



**Chapitre IV : Structure de programme modèle  
détaillé**

### IV.1 Introduction

La stabilité transitoire (ST) est une spécialité de la stabilité de l'angle du rotor qui simule et analyse le comportement dynamique des machines synchrones avant, pendant et après une perturbation. La tendance la plus courante pour étudier la ST est une simulation dans le domaine du temps (SDT). À cette fin, nous formulons un ensemble d'équations différentielles algébriques (EDA) qui simulent le comportement des machines ainsi que le fonctionnement du réseau. Ces équations sont non linéaires et leur résolution nécessite l'application de méthodes numériques d'intégration.

Ce chapitre introduit le modèle mathématique qui représente le comportement dynamique détaillé du générateur synchrone et la description pas-à-pas de la programmation. D'abord, nous décrivons les équations différentielles qui simulent le comportement dynamique du groupe générateur-excitatrice ainsi que les équations algébriques qui simulent le rotor et le réseau électrique. Ensuite, nous expliquerons la technique implicite qui raouts les EDA. À la fin, nous présenterons les aspects principaux liés à la mise en œuvre du programme, tels que les conditions initiales, les options définies par l'utilisateur et la présentation des résultats.

### IV.2 Structure du modèle dynamique du réseau électrique

L'analyse de la stabilité transitoire des réseaux électriques implique la modélisation des éléments du réseau électrique et le calcul de leur réponse dynamique non linéaire lors des grandes perturbations [15]

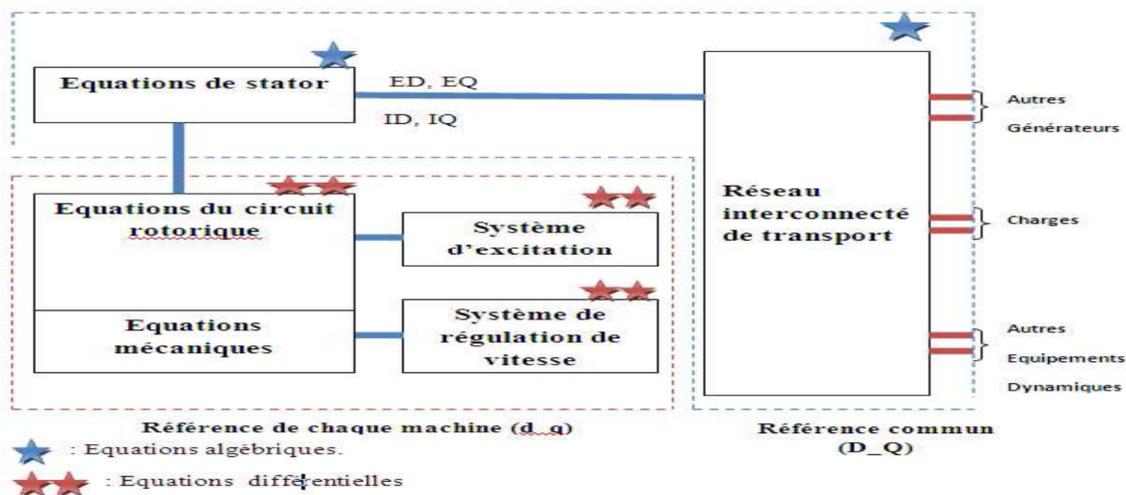


Figure IV.1 : Structure complète du modèle du réseau électrique pour l'analyse de la stabilité transitoire.



La figure (IV.1) représente la structure générale du modèle du réseau électrique pour l'analyse de la stabilité transitoire, la représentation globale du réseau électrique inclut les modèles des différents composants suivants :

- Générateurs synchrones et leurs systèmes de régulation de tension et de vitesse.
- Interconnexion au réseau de transporte.

La modélisation des générateurs synchrones et leurs régulateurs sont limite aux équations différentielles ordinaires non linéaires de premier ordre. Le stator et le réseau d'interconnexion sont modélises par des équations algébriques.

### IV.3 Modèle mathématique

Le comportement dynamique des générateurs est représenté pour un système d'EDA dont la forme est:

$$\begin{aligned} &\text{Équations différentielles} \\ &\dot{x} = f(x, y, u) \end{aligned} \tag{IV.1}$$

$$\begin{aligned} &\text{Équations algébrique} \\ &0 = g(x, y) \end{aligned} \tag{IV.2}$$

Où les vecteurs  $x$ ,  $y$  et  $u$  contiennent, respectivement, les variables d'état, les variables algébriques et les variables de contrôle. La technique la plus courante pour résoudre les EDA consiste, dans un premier temps, à intégrer implicitement le système d'équations (IV.1)

Ensuite, ce résultat est relié aux équations algébriques (IV.2) en constituant un système d'équations non linéaires. Finalement, la solution est obtenue en appliquant une méthode de résolution pour ce type d'équations, comme celle de Newton Raphson

