

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À  
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE  
À L'OBTENTION DE LA  
MAÎTRISE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. Ing.

PAR  
Roberto Andres PEREIRA ARAYA

ÉTUDE DE LA STABILITÉ TRANSITOIRE À L'AIDE DE  
L'ALGORITHME SIME

MONTREAL, LE 23 AVRIL 2012



Roberto Andres PEREIRA ARAYA, 2012



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ  
PAR UN JURY COMPOSÉ DE:

M. Louis-A. Dessaint, directeur de mémoire  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Pierre Jean Lagacé, président du jury  
Département de génie électrique à l'École de technologie supérieure

Innocent Kamwa, membre du jury  
Chercheur, IREQ

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 13 AVRIL 2012

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE



## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier, tout d'abord, mon directeur de mémoire, M. Louis-A. Dessaint, pour m'avoir donné l'occasion de participer à ce projet, pour sa disponibilité ainsi que son soutien matériel et intellectuel.

Mes remerciements vont aussi aux membres de ma famille : ma femme Ivonne, mes chers enfants, Anette et Alberto, qui ont été la principale source d'inspiration pour mener à terme mes études de maîtrise.

Je ne veux pas oublier mes camarades de projet pour leur disponibilité et leur collaboration désintéressée.

Je remercie les Services aux étudiants, particulièrement Mme. Chantal Gamache, pour son accompagnement.

Enfin, je remercie Dieu, mes amies et mes amis qui ont suivi ce projet de près ou de loin.



# ETUDE DE STABILITÉ TRANSITOIRE À L'AIDE DE L'ALGORITHME SIME

Roberto Andres PEREIRA ARAYA

## RÉSUMÉ

Le but de ce travail est d'étudier la fonctionnalité de l'algorithme SIME (single machine equivalent) dans l'étude de la stabilité transitoire. La recherche du temps critique, voir les changements des machines critiques et la variation de la marge de stabilité par rapport à la variation du temps critique seront les principales variables à étudier.

L'étude utilisera quatre réseaux électriques à tester : le réseau 3 machines-9 barres, le réseau 10 machines-39 barres, le réseau 17 machines-162 barres et le réseau 50 machines-145 barres. L'analyse inclut aussi l'utilisation du modèle classique et du modèle deux axes des machines. Les résultats obtenus seront validés avec le logiciel commercial PSS@E ou à l'aide des résultats présentés dans les publications spécialisées.

Par rapport aux résultats obtenus, nous pouvons souligner qu'il y a un comportement linéaire de la marge de stabilité autour du CCT (critical clearing time) et une variation dans le nombre des machines critiques dans la recherche du CCT.

En conclusion, en utilisant un programme de stabilité transitoire et à l'aide du critère d'égalité des surfaces, SIME calcule de façon simple la marge de stabilité et le temps critique du système.

**Mots clés:** Stabilité transitoire, algorithme SIME, marge de stabilité, temps critique, critère d'égalité des surfaces.



# ÉTUDE DE LA STABILITÉ TRANSITOIRE À L'AIDE DE L'ALGORITHME SIME

Roberto Andres PEREIRA ARAYA

## ABSTRACT

The purpose of this study was to determine the functionality of the algorithm SIME (single machine equivalent) in the study of transient stability. The search for the critical time, see the changes of critical machines and the variation of the stability margin with respect to the variation of the critical time will be the main variables to study.

The study will use four power test systems: the network 3 machines-9 bars, the network 10 machines-39 bars, the network 17 machines-162 bars and the network 50 machines-145 bars. This study also includes the use of the classical model and the model of two-axis machines. The results will be validated with the commercial software PSS@E or with the results presented in the literature.

Regarding the results obtained, we can highlight that there is a linear behavior of the stability margin around the CCT (critical clearing time) and a variation in the number of critical machines in the search of CCT.

In conclusion, using a transient stability program in combination with the equal-area criterion, SIME efficiently computes the stability margin and the critical time of the system.

**Key words:** Transient stability, algorithm SIME, stability margin, critical clearing time, equal-area criterion.



## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	3
CHAPITRE 2 STABILITÉ TRANSITOIRE .....	5
2.1 Notions de stabilité transitoire .....	5
2.2 Équation du mouvement d'un générateur .....	6
2.3 Modèle classique de la machine synchrone et réseaux équivalents.....	10
2.4 Critère d'égalité des surfaces pour prédire la stabilité.....	12
2.5 Temps critique .....	15
2.6 Étude de la stabilité transitoire d'un réseau à plusieurs machines avec le modèle classique.....	15
2.7 Étude de la stabilité transitoire d'un réseau à plusieurs machines avec le modèle deux axes.....	22
CHAPITRE 3 STABILITÉ TRANSITOIRE EN UTILISANT SIME .....	27
3.1 Fondements du SIME .....	27
3.2 Trajectoire OMIB stable .....	31
3.3 Trajectoire OMIB instable .....	32
3.4 Concept de la marge de stabilité .....	33
3.5 Le triangle d'approximation dans une trajectoire stable.....	34
3.6 Calcul CCT (Critical Clearing Time) avec la Marge de Stabilité.....	36
CHAPITRE 4 IMPLANTATION DU MODÈLE .....	39
4.1 Introduction.....	39
4.2 Diagramme d'implantation du programme principal .....	39
4.3 Description du diagramme d'implantation du sous programme de stabilité transitoire (modèle classique) .....	44
4.4 Description du diagramme d'implantation du sous-programme SIME .....	46
CHAPITRE 5 RÉSULTATS ET VALIDATION .....	49
5.1 Introduction.....	49
5.2 Résultats et validation- Modèle Classique .....	50
5.2.1 Résultats numériques .....	50
Système 3 machines – 9 barres, modèle classique.....	50
Système 10 machines – 39 barres, modèle classique.....	51
Système 17 machines – 162 barres, modèle classique.....	52
Système 50 machines – 145 barres, modèle classique.....	53
5.2.2 Résultats graphiques du système 3 machines-9 barres, modèle classique	54
5.3 Résultats et validation- Modèle 2 axes .....	59
5.3.1 Résultats numériques système 3 machines – 9 barres, modèle 2 axes.....	59

5.3.2	Résultats graphiques du système 3 machines-9 barres, modèle 2 axes ....	59
5.3.3	Variation de la tension de l'excitatrice et tension interne des machines, modèle 2 axes.....	64
5.4	Changement de machines critiques avec le temps de défaut. ....	67
5.5	Discussion des résultats. ....	70
CONCLUSION .....		75
ANNEXE I	TABLEAUX DES ERREURS RELATIVES.....	77
ANNEXE II	FICHIERS MATLAB.....	81
ANNEXE III	DONNÉES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES.....	91
ANNEXE IV	FLOWCHARTS .....	127
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		131

## LISTE DES TABLEAUX

		Page
Tableau 4.1	Description de variables du bloc de simulation 1 .....	40
Tableau 4.2	Description des variables des blocs de simulation 2 et 3 .....	41
Tableau 5.1	Résultats de la simulation du système 3 machines, modèle classique .....	50
Tableau 5.2	Résultats de la simulation du système 10 machines, modèle classique.....	51
Tableau 5.3	Résultats de la simulation du système 17 machines, modèle classique.....	52
Tableau 5.4	Résultats de la simulation du système 50 machines, modèle classique.....	53
Tableau 5.5	Résultats simulation système 3 machines, modèle deux axes .....	59
Tableau 5.6	Variation des machines critiques avec défaut barre 4, ouverture ligne 4-14.....	67



## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 2.1	Modèle classique machine synchrone ..... 10
Figure 2.2	Machine synchrone connectée à un réseau électrique équivalent ..... 10
Figure 2.3	Puissance fournie par la machine synchrone ..... 11
Figure 2.4	Critère d'égalité des surfaces ..... 12
Figure 2.5	Réseau à plusieurs machines ..... 16
Figure 2.6	Modèle simplifié machine synchrone ..... 17
Figure 2.7	Modèle de charge comme admittance ..... 18
Figure 2.8	Modèle $\Pi$ de ligne ..... 19
Figure 2.9	Modèle d'un transformateur avec changement de prise ..... 19
Figure 3.1	Groupe des machines critiques et non critiques ..... 27
Figure 3.2	Trajectoire OMIB stable ..... 31
Figure 3.3	Trajectoire OMIB instable ..... 32
Figure 3.4	Les surfaces d'accélération et décélération ..... 33
Figure 3.5	Triangle approximation dans une trajectoire OMIB stable ..... 34
Figure 3.6	Marge stabilité vs temps critique ..... 36
Figure 3.7	Description de la recherche du CCT (critical clearing time) ..... 37
Figure 4.1	Bloc de départ de la simulation ..... 39
Figure 4.2	Blocs de calcul de la stabilité transitoire et des paramètres OMIB ..... 40
Figure 4.3	Bloc de calcul du deuxième CCT instable ..... 41
Figure 4.4	Blocs de calcul de la stabilité, des paramètres OMIB et de la marge de stabilité ..... 42
Figure 4.5	Bloc de vérification de la stabilité ..... 42

Figure 4.6	Blocs d'interpolation ou d'arrêt de la recherche du CCT.....	43
Figure 4.7	Blocs d'extrapolation de la recherche du CCT.....	44
Figure 4.8	Variables entrées dans le sous programme de stabilité transitoire .....	44
Figure 4.9	Bloc de résolution des équations de mouvement du système.....	45
Figure 4.10	Blocs de calcul des machines critiques et des variables de sortie du sous programme .....	46
Figure 4.11	Blocs d'entrée des données et de définition des variables du sous programme SIME .....	46
Figure 4.12	Bloc de calcul des paramètres OMIB .....	47
Figure 4.13	Bloc de vérification de la stabilité ou de l'instabilité du système .....	48
Figure 4.14	Bloc de calcul de la marge de stabilité .....	48
Figure 5.1	Mouvement des angles internes, cas stable, 3 machines .....	54
Figure 5.2	Mouvement des angles internes, cas instable, 3 machines .....	54
Figure 5.3	Puissance électrique et mécanique OMIB, cas stable, 3 machines .....	55
Figure 5.4	Puissance électrique et mécanique OMIB, cas instable, 3 machines .....	55
Figure 5.5	Angle OMIB, cas stable, 3 machines .....	56
Figure 5.6	Angle OMIB, cas instable, 3 machines .....	56
Figure 5.7	Vitesse OMIB, cas stable, 3 machines .....	57
Figure 5.8	Vitesse OMIB, cas instable, 3 machines .....	57
Figure 5.9	Variation de la marge de stabilité du système, 3 machines .....	58
Figure 5.10	Mouvement des angles internes, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes .....	60
Figure 5.11	Mouvement des angles internes, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	60
Figure 5.12	Puissance électrique et mécanique OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes .....	61

Figure 5.13	Puissance électrique et mécanique OMIB, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	61
Figure 5.14	Angle OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes.....	62
Figure 5.15	Angle OMIB, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	62
Figure 5.16	Vitesse OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes.....	63
Figure 5.17	Vitesse OMIB, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	63
Figure 5.18	Variation de la marge de stabilité du système, 3 machines, modèle 2 axes .....	64
Figure 5.19	Variation de la tension interne des machines, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes .....	65
Figure 5.20	Variation de la tension interne des machines, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	65
Figure 5.21	Variation de la tension de contrôle de l'excitatrice, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes .....	66
Figure 5.22	Variation de la tension de contrôle de l'excitatrice, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes .....	66
Figure 5.23	Variation de la marge de stabilité vs temps de défaut .....	68
Figure 5.24	Variation de l'angle critique vs temps de défaut .....	68
Figure 5.25	Variation des machines critiques vs temps de défaut .....	69



## LISTE DES ABRÉVIATIONS ET SIGLES

<i>CCT</i>	Critical Clearing Time
$\delta u$	Angle instable
$\delta r$	Angle retour
<i>PmOMIB</i>	Puissance mécanique OMIB
<i>PeOMIB</i>	Puissance électrique OMIB
<i>Mc</i>	Machine critique
<i>Mn</i>	Machine non critique
<i>P</i>	Puissance
<i>Pm</i>	Puissance mécanique
$\delta\theta$	Angle machine
<i>te</i>	Temps critique
<i>tu</i>	Temps instable
<i>tr</i>	Temps retour
$\eta$	Marge stabilité
<i>SIME</i>	Single machine equivalent
<i>OMIB</i>	One machine infinite bus



## INTRODUCTION

Les réseaux électriques sont souvent sujets à des perturbations. Ces perturbations (telles que le court-circuit, les variations brusques de charge, les pertes de lignes de transmission, etc.) affectent les points de fonctionnement des machines synchrones et les conduisent généralement à la perte de la stabilité. Alors, le système est défini stable si toutes les machines peuvent suivre les changements sans perdre le synchronisme.

L'analyse de la stabilité dans un réseau à plusieurs machines consiste à étudier les variations des angles internes, les vitesses, les puissances, les tensions des machines ainsi que la détermination du CCT en résolvant les équations différentielles et les équations algébriques à l'aide d'un logiciel de stabilité. Cette façon d'étudier la stabilité fournit des résultats exacts sur la stabilité du réseau électrique, mais ne permet pas de calculer la marge de stabilité.

SIME nous donne une façon d'analyser la stabilité transitoire d'un réseau électrique. SIME réduit les machines du système à deux groupes de machines, qu'on appelle machines critiques et machines non critiques. Ensuite, les deux groupes de machines sont remplacés par un système mono machine, appelé OMIB (one machine infinite bus) et SIME prédit la stabilité du système en appliquant le critère d'égalité des surfaces.

Ce rapport met l'accent sur l'utilisation de l'algorithme SIME dans l'étude de la stabilité transitoire pour trouver le CCT à l'occurrence d'un défaut électrique. Nous trouverons la description de l'élaboration d'un code de stabilité transitoire avec SIME, ainsi que les différents réseaux électriques utilisés. Ce document présente les différents résultats, comme les groupes de machines critiques et non critiques, la vitesse OMIB, l'angle OMIB, les puissances mécanique et électrique OMIB, le temps critique et la marge de stabilité. Finalement, la modélisation a été faite dans l'environnement Matlab.



## CHAPITRE 1

### REVUE DE LA LITTÉRATURE

L'étude de stabilité transitoire a été possible grâce aux différentes méthodes développées dans les années précédentes.

La méthode d'égalité de surfaces a été proposée pour l'étude d'un système mono machine sans résoudre les équations d'oscillations (Fortescue 1925). Dans cette publication, l'auteur montre le comportement de la puissance électrique par rapport à l'angle interne de la machine et la variation d'angle interne de la machine par rapport au temps, à l'occurrence d'une manœuvre ou d'un défaut dans le réseau électrique composé d'un générateur, des transformateurs, d'une ligne et d'une charge moteur. À la fin de la décennie des années 1920, des méthodes de calcul de stabilité ont été présentées pour l'analyse d'un système multi machine (Park and Bancker 1929). Cette publication fait une révision des facteurs affectant la stabilité, notamment, des régulateurs de tension et les systèmes d'excitation. Elle donne aussi la méthodologie utilisée dans l'analyse de stabilité, laquelle comprend la réduction du système à son équivalent de réactance série et le calcul du coefficient d'inertie équivalente du système, tout cela pour réduire le système à son équivalent mono machine. Autour des années 1950, diverses méthodes ont été proposées, comme les méthodes de résolution des équations d'énergie du système (Magnusson 1947),(Aylett 1958). Dans ce cas, la méthode résout les intégrales des équations de mouvement du système en appliquant une méthode d'intégration pas-à-pas et fournit, par exemple, la variation des angles internes de machine par rapport au temps. D'autres études ont été publiées dans les années 1960 (El-Abiad and Nagappan 1966) . En effet, la deuxième méthode de Liapunov a été utilisée pour obtenir une région asymptotique de stabilité après défaut. Si la condition initiale du système après défaut se trouve à l'intérieur de cette région en ce moment que l'opération normale est rétablie, le système sera défini stable. Finalement, le critère d'égalité des surfaces et la théorie OMIB (one machine infinite bus) ont été introduits à la fin des années 1980 (Xue, Van Cutsem et al. 1988),(Xue, Van Cutsem et al. 1989). Cette méthode prend le système multi machine et le

réduit à un système mono machine. En utilisant le critère d'égalité des surfaces, on étudie la stabilité du système mono machine.

## CHAPITRE 2

### STABILITÉ TRANSITOIRE

#### 2.1 Notions de stabilité transitoire

Les systèmes électriques sont sujets à des perturbations qui changent leur point de fonctionnement. Par exemple, un court-circuit ou une perte des générateurs conduisent souvent à la perte de la stabilité du système. Alors, on peut différencier trois types de stabilité: stabilité en régime permanent, stabilité transitoire et stabilité dynamique.(Kundur, Paserba et al. 2004)

##### **Stabilité en régime permanent**

En régime permanent, il y a une variation graduelle des charges et le système peut être analysé avec un programme d'écoulement de puissance pour obtenir les angles et les voltages dans chaque barre du réseau électrique.

##### **Stabilité transitoire**

L'étude de la stabilité transitoire est réalisée pour voir si le système perd ou ne perd pas le synchronisme à la suite d'une sévère perturbation. L'étude analyse les angles internes et la vitesse de chaque machine avant, pendant et après le défaut et voit si les angles et les vitesses reviennent à une valeur stable à la fréquence synchrone. L'étude est réalisée avec un logiciel qui calcule, en premier lieu, l'écoulement de puissance et qui, postérieurement, résout les équations différentielles de mouvement des machines. Ici, nous supposons que la puissance mécanique et les tensions internes des machines sont constantes.

##### **Stabilité dynamique**

La stabilité dynamique est réalisée dans une période de temps plus longue par rapport à l'étude de la stabilité transitoire. Cette étude prend en considération les dispositifs de commande et de régulation du réseau.

## 2.2 Équation du mouvement d'un générateur

L'équation du mouvement d'une machine synchrone est décrit par le produit du coefficient d'inertie et de l'accélération angulaire du système, qu'on appelle couple d'accélération (Grainger and Stevenson 1994).

En effet :

$$J \frac{d^2 \theta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ (N-m)} \quad (2.1)$$

où

$J$  : Inertie totale du système (turbine + machine) ( $\text{Kg} - \text{m}^2$ );

$\theta_m$  : Position angulaire dans le référentiel stationnaire ( $\text{rad}$ );

$t$  : Temps ( $\text{sec}$ );

$T_m$  : Couple mécanique ( $\text{N-m}$ );

$T_e$  : Couple électrique ( $\text{N-m}$ );

$T_a$  : Couple d'accélération ( $\text{N-m}$ ).

On pose :

$$\theta_m = \omega_{msyn} t + \delta_m \quad (2.2)$$

où

$\omega_{msyn}$  : Vitesse synchrone du rotor ( $\text{rad/s}$ );

$\delta_m$  : Position angulaire du rotor dans le référentiel synchrone ( $\text{rad}$ ).

Si nous faisons le dérivé de (2.2) par rapport au temps, on obtient la vitesse angulaire du rotor :

$$\frac{d\theta_m}{dt} = \omega_{msyn} + \frac{d\delta_m}{dt} \quad (2.3)$$

et

$$\frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (2.4)$$

L'équation (2.3) montre que la vitesse angulaire du rotor,  $d\theta_m / dt$ , est constante et égale à  $\omega_{msyn}$  si  $d\delta_m / dt$  est nulle. Ici,  $d\delta_m / dt$  est la déviation de la vitesse du rotor par rapport à la vitesse synchrone. De plus, l'équation (2.4) montre l'accélération du rotor.

Si on remplace l'équation (2.4) dans (2.1), on obtient :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_a = T_m - T_e \text{ (N-m)} \quad (2.5)$$

Si on multiplie l'équation (2.5) par  $\omega_m$ , l'équation devient :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = T_m \omega_m - T_e \omega_m = P_a = P_m - P_e \text{ (W)} \quad (2.6)$$

où

$P_a$  : Puissance d'accélération;

$P_m$  : Puissance mécanique fournie par la turbine;

$P_e$  : Puissance électrique fournie par le générateur plus les pertes électriques;

$J\omega_m$  : Couple angulaire du rotor.

À la vitesse synchrone, on peut mettre en évidence que  $J\omega_m$  est la constante d'inertie de la machine, notée par  $M$ . Alors, l'équation (2.6) devient :

$$M \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.7)$$

La constante d'inertie,  $H$ , est définie par :

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_{msyn}^2}{S_{nom}} = \frac{\frac{1}{2} M \omega_{msyn}}{S_{nom}} \quad (\text{Joules/VA}) \quad (2.8)$$

où

$\frac{1}{2} J \omega_{msyn}^2$  : Énergie cinétique à la vitesse synchrone.

$S_{nom}$  : Puissance apparente nominale du générateur.

De (2.8), on obtient :

$$M = \frac{2H}{\omega_{msyn}} S_{nom} \quad (2.9)$$

Si on remplace l'équation (2.9) dans (2.7), on obtient :

$$\frac{2H}{\omega_{msyn}} \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = \frac{P_a}{S_{nom}} = \frac{P_m - P_e}{S_{nom}} \quad (2.10)$$

Dans un générateur synchrone de  $P$  pôles, nous avons :

Angle interne machine :

$$\delta = \frac{P}{2} \delta_m \quad (2.11)$$

Fréquence angulaire synchrone :

$$\omega_{syn} = \frac{P}{2} \omega_{msyn} \quad (2.12)$$

Si on déplace les équations (2.11) et (2.12) dans (2.10), on obtient :

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \text{ (pu)} \quad (2.13)$$

L'équation (2.13) est une équation différentielle de deuxième ordre et décrit le mouvement du système. Finalement, cette équation de deuxième ordre est écrite sous forme de deux équations du premier ordre qui, finalement, sont les équations différentielles à résoudre.

On obtient :

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e \text{ (pu)} \quad (2.14)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega - \omega_{syn} \text{ (pu)} \quad (2.15)$$

### 2.3 Modèle classique de la machine synchrone et réseaux équivalents

Dans l'étude de la stabilité transitoire, on peut utiliser le modèle simplifié d'une machine synchrone, qu'on appelle modèle classique.

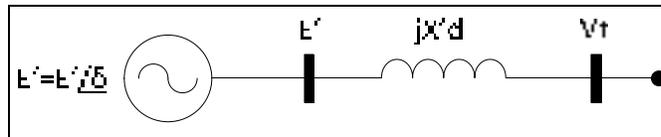


Figure 2.1 Modèle classique machine synchrone  
Adaptée de Glover, Sarma et al.(2008, p.702)

Dans ce modèle, la machine est représentée par une source sinusoïdale de voltage en série avec la réactance transitoire et le modèle se base sur les hypothèse ci-dessous (Glover, Sarma et al. 2008):

- le fonctionnement de la machine est en mode équilibré et, par conséquent, on ne considère que la réactance de séquence positive;
- l'excitation de la machine est constante;
- la saturation, les pertes et la saillance de pôles sont négligées.

Alors, dans l'analyse, le modèle est connecté en série avec le réseau électrique équivalent, de façon à trouver la puissance électrique fournie par la machine.

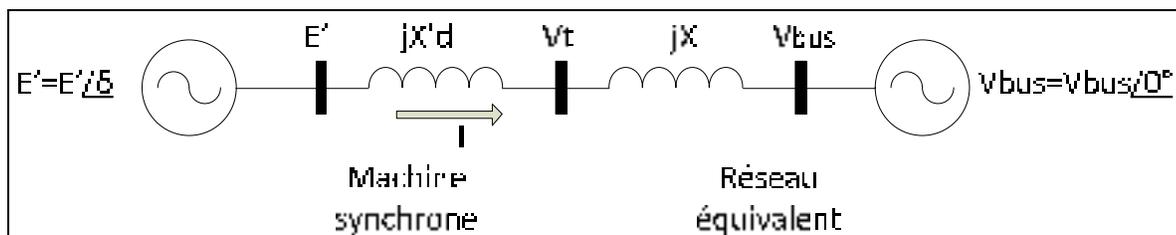


Figure 2.2 Machine synchrone connectée à un réseau électrique équivalent  
Adaptée de Glover, Sarma et al.(2008, p.703)

La puissance complexe fournie au réseau équivalent est :

$$S_{bus} = V_{bus} \times I^* = V_{bus} \times \left[ \frac{E' - V_{bus}}{j(X + X'_d)} \right]^* = \frac{j[V_{bus} E'^* - V_{bus} V_{bus}^*]}{(X + X'_d)} = \frac{j(V_{bus} E' e^{-j\delta} - V_{bus}^2)}{(X + X'_d)} \quad (2.16)$$

$$S_{bus} = \frac{V_{bus} E' \sin \delta}{X + X'_d} + j \left( \frac{V_{bus} E' \cos \delta - V_{bus}^2}{X + X'_d} \right) \quad (2.17)$$

Par conséquent, la puissance active fournie par la machine synchrone est :

$$P_e = P_{bus} = \frac{V_{bus} E' \sin \delta}{X + X'_d} = \frac{V_{bus} E' \sin \delta}{X_{eq}} \quad (2.18)$$

L'équation (2.18) montre que la puissance fournie par la machine synchrone dépend des réactances  $X$  et  $X'_d$  et de l'angle  $\delta$ . La puissance maximale se produit lorsque la valeur de l'angle  $\delta$  est  $90^\circ$ .

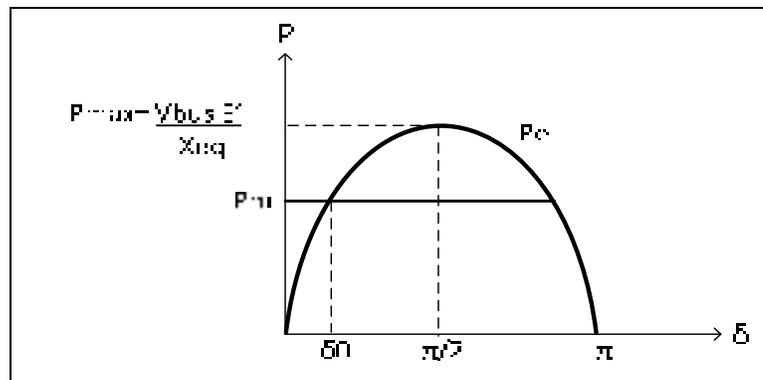


Figure 2.3 Puissance fournie par la machine synchrone  
Adaptée de Glover, Sarma et al.(2008, p.705)

## 2.4 Critère d'égalité des surfaces pour prédire la stabilité

Le critère d'égalité des surfaces est utilisé dans l'étude de la stabilité transitoire d'un système de deux machines ou d'une machine connectée à une barre infinie. À l'occurrence d'un défaut électrique, en  $\delta_0$ , la puissance électrique tombe à zéro jusqu'au point  $\delta_1$ . Ici, le défaut est enlevé et la puissance électrique devient plus grande que la puissance mécanique jusqu'au point maximal  $\delta_2$ . (Grainger and Stevenson 1994),(Glover, Sarma et al. 2008).

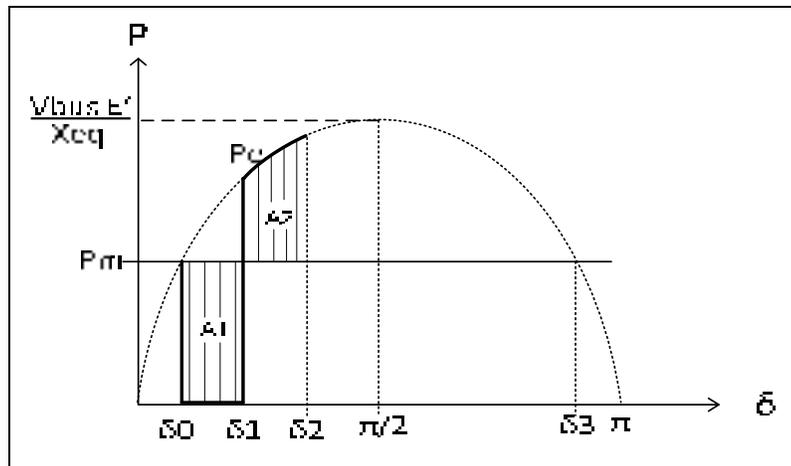


Figure 2.4 Critère d'égalité des surfaces  
Adaptée de Glover, Sarma et al.(2008, p.705)

Considérons l'équation de mouvement de la machine :

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a = P_m - P_e \quad (2.19)$$

En multipliant les deux membres par  $d\delta / dt$ , on obtient :

$$\frac{2H}{\omega_{syn}} \frac{d^2 \delta}{dt^2} \left( \frac{d\delta}{dt} \right) = (P_m - P_e) \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (2.20)$$

Aussi :

$$\frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = 2 \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \left( \frac{d^2}{dt^2} \delta \right) \quad (2.21)$$

Si nous remplaçons l'équation (2.21) en (2.20), le résultat sera :

$$\frac{H}{\omega_{syn}} \frac{d}{dt} \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (P_m - P_e) \left( \frac{d\delta}{dt} \right) \quad (2.22)$$

Ou encore :

$$\frac{H}{\omega_{syn}} d \left[ \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 \right] = (P_m - P_e) d\delta \quad (2.23)$$

Si nous faisons l'intégration des deux membres de l'équation (2.23), on obtient :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} \frac{H}{\omega_{syn}} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.24)$$

Ou bien :

$$\frac{H}{\omega_{syn}} \left( \frac{d\delta}{dt} \right)^2 /_{\delta_0}^{\delta} = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta \quad (2.25)$$

Dans l'équation (2.25), à  $t=0$  et  $\delta = \delta_0$ , la dérivée  $d\delta / dt$  est nulle. Aussi, quand  $\delta$  se rend jusqu'à  $\delta = \delta_2$ , la dérivée  $d\delta / dt$  est nulle.

En conséquence, on peut réécrire l'équation (2.25) comme :

$$\int_{\delta_0}^{\delta} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.26)$$

L'équation (2.26) peut être séparée en deux parties :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta + \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_m - P_e) d\delta = 0 \quad (2.27)$$

Ou bien :

$$\int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_e - P_m) d\delta \quad (2.28)$$

Ici

$$A1 = \text{Aire}_d \text{ accélération} = \int_{\delta_0}^{\delta_1} (P_m - P_e) d\delta$$

$$A2 = \text{Aire}_d \text{ décélération} = \int_{\delta_1}^{\delta_2} (P_e - P_m) d\delta$$

Si, à la suite d'un défaut électrique, le système demeure stable, le critère des égalités de surfaces nous dit que les aires A1 et A2 seront égales (A1=A2) et que l'angle  $\delta$  oscillera entre les angles  $\delta_0$  et  $\delta_2$  pour trouver un nouveau point d'opération  $\delta_1$ . Dans le où que le système devient instable, l'angle  $\delta_2$  dépassera l'angle  $\delta_3$  (valeur de non-retour) et la machine s'accélélera parce que le couple mécanique est plus élevé que le couple électrique.

## 2.5 Temps critique

Les besoins d'énergie électrique augmentent et les réseaux électriques deviennent de plus en plus complexes. Il est nécessaire de déterminer le temps critique du système à l'occurrence d'un défaut électrique.

On peut dire que le temps critique correspond à la valeur maximale du temps pendant lequel le défaut électrique peut être actif dans le réseau sans que le réseau perde le synchronisme. Cela signifie que si le défaut est enlevé avant le temps critique, le système reste stable. Mais, si le défaut est enlevé après le temps critique, le système devient instable. En conséquence, avec le temps critique, on peut établir la coordination du système de protection du réseau.

## 2.6 Étude de la stabilité transitoire d'un réseau à plusieurs machines avec le modèle classique

Dans l'étude de la stabilité transitoire de plusieurs machines, il est nécessaire de résoudre les équations de mouvement de toutes les machines (Grainger and Stevenson 1994), (Glover, Sarma et al. 2008), (Anderson, Fouad et al. 2003).

De façon à réduire la complexité des équations, les hypothèses suivantes sont définies :

- la puissance mécanique de chaque machine demeure constante dans la résolution des équations différentielles de mouvement des machines ;
- chaque machine synchrone est représentée par sa source de tension constante en série avec la réactance transitoire ;
- les charges doivent être représentées comme impédances constantes ;
- les équipements (lignes, transformateurs) sont représentés par des admittances constantes.

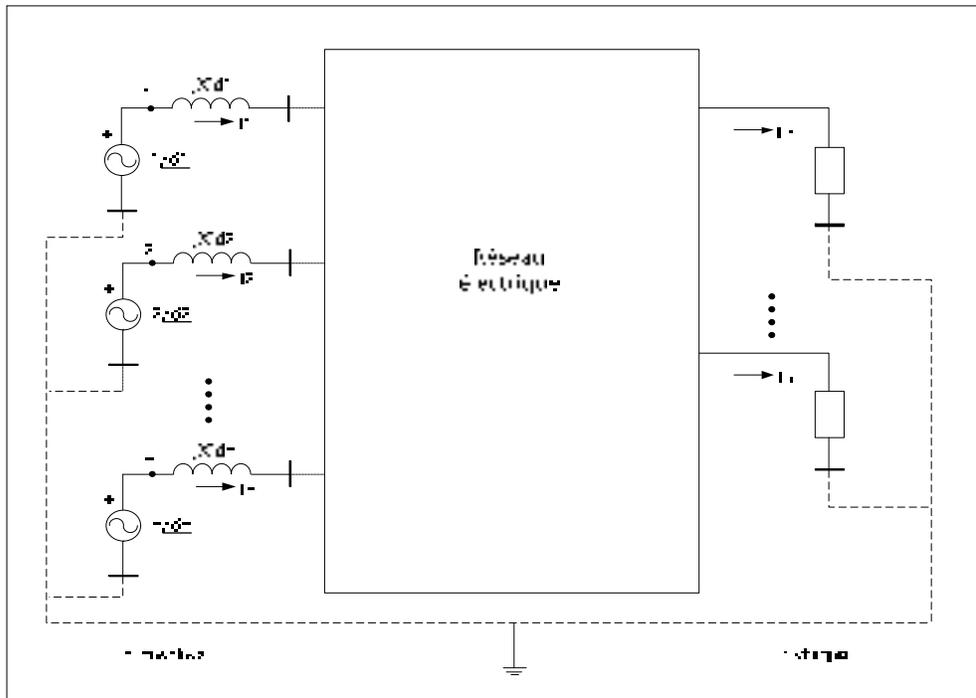


Figure 2.5 Réseau à plusieurs machines  
Tirée d'Anderson, Fouad et al.(2003, p.36)

Le schéma du réseau à plusieurs machines est présenté dans la figure 2.5. Ici, la barre  $0$  correspond à la barre de référence et les barres  $1$  jusqu'à  $n$  sont les barres internes de chaque machine. De même, on peut voir que les réactances transitoires de chaque machine sont connectées en série et toutes les charges sont représentées comme impédances constantes.

