq} = 0 \quad V_{b,pq} - V_{b,p} - V_{b,q} = 0 \quad V_{c,pq} - V_{c,p} - V_{c,q} = 0$$

En appliquant la transformation T aux noeuds " p " et " q ", on a :

$$\begin{aligned} V_{1,pq} - V_{2,pq} - V_{0,pq} \\ I_{1,pq} + I_{2,pq} + I_{0,pq} = 0 \\ I_{j,pq} = I_{j,p} = I_{j,q} \\ V_{j,pq} - V_{j,p} - V_{j,q} \quad j=0,1,2 \end{aligned}$$

le circuit équivalent est alors :



où F : est la borne gauche de la phase ouverte du disjoncteur .

K : est la borne droite de la phase ouverte du disjoncteur .

Afin de simuler le défaut aux noeuds p et q, on doit résoudre simultanément les trois systèmes d'équations suivants : (S.1) , (S.2) et (S.3) :

noeud en défaut " p " :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n Y_{0,pj} V_{0,j} + I_{0,p} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{1,pj} V_{1,j} + I_{1,p} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{2,pj} V_{2,j} + I_{2,p} &= 0 \end{aligned} \quad (S.2)$$

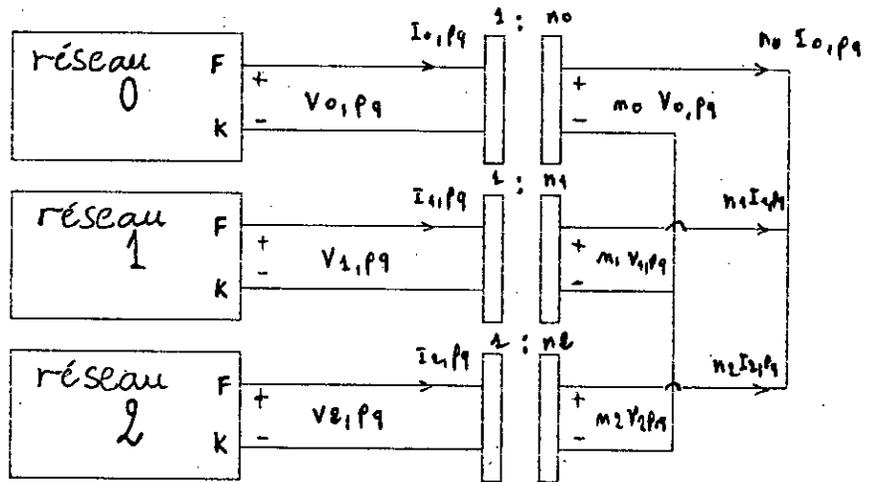
noeud en défaut " q " :

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^n Y_{0,qj} V_{0,j} - I_{0,q} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{1,qj} V_{1,j} - I_{1,q} &= 0 \\ \sum_{j=1}^n Y_{2,qj} V_{2,j} - I_{2,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.2)$$

conditions de défaut :

$$\begin{aligned} F_1 - I_{0,p} + I_{1,p} + I_{2,p} &= 0 \\ F_2 - (V_{1,p} - V_{1,q}) - (V_{0,p} - V_{0,q}) &= 0 \\ F_3 - (V_{1,p} - V_{1,q}) - (V_{2,p} - V_{2,q}) &= 0 \\ F_4 - I_{0,q} + I_{1,q} + I_{2,q} &= 0 \\ F_5 - I_{1,p} - I_{1,q} &= 0 \\ F_6 - I_{2,p} - I_{2,q} &= 0 \end{aligned} \quad (S.3)$$

en résumé ,l'ouverture d'une phase a , b ou c peut être représentée par le schéma suivant :



les valeurs des angles de décalage sont données en annexe A.3

* Le défaut série " 1LO " est caractérisé par une connexion parallèle ,et l'impédance équivalente Z_F vue aux noeuds de défaut p et q par le circuit direct représentant les circuits 0 et 2 est donnéepar :

$$Z_{eq} = Z_F - \frac{Z^0 Z^2}{Z^0 + Z^2}$$

ou

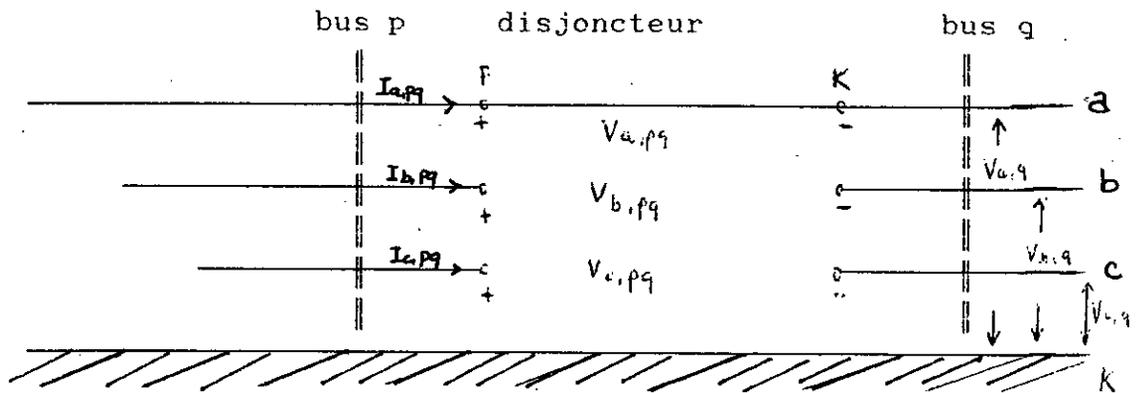
$$Z^0 = Z_{0,pp} + Z_{0,qq} - Z_{0,pq} - Z_{0,qp}$$

$$Z^2 = Z_{2,pp} + Z_{2,qq} - Z_{2,pq} - Z_{2,qp}$$

$Z_{s,pp}, Z_{s,qq}, Z_{s,pq}, Z_{s,qp}$: sont des éléments de la matrice Z_s du réseau de séquence s .

2) OUVERTURE DE DEUX PHASES (2 LO)

L'ouverture de deux lignes ou phases " two ligne - open " (2lo) représente un défaut qui est la conséquence de l'ouverture de deux phases d'un disjoncteur , ce défaut peut être schématisé par :



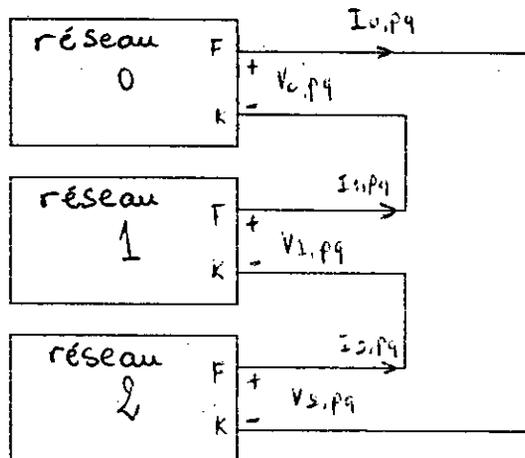
conditions de défaut :

$$\begin{aligned} I_{b,pq} &= 0 \\ I_{c,pq} &= 0 \\ V_{a,pq} &= 0 \end{aligned}$$

En appliquant la transformation T au noeud " p " et " q " , on a :

$$\begin{aligned} V_{1,pq} + V_{2,pq} + V_{0,pq} &= 0 \\ I_{1,pq} - I_{2,pq} - I_{0,pq} &= 0 \\ I_{j,pq} = I_{j,p} = I_{j,q} & \\ V_{j,pq} = V_{j,p} - V_{j,q} & \quad j=0,1,2 \end{aligned}$$

Le circuit équivalent est alors :

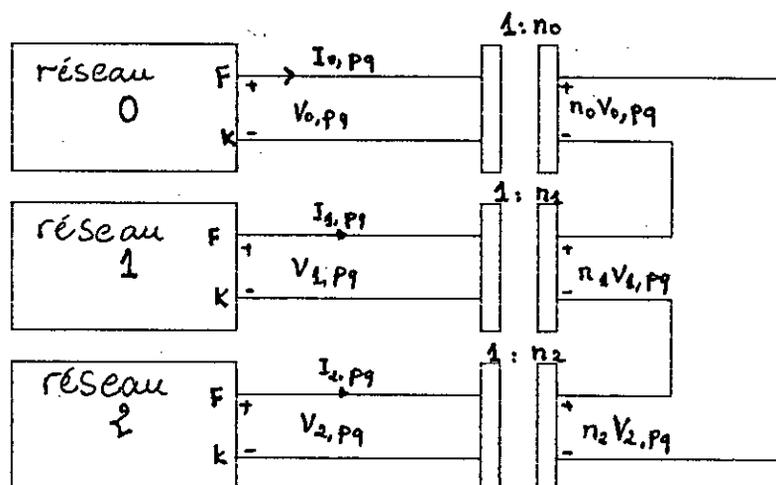


Afin de simuler le défaut aux noeuds p et q , on doit résoudre simultanément les trois systèmes d'équations suivants (S.1) et (S.2) avec (S.3)

modifié suivant :

$$\begin{aligned} F_1 - I_{0,p} - I_{2,p} &= 0 \\ F_2 - I_{0,p} - I_{1,p} &= 0 \\ F_3 - I_{1,p} - I_{1,q} &= 0 \\ F_4 - I_{2,p} - I_{2,q} &= 0 \\ F_5 - I_{0,p} - I_{0,q} &= 0 \\ F_6 - V_{1,pq} + V_{2,pq} + V_{0,pq} &= 0 \end{aligned}$$

En résumé , l'ouverture de deux lignes b et c , c et a ou a et b peut être représentée par le schéma suivant:



Dans le cas de défaut série (2LO) , il s'agit d'un circuit (connexion) série et l'impédance passive équivalente Z_F vu au noeuds de défaut p et q par le circuit direct représentant les circuits 0 et 2 est donnée par :

$$\begin{aligned} Z_{eq} - Z_F &= Z^0 + Z^2 \\ \text{ou} \\ Z^0 &= Z_{0,pp} + Z_{0,qq} - 2 Z_{0,pq} \\ Z^2 &= Z_{2,pp} + Z_{2,qq} - 2 Z_{2,pq} \end{aligned}$$

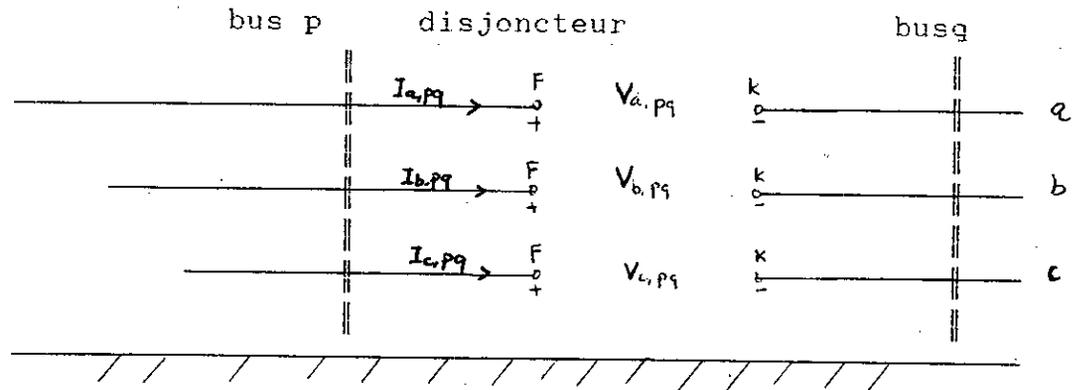
Ce résultat est obtenu en combinant les relations donnant les conditions de défaut .

Les valeurs des angles de décalage sont données en annexe A.3
 En tenant compte des angles de décalage , on aura :

$$\begin{aligned} n_1 V_{1,pq} + n_2 V_{2,pq} + n_0 V_{0,pq} &= 0 \\ n_1 I_{1,pq} - n_2 I_{2,pq} - n_0 I_{0,pq} &= 0 \end{aligned}$$

3 - OUVERTURE DE TROIS PHASES (3LO) :

L'ouverture des trois phases peut être schématisé par :



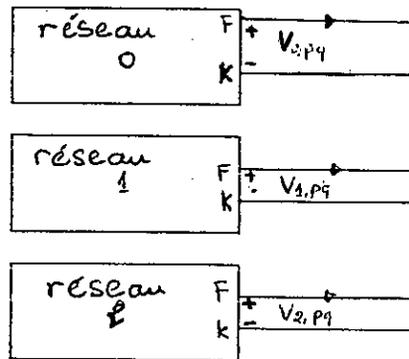
Conditions de défaut :

$$\begin{aligned} I_{a,pq} &= 0 \\ I_{b,pq} &= 0 \\ I_{c,pq} &= 0 \end{aligned}$$

En appliquant la transformation T au noeud " p " et " q " , on obtient :

$$I_{1,pq} - I_{2,pq} - I_{0,pq} = 0$$

Le circuit équivalent est alors :



Afin de simuler le défaut aux noeuds " p " et " q " et vu la non intervention des composantes inverse et homopolaire ,on doit résoudre simultanément que les équations (S.1) et (S.2) avec (S.3) modifié suivant :

$$\begin{aligned} F_j - I_{j,p} &= 0 & j &= 0, 1, 2 \\ F_k - I_{k,q} &= 0 & k &= 0, 1, 2 \end{aligned}$$

Dans le cas défaut série de type (3LO) il s'agit d'un circuit ouvert ,et l'impédance vue par le circuit direct aux noeuds de défaut p et q est l'infini, ainsi $Z_F = \infty$

I.4.C DEFAUTS SIMULTANES :

Les défauts simultanés peuvent résulter de l'apparition de deux ou plusieurs défauts en même temps .Dans notre étude ,on se limitera au cas où seulement deux défauts surviennent simultanément. [6][9][10]

On rencontre les quatre cas suivants :

- 1 - défaut shunt au point F et défaut shunt au point F' .
- 2 - défaut shunt au point F et défaut série aux points F', K' .
- 3 - défaut série aux points F , K et défaut shunt au point F'.
- 4 - défaut série aux points F , K et défaut série aux points F', K' .

En réalité on peut remarquer qu'il existe trois cas, le deuxième et le troisième cas sont traités de la même manière.L'apparition simultanée de deux défauts peut donner naissance à trois types de connexion.

connexion : série - série , connexion : parallèle - parallèle ,
connexion :série - parallèle (ou parallèle - série).

Les différents types de connexion sont résumés dans le tableau suivant :

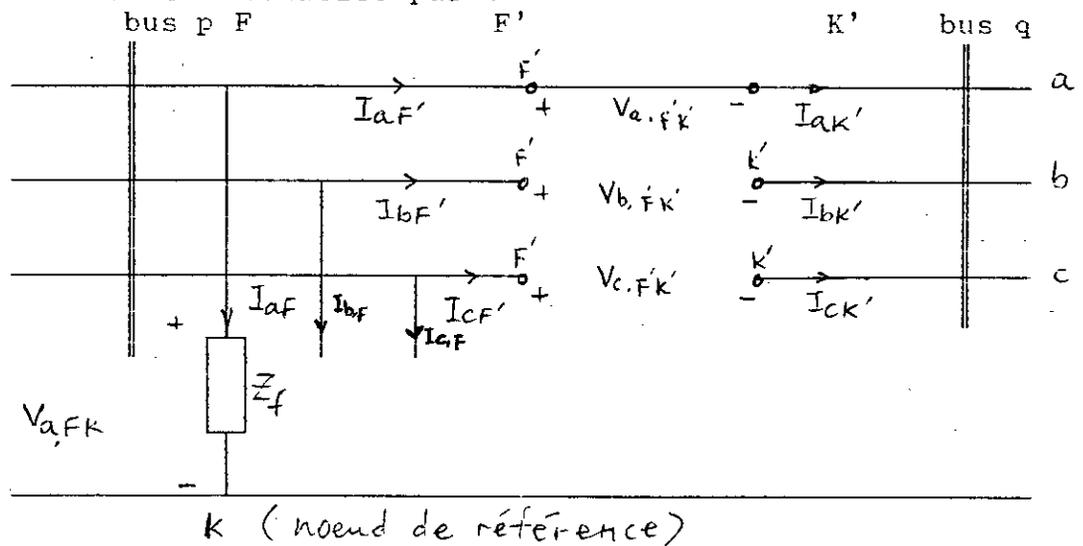
		défaut	shunt	defaut	série
type de défaut	cas	SLGF (série)	2LGF (parall)	1LO (parall)	2LO (série)
shunt	SLGF (série)	Z_{NN}	H_{NN}	H_{Nq}	Z_{Nq}
	2LGF (parall)	G_{NN}	Y_{NN}	Y_{Nq}	G_{Nq}
serie	1LO (parall)	G_{qN}	Y_{qN}	Y_{qq}	G_{qq}
	2LO (série)	Z_{qN}	H_{qN}	H_{qq}	Z_{qq}

où Z , Y , H et G représentent respectivement les paramètres impédance ,admittance , hybride et hybride inverse du quadripole équivalent de la connexion

1 - CONNEXION SERIE - SERIE (Z TYPE FAULT) :

Cette connexion résulte de l'apparition simultanée de deux défauts (voir tableau) . on prend comme exemple d'étude ,l'apparition simultanée du défaut shunt (SLGF : phase : a) au point F et du défaut série (2LO :b et c ouverts)

Ce type de défaut est schématisé par :



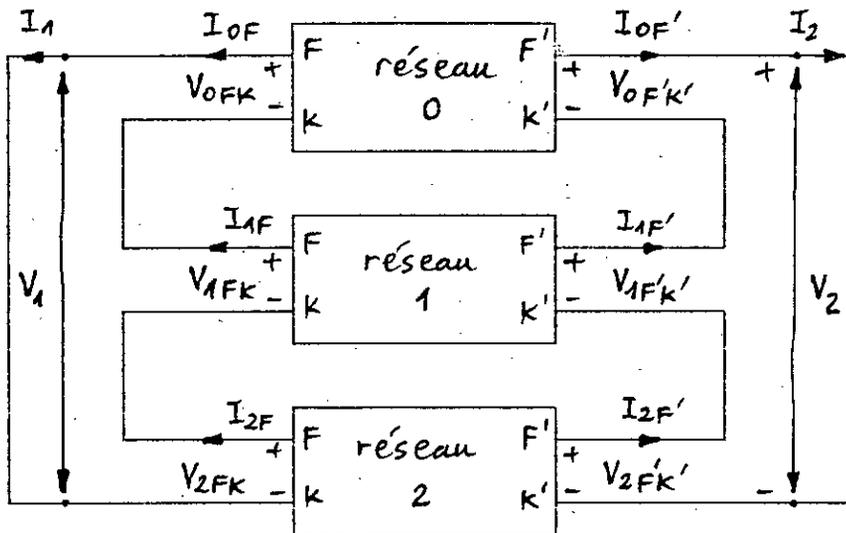
conditions de défaut : SLGF :

$$I_{b,F} = 0, \quad I_{c,F} = 0, \quad V_{a,Fk} = Z_f I_{a,F}$$

2LO :

$$I_{b,F'k'} = 0, \quad I_{c,F'k'} = 0, \quad V_{a,F',k'} = 0$$

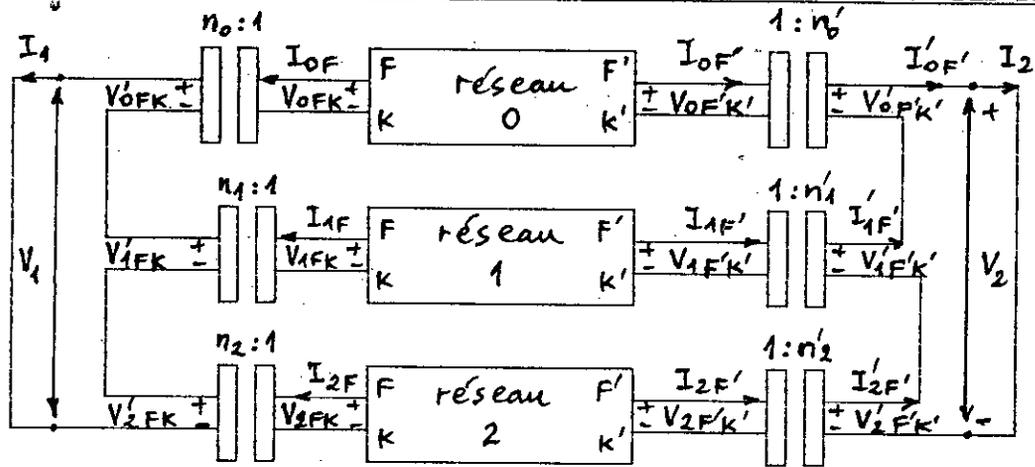
Le circuit équivalent est alors :



Ecrivons pour chaque quadripole le système d'équations :

$$\begin{aligned} V_{1,Fk} &= Z_{11}(i) I_{1,F} + Z_{12}(i) I_{1,F'} \\ V_{1,F'k'} &= Z_{21}(i) I_{1,F} + Z_{22}(i) I_{1,F'} \end{aligned}$$

Généralisation : si on tient compte des angles de décalage de phase le circuit équivalent devient :



n_i et n'_i sont données par :

$$n_i = \frac{\hat{V}_{i,FK}}{V_{i,FK}} = \frac{\hat{I}_{i,F}}{I_{i,F}} \quad i=0,1,2.$$

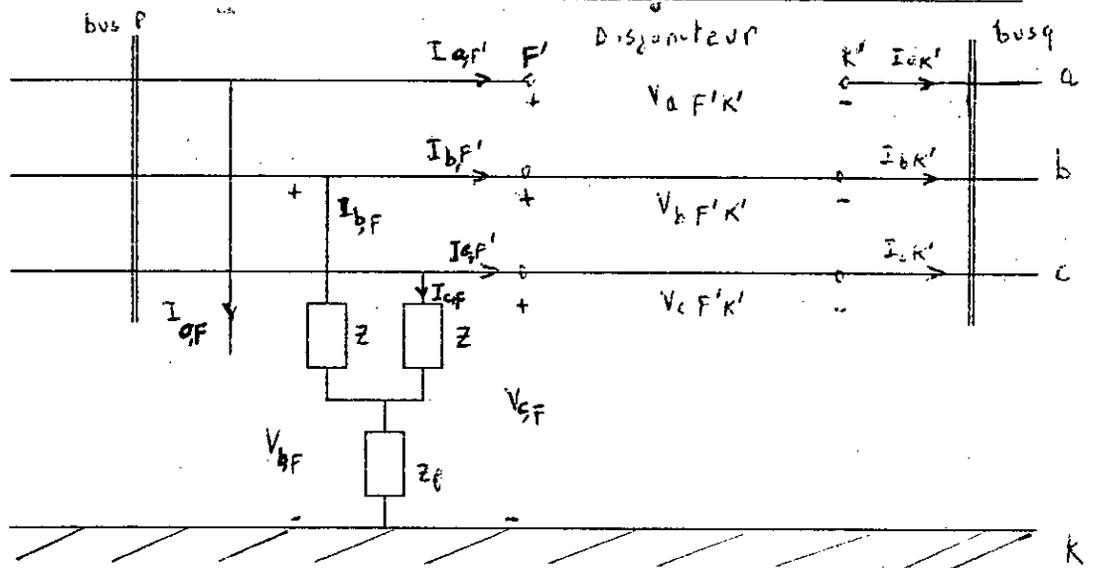
$$\hat{n}_i = \frac{\hat{V}_{i,FK}}{V_{i,F'K'}} = \frac{\hat{I}_{i,F'}}{I_{i,F'}}$$

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_{i,FK} \\ \hat{V}_{i,F'K'} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11}(i) & (\frac{n_i}{\hat{n}_i}) Z_{12}(i) \\ (\frac{\hat{n}_i}{n_i}) Z_{21}(i) & Z_{22}(i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{I}_{i,F} \\ \hat{I}_{i,F'} \end{pmatrix} \quad i=0,1,2$$

2 - CONNEXION PARALLELE - PARALLELE (Y TYPE FAULT) :

Cette connexion résulte de l'apparition simultanée de deux défauts (voir tableau) . On prend comme exemple d'étude l'apparition simultanée du défaut shunt (LLGF : phases b,c) et du défaut série (1LO : phase a) .