#### IV.3.1 Equations différentielles de la machine synchrone

Pour un réseau avec  $m$  générateurs, les équations différentielles qui caractérisent la dynamique de la machine synchrone pour le modèle détaillé à « deux axes » s'expriment comme suit [47]:

$$T'_{d0i} = \frac{dE'_{qi}}{dt} = -E'_{qi} - (X_{di} - X'_{di})I_{di} + E_{fdi} \tag{IV.3}$$

$$T'_{q0i} = \frac{dE'_{di}}{dt} = -E'_{di} - (X_{qi} - X'_{qi})I_{qi} \tag{IV.4}$$

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_s \tag{IV.5}$$

$$\frac{2H_i}{\omega_s} \frac{d\omega_i}{dt} = T_{Mi} - E'_{di}I_{di} - E'_{qi}I_{qi} - (X'_{qi} - X'_{di})I_{di}I_{qi} - D_i(\omega_i - \omega_s) \tag{IV.6}$$



$$T_{Ei} \frac{dE_{fdi}}{dt} = - \left( K_{Ei} + S_{Ei} (E_{fdi}) \right) E_{fdi} + V_{Ri} \tag{IV.7}$$

$$T_{Fi} \frac{dR_{fdi}}{dt} = -R_{fdi} + \frac{K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} \tag{IV.8}$$

$$T_{Ai} \frac{dV_{Ri}}{dt} = -V_{Ri} + K_{Ai} R_{fdi} - \frac{K_{Ai}K_{Fi}}{T_{Fi}} E_{fdi} + K_{Ai} (V_{refi} - V_i) \tag{IV.9}$$

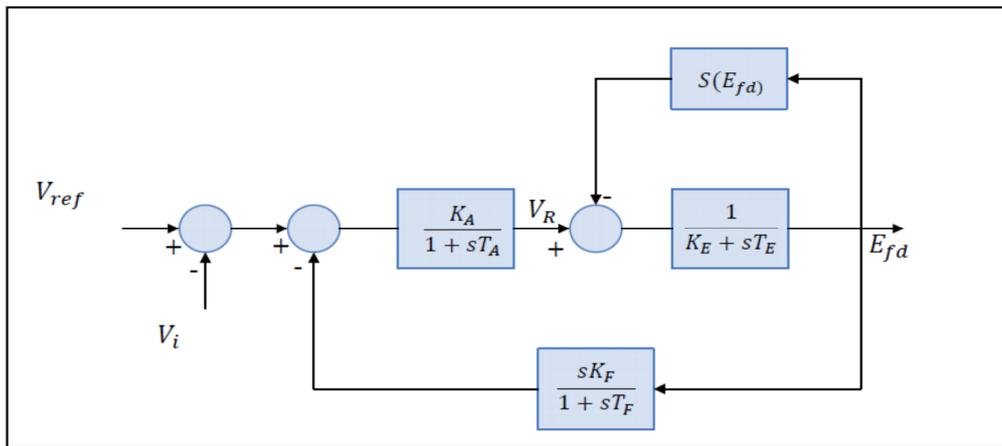
$i = 1, \dots, m$

Le Tableau (IV.1) présente la description des variables d'état et algébriques. Les variables d'entrée liées au générateur sont contenues dans le Tableau (IV.2) et celles de l'excitatrice, dans le Tableau (IV.3) Les équations (IV.3) et (IV.4) résultent de l'application de la loi de Faraday aux circuits du rotor. D'autre part, les équations (IV.5) et (IV.6) découlent de l'application de la loi de Newton à la dynamique du rotor [48].

Les équations de la (IV.7) à la (IV.9) représentent le comportement du système d'excitation en incluant le régulateur de tension. Ce système est responsable de fournir la tension nécessaire pour que la machine synchrone atteigne le niveau de puissance demandé. Il existe plusieurs types de systèmes d'excitation, mais généralement, ils sont classifiés en trois catégories : à courant continu, à courant alternatif et statique. On peut trouver davantage d'information sur les modèles d'excitation dans le document publié par l'IEEE, « *Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies* » (2006, p. 8-21).

Variable	Description
$E_{fd}$	Tension d'excitation
$R_F$	Signal de retour de l'information de tension
$V_R$	Sortie du régulateur de tension
$E'_q$	Tension interne du générateur - axe q
$E'_d$	Tension interne du générateur - axe d
$\delta$	Angle du générateur
$\omega$	Vitesse angulaire
$I_d$	Courant de générateur – axe d
$I_q$	Courant de générateur – axe q
$V$	Module de la tension
$\theta$	Angle de la tension

Tableau (IV.1) Variables d'état et algébrique



**Figure IV.2** Système d'excitation type I  
Tirée de Pai, Sen Gupta et al. (2005, p. 269)

Bien qu'il existe des modèles d'excitation plus spécialisés qui peuvent représenter le fonctionnement d'un type de système de façon plus stricte, ce modèle d'excitation convient particulièrement aux études de stabilité grâce à son adaptabilité pour différents types de systèmes d'excitation [49].