Ensuite, pour déterminer la stabilité transitoire dans un réseau à plusieurs machines, l'étude doit être réalisée en trois étapes : calculs préliminaires, obtention des matrices d'impédances du réseau avant, pendant et après défaut et résolution des équations de mouvement des machines :

### Premier Etape : Calculs préliminaires

- calculer les tensions, puissances et angles dans chaque barre à l'aide d'un écoulement de puissance ;
- calculer les tensions et les angles internes de chaque machine à l'aide des résultats de l'écoulement de puissance.

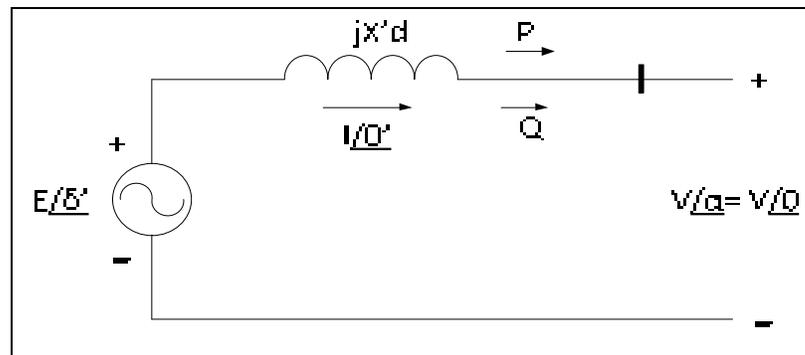


Figure 2.6 Modèle simplifié machine synchrone  
Tirée d'Anderson, Fouad et al.(2003, p.40)

En effet, les courants de chaque machine sont :

$$I_i = \left( \frac{S_i}{V_i} \right)^* = \left( \frac{P_i + jQ_i}{V_i} \right)^* \quad (2.29)$$

Finalement, les tensions internes de chaque machine sont :

$$E_i \angle \delta_i = V_i + jX'_d I_i \quad (2.30)$$

## Deuxième Etape : Obtention des matrices d'impédances du réseau avant, pendant et après défaut

- faire la conversion des charges en admittances :

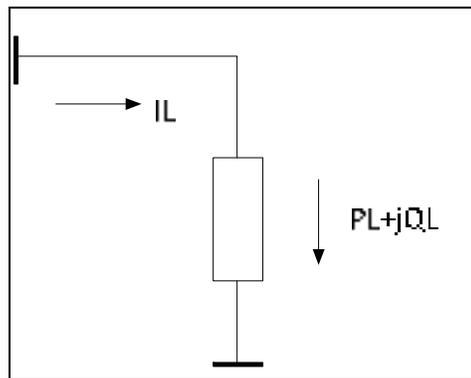


Figure 2.7 Modèle de charge comme admittance  
Adaptée de Grainger and Stevenson (1994, p.728)

Soit :

$$S_L = P_L + jQ_L \quad (2.31)$$

Par conséquent, l'admittance de charge est :

$$Y_L = \frac{P_L}{V_L^2} - j \frac{Q_L}{V_L^2} \quad (2.32)$$

- les équipements (lignes, transformateurs) sont représentés par des admittances constantes.

Dans le cas des lignes, ils sont représentés par leur modèle  $\Pi$  (voir figure 2.8).

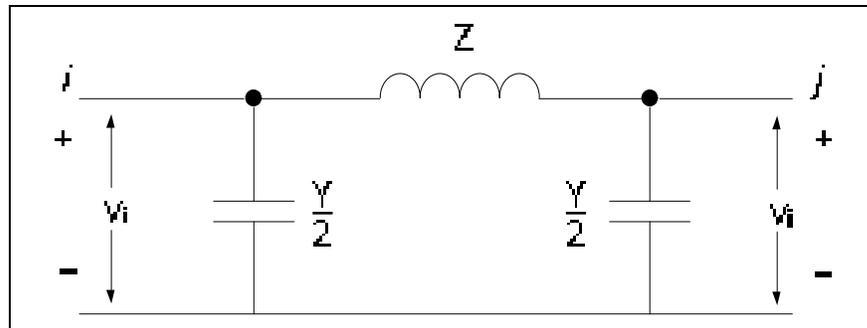


Figure 2.8 Modèle II de ligne  
Tirée de Grainger and Stevenson (1994, p.201)

Dans le cas des transformateurs, ils sont représentés par leur modèle II avec changement de prise. S'il n'y a pas de changement de prise,  $a=1$  (voir figure 2.9).

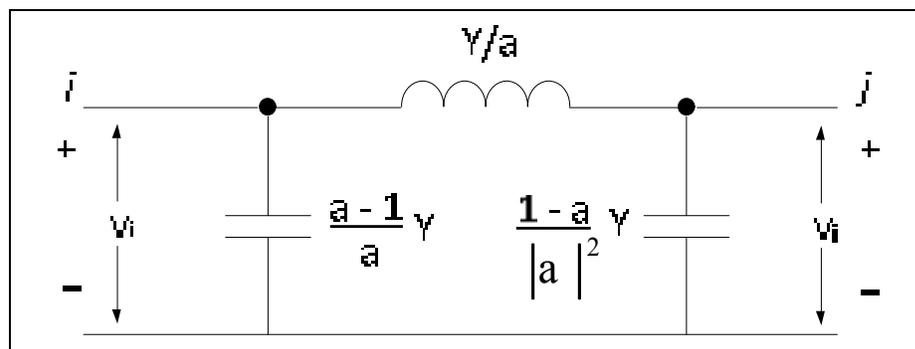


Figure 2.9 Modèle d'un transformateur avec changement de prise  
Tirée de Grainger and Stevenson (1994, p.363)

- la matrice d'admittance du réseau avant défaut doit être calculée de la façon suivante:
  - a. toutes les impédances doivent être converties en admittances ;
  - b. la diagonale  $Y_{ii}$  de la matrice d'admittance est formée par l'addition de toutes les admittances connectées à la barre  $i$  ;
  - c. les éléments  $Y_{ij}$  sont les valeurs négatives de l'admittance connectée entre la barre  $i$  et la barre  $j$  .

- la matrice d'admittance du réseau pendant défaut doit être calculée de la façon suivante:
  - a. prendre la matrice d'admittance avant défaut (déjà calculée).
  - b. mettre des *zéro* dans toute la ligne et dans toute la colonne qui correspondent à la barre où s'est produit le défaut.
  
- la matrice d'admittance du réseau après défaut doit être calculée de la façon suivante:
  - a. prendre la matrice d'admittance avant défaut (déjà calculé) ;
  - b. dans la matrice avant défaut, soustraire les valeurs qui correspondent à la ligne qui a été ouverte pour enlever le défaut.
  
- à l'aide de la réduction de Kron, obtenir les matrices réduites avant-pendant-après défaut à partir de matrices originales avant, pendant et après défaut. Pour cette réduction, on doit éliminer les barres dans lesquelles il n'y a pas d'injection de courants et conserver uniquement les barres internes des générateurs.

En effet :

$$I = YV \quad (2.33)$$

et

$$I = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.34)$$

Si nous remplaçons l'équation (2.34) en (2.33), on obtient :

$$\begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nr} \\ Y_{rn} & Y_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ V_r \end{bmatrix} \quad (2.35)$$

Dans l'équation (2.35),  $n$  représente les barres de tension internes des générateurs et  $r$  les barres d'injection nulle de courant.

Nous pouvons réécrire l'équation (2.35) comme :

$$I_n = Y_{nn}V_n + Y_{nr}V_r \quad (2.36)$$

$$0 = Y_{rn}V_n + Y_{rr}V_r \quad (2.37)$$

Si on remplace l'équation (2.37) dans l'équation (2.36), on obtient :

$$I_n = (Y_{nn} - Y_{nr}Y_{rr}^{-1}Y_{rn}) \times V_n \quad (2.38)$$

Ici  $(Y_{nn} - Y_{nr}Y_{rr}^{-1}Y_{rn})$  est la nouvelle matrice de grandeur  $n \times n$  où  $n$  est le nombre des générateurs.

### Troisième Etape : Résolution des équations de mouvement des machines

- finalement et à l'aide d'une méthode numérique de résolution des équations différentielles, on doit résoudre les équations de mouvement du système pour trouver les angles internes et la vitesse de chaque machine avant, pendant et après défaut.

En effet :

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{\omega_{syn}}{2H_i} [Pm_i - Pe_i(t)] \quad (2.39)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i(t) - \omega_{syn} \quad (2.40)$$

$$Pe_i(t) = |E_i|^2 |G_{ii}| + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |E_i| |E_j| |Y_{ij}| \cos(\delta_i(t) - \delta_j(t) - \vartheta_{ij}) \quad (2.41)$$

où

$Pm_i$  : Puissance mécanique de chaque machine;

$Pe_i(t)$  : Puissance électrique de chaque machine;

$\omega_i(t)$  : Vitesse de chaque machine;

$\delta_i(t)$  : Angle interne de chaque machine;

$E_i$  : Tension interne de chaque machine;

$G_{ii}$  : Éléments de la matrice d'admittance;

$Y_{ij}$  : Éléments de la matrice d'admittance;

$\vartheta_{ij}$  : Angles éléments  $ij$  matrice d'admittance.

## 2.7 Étude de la stabilité transitoire d'un réseau à plusieurs machines avec le modèle deux axes

Le modèle deux axes d'un système de  $m$  machines est formé des équations différentielles des machines et du système de contrôle de tension de l'excitatrice et par les équations algébriques du stator et du réseau électrique (Sauer and Pai 1998). Le modèle utilisé du système de contrôle de tension de l'excitatrice a été l'IEEE1.

En effet, les équations différentielles de (2.42) à (2.45) représentent la machine synchrone.

$$T'_{doi} \frac{dE'_{qi}}{dt} = -E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di}) I_{di} + E_{fdi} \quad (2.42)$$

$$T'_{qoi} \frac{dE'_{di}}{dt} = -E'_{di} - (X_{qi} - X'_{qi}) I_{qi} \quad (2.43)$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \quad (2.44)$$

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} = T_{Mi} - E'_{di} I_{di} - E'_{qi} I_{qi} - (X'_{qi} - X'_{di}) I_{di} I_{qi} - D_i (\omega_i - \omega_s) \quad (2.45)$$

où

$i=1,2,\dots,m;$

$m$  : Nombre des générateurs;

$\omega_i$  : Vitesse de chaque machine;

$\omega_s$  : Vitesse synchrone;

$I_{di}, I_{qi}$  : Composantes directe et en quadrature du courant statorique ;

$E'_{di}, E'_{qi}$  Force électromotrice axe direct et axe quadrature;

$T_{doi}, T_{qoi}$  : Constantes des temps circuit ouvert axe direct et axe quadrature;

$X'_{di}, X'_{qi}$  : Réactances transitoires axe direct et axe quadrature;

$R_{si}$  : Resistance d'armature de chaque machine;

$H_i$  : Constante d'inertie;

$D_i$  : Constante d'amortissement.

Les équations différentielles de (2.46) à (2.48) représentent le système de contrôle de tension de l'excitatrice.

$$T_{ei} \frac{dE_{fdi}}{dt} = -(K_{ei} + S_{ei}(E_{fdi})) E_{fdi} + V_{ri} \quad (2.46)$$

$$T_{fi} \frac{dR_{fi}}{dt} = -R_{fi} + \frac{K_{fi}}{T_{fi}} E_{fdi} \quad (2.47)$$

$$T_{ai} \frac{dV_{ri}}{dt} = -V_{ri} + K_{ai} R_{fi} - \frac{K_{ai} K_{fi}}{T_{fi}} E_{fdi} + K_{ai} (V_{refi} - V_i) \quad (2.48)$$

où

$V_{refi}$  : Tension de référence du système de contrôle de tension de l'excitatrice;

$V_{ri}, R_{fi}$  : Tension sortie du régulateur de tension et variable boucle fermée du système de contrôle de tension de l'excitatrice;

$E_{fdi}$  : Tension sortie du système de contrôle de tension de l'excitatrice;

$T_{ai}, T_{ei}, T_{fi}$  : Constante de temps du régulateur de tension, de l'excitatrice et de la boucle fermée;

$K_{ai}, K_{ei}, K_{fi}$  : Gain du régulateur de tension, de l'excitatrice et de la boucle fermée;

$S_{ei}$  : Fonction saturation de l'excitatrice.

Les équations algébriques polaires de (2.49) à (2.50) représentent le modèle du stator :

$$E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \vartheta_i) - R_{si} I_{di} + X'_{qi} I_{qi} = 0 \quad (2.49)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \vartheta_i) - R_{si} I_{qi} + X'_{di} I_{di} = 0 \quad (2.50)$$

où

$i=1, 2, \dots, m;$

$E'_{di}, E'_{qi}$  : Forces électromotrices axe direct et axe quadrature;

$X'_{di}, X'_{qi}$  : Réactances transitoires axe direct et axe quadrature;

$I_{di}, I_{qi}$  : Courants axe direct et axe quadrature;

$R_{si}$  : Résistance d'armature de chaque machine;

$\delta_i$  : Angle interne de chaque machine;

$V_i$  : Tension de barre de la machine;

$\theta_i$  : Angle tension de barre de la machine.

L'équation algébrique (2.51) représente le réseau électrique.

$$(I_{di} + jI_{qi})e^{j(\delta_i - \frac{\pi}{2})} = \sum_{k=1}^n V_k e^{j\theta_k} Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} \quad (2.51)$$

où

$$Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} \quad i \neq k$$

$$Y'_{ii} e^{j\alpha'_{ii}} = Y_{ii} e^{j\alpha_{ii}} + y_{ii} \quad .. \quad i=k$$

$i=1,2,\dots,m;$

$n=\text{nombre barres};$

$Y_{ii}$  : Matrice d'admittance du réseau;

$y_{ii} = -\frac{(P_{Li} - jQ_{Li})}{V_i^2}$  : Matrice d'admittance des charges.

La méthodologie de calcul des valeurs des angles internes et de la vitesse des machines est similaire à celle du modèle classique, mais, on doit résoudre l'ensemble des équations différentielles et algébriques à l'aide de la méthode implicite ou explicite des résolutions des équations. (Voir mémoire: *Étude comparative de méthodes de simulation de la stabilité transitoire*, Camilo Apraez, École de technologie supérieure, université du Québec, 2012)



## CHAPITRE 3

### STABILITÉ TRANSITOIRE EN UTILISANT SIME

#### 3.1 Fondements du SIME

- **Identification des machines critiques et non critiques**

En premier lieu, la perte de stabilité, se traduit par une séparation des machines en deux groupes : le groupe des machines critiques (CMs), qui sont les responsables de la perte de stabilité, et les machines non critiques (NMs), qui demeurent stables (Pavella, Ernst et al. 2000), (Pavella, Ruiz-Vega et al. 2008).

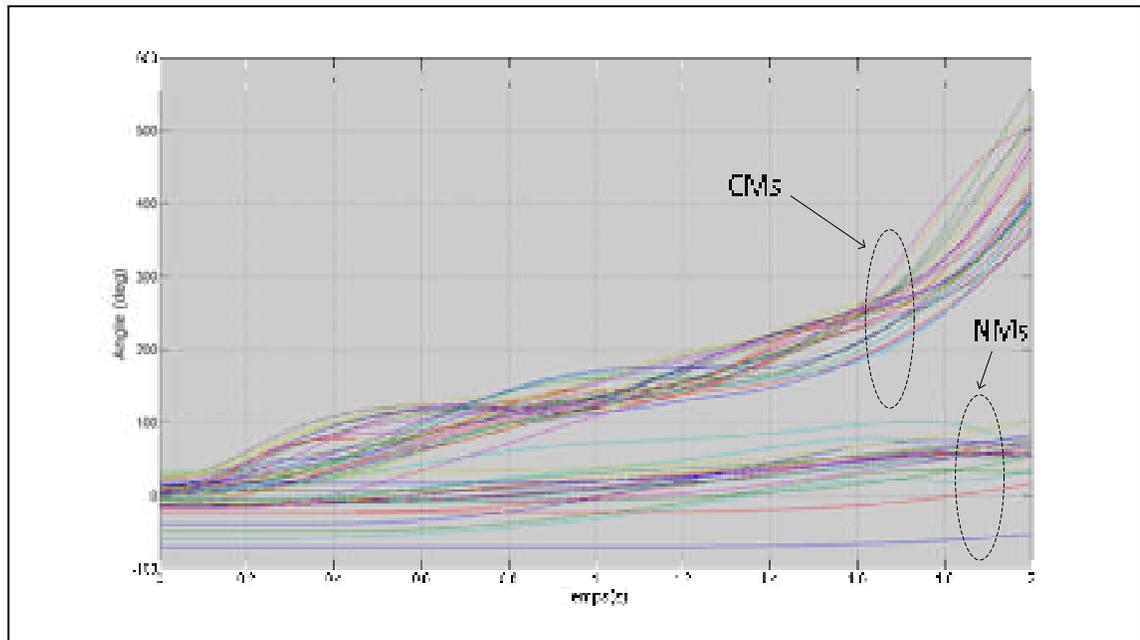


Figure 3.1 Groupe des machines critiques et non critiques  
Adaptée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.161)

Pour l'identification des groupes de machines critiques et non critiques, on a utilisé la méthode heuristique suivante (Chan, Cheung et al. 2002) :

- a. prendre les dernières valeurs des angles calculés dans la simulation dynamique et les classer et gardez par ordre décroissant dans un vecteur. Chaque angle est relié à une machine.
- b. prendre les premiers  $\delta_i$  angles à partir du vecteur et les fixer comme groupe des angles des machines critiques. Nous devons considérer le reste des angles comme groupe des angles des machines non critiques. Cela signifie qu'on doit prendre, dans la première itération, le premier angle  $\delta_i$  (avec  $i=1$ ) comme groupe des angles des machines critiques et les angles  $\delta_i$  (avec  $i=2,3,\dots,n$ ) comme groupe des angles des machines non critiques. Dans une deuxième itération, on doit prendre les angles  $\delta_i$  (avec  $i=1,2$ ) comme groupe des angles des machines critiques et les angles  $\delta_i$  (avec  $i=3,4,\dots, n$ ) comme groupe des angles des machines non critiques. Ce processus continue jusqu'à  $i=1,2,3,\dots,n-1$  comme groupe des angles des machines critiques et  $i=n$  comme groupe des angles des machines non critiques. Ici  $n$  est le nombre des machines.
- c. dans chaque itération calculer les centres d'inertie des angles correspondant à chaque groupe de machines en utilisant les équations (3.1) et (3.2) et calculer la déviation avec l'équation (3.3) :

$$\delta_C = \frac{\sum_{k \in C} M_k \delta_k}{\sum_{k \in C} M_k} \quad (3.1)$$

$$\delta_N = \frac{\sum_{j \in N} M_j \delta_j}{\sum_{j \in N} M_j} \quad (3.2)$$

$$\Delta \delta_i = \delta_C - \delta_N \quad (3.3)$$

- d. classifier les groupes de machines qui ont la plus grande valeur de  $\Delta\delta_i$  comme groupe des machines critiques.
- **Calcul de paramètres OMIB (one machine infinite bus)** (Pavella, Ernst et al. 2000)

En premier lieu, on doit calculer l'angle OMIB en utilisant les équations de (3.4) à (3.8).

En effet, dans les cas du groupe des machines critiques, l'angle critique est :

$$\delta_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \delta_k(t) \quad (3.4)$$

où

$$M_C = \sum_{k \in C} M_k \quad (3.5)$$

Dans le cas du groupe des machines non critiques, l'angle non critique est :

$$\delta_N(t) = M_N^{-1} \sum_{j \in N} M_j \delta_j(t) \quad (3.6)$$

où

$$M_N = \sum_{j \in N} M_j \quad (3.7)$$

Finalement, l'angle OMIB s'obtient ainsi :

$$\delta_{OMIB}(t) = \delta_C(t) - \delta_N(t) \quad (3.8)$$

Dans les cas du calcul de la vitesse OMIB, on utilise les équations de (3.9) à (3.13).

Pour la vitesse des machines critiques :

$$\omega_C(t) = M_C^{-1} \sum_{k \in C} M_k \omega_k(t) \quad (3.9)$$

où

$$M_C = \sum_{k \in C} M_k \quad (3.10)$$

Pour la vitesse des machines non critiques

$$\omega_N(t) = M_N^{-1} \sum_{j \in N} M_j \omega_j(t) \quad (3.11)$$

où

$$M_N = \sum_{j \in N} M_j \quad (3.12)$$

Finalement, la vitesse OMIB s'obtient ainsi :

$$\omega_{OMIB}(t) = \omega_C(t) - \omega_N(t) \quad (3.13)$$

Pour le calcul de la puissance électrique et mécanique OMIB, on utilise les équations de (3.14) à (3.16).

$$P_m OMIB(t) = M_{OMIB} (M_C^{-1} \sum_{k \in C} Pm_k(t) - M_N^{-1} \sum_{j \in N} Pm_j(t)) \quad (3.14)$$

$$Pe OMIB(t) = M_{OMIB} (M_C^{-1} \sum_{k \in C} Pe_k(t) - M_N^{-1} \sum_{j \in N} Pe_j(t)) \quad (3.15)$$

où

$$M_{OMIB} = \frac{M_C M_N}{M_C + M_N} \quad (3.16)$$

Finalement, la puissance d'accélération OMIB est :

$$PaOMIB(t) = PmOMIB(t) - PeOMIB(t) \quad (3.17)$$

### 3.2 Trajectoire OMIB stable

En utilisant le critère d'égalité des surfaces, une trajectoire OMIB est considéré stable quand la puissance électrique OMIB retourne sans toucher une deuxième fois la puissance mécanique OMIB (Pavella, Ernst et al. 2000).

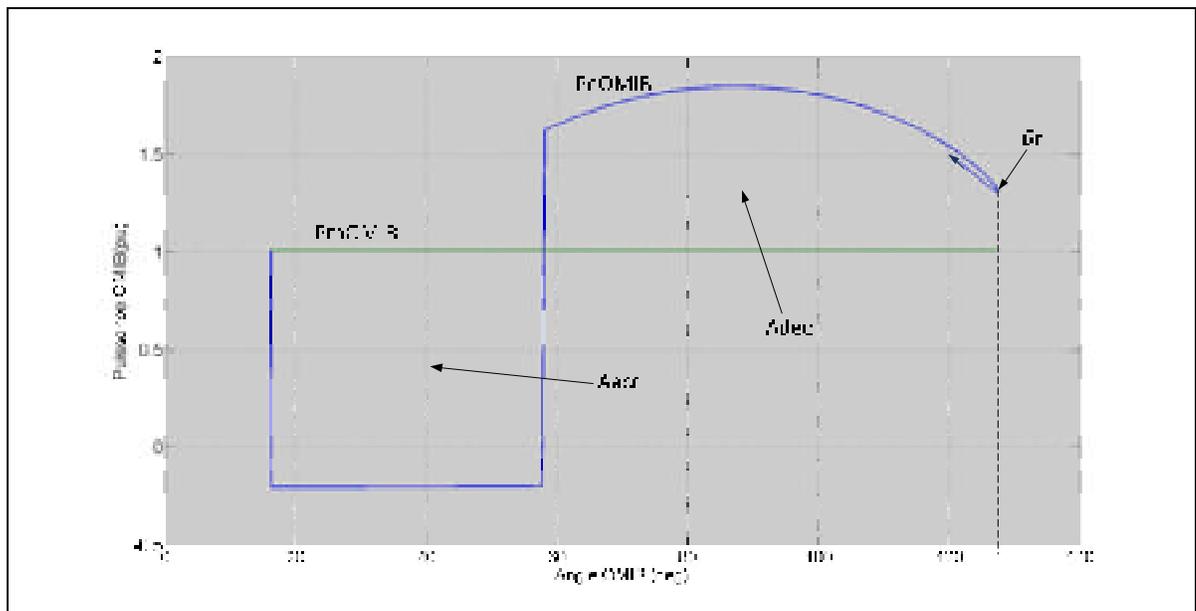


Figure 3.2 Trajectoire OMIB stable  
Adaptée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.45)

Par exemple, dans la figure 3.2, nous pouvons observer qu'il y a un angle de retour  $\delta_r$  qui est le point de retour de la puissance électrique OMIB. Alors, on peut déduire que le système est stable parce que la surface d'accélération est égale à la surface de décélération ( $A_{acc} = A_{dec}$ ).

Il faut remarquer que la présence d'une surface d'accélération négative indique la présence d'un groupe prédominant des machines non critiques (voir équation 3.15).

### 3.3 Trajectoire OMIB instable

De la même façon, en utilisant le critère d'égalité des surfaces, une trajectoire OMIB est considérée instable quand la puissance électrique OMIB touche une deuxième fois la puissance mécanique OMIB (Pavella, Ernst et al. 2000) .

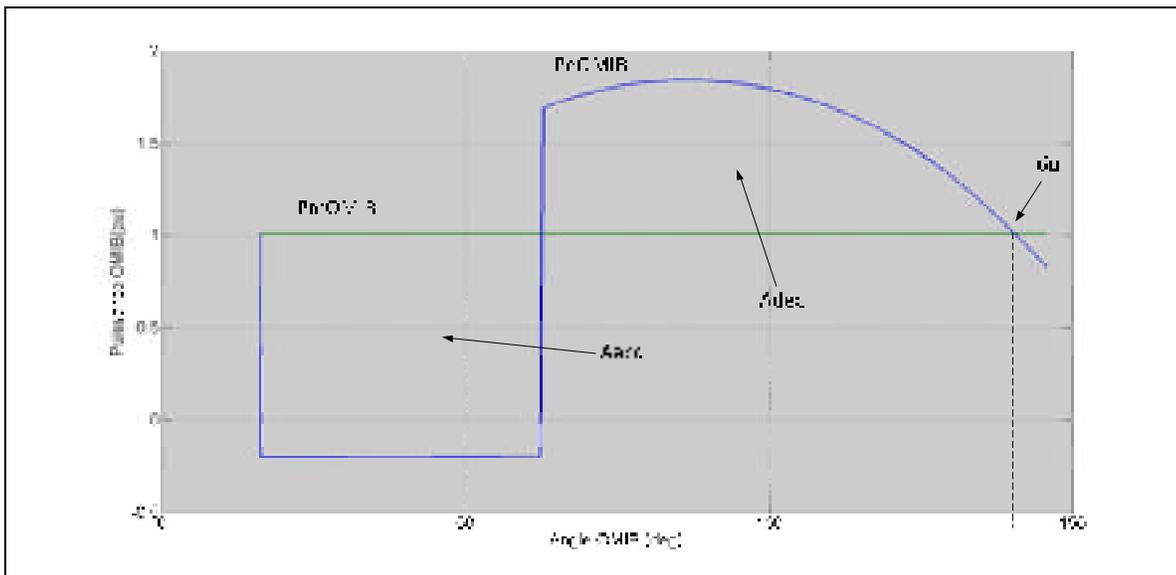


Figure 3.3 Trajectoire OMIB instable  
Adaptée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.45)

Dans la figure 3.3, nous pouvons voir la présence d'un angle  $\delta_u$  dans lequel la puissance électrique OMIB touche la puissance mécanique OMIB une deuxième fois. Dans ce cas, on peut conclure que le système est instable parce que la surface d'accélération est plus grande que la surface de décélération ( $A_{acc} > A_{dec}$ ).

### 3.4 Concept de la marge de stabilité

La surface d'accélération,  $A_{acc}$ , représente l'énergie cinétique que la machine stocke pendant la période de défaut. De même que la surface de décélération,  $A_{dec}$ , est l'énergie potentielle que la machine peut dissiper dans la période après-défaut (Pavella, Ernst et al. 2000) .

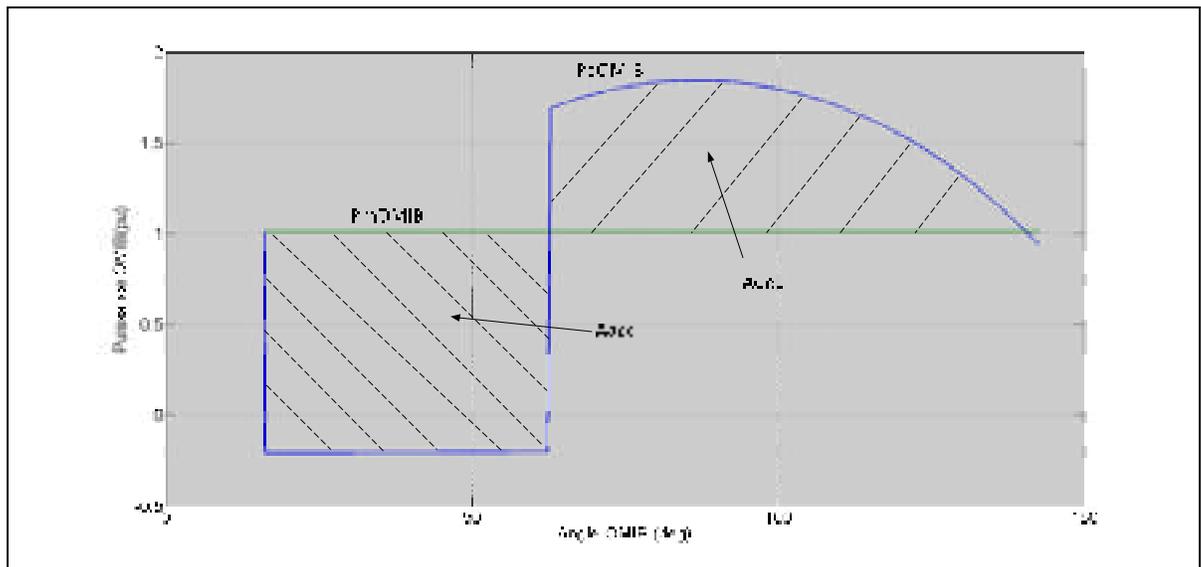


Figure 3.4 Les surfaces d'accélération et décélération  
Adaptée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.39)

Alors, la marge de stabilité est définie comme :

$$\eta = A_{dec} - A_{acc} \quad (3.18)$$

Dans le cas d'un système stable, la marge de stabilité est positive et cela signifie que :

$$\eta_{st} = (A_{dec} - A_{acc}) > 0 \quad (3.19)$$

De même que, dans le cas d'un système instable, la marge de stabilité est négative et définie comme :

$$\eta_u = (A_{dec} - A_{acc}) < 0 = -\frac{1}{2} \times M_{OMIB} \times \omega_u^2 \quad (3.20)$$

où

$$\omega_u \equiv \omega(\delta = \delta_u)$$

### 3.5 Le triangle d'approximation dans une trajectoire stable

Le triangle d'approximation est une surface conceptuelle qui se trouve entre l'angle de retour  $\delta_r$  et l'angle instable  $\delta_u$ . Cette surface représente une surface de décélération qui nous permet d'avoir toujours une marge de stabilité positive (Pavella, Ernst et al. 2000).

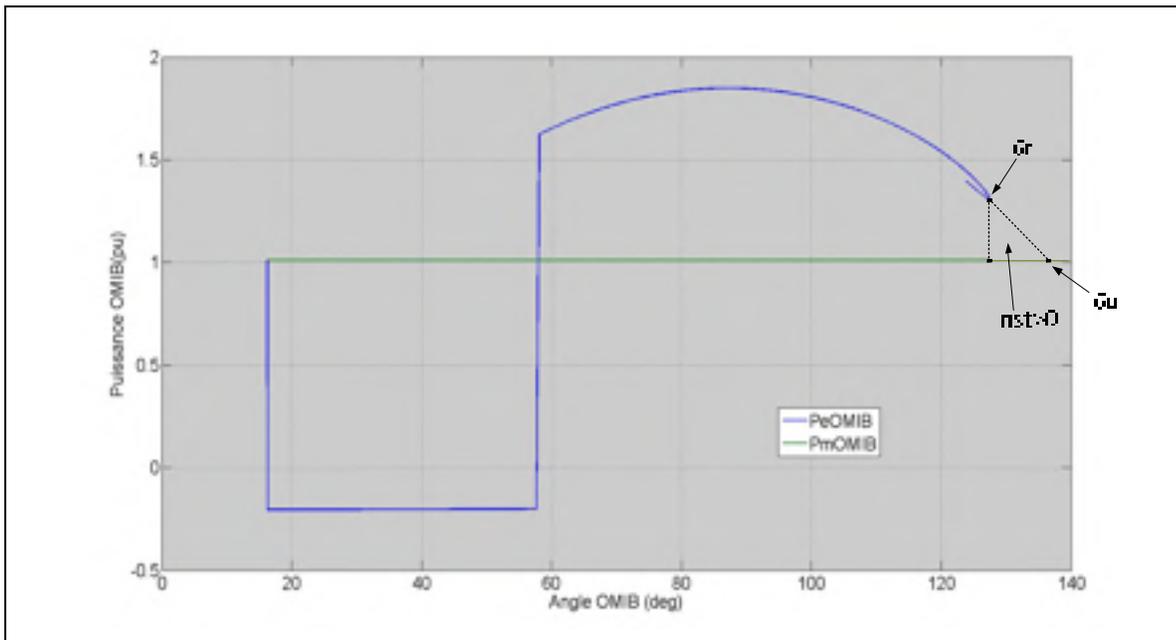


Figure 3.5 Triangle approximation dans une trajectoire OMIB stable  
Adaptée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.356)

La marge de stabilité d'un système stable est calculée de la façon suivante :

$$\eta_{st} = \frac{1}{2} * |P_{ar}| * (\delta_u - \delta_r) \quad (3.21)$$

où

$$P_{ar} = P_{mr} - P_{er} \quad (3.22)$$

Ici

$P_{ar}$  : Puissance d'accélération;

$P_{mr}$  : Valeur de la puissance mécanique dans la pointe  $\delta_r$ ;

$P_{er}$  : Valeur de la puissance électrique dans la pointe  $\delta_r$ .