Ce type de défaut peut être schématisé par :



conditions de défaut :

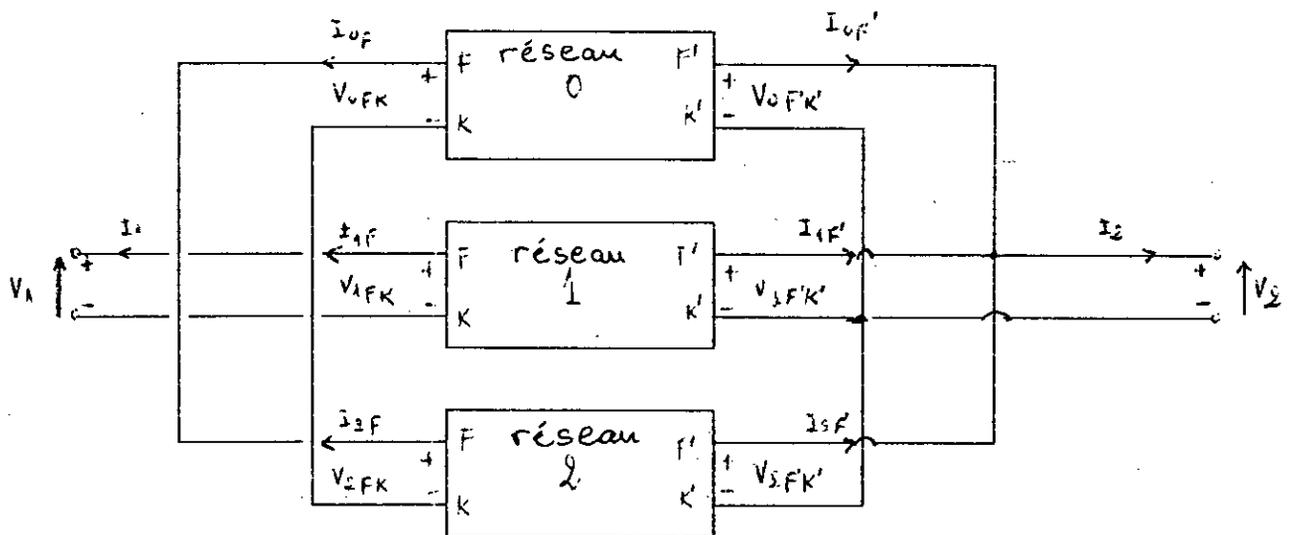
LLGF :

$$I_{a,F} = 0 \quad V_{b,F} = -ZI_{b,F} + Z_f(I_{b,F} + I_{c,F}) \quad V_{c,F} = -ZI_{c,F} + Z_f(I_{b,F} + I_{c,F})$$

1LO :

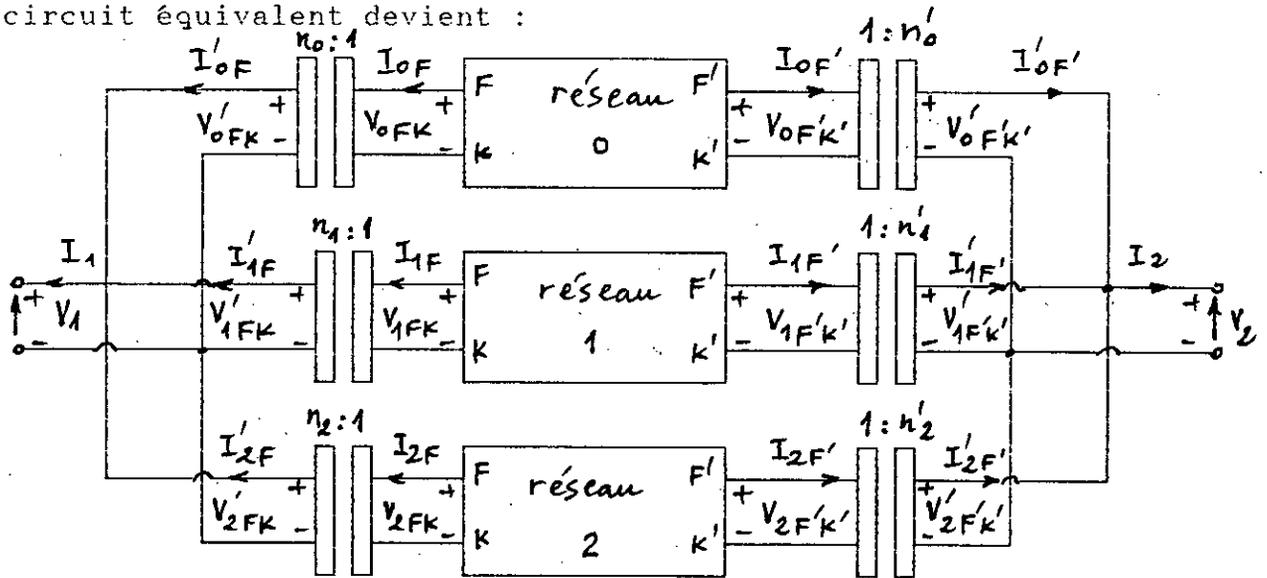
$$I_{a,DQ} = 0 \quad V_{b,DQ} = V_{b,D} - V_{b,Q} = 0 \quad V_{c,DQ} = V_{c,D} - V_{c,Q} = 0$$

Le circuit équivalent est :



$$\begin{aligned} I_{i,F} &= Y_{11}(i) V_{i,FK} + Y_{12}(i) V_{i,F'K'} \\ I_{i,F'} &= Y_{21}(i) V_{i,FK} + Y_{22}(i) V_{i,F'K'} \end{aligned} \quad i=0,1,2$$

Généralisation : si on tient compte des angles de décalage le circuit équivalent devient :



n_i et n'_i étant les angles de de décalage , ils sont donnés par les relations :

$$\begin{aligned} n_i &= \frac{\dot{V}_{i,FK} - \dot{I}_{i,F}}{V_{i,FK} I_{i,F}} \\ n'_i &= \frac{\dot{V}_{i,F'K'} - \dot{I}_{i,F'}}{V_{i,F'K'} I_{i,F'}} \end{aligned} \quad i=0,1,2$$

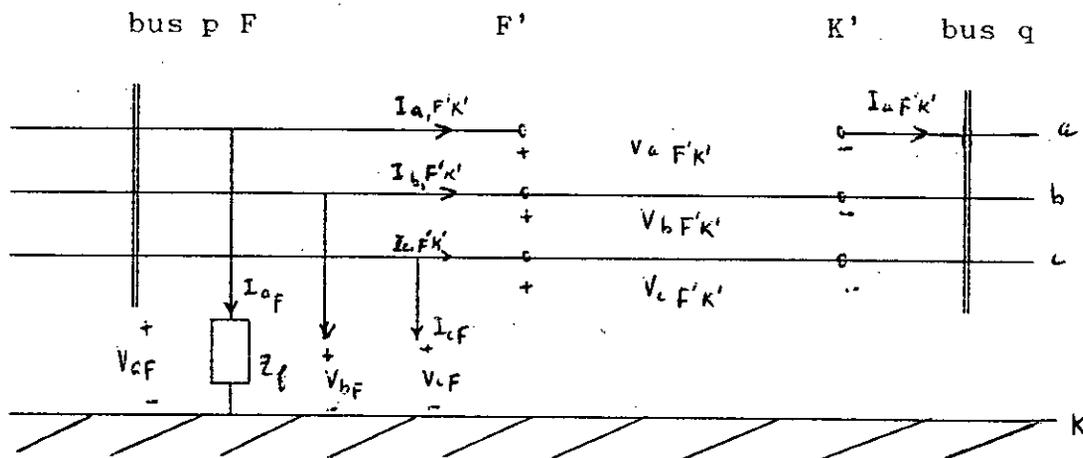
ainsi le système d'équations précédent devient :

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{i,F} \\ \dot{I}_{i,F'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11}(i) & (\frac{n_i}{n'_i}) Y_{12}(i) \\ (\frac{n'_i}{n_i}) Y_{21}(i) & Y_{22}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{i,FK} \\ \dot{V}_{i,F'K'} \end{bmatrix}$$

les valeurs de $Y_{11}(i)$, $Y_{12}(i)$, $Y_{21}(i)$ et $Y_{22}(i)$ seront explicitement déterminés dans l'annex A.2

3 - CONNEXION SERIE - PARALLELE :

Cette connexion résulte de l'apparition de deux défauts (voir tableau) on prend comme exemple d'étude l'apparition simultanée du défaut shunt (SLGF :phase a) et du défaut série (1LO :phase a)
Ce type de défaut est schématisé par :



conditions de défaut :

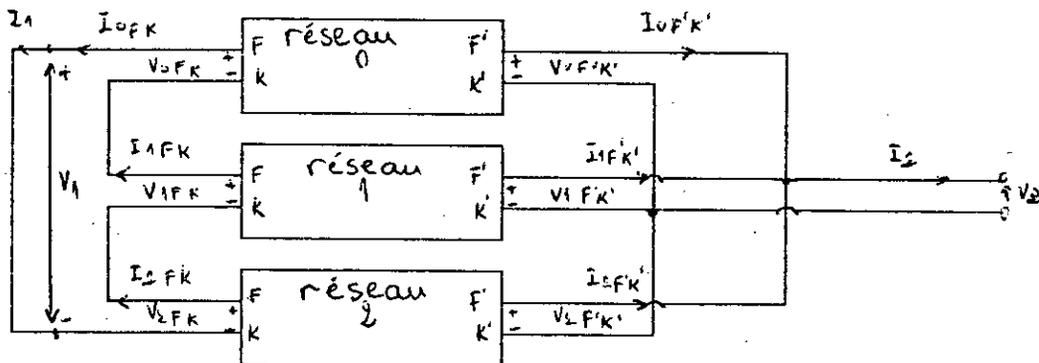
SLGF :

$$I_{b,F} = 0, I_{c,F} = 0, V_{a,FK} = Z_f I_{a,F}$$

1 LO :

$$I_{a,FK'} = 0, V_{b,FK'} = 0, V_{c,FK'} = 0$$

le circuit équivalent est :

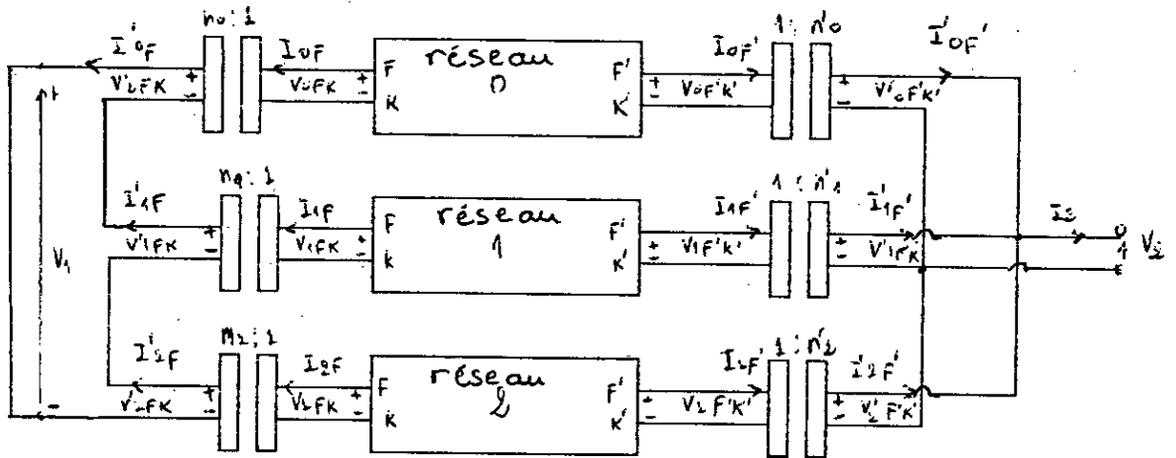


pour chaque quadripole le système d'équations est :

$$\begin{aligned} V_{1,FK} &= h_{11}(i) I_{1,F} + h_{21}(i) V_{1,FK'} \\ I_{1,F} &= h_{21}(i) I_{1,F} + h_{22}(i) V_{1,FK'} \end{aligned}$$

Généralisation :

Si on tient compte des angles de décalage, le circuit équivalent devient :



le système d'équations pour chaque quadripole devient :

$$\begin{pmatrix} \hat{V}_{1,FK} \\ \hat{I}_{1,F} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} h_{11}(i) & (\frac{n_i}{\hat{n}_i}) h_{12}(i) \\ (\frac{\hat{n}_i}{n_i}) h_{21}(i) & h_{22}(i) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{f}{I_{1,F}} \\ \hat{V}_{1,FK} \end{pmatrix}$$

$h_{11}(i)$, $h_{12}(i)$, $h_{21}(i)$ et $h_{22}(i)$ étant des éléments de la matrice hybride H de chaque quadripole leurs valeurs seront explicitement déterminées dans l'annexe A.2.

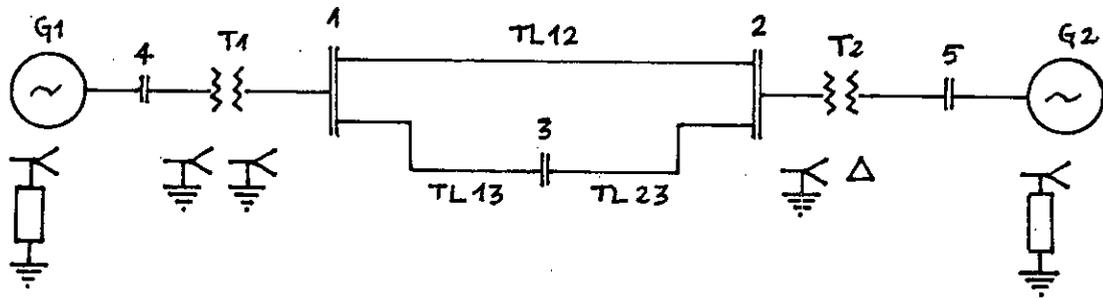
I - 5 CALCUL DES GRANDEURS DU RESEAU DANS LE CAS DE DEFAUTS NON SYMETRIQUES :

Le calcul des défauts non symétriques est une application

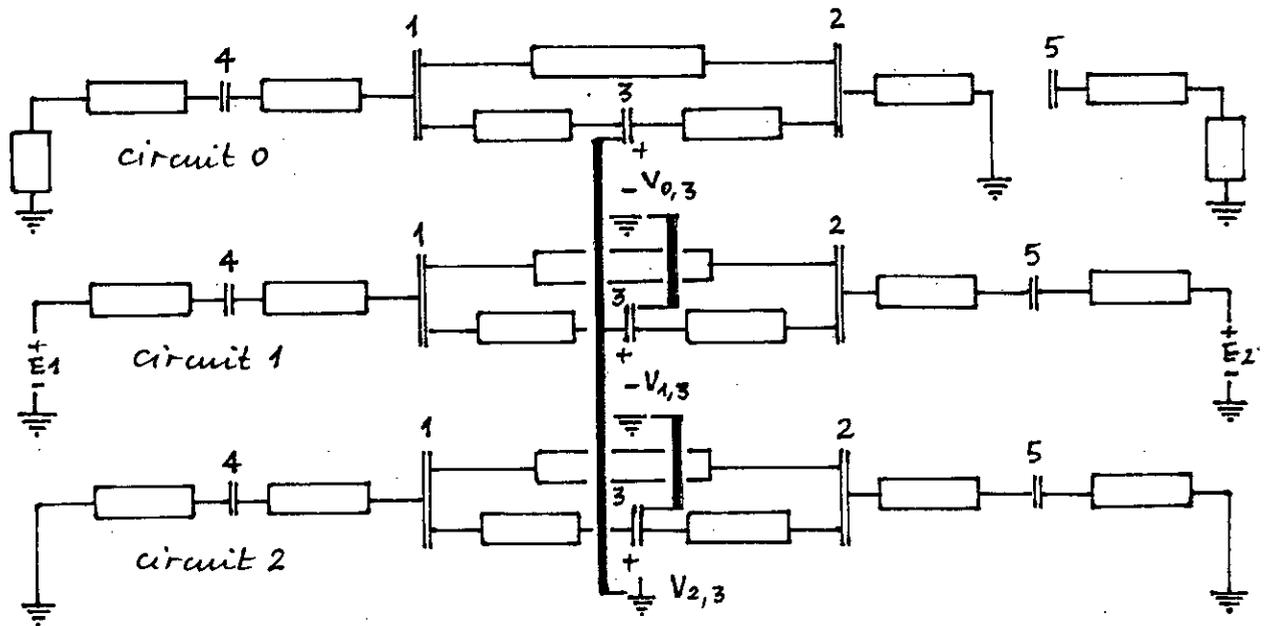
directe des matrices impédances de transfert. Un calcul détaillé est présenté dans l'annexe A-2.

I - 6 EXEMPLE D'APPLICATION :

Soit le réseau suivant composé de cinq noeuds, deux machines, deux transformateurs et trois lignes de transmission.



Un court-circuit monophasé se produit au noeud 3, la représentation de ce réseau en régime déséquilibré est :



court-circuit monophasé au noeud 3

CHAPITRE II

***ETUDE
DE LA STABILITE
TRANSITOIRE***

II - 1 ETUDE DE LA STABILITE TRANSITOIRE :

II - 1 INTRODUCTION :

Un réseau électrique n'est jamais en régime établi , En plus des variations stochastiques , des défauts sévères peuvent se produire. Ces derniers sont éventuellement accompagnés de mise hors circuit de machines ou d'ouvrages conduisant ainsi en cas d'échec des procédures de réenclenchement à des modifications de la topologie du réseau [13]. il en résulte , soit des phénomènes qui varient lentement et qui sont considérés comme dans un régime établi et par conséquent ils sont analysés en étudiant la stabilité statique , soit des phénomènes électriques transitoires qui nécessitent une étude détaillée de la stabilité car les perturbations dans le réseau peuvent engendrer une perte de synchronisme.

Un réseau d'énergie électrique est dit en régime de stabilité transitoire si à la suite d'une perturbation importante (qui peut résulter d'une perte soudaine d'un générateur , ou d'une ligne , ou plus fréquemment d'un court - circuit) il retrouve un état de régime permanent de marche synchrone .[14] .Les études de stabilité transitoire portent généralement sur les défauts les plus probables et les plus contraignants (court-circuit, report de charge, pertes de lignes, etc...) elles sont pratiquée par intégration numérique du modèle régissant la dynamique du système. Ce modèle présente essentiellement une forte non-linéarité et une dimension généralement importante. Il existe d'autre méthodes d'évaluation de la stabilité telles que les méthodes directes de LIAPUNOV et la méthode par reconnaissance des formes[12].

L'étude de la stabilité d'un réseau électrique est d'une importance primordiale ,elle permet d'évaluer les capacités du réseau à retrouver un état de fonctionnement normal ou synchrone après élimination du défaut ,elle permet aussi de déterminer la temporisation à afficher au niveau des protections.

Le mouvement dynamique du rotor des machines synchrones est

régi par l'équation suivante: $T_2 = T_m + T_e$

où: T_m : couple mécanique fourni par la turbine,
 T_e : couple électromagnétique fourni par la machine,
 T_2 : couple d'accélération .

En régime équilibré , stable le couple mécanique T_m est égal au couple électromagnétique T_e , et donc le couple d'accélération T_2 est nul et la machine fonctionne au synchronisme , elle persiste dans cet état tant que cette relation reste vérifiée il n'y aura donc ni accélération , ni décélération des masses tournantes , si un déséquilibre se produit entre les couples mécaniques et électriques alors le synchronisme est perdu provoquant ainsi une instabilité du système [8].

Le réseau d'énergie électrique comporte en général un grand nombre de générateurs synchrones interconnectés (réseau multi-machines). Une perturbation survenant en un point quelconque du réseau affecte l'ensemble des machines. L'Etude rigoureuse du processus nécessite en principe la prise en compte des régimes transitoires de toutes les machines ,c'est ainsi que sont établis les programmes numériques d'étude de la stabilité du réseau.

Dans l'étude de la stabilité transitoire , quelques hypothèses ont été passées en vue d'une approche des plus précises à savoir:

- 1 - Le couple mécanique T_m ou (puissance mécanique P_m) pour chaque machine demeure constant durant tout le régime transitoire.
- 2 - L'effet d'amortissement du rotor est négligé.
- 3 - Chaque machine sera représentée par une réactance transitoire constante en série avec une source de tension .
- 4 - Les charges sont représentées par des admittances shunt reliées à la terre dont les valeurs dépendent de l'état du réseau avant la perturbation.

L'étude du réseau avant l'apparition du défaut est déterminée par

un calcul de l'écoulement de puissance (LOAD FLOW) basé sur la méthode de GAUSS-SEIDEL(Voir annexe A.1).

L'état du réseau durant et après le défaut est déterminé par la méthode de RUNGE-KUTTA.

II.2) Modélisation des éléments du réseau .

Le but de ce chapitre , est de modéliser le réseau d'énergie électrique pour l'évaluation de la stabilité transitoire.

II.2.1) Modélisation de la machine synchrone:

La machine synchrone triphasée comporte d'une part ,au stator trois enroulements de phases notés a,b et c d'autre part ,au rotor un enroulement d'excitation noté f,elle comporte également un certain nombre de barres d'amortisseur.

Pour l'étude de la stabilité transitoire nous adoptons comme modèle le modèle du second ordre .

Cette représentation de la machine synchrone néglige les effets de saillance et considère le flux dans l'inducteur constant ,ce qui revient à supposer que la machine se comporte comme une force électromotrice constante (E) en série avec la réactance transitoire de la machine X_d' . Cette hypothèse n'est valable que pendant un temps relativement court après l'apparition d'une perturbation .[3]

Equations électriques :

La f.e.m derrière la réactance transitoire E' est :

$$E' = V_t + R_a I_t + jX_d' I_t \quad (II.1)$$

V_t :est la tension aux bornes du stator de la machine,

E' :est la f.e.m derrière la réactance transitoire.

I_t :est le courant généré par la machine,

X_d' :est la réactance transitoire de machine.

R_a :est la résistance de l'induit.

La figure (II.1) ci-dessous donne le schéma équivalent de la machine dont la représentation vectorielle est donnée par la figure (II.2).

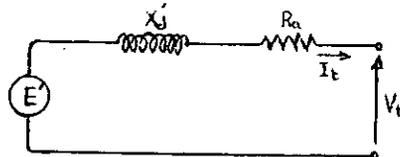


Schéma électrique monophasé équivalent de la machine synchrone.

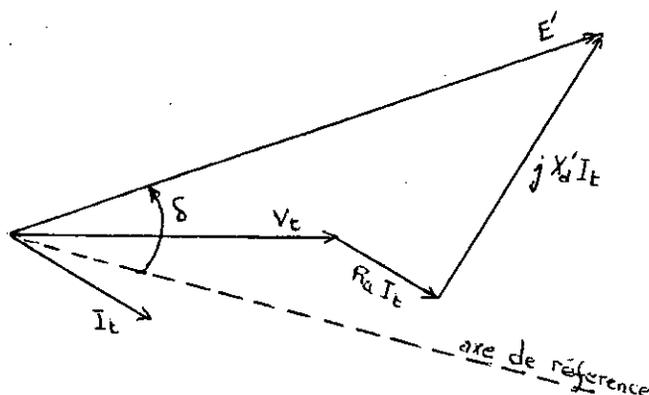


Fig (II.2)

Représentation vectorielle de la machine.

Equations mécaniques:

L'équation de mouvement du rotor des machines synchrones est basée sur l'évolution du couple d'accélération lié au moment d'inertie de la machine par la relation (II.2) ci-dessous.

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} - T_a - T_m - T_e \quad [N.M] \quad (II.2)$$

Où J: est le moment d'inertie des masses tournantes [Kg.M²]

θ_m : est le déplacement angulaire du rotor (angle mécanique en radians)

t :est le temps en secondes

T_m :est le couple mécanique d'entraînement fourni par la turbine [N.M]

T_e :est le couple électromagnétique fourni par la machine synchrone[N.M]

T_a :est le couple d'accélération [N.M].

L'angle θ_m est mesuré par rapport à un axe lié au stator et pris comme référence , comme la vitesse du rotor par rapport à la vitesse synchrone est l'objet de notre intérêt , il est plus convenable de mesurer la position angulaire du rotor par rapport à l'axe de référence qui tourne à la vitesse synchrone.

Aussi nous définissons θ_m par la relation :

$$\theta_m = \Omega_0 t + \delta_m \quad (II.3)$$

Où Ω_0 : est la la vitèsse synchrone en radians mécaniques par secondes

δ_e : est le déplacement angulaire du rotor en radians mécaniques en dérivant (II.3) par rapport au temps, on obtient:

$$\frac{d\theta_m}{dt} - \Omega_0 + \frac{d\delta_m}{dt} \quad [rd/s] \quad (\text{II.4})$$

sachant que :

$$\frac{d\theta_m}{dt} - \Omega$$

devient :

$$\frac{d\delta_m}{dt} - \Omega - \Omega_0 \quad (\text{II.5})$$

En première approximation lorsque, Ω est peu différente de Ω_0 les mouvements du rotor de la machine sont régis par l'équation suivante:

$$J\Omega_0 \frac{d\Omega}{dt} - P_m - P_e \quad (\text{II.6})$$

Où

Ω : est la vitesse angulaire du rotor.

P_m : est la puissance mécanique développée par la turbine. [W]

P_e : est la puissance électrique développée par la machine. [W]

La puissance électrique s'écrit:

$$P_e = \text{Re}(\overline{VI}^*) \quad (\text{II.7})$$

Avec : V: la tension aux bornes de la machine [V]

I: l'expression conjuguée du courant statorique [A]

En divisant les deux membres de la relation (II.6) par la puissance nominale de la machine notée S_n l'équation précédente devient :

$$J \frac{\Omega_0}{S_n} \frac{d\omega}{dt} - P_m - P_e \quad (\text{II.8})$$

Dans laquelle P_m et P_e sont exprimées en valeurs réduites (pu).

Remarquons que :

$$\frac{\Omega}{\Omega_0} - \frac{\omega}{\omega_b}$$

$$\omega_b = 2\pi f$$

$$\delta = P_r \delta_m$$

ω : pulsation de la tension aux bornes du stator .

ω_b : pulsation de référence (synchrone) .

P_r : nombre de paires de poles de la machine .

le mouvement des masses tournantes est régi par les équations suivantes :

$$M \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad (\text{II.9})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \quad (\text{II.10})$$

avec :

$$\frac{M - J\Omega_0^2}{S_n \omega_b}$$

M : étant le moment d'inertie des masses tournantes
le moment d'inertie M peut s'écrire selon la relation suivante :

$$M = \frac{2W_c}{S_n \omega_b}$$

$$W_c = \frac{1}{2} J \Omega_0^2$$

$W_c =$: énergie cinétique des masses tournantes à la vitesse nominale Ω_0 .

Dans les études de stabilité ,il est fait souvent appel à une autre constante d'inertie notée H qui est définie comme suit :

$$H = \frac{W_c}{S_n} \quad [s]$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \Omega_0^2}{S_n} = \frac{1}{2} \frac{M \Omega_0}{S_n}$$

on aboutit en dernier lieu aux deux équations décrivant le

comportement du rotor en fonction du stator , à savoir :

$$\frac{2H}{\omega_b} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \quad [\text{pu}] \quad (\text{II.12})$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b \quad [\text{pu}] \quad (\text{II.13})$$

En régime transitoire , on supposera que la puissance mécanique P_m présente au niveau de l' arbre de la machine demeure constante . cette hypothese reste valable en raison du temps de réponse assez lent des groupes tournants .

II-2-1 MODELISATION DES CHARGES :

Les charges sont représentées par des admittances constantes:

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{V_i^2} \quad i=1, \dots, n_{ch}$$

avec :

V_i : module de la tension au noeud de charge i avant la perturbation.

P_{Li} : puissance active consommée par la charge i .