Dans le calcul de la surface du triangle, nous faisons les suppositions suivantes :

- les angles  $\delta_r$  et  $\delta_u$  doivent être proches l'un de l'autre.
- pour calculer l'angle  $\delta_r$ , on doit précédemment, faire deux simulations instables de façon à utiliser les formules d'extrapolation suivantes :

$$\delta_u /_{\eta=0} = \delta_u(k) - \frac{\eta_u(k)}{S_{\delta_u}^{\eta_u}} \quad (3.23)$$

$$S_{\delta_u}^{\eta_u} = \frac{\eta_u(k) - \eta_u(k-1)}{\delta_u(k) - \delta_u(k-1)} \quad (3.24)$$

où

$\eta_u(k)$  : Marge de stabilité, simulation  $k$ ;

$\eta_u(k-1)$  : Marge de stabilité, simulation  $k-1$ ;

$\delta_u(k)$  : Angle instable, simulation  $k$ ;

$\delta_u(k-1)$  : Angle instable, simulation  $k-1$ .

### 3.6 Calcul CCT (Critical Clearing Time) avec la Marge de Stabilité

Une caractéristique très intéressante du SIME est qu'autour du CCT, la variation de la marge de stabilité par rapport à la variation du temps de défaut est presque linéaire.

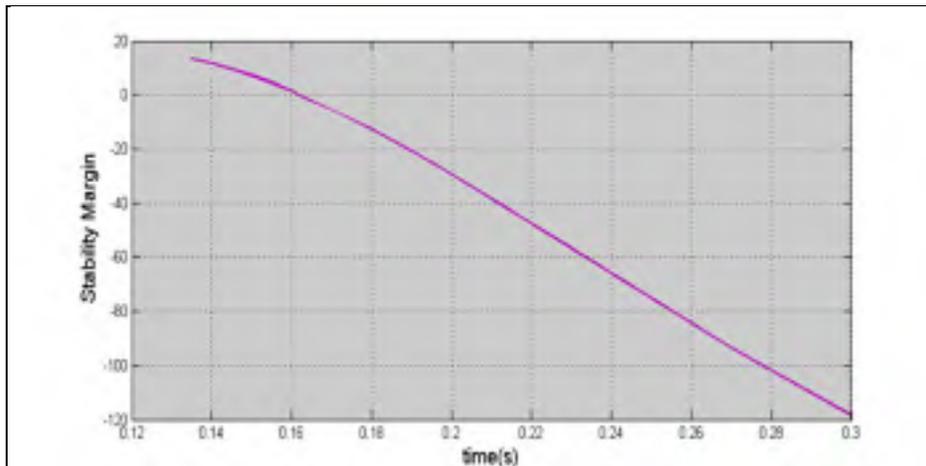


Figure 3.6 Marge stabilité vs temps critique

La procédure de recherche du CCT est décrite ci-dessous (Pavella, Ernst et al. 2000) :

- i. mettre  $k=0$  et choisir  $te(k)$  comme une simulation instable et calculer sa marge de stabilité  $n(k) < 0$ . Mettre  $k=k+1$  et  $te(k)=te(k-1)-\Delta*te(k-1)$ ;
- ii. exécuter le logiciel de stabilité transitoire avec le temps de défaut égal à  $te(k)$ . Si  $n(k)>0$ , mettre  $Kst=k$ . Si  $n(k)<0$  mettre  $Ku=k$ ;
- iii. si  $n(k)<0$ , faire une extrapolation entre les deux dernières simulations instables pour obtenir  $CCT(k)$ .

- si  $n(k) > 0$ , faire une interpolation entre la dernière simulation stable et la dernière simulation instable;
- iv. si on obtient une simulation instable, mettre  $k=k+1$ ,  $te(k)=CCT(k-1)$  et aller à (ii).  
si on obtient une simulation stable et  $te(Ku)-te(Kst) > \epsilon$ , mettre  $k=k+1$ ,  $te(k)=CCT(k-1)$  et aller à (ii), sinon aller à (v).
- v. arrêter la recherche du CCT. La valeur du temps critique se situe à l'intérieur de la fenêtre  $te(k)$  et  $te(k-1)$ .

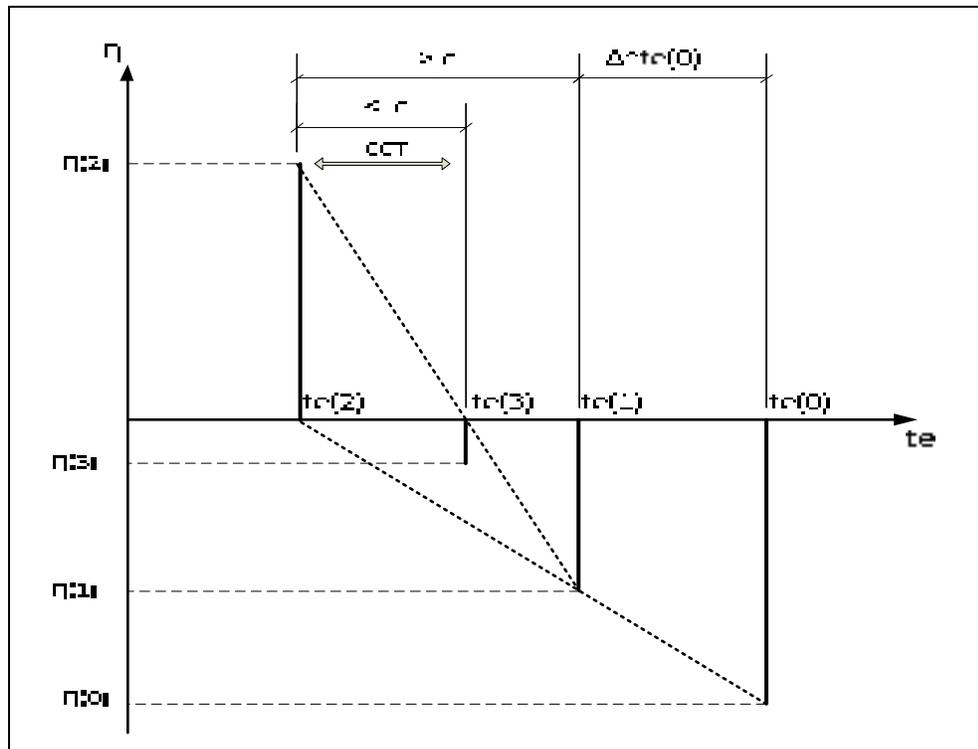


Figure 3.7 Description de la recherche du CCT (critical clearing time)  
Tirée de Pavella, Ernst et al.(2000, p.108)

Dans la figure 3.7, on peut voir le processus de recherche du CCT. Comme la variation de la marge de stabilité par rapport au temps critique est presque linéaire, on fait simplement un processus itératif d'interpolation et d'extrapolation pour trouver le CCT.



## CHAPITRE 4

### IMPLANTATION DU MODÈLE

#### 4.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous expliquerons l'implantation du modèle SIME dans l'étude de la stabilité transitoire. En premier lieu, nous expliquerons le fonctionnement du programme principal et, ultérieurement, les sous-programmes (le sous programme de stabilité transitoire et le sous programme SIME).

#### 4.2 Diagramme d'implantation du programme principal

Le programme principal contient les valeurs initiales du programme, telles que le temps critique et le temps de simulation et doit aussi appeler le sous programme de la stabilité transitoire et le sous programme SIME (voir Annexe IV, figure-A IV-1).

- le premier bloc fait l'initialisation de toutes les variables nécessaires pour le fonctionnement du code. Il est très important de dire que le point de départ de la recherche du CCT commence avec un temps de défaut instable (voir figure 4.1).

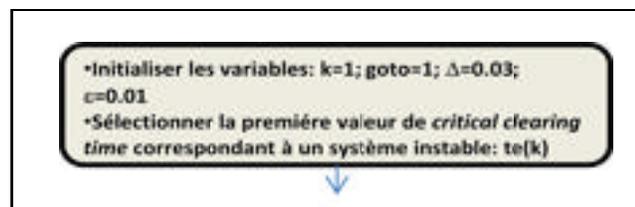


Figure 4.1 Bloc de départ de la simulation

La description des variables utilisées dans ce bloc est indiquée dans le tableau 4.1.

Tableau 4.1 Description de variables du bloc de simulation 1

Variable	Tâche
tf	temps total de la simulation en secondes
t_fault	temps du début du défaut en secondes
t_cleared	temps d'élimination du défaut en secondes
delta	facteur de recherche du deuxième CCT. $0 < \Delta < 1$
epsilon	erreur désirée dans la recherche du CCT. $\epsilon \approx 1\%$
k	Variable qui conserve le nombre d'itérations dans la recherche du CCT
kst	Variable qui conserve le nombre de la dernière itération stable k
ku	Vecteur qui conserve les nombres des itérations instables k
te	Vecteur qui conserve les temps critiques dans la recherche du CCT
goto	Variable qui contrôle la boucle de calcul du CCT

- les blocs 2 et 3 sont responsables de faire l'analyse de la stabilité transitoire, le calcul des paramètres OMIB et le calcul de la marge de stabilité en utilisant les paramètres initiaux. En particulier, le bloc 2 appelle le programme de stabilité transitoire pour calculer les angles, les vitesses et les machines critiques du système. Ensuite, le bloc 3 calcul les paramètres OMIB et la marge de stabilité du système (voir figure 4.2).

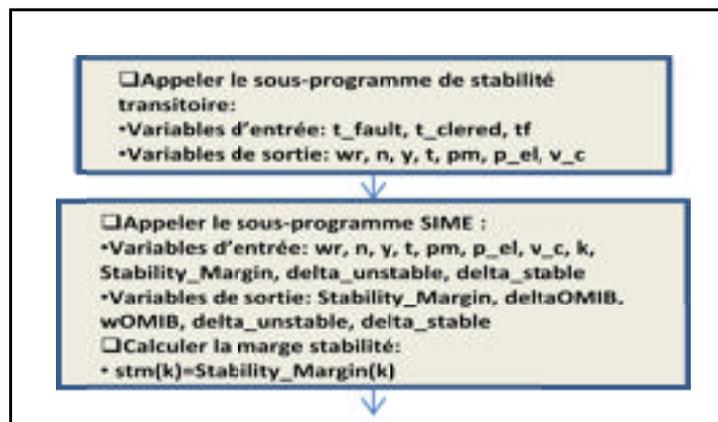


Figure 4.2 Blocs de calcul de la stabilité transitoire et des paramètres OMIB

La description des variables est indiquée dans le tableau 4.2.

Tableau 4.2 Description des variables des blocs de simulation 2 et 3

Variable	Tâche
wr	vitesse synchronique. $wr=2*\pi*60$
n	nombre des machines
y	matrice des résultats des angles et vitesses de chaque machine
t	vecteur qui contient les temps de simulation
pm	vecteur des résultats de puissance mécanique de chaque machine
p_el	vecteur des résultats de puissance électrique de chaque machine
v_c	vecteur qui contient les machines critiques et non critiques de la simulation actuelle
Stability_Margin	vecteur qui conserve les calculs de la marge de stabilité
delta_unstable	vecteur qui contient les angles $\delta_u$
delta_stable	vecteur qui contient les angles $\delta_r$
deltaOMIB	vecteur qui contient les angles OMIBs du système
wOMIB	vecteur qui contient les vitesses OMIBs du système
stm	vecteur qui conserve les calculs de la marge de stabilité

- dans le bloc 4, le vecteur  $ku(k)$ , qui contient la position d'une itération instable, est initialisé. Par la suite, le compteur d'itération  $k$  est augmenté et le deuxième CCT instable est calculé (voir figure 4.3).

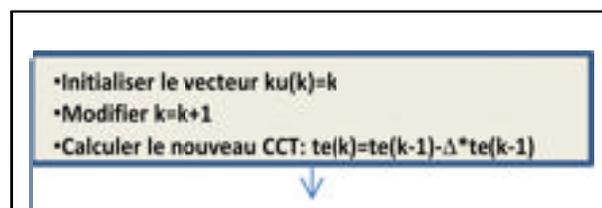


Figure 4.3 Bloc de calcul du deuxième CCT instable

- les blocs 5 et 6 utilisent la nouvelle valeur du CCT pour l'analyse de la stabilité transitoire, calcul de tous les paramètres OMIB et le calcul de la nouvelle marge de stabilité (voir figure 4.4).

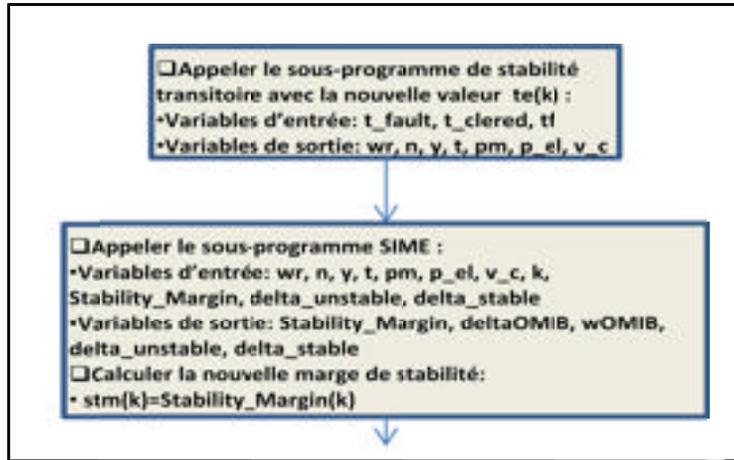


Figure 4.4 Blocs de calcul de la stabilité, des paramètres OMIB et de la marge de stabilité

- dans le bloc 7, le programme vérifie si la marge de stabilité a une valeur positive (cas stable) ou négative (cas instable). Si la marge de stabilité est positive, le nombre de l'itération actuelle est gardé dans la variable  $kst$ . Si la marge de stabilité est négative, le nombre de l'itération actuelle est gardé dans le vecteur  $ku$  (voir figure 4.5).

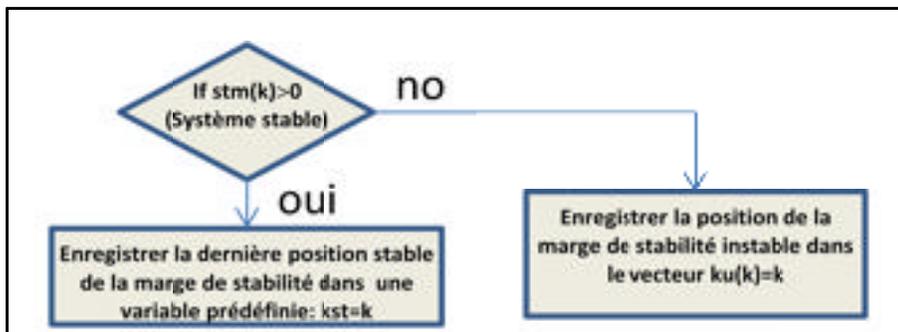


Figure 4.5 Bloc de vérification de la stabilité

- si la nouvelle marge de stabilité est positive, le programme fait l'interpolation entre la valeur actuelle stable du CCT-Marge Stabilité et la dernière valeur instable du CCT-Marge Stabilité. Aussi, le programme décide d'arrêter la simulation ou de poursuivre la recherche du CCT. De plus, les blocs actualisent le nombre de l'itération et conserve la nouvelle valeur du CCT (voir figure 4.6, blocs 8 et 9).

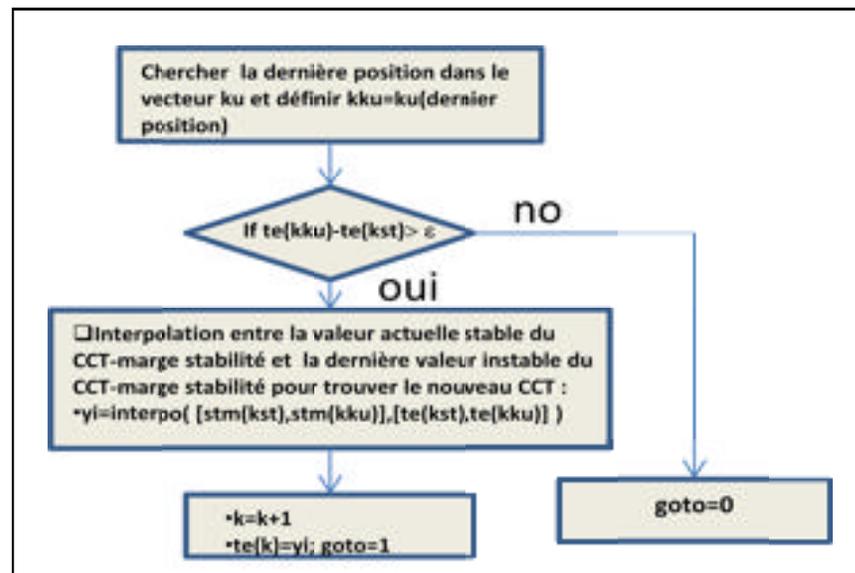


Figure 4.6 Blocs d'interpolation ou d'arrêt de la recherche du CCT

- si la nouvelle marge de stabilité est négative, le programme fait l'extrapolation entre la valeur actuelle instable du CCT-Marge Stabilité et la valeur précédente instable du CCT-Marge Stabilité. De plus, les blocs actualisent le nombre de l'itération et conserve la nouvelle valeur du CCT (voir figure 4.7, blocs 10 et 11).

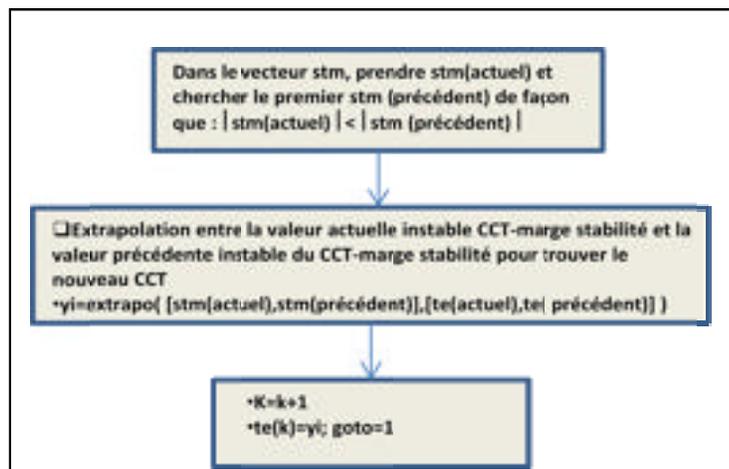


Figure 4.7 Blocs d'extrapolation de la recherche du CCT

### 4.3 Description du diagramme d'implantation du sous programme de stabilité transitoire (modèle classique)

Le sous programme de stabilité transitoire calcule l'angle, la vitesse et ainsi que la puissance électrique et mécanique de chaque machine à la suite d'un défaut électrique. Aussi, le sous programme définit des machines critiques et non critiques (voir Annexe IV, figure-A IV-2).

- le premier bloc est l'entrée des données dans le sous programme. Les données correspondent au temps de simulation  $t_f$ , au temps d'élimination du défaut  $t_{cleared}$  et au temps du début du défaut  $t_{fault}$  (voir figure 4.8).

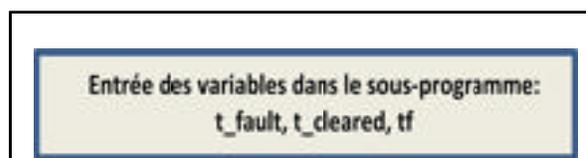


Figure 4.8 Variables entrées dans le sous programme de stabilité transitoire

- le deuxième bloc analyse la stabilité transitoire du système. Le sous programme appelle le programme MatPower pour faire l'écoulement de puissance du réseau. Ensuite, pour résoudre les équations différentielles de mouvement du système, on définit d'abord la

barre et la ligne où le court-circuit se produit. Puis, le sous programme calcule les matrices d'admittance avant-pendant-après défaut du réseau à l'aide de réduction de Kron et, finalement, le sous programme résout les équations de mouvement à l'aide d'une méthode numérique (voir figure 4.9).

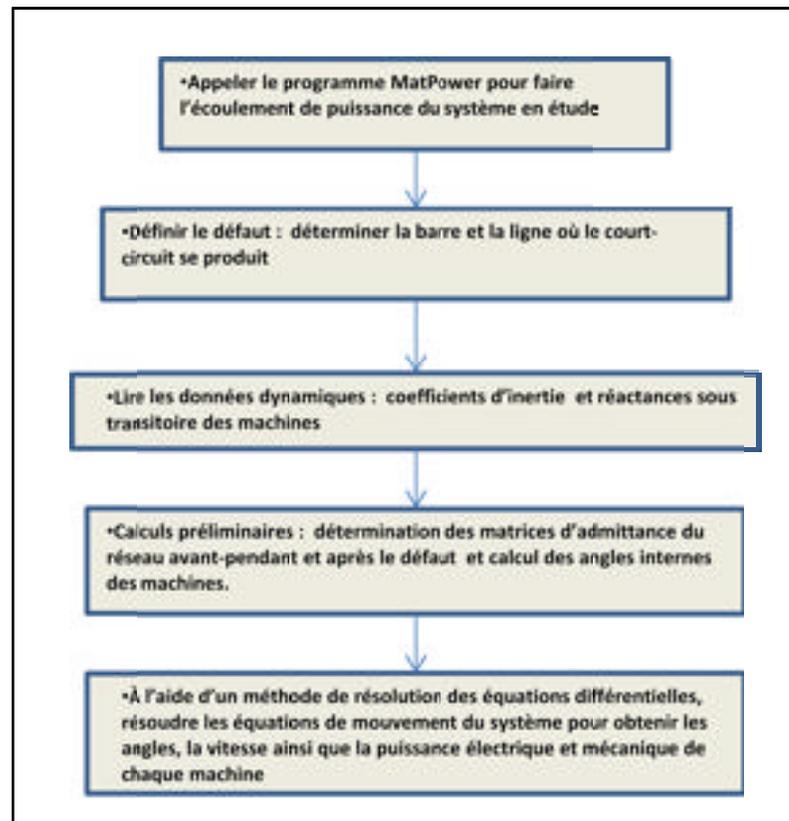


Figure 4.9 Bloc de résolution des équations de mouvement du système

- le troisième bloc calcule les machines critiques et le quatrième bloc correspond à la sortie des variables (voir figure 4.10).

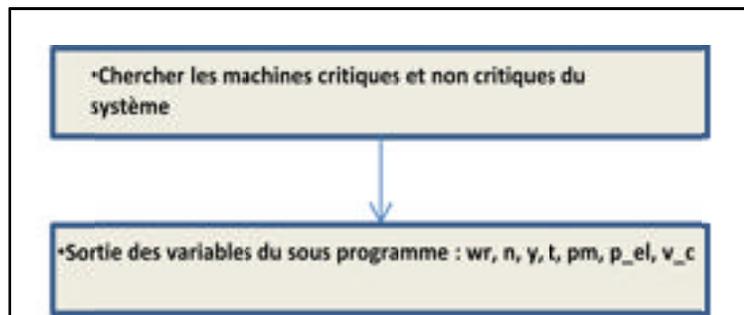


Figure 4.10 Blocs de calcul des machines critiques et des variables de sortie du sous programme

#### 4.4 Description du diagramme d'implantation du sous-programme SIME

Le sous programme SIME doit calculer tous les paramètres OMIB, évaluer si le système est stable ou instable et calculer la marge de stabilité du système (voir Annexe IV, figure-A IV-3).

- le premier bloc correspond à l'entrée des données et à la définition des variables. Les matrices  $d(:, :)$  et  $w(:, :)$  correspondent aux angles et à la vitesse des machines,  $M_{jk}$  est la matrice des coefficients d'inertie des machines et  $n\_data$  est la quantité des données par machine (voir figure 4.11).

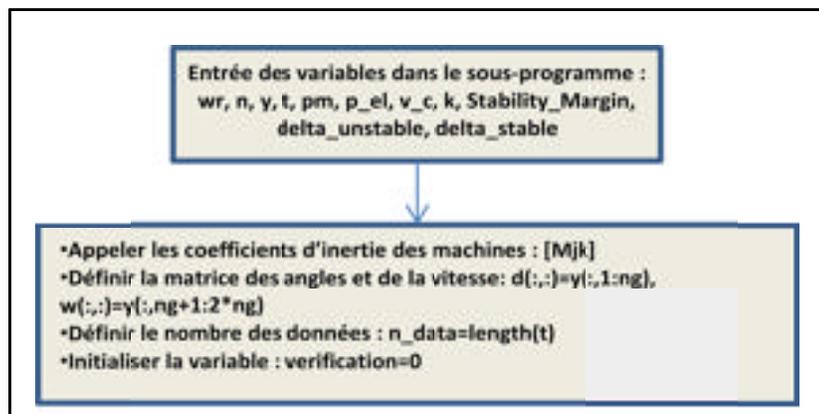


Figure 4.11 Blocs d'entrée des données et de définition des variables du sous programme SIME

- les deuxième et troisième blocs calculent les paramètres OMIB du système et vérifient si la puissance électrique OMIB touche une première fois la puissance mécanique OMIB (voir figure 4.12).

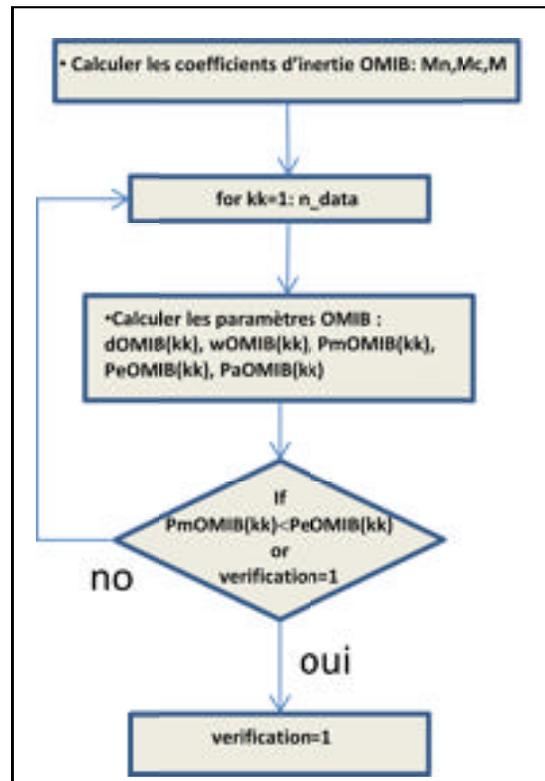


Figure 4.12 Bloc de calcul des paramètres OMIB

La variable *verification* est utilisée pour contrôler le premier point dans lequel la puissance électrique OMIB touche la puissance mécanique OMIB.

- une fois que la puissance électrique OMIB a touché la puissance mécanique OMIB pour la première fois, le bloc fait les vérifications suivantes : si la courbe de puissance électrique OMIB revient, le système est défini stable et le cycle *for* est interrompu; si la courbe de puissance électrique OMIB touche pour la deuxième fois la courbe de puissance mécanique OMIB, le système est défini instable et le cycle *for* est interrompu (voir figure 4.13, blocs 4 et 5).

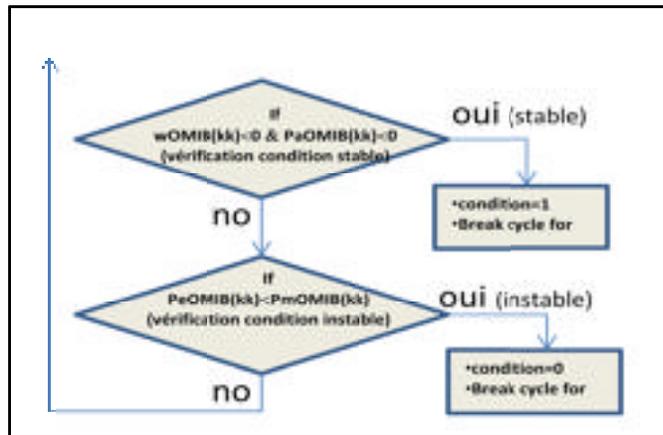


Figure 4.13 Bloc de vérification de la stabilité ou de l'instabilité du système

- si le système est instable, le sous programme calcule la marge de stabilité et conserve, dans le vecteur  $\text{delta\_unstable}(k)$ , la valeur d'angle correspondant au point d'intersection entre la puissance électrique OMIB et puissance mécanique OMIB. Si le système est stable, le sous programme calcule la marge de stabilité en utilisant la surface WST et conserve, dans le vecteur  $\text{delta\_unstable}(k)$ , la valeur d'angle correspondant au point de retour de puissance électrique OMIB. Finalement, le sous programme fournit les variables de sortie au programme principal (voir figure 4.14, blocs 6 et 7).

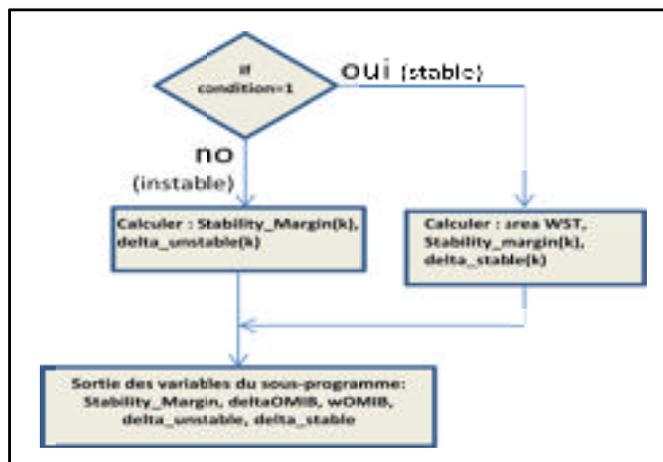


Figure 4.14 Bloc de calcul de la marge de stabilité

## CHAPITRE 5

### RÉSULTATS ET VALIDATION

#### 5.1 Introduction

Ce chapitre présentera les principaux résultats de l'analyse de stabilité transitoire avec SIME. Nous utiliserons différents réseaux test qui, dans notre étude, sont le réseau de 3 machines, le réseau New England, le réseau IEEE de 17 machines et le réseau IEEE de 50 machines (voir Annexe III). L'analyse a été effectuée en utilisant le modèle classique et le modèle deux axes des machines. La validation des résultats, a été effectuée en utilisant le logiciel PSS@E et à l'aide des résultats publiés dans les ouvrages spécialisées.

Les résultats de la simulation seront présentés dans les tableaux de 5.1 à 5.6. Ils présenteront les résultats numériques suivants : le temps critique, le groupe des machines critiques, la marge de stabilité et les angles critiques, la validation des résultats et le changement des machines critiques avec le temps de défaut.

Les figures 5.1 à 5.25 montreront quelques résultats graphiques en appliquant un défaut au système de 3 machines. Les courbes montreront le comportement de la puissance électrique et mécanique OMIB, la variation de vitesse OMIB, la variation des angles OMIB et la variation de la marge de stabilité ainsi que la variation de la tension interne des machines et le changement des groupes des machines critiques avec le temps de défaut.

Les simulations seront effectuées dans un ordinateur avec un processeur AMD Phenom II-X4-B93, vitesse 2.79 GHz et 3GB de mémoire RAM. La programmation se fera dans l'environnement MATLAB, version R2011a.

## 5.2 Résultats et validation- Modèle Classique

### 5.2.1 Résultats numériques

#### Système 3 machines – 9 barres, modèle classique

Le tableau 5.1 montre les résultats de la simulation du système de 3 machines-9 barres obtenus en utilisant l'algorithme SIME.

Tableau 5.1 Résultats de la simulation du système 3 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	Resultats SIME			Resultats PSS/E	Machines critiques
		<i>tr / tu (msec)</i> <i>Stable/instable</i>	$\delta r / \delta u$ (deg) <i>stable/instable</i>	Marge Stab <i>stable/instable</i>	<i>tr / tu (msec)</i> <i>Stable/instable</i>	
4	4-6	310.0/310.6	157.3/156.5	0.0002/-0.0114	309/310	2-3
9	9-8	237.7/238.0	149.4/156.2	0.0099/-0.0049	233/234	3
7	7-5	161.9/162.1	139.1/144.3	0.0053/-0.0022	160/161	2-3
7	7-8	182.3/183.0	135.8/138.6	0.0025/-0.0089	181/182	2
8	7-8	274.6/275.1	138.6/136.7	0.0018/-0.0057	273/274	2
4	4-5	317.7/318.3	163.9/168.6	0.0045/-0.0107	307/308	2-3

En concernant au temps de simulation, les résultats dans ce cas sont les suivantes :

- Temps simulation moyenne du programme stabilité transitoire : 340 ms.
- Temps simulation moyenne recherche machines critiques : 0,158 ms.
- Temps simulation moyenne recherche stabilité avec SIME : 50,7 ms.

### Système 10 machines – 39 barres, modèle classique

Le tableau 5.2 montre les résultats de la simulation du système de 10 machines-39 barres obtenus en utilisant l'algorithme SIME.

Tableau 5.2 Résultats de la simulation du système 10 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	Resultats SIME			Resultats PSS/E	Machines critiques
		<i>tr / tu(msec)</i> <i>stable/instable</i>	$\delta r / \delta u$ (deg) <i>stable/instable</i>	<i>Marge Stab</i> <i>Stable/instable</i>	<i>tr / tu (msec)</i> <i>stable/instable</i>	
29	28-29	52.8/52.9	108.4/112.5	0.0077/-0.001	52.5/52.6	9
29	26-29	72.8/75.5	114.0/116.2	0.003/-0.073	71.0/72.0	9
26	26-27	138.6/138.7	130.7/133.5	0.01/-0.00036	137.0/138.0	9
6	6-11	167.3/167.5	128.5/131.0	0.0040/-0.0029	160.0/161.0	2
34	--	194.4/196.8	111.7/167.6	0.815/-0.138	195.0/196.0	5
31	--	176.9/179.1	76.6/142.4	0.203/-0.205	177.0/178.0	2
26	25-26	127.2/127.5	132.7/135.7	0.005/-0.007	126.0/127.0	9
28	26-28	101.9/102.1	116.8/121.2	0.0102/-0.0032	104.0/105.0	9

Les temps de simulations obtenues dans ce cas sont les suivantes :

- Temps simulation moyenne du programme stabilité transitoire : 538 ms.
- Temps simulation moyenne recherche machines critiques : 0,232 ms.
- Temps simulation moyenne recherche stabilité avec SIME : 48,2 ms.

### Système 17 machines – 162 barres, modèle classique

Le tableau 5.3 montre les résultats de la simulation du système de 17 machines-162 barres. Dans les cas des barres 1-26-27-98, les résultats de validation proviennent de (Chung and Fang 1993) et dans le cas de la barre 75, le résultat de validation provient de (IEEE 1992).

Tableau 5.3 Résultats de la simulation du système 17 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	Resultats SIME			Resultats Publ.	Machines critiques
		<i>tr / tu(msec)</i> <i>stable/instable</i>	$\delta r / \delta u$ (deg) <i>stable/instable</i>	<i>Marge Stab</i> <i>stable / instable</i>	<i>tr / tu (msec)</i> <i>stable/instable</i>	
1	1-4	219.0/225.0	92.7/167.5	2.32/-0.92	220.0/230.0	2
26	26-25	195.0/196.0	156.9/158.8	0.166/-0.538	190.0/200.0	5-6
75	75-9	360.1/360.4	187.6/189.4	0.0079/-0.0022	350.0/360.0	16
27	27-62	191.9/192.2	142.8/145.6	0.0197/-0.0119	170.0/180.0	4
98	--	456.0/457.0	134.5/137.3	0.0446/-0.0072	440.0/450.0	9

Les temps de simulations dans ce cas sont les suivantes :

- Temps simulation moyenne du programme stabilité transitoire : 946 ms.
- Temps simulation moyenne recherche machines critiques : 0,297 ms.
- Temps simulation moyenne recherche stabilité avec SIME : 49,0 ms.

### Système 50 machines – 145 barres, modèle classique

Le tableau 5.4 montre les résultats de la simulation du système de 50 machines-145 barres obtenus en utilisant l'algorithme SIME.

Tableau 5.4 Résultats de la simulation du système 50 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	Resultats SIME			Resultats PSS/E	Machines critiques
		<i>tr / tu(msec)</i> <i>stable/instable</i>	$\delta r / \delta u$ (deg) <i>stable/instable</i>	Marge Stab <i>stable/instable</i>	<i>tr / tu (msec)</i> <i>stable/instable</i>	
7	7-6	108.5/108.8	167.7/141.2	0.509/-0.023	108.0/108.5	20-26
90	90-92	196.0/196.2	156.9/163.3	0.0026/-0.00027	190.0/200.0	7
117	--	238.0/243.0	53.2/147.9	1.8113/-1.442	240.0/250.0	18
58	58-87	333.0/342.0	212.3/216.1	0.039/-0.4364	320.0/330.0	14
25	25-27	182.4/183.0	129.3/131.2	0.006E-3/-0.0016E-3	190.0/200.0	43
144	--	181.0/189.0	108.5/108.4	0.0026/-0.2125	190.0/200.0	43
106	106-74	187.0/193.0	50.5/167.1	0.9171/-0.7124	184.6/185.5	22

Les temps de simulations obtenues dans ce cas sont les suivantes :

- Temps simulation moyenne du programme stabilité transitoire : 5,45 s.
- Temps simulation moyenne recherche machines critiques : 0,770 ms.
- Temps simulation moyenne recherche stabilité avec SIME : 58,1 ms.

### 5.2.2 Résultats graphiques du système 3 machines-9 barres, modèle classique

Les figures 5.1 à 5.9 présentent les résultats graphiques obtenus en appliquant un défaut au système de 3 machines, à la barre 7, avec l'ouverture de la ligne 5-7. Nous avons utilisé un temps de défaut de 161.9ms (cas stable) et un temps de défaut critique de 162.1ms (cas instable).

- les figures 5.1 et 5.2 montrent le comportement dynamique des angles internes des machines dans les cas stable et instable, modèle classique.

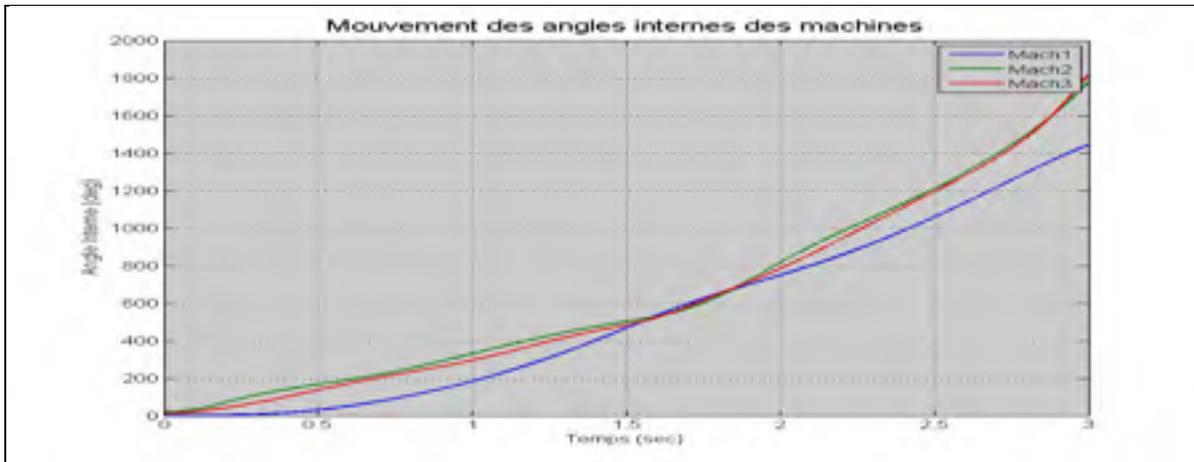


Figure 5.1 Mouvement des angles internes, cas stable, 3 machines

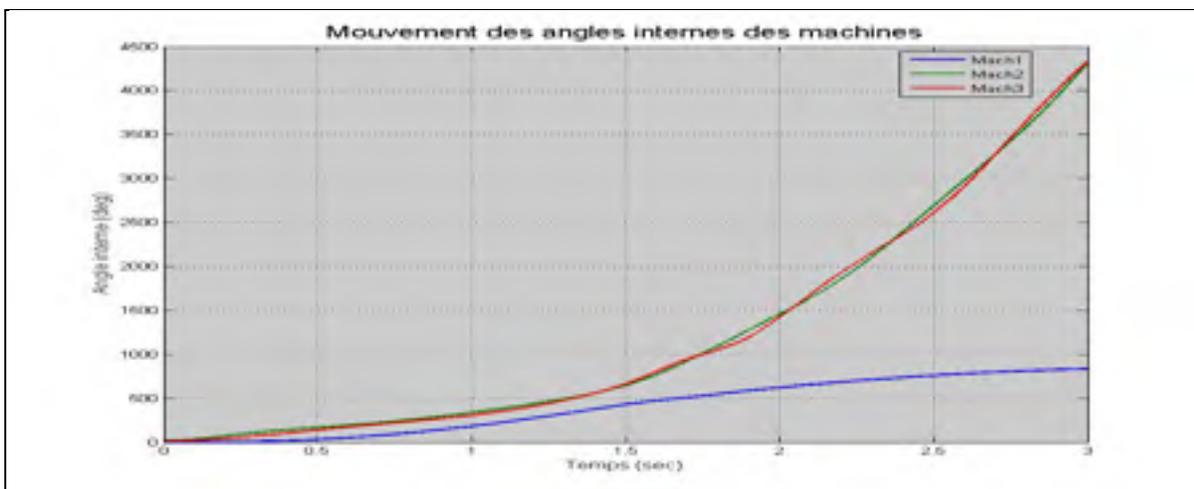


Figure 5.2 Mouvement des angles internes, cas instable, 3 machines

- les figures 5.3 et 5.4 montrent l'évolution de la puissance électrique et mécanique OMIB dans les cas stable et instable, modèle classique.

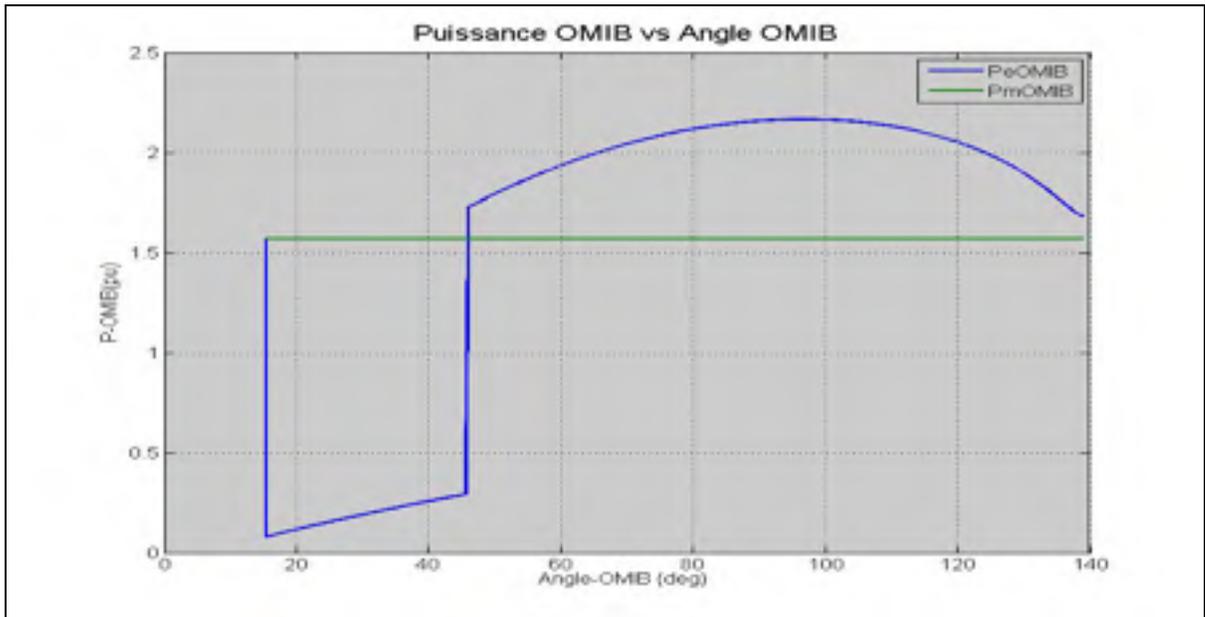


Figure 5.3 Puissance électrique et mécanique OMIB, cas stable, 3 machines

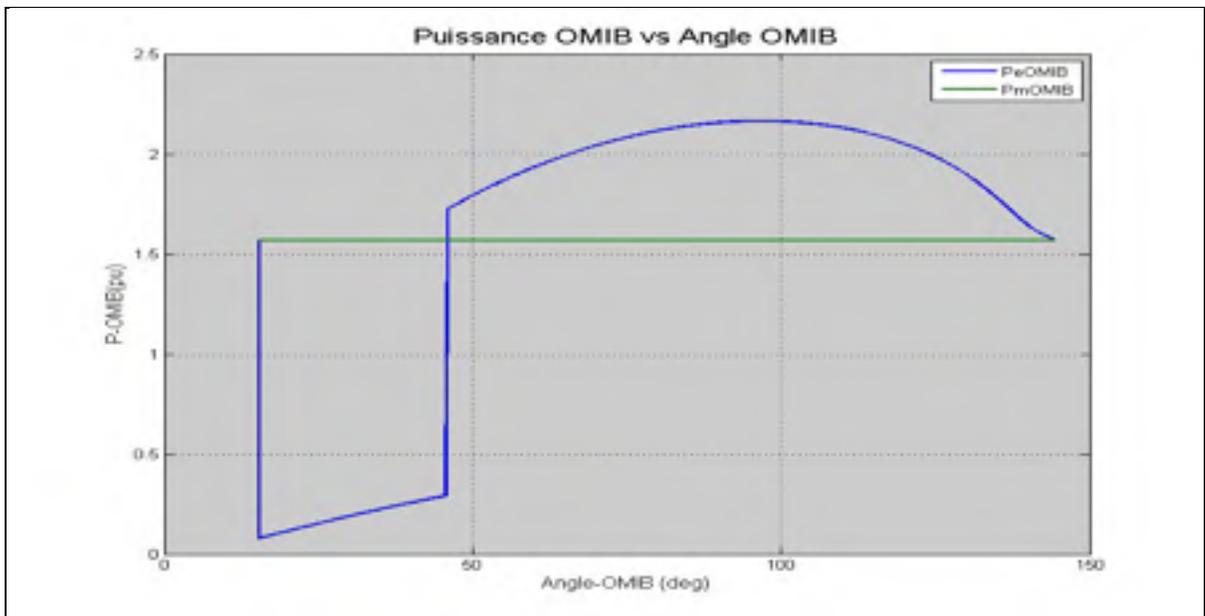


Figure 5.4 Puissance électrique et mécanique OMIB, cas instable, 3 machines

- les figures 5.5 et 5.6 montrent l'évolution des angles OMIB dans les cas stable et instable, modèle classique.

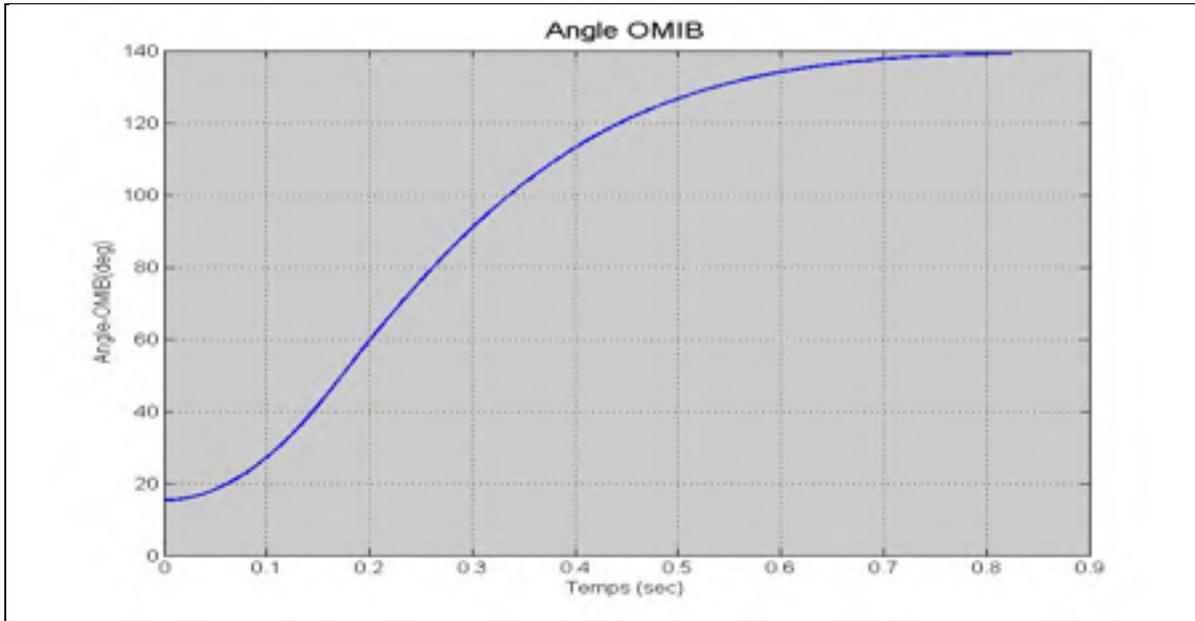


Figure 5.5 Angle OMIB, cas stable, 3 machines

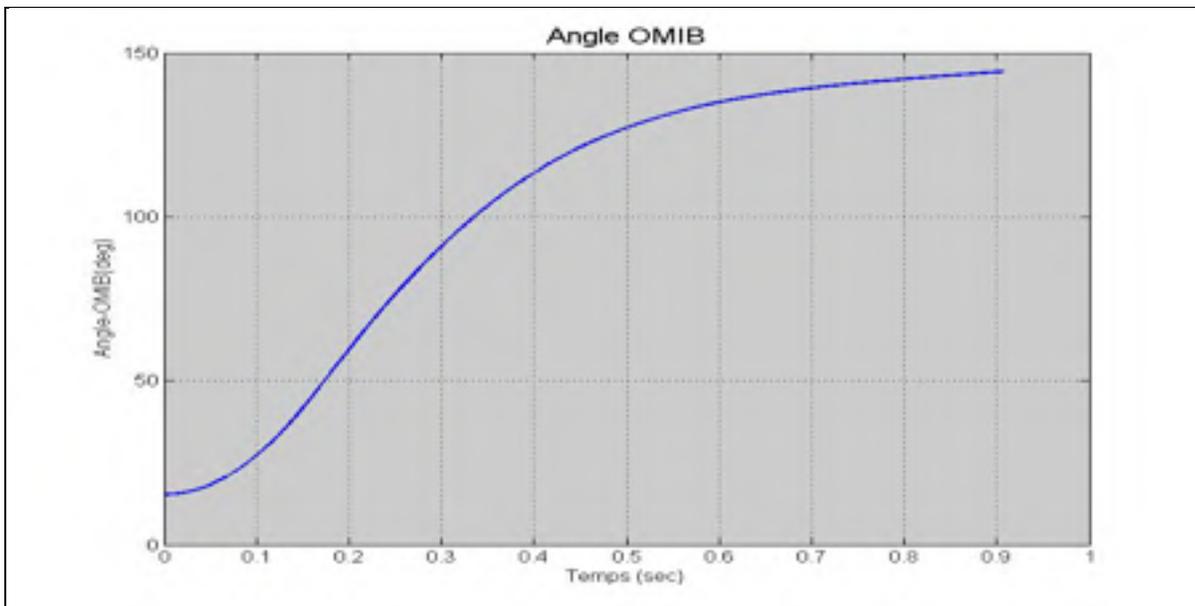


Figure 5.6 Angle OMIB, cas instable, 3 machines

- les figures 5.7 et 5.8 montrent l'évolution de la vitesse OMIB dans les cas stable et instable, modèle classique.

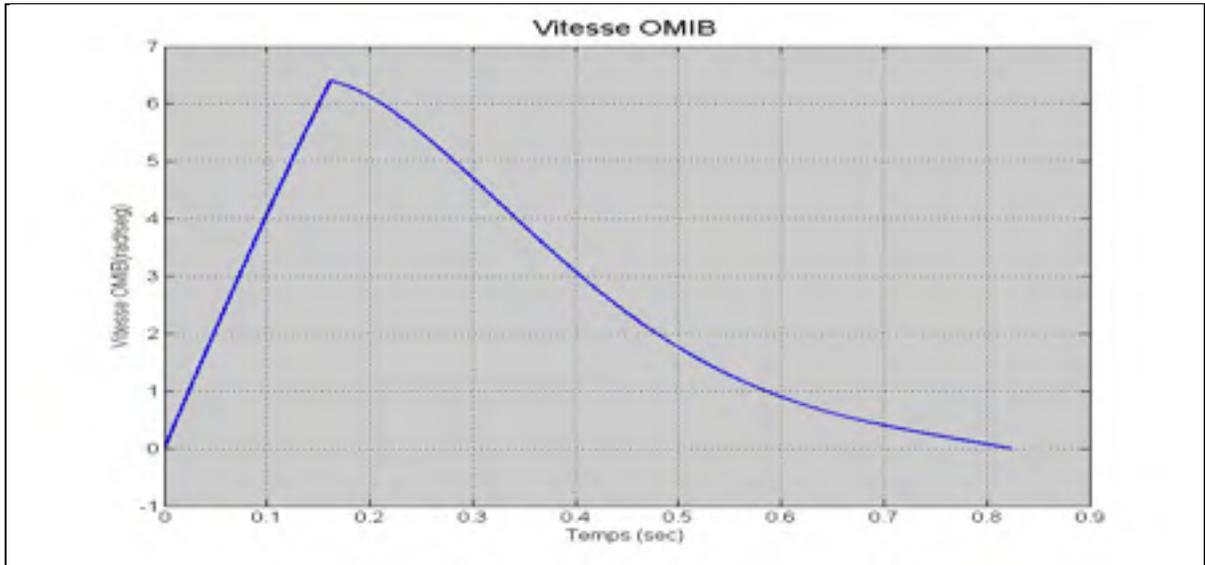


Figure 5.7 Vitesse OMIB, cas stable, 3 machines

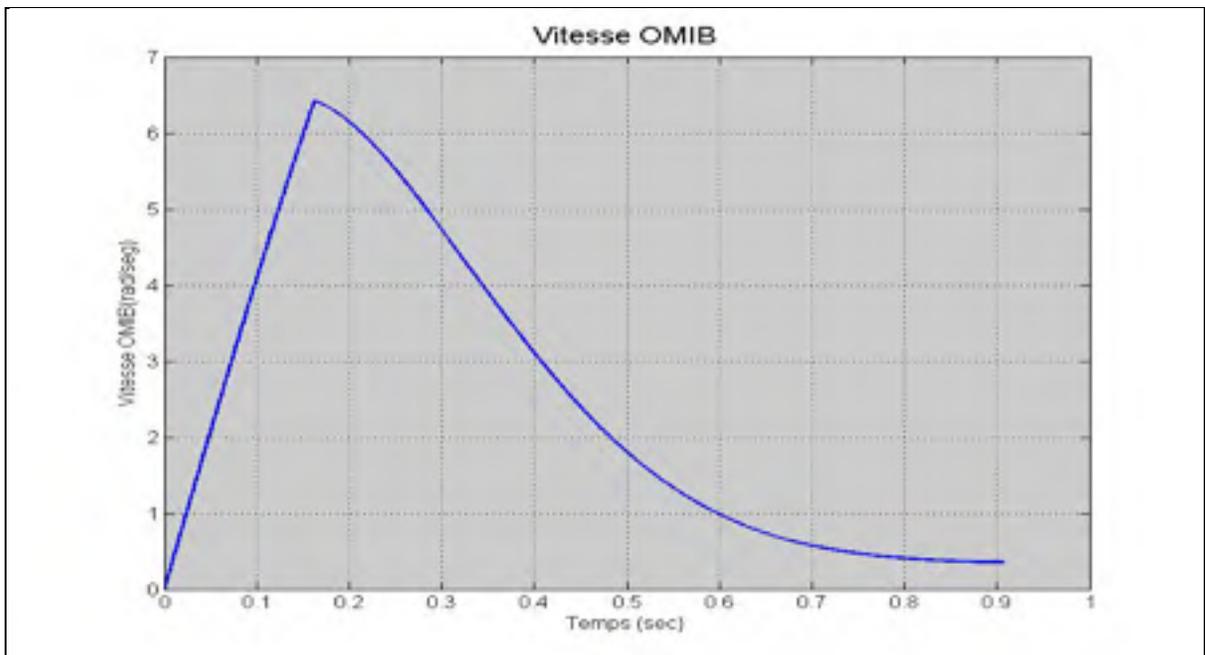


Figure 5.8 Vitesse OMIB, cas instable, 3 machines

- la figure 5.9 montre l'évolution de la marge de stabilité du système, modèle classique.

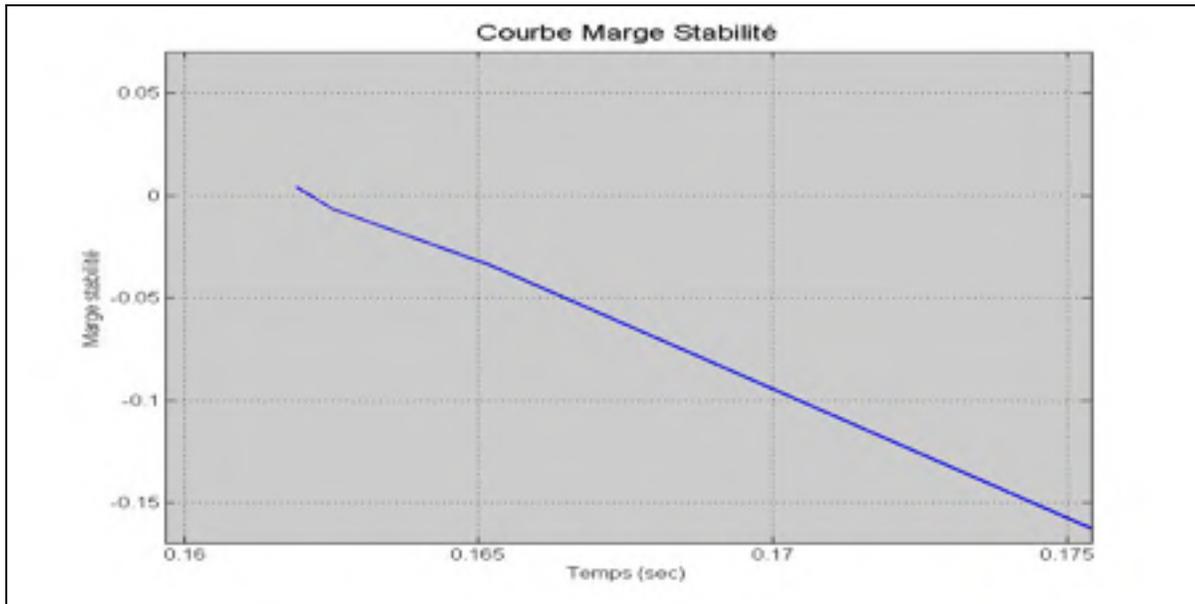


Figure 5.9 Variation de la marge de stabilité du système, 3 machines

### 5.3 Résultats et validation- Modèle 2 axes

#### 5.3.1 Résultats numériques système 3 machines – 9 barres, modèle 2 axes

Le tableau 5.5 montre les résultats de la simulation du système de 3 machines-9 barres obtenus en utilisant SIME avec le modèle deux axes.

Tableau 5.5 Résultats simulation système 3 machines, modèle deux axes

Défaut barre n°	Ligne ouverte	Resultats SIME			Resultats PSS/E	Machines critiques
		<i>tr / tu(msec)</i> <i>stable/instable</i>	$\delta r / \delta u$ (deg) <i>stable/instable</i>	<i>Marge Stab</i> <i>stable/instable</i>	<i>tr / tu (msec)</i> <i>stable/instable</i>	
4	4-6	222.0/223.0	154.2/166.5	0.01115/-0.0023	226.0/227.0	2-3
4	4-5	222.0/223.0	182.3/165.5	0.0179/-0.0059	226.0/227.0	2-3
9	9-8	195.0/197.0	134.3/153.0	0.0916/-0.0249	191.0/192.0	3
7	7-5	78.8/79.5	153.7/153.8	8.898E-6/-0.0038	86.0/87.0	2-3
7	7-8	132.5/132.8	147.8/147.5	1.359E-5 -0.0018	131.0/132.0	2
8	7-8	200.0/201.4	146.9/147.0	3.948E-5/-0.00322	198.0/199.0	2

Les temps de simulations obtenues dans ce cas sont les suivantes :

- Temps simulation moyenne du programme stabilité transitoire : 8,78 s.
- Temps simulation moyenne recherche machines critiques : 0,118 ms.
- Temps simulation moyenne recherche stabilité avec SIME : 50,1 ms

#### 5.3.2 Résultats graphiques du système 3 machines-9 barres, modèle 2 axes

Les figures 5.10 à 5.18 présentent les résultats graphiques. Nous avons testé un défaut à la barre 7 avec l'ouverture de la ligne 5-7 et l'utilisation d'un temps de défaut de 78.8ms, dans le cas stable, et d'un temps de défaut de 79.5ms dans le cas instable.

- les figures 5.10 et 5.11 montrent le comportement dynamique des angles internes des machines dans les cas stable et instable, modèle 2 axes.

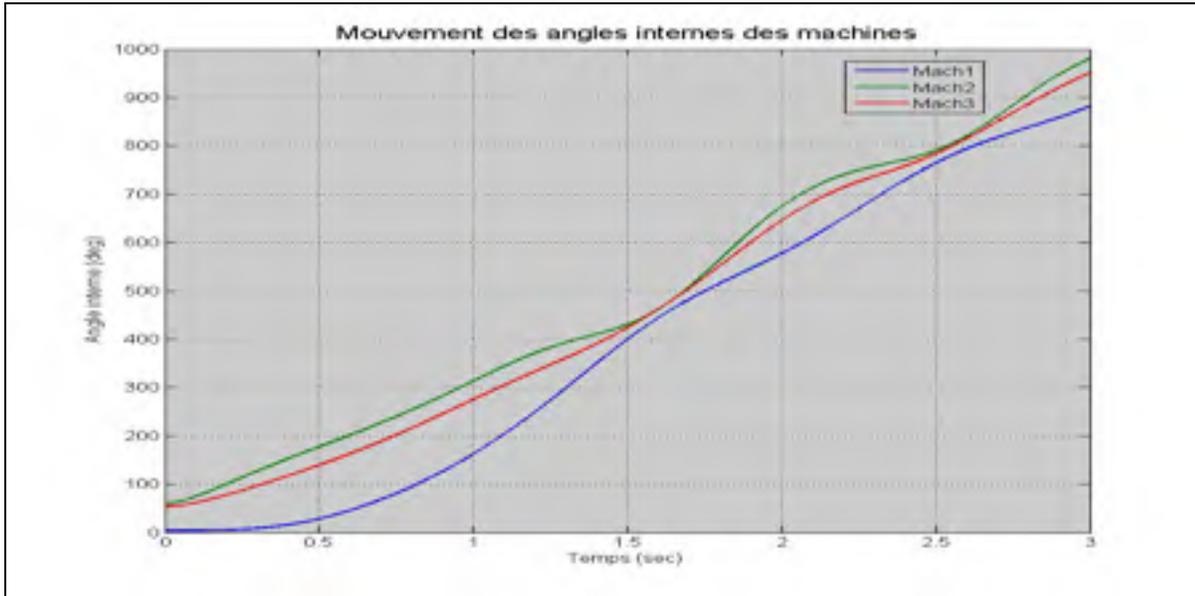


Figure 5.10 Mouvement des angles internes, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

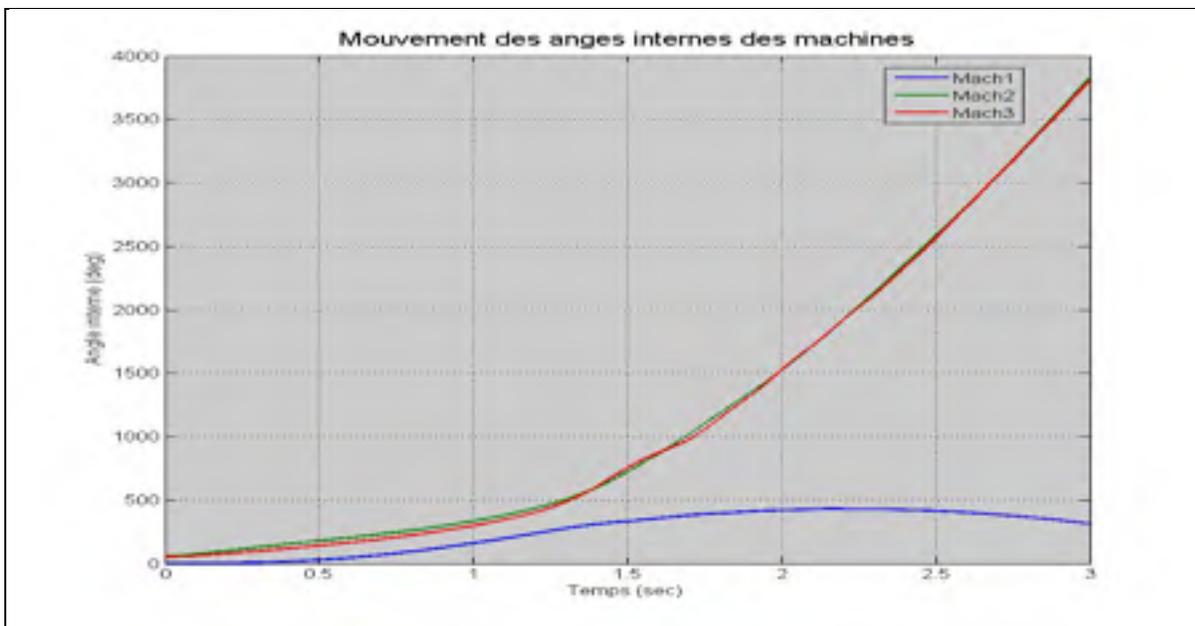


Figure 5.11 Mouvement des angles internes, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes

- les figures 5.12 et 5.13 montrent l'évolution de la puissance électrique et mécanique OMIB, dans les cas stable et instable, modèle deux axes.