Q_{Li} : puissance réactive consommée par la charge i .

n_{ch} : nombre de charges .

II-2-3 SOLUTION DU PROBLEME DE STABILITE TRANSITOIRE :

Les équations du modèle adopté pour l'étude de la stabilité transitoire sont données cidessous .

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_b$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\omega_b}{2H} (P_m - P_e)$$

$$X_{1i} - \delta_i \quad X_{2i} - \omega_i \quad i=1, \dots, n_m$$

les équations du modèle s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} \dot{X}_{1i} &= X_{2i} - \omega_b \\ \dot{X}_{2i} &= \frac{\omega_b}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \end{aligned}$$

on définit X^s le point d'équilibre avant la perturbation .

$$X^s = [X_{1i}^s, X_{2i}^s]^t$$

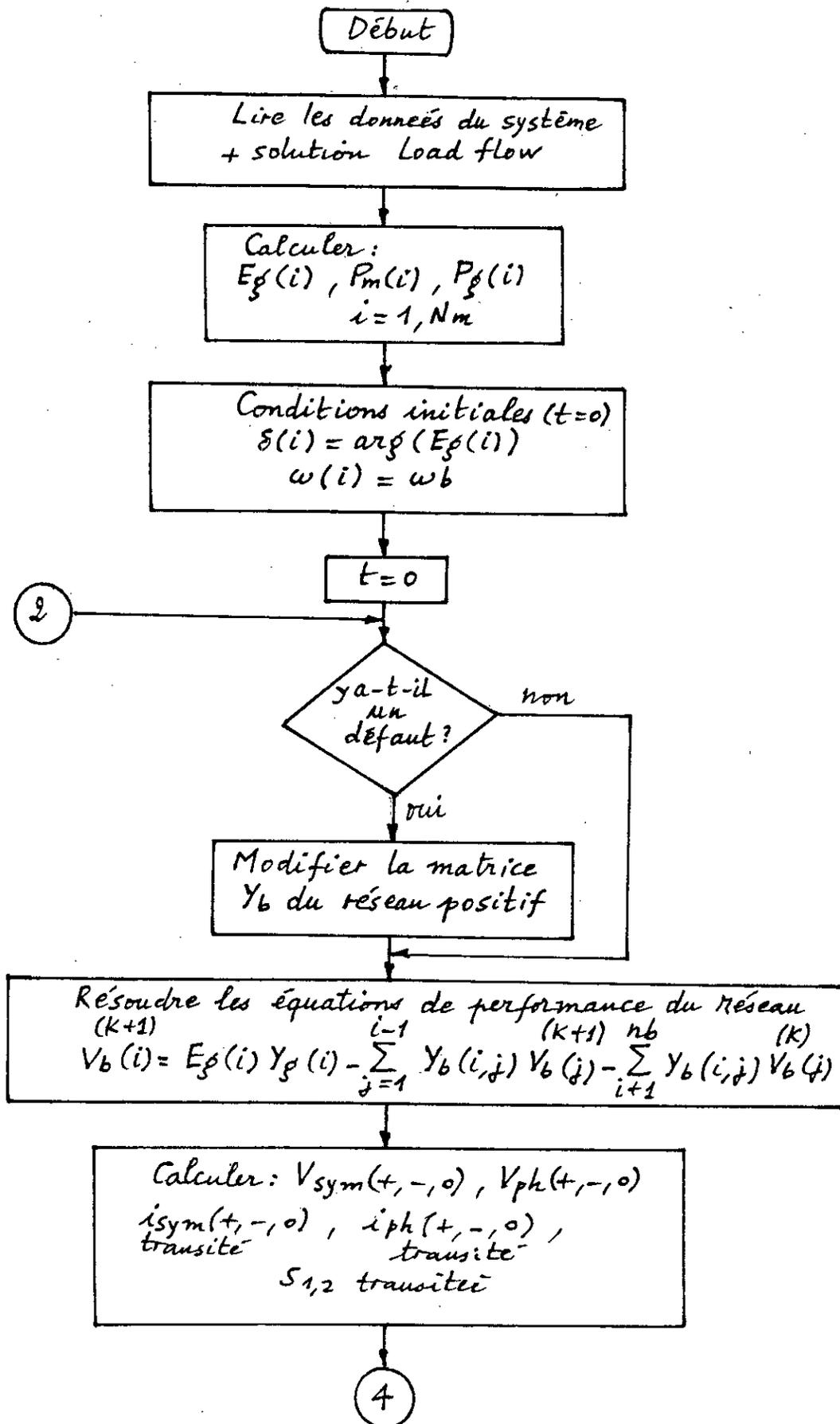
Le vecteur d'état X peut s'écrire sous la forme :

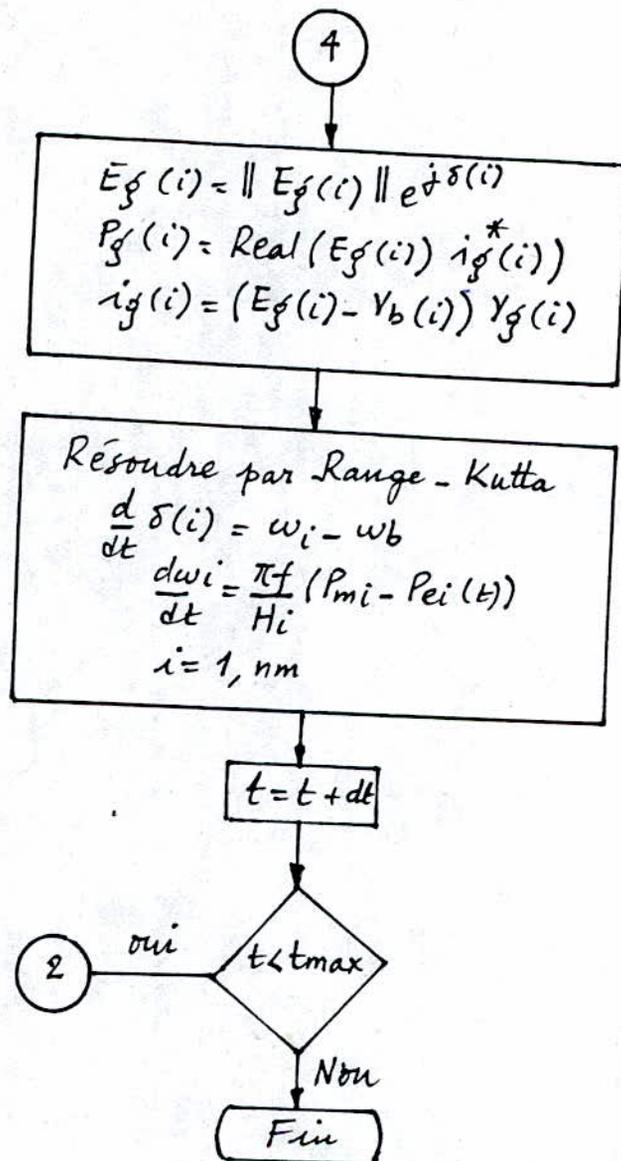
$$\dot{X} = F(X)$$

$$\dot{X} = \left[\frac{dX_{1i}}{dt}, \frac{dX_{2i}}{dt} \right]^t \quad i=1, \dots, n_m$$

Ce système d'équations différentielles non linéaires est résolu par la méthode d'intégration numérique de RUNGE KUTTA du 4 ième ordre.

II -3 Algorithme





Organigramme de calcul de la stabilité transitoire
par la méthode de "RUNGE KUTTA"

CHAPITRE III

*INCLUSION DES DEFAUTS NON
SYMETRIQUES DANS LES LOGICIELS
DE STABILITE*

III.1 INTRODUCTION :

Dans les logiciels de stabilité , plusieurs methodes (tenant compte des défauts non symétriques) sont utilisées parmi lesquelles les méthodes matricielles et les méthodes basées sur les topologies des reseaux [6] .Dans notre etude on s'intéressera à celle basée sur la modification directe des admittances qui est plus simple à mettre en oeuvre et ne nécessitant pas de grandes modifications dans la structure du programme de stabilité [7] .

III.2 MODIFICATION DE Y^+ DUE AU DEF AUT SHUNT, SERIE ET SIMULTANE :

La simulation d'un défaut non symétrique se fait en modifiant convenablement la matrice admittance nodale Y^+ du réseau

III.2.1 MODIFICATION DE Y^+ DUE AU DEF AUT SHUNT :

Nous avons vu dans le cas d'un défaut shunt qu'on injecte un courant uniquement au noeud de défaut . Considerans la ligne p-q entre deux noeuds quelconque du reseau ,et un défaut se produit au noeud q fig (1.a) :

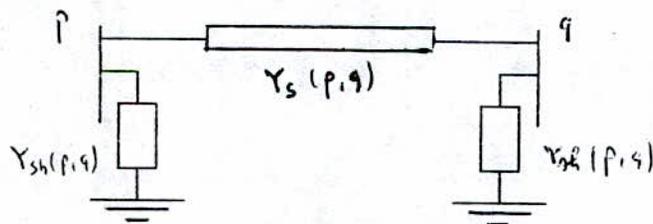


FIG (1.a)

au noeud de défaut le réseau positif voit une impédance passive Z_F parcourue par le courant de défaut I_q fig (1.b) :

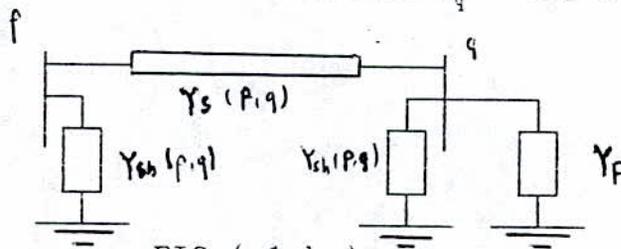


FIG (1.b)

$Y_{s\ pq}$: admittance série positive de la ligne p-q
 Le changement dans Y^+ du réseau se fait au niveau de l'élément diagonal Y_{qq} comme suit

$$Y_{qq} = Y_{0qq} + Y_F$$

Y_0 : étant la matrice nodale à l'état saint

Y_F : étant l'admittance du défaut $Y_F = 1 / Z_F$

Pour chaque type de défaut shunt le réseau positif voit une impédance passive Z_p .

Dans l'étude des défauts shunts, deux cas peuvent se présenter :

PREMIER CAS : apparition d'un court-circuit au noeud préexistant q ce défaut sera éliminé en un temps.

DEUXIEME CAS : apparition d'un court-circuit au point D de la ligne p q distant de a par rapport au noeud p et de (1-a) par rapport au noeud q.

L'ouverture de la ligne affectée par le défaut est réalisée en deux stades grace aux disjoncteurs extrêmes.

III-2-1-a APPARITION D'UN COURT-CIRCUIT AU NOEUD PREEXISTANT q :

à $t=t_0$ le défaut apparait au noeud q (fig 1b).

on désigne par Y_b la matrice admittance nodale modifiée du réseau positif et par Y_{b0} la matrice nodale à l'état saint. la simulation de ce défaut consiste à changer l'élément diagonale de Y^+ :

$$Y_{b\ qq} = Y_{b0\ qq} + Y_F$$

à $t=t_1$ le défaut shunt est éliminé en un temps :

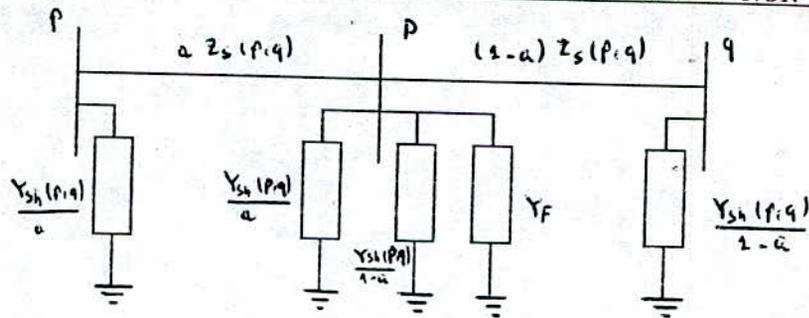
$$\text{et } Y_{b\ qq} = Y_{b0\ qq}$$

III.2.1 b APPARITION D'UN COURT-CIRCUIT AU NOEUD NON PREXISTANT :

Pour simuler un défaut éliminé en deux temps t_1, t_2 on suit les étapes suivante :

- Création d'un noeud fictif D.
- Elimination du défaut au premier stade en éliminant la ligne pD ou Dq selon la valeur de a.
- Elimination du défaut au deuxième stade en éliminant la ligne restante.
- Suppression du noeud D

Le défaut est modélisé par le schéma suivant



à $t=t_0$ le défaut se produit , la matrice Y_1 subit les changements suivants :

$$\begin{aligned}
 Y_{b\ DD} &= \frac{Y_{s\ pq} + Y_{sh\ pq}}{a(1-a)} + Y_F \\
 Y_{b\ pq} &= Y_{b0\ pq} + Y_{s\ pq} \\
 Y_{b\ qp} &= Y_{pq} \\
 Y_{b\ pp} &= Y_{b0\ pp} - Y_{s\ pq} - Y_{sh\ pq} + \frac{Y_{s\ pq} + Y_{sh\ pq}}{a} \\
 Y_{b\ pD} &= -\frac{Y_{s\ pq}}{a} \\
 Y_{b\ Dp} &= Y_{b\ pD} \\
 Y_{b\ qq} &= Y_{b0\ qq} - Y_{s\ qp} - Y_{sh\ qp} + \frac{Y_{s\ qp} + Y_{sh\ qp}}{1-a} \\
 Y_{b\ qD} &= -\frac{Y_{s\ pq}}{1-a} \\
 Y_{b\ Dq} &= Y_{b\ qD}
 \end{aligned}$$

à $t = t_1$ Premier stade d'élimination du défaut .

Cette élimination partielle du défaut dépend de la valeur de a
 Si $a \leq 0.5$ le noeud en défaut D est proche du noeud p ,
 l'impédance série entre le noeud en défaut D et le noeud p est
 donnée par $a Z_{s\ pq}$

on pose : $P_0 = P$ $q_0 = q$ $a_0 = 1-a$

Si $a > 0.5$ le noeud en défaut d est proche du noeud q , l'impédance
 série entre le le noeud en défaut D et le noeud q est donnée par
 $(1-a) Z_{s\ pq}$

on pose : $P_0 = q$ $q_0 = P$ $a_0 = a$

Selon la valeur de a on élimine la partie p-D ou D-q de la ligne à ce moment la matrice Y^+ subit les changements suivants :

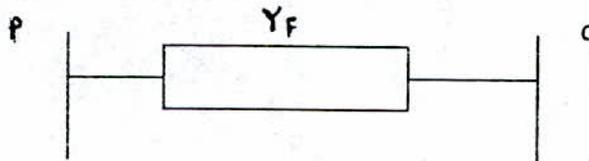
$$\begin{aligned}
 Y_{b\,DD} &= \frac{Y_{s\,p0q0} + Y_{sh\,p0q0}}{a0} + Y_F \\
 Y_{b\,p0q0} &= Y_{b0\,p0q0} + Y_{s\,p0q0} & Y_{b\,q0p0} &= Y_{b0\,p0q0} \\
 Y_{b\,p0p0} &= Y_{b0\,p0p0} - Y_{sh\,p0q0} - Y_{s\,p0q0} \\
 Y_{b\,q0q0} &= Y_{b0\,q0q0} - Y_{s\,p0q0} - Y_{sh\,p0q0} + \frac{Y_{s\,p0q0} + Y_{sh\,p0q0}}{a0} \\
 Y_{b\,p0D} &= 0 & Y_{b\,Dp0} &= Y_{b\,p0D} \\
 Y_{b\,q0D} &= -\frac{Y_{s\,p0q0}}{a0} & Y_{b\,Dq0} &= Y_{b\,q0D}
 \end{aligned}$$

A $t = t_2$: 2^{ème} stade d'élimination du défaut .à ce moment la matrice Y^+ du réseau subit les changements suivants :

$$\begin{aligned}
 Y_{b\,pp} &= Y_{b0\,pp} - Y_{sh\,pq} - Y_{s\,pq} \\
 Y_{b\,qq} &= Y_{b0\,qq} - Y_{sh\,qp} - Y_{s\,qp} \\
 Y_{b\,pq} &= Y_{b0\,pq} + Y_{s\,pq} \\
 Y_{b\,qp} &= Y_{b0\,qp} + Y_{s\,qp}
 \end{aligned}$$

III-3-2 MODIFICATION DE Y^+ DUE AU DEFAUT SERIE :

L'apparition d'un défaut série entre deux noeuds p et q quelconque du réseau peut être modélise par le schéma suivant :



$$Z_{Feq} = Z_F + Z_{s\,pq} \qquad Y_F = \frac{1}{Z_{Feq}}$$

où Z_F : impédance passive vue aux noeuds de défaut p et q par le circuit positif.

$Z_{s\,pq}$: impédance série positive de la ligne p-q .

La simulation de ce type de défaut se fait en un seul temps en changeant convenablement Y_i aux noeuds de défaut.

à $t=t_0$ la matrice Y^+ subit les changements suivants :

$$\begin{aligned} Y_{b\ pp} &= Y_{b_0\ pp} - Y_{sh\ pq} - Y_{s\ pq} + Y_F \\ Y_{b\ qq} &= Y_{b_0\ qq} - Y_{sh\ qp} - Y_{s\ qp} + Y_F \\ Y_{b\ pq} &= Y_{b_0\ pq} + Y_{s\ pq} - Y_F \\ Y_{b\ qp} &= Y_{b_0\ qp} + Y_{s\ qp} - Y_F \end{aligned}$$

à $t=t_1$ le défaut est éliminé :

$$Y_{b\ ij} = Y_{b_0\ ij} \quad i=1, \dots, n \quad , \quad j=1, \dots, n$$

III-3-3 MODIFICATION DE Y^+ DUE AU DEFAUT SIMULTANE :

Nous avons vu dans le chapitre (I-4-C) que l'étude des défauts simultanés est basée sur la théorie des quadripoles .

L'apparition simultanée de deux défauts peut donner naissance à trois types de connexion : connexion série-série , connexion parallèle-parallèle, connexion série-parallèle . pour chaque type de connexion 2,3 ou 4 noeuds sont affectés par le défaut .

A - CAS OU 4 NOEUDS SONT AFFECTES PAR LE DEFAUT :

Aux noeuds de défauts F,K,F',K' on injecte respectivement les courants $-I_F$, I_F , $-I_{F'}$, $I_{F'}$, pour simuler ce défaut on doit changer convenablement la matrice Y^+ du réseau aux noeuds de défaut et résoudre le système (S'.1) (Voir annexe A.2).

La matrice Y^+ du réseau subit les changements suivants :

$$\begin{aligned} Y_{b\ FF} &= Y_{b_0\ FF} + \alpha + \beta \\ Y_{b\ FF'} &= Y_{b_0\ FF'} - \alpha \\ Y_{b\ F'F} &= Y_{b_0\ F'F} + \alpha + \gamma \\ Y_{b\ F'F'} &= Y_{b_0\ F'F'} - \alpha \\ Y_{b\ KK} &= Y_{b_0\ KK} + \alpha + \beta \\ Y_{b\ KK'} &= Y_{b_0\ KK'} - \alpha \\ Y_{b\ K'K} &= Y_{b_0\ K'K} + \alpha + \gamma \\ Y_{b\ K'K'} &= Y_{b_0\ K'K'} - \alpha \end{aligned}$$

B - CAS OU 3 NOEUDS SONT AFFECTES PAR LE DEFAUT :

Aux noeuds de défaut F ,F' et K' on injecte les courants $-I_F$, $-I_{F'}$, et $I_{K'}$

pour simuler ce défaut on doit résoudre le système (S'.2)(Voir annexe A .2).

le changement dans Y^+ est donné par :

$$\begin{aligned} Y_{bFF} &= Y_{bOFF} + \alpha + \beta \\ Y_{bFF'} &= Y_{bOFF'} - \alpha \\ Y_{bF'F'} &= Y_{bOFF'} + \alpha + \gamma \\ Y_{F'F} &= Y_{bOFF} - \alpha \\ Y_{bK'K'} &= Y_{bOK'K'} + \alpha + \gamma \end{aligned}$$

C - CAS OU DEUX NOEUDS SONT AFFECTES PAR LE DEFAUT:

Aux noeuds de défaut F ,F' on injecte respectivement les courants $-I_F$, et $I_{F'}$

pour simuler ce défaut on doit résoudre le système (S'.3) (Voir annexe A.2)

le changement dans Y^+ est donné par :

$$\begin{aligned} Y_{bFF} &= Y_{bOFF} + \alpha + \beta \\ Y_{bFF'} &= Y_{bOFF'} - \alpha \\ Y_{bF'F'} &= Y_{bOFF'} + \alpha + \gamma \\ Y_{bF'F} &= Y_{bOFF} - \alpha \end{aligned}$$

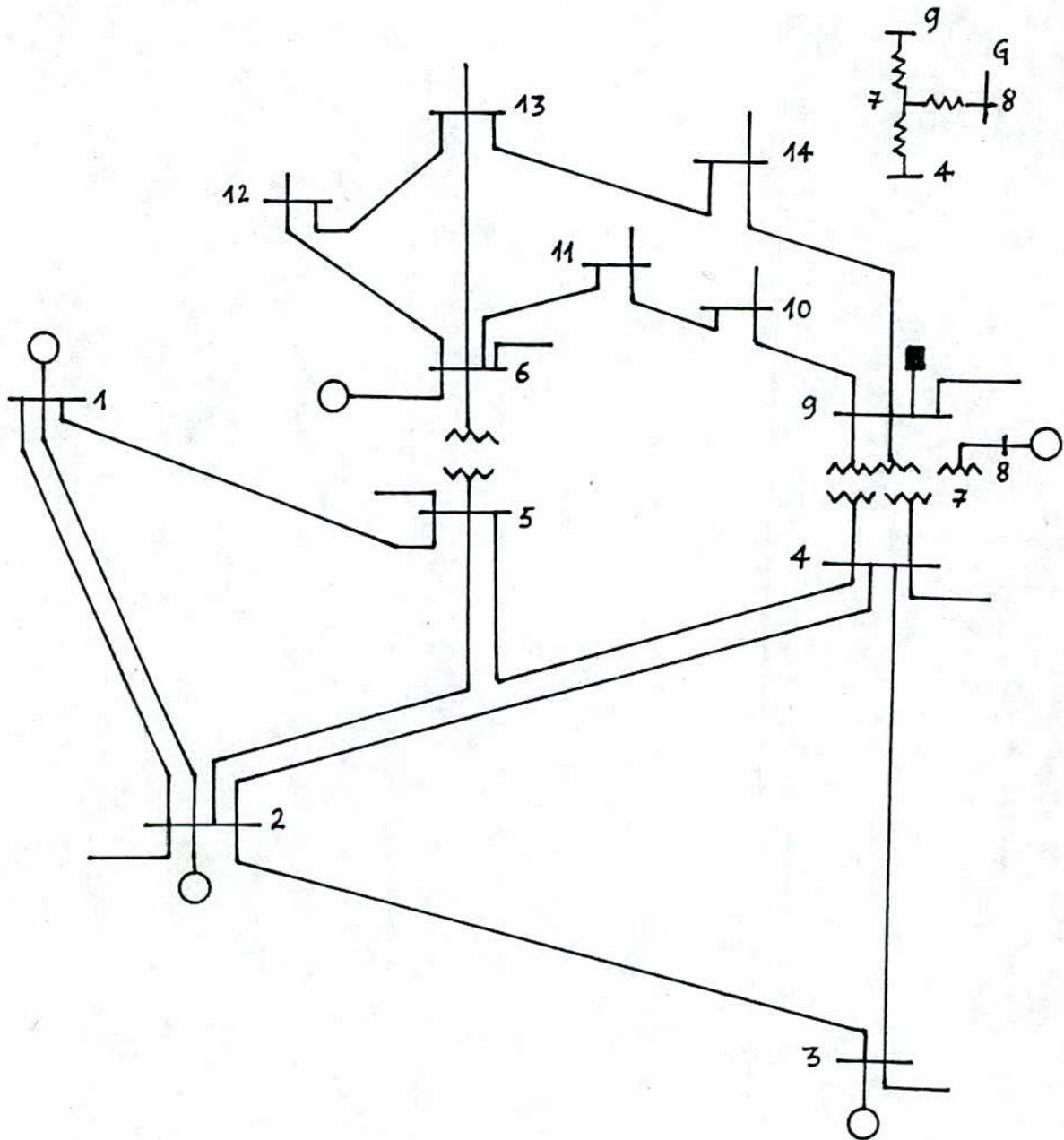
CHAPITRE IV

*APPLICATIONS ET RESULTATS
DE SIMULATION*

IV. APPLICATIONS ET RESULTATS DE SIMULATION :

IV.1 RESEAU ETUDIE:

Nous avons pris comme exemple d'application , un réseau à 14 noeuds ,5 machines et 3 transformateurs dont un est à trois enroulements. Nous donnons ci-dessous le schéma du réseau ainsi ces caractéristiques [11].



IV.2 DONNEES DU RESEAU : (IEEE - 14)

IV.2.1 CARACTERISTIQUES DES LIGNES :

ligne	R_{s1}	X_{s1}	R_{s0}	X_{s0}	$b_s/2$
1 - 2	0.0194	0.0592	0.0582	0.2358	0.0264
1 - 5	0.0540	0.2230	0.1620	0.8310	0.0246
2 - 3	0.0470	0.1980	0.1410	0.7350	0.0219
2 - 4	0.0581	0.1763	0.1743	0.5289	0.0187
2 - 5	0.0570	0.1739	0.1710	0.5217	0.0170
3 - 4	0.0670	0.1710	0.2010	0.5130	0.0173
4 - 5	0.0134	0.0421	0.0402	0.1263	0.0064
6 - 11	0.0949	0.1989	0.2849	0.5967	0.0000
6 - 12	0.1229	0.2558	0.3687	0.7674	0.0000
6 - 13	0.0662	0.1303	0.1985	0.3909	0.0000
9 - 10	0.0118	0.0845	0.0354	0.2535	0.0000
9 - 14	0.1271	0.2704	0.3813	0.8112	0.0000
10 - 11	0.0822	0.1921	0.2466	0.5763	0.0000
12 - 13	0.2209	0.1999	0.6627	0.5997	0.0000
13 - 14	0.1709	0.3480	0.5370	1.0440	0.0000

$b_s/2$: demi-susceptance de la ligne.