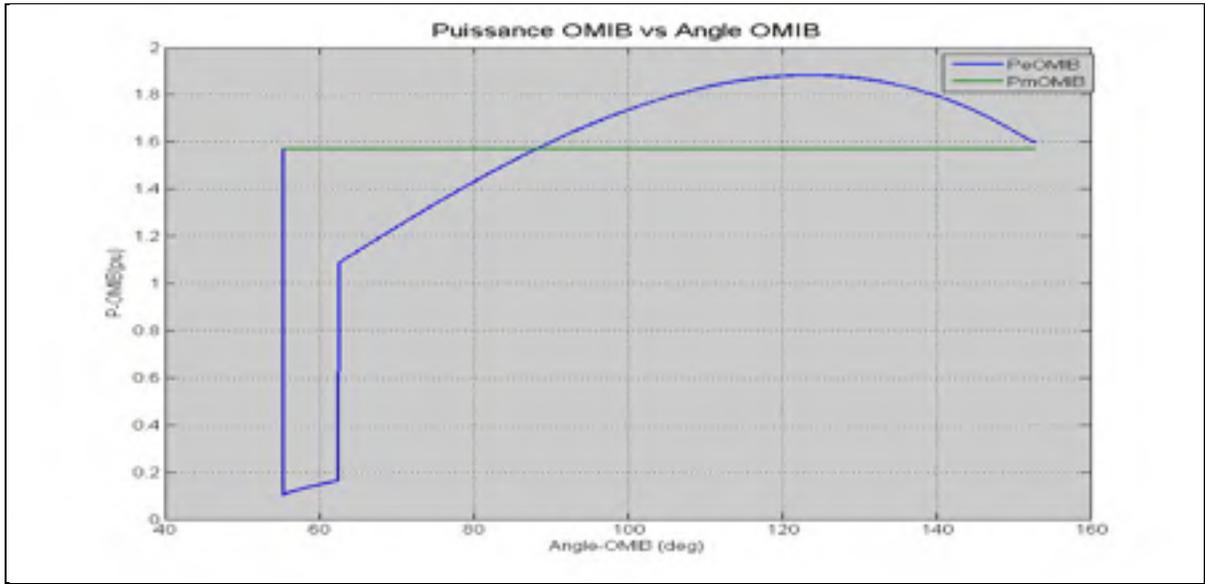


Figure 5.12 Puissance électrique et mécanique OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

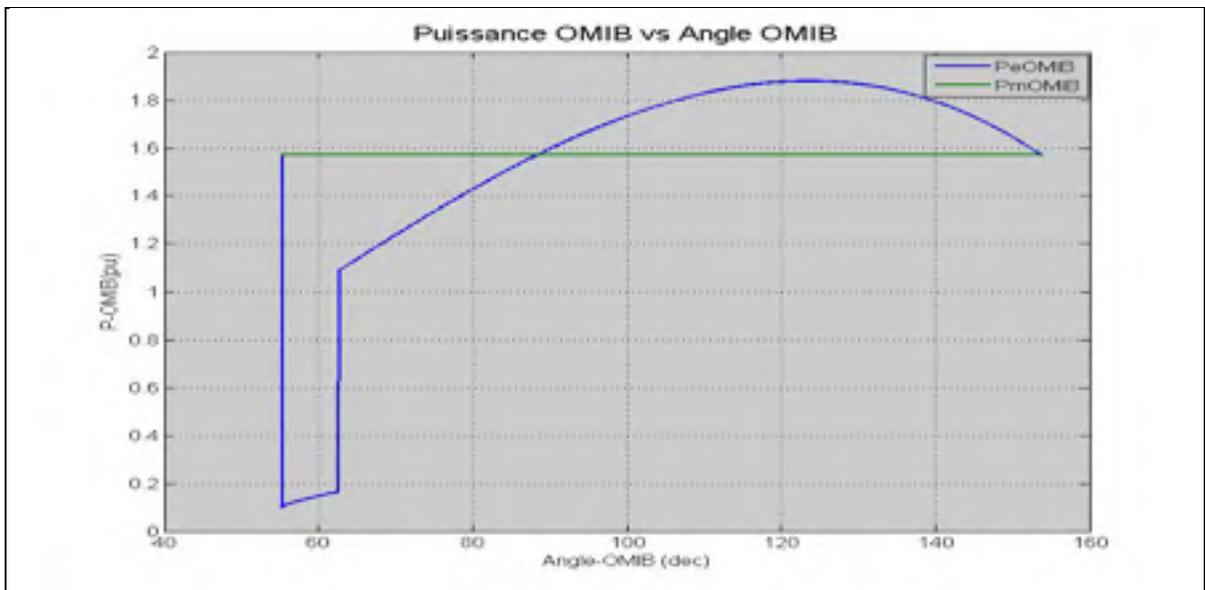


Figure 5.13 Puissance électrique et mécanique OMIB, cas instable,  
3 machines, modèle 2 axes

- les figures 5.14 et 5.15 montrent l'évolution des angles OMIB, dans le cas stable et instable, modèle 2 axes.

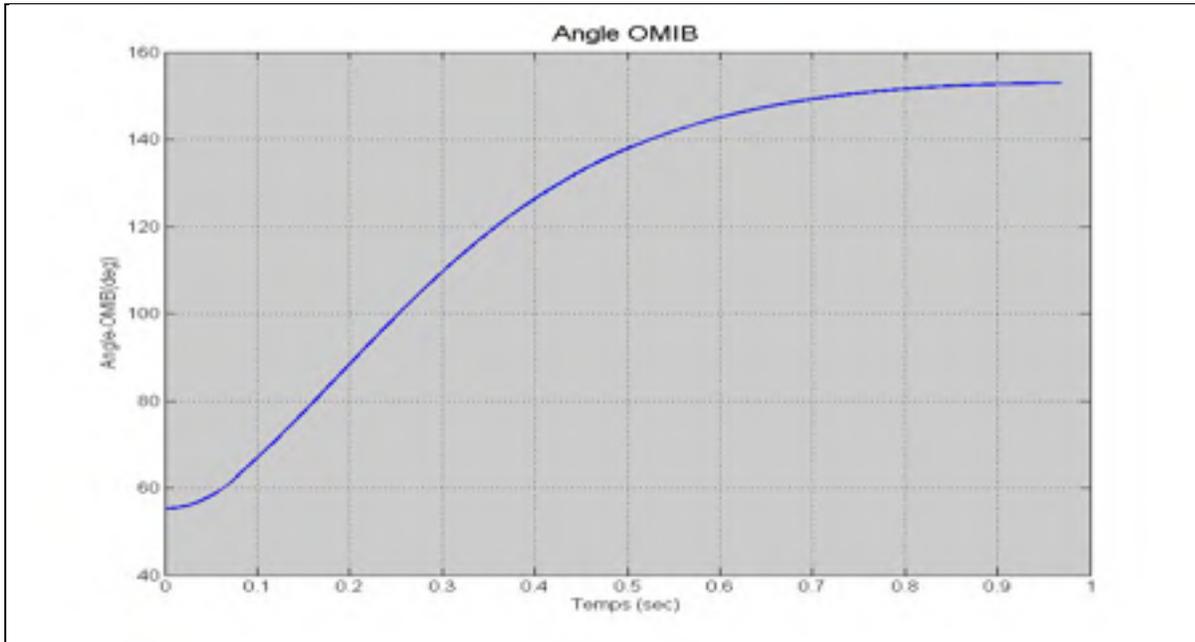


Figure 5.14 Angle OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

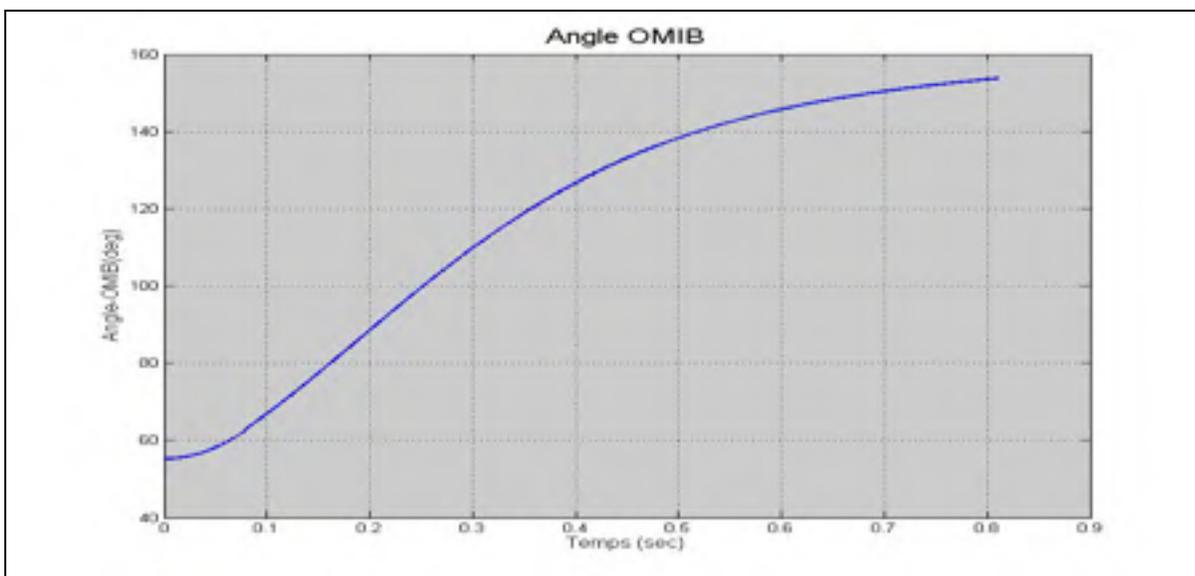


Figure 5.15 Angle OMIB, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes

- les figures 5.16 et 5.17 montrent l'évolution de la vitesse OMIB, dans les cas stable et instable, modèle 2 axes.

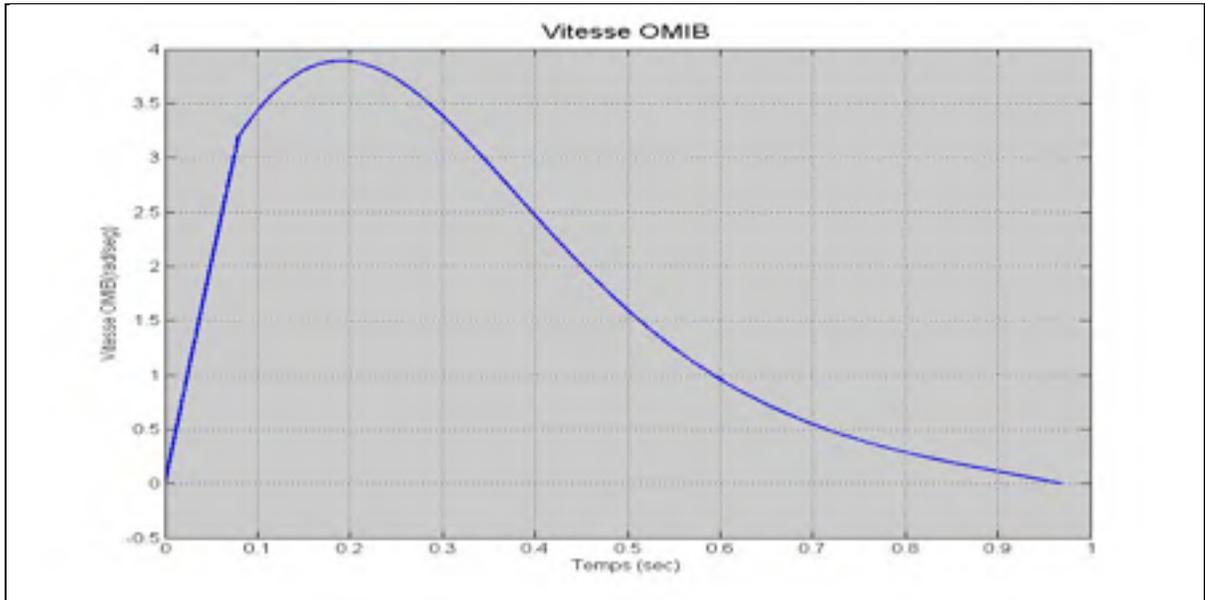


Figure 5.16 Vitesse OMIB, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

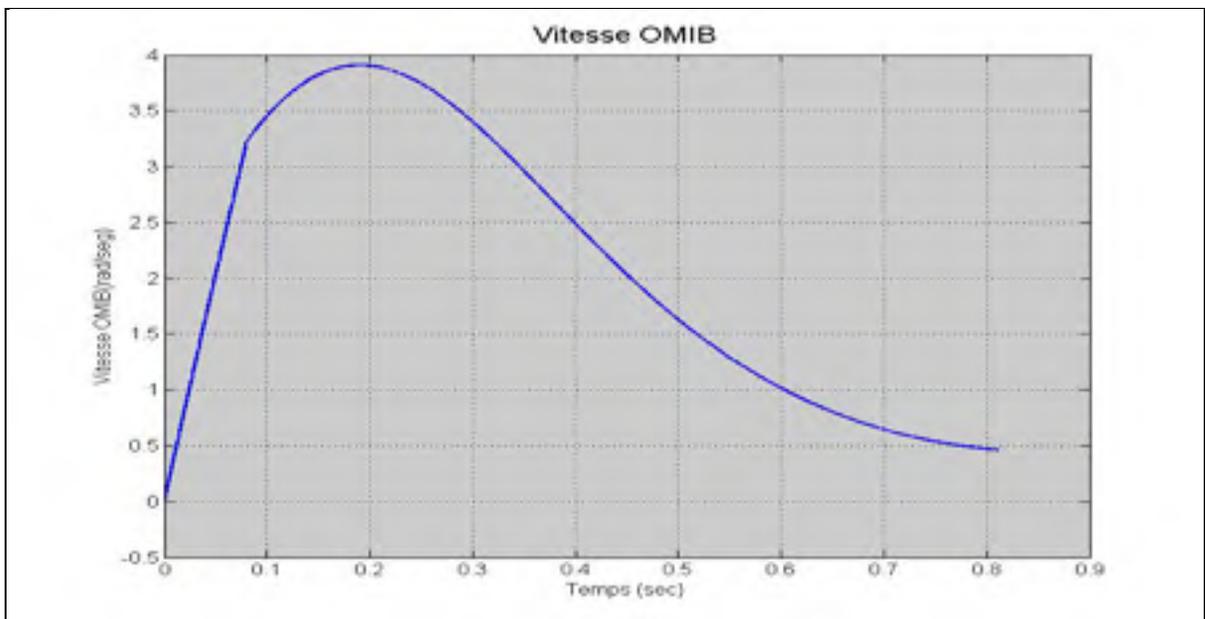


Figure 5.17 Vitesse OMIB, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes

- la figure 5.18 montre l'évolution de la marge de stabilité du système, modèle deux axes.

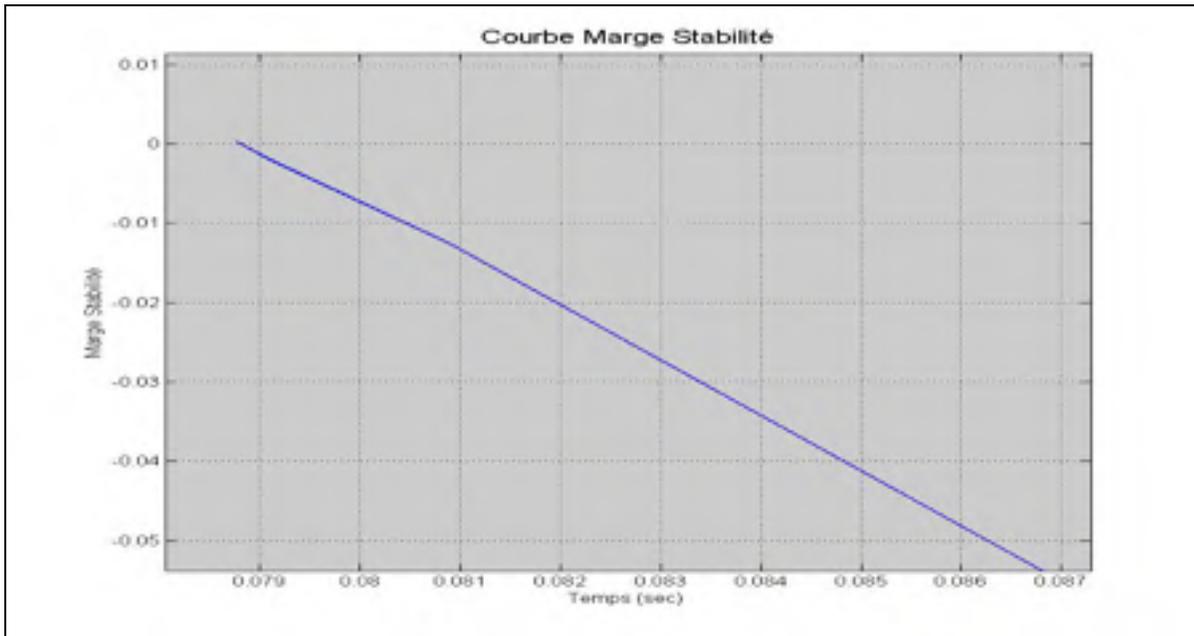


Figure 5.18 Variation de la marge de stabilité du système, 3 machines, modèle 2 axes

### 5.3.3 Variation de la tension de l'excitatrice et tension interne des machines, modèle 2 axes

Les figures 5.19 à 5.22 présentent les résultats graphiques de l'évolution de la tension interne des machines et de la tension de l'excitatrice. Nous avons testé un défaut à la barre 7 avec l'ouverture de la ligne 5-7 et d'un temps de défaut de 70ms, dans le cas stable, et de 80ms dans le cas instable.

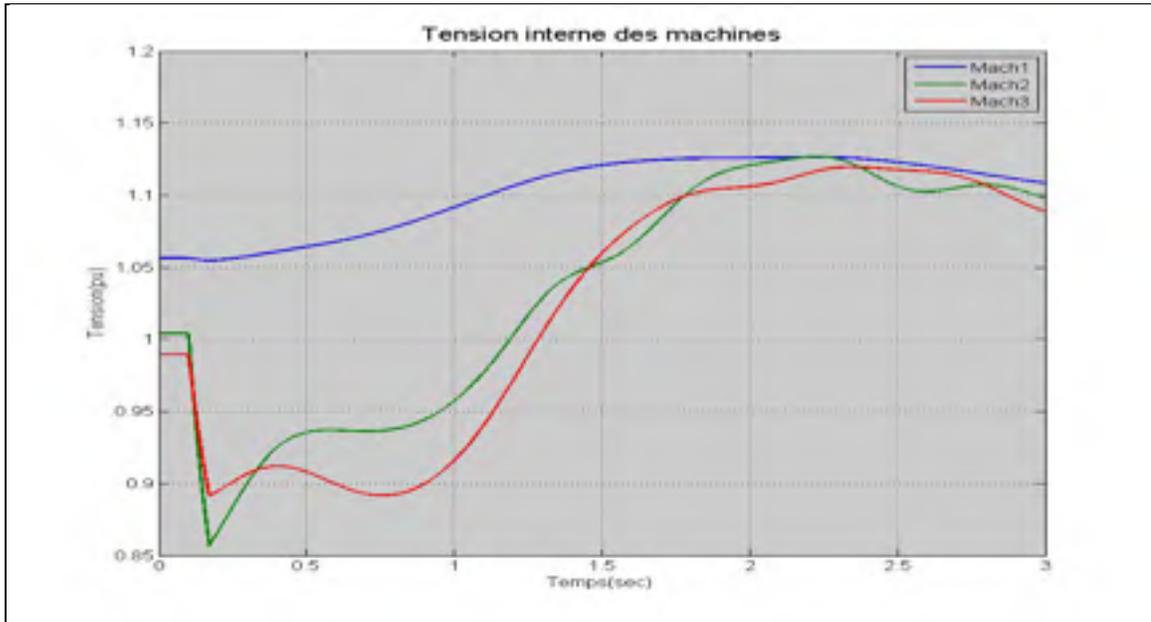


Figure 5.19 Variation de la tension interne des machines, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

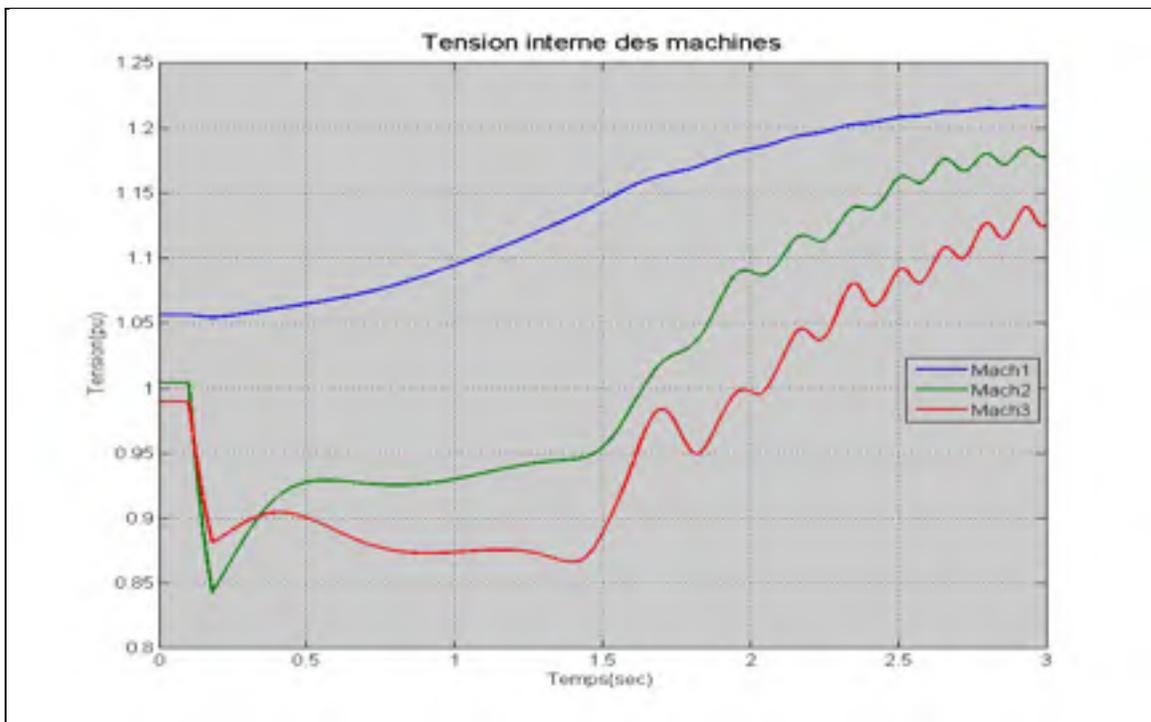


Figure 5.20 Variation de la tension interne des machines, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes

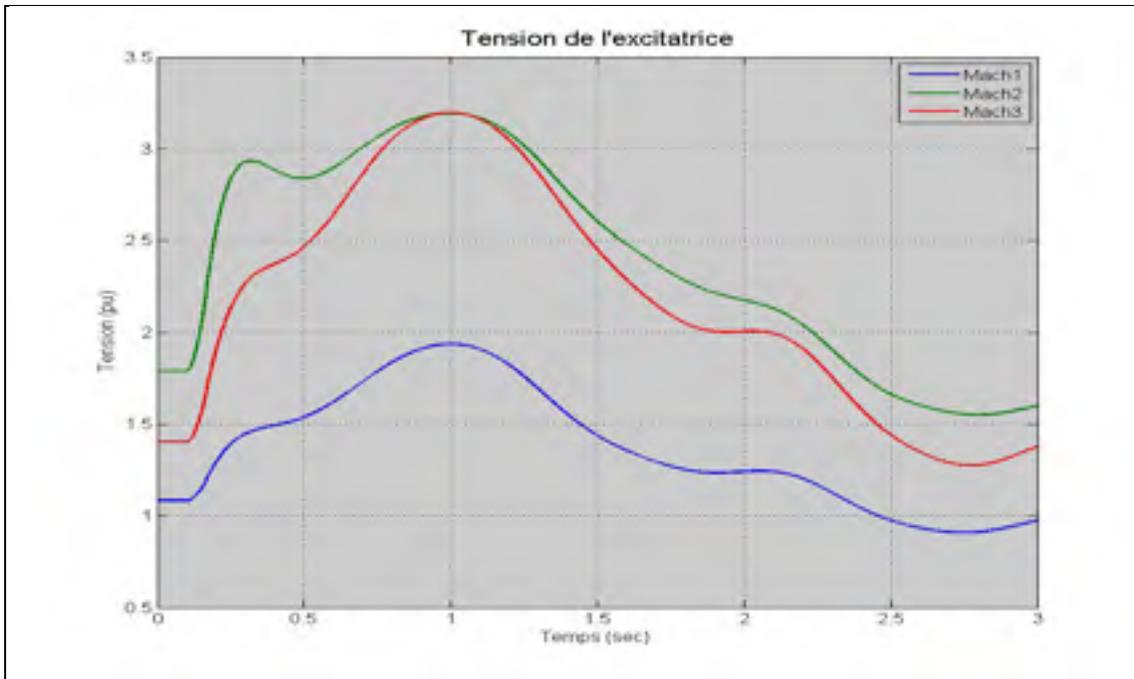


Figure 5.21 Variation de la tension de contrôle de l'excitatrice, cas stable, 3 machines, modèle 2 axes

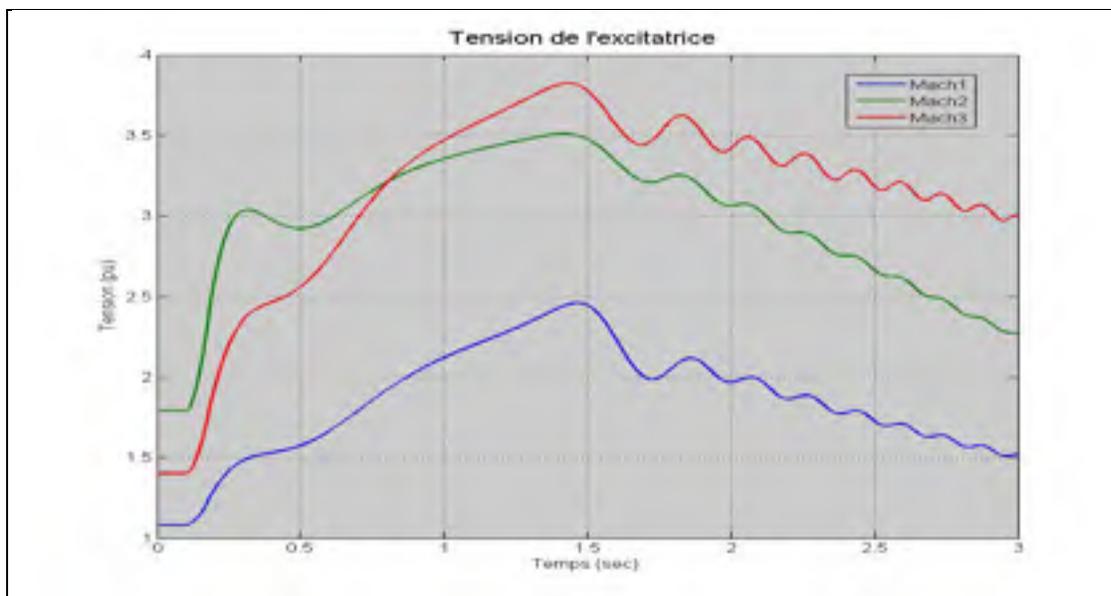


Figure 5.22 Variation de la tension de contrôle de l'excitatrice, cas instable, 3 machines, modèle 2 axes

## 5.4 Changement de machines critiques avec le temps de défaut

Dans l'étude de la stabilité transitoire avec SIME il peut y avoir une variation du nombre de machines critiques dans la recherche du CCT. Cette variation du nombre de machines critiques peut affecter le comportement de la marge de stabilité. Alors, nous avons simulé un défaut dans le système de 10 machines, modèle classique, pour montrer la variation des machines critiques. Le défaut a été simulé à la barre 4 avec l'ouverture de la ligne 4-14 (voir tableau 5.6).

### 5.4.1 Résultats en appliquant un défaut à la barre 4 avec l'ouverture de la ligne 4-14, modèle classique

Tableau 5.6 Variation des machines critiques avec défaut barre 4, ouverture ligne 4-14

Temps défaut <i>t<sub>e</sub></i> (sec)	Machines plus critiques	Marge stabilité	Angle instable $\delta u$ (deg)	Angle retour $\delta r$ (deg)	Condition
0.4100	2-3	-14.3777	139.0279		Instable
0.4000	2-3	-13.5898	138.6555		Instable
0.3900	2-3	-12.7532	139.0909		Instable
0.3700	2	-6.2969	136.6501		Instable
0.3500	2	-5.3805	136.7704		Instable
0.3000	2	-3.1411	137.1371		Instable
0.2500	2	-1.0921	138.3919		Instable
0.2400	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-4.9006	118.3728		Instable
0.2300	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-3.7429	123.3231		Instable
0.2200	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-2.4181	130.2903		Instable
0.2100	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-0.7748	139.3717		Instable
0.2090	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-0.5528	140.4374		Instable
0.2070	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-0.1131	142.9412		Instable
0.2069	1-2-3-4-5-6-7-8-9	-0.1130	142.9412		Instable
0.2053	-	0.1026		136.2433	stable
0.2042	-	0.2677		128.7147	stable
0.1924	-	1.6487		108.2888	stable

Les figures 5.23 et 5.24 montrent la variation de la marge de stabilité et de l'angle critique avec la variation du temps de défaut.

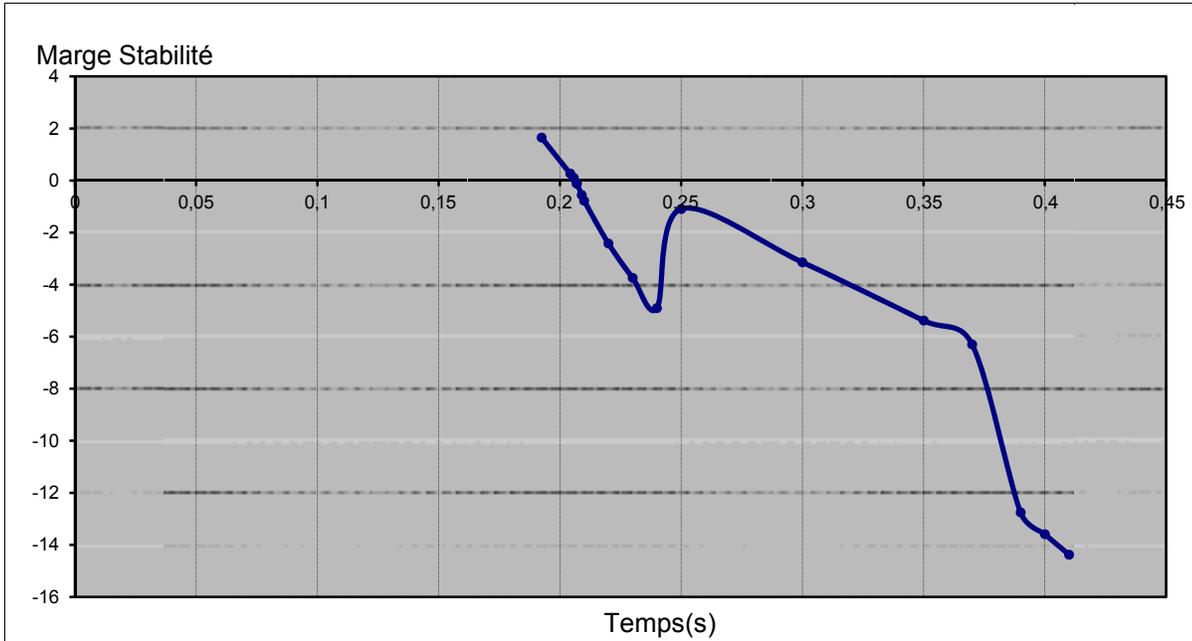


Figure 5.23 Variation de la marge de stabilité vs temps de défaut

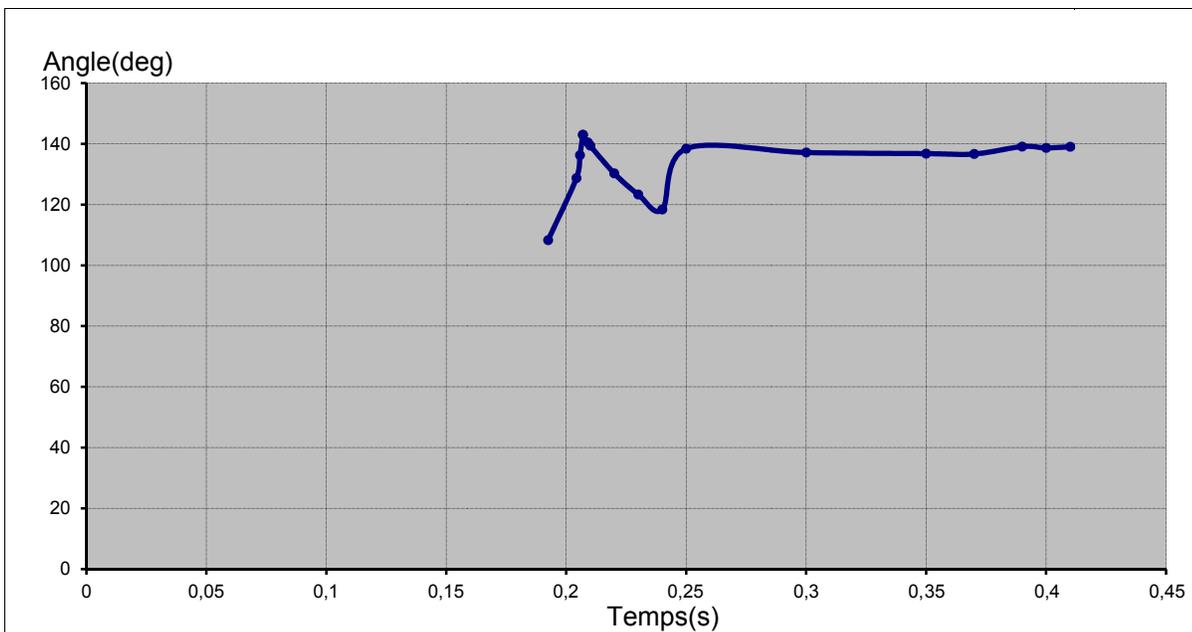


Figure 5.24 Variation de l'angle critique vs temps de défaut

La figure 5.25 montre la variation des angles internes de machines avec différents valeurs du temps de défaut, de façon à montrer la variation des groupes de machines critiques.

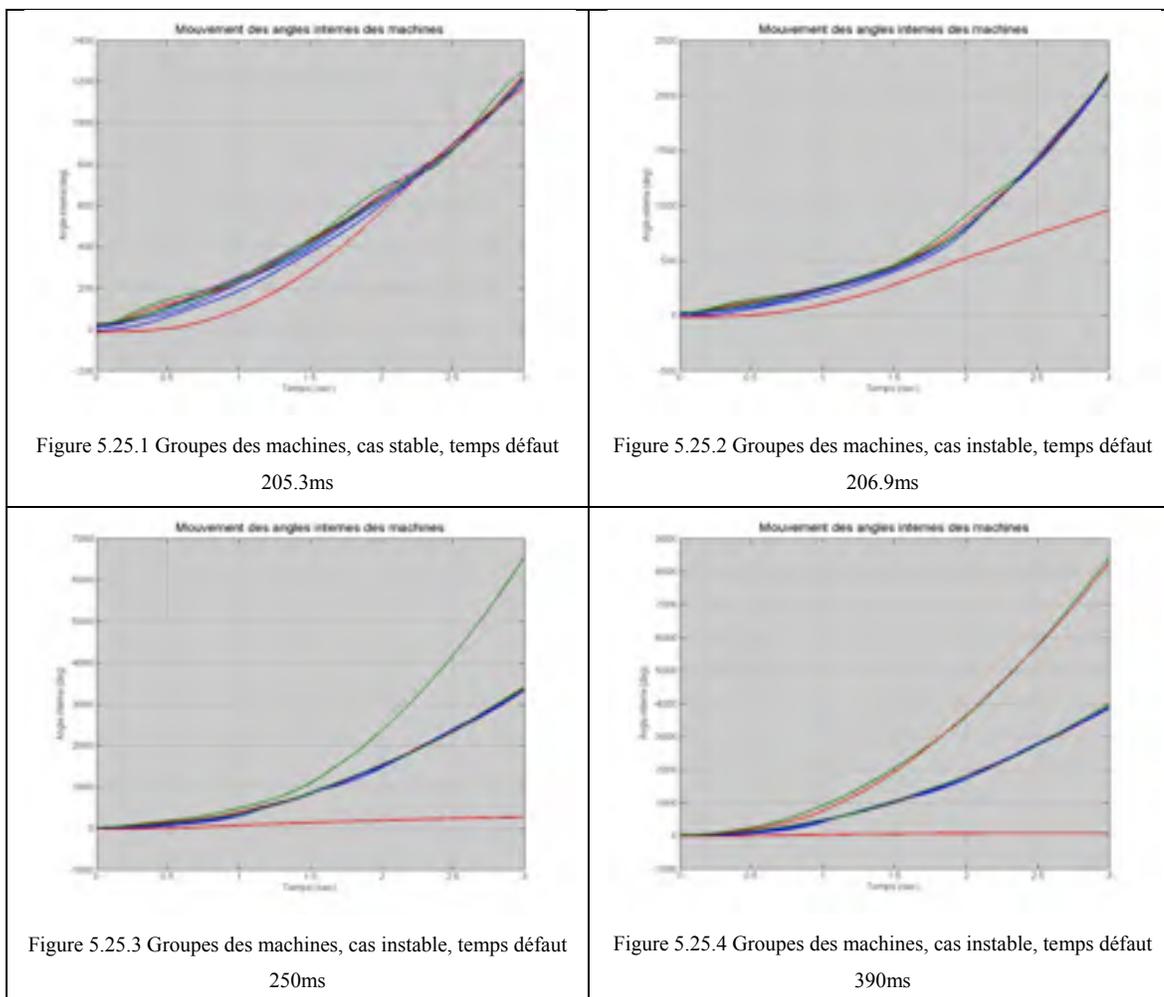


Figure 5.25 Variation des machines critiques vs temps de défaut

## 5.5 Discussion des résultats

Dans la discussion des résultats numériques, nous comparerons nos résultats à ceux trouvés avec l'utilisation d'un logiciel spécialisé, appelé PSS/E, et à ceux publiés par d'autres chercheurs. De plus, nous analyserons les principales caractéristiques des courbes des résultats graphiques.

Nous devons noter que nous avons recherché une plage où se trouve le vrai CCT. Cette plage a, comme limite inférieure, une valeur de temps critique stable et, comme limite supérieure, une valeur de temps critique instable. La différence entre les deux limites est égale ou inférieure à 1%.

### 5.5.1 Analyse des méthodes

Dans le modèle deux axes, nous avons considéré les charges comme impédances constantes de façon de simplifier les équations algébriques du réseau électrique.

Nous devons souligner que, dans le cas 3 machines, modèle deux axes, le modèle de générateur de PSS/E utilise les paramètres transitoires et subtransitoires. De même, le modèle de générateur qu'utilise SIME dans l'obtention de valeurs des angles et des vitesses des machines ne considère que les paramètres transitoires. Alors, pour permettre les rapprochements des résultats des deux modèles, nous avons considéré dans PSS/E que :

- $X''d = X''q$ .
- nous avons considéré  $X''d = X'd$  et  $X''q = X'q$  parce qu'il n'y a aucune information sur les valeurs  $X''q$  et  $X''d$  dans la littérature.
- permettre que la tension sortie du régulateur de tension ( $V_{rmin}$  et  $V_{rmax}$ ) du système de contrôle de tension de l'excitatrice varie entre -10 et +10 pu.
- $T''qo = T'qo/10$ ;  $X''do = 0.03$ .

Dans la résolution des équations différentielles du système, nous avons utilisé des pas de calcul de 0.833ms dans le modèle classique et de 1ms dans le modèle deux axes.

Quant à la méthode d'intégration de résolution des équations différentielles, SIME utilise les données obtenues à partir de la méthode Runge Kutta, quatrième ordre, à pas fixe. Quant à PSS/E, il utilise la méthode Euler de second ordre (PSS/E-32.1, Volume II, Programme application guide, page 12.10).

Dans tous les cas, nous avons utilisé un temps de simulation de trois secondes.

### **5.5.2 Analyse des résultats**

Entre les résultats obtenus avec la méthode SIME et les résultats obtenus avec l'analyse visuelle des courbes de mouvement des angles et des vitesses des machines, nous pouvons dire qu'il y a des erreurs relatives qui se trouvent entre -13% et +8% dans tous les cas considérés (voir Annexe I).

Dans les cas stable ou instable, la valeur négative ou positive de pourcentage d'erreur signifie que la valeur trouvée par SIME est respectivement plus grande ou plus petite que la valeur trouvée par les autres méthodes.

En moyenne, nous pouvons dire que la valeur du CCT stable calculée par SIME a une précision minimale moyenne de 95% et, dans le cas instable, SIME a une précision minimale moyenne de 98%. Ces résultats sont cohérents avec le calcul de la marge de stabilité, parce que le calcul de la marge de stabilité positive est une approximation, ce qui nous donne une valeur de précision plus petite par rapport à la valeur de marge de stabilité négative ou instable (voir Annexe I).

Par rapport aux résultats graphiques, nous avons constaté que la marge de stabilité a un comportement presque linéaire autour du CCT.

Dans le cas stable, la courbe d'angle OMIB a un comportement parabolique et une pente nulle dans le temps de retour. Aussi, la courbe de vitesse OMIB a une pente positive jusqu'à une valeur maximale et par la suite, une pente négative jusqu'au temps de retour  $t_r$  où la vitesse est nulle. Par rapport à la courbe de la puissance électrique et mécanique OMIB, nous pouvons voir très clairement le critère d'égalité des surfaces. Ici, nous pouvons voir la surface d'accélération et de décélération ainsi que le retour de la puissance électrique OMIB dans l'angle de retour, ce qui nous dit que nous avons un système stable.

Dans le cas instable, la courbe d'angle OMIB a un comportement parabolique croissant avec une pente, toujours positive. Aussi, la courbe de vitesse OMIB a une pente positive jusqu'à une valeur maximale et, par la suite, une pente négative jusqu'au le temps instable  $t_u$  où la vitesse OMIB commence à monter de nouveau, avec une pente positive. Par rapport à la courbe de la puissance électrique et mécanique OMIB, nous pouvons voir que la puissance électrique OMIB touche une deuxième fois la puissance mécanique OMIB, ce qui nous indique que le système devient instable.

En ce qui concerne le comportement de la marge de stabilité avec la variation des machines critiques, nous pouvons voir qu'il y a des secteurs linéaires en correspondance avec les groupes des machines critiques. Par exemple, dans la figure 5.23, nous avons trois secteurs en concordance avec les trois groupes des machines montrés dans le tableau 5.6.

Par rapport à la variation des angles OMIB de retour et instable, dans la figure 5.24, nous pouvons voir une convergence des angles (angle de retour à droite et angle instable à gauche) vers l'angle critique du système. Cette convergence se produit exactement dans le point où se trouve le CCT du système. Aussi, nous pouvons voir que la convergence se produit avec les groupes de machines critiques proches du CCT.

Dans les cas du modèle deux axes nous observons une diminution des valeurs du CCT par rapport à celles du modèle classique. De même, le comportement des courbes est similaire,

sauf dans les courbes de vitesse OMIB, parce que la courbe de vitesse correspondant au modèle deux axes a une évolution douce.

En ce qui concerne les groupes des machines critiques, le nombre des groupes critiques peut augmenter si le temps critique est loin du CCT, ce qui peut produire un problème parce que SIME est basé sur deux groupes des machines critiques.

Par rapport au temps d'exécution du programme, on observe que dans le bloc SIME (bloc responsable de la recherche de la stabilité du système) il y a un temps d'exécution similaire dans tous les cas, ce qui nous dit que le temps d'exécution du bloc SIME est indépendant de la quantité des machines. En ce qui concerne le temps de simulation de la recherche des machines critiques ou temps de simulation du programme de stabilité transitoire, on voit que le temps d'exécution est dépendant du nombre des machines, des barres ou du modèle de la machine synchrone.



## CONCLUSION

SIME est un bon outil d'étude de la stabilité transitoire. En premier lieu, SIME réduit le réseau électrique à un système mono machine. Par la suite, en utilisant le critère d'égalité de surface avec le calcul de la marge de stabilité, SIME prédit la stabilité ou l'instabilité du système sans la nécessité de voir les courbes des angles internes des machines. Nous pouvons dire que cette étude de la stabilité transitoire est une méthode mathématique de calcul de la stabilité.

SIME doit avoir une méthodologie de recherche des machines critiques assez robuste chaque fois qu'on change la valeur du temps de défaut. En effet, la variation des machines critiques produit une discontinuité dans la linéarité de la marge de stabilité. Pour éviter ce problème, nous devons commencer la recherche du temps critique très proche du CCT.

Le calcul de la marge de stabilité positive est une approximation parce que le calcul de la petite surface utilise un  $\delta u$  estimé (voir équations 3.23 et 3.24). Cette estimation peut produire des erreurs pendant la recherche du CCT. En effet, il y a des cas dans lesquels l'angle  $\delta u$  estimé est plus petit que l'angle  $\delta r$ , ce qui nous donne une marge de stabilité négative bien que le système soit stable (voir équation 3.21). Pour éviter ce problème et en raison de la convergence des angles  $\delta r$  et  $\delta u$  à l'angle  $\delta c$ , nous devons prendre comme  $\delta u$  le dernier angle instable trouvé dans la recherche du CCT.

Dans la recherche du CCT, dans l'espace solution très proche du vrai CCT, il y a des cas, dans la partie de l'extrapolation, pour lesquels la marge de stabilité actuelle et la marge de stabilité précédente sont presque égales. Cela produit une recherche très à gauche de l'espace de solution ou une erreur dans l'extrapolation. Pour éviter cela et pour faire l'extrapolation, nous devons choisir une valeur de marge de stabilité précédant différente de la valeur de la marge de stabilité actuelle.

Dans le cadre des travaux futurs, SIME nous ouvre plusieurs possibilités dans l'analyse de réseaux électriques. Par exemple, SIME peut être utilisé dans la recherche des barres plus critiques à l'occurrence d'un défaut électrique (analyse de contingences) et aussi, SIME peut être utilisé dans l'analyse de limite de puissance que les machines critiques peuvent fournir sans perdre le synchronisme (*power limit*). De plus, il sera intéressant de faire une étude comparative entre le modèle classique et le modèle deux axes pour chercher, par exemple, la cause qui produit une diminution du temps critique en utilisant le modèle deux axes. La recherche des machines critiques peut être un autre aspect à améliorer, en particulier dans le cas où il y a trois groupes des machines distincts.

Finalement, il peut être intéressant d'essayer la méthode de la bisection dans la recherche du CCT, qui est un algorithme de recherche d'un zéro d'une fonction, en profitant de la caractéristique linéaire de la marge de stabilité autour du CCT (Steven C., Raymond C. 2009).

## ANNEXE I

### TABLEAUX DES ERREURS RELATIVES

Tableau-A I-1 Erreur relative, cas 3 machines, modèle classique

<i>Défaut barre n°</i>	<i>Ligne ouverte</i>	% erreur	
		<i>Cas stable</i>	<i>Cas instable</i>
4	4-6	-0.324	-0.002
9	9-8	-2.017	-0.017
7	7-5	-1.187	-0.007
7	7-8	-0.718	-0.005
8	7-8	-0.586	-0.004
4	4-5	-3.485	-0.033
<i>erreur moyenne</i>		-1.386	-0.011

Tableau-A I-2 Erreur relative, cas 10 machines, modèle classique

<i>Défaut barre n°</i>	<i>Ligne ouverte</i>	% erreur	
		<i>Cas stable</i>	<i>Cas instable</i>
29	28-29	-0.571	-0.570
29	26-29	-2.535	-4.861
26	26-27	-1.168	-0.507
6	6-11	-4.563	-4.037
34	--	0.308	-0.408
31	--	0.056	-0.618
26	25-26	-0.952	-0.394
28	26-28	2.019	2.762
<i>erreur moyenne</i>		-0.926	-1.079

Tableau-A I-3 Erreur relative, cas 17 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	% erreur	
		Cas stable	Cas instable
1	1-4	0.455	2.174
26	26-25	-2.632	2.000
75	75-9	-2.886	-0.111
27	27-62	-12.882	-6.778
98	--	-3.636	-1.556
<i>erreur moyenne</i>		-3.864	-0.180

Tableau-A I-4 Erreur relative, cas 50 machines, modèle classique

Défaut barre n°	Ligne ouverte	% erreur	
		Cas stable	Cas instable
7	7-6	-0.46	-0.28
90	90-92	-3.16	1.90
117	--	0.83	2.80
58	58-87	-4.06	-3.64
25	25-27	4.00	8.50
144	--	4.74	5.50
106	106-74	-1.30	-4.04
<i>erreur moyenne</i>		0.08	1.53

Tableau-A I-5 Erreur relative, cas 3 machine, modèle deux axes

Défaut barre n°	Ligne ouverte	% erreur	
		Cas stable	Cas instable
4	4-6	1.77	1.76
4	4-5	1.77	1.76
9	9-8	-2.09	-2.60
7	7-5	8.37	8.62
7	7-8	-1.15	-0.61
8	7-8	-1.01	-1.21
<i>erreur moyenne</i>		1.28	1.29

La formule utilisée dans le calcul d'erreur relative est la suivante :

$$\% \text{\_erreur} = \frac{t_{pss@e} - t_{sime}}{t_{pss@e}} \times 100$$



## ANNEXE II

### FICHIERS MATLAB

#### Programme principal

```
%% Programme principal
clear all; close all; clc;
tf=3;
t_fault=0;
t_cleared=0.19;
delta=0.03;
epsilon=0.01;
k=1;
kst=0;
ku(k)=0;
te(k)=t_cleared;
goto=1;
Stability_Margin(k)=0;
delta_unstable(k)=0;
delta_stable(k)=0;

%%%%%%%%%%%%Appel TD- programme%%%%%%%%
[wr,n,y,t,pm,p_el,v_c]=case9_st(t_fault,t_cleared,tf);
%%cas 3 machines : case9_st
%%cas 10 machines: case39_st
%%cas 17 machines: case162_st
%%cas 50 machines: case145_st

%%%%%%%%%%%%appel programme SIME%%%%%%%%%%%%
[Stability_Margin,deltaOMIB,wOMIB,delta_unstable,delta_stable]=sime_case9(
wr,n,y,t,pm,p_el,v_c,k,Stability_Margin,delta_unstable,delta_stable);
%%cas 3 machines :sime_case9
%%cas 10 machines: sime_case39
%%cas 17 machines: sime_case162
%%cas 50 machines: sime_case145

stm(k)=Stability_Margin(k);
%%imprimer marge stabilité vs temps critique
figure(1)
stem(te,stm,'--')
xlabel('Clearing Times(s)')
ylabel('Stability Margin')
M(k)=getframe;
%%fin

ku(k)=k;
k=k+1;
te(k)=te(k-1)-delta*te(k-1);
```

```

%%recherche du temps critique
while goto==1

    t_cleared=te(k);
    [wr,n,y,t,pm,p_el,v_c]=case9_st(t_fault,t_cleared,tf);%TD- programme%%
    %%cas 3 machines : case9_st
    %%cas 10 machines: case39_st
    %%cas 17 machines: case162_st
    %%cas 50 machines: case145_st

    [Stability_Margin,deltaOMIB,wOMIB,delta_unstable,delta_stable]=sime_case9(
wr,n,y,t,pm,p_el,v_c,k,Stability_Margin,delta_unstable,delta_stable);%SIME
    %%cas 3 machines :sime_case9
    %%cas 10 machines: sime_case39
    %%cas 17 machines: sime_case162
    %%cas 50 machines: sime_case145

    stm(k)=Stability_Margin(k);
    %%imprimer marge stabilité vs temps critique
    figure(1)
    stem(te,stm,'--')
    xlabel('Clearing Times(s)')
    ylabel('Stability Margin')
    M(k)=getframe;
    %%fin

    if stm(k)>0 %%stable condition
        kst=k;
        kku=find(ku~=0);
        tt=length(kku);

        if te(ku(kku(tt)))-te(kst)>epsilon
            x=[te(k);te(ku(kku(tt)))];
            y=[stm(k);stm(ku(kku(tt)))];
            yi=interp1(y,x,0,'linear');%%interpolation
            CCT(k)=yi;
            k=k+1;
            te(k)=CCT(k-1);
            goto=1;
        else
            goto=0;%%fin simulation
        end

    else % stm(k)<0 instable condition
        ku(k)=k;
        kku=find(ku~=0);
        tt=length(kku);
        if abs(stm(ku(kku(tt))))<abs(stm(ku(kku(tt-1)))))%vérifie si
marge stabilite actuelle est plus petit que la marge de stabilite
précédente
            x=[te(ku(kku(tt)));te(ku(kku(tt-1)))];
            y=[stm(ku(kku(tt)));stm(ku(kku(tt-1)))];

```

```

else %%recherche la première plus grande marge stabilité
précédente à la marge de stabilité actuelle
    posit_sm_neg=find(stm<0);
    tttt=length(posit_sm_neg);
    for k3=tttt-1:-1:1;
        if stm(posit_sm_neg(tttt)) > stm(posit_sm_neg(k3))
            break
        end
    end
    x=[te(posit_sm_neg(tttt));te(posit_sm_neg(k3))];
    y=[stm(posit_sm_neg(tttt));stm(posit_sm_neg(k3))];
end

yi=interp1(y,x,0,'linear','extrap');%%extrapolation
CCT(k)=yi;
k=k+1;
te(k)=CCT(k-1);
goto=1;

end

end
%%%fin

Final_CCT=te(k)

```

### Sous programme SIME

```

%%%% Sous Programme SIME
function[Stability_Margin,deltaOMIB,wOMIB,delta_unstable,delta_stable]
=sime_case9(wr,ng,y,t,Pm,p_el,v_c,k,Stability_Margin,delta_unstable,delta_
stable)
%%cas 3 machines :sime_case9
%%cas 10 machines: sime_case39
%%cas 17 machines: sime_case162
%%cas 50 machines: sime_case145

[Mjk] = generatordata_case9; %%appel données générateurs
%%cas 3 machines :generatordata_case9
%%cas 10 machines :generatordata_case39
%%cas 17 machines :generatordata_case162
%%cas 50 machines :generatordata_case145

Ws=wr;
d(:,:)=y(:,1:ng);
w(:,:)=y(:,ng+1:2*ng);
n_data=length(t);
verification=0; %%variable de verification du premier point dans laquelle
PeOMIB>=PmOMIB

%%Calcul coefficient d'inertie OMIB

```

```

Mc=0;Mn=0;
for tt=1:ng
    if v_c(tt)==2 %machine critique
        Mc=Mc+2*Mjk(tt,2)/Ws;
    else %machine non critique
        Mn=Mn+2*Mjk(tt,2)/Ws;
    end
end
M=Mc*Mn/(Mc+Mn);
%%fin

%%calcul paramètres OMIB
for kk=1:n_data
    sum1=0;sum2=0;sum3=0;sum4=0;sum5=0;sum6=0;sum7=0;sum8=0;
    for tt=1:ng
        if v_c(tt)==2 %machine critique
            sum1=sum1+(2*Mjk(tt,2)/Ws)*d(kk,tt);
            sum2=sum2+(2*Mjk(tt,2)/Ws)*w(kk,tt);
            sum3=sum3+Pm(tt);
            sum4=sum4+p_el(kk,tt);
        else %machine non critique
            sum5=sum5+(2*Mjk(tt,2)/Ws)*d(kk,tt);
            sum6=sum6+(2*Mjk(tt,2)/Ws)*w(kk,tt);
            sum7=sum7+Pm(tt);
            sum8=sum8+p_el(kk,tt);
        end
    end

    end

    dOMIB(kk)=(1/Mc)*(sum1)-(1/Mn)*(sum5);
    wOMIB(kk)=(1/Mc)*(sum2)-(1/Mn)*(sum6);
    PmOMIB(kk)=M*((1/Mc)*sum3-(1/Mn)*sum7);
    PeOMIB(kk)=M*((1/Mc)*sum4-(1/Mn)*sum8);
    PaOMIB(kk)=PmOMIB(kk)-PeOMIB(kk);

    %%Verification stabilité %%%%%%%%%%%
    if PmOMIB(kk)<PeOMIB(kk) || verification==1 %(oui) premier point où
PeOMIB a touché par première fois PmOMIB
        verification=1;

        if wOMIB(kk)<=0 && PaOMIB(kk)<0 %%Condition système stable
            clc
            fprintf('Stable OMIB trajectory')
            Condition=1; %%definition système stable
            break %%break cycle for
        end

        if PeOMIB(kk)<PmOMIB(kk) %%Condition système instable
            clc
            fprintf('UnStable OMIB trajectory')
            Condition=0; %%definition système instable
            break %%break cycle for
        end
    end
end
end

```

```

end
%%fin

%%calcul marge stabilité
if Condition==1 %%condition stable

    %%%%%%%%% Area WSL %%%%%%%%%
    ttt=length(dOMIB);
    posit_sm_neg=find(Stability_Margin<0);
    tttt=length(posit_sm_neg);
    deltaU=delta_unstable(posit_sm_neg(tttt)); %%recherche dernier angle
    instable
    %%%%Stability Margin
    Stability_Margin(k)=0.5*abs(PaOMIB(ttt))*abs(deltaU-dOMIB(ttt));
    delta_stable(k)=dOMIB(ttt); %%conserve l'angle stable de retour

else %%condition instable, Condition==0

    ttt=length(PeOMIB);
    %%%%Stability Margin
    Stability_Margin(k)=(-1/2)*M*wOMIB(ttt-1)^2;
    delta_unstable(k)=dOMIB(ttt-1); %%conserve l'angle instable

end
%%fin

%%imprimer des figures
deltaOMIB=dOMIB*180/pi; %% dgr
ttt=length(wOMIB);
temp=t(1:ttt);

% figure(19)
% plot(temp,wOMIB)
% xlabel ('Time (sec)')
% ylabel ('Speed-OMIB(rad/sec)')
% grid on
%
% figure(20)
% plot(temp,deltaOMIB)
% xlabel ('Time (sec)')
% ylabel ('Angle-OMIB(deg)')
% grid on

figure(21)
plot(deltaOMIB,PeOMIB,deltaOMIB,PmOMIB)
xlabel ('delta-OMIB (deg)')
ylabel ('P-OMIB(pu)')
grid on

end

```

## Sous programme stabilité transitoire

```

%%sous programme stabilité transitoire
function [wr,m,y,t,pm,pei,v_c]=case9_st(t_fault,t_cleared,tf)
%%cas 3 machines : case9_st
%%cas 10 machines: case39_st
%%cas 17 machines: case162_st
%%cas 50 machines: case145_st

%clear all; close all; clc;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%ÉCOULEMENT DE PUISSANCE      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
case_ = 'case9';
%%cas 3 machines : case9
%%cas 10 machines: case39
%%cas 17 machines: case162
%%cas 50 machines: case145
opt = mption('ENFORCE_Q_LIMS', 2);
results=runpf(case_,opt);
define_constants;
MVAbase=100;
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%DÉFINITION DES VARIABLES      %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%
%%
tic
geng=results.gen;
bus=results.bus;
branch=results.branch;
VM=results.bus(:,VM);           %magnitude de la tension
VA=results.bus(:,VA);           %l'angle de la tension
PD=results.bus(:,PD)/MVAbase;   %Puissance active demandé
QD=results.bus(:,QD)/MVAbase;   %Puissance reactive demandé
PG=results.gen(:,PG)/MVAbase;   %Puissance de generation active
géné
QG=results.gen(:,QG)/MVAbase;   %Puissance de generation reactive
demandé

Yb=makeYbus(100,bus,branch);     %Ybus
yy=(PD-1j*QD)./(VM.^2);         %Charge comme impédance
Ybus=Yb+diag(yy);               %Ybus modifié avec la charge
n=length(VM);                    %quantité de barres
m=length(PG);                    %quantité de machines
nodref=find(results.bus(:,2)==3); % (slack bus) barre d'équilibre
z=results.branch(:,1:5); z=[z(:,1:4), (z(:,5)/2)];

```



```

%      1. ODE 45 explicit RK (4,5) pas d'integration variable
%      2. ODE 113 pas d'integration variable
%      3. Trapezoidal implicit: deuxieme pas 1/10[t_default t_elim def]
%      4. RK pas fix
%      5. RK avec deux pas d'integration
%      6. Trapezoidal implicit avec deux pas d'integration
%      7. Euler Explicit
%      8. Euler modifié
%      9. Euler deux pas
%     10. Multipas ODE15S

methode=4;
pas=0.000833;

[t,y,pei]=
Eqdif(ti,tf,yi,pas,kw,h,EM,pm,ypf,yf,yaf,t_fault,t_cleared,m,pe0,methode);
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% %PLOTS
%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
t_e=toc; %temps d'exécution

%printfig(t,y,nodref,m,pei)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%
%%Recherche machines critiques
%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
n_elem=size(y,2)/2; %%nombre generateurs
x=y(size(y,1),1:n_elem); %% cherche dernier angle interne calculé de
toutes les machines
mm=transpose(gen(:,2)); %% coefficient inertie chaque machine
[yyy,b]=sort(x,'descend'); %%ordre décroissant derniers angles des
machines

for i=1:n_elem-1;
    sum110=0;sum220=0;
    for tt=1:i;
        sum110=sum110+mm(b(tt))*yyy(tt);
        sum220=sum220+mm(b(tt));
        m_c(i,tt)=b(tt); %%conserve les machines critiques
    end

    sum330=0;sum440=0;
    for j=i+1:n_elem;
        sum330=sum330+mm(b(j))*yyy(j);
        sum440=sum440+mm(b(j));
        m_n(i,j)=b(j); %%conserve les machines non critiques
    end
end

```

```

end

delta_c=sum110/sum220;
delta_r=sum330/sum440;

delta(i)=delta_c-delta_r;
end

[hh, kk]=max(delta);

machine_critique=m_c(kk, :);
machine_no_critique=m_n(kk, :);

for i=1:n_elem-1;
    if machine_critique(i) ~= 0
        v_c(machine_critique(i))=2; %%vecteur machines critiques
    end
end

for i=1:n_elem;
    if machine_no_critique(i) ~= 0
        v_c(machine_no_critique(i))=1; %%vecteur machines non critiques
    end
end

%%fin

end

```

### Données des générateurs

```

function [Mjk] = generatordata_case9
%%cas 3 machines :generatordata_case9
%%cas 10 machines :generatordata_case39
%%cas 17 machines :generatordata_case162
%%cas 50 machines :generatordata_case145

% Machine H
Mjk= [
    1    23.64 ;
    2     6.4  ;
    3     3.01 ;
];
end

```



## ANNEXE III

### DONNÉES RÉSEAUX ÉLECTRIQUES

Dans cette annexe, les différents réseaux de test sont présentés. On peut voir la configuration de chaque réseau comme ainsi que les paramètres des différents composants. Dans tous les cas, on a considéré comme puissance de base 100MVA.

#### A.- Système 3 machines – 9 barres

Ce système électrique est composé de 3 générateurs, de 9 barres, de 3 transformateurs et de 6 lignes. On peut voir sa représentation dans la figure-A III-1.

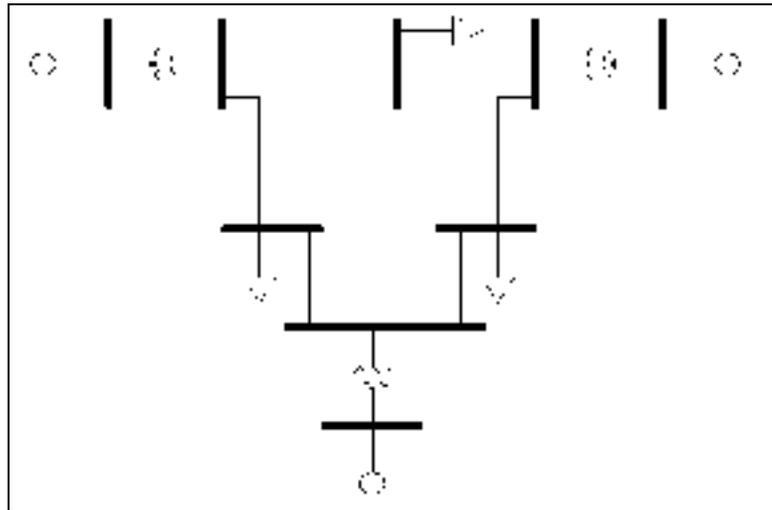


Figure-A III-1 Réseau 3 machines-9 barres  
Anderson, Fouad et al. (2003, p.38)

Dans les tableaux A III-1 à A III-4 on trouve les paramètres des composants.

Tableau-A III-1 Caractéristiques des lignes

Ligne <i>N</i>	Barre		Résistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B/2 (pu)
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	4	5	0.01	0.085	0.088
2	4	6	0.017	0.092	0.079
3	5	7	0.032	0.161	0.153
4	6	9	0.039	0.17	0.179
5	7	8	0.0085	0.072	0.0745
6	8	9	0.0119	0.1008	0.1045

Tableau-A III-2 Caractéristiques des générateurs

Unité	<i>H(s)</i>	<i>X'd (pu)</i>
1	23.64	0.0608
2	6.4	0.1198
3	3.01	0.1813

Tableau-A III-3 Caractéristiques des transformateurs

Transformateur <i>N</i>	Barre		Résistance (pu)	Réactance (pu)	Tap
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	1	4	0	0.0576	1
2	2	7	0	0.0625	1
3	3	9	0	0.0586	1

Tableau-A III-4 Caractéristiques des charges

Barre <i>N</i>	Puissance Active Mw	Puissance Reactive MVAR
5	125	50
6	90	30
8	100	35

### B.- Système 10 machines – 39 barres (New England)

Ce système électrique est composé de 10 générateurs, de 39 barres, de 12 transformateurs et de 34 lignes. On peut voir sa représentation dans la figure-A III-2.

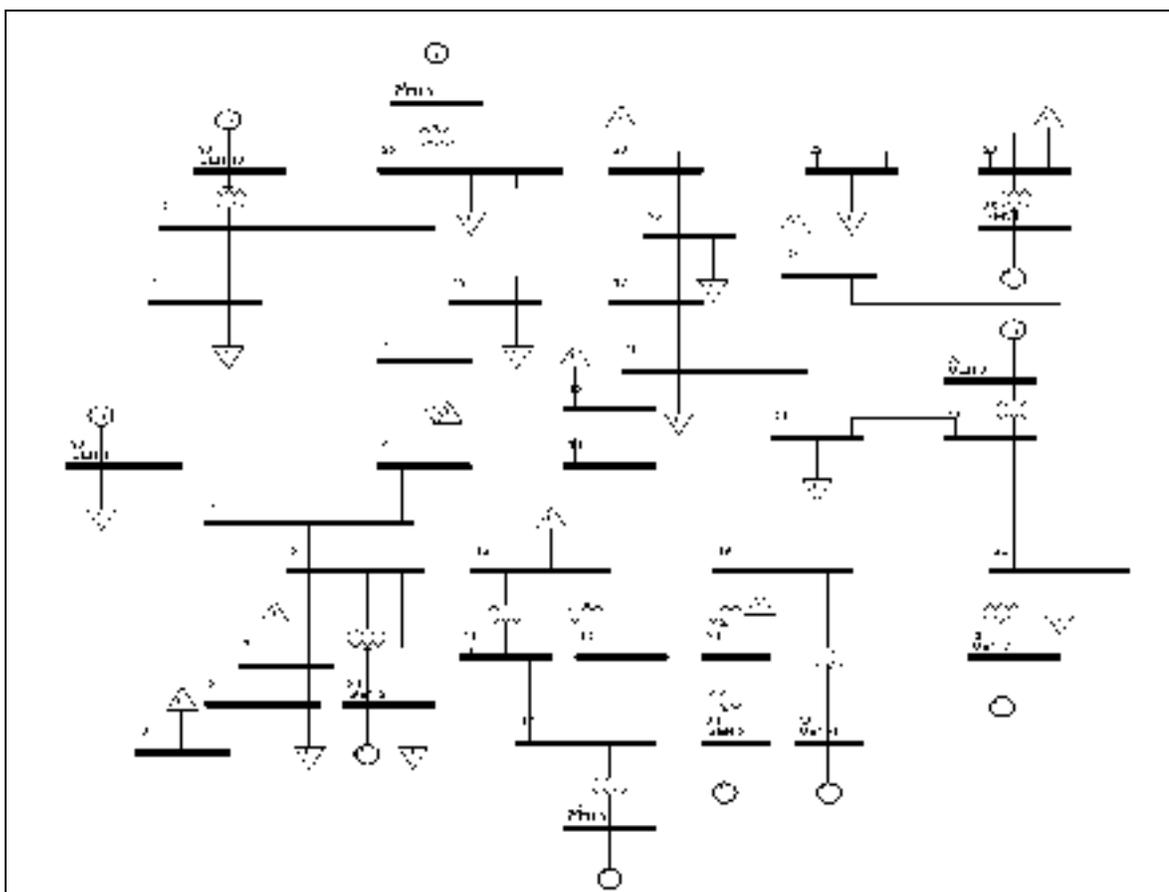


Figure-A III-2 Réseau 10 machines -39 barres  
Yeu, R.H. (2010)

Dans les tableaux A III-5 à A III-8 on trouve les paramètres des composants.