R_{s1} : résistance directe de la ligne.

X_{s1} : réactance directe de la ligne.

R_{s0} : résistance homopolaire de la ligne.

X_{s0} : réactance homopolaire de la ligne.

IV.2.2 Caractéristique des machines.

	H	Xd1	Rd2	Xd2	Xd0
M1	4.9850	0.2200	0.0200	0.0950	0.0020
M2	4.6400	0.1850	0.0160	0.0850	0.0700
M3	1.5490	0.2310	0.0000	0.1180	0.0770
M4	1.2540	0.2320	0.0082	0.1200	0.0215
M5	1.2540	0.2320	0.0082	0.1200	0.0215

H : étant la constante d'inertie de la machine, elle est donnée par:

$$2 \frac{W_c}{S_n}$$

R_{Di} : résistance directe de la machine synchrone.

X_{Di} : réactance directe de la machine synchrone.

X'_{Di} : réactance transitoire de la machine:

$i=0,1,2$

IV.2.3 CARACTERISTIQUE DES TRANSFORMATEURS

a- Transformateur a deux enroulements

CONNEXION	Rt1	Xt1	A
4 - 9	0.0000	0.5562	0.969
5 - 6	0.0000	0.2520	0.932

b- Transformateur a trois enroulements

A=0.978

CONNEXION	Rt	Xt
4 - 7	0.0000	0.2090
7 - 8	0.0000	0.1761
7 - 9	0.0000	0.1100

CAPACITE STATIQUE DE COMPENSATION :

NOEUD : 9

$X_c=0.1900$

Notons que toutes les données sont exprimées en p.u dans la base de 100 MVA.

IV.3.4 Résultats obtenus par simulation.

Le calcul de l'écoulement de puissance nécessaire avant la simulation de défaut est fait selon l'organigramme A.1, et le calcul de la stabilité par la méthode de RUNGE_KUTTA. Selon l'organigramme II.3, le programme de calcul est écrit en FORTRAN 77

IV.3.1 Application des différents types de défaut:

Dans cette partie nous montrerons l'influence de l'application des différents types de défauts sur la stabilité, et ceci en changeant les paramètres de simulation (durée de défaut, période de simulation, pas d'intégration...etc).

Dans notre application on suppose l'existence d'un défaut non symétrique sur la ligne 1-2.

la simulation des défauts shunt présentent deux cas:

- 1^{er} cas: la simulation avec élimination du défaut en premier stade, pour ce cas on suppose l'apparition du défaut au noeud 2.
- 2^{ème} cas: la simulation du défaut en deux stades grace aux deux disjoncteurs extrêmes, pour ce cas on suppose le défaut apparaissant sur la ligne 1-2 est proche du noeud 2.

on rappellera que le problème primordial qui se pose à l'exploitant d'un réseaux électrique soumis à une perturbation et de savoir quelle temporisation à afficher au niveau de protection pour éviter l'ecroulement du réseau, ainsi en simulant on peut tester plusieurs niveaux de temporisation jusqu'à avoir celle permettant la sauvegarde de la stabilité (temporisation optimale).

Nous présentons en premier lieu le cas d'un défaut en ligne bien éliminé par les protections rapides qui laissent les machines stables puis le cas d'un défaut avec défaillance des disjoncteurs qui entraînent des temps d'élimination importants conduisant à la perte du synchronisme des groupes.

IV.3.2 COMMENTAIRE ET INTERPRETATION DES RESULTATS:

Défaut shunt :

Les résultats obtenus sont donnés par les figures allant de IV.1 jusqu'à IV.4.

Pour les défauts shunt en un noeud du réseau , on constate que la stabilité des machines est maintenue après élimination du défaut.

Par contre le défaut shunt en un noeud fictif, les courbes des angles et vitesses présentent de fortes oscillations , les 5 machines ne sont pas stables .

Les figures IV.5 et IV.6 illustrent ces résultats .

Les défauts série sont les moins sévères pour les machines , en comparant les courbes de vitesse et des angles , pour les différents défauts série , il n'y a pas une grande différence .

Les résultats sont donnés par les figures IV.9 , IV.10 et IV.11 .

Remarque:

- Pour les défauts shunts éliminés en un stade, nous avons pris $t_e = 0,1s$.
- Pour les défauts shunts éliminés en deux stades, nous avons pris $t_{e1} = 0,1s$ $t_{e2} = 0,2s$.

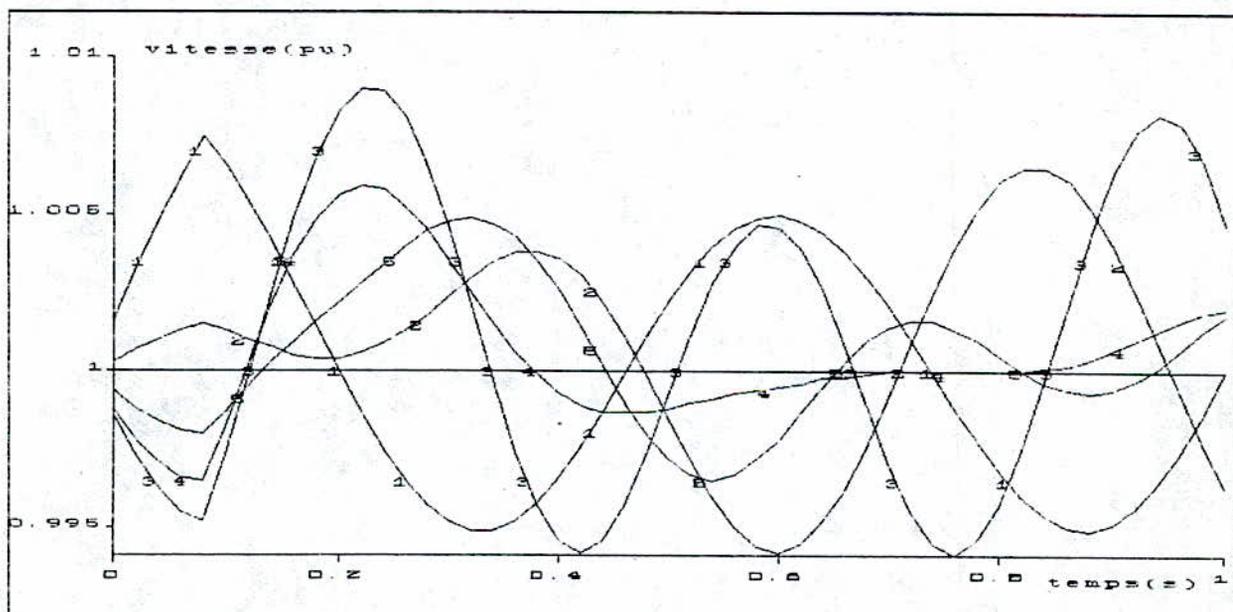
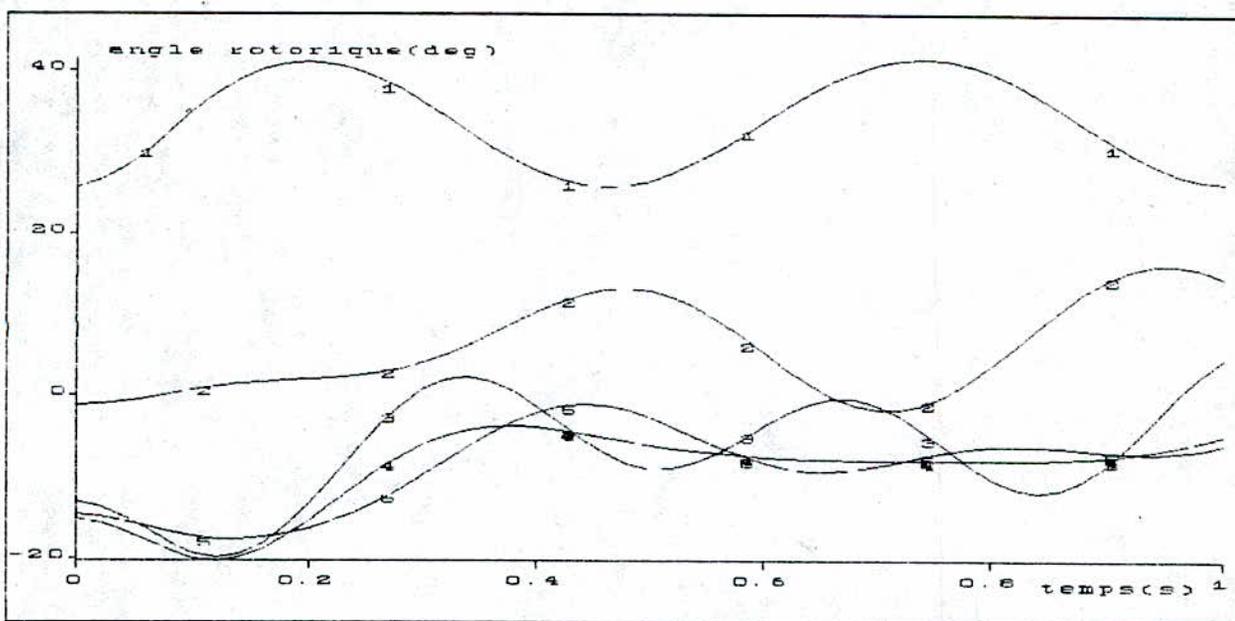


Figure IV.1 Défaut shunt
(monophasé-terre au noeud 2)

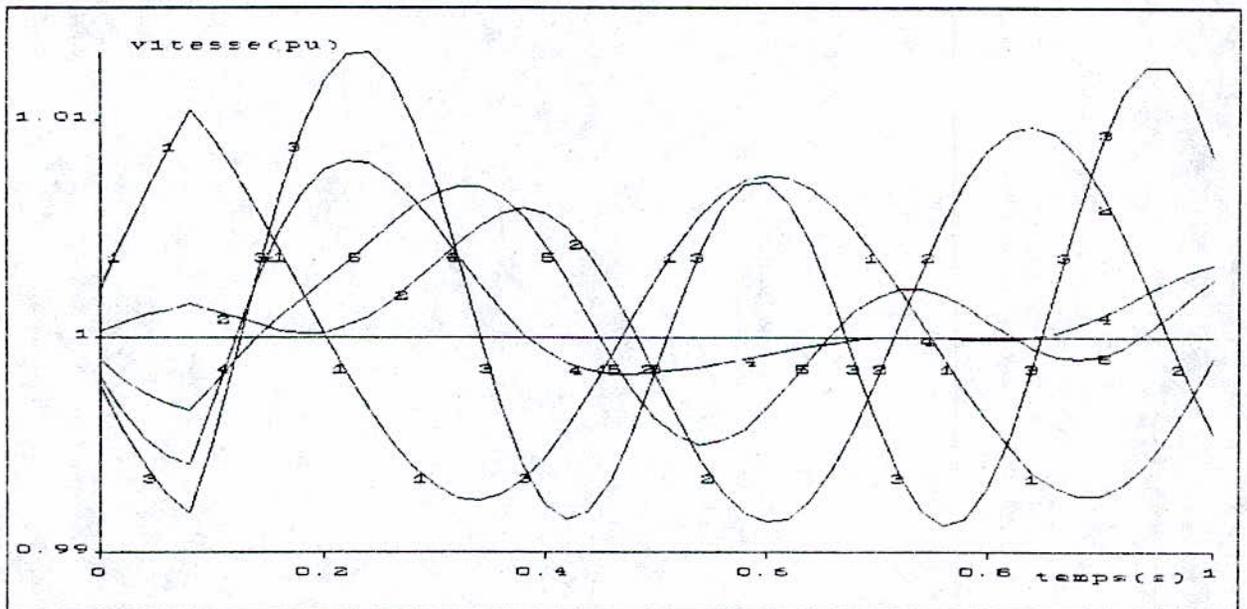
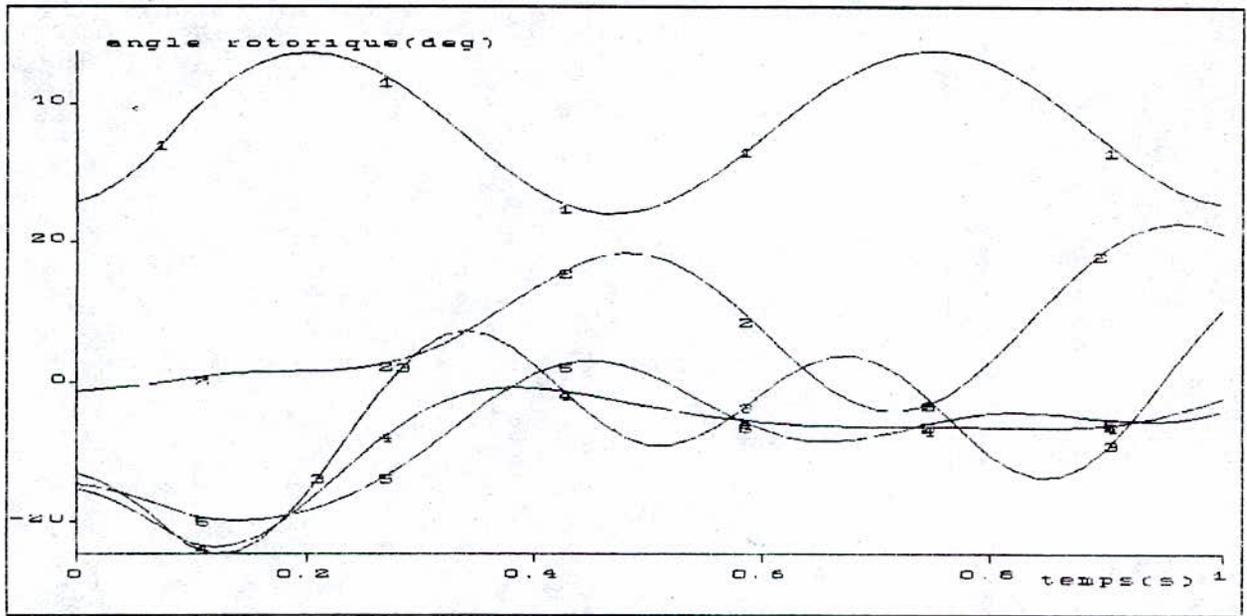


Figure IV.2 Défaut shunt
(biphasé au noeud 2)

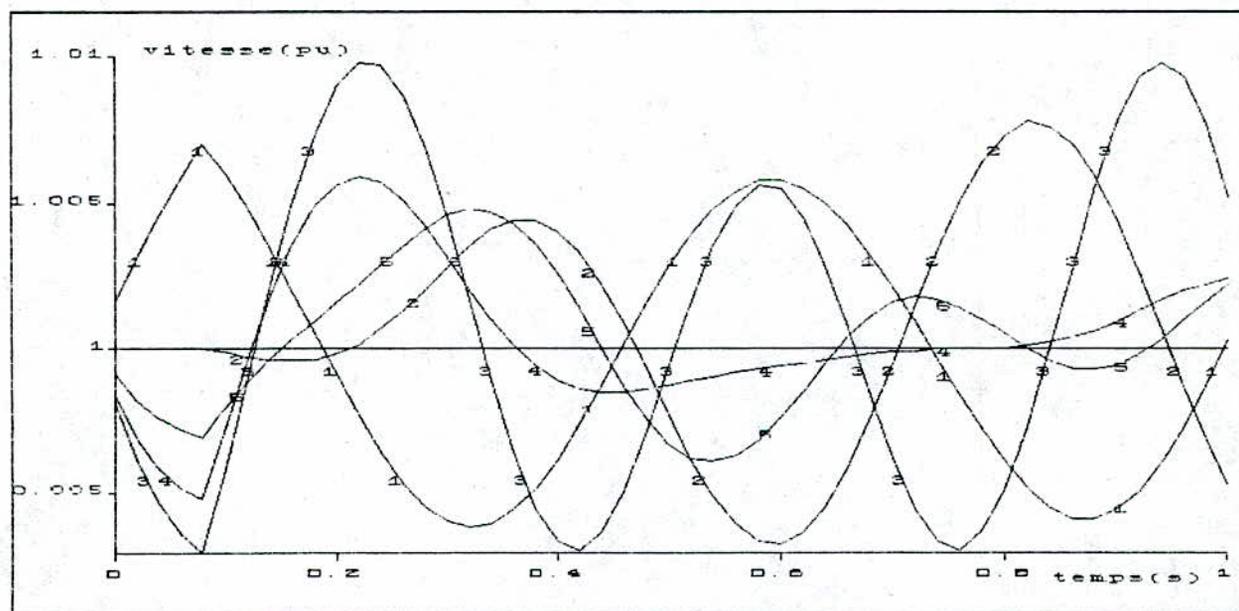
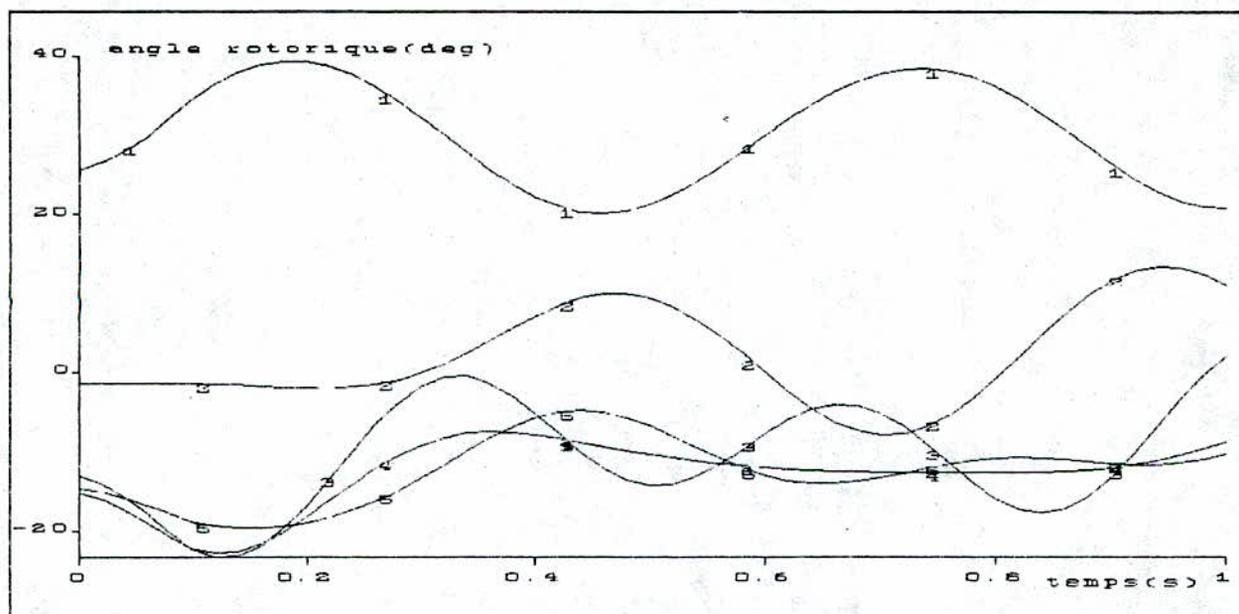


Figure IV.3 Défaut shunt (biphasé-terre au noeud 2)

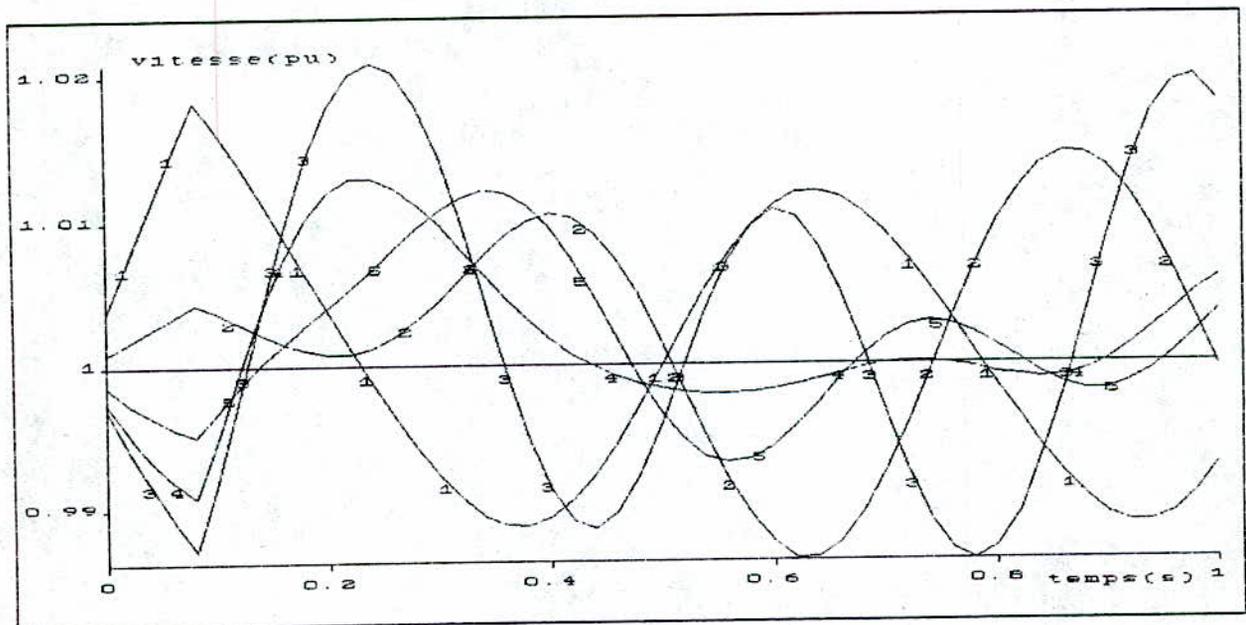
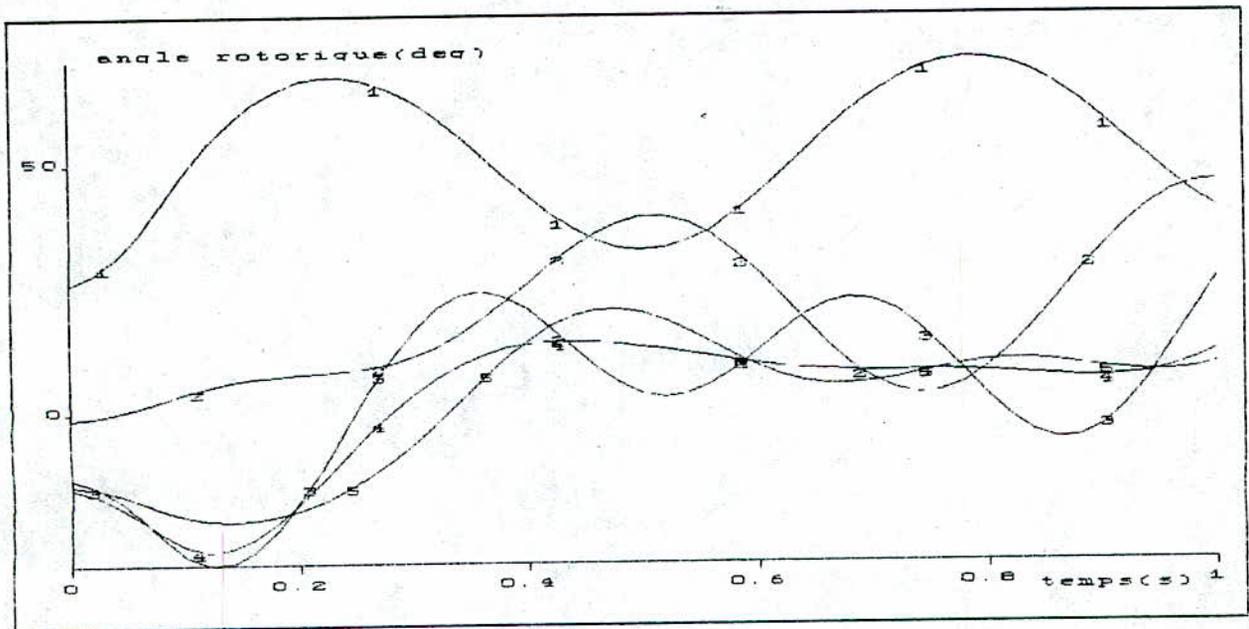


Figure IV.4 Défaut shunt
(triphasé-terre au noeud 2)