Tableau-A III-5 Caractéristiques des lignes

Ligne <i>N</i>	Barre		Resistance ( <i>pu</i> )	Réactance ( <i>pu</i> )	Susceptance <i>B</i> ( <i>pu</i> )
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	1	2	0.0035	0.0411	0.6987
2	1	39	0.001	0.025	0.75
3	2	3	0.0013	0.0151	0.2572
4	2	25	0.007	0.0086	0.146
5	3	4	0.0013	0.0213	0.2214
6	3	18	0.0011	0.0133	0.2138
7	4	5	0.0008	0.0128	0.1342
8	4	14	0.0008	0.0129	0.1382
9	5	6	0.0002	0.0026	0.0434
10	5	8	0.0008	0.0112	0.1476
11	6	7	0.0006	0.0092	0.113
12	6	11	0.0007	0.0082	0.1389
13	7	8	0.0004	0.0046	0.078
14	8	9	0.0023	0.0363	0.3804
15	9	39	0.001	0.025	1.2
16	10	11	0.0004	0.0043	0.0729
17	10	13	0.0004	0.0043	0.0729
18	13	14	0.0009	0.0101	0.1723
19	14	15	0.0018	0.0217	0.366
20	15	16	0.0009	0.0094	0.171
21	16	17	0.0007	0.0089	0.1342
22	16	19	0.0016	0.0195	0.304
23	16	21	0.0008	0.0135	0.2548
24	16	24	0.0003	0.0059	0.068
25	17	18	0.0007	0.0082	0.1319
26	17	27	0.0013	0.0173	0.3216
27	21	22	0.0008	0.014	0.2565
28	22	23	0.0006	0.0096	0.1846
29	23	24	0.0022	0.035	0.361
30	25	26	0.0032	0.0323	0.531
31	26	27	0.0014	0.0147	0.2396
32	26	28	0.0043	0.0474	0.7802
33	26	29	0.0057	0.0625	1.029
34	28	29	0.0014	0.0151	0.249

Tableau-A III-6 Caractéristiques des générateurs

<i>Unité</i>	<i>H(s)</i>	<i>X'd (pu)</i>
1	500	0.006
2	30.3	0.0697
3	35.8	0.0531
4	28.6	0.0436
5	26	0.132
6	34.8	0.05
7	26.4	0.049
8	24.3	0.057
9	34.5	0.057
10	42	0.031

Tableau-A III-7 Caractéristiques des transformateurs

<i>Transformateur</i> <i>N</i>	<i>Barre</i>		<i>Resistance</i> <i>(pu)</i>	<i>Réactance</i> <i>(pu)</i>	<i>Tap</i>
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	2	30	0	0.0181	1.025
2	6	31	0	0.025	1.07
3	10	32	0	0.02	1.07
4	12	11	0.0016	0.0435	1.006
5	12	13	0.0016	0.0435	1.006
6	19	20	0.0007	0.0138	1.06
7	19	33	0.0007	0.0142	1.07
8	20	34	0.0009	0.018	1.009
9	22	35	0	0.0143	1.025
10	25	37	0.0006	0.0232	1.025
11	29	38	0.0008	0.0156	1.025
12	23	36	0.0005	0.0272	1

Tableau-A III-8 Caractéristiques des charges

<i>Barre</i> <i>N</i>	<i>Puissance</i> <i>Active</i> <i>(Mw)</i>	<i>Puissance</i> <i>Reactive</i> <i>(MVar)</i>
1	97.6	44.2
3	322	2.4
4	500	184
7	233.8	84
8	522	176.6
9	6.5	-66.6
12	8.53	88
15	320	153
16	329	32.3
18	158	30
20	680	103
21	274	115
23	247.5	84.6
24	308.6	-92.2
25	224	47.2
26	139	17
27	281	75.5
28	206	27.6
29	283.5	26.9

### C.- Système 17 machines – 162 barres

Ce système électrique est composé de 17 générateurs, de 162 barres, de 46 transformateurs et de 238 lignes. On peut voir sa représentation dans la figure-A III-3.

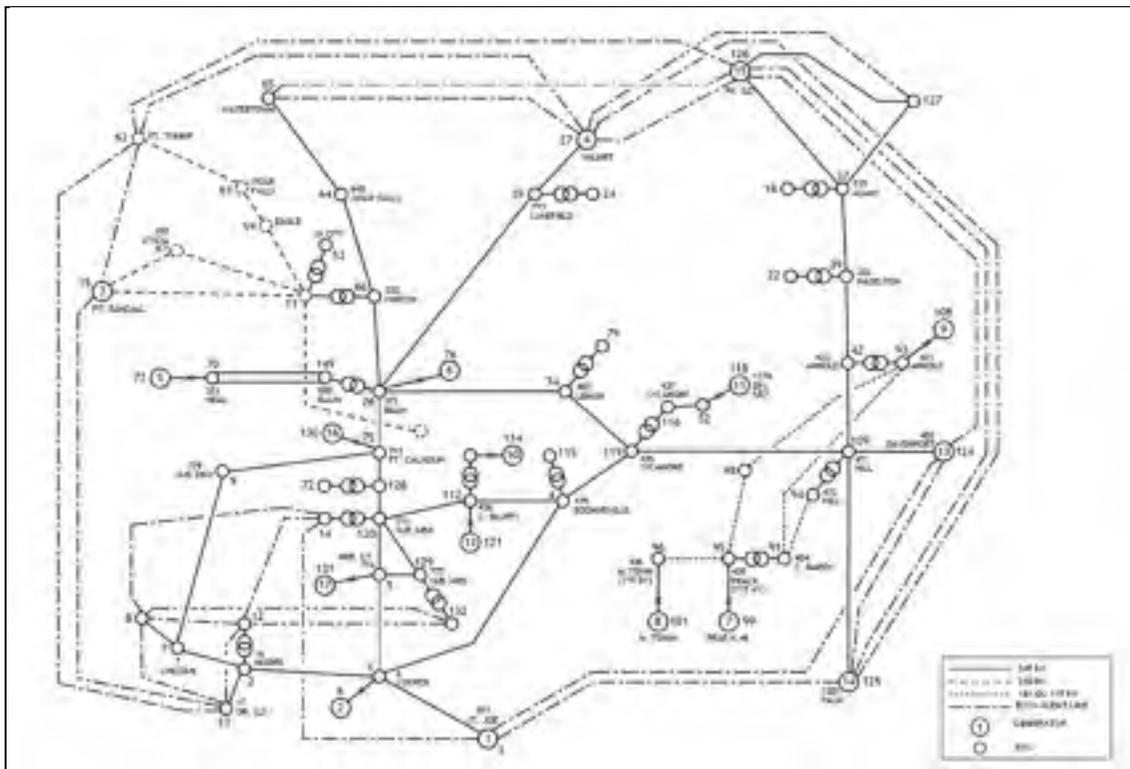


Figure-A III-3 Réseau 17 machines- 162 barres  
IEEE Common Data Format, University of Washington(en ligne)

Dans les tableaux A III-9 à A III-12 on trouve les paramètres des composants.

Tableau-A III-9 Caractéristiques des lignes

Ligne <i>N</i>	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance <i>B</i> (pu)
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	1	2	0.0035	0.0321	0.5438
2	1	3	0.0034	0.0326	0.7224
3	1	4	0.0064	0.0621	0.987
4	1	5	0.0011	0.0119	0.2012
5	2	7	0.0014	0.0125	0.2122
6	2	13	0.0046	0.0417	0.7058
7	3	14	0.2361	1.0122	0
8	3	50	0.0389	0.1699	0
9	3	103	0.1074	1.8023	0
10	3	123	0.2883	1.6719	0
11	3	124	0.014	0.6483	0
12	3	125	0.0084	0.1139	0
13	4	112	0.0059	0.0568	0.925
14	4	119	0.0014	0.0119	0.205
15	5	120	0.0022	0.0224	0.3792
16	5	129	0.0022	0.0268	0.4612
17	7	9	0.0017	0.0169	0.2872
18	8	10	0.4591	1.0703	0
19	8	12	0.0106	0.0574	0
20	8	13	0.1274	0.4784	0
21	8	14	0.0473	0.3956	0
22	8	15	0.5035	1.7433	0
23	8	132	0.0252	0.288	0
24	9	75	0.0013	0.015	0.2682
25	10	11	0.0051	0.037	0.0716
26	10	13	0.1299	0.622	0
27	10	15	0.1275	0.7033	0
28	10	60	0.2525	1.2242	0
29	11	15	0.0285	0.1793	0.3484
30	11	46	0.0142	0.1225	0.1876
31	11	58	0.017	0.107	0.2074
32	11	59	0.0071	0.0471	0.0852
33	12	13	0.1038	0.3137	0
34	12	14	0.1598	0.6415	0
35	12	132	0.4486	1.5773	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
36	13	15	0.044	0.3227	0
37	13	62	0.0098	0.1221	0
38	14	72	0.0107	0.0828	0
39	14	113	0.0063	0.0382	0
40	14	132	0.0057	0.0374	0
41	15	58	0.0115	0.0732	0.142
42	15	60	0.3907	1.6753	0
43	15	62	0.0084	0.0588	0
44	15	63	0.1704	1.4555	0
45	16	17	0.6017	1.4373	0
46	16	18	0.0297	0.107	0.0546
47	16	27	0.1574	0.8871	0
48	16	126	0.1053	0.5132	0
49	16	127	0.0958	0.5276	0
50	17	18	0.0213	0.1013	0.0642
51	17	19	0.2314	0.7678	0
52	17	21	0.0471	0.2665	0
53	17	127	0.0287	0.2637	0
54	18	30	0.0207	0.1088	0.052
55	18	32	0.0234	0.122	0.0582
56	19	21	0.3867	1.9005	0
57	19	38	0.0239	0.125	0.0596
58	19	43	0.0603	0.2572	0
59	19	127	0.1074	0.6809	0
60	20	157	0.0113	0.0279	0.0004
61	21	22	0.0312	0.1629	0.0778
62	21	127	0.0105	0.6414	0
63	22	38	0.014	0.054	0.025
64	22	40	0.0188	0.0717	0.0328
65	22	41	0.0172	0.085	0.0404
66	23	24	0.0174	0.0511	0.023
67	23	60	0.066	0.3093	0
68	24	28	0.0249	0.0725	0.0202
69	24	45	0.0137	0.0725	0.034
70	25	26	0.0059	0.0583	0.9302
71	25	27	0.0044	0.041	0.8384
72	26	74	0.0063	0.0607	0.93
73	26	75	0.003	0.0322	0.5038

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
74	27	31	0.0101	0.1273	0
75	27	62	0.0173	0.581	0
76	27	65	0.0105	0.2764	0
77	27	125	0.035	1.6845	0
78	27	126	0.0022	0.0225	0
79	27	127	0.1506	1.4355	0
80	28	29	0.024	0.0965	0.0444
81	29	30	0.038	0.15	0.0696
82	29	31	0.0206	0.0833	0.0384
83	30	32	0.0249	0.1005	0.0458
84	32	33	0.0114	0.0448	0.0208
85	33	34	0.028	0.114	0.052
86	33	35	0.0216	0.107	0.051
87	33	36	0.0102	0.0536	0.0254
88	34	40	0.0397	0.1517	0.069
89	34	77	0.0235	0.0896	0.0408
90	35	40	0.0271	0.1341	0.0638
91	36	67	0.0176	0.0924	0.044
92	37	39	0.0039	0.0379	0.67
93	37	126	0.004	0.0381	0.67
94	37	127	0.004	0.0403	0.6832
95	39	42	0.002	0.0186	0.32
96	40	81	0.03	0.345	0.0038
97	40	82	0.004	0.019	0.0108
98	41	81	0.037	0.372	0.0058
99	41	83	0.0052	0.0256	0.0124
100	41	84	0.0057	0.058	0.0292
101	42	109	0.0019	0.0196	0.333
102	43	44	0.0188	0.0751	0.0348
103	43	103	0.0324	0.1702	0
104	43	124	0.0293	0.1766	0
105	43	125	0.1449	0.6509	0
106	44	102	0.013	0.05	0.0236
107	44	103	0.0127	0.051	0.0244
108	45	54	0.0108	0.057	0.0272
109	46	47	0.031	0.1378	0.0622
110	47	48	0.0251	0.1114	0.0502
111	47	49	0.003	0.012	0.0054

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
112	48	50	0.0336	0.166	0.078
113	48	51	0.042	0.13	0.057
114	48	52	0.054	0.168	0.074
115	49	87	0.014	0.068	0.0266
116	50	51	0.03	0.09	0.041
117	50	123	0.4071	1.8543	0
118	50	125	0.1337	0.6031	0
119	51	141	0.0323	0.1	0.0442
120	52	79	0.0623	0.2126	0.094
121	52	106	0.0231	0.0717	0.0314
122	52	116	0.006	0.0487	0.0256
123	52	117	0.0117	0.0493	0.023
124	53	54	0.0275	0.1961	0.0956
125	53	55	0.0005	0.0026	0.0022
126	54	56	0.0174	0.091	0.043
127	54	57	0.025	0.1237	0.0588
128	55	57	0.0462	0.1763	0.0802
129	55	149	0.0153	0.0671	0.0312
130	55	162	0.004	0.0189	0.0098
131	56	67	0.017	0.0894	0.0424
132	57	80	0.0272	0.1037	0.0472
133	58	61	0.0133	0.1018	0.1842
134	59	61	0.0106	0.0706	0.121
135	60	62	0.3674	0.964	0
136	60	65	0.1041	0.4144	0
137	60	126	0.5367	1.8295	0
138	61	62	0.0296	0.2275	0.3996
139	61	63	0.0043	0.0422	0.0764
140	62	63	0.0158	0.1702	0
141	62	65	0.004	0.074	0
142	62	126	0.0044	0.2969	0
143	63	65	0.2409	1.96	0
144	64	65	0.005	0.0571	0.9098
145	64	66	0.0033	0.0381	0.6066
146	65	126	0.0031	0.1536	0
147	67	68	0.0193	0.1013	0.0482
148	68	69	0.0068	0.0353	0.0168
149	69	77	0.0098	0.0374	0.017

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
150	69	78	0.0114	0.0434	0.0196
151	69	79	0.0052	0.0433	0.022
152	70	149	0.0002	0.0018	0.001
153	70	149	0.0002	0.0018	0.001
154	71	85	0.0304	0.1506	0.0716
155	71	150	0.0196	0.097	0.0462
156	72	113	0.0022	0.013	0
157	72	132	0.0028	0.0168	0
158	72	152	0.0385	0.18	0
159	74	119	0.0031	0.031	0.4822
160	75	128	0.0008	0.0087	0.166
161	78	79	0.0051	0.0336	0.0182
162	78	80	0.0244	0.093	0.0422
163	82	83	0.0053	0.0249	0.013
164	84	93	0.0125	0.0826	0.0414
165	85	86	0.0211	0.1046	0.0498
166	86	87	0.028	0.112	0.0538
167	86	88	0.044	0.228	0.109
168	88	96	0.074	0.25	0.0142
169	88	106	0.0079	0.0468	0.0232
170	89	90	0.069	0.134	0.014
171	90	96	0.1837	0.359	0.037
172	91	92	0.0156	0.0819	0.0376
173	91	93	0.0143	0.0895	0.045
174	91	94	0.0145	0.0957	0.048
175	92	102	0.015	0.061	0.0292
176	94	103	0.0227	0.1333	0.066
177	94	107	0.0613	0.1891	0.0836
178	95	96	0.087	0.212	0.086
179	95	97	0.1289	0.2809	0.0334
180	95	98	0.0071	0.043	0.0224
181	96	100	0.069	0.161	0.0186
182	98	105	0.1485	0.293	0.031
183	100	104	0.062	0.145	0.0166
184	103	123	0.182	0.751	0
185	103	124	0.0002	0.0167	0
186	103	125	0.0279	0.1972	0
187	106	107	0.0196	0.0611	0.0268

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
188	107	122	0.013	0.0621	0.0296
189	109	119	0.006	0.0577	0.929
190	109	124	0.002	0.0222	0.3782
191	109	125	0.007	0.062	1
192	110	111	0.023	0.099	0.046
193	110	134	0.0032	0.0256	0.0134
194	110	141	0.021	0.0649	0.0288
195	111	115	0.0527	0.2215	0.103
196	112	120	0.0005	0.0044	0.072
197	113	132	0.0459	0.2911	0
198	113	134	0.0008	0.0072	0.0038
199	115	117	0.0019	0.0154	0.033
200	116	117	0.0048	0.0391	0.0214
201	116	147	0.0035	0.0286	0.0156
202	117	147	0.0022	0.0175	0.01
203	120	128	0.0004	0.0051	0.1
204	120	129	0.0003	0.0038	0.0652
205	122	123	0.0175	0.0835	0.0398
206	123	125	0.0423	0.2441	0
207	124	125	0.0113	0.1585	0
208	124	126	0.0577	0.8256	0
209	125	126	0.0201	0.5915	0
210	126	127	0.0877	0.7049	0
211	133	135	0.0109	0.0259	0.0004
212	133	136	0.039	0.099	0.0016
213	133	137	0.0134	0.0504	0.001
214	135	138	0.0466	0.1182	0.002
215	136	139	0.026	0.065	0.001
216	137	140	0.0041	0.0156	0.0004
217	138	139	0.026	0.065	0.001
218	138	140	0.0251	0.0941	0.0018
219	138	145	0.0923	0.2338	0.0038
220	142	143	0.1582	0.3919	0.0068
221	142	146	0.1618	0.3861	0.007
222	143	144	0.0927	0.2322	0.002
223	144	145	0.089	0.221	0.0032
224	144	146	0.068	0.2906	0.0058
225	149	150	0.001	0.0085	0.002

Ligne N	Barre		Résistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
226	149	151	0.0039	0.0262	0.0138
227	149	152	0.0253	0.1168	0.0544
228	151	161	0.0021	0.0138	0.0074
229	153	154	0.071	0.2841	0.0054
230	153	155	0.043	0.1856	0.0038
231	154	156	0.0155	0.0379	0.0008
232	154	160	0.0102	0.0429	0.001
233	155	156	0.0176	0.0822	0.0014
234	156	157	0.053	0.1273	0.0022
235	157	158	0.0489	0.1404	0.0028
236	158	159	0.0339	0.0664	0.0012
237	159	160	0.019	0.0811	0.012
238	161	162	0.0022	0.0103	0.0054

Tableau-A III-10 Caractéristiques des générateurs

Unité	H(s)	X'd (pu)
1	100	0.004
2	34.56	0.0437
3	80	0.01
4	80	0.005
5	16.79	0.0507
6	32.49	0.0206
7	6.65	0.1131
8	2.66	0.3115
9	29.6	0.0535
10	5	0.177
11	11.31	0.1049
12	19.79	0.0297
13	200	0.004
14	200	0.002
15	100	0.004
16	28.6	0.0559
17	20.66	0.0544

Tableau-A III-11 Caractéristiques des transformateurs

Transformateur <i>N</i>	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Tap
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	1	6	0	0.0133	1.0519
2	4	115	0	0.0185	1
3	5	131	0	0.0127	1.0249
4	7	8	0.0004	0.0189	0.9751
5	12	2	0.0008	0.0377	1.0252
6	18	37	0	0.0456	1.1193
7	20	53	0	0.114	1
8	22	39	0	0.0493	1.1081
9	24	25	0	0.034	1.0217
10	26	76	0	0.0082	1.04
11	52	118	0	0.052	1.0429
12	53	11	0.0005	0.02	1
13	60	61	0.0027	0.0653	1.0252
14	60	61	0.002	0.0393	1.0252
15	66	11	0	0.0118	1
16	70	73	0	0.0197	1.0398
17	75	130	0.0004	0.0242	1.0249
18	79	74	0	0.018	1.0248
19	89	86	0	0.057	1.0252
20	93	42	0	0.026	1.0248
21	93	108	0	0.0154	1.0503
22	94	109	0	0.035	1.0248
23	95	91	0.0054	0.0458	1.02
24	95	99	0	0.0685	1.0296
25	96	101	0	0.1031	1.0296
26	97	44	0.0051	0.1007	1.0252
27	98	93	0.0006	0.0214	1.0252
28	104	34	0.008	0.0637	1
29	105	38	0	0.116	1.0252
30	110	112	0	0.0185	1
31	110	114	0	0.0768	1.0398
32	112	121	0	0.019	1.0499
33	116	119	0	0.009	1.0248
34	120	14	0.0003	0.0188	0.9751
35	128	72	0.0004	0.018	1

Transformateur <i>N</i>	Barre		Résistance ( <i>pu</i> )	Réactance ( <i>pu</i> )	Tap
	<i>i</i>	<i>j</i>			
36	129	132	0.0004	0.0198	1
37	133	134	0	0.041	1.0249
38	138	110	0	0.041	1
39	142	51	0	0.1728	1.07
40	144	141	0	0.082	1.0249
41	148	116	0	0.041	1
42	149	26	0	0.0386	1
43	149	26	0	0.0386	1
44	153	70	0	0.0916	1
45	153	70	0	0.0916	1
46	157	55	0	0.0827	1

Tableau-A III-12 Caractéristiques des charges

Barre <i>N</i>	Puissance Active ( <i>Mw</i> )	Puissance Reactive ( <i>MVAr</i> )
8	398	0
10	226	0
12	193	0
13	204	0
14	381	0
16	-54.2	0
17	-116.5	0
18	34.4	11.67
19	64.4	0
20	37.9	12.5
21	-69.8	0
22	17.39	5.27
23	63.5	0
28	38.47	13.17
29	28.31	9.03
30	101.2	32.52
31	72.5	0
32	52.7	15.06
33	45.17	15.06
34	14.18	5.25
35	54.48	14.63

<i>Barre</i>	<i>Puissance Active (Mw)</i>	<i>Puissance Reactive (MVar)</i>
<i>N</i>		
36	31.96	8.68
38	14.76	4.08
40	52.88	17.6
41	39.2	12.8
43	41.5	0
44	16.32	3.71
45	20.02	5.41
46	65.31	22.3
47	4.82	1.56
48	33.76	22.86
49	6.82	1.78
50	99.7	0
52	218.2	42.8
54	70.34	29.57
56	25.29	7.26
57	48.48	15.61
59	84.43	27.05
60	244	0
62	-865.6	0
63	59.1	0
65	-26.3	0
67	22.54	7.03
68	40.42	12.68
71	29.87	11.93
72	427	0
77	26.41	8.78
78	79.12	0
80	15.76	5.25
81	50.88	16.8
82	62.28	20.26
84	37.9	9.49
85	40.52	11.26
86	50.73	13.35
87	16.91	4.23
88	60.6	4.44
90	50.21	16.76
91	51.24	12.83

<i>Barre</i>	<i>Puissance Active (Mw)</i>	<i>Puissance Reactive (MVar)</i>
<i>N</i>		
92	36.12	9.05
93	103.8	34.56
94	164	6.49
95	117.2	39.01
96	119.2	0
97	22.84	5.71
98	151.1	50.35
100	23.21	6.9
102	16.54	4.08
103	322	0
104	31.52	10.46
105	24.84	6.23
107	35.41	5.41
111	65.41	16.72
113	32.7	0
115	17.32	3.34
116	56.08	11.2
117	101.9	20.06
122	47.28	9.36
123	165	0
127	-52.6	0
132	159	0
133	30.1	6.02
134	17.46	3.34
135	20.06	4.01
136	20.06	4.01
137	20.06	4.01
139	10.1	2.01
140	13.58	2.68
142	27.09	5.35
143	21.07	4.01
144	12.37	2.01
145	10.83	2.21
146	21.33	4.01
147	216.4	42.8
148	120	24
150	4.8	1.6

<i>Barre</i> <i>N</i>	<i>Puissance</i> <i>Active</i> <i>(Mw)</i>	<i>Puissance</i> <i>Reactive</i> <i>(MVar)</i>
151	24	8
152	6	0
153	4	1.6
154	28	9.6
155	12	4
156	8	2.4
157	32	10.4
158	16	5.6
159	8	2.4
160	14.4	4.8
161	32	10.4
162	20	6.4

**D.- Système 50 machines – 145 barres**

Ce système électrique est composé de 50 générateurs, de 145 barres, de 52 transformateurs et de 401 lignes. On peut voir sa représentation dans la figure-A III-4.

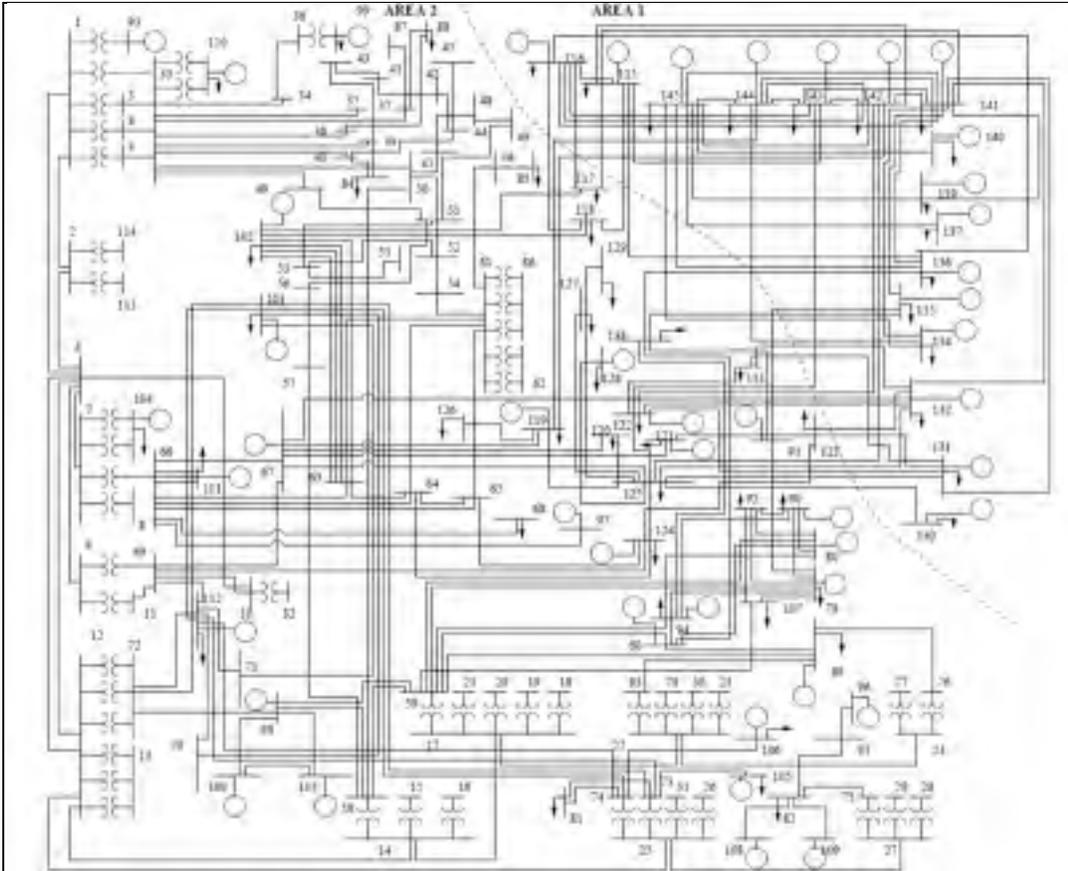


Figure-A III-4 Réseau 50 machines- 145 barres  
IEEE Common Data Format, University of Washington(en ligne)

Dans les tableaux A III-13 à A III-16 on trouve les paramètres des composants.

Tableau-A III-13 Caractéristiques des lignes

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
1	1	2	3.00E-05	0.0008	0.0632
2	1	2	3.00E-05	0.0008	0.0632
3	1	6	0.00194	0.0209	2.3792
4	2	6	0.00194	0.0209	2.3792
5	3	33	0.0002	0.0221	0
6	4	33	0.0002	0.0221	0
7	5	33	0.0002	0.0219	0
8	6	7	0.00129	0.0139	1.4652
9	6	9	0.00016	0.0017	0.1752
10	6	10	0.00016	0.0017	0.1752
11	6	12	0.0002	0.0021	0.8776
12	6	12	0.0002	0.0021	0.8776
13	8	66	0.0002	0.0299	0
14	8	66	0.0002	0.0221	0
15	11	69	0.0002	0.0262	0
16	12	14	0.00096	0.0091	0.8556
17	12	14	0.00096	0.0091	0.8556
18	12	25	0.00051	0.0055	0.625
19	12	25	0.00051	0.0055	0.625
20	13	72	0.0002	0.026	0
21	13	72	0.0003	0.0262	0
22	13	72	0.0002	0.026	0
23	14	17	0.00339	0.0367	3.4582
24	14	17	0.00352	0.0367	3.4516
25	15	58	0.0002	0.0255	0
26	16	58	0.0002	0.022	0
27	17	22	0.00228	0.0276	2.6204
28	18	59	0.0002	0.0298	0
29	19	59	0	0.0629	0
30	20	59	0	0.0638	0
31	21	59	0.0002	0.0329	0
32	22	24	0.00173	0.0208	1.9648
33	23	83	0.0004	0.0595	0
34	23	83	0.0003	0.0597	0
35	25	27	0.0023	0.0266	3.0508
36	25	27	0.0023	0.0266	3.0508

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
37	26	73	0.0003	0.0267	0
38	28	75	0.0002	0.029	0
39	29	75	0.0002	0.0269	0
40	30	78	0	0.0335	0
41	31	74	0.0003	0.0279	0
42	32	69	0.0002	0.0265	0
43	33	34	6.00E-05	0.0009	0.0006
44	33	35	6.00E-05	0.0009	0.0006
45	33	37	0.00996	0.0707	0.1116
46	33	38	0.00995	0.0693	0.111
47	33	39	0.0085	0.0699	0.1006
48	33	40	0.00849	0.0698	0.1004
49	33	49	0.0056	0.0493	0.0778
50	33	50	0.0056	0.0493	0.0778
51	34	36	0.00025	0.0022	0.0006
52	37	88	0.0031	0.1651	0
53	38	88	0.0031	0.1638	0
54	39	43	0.00602	0.0495	0.0712
55	39	84	0.00722	0.2786	0
56	40	44	0.00603	0.0496	0.0714
57	40	84	0.00729	0.2756	0
58	41	42	0.0005	0.1514	0
59	41	43	1.00E-05	0.0009	0.0006
60	42	44	1.00E-05	0.0009	0.0006
61	43	46	0.00618	0.0508	0.0732
62	44	45	0.00618	0.0508	0.0732
63	45	61	0.00445	0.0366	0.0526
64	45	85	0	0.26	0
65	46	61	0.00445	0.0366	0.0526
66	46	85	0	0.2592	0
67	47	48	-0.01	0.2306	0
68	47	50	1.00E-05	0.0009	0.0006
69	47	87	0.0831	0.401	0
70	48	49	1.00E-05	0.0009	0.0006
71	48	87	0.0998	0.436	0
72	49	51	0.00898	0.079	0.1248
73	50	51	0.00898	0.079	0.1248
74	51	52	0.0029	0.0279	0.0466

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
75	51	53	0.0029	0.0279	0.0466
76	51	56	0.00759	0.0483	0.0712
77	51	57	0.00759	0.0483	0.0712
78	52	53	-0.0067	0.3911	0
79	52	54	0.0047	0.0293	0.0462
80	53	55	0.0047	0.0293	0.0462
81	54	55	-0.0553	0.9289	0
82	54	61	0.00141	0.0087	0.0138
83	55	61	0.00141	0.0087	0.0138
84	56	57	-0.009	0.3895	0
85	56	58	0.0019	0.012	0.0178
86	57	58	0.0019	0.012	0.0178
87	58	59	0.6674	2.2175	0
88	58	72	0.0302	0.2364	0
89	58	87	0.0863	0.3906	0
90	58	98	0.0131	0.1765	0
91	58	100	0.1193	1.269	0
92	58	103	0.8416	5.5383	0
93	59	60	-0.1803	5.9659	0
94	59	72	0.8613	3.0485	0
95	59	79	0.0099	0.2644	0
96	59	80	0.2876	2.3898	0
97	59	89	0.3421	9.0571	0
98	59	92	-0.007	0.5678	0
99	59	94	0.7041	5.9885	0
100	59	98	0.106	0.5845	0
101	59	100	0.0183	0.2016	0
102	59	103	0.0368	0.3341	0
103	59	107	0.0372	0.8834	0
104	60	135	-1.831	9.7964	0
105	60	79	-0.0375	1.1068	0
106	60	80	0.0655	2.6441	0
107	60	90	-0.0201	1.5135	0
108	60	92	-0.264	3.7139	0
109	60	94	0.0012	0.0775	0
110	60	95	-0.0855	0.9926	0
111	60	138	-0.3639	1.7936	0
112	61	63	0.00812	0.0782	0.1318

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
113	61	63	0.00812	0.0782	0.1318
114	61	64	0.00242	0.0318	0.0568
115	61	65	0.00242	0.0318	0.0568
116	62	86	0.0036	0.0501	0
117	62	86	0.0013	0.0838	0
118	63	64	0.0147	0.2825	0
119	63	65	0.0147	0.2813	0
120	63	66	0.0056	0.09	0
121	63	67	0.0321	0.2785	0
122	63	69	0.0107	0.1571	0
123	63	102	0.0106	0.1583	0
124	63	102	0.0106	0.1576	0
125	63	102	0.0107	0.1604	0
126	63	102	0.0104	0.1542	0
127	63	116	-0.3897	6.8588	0
128	63	117	0.003	0.056	0
129	63	118	-0.0125	0.2425	0
130	63	124	-0.1265	2.022	0
131	64	65	0.0013	0.1674	0
132	64	66	0.0039	0.0684	0
133	64	67	0.0233	0.212	0
134	64	69	0.0075	0.1196	0
135	64	97	-0.4336	8.2923	0
136	64	124	-0.1041	1.5375	0
137	65	66	0.0039	0.0682	0
138	65	67	0.0233	0.2111	0
139	65	69	0.0075	0.1191	0
140	65	97	-0.4292	8.2582	0
141	65	124	-0.1032	1.5312	0
142	66	67	0.0081	0.0675	0
143	66	68	-2.473	2.472	0
144	66	69	0.0028	0.0381	0
145	66	97	-0.1119	2.6432	0
146	66	111	0	0.0264	0
147	66	111	0.00057	0.0266	0
148	66	111	0	0.0273	0
149	66	111	0.00057	0.0264	0
150	66	124	-0.0283	0.4902	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
151	67	68	-3.443	3.7172	0
152	67	69	0.0061	0.055	0
153	67	97	0.0063	0.1166	0
154	67	119	-0.2213	9.3918	0
155	67	120	-0.0034	1.7847	0
156	67	121	0.0082	1.17	0
157	67	122	-0.0047	0.4473	0
158	67	124	0.0003	0.0065	0
159	67	125	0.0062	0.2519	0
160	67	132	-0.3194	4.3566	0
161	68	69	-0.692	0.6984	0
162	69	70	0.0085	0.3333	0
163	69	71	0.0075	0.312	0
164	69	72	0.0013	0.01	0
165	69	73	0.0098	0.0747	0
166	69	74	0.0135	0.0741	0
167	69	97	-0.0674	1.5849	0
168	69	101	0.0174	0.2188	0
169	69	112	0.0175	0.2201	0
170	69	124	-0.0267	0.3986	0
171	70	71	-0.4891	2.6613	0
172	70	72	-0.0062	0.1216	0
173	70	73	-0.0424	0.9125	0
174	70	74	0.0032	0.9138	0
175	70	101	-0.1248	1.0409	0
176	70	112	-0.1257	1.0471	0
177	71	72	-0.006	0.1138	0
178	71	73	-0.0409	0.8541	0
179	71	74	0.0018	0.8553	0
180	71	101	-0.1592	1.2303	0
181	71	112	-0.1603	1.2377	0
182	72	73	0.0015	0.0275	0
183	72	74	0.0028	0.0274	0
184	72	98	0.0138	0.2417	0
185	72	100	0.1337	1.7384	0
186	72	101	0.0002	0.0802	0
187	72	103	1.0224	7.5945	0
188	72	112	0.0002	0.0806	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
189	73	74	-0.0007	0.0393	0
190	73	75	0.0147	0.2581	0
191	73	81	-0.0122	0.3068	0
192	73	82	0.0036	2.0169	0
193	73	91	0.0271	0.5732	0
194	73	96	0.0245	0.4805	0
195	73	101	0.0044	0.6014	0
196	73	105	0.0007	0.0325	0
197	73	105	0.0007	0.0325	0
198	73	105	0.0006	0.0295	0
199	73	108	-0.0182	0.5832	0
200	73	109	0.0524	3.0059	0
201	73	112	0.0043	0.605	0
202	73	121	-0.0268	1.7653	0
203	74	75	0.0215	0.3277	0
204	74	81	-0.0333	0.4631	0
205	74	82	-0.0098	1.9859	0
206	74	91	0.0413	0.7511	0
207	74	96	0.435	7.6901	0
208	74	101	0.0344	0.6005	0
209	74	106	0.003	0.0335	0
210	74	106	0.0005	0.0328	0
211	74	108	-0.0187	0.4544	0
212	74	109	0.1004	3.4697	0
213	74	112	0.0345	0.6042	0
214	74	121	-0.0348	1.3757	0
215	75	82	0.0777	1.125	0
216	75	91	-0.2255	3.1442	0
217	75	96	-0.4516	4.631	0
218	75	108	0.0042	0.1049	0
219	75	109	0.1046	1.4465	0
220	75	121	0.0178	0.3172	0
221	76	77	0.0002	0.016	0
222	76	89	0.0011	0.0221	0
223	79	80	0.044	0.0991	0
224	79	90	0.0506	2.471	0
225	79	92	0.0017	0.3032	0
226	79	94	0.1275	1.1195	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
227	79	95	0.305	6.4154	0
228	79	107	0.0786	1.414	0
229	80	90	0.4658	5.8756	0
230	80	92	0.1192	1.5053	0
231	80	94	0.46	2.6475	0
232	82	91	-0.2349	2.4188	0
233	82	108	-0.0742	0.7278	0
234	82	109	-0.0071	0.2634	0
235	82	121	-0.1892	2.2054	0
236	83	89	0.0582	0.3855	0
237	89	103	-1.073	4.1433	0
238	90	92	-0.138	8.2959	0
239	90	94	0.0689	1.0717	0
240	91	96	-0.1224	4.2463	0
241	91	108	-0.1078	0.6994	0
242	91	109	-0.2699	4.2634	0
243	91	121	-0.2924	2.121	0
244	92	94	0.2883	3.7717	0
245	92	107	0.0176	3.0227	0
246	94	95	0.0534	0.996	0
247	94	138	-0.1125	1.8385	0
248	95	138	-0.0732	0.6389	0
249	96	108	-0.8215	6.1143	0
250	97	124	-0.3793	1.9557	0
251	98	100	-0.0063	0.3269	0
252	98	103	0.0544	1.4358	0
253	100	103	-0.0249	0.4891	0
254	101	112	-0.0138	0.361	0
255	102	117	-0.0003	0.019	0
256	102	118	-0.0267	0.3222	0
257	108	109	-0.0825	1.2713	0
258	108	121	-0.0009	0.0431	0
259	109	121	-0.1881	3.8499	0
260	115	116	0.0008	0.0291	0
261	115	117	-0.0092	0.2222	0
262	115	118	-0.0044	0.0677	0
263	115	143	-0.1017	0.4924	0
264	116	117	0.00191	0.0288	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
265	116	118	-0.001	0.044	0
266	116	143	-0.2187	1.2896	0
267	117	118	0.0008	0.0081	0
268	117	143	-0.0834	0.6854	0
269	118	131	-0.8925	6.2385	0
270	118	132	-0.6967	8.143	0
271	118	143	-0.0011	0.0231	0
272	119	120	0.001	0.0236	0
273	119	121	-0.011	0.2901	0
274	119	122	-0.6013	5.8941	0
275	119	124	-0.2618	3.394	0
276	119	125	-0.0082	0.2595	0
277	119	126	0.00153	0.0179	0
278	119	127	-0.1172	1.3932	0
279	119	128	-0.0054	0.0516	0
280	119	129	0.0034	0.0642	0
281	119	130	-0.0022	0.0163	0
282	119	131	-0.0044	0.0242	0
283	119	132	-0.4137	2.4027	0
284	119	144	-0.8511	3.8358	0
285	120	121	0.0009	0.0779	0
286	120	122	-0.061	0.9305	0
287	120	123	-0.0466	0.5011	0
288	120	124	-0.0259	0.4722	0
289	120	125	-0.0002	0.0555	0
290	120	127	0.002	0.1818	0
291	120	128	-0.0029	0.0743	0
292	120	129	-0.0229	0.4911	0
293	120	130	-0.1674	1.0675	0
294	120	131	-0.0687	0.4516	0
295	120	132	-0.0255	0.4566	0
296	121	122	-0.0108	0.483	0
297	121	123	-0.1712	1.9482	0
298	121	124	-0.006	0.3494	0
299	121	125	0	0.0124	0
300	121	127	-0.0204	0.8338	0
301	121	128	-0.0278	0.3095	0
302	121	129	-0.4545	4.254	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
303	121	131	-0.2183	1.5066	0
304	121	132	-0.1308	1.3815	0
305	122	123	-0.584	4.8609	0
306	122	124	-0.0009	0.0552	0
307	122	125	-0.0069	0.1583	0
308	122	131	-0.2433	1.935	0
309	122	132	-0.0187	0.2572	0
310	122	133	-0.098	0.9821	0
311	122	143	-0.0312	0.4888	0
312	123	124	-0.223	1.967	0
313	123	125	-0.0821	0.6062	0
314	123	131	-0.1783	1.2535	0
315	123	132	-0.1355	1.2041	0
316	124	125	-0.0017	0.0949	0
317	124	128	-1.153	8.2513	0
318	124	131	-0.1062	0.8185	0
319	124	132	-0.0094	0.1612	0
320	124	133	-0.0342	1.1798	0
321	124	143	-0.0078	0.7607	0
322	125	127	-0.0791	0.9851	0
323	125	128	-0.062	0.5991	0
324	125	129	-0.4217	3.9702	0
325	125	130	-1.974	8.4854	0
326	125	131	-0.1251	0.6939	0
327	125	132	-0.0536	0.5086	0
328	127	128	-0.0026	0.124	0
329	127	129	-0.0392	1.1082	0
330	128	129	-0.001	0.0207	0
331	128	130	-1.1	2.9924	0
332	128	131	-1.559	4.0869	0
333	130	131	-0.0027	0.0154	0
334	130	132	-0.6509	3.031	0
335	130	144	-0.7532	3.0664	0
336	131	132	-0.0032	0.0411	0
337	131	133	-1.077	5.5285	0
338	131	143	-0.0588	0.4055	0
339	131	144	-0.0022	0.0151	0
340	132	133	-0.0916	0.8229	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
341	132	143	-0.0049	0.0965	0
342	132	144	-0.1108	0.9827	0
343	133	143	-0.36	2.6309	0
344	134	131	-0.4042	0.9144	0
345	134	136	-0.0698	0.6428	0
346	134	139	-0.0353	0.166	0
347	134	141	-0.023	0.1179	0
348	134	142	-0.0263	0.1167	0
349	134	144	-0.0145	0.0435	0
350	134	145	-0.0034	0.0216	0
351	135	95	-0.3448	3.4845	0
352	135	136	-0.0031	0.0178	0
353	135	138	-0.0084	0.1729	0
354	135	141	-0.129	0.6993	0
355	136	115	-0.012	0.0855	0
356	136	116	-1.2	4.2655	0
357	136	117	-2.969	9.0875	0
358	136	118	-0.5749	1.6206	0
359	136	138	-0.1581	0.5485	0
360	136	139	-0.0059	0.0293	0
361	136	140	-2.403	9.378	0
362	136	141	-0.0026	0.0175	0
363	136	142	-0.0467	0.1709	0
364	136	143	-1.762	3.4549	0
365	136	145	-0.0049	0.0539	0
366	137	139	-0.0183	0.0936	0
367	137	140	-2.229	8.0228	0
368	137	145	-0.0852	0.4071	0
369	139	140	-0.0054	0.0239	0
370	139	141	-0.0083	0.046	0
371	139	142	-0.3102	1.267	0
372	139	145	-0.0009	0.008	0
373	140	145	-0.1088	0.48	0
374	141	115	-0.0007	0.0131	0
375	141	116	-0.1568	0.7448	0
376	141	117	-0.3702	1.382	0
377	141	118	-0.0414	0.1439	0
378	141	131	-0.2331	0.8129	0

Ligne N	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Susceptance B (pu)
	i	j			
379	141	132	-1.628	7.0936	0
380	141	142	-0.0018	0.0105	0
381	141	143	-0.0702	0.1778	0
382	141	144	-0.0756	0.2441	0
383	141	145	-0.0038	0.0358	0
384	142	115	-0.0166	0.1563	0
385	142	116	-0.6916	2.6302	0
386	142	117	-0.5596	2.2284	0
387	142	118	-0.0185	0.1037	0
388	142	119	-0.2742	1.8611	0
389	142	120	-0.6043	7.353	0
390	142	122	-0.2589	2.1732	0
391	142	124	-0.1736	2.1347	0
392	142	125	-1.09	8.616	0
393	142	130	-0.3608	1.8618	0
394	142	131	-0.0013	0.0157	0
395	142	132	-0.0055	0.081	0
396	142	133	-1.636	9.1725	0
397	142	143	-0.0038	0.0187	0
398	142	144	-0.002	0.0229	0
399	142	145	-0.0738	0.438	0
400	143	144	-0.4863	2.3282	0
401	144	145	-0.3835	1.2052	0

Tableau-A III-14 Caractéristiques des générateurs

Unité	H(s)	X'd (pu)
1	115.0366	0.024
2	73.8528	0.0122
3	84.3915	0.0208
4	56.261	0.03118
5	115.05	0.024
6	73.8528	0.0122
7	1.41	0.4769
8	52.1796	0.0213
9	6.65	0.1292
10	1.2857	0.6648
11	2.115	0.5291

<i>Unité</i>	<i>H(s)</i>	<i>X'd (pu)</i>
12	20.5602	0.0585
13	0.7628	1.6
14	1.6848	0.3718
15	17.3424	0.0839
16	5.4662	0.1619
17	2.1216	0.4824
18	5.4912	0.2125
19	13.96	0.0795
20	17.108	0.1146
21	7.56	0.1386
22	12.2844	0.0924
23	78.4366	0.0135
24	8.16	0.1063
25	30.432	0.0248
26	2.6622	0.2029
27	12.2844	0.0924
28	97.33	0.0024
29	105.5	0.0022
30	102.16	0.0017
31	162.74	0.0014
32	248.22	0.0002
33	116.54	0.0017
34	39.24	0.0089
35	116.86	0.0017
36	503.87	0.0001
37	230.9	0.001
38	1101.72	0.0001
39	120.35	0.0016
40	802.12	0.0003
41	232.63	0.0008
42	2018.17	0.0001
43	469.32	0.0004
44	2210.2	0.0001
45	899.19	0.0003
46	1474.22	0.0001
47	950.8	0.0003
48	204.3	0.0023
49	443.22	0.0004
50	518.08	0.0018

Tableau-A III-15 Caractéristiques des transformateurs

Transformateur <i>N</i>	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Tap
	<i>i</i>	<i>j</i>			
1	1	3	-0.009	-0.1718	0.935
2	1	4	-0.009	-0.1718	0.935
3	1	5	-0.0089	-0.1697	0.935
4	1	33	0.0001	0.006	0.935
5	1	93	0.0002	0.0138	1.1036
6	1	93	0.0002	0.0138	1.1036
7	2	113	0	0.0148	1.1052
8	2	114	0.00018	0.0145	1.1052
9	7	8	-0.0112	-0.1516	0.9716
10	7	66	0.00015	0.0097	0.9716
11	7	104	0.00036	0.019	1.1052
12	7	104	0.00041	0.0174	1.1052
13	9	11	-0.0217	-0.3062	0.9166
14	9	69	0.0004	0.0188	0.9166
15	10	32	-0.027	-0.3041	0.9166
16	10	69	0.0004	0.0187	0.9166
17	12	13	-0.0223	-0.3099	0.9166
18	12	13	-0.0237	-0.316	0.9166
19	12	13	-0.0237	-0.316	0.9166
20	12	72	0.0003	0.0189	0.9166
21	12	72	0.0003	0.019	0.9166
22	12	72	0.0003	0.019	0.9166
23	14	15	-0.0415	-0.3996	0.9164
24	14	16	-0.01	-0.1669	0.9164
25	14	58	0.0002	0.0097	0.9164
26	17	18	-0.3181	-1.315	0.8708
27	17	19	0	-0.847	0.8634
28	17	20	0	-0.8676	0.8634
29	17	21	-0.0095	-0.1615	0.8708
30	17	59	0.0001	0.0071	0.8708
31	22	23	0	-0.3787	0.9322
32	22	30	0	-0.3066	0.9532
33	22	78	0	0.0268	0.9532
34	22	83	0	0.0349	0.9322
35	24	76	0.0002	0.0088	0.9898
36	24	77	-0.0023	-0.0603	0.9898

Transformateur <i>N</i>	Barre		Resistance (pu)	Réactance (pu)	Tap
	<i>i</i>	<i>j</i>			
37	25	26	-0.006	-0.1375	0.9166
38	25	31	-0.0082	-0.1648	0.9166
39	25	73	0.0003	0.0172	0.9166
40	25	74	0.0004	0.0179	0.9166
41	27	28	-0.1153	-0.7453	0.9074
42	27	29	-0.0163	-0.2618	0.9074
43	27	75	0.00016	0.01	0.9074
44	33	110	0.00024	0.0157	1.18
45	33	110	0.00023	0.0156	1.18
46	36	99	0.0008	0.0455	1.1291
47	37	87	0.00093	0.0442	1.05
48	61	62	-0.0362	-0.2608	1.05
49	61	62	-0.0472	-0.5438	1.05
50	61	86	0.00132	0.032	1.05
51	61	86	0.0011	0.037	1.05
52	61	86	0.0011	0.037	1.05

Tableau-A III-16 Caractéristiques des charges

Barre <i>N</i>	Puissance Active (Mw)	Puissance Reactive (MVar)
34	45.05	46.56
35	49.19	27.53
51	58.45	28.44
58	76.3	-10.8
66	102.2	26.7
68	0	-7.41
70	0	56.63
71	0	-21.2
74	81.9	43.7
78	89	26.8
81	82.2	-93.1
84	24.3	8.2
85	27.4	0.3
88	69	20.9
92	0	31.02

<i>Barre</i> <i>N</i>	<i>Puissance</i> <i>Active</i> <i>(Mw)</i>	<i>Puissance</i> <i>Reactive</i> <i>(MVar)</i>
107	-17.5	-12.8
120	-408	175.1
123	-84	-19
125	-712	-319
126	-333	-160
127	-546	-72
129	-482	-122
133	-83	-36.3
138	-363	-188



**ANNEXE IV**

**FLOWCHARTS**

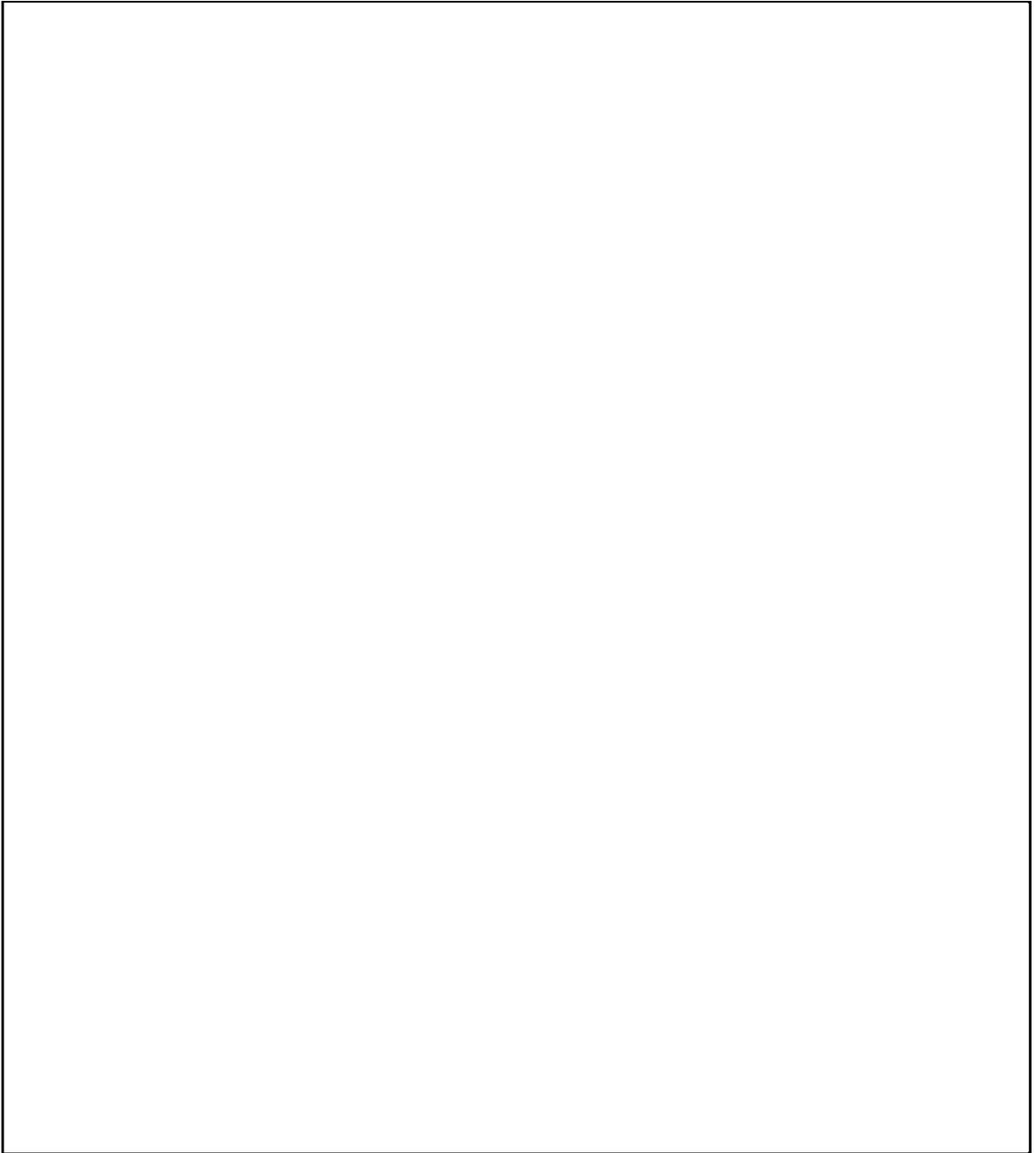


Figure-A IV-1 Flowchart programme principal

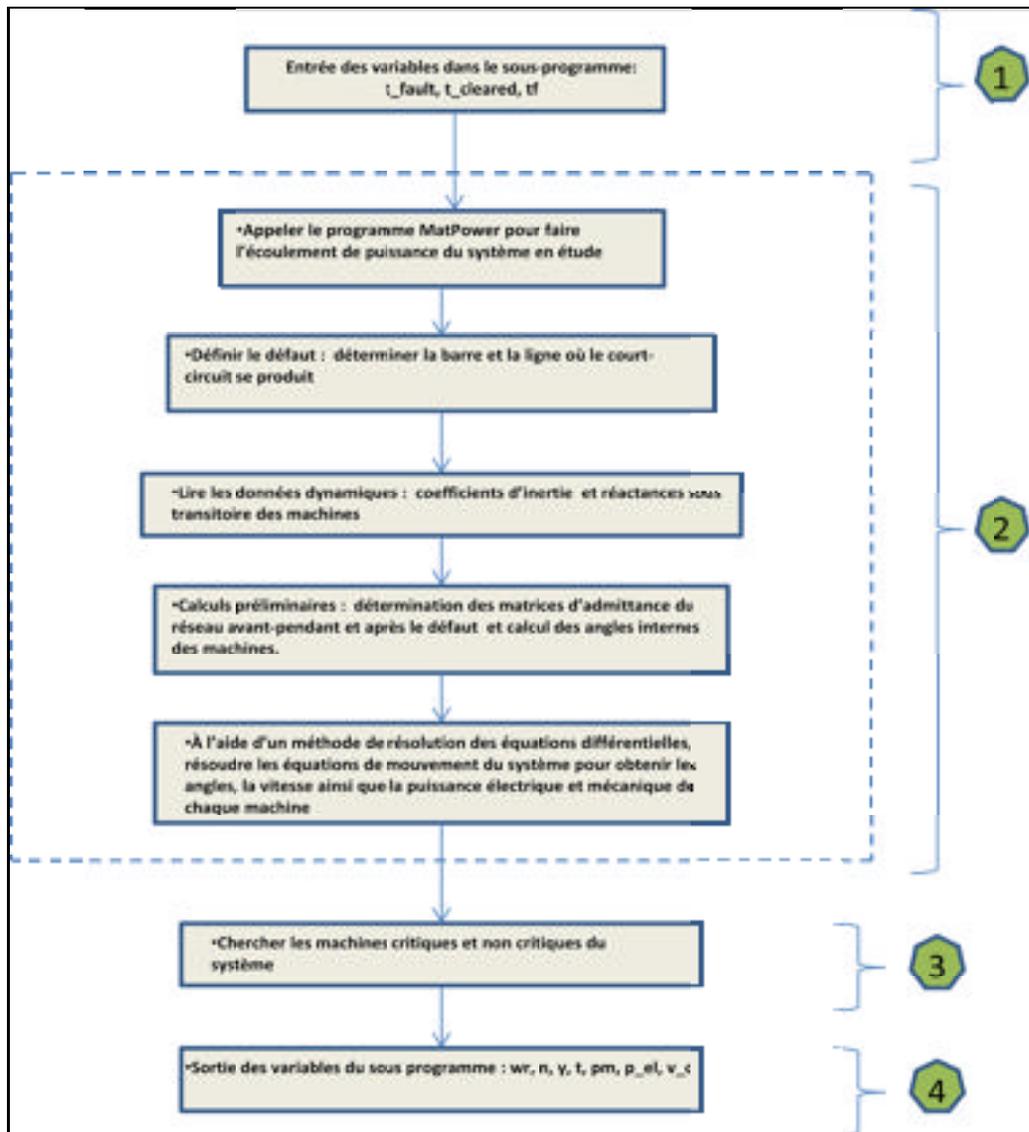


Figure-A IV-2 Flowchart sous programme analyse stabilité transitoire

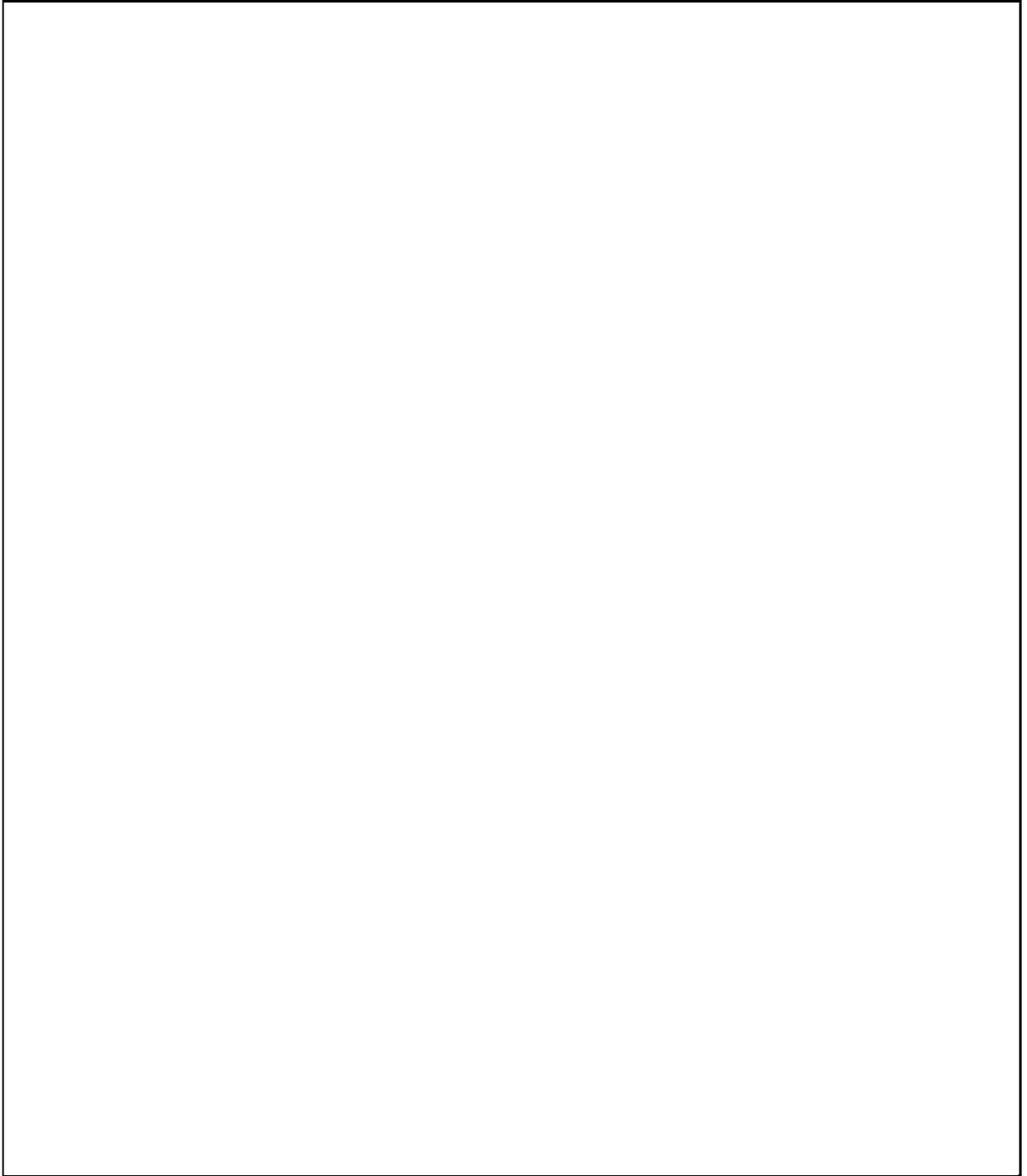


Figure-A IV-3 Flowchart sous programme SIME



## LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Anderson, P. M., A. A. Fouad, et al. (2003). Power system control and stability, IEEE Press.
- Aylett, P. D. (1958). "The energy-integral criterion of transient stability limits of power systems." Proceedings of the IEE - Part C: Monographs 105(8): p.527-536.
- Chan, K. W., C. H. Cheung, et al. (2002). Time domain simulation based transient stability assessment and control. Power System Technology, 2002. Proceedings. PowerCon 2002. International Conference on.
- Chung, T. S. and D.-Z. Fang (1993). A new method of fast assessment of transient stability margins. Advances in Power System Control, Operation and Management, 1993. APSCOM-93., 2nd International Conference on.
- El-Abiad, A. H. and K. Nagappan (1966). "Transient Stability Regions of Multimachine Power Systems." Power Apparatus and Systems, IEEE Transactions on PAS-85(2): p.169-179.
- Fortescue, C. L. (1925). "Transmission Stability Analytical Discussion of Some Factors Entering into the Problem." American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the XLIV: p.984-1003.
- Fujii, W., J. Wakisaka, et al. (2007). Transient Stability Analysis Based on Dynamic Single Machine Equivalent. Power Symposium, 2007. NAPS '07. 39th North American.
- Glover, J. D., M. S. Sarma, et al. (2008). Power system analysis and design, Thomson.
- Grainger, J. J. and W. D. Stevenson (1994). Power system analysis, McGraw-Hill.
- IEEE, C. R. (1992). "Transient stability test systems for direct stability methods." Power Systems, IEEE Transactions on 7(1): p.37-43.
- Kundur, P., J. Paserba, et al. (2004). "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions." Power Systems, IEEE Transactions on 19(3): p.1387-1401.
- Magnusson, P. C. (1947). "The Transient-Energy Method of Calculating Stability." American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the 66(1): p.747-755.
- Park, R. H. and E. H. Bancker (1929). "System Stability as a Design Problem." American Institute of Electrical Engineers, Transactions of the 48(1): p.170-193.

- Pavella, M., D. Ernst, et al. (2000). Transient stability of power systems: a unified approach to assessment and control, Kluwer Academic Publishers.
- Pavella, M., D. Ruiz-Vega, et al. (2008). Appendix B: Sime: A Comprehensive Approach to Transient Stability. Real-Time Stability Assessment in Modern Power System Control Centers, John Wiley & Sons, Inc.: p.353-400.
- Saadat, H. (2002). Power Systems Analysis, McGraw-Hill.
- Sauer, P. W. and M. A. Pai (1998). Power system dynamics and stability, Prentice Hall.
- Tan, H. M. and R. Zivanovic (2008). Integrating the SIME method with standard time domain simulation software to search for transient stability limits. Power Engineering Conference, 2008. AUPEC '08. Australasian Universities.
- Xue, Y. and M. Pavella (1993). "Critical-cluster identification in transient stability studies [of power systems]." Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C 140(6): p.481-489.
- Xue, Y., T. Van Cutsem, et al. (1988). "A simple direct method for fast transient stability assessment of large power systems." Power Systems, IEEE Transactions on 3(2): p.400-412.
- Xue, Y., T. Van Cutsem, et al. (1989). "Extended Equal Area Criterion Justifications, Generalizations, Applications." Power Engineering Review, IEEE 9(2): p.38-39.
- Yeu, R. H. (2010). "Small signal analysis of power systems: Eigenvalue tracking method and eigenvalue estimation contingency screening for DSA." Dissertation, University of Illinois at Urbana-Champaign: p.159-163.
- Zhang, Y., L. Wehenkel, et al. (1997). "SIME: A hybrid approach to fast transient stability assessment and contingency selection." International Journal of Electrical Power & Energy Systems 19(3): p.195-208.
- IEEE Common Data Format, University of Washington. En ligne  
<<http://www.washington.edu/research/pstca>>. Consulté le 31 Janvier 2012.
- Steven Chapra, Raymond Canale (2009). Numerical methods for engineers, McGraw-Hill.