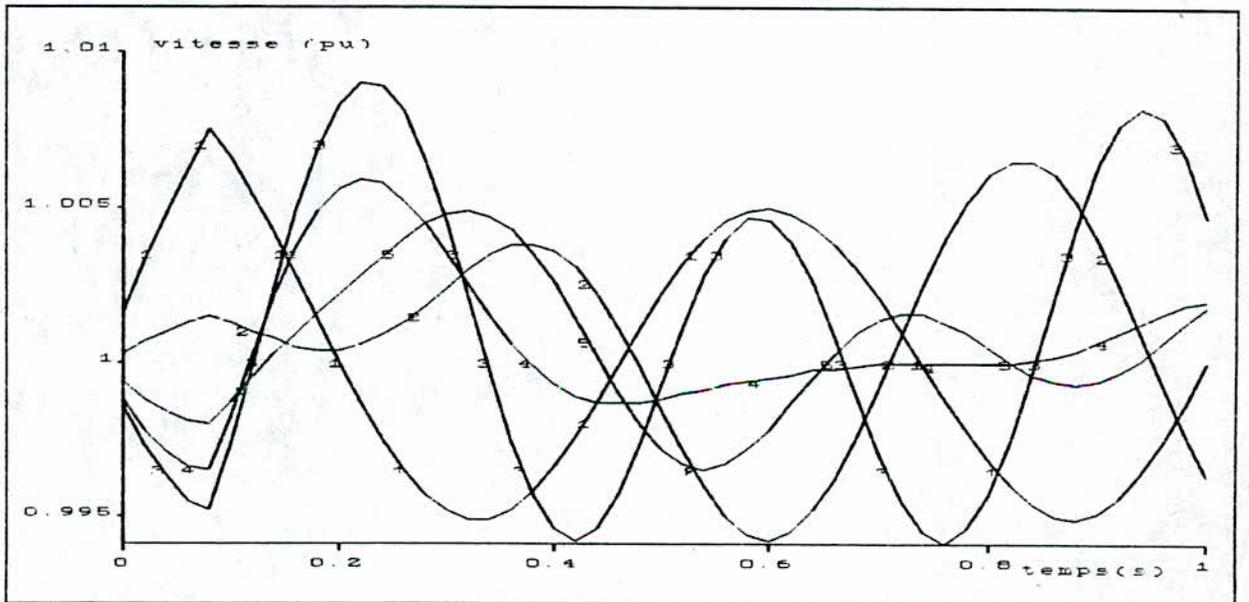
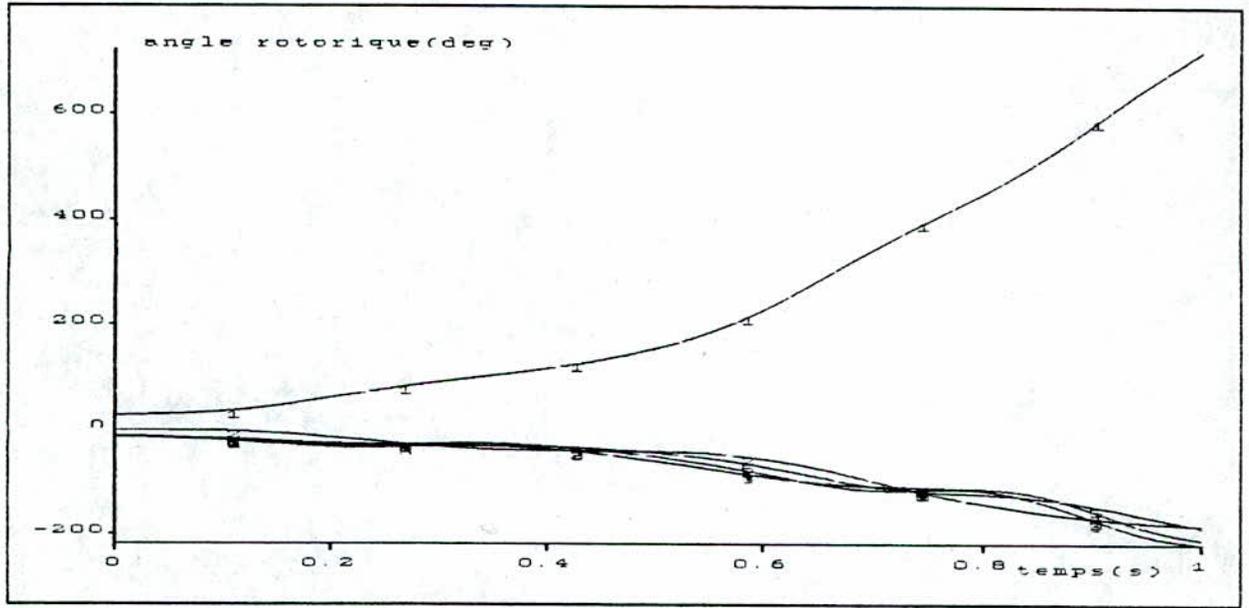


Figure IV.5 Défaut shunt
(monophasé-terre au point D de la ligne 1-2)

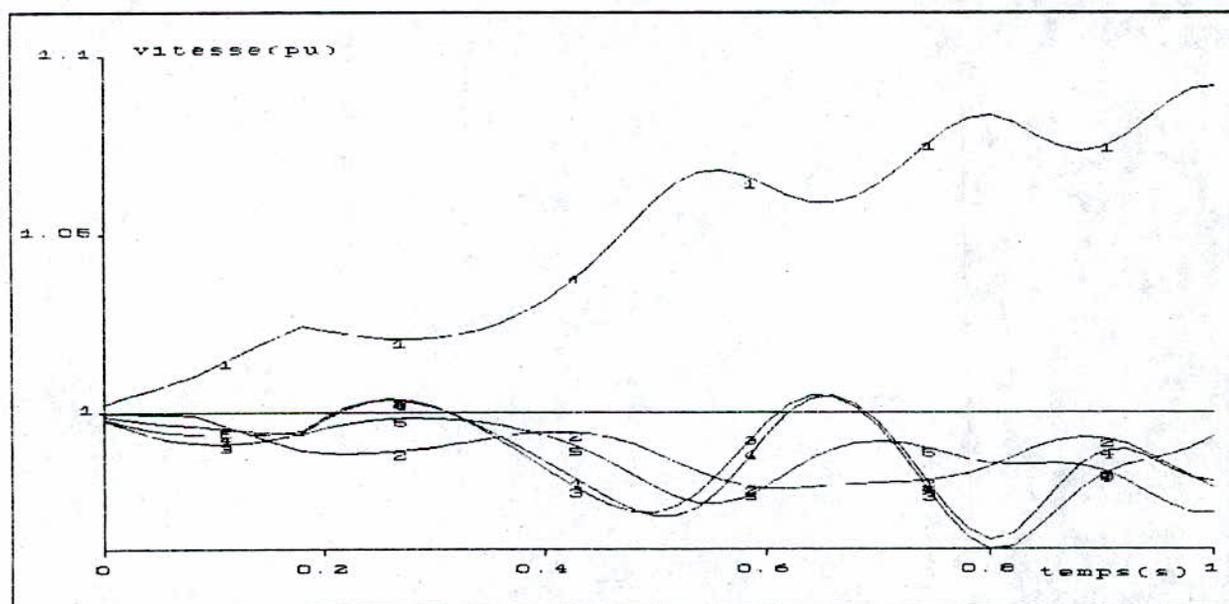
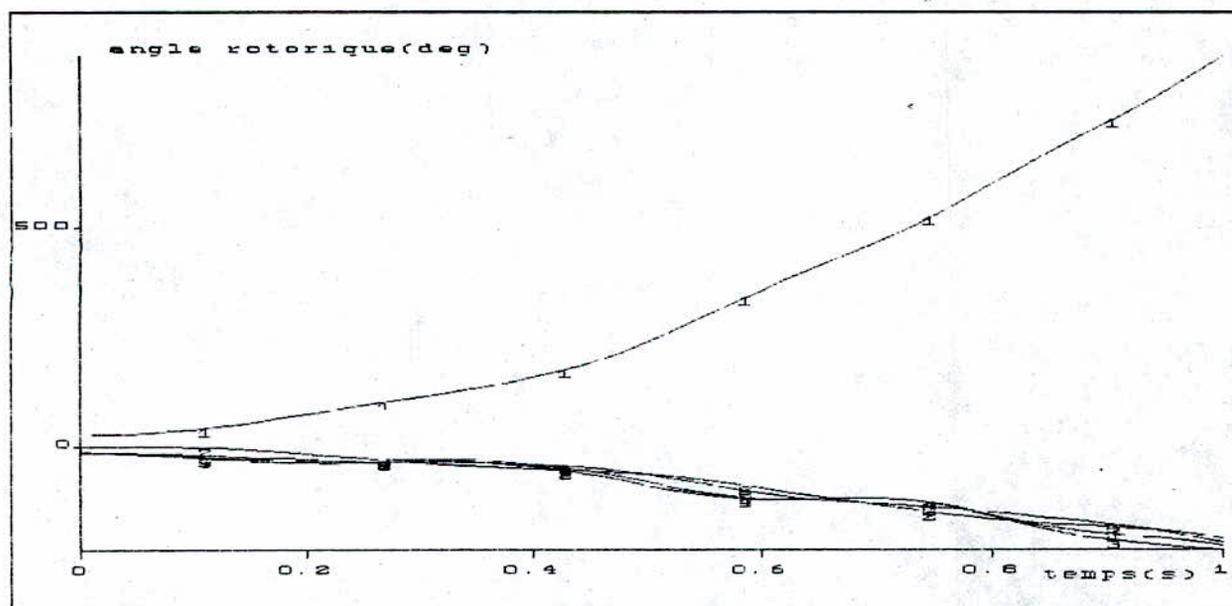


Figure IV.6 Défaut shunt
(biphasé au point D de la ligne 1-2)

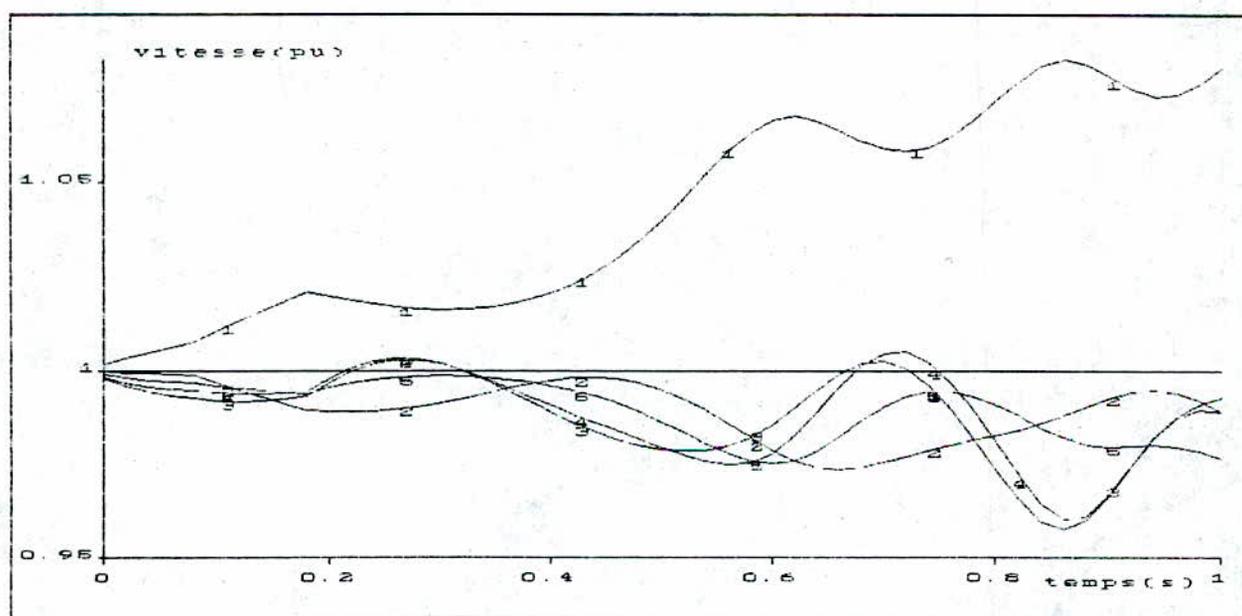
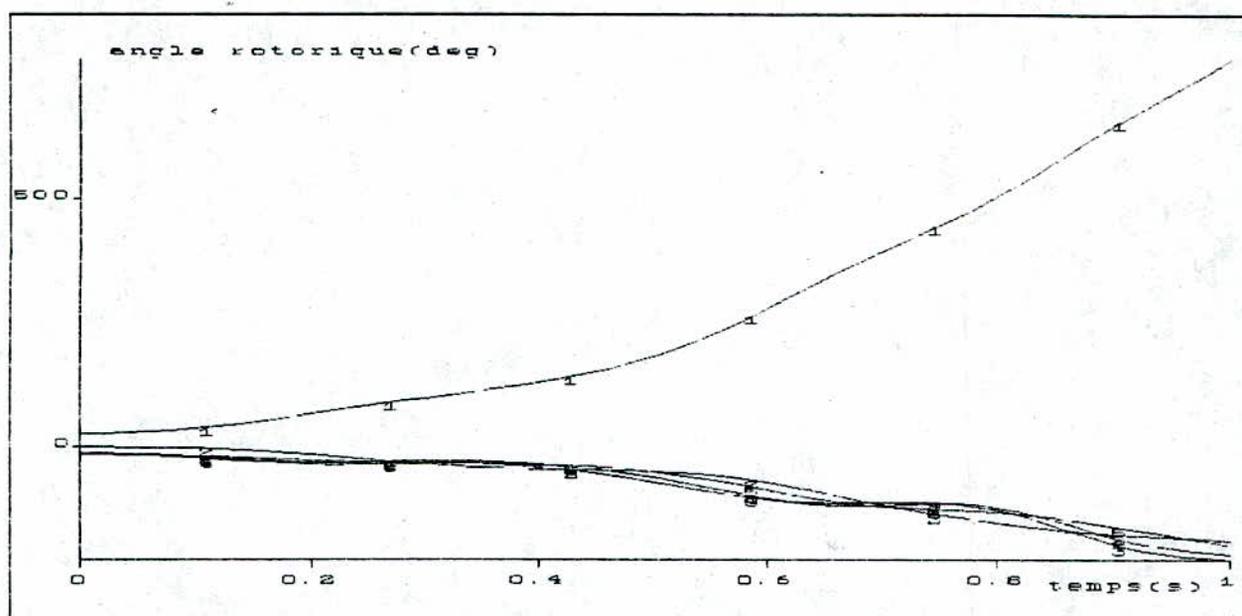


Figure IV.7 Défaut shunt
(biphasé-terre au point D de la ligne 1-2)

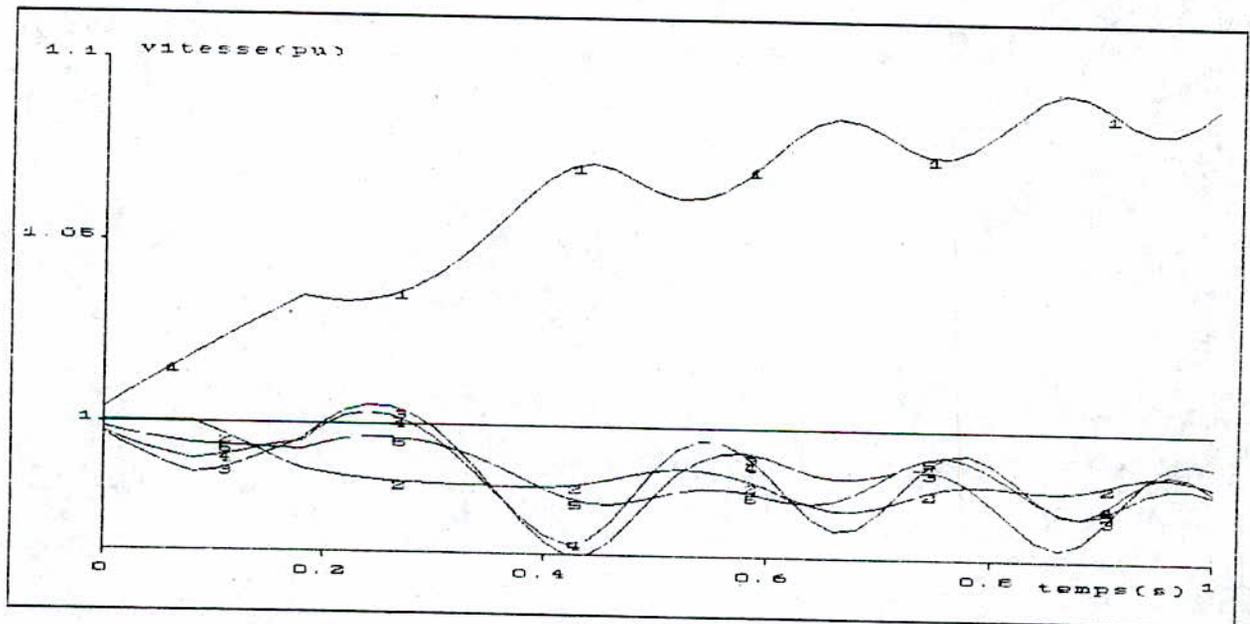
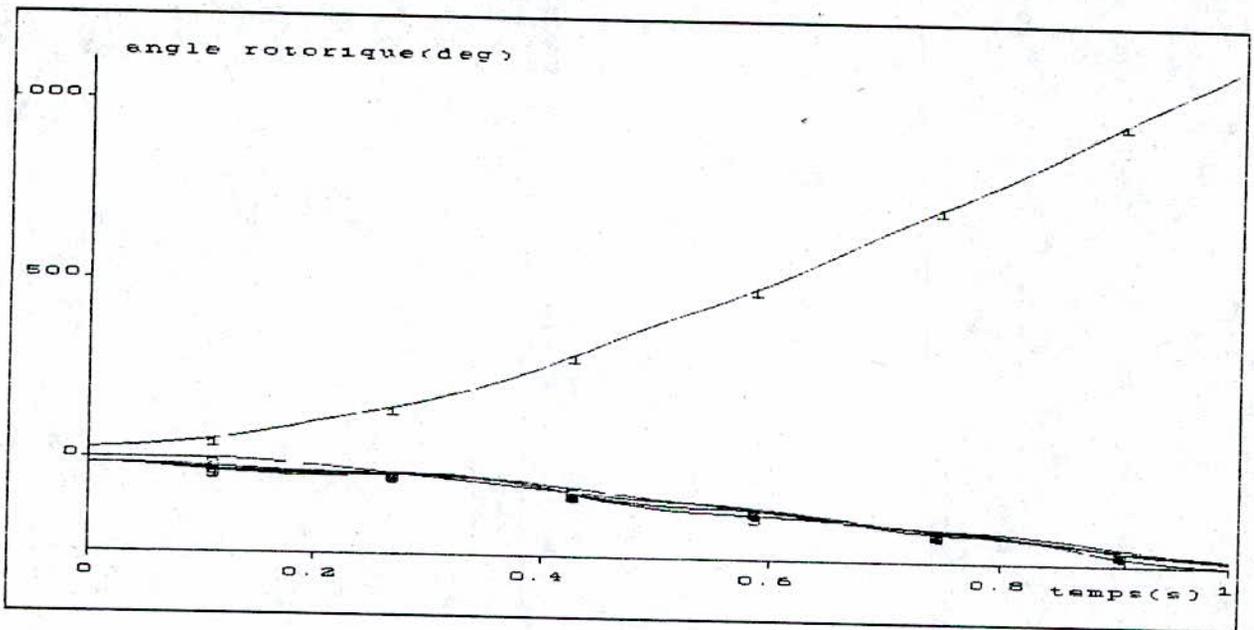


Figure IV.8 Défaut shunt
(triphasé-terre au point D de la ligne 1-2)

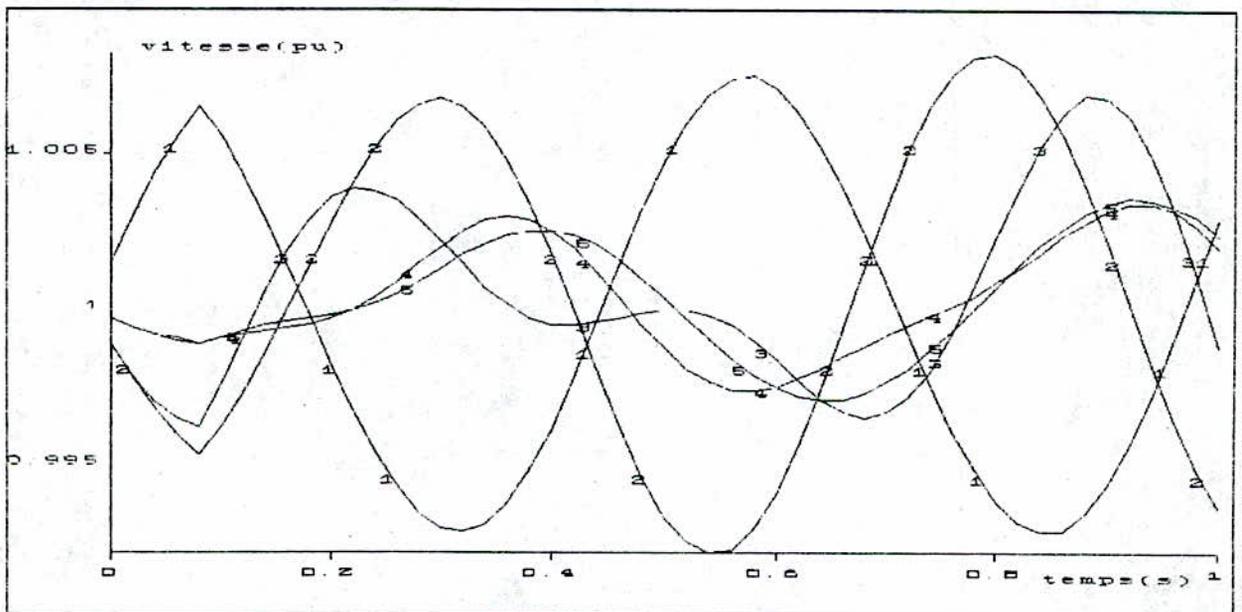
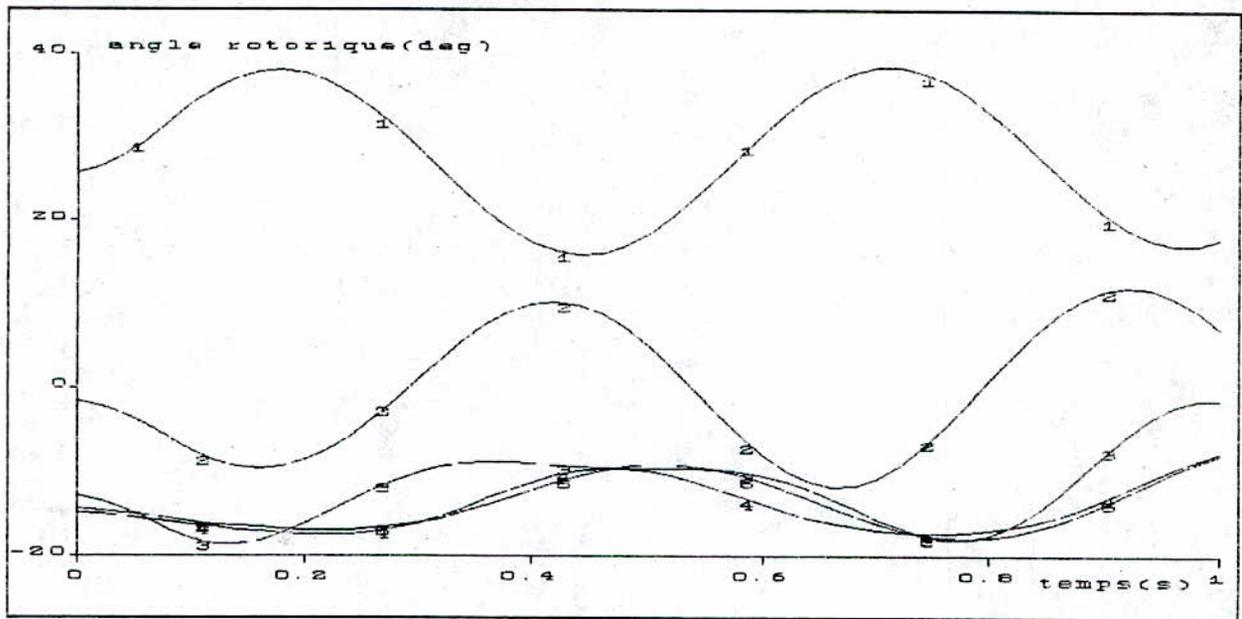


Figure IV.9 Défaut série
(ouverture d'une phase de la ligne 1-2)

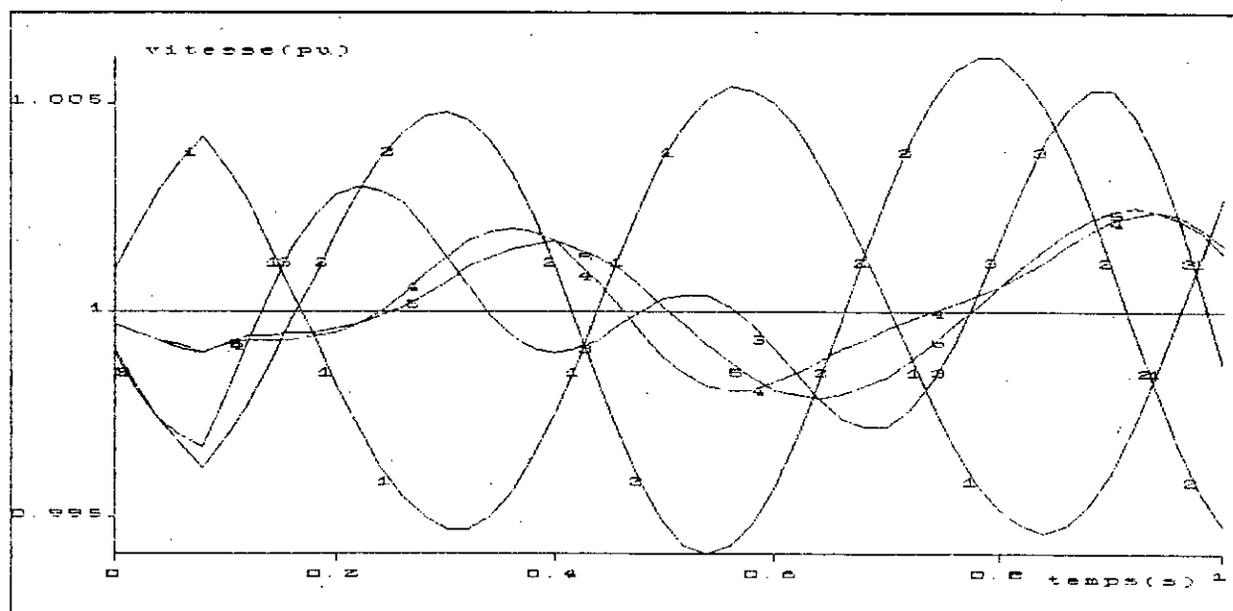
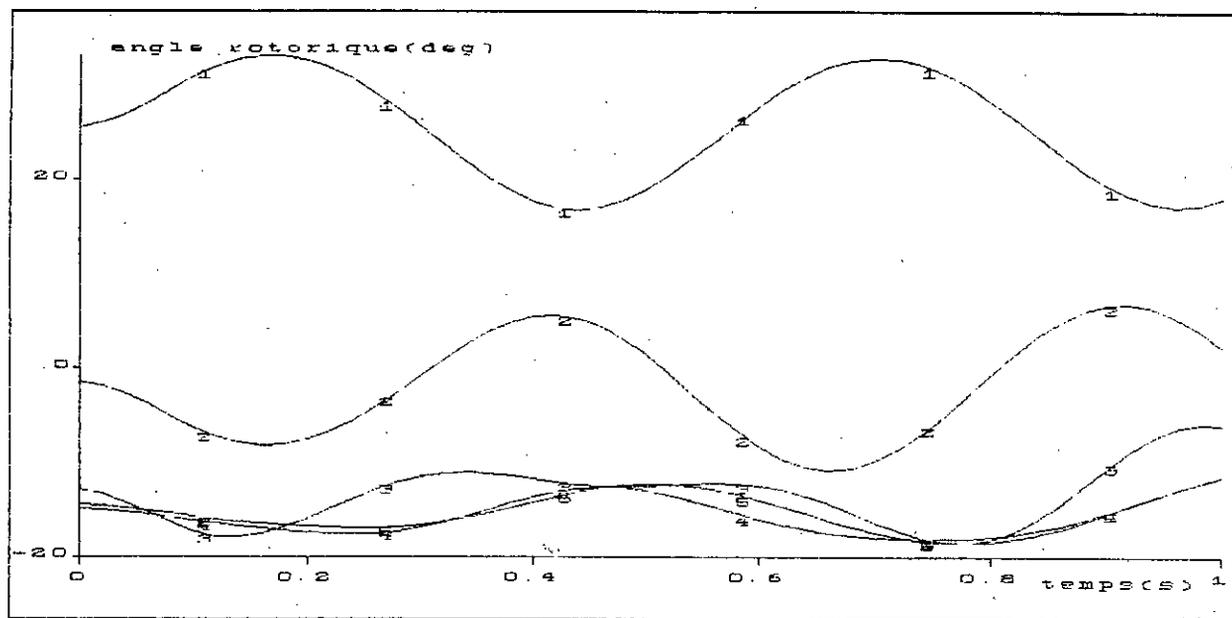


Figure IV.10 Défaut série
(ouverture de deux phases de la ligne 1-2)

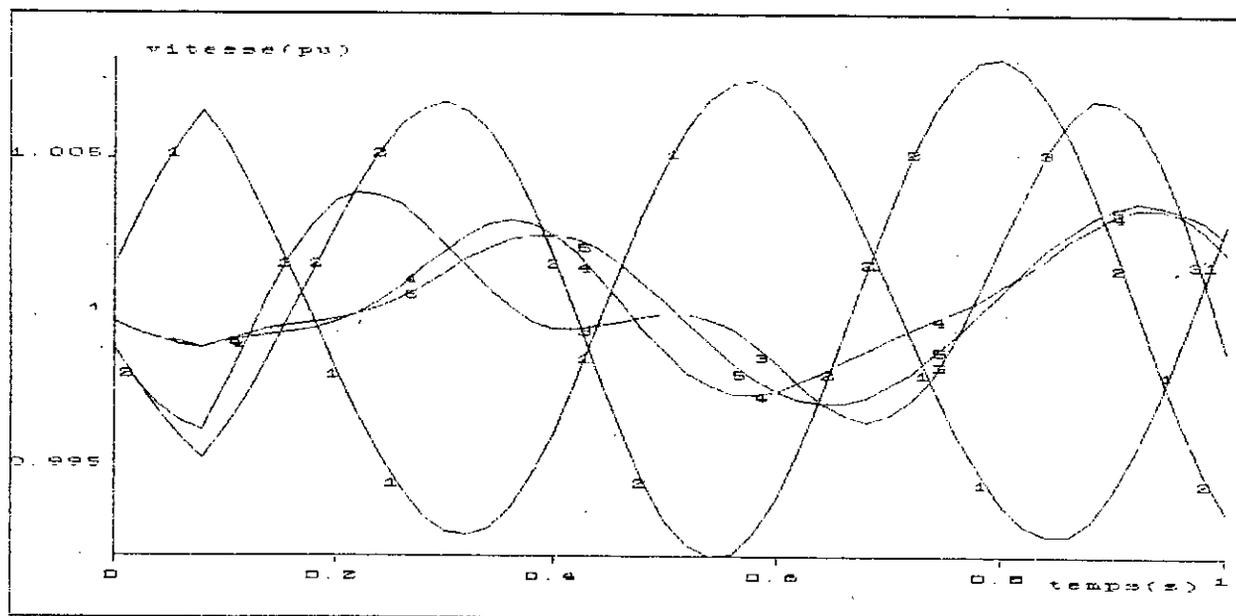
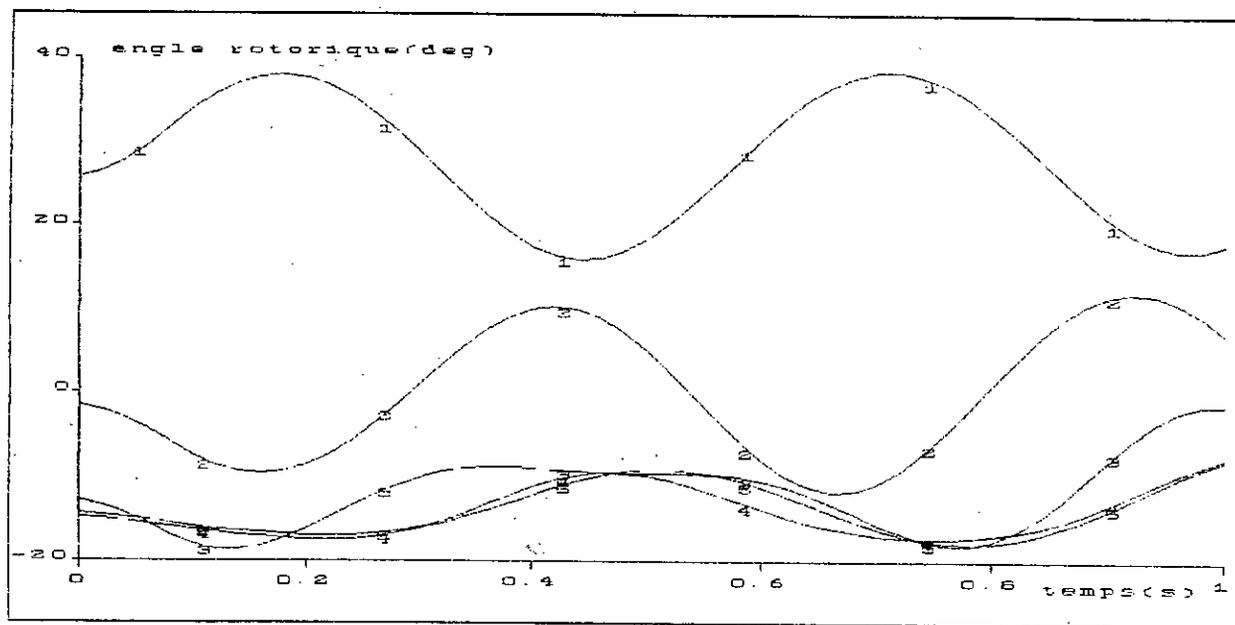
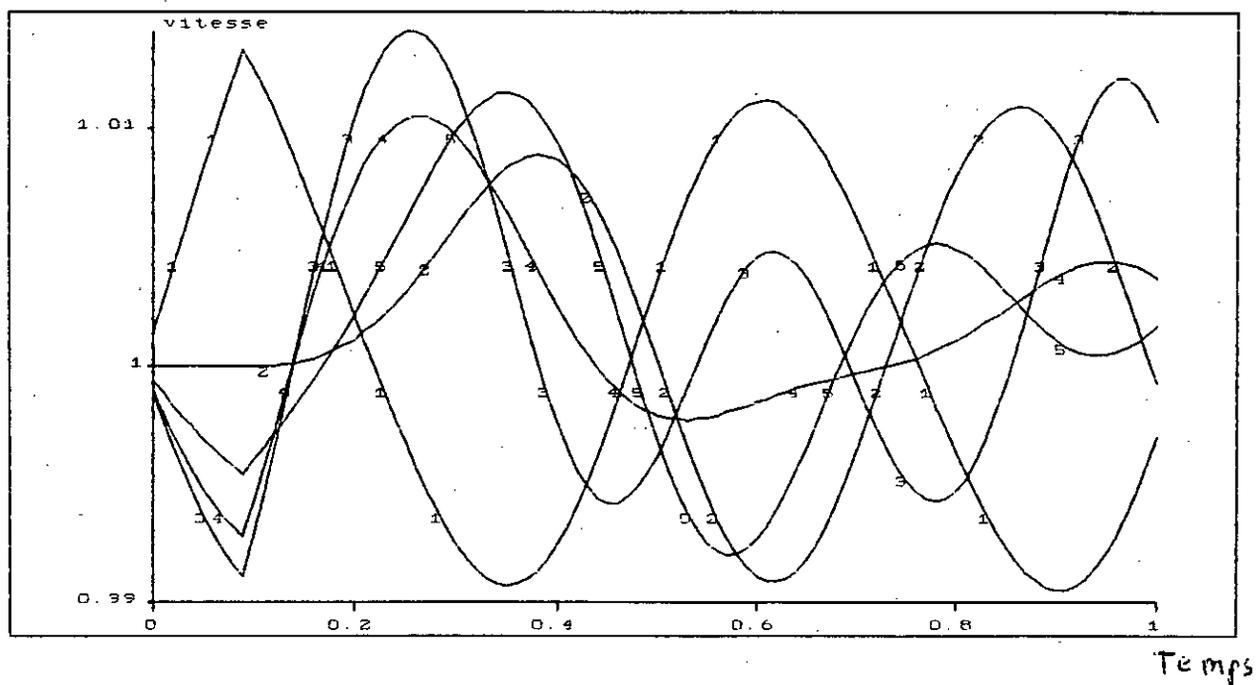
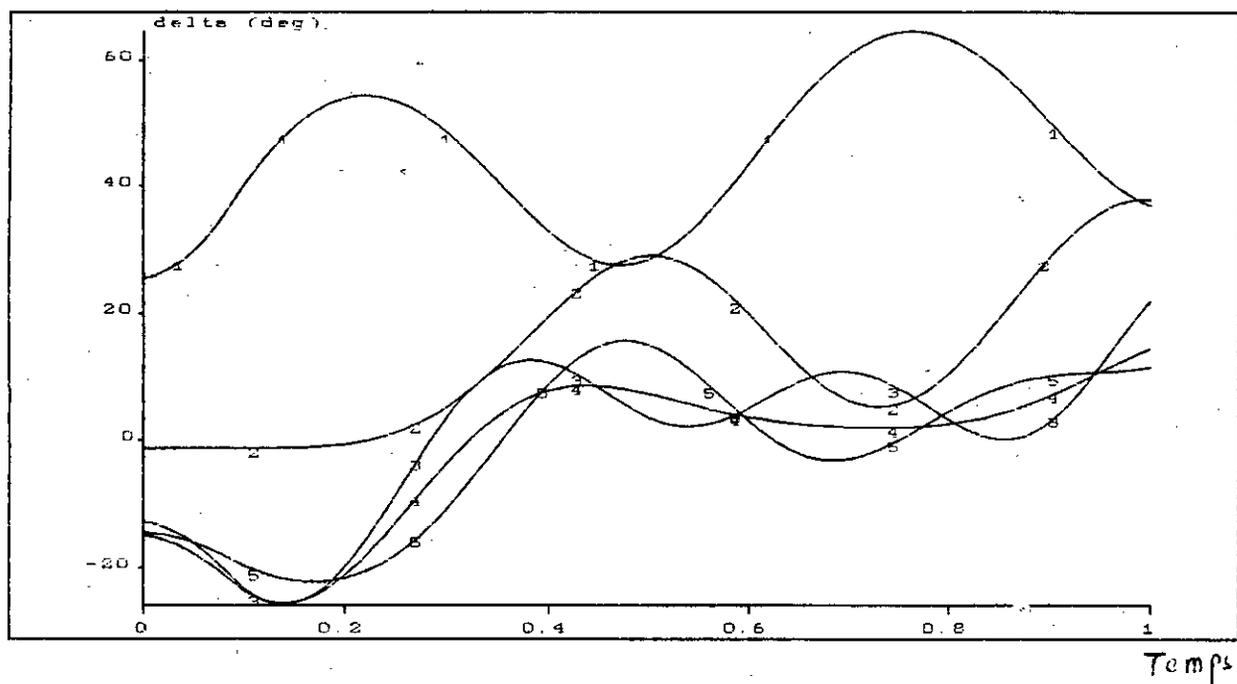
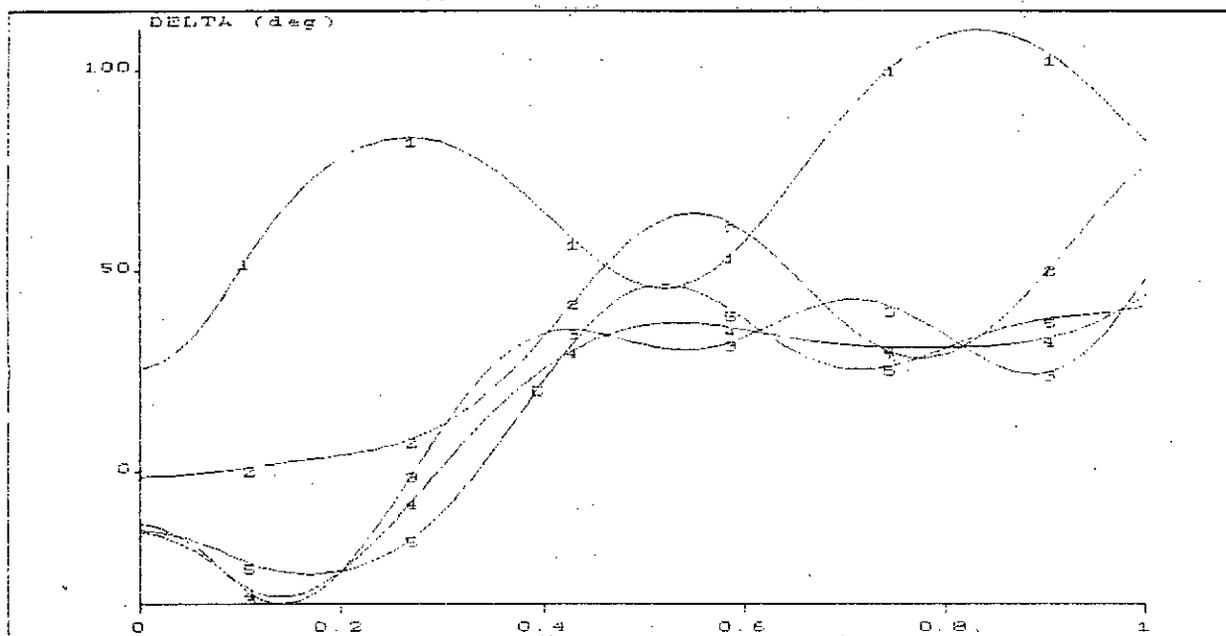


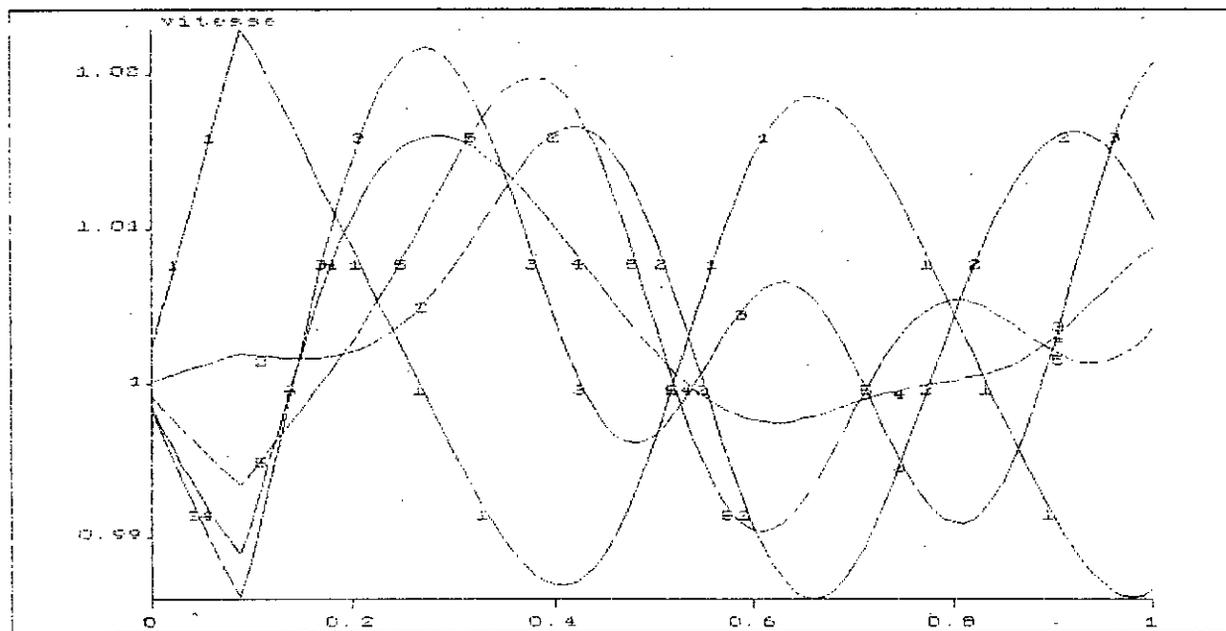
Figure IV.11 Défaut série
(ouverture de trois phases de la ligne 1-2)



FigIV.12 : Défaut simultané (bus1 - bus2) éliminé
à $t_0 = 0.1$ s connexion : serie - serie

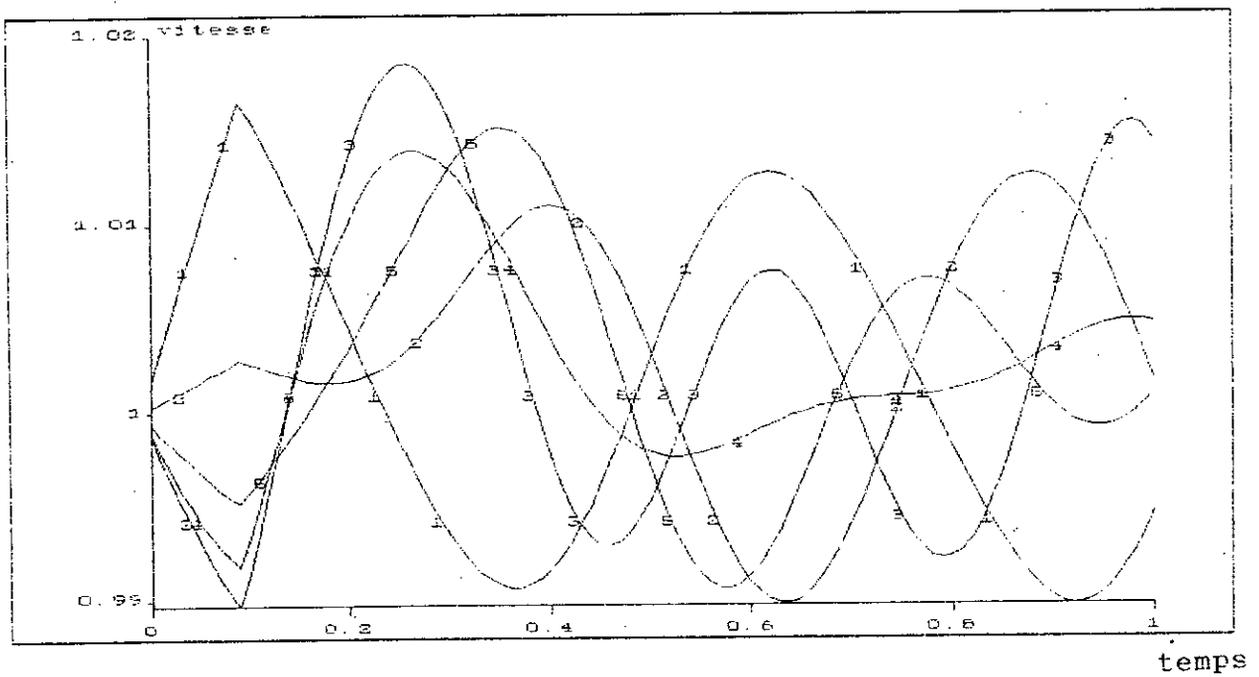
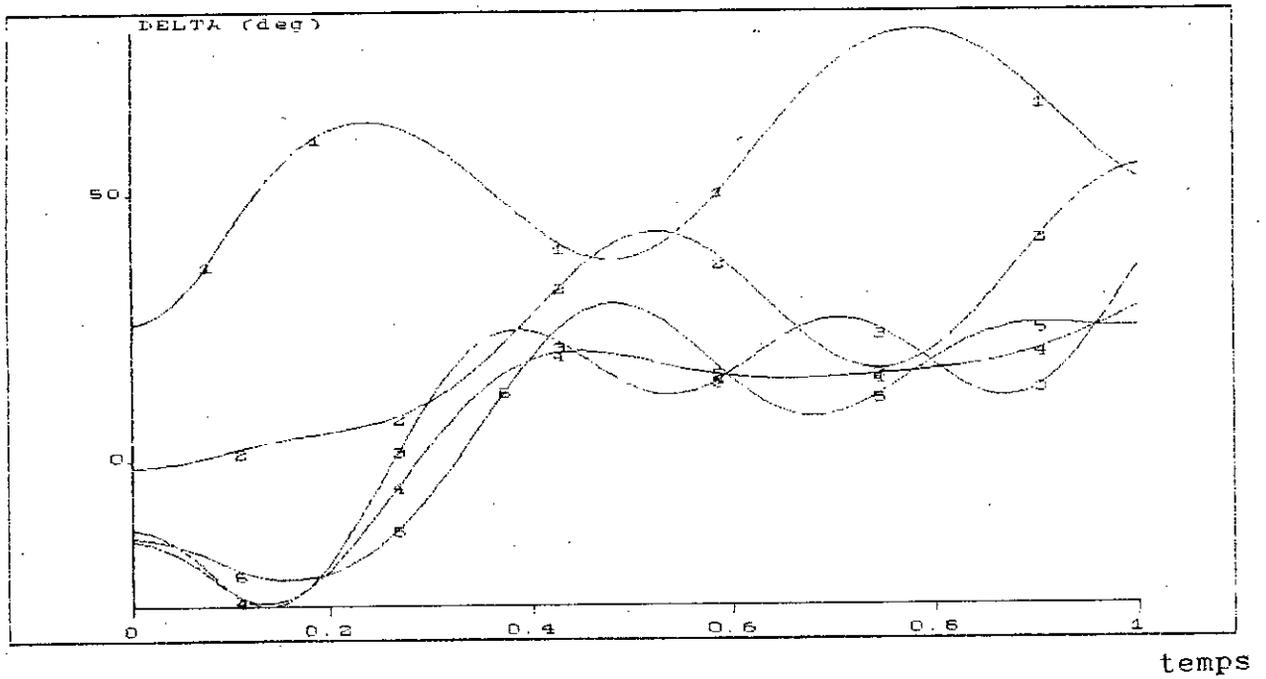


temps

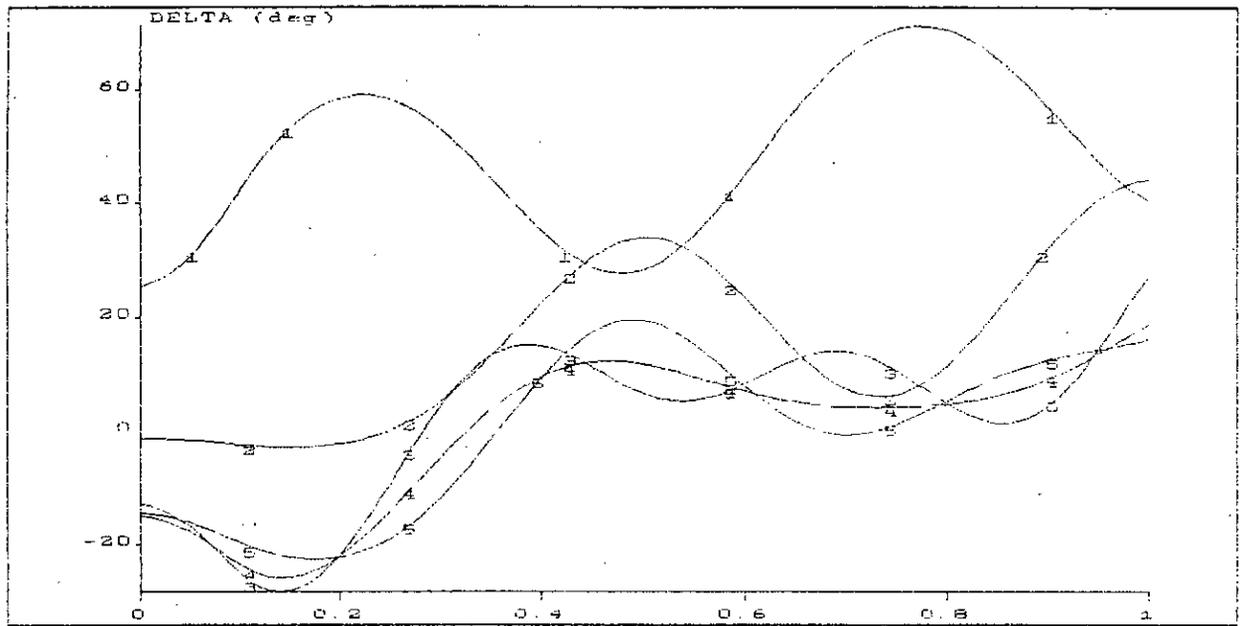


temps

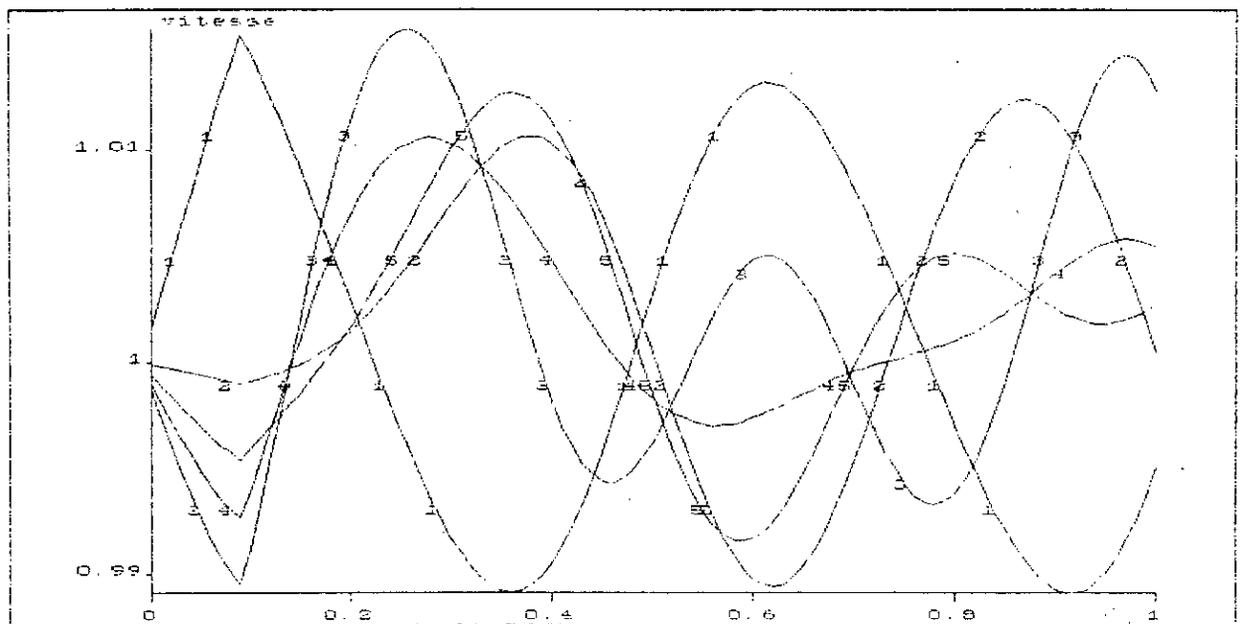
FigIV.13 : Défaut simultané (bus1 - bus2) éliminé à $t_e = 0.1$ s connexion : parallèle - parallèle



FigIV.14 : Défaut simultané (bus1 - bus2) éliminé à $t_0 = 0.1$ s connexion : serie -parallele

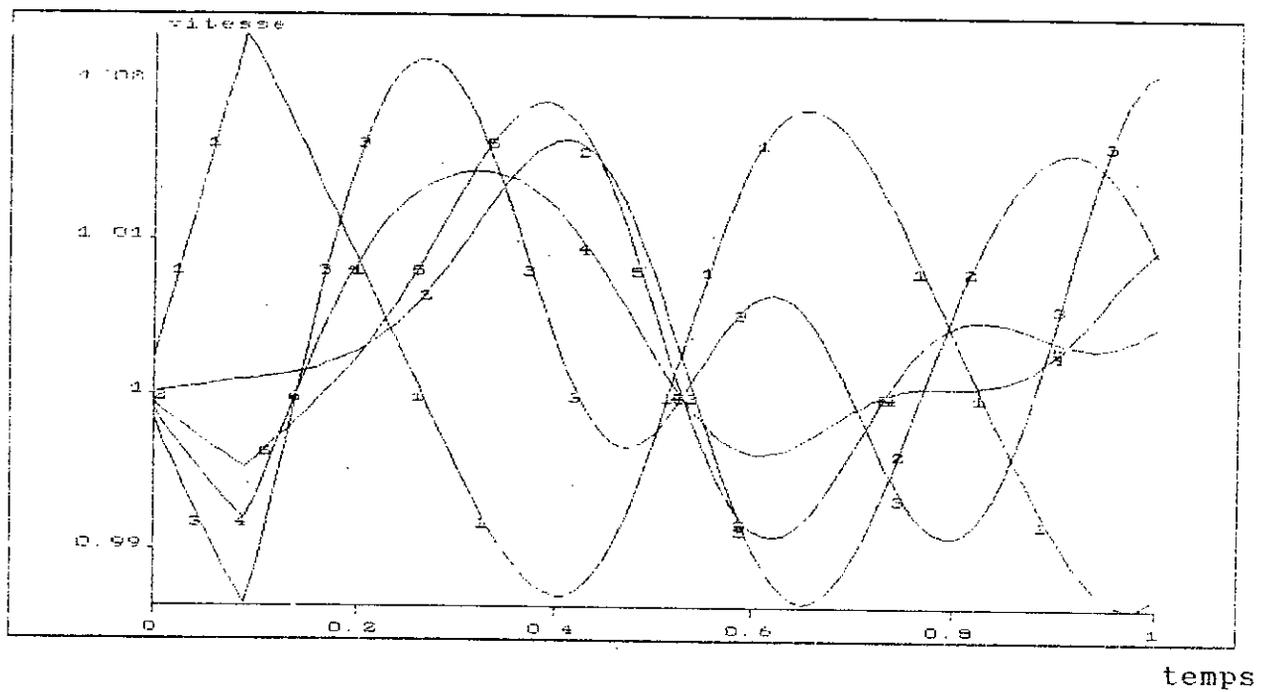
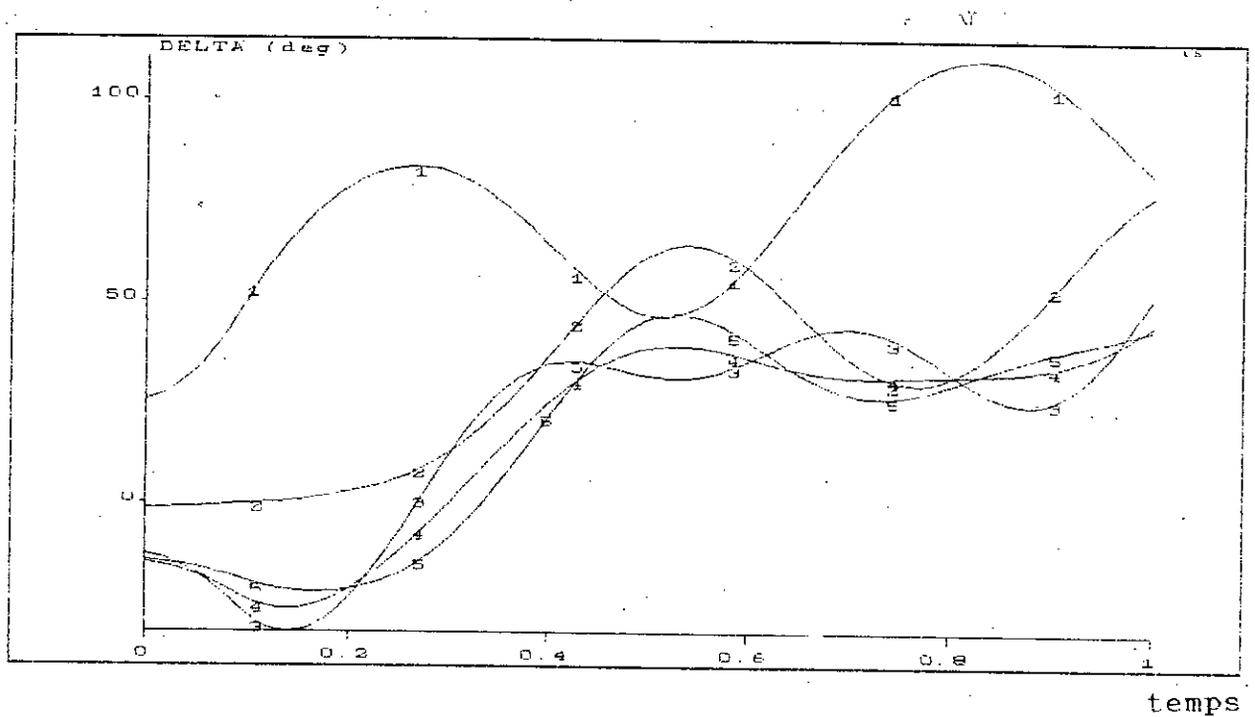


temps

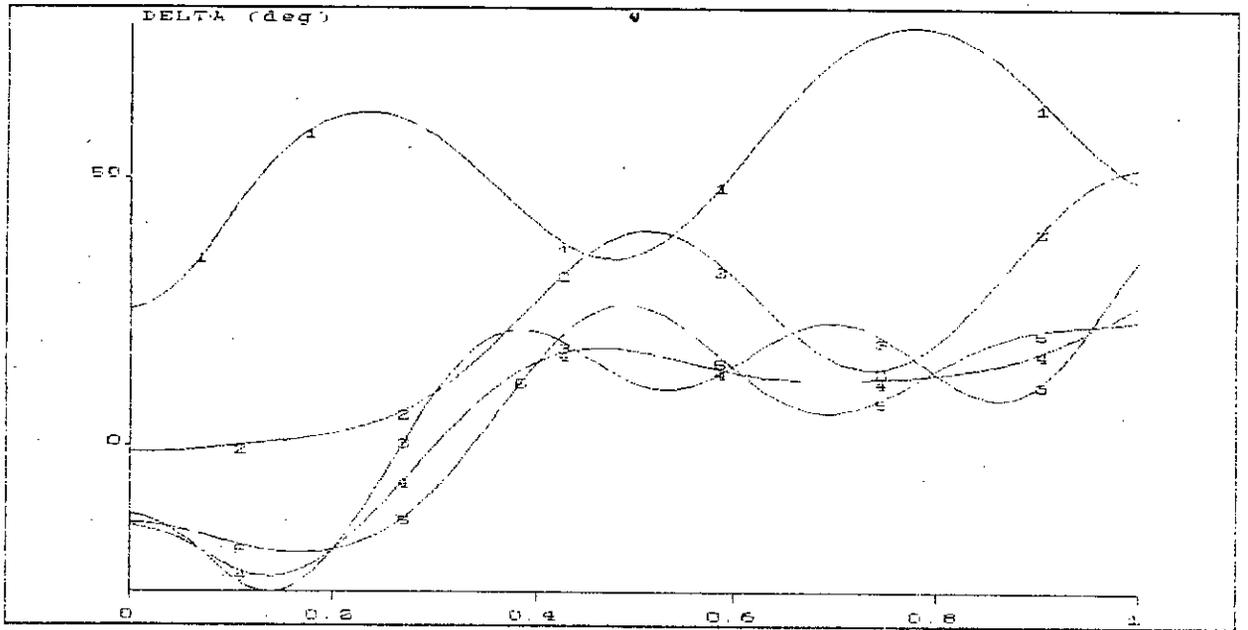


temps

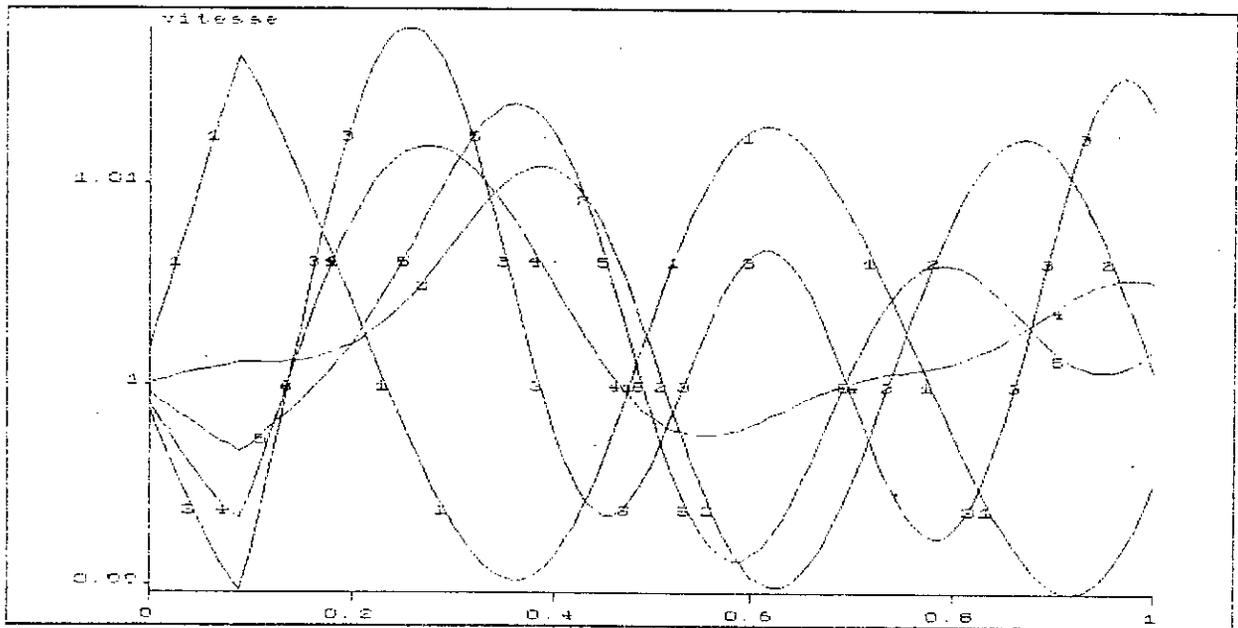
FigIV.15 : Défaut simultané (bus1 - bus2 , bus4) éliminé à $t_e = 0.1$ s connexion : serie - serie



FigIV.16 : Défaut simultanné (bus1 - bus2 , bus4) éliminé à $t_0 = 0.1$ s connexion : parallele - parallele

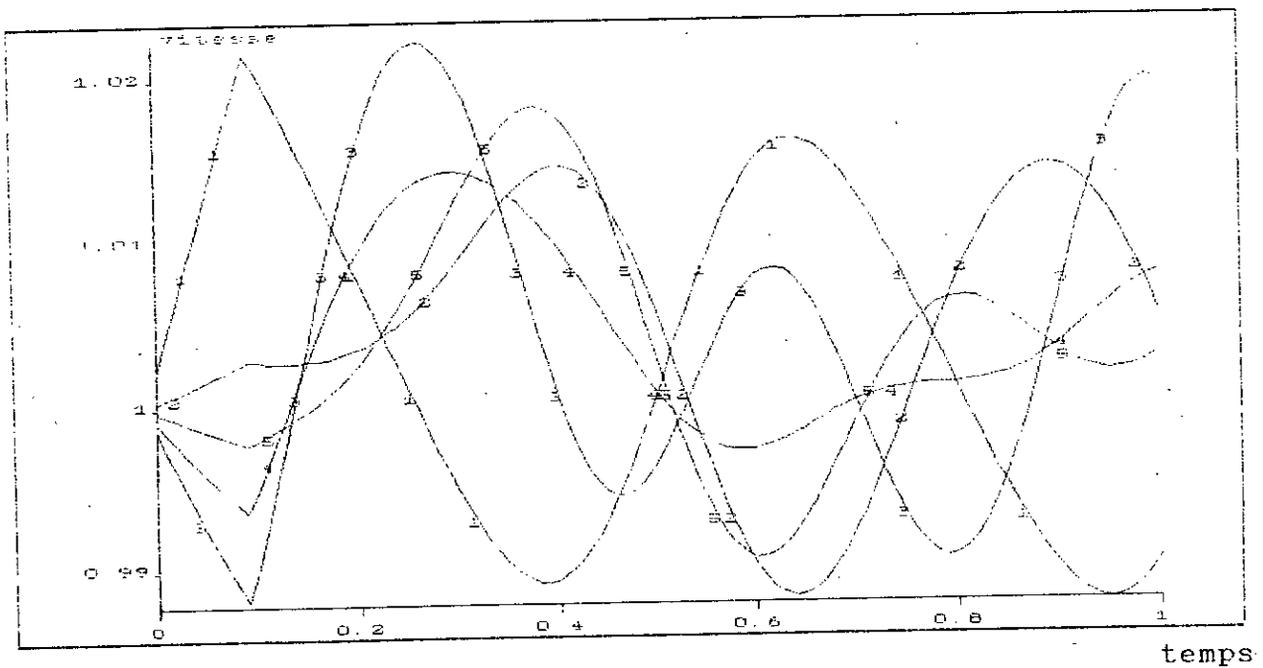
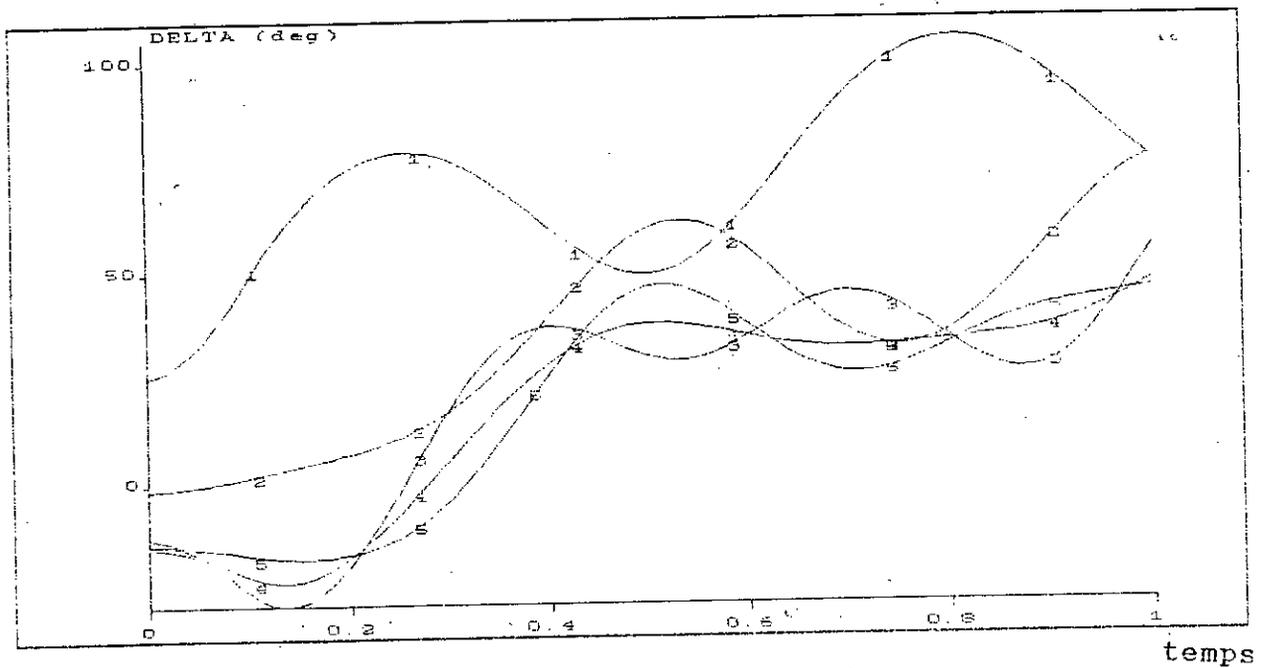


temps

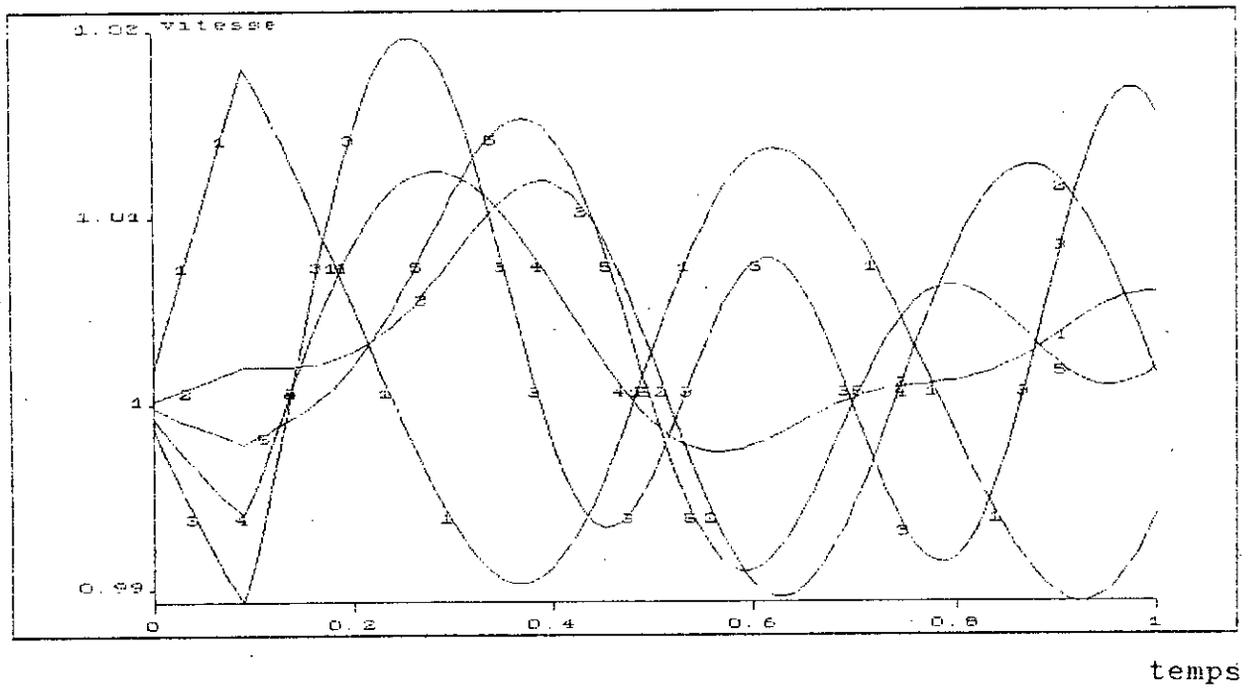
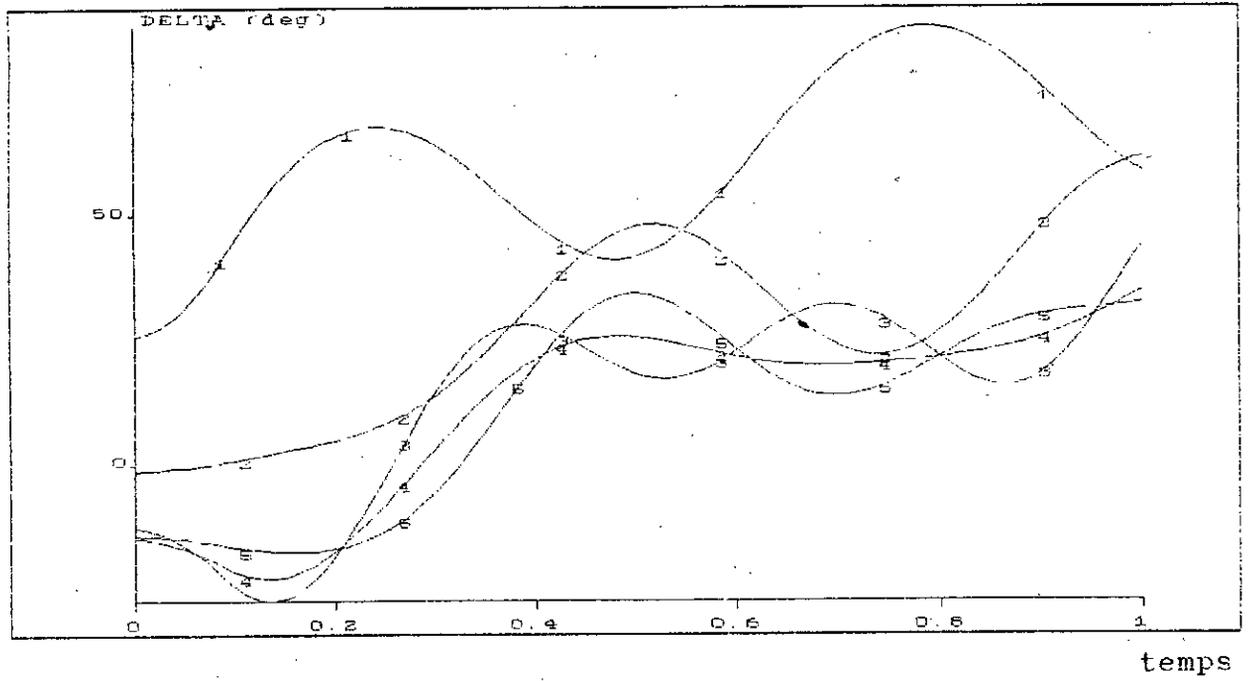


temps

FigIV.17 : Défaut simultanné (bus1 - bus2 , bus4 - bus5)
 éliminé à $t_e = 0.1$ s connexion : serie - serie



FigIV.18 : Défaut simultané (bus1 - bus2 , bus4 - bus5)
 éliminé à $t_e = 0.1$ s connexion : parallele - parallele



FigIV.19 : Défaut simultané (bus1 - bus2 , bus4 - bus5)
 éliminé à $t_c = 0.1$ s connexion : serie -parallele

CONCLUSION GENERALE

Les simulations effectuées permettent d'établir que :

1- Tout réseau perturbé engendre un nouvel état de fonctionnement qui est illustré par l'évolution de la vitesse angulaire et de l'angle interne du rotor des machines reliées au réseau en fonction du temps.

2- La cause essentielle du régime transitoire intervenant dans le réseau est un déséquilibre entre la puissance générée par les groupes tournants et celle demandée par les consommateurs .

3- La perte de stabilité se traduit par des variations importantes de la vitesse et de l'angle interne ...etc

4- L'intérêt de l'élimination du défaut en deux stades est d'assurer la sélectivité des protections.

Enfin pour terminer nous souhaitons que ce travail soit l'amorce à d'autres plus importants dans le domaine de la stabilité des réseaux électriques qui incluent les défauts simultanés plus de deux défauts .

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

[1] OLLEI. ELGERDE ,Electric energi systems theory:An introduction, McGraw-Hill ,inc.,USA ,1971.

[2] B.M . Weedy, Electric power systéms (second edition), John wiley and sons, 1972.

[3] G.W stagg,A.H El-Abiad,Computer methods in power system analysis ,McGraw-Hill ,inc .,USA ,1968.

[4] A.Bensenouci,M.E.H. Aggoune, Modélisation des réseaux électriques, ENP,Algerie ,1990.

[5] Stevenson. w.d.Jr,Elements of power system analysis , McGraw-Hill, new york ,1968.

[6] P.M. Anderson ,Analysis of faulted power systems, the iowa state University Press, Ames, IOWA, USA,1973.

[7] A,Bensenouci,et al ,implémentation des défauts non symétriques dans les logiciels d'analyse de la stabilité transitoire,1ère conférence régionale des pays arabes ,(Egypte),cigre,22,23 janvier,1995,caire.

[8] Etude et modélisation des défauts non symétriques ,rapport N 1 RD/juillet 93,Direction de Recherche et développement,SONALGAZ,Algerie.

[9] P.M. Anderson ,Analysis of simultaneous fault by two port net work theory, IEEE, winter power meeting,new york,NY january31-february 5,1971.

[10] Z.X. Han, Generalized method of analysis of simultaneous faults in electric power system, IEEE, Transactions on power Apparatus and systems, Vol.PAS-101, NO. 10,october 1982 pp.3933-3942

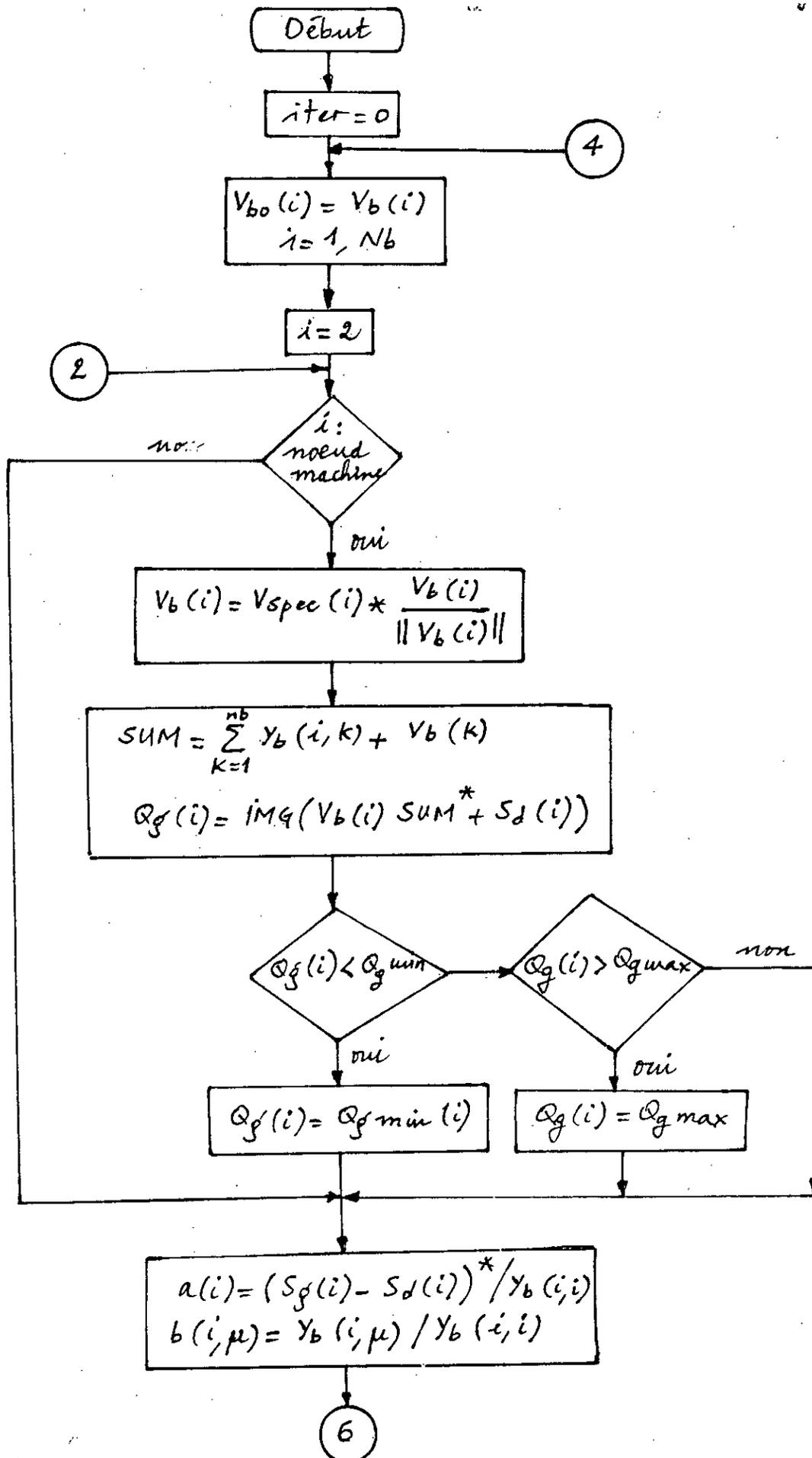
[11] P.M. Anderson,A. FOUAD, power system control and stabilité, the iowa state University Press, Ames,IOWA, USA, 1977.

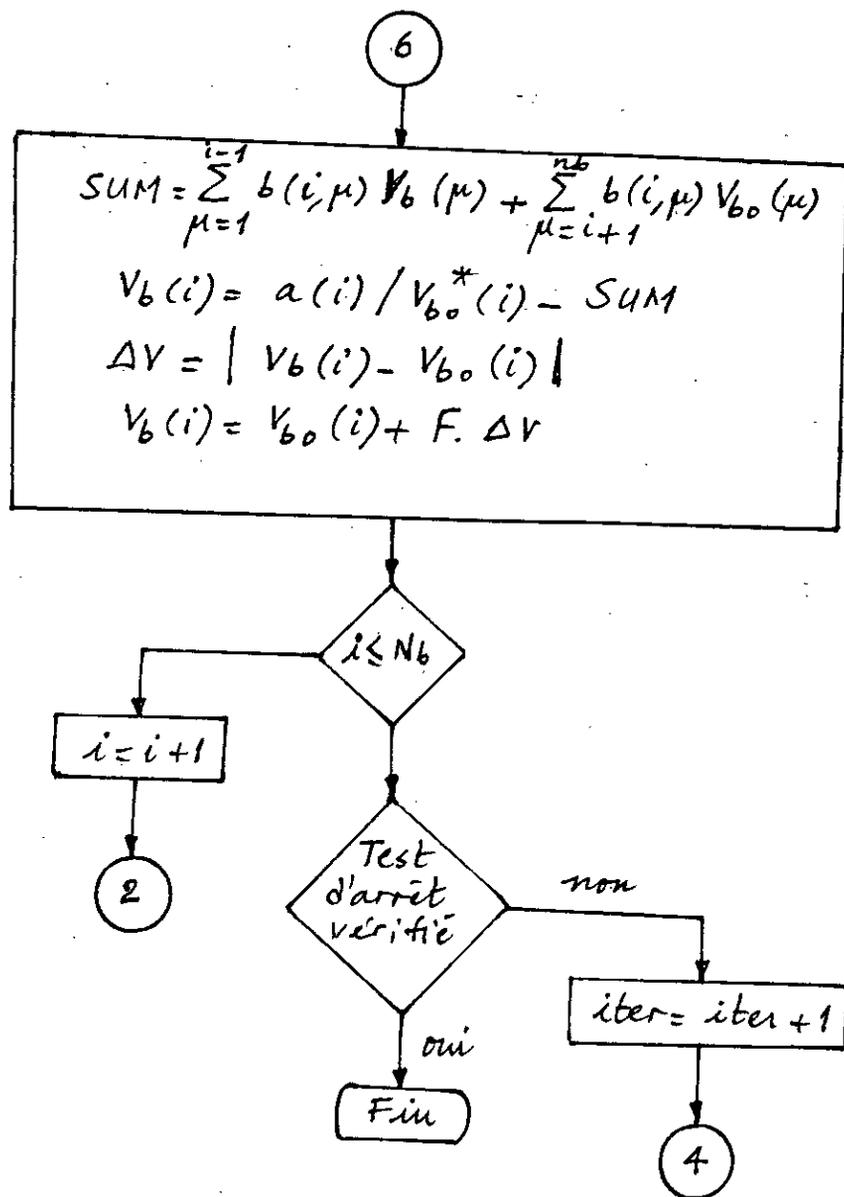
[12] Monsef.Berbiche, stabilité transitoire des réseaux d'énergie. approche par reconnaissance des formes statiques, Maitre es-sciences. soutenue le 05/07/90 à TOULOUSE.

[13] A.Bensenouci,K.Mekhnache,K.Khati , Etude de la stabilité transitoire d'un réseau électrique H.T ,ENP ,projet de fin d'étude promotion 91

[14] M.Moudjahed,Bouteldja,Moulai,Etude de la stabilité d'un réseau électrique H.T, USTHB, projet de fin d'études ,promotion 90.

ANNEXES





Organigramme de calcul de l'écoulement de puissance par la méthode de "GAUSS SIEDEL"

ANNEXE A2:

CALCUL DES GRANDEURS DU RESEAU EN PRESENCE
DE DEFAUTS NON SYMETRIQUES :

A2.1 DEFAUTS SHUNTS:

A2.1.a CALCUL DES COURANTS DE COURT-CIRCUIT :

Les défauts non symétriques sont modélisés par le circuit équivalent suivant:

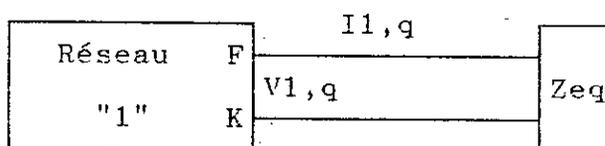


Schéma modélisant les défauts non symétriques.

Où

$V_{1,q}$: est la tension positive de défaut au noeud q.
 $I_{1,q}$: est le courant positif de défaut au noeud q.
 Z_{eq} : est l'impédance équivalente vue par le circuit direct au noeud de défaut q.

1. DEFAUT MONOPHASE - TERRE (SLGF) :

$$Z_{eq} = Z_{0,qq} + 3Z_f + Z_{2,qq}$$

$$I_{1,q} = \frac{V_{1,q}}{Z_{eq}}$$

$$I_{2,q} = \frac{n_1}{n_2} I_{1,q}$$

$$I_{0,q} = \frac{n_1}{n_0} I_{1,q}$$

2. DEFAUT BIPHASE (LLF) :

$$Z_{eq} = Z_{2,qq} + Z$$

$$I_{1,q} = \frac{V_{1,q}}{Z_{eq}}$$

$$I_{2,q} = \frac{n_1}{n_2} I_{1,q}$$

$$I_{0,q} = 0$$

3. DEFAUT BIPHASE-TERRE (LLGF) :

$$Z_{eq} = \frac{(Z_{2,qq} + Z)(Z_{0,qq} + 3Z_f + Z)}{Z_{0,qq} + Z_{2,qq} + 3Z_f + 2Z}$$

$$I_{1,q} = \frac{V_{1,q}}{Z_{eq}}$$

$$I_{2,q} = -\frac{n_1}{n_2} \frac{V_{1,q} - Z I_{1,q}}{Z_{0,qq} + 3Z_f + Z}$$

$$I_{0,q} = -\frac{n_1}{n_0} \frac{V_{1,q} - Z I_{1,q}}{Z_{0,qq} + 3Z_f + Z}$$

4. DEFAUT TRIPHASE (3LGF) :

$$Z_{eq} = Z_f$$

$$I_{1,q} = \frac{V_{1,q}}{Z_{eq}}$$

$$I_{2,q} = 0$$

$$I_{0,q} = 0$$

A2.1.b CLACUL DES TENSIONS SYMETRIQUES :

$$V_{1,i} = V(i)$$

$$V_{0,i} = -Z_{0,iq} I_{0,q}$$

$$V_{2,i} = -Z_{2,iq} I_{2,q}$$

Où

$V(i)$: tensions obtenues par la solution de l'écoulement de puissance.

i : désigne un noeud quelconque du réseau.

q : noeud en défaut

A2.2 DEFAUT SERIE :

Dans le cas d'un défaut série, deux noeuds p et q quelconque du réseau sont affectés, il s'agit de deux courants I_p et I_q injectés respectivement aux noeuds p et q .

A2.2.a CALCUL DES COURANTS SYMETRIQUES :

1. DEFAUT : OUVERTURE D'UNE PHASE (1LO) :

$$Z_{eq} = \frac{Z^0 Z^2}{Z^0 + Z^2}$$

$$Z^0 = Z_{0,pp} + Z_{0,qq} - Z_{0,pq} - Z_{0,qp}$$

$$Z^2 = Z_{2,pp} + Z_{2,qq} - Z_{2,pq} - Z_{2,qp}$$

$$I_{1,p} = I_{1,q} = - \frac{V_{1,p} - V_{1,q}}{Z_{eq} + Z_{s1,pq}}$$

$$I_{2,p} = I_{2,q} = - \frac{V_{2,p} - V_{2,q}}{Z_{2,pp} + Z_{2,qq} - Z_{2,pq} - Z_{2,qp}}$$

$$I_{0,p} = I_{0,q} = - \frac{V_{0,p} - V_{0,q}}{Z_{0,pp} + Z_{0,qq} - Z_{0,pq} - Z_{0,qp}}$$

Où

$Z_{s1,pq}$: est l'impédance série (positif) de la ligne.

2. DEFAUT : OUVERTURE DE DEUX PHASES (2LO) :

$$Z_{eq} = Z^0 + Z^2$$

$$I_{1,p} = I_{1,q} = \frac{V_{1,p} - V_{1,q}}{Z_{eq} + Z_{s1,pq}}$$

$$I_{2,p} = I_{2,q} = \frac{n_1}{n_2} I_{1,p}$$

$$I_{0,p} = I_{0,q} = \frac{n_1}{n_0} I_{1,p}$$

3. DEFAUT : OUVERTURE DE TROIS PHASES (3LO) :

$$Z_{eq} = \infty$$

$$I_{1,p} = I_{1,q} = 0$$

$$I_{2,p} = I_{2,q} = 0$$

$$I_{0,p} = I_{0,q} = 0$$

A2.2.b CALCUL DES TENSIONS SYMETRIQUES :

$$V_1 i - V_1$$

$$V_0 i - (-Z_0 i p + Z_0 i q) I_0 q$$

$$V_2 i - (-Z_2 i p + Z_2 i q) I_2 q$$

Où

$V_{1,i}$: est donnée par la solution de l'écoulement de puissance.

A2.3 CALCUL DES DEFAUTS SIMULTANES:

L'étude des défauts simultanés, se ramène à l'étude des quadripoles. On distingue trois types de connexion :

A2.3.a CONNEXION SERIE-SERIE:

Selon le nombre de noeuds en défauts trois cas peuvent se présenter :

1^{er} CAS : quatre noeuds en défaut:

Chaque quadripole i est représenté par le système d'équations suivant:

$$\begin{bmatrix} V_{i,FK} \\ V_{i,F'K'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11}(i) & Z_{12}(i) \\ Z_{21}(i) & Z_{22}(i) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{i,F} \\ I_{i,F'} \end{bmatrix} \quad i=0,1,2$$

Où:

$$Z_{11}(i) = -Z_{i,FF} - Z_{i,KK} + Z_{i,FK} + Z_{i,KF}$$

$$Z_{12}(i) = -Z_{i,FF'} - Z_{i,KK'} + Z_{i,FK} + Z_{i,KF'}$$

$$Z_{21}(i) = -Z_{i,F'F} - Z_{i,K'K} + Z_{i,F'K} + Z_{i,K'F}$$

$$Z_{22}(i) = -Z_{i,F'F'} - Z_{i,K'K'} + Z_{i,K'F'} + Z_{i,F'K'}$$

$$i=0,1,2$$

Les conditions de défaut permettent d'écrire :

$$\begin{aligned} V_a + V_b + V_c &= 0 \\ I_a - I_b - I_c &= 0 \end{aligned}$$

$$V_b = -(Z_a + Z_c) I_b$$

$$V_b = Z_F I_b$$

Avec :

$$Z_F = -(Z_a + Z_c)$$

Où Z_F étant la matrice impédance vue par le quadripole "1" aux noeuds de défaut

par inversion on obtient :

$$I_b = Y_F V_b$$

Où

$$Y_F = Z_F^{-1}$$

Aux noeuds de défaut F, K, F' et K, on injecte respectivement les courants $-I_F, I_{F'}, -I_{F'}$ et $I_{F'}$. Pour simuler ce défaut on doit changer convenablement la matrice Y du réseau positif aux noeuds de défaut et résoudre le système d'équations (s'.1).

Aux noeuds saints:

$$\sum_{i=1}^{i-n} Y_{Fj} V_j = Y_{gi} E_{gi} = I_{gi}$$

$$i \neq F, F', K, K'$$

Aux noeuds de défaut:

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{Fj} V_j + (Y_{FF} + \alpha + \beta) V_F + (Y_{FF} - \alpha) V_{F'} = I_{gF}$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{F'j} V_j + (Y_{F'F} - \alpha) V_F + (Y_{F'F} + \alpha + \gamma) V_{F'} = I_{gF'} \quad (S'.1)$$

$$j \neq F, F'$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{Kj} V_j + (Y_{KK} + \alpha + \beta) V_K + (Y_{KK} - \alpha) V_{K'} = I_{gK}$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{K'j} V_j + (Y_{K'K} - \alpha) V_K + (Y_{K'K} + \alpha + \gamma) V_{K'} = I_{gK'}$$

$$j \neq K, K'$$

I_{gi} étant les courants générés par les noeuds machines.
 $i=1, n$

Y_{gi} étant l'admittance interne de la machine synchrone.

on pose:

$$\begin{aligned} \alpha + \beta &= Y_{F,11} \\ \alpha + \gamma &= Y_{F,22} \\ -\alpha &= Y_{F,12} = Y_{F,21} \end{aligned}$$

$Y_{F11}, Y_{F12}, Y_{F21}$ et Y_{F22} sont les éléments de de la matrice Y_2

2^{ème} cas: Trois noeuds en défaut

Les éléments de la matrice $Z(i)$ de chaque quadipôle sont données par:

$$Z_{11}(i) = -Z_{i,FF}$$

$$Z_{12}(i) = -Z_{i,FF'} + Z_{i,FK'}$$

$$Z_{21}(i) = -Z_{i,FF'} + Z_{i,K'F}$$

$$Z_{22}(i) = -Z_{i,FF'} - Z_{i,K'K'} + Z_{i,K'F'} + Z_{i,F'K'}$$

$$i=0, 1, 2$$

Pour simuler ce défaut, on doit modifier convenablement la matrice Y^* du réseau aux noeuds de défaut et résoudre le système d'équations (S'.2)

$$\sum_{i=1}^{i-n} Y_{ij} V_j = Y_{gi} E_{gi} - I_{gi}$$

$$i \neq F, F', K, K'$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{Fj} V_j + (Y_{FF} + \alpha + \beta) V_F + (Y_{FF'} - \alpha) V_{F'} - I_{gF}$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{F'j} + (Y_{F'F} - \alpha) V_F + (Y_{F'F'} + \alpha + \gamma) V_{F'} - I_{gF'} \quad (S'.2)$$

$$j \neq F, F'$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{K'j} V_j + (Y_{K'K'} + \alpha + \gamma) V_{K'} - I_{gK'}$$

$$j \neq K'$$

3^{ème} cas: deux noeuds en défaut

$$Z_{11}(i) = -Z_{i,FF}$$

$$Z_{12}(i) = -Z_{i,FF'}$$

$$Z_{21}(i) = -Z_{i,F'F}$$

$$Z_{22}(i) = -Z_{i,F'F'}$$

$$i=0,1,2$$

Pour simuler ce défaut, on doit modifier la matrice Y^i du réseau positif et résoudre le système d'équation (S'.3).

$$\sum_{i=1}^{i-n} Y_{ij} V_j - Y_{gi} E_{gi} = I_{gi}$$

$$i \neq F, F'$$

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{Fj} V_j + (Y_{FF} + \alpha + \beta) V_F + (Y_{FF'} - \alpha) V_{F'} = I_{gF}$$

(S'.3)

$$\sum_{j=1}^{j-n} Y_{F'j} V_j + (Y_{F'F} - \alpha) V_F - (Y_{F'F'} + \alpha + \gamma) V_{F'} = I_{gF'}$$

$$j \neq F', F$$

A2.3.b CONNEXION PARALLELE-PARALLALE:

pour ce type de défaut, on procède de la même façon que la connexion série-série, seulement pour ce cas on utilise les paramètres admittances.

Les éléments $Y_{11}(i), Y_{12}(i), Y_{21}(i)$ et $Y_{22}(i)$ sont obtenus par inversion de la matrice $Z(i)$.

A2.3.c CONNEXION SERIE-PARALLELE:

Pour ce cas de défaut, on utilise les paramètres hybrides H. Ces derniers sont donnés par:

$$h_{11}(i) = \frac{\det(Z(i))}{Z_{22}(i)}$$

$$h_{21}(i) = \frac{Z_{12}(i)}{Z_{22}(i)} (i)$$

$$h_{21}(i) = \frac{Z_{21}(i)}{Z_{22}(i)} (i)$$

$$h_{22}(i) = \frac{1}{Z_{22}(i)} (i)$$

$$\text{Avec } \det(Z(i)) = Z_{11}(i)Z_{22}(i) - Z_{21}(i)Z_{12}(i)$$

$$i=0,1,2$$

Transformation des paramètres H aux paramètres Y

$$Y_{11}(i) = \frac{1}{h_{11}(i)}$$

$$Y_{12}(i) = -\frac{h_{12}(i)}{h_{11}(i)}$$

$$Y_{21}(i) = \frac{h_{21}(i)}{h_{11}(i)}$$

$$Y_{22}(i) = \det \frac{(H(i))}{h_{11}(i)}$$

$$i=0,1,2$$

A2.4 CALCUL DES GRANDEURS DE PHASES:

Pour les différents types de défaut, les courants et les tensions de phases sont obtenus, en utilisant la transformation des composantes symétriques

$$I_{p,i} = T I_{s,i}$$

$$V_{p,i} = T V_{s,i}$$

$i=1, n$

Où n : est le nombre total des neuds du réseau.

ANNEXEA3

Les angles de décalage sont donnés par :

1 DEFAUT SHUNT :

SLGF	LLF	LLGF	n0	n1	n2
A	BC	BC	1	1	1
B	CA	CA	1	a^2	a
C	AB	AB	1	a	a^2

2 DEFAUT SERIE :

1LO	2LO	n0	n1	n1
A	BC	1	1	1
B	CA	1	a^2	a
C	AB	1	a	a^2

ANNEXE A4

A4.1 FORMATION DES MATRICES Y^+ , Y^- , Y^0 :

Deux noeuds i et j quelconques du réseau sont reliés entre eux par l'intermédiaire d'une ligne ou d'un transformateur fig(A.4.1)

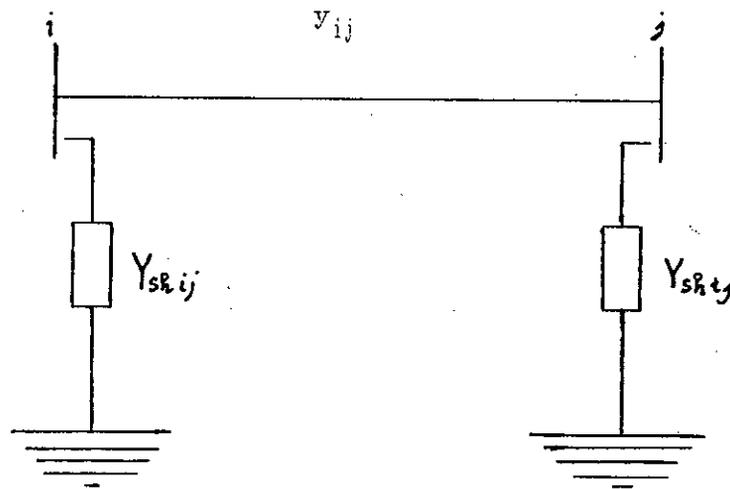


FIG A4.1 Représentation d'une ligne de transport.

On définit $Y(n,n)$ la matrice admittance nodale du réseau (ne tenant pas compte des générateurs et des charges) par :

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad i \neq j$$

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^{j=n} (y_{ij} + Y_{shij})$$

n : le nombre de noeuds du réseau.

y_{ij} : l'admittance série reliant les deux noeuds i et j .

Y_{shij} : l'admittance shunt de la ligne.

Si la ligne de transmission relie les deux noeuds i et j , l'admittance série y_{ij} est donné par :

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{lij} + jx_{lij}}$$

Où

r_{lij} : la résistance de la ligne i - j .
 x_{lij} : la réactance de la ligne i - j .

Si c'était un transformateur qui relie les deux noeuds, on aura:

$$y_{ij} = \frac{1}{r_{tij} + jx_{tij}}$$

Où

r_{tij} : est la résistance du transformateur i-j .
 x_{tij} : est la réactance de fuite du transformateur i-j.

Y^+ , Y^- , et Y^0 représentent respectivement, les matrices nodales positive, négative et homopolaire du réseau. La formation de ces matrices se fait, en utilisant l'algorithme cité ci-dessus.

Dans l'étude de la stabilité transitoire, seule la matrice admittance Y^+ du réseau est utilisée, elle doit contenir les charges qui sont modélisées par des admittances constantes.

$$Y_{Li} = \frac{P_{Li} - jQ_{Li}}{V_i^2}$$

Durant le régime transitoire, on définit la matrice Y_i (tenant compte des charges et des générateurs) par :

$$Y_{tij} - Y_{ij}$$

$$Y_{tii} - Y_{ii} + Y_{gi} \quad 1 \leq i \leq n_g \quad \text{pour les noeuds generateurs}$$

$$Y_{tii} - Y_{ii} + Y_{Li} \quad n_g < i \leq n \quad \text{pour les noeuds decharges}$$

Où:

$$Y_{gi} = \frac{1}{r_{di} + jX_{di}}$$

X_d : est la réactance synchrone de générateur.

r_d : est la résistance du générateur.

n_g : nombre de noeuds générateurs.

n : nombre de noeuds du réseau.