### IV.3.2 Les équations algébriques

Les équations algébriques du stator, sous forme polaire, sont données par les expressions suivantes [47]:

$$E'_{di} - V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{di} + X'_{qi}I_{qi} \quad (IV.10)$$

$$E'_{qi} - V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - R_{si}I_{qi} + X'_{di}I_{di} \quad (IV.11)$$

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

Par ailleurs, les équations qui décrivent un réseau électrique, après une réduction de Kron, sont énoncées comme suit :

$$(I_{di} + jI_{qi})e^{j(\delta_i - \frac{\pi}{2})} = \sum_{k=1}^n V_k e^{j\theta_{ik}} Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} \quad (IV.12)$$

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

Où les éléments  $ii$  et  $ik$  de la matrice d'admittance sont :

$$Y'_{ik} e^{j\alpha'_{ik}} = Y_{ik} e^{j\alpha_{ik}} \quad (IV.13)$$

$$Y'_{ii} e^{j\alpha'_{ii}} = Y_{ii} e^{j\alpha_{ii}} Y_L$$

Le vecteur  $Y_L$ , qui modèle les charges sous forme d'admittances, est calculé avec l'équation

(IV.10) Pour la programmation, l'équation (IV.14) est implémentée en séparant les composants réels et imaginaires.

Les éléments qui composent le système de puissance ainsi que les interactions sont représentés par le diagramme de blocs suivant Figure (IV.3) :

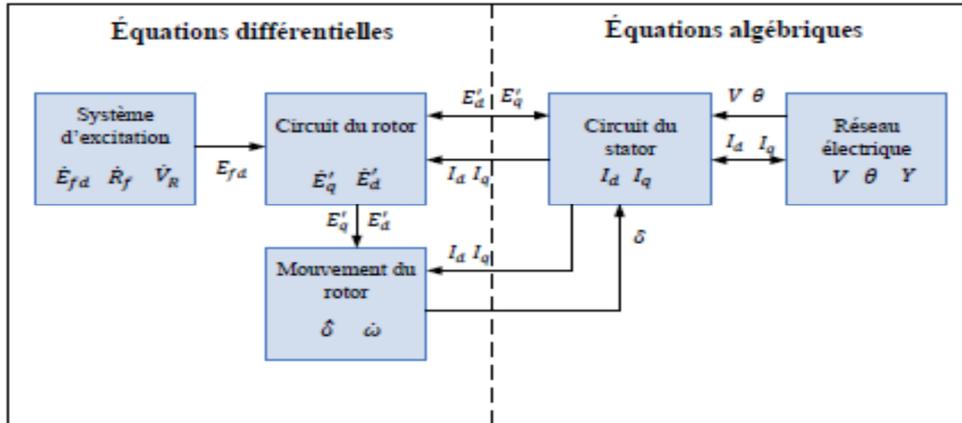


Figure (IV.3) Diagramme de blocs du système d'EDA

#### IV.4 Les données d'entrée

Comme le modèle classique, le modèle détaillé de la stabilité transitoire se sert des données qui résultent de l'écoulement de puissance pour formuler les conditions initiales. De même, le réseau est modélisé grâce aux matrices *bus*, *gen* et *branche*. Néanmoins, la liste des variables qui caractérisent la dynamique du générateur, pour ce modèle, est plus grande. Le Tableau (IV.2) et le Tableau (IV.3) présentent respectivement les variables liées au générateur et à l'excitatrice.

Variable	Description
H	Constante d'inertie de la machine
$R_s$	Résistance du stator
$X'_d$	Réactance transitoire— axe d
$X'_q$	Réactance transitoire — axe q
$X_d$	Réactance du générateur — axe d
$X_q$	Réactance du générateur — axe q
$T'_{d0}$	Constante de temps — axe d
$T'_{q0}$	Constante de temps — axe q

Tableau IV.2 Variables dynamiques du générateur



Ces variables sont classées sous forme matricielle et reliées, pour chaque cas d'étude, dans la fonction  $dinData(n)$ . Cette fonction, appelée au début du programme principal, détermine, en utilisant la quantité de barres, les variables appropriées pour formuler les équations différentielles.

L'écoulement de puissance et la lecture des variables sont obtenus de la même façon que pour le modèle classique avec l'instruction **runpf** ('case\_\_').

Variable	Description
$K_a$	Gain de l'amplificateur
$T_a$	Constante de temps de l'amplificateur
$K_e$	Gain de l'excitatrice
$T_e$	Constante de temps de l'excitatrice
$k_f$	Gain du stabilisateur
$T_f$	Constante de temps du stabilisateur
$S_{EK1}$	Première constante de la fonction de saturation
$S_{EK2}$	Deuxième constante de la fonction de saturation
$\frac{D}{M}$	Constante d'amortissement

Tableau IV.3 Variables dynamiques de l'excitatrice

### IV.5 Calcul des conditions initiales

Les calculs préliminaires visent à initialiser les vecteurs d'état et à établir les coefficients des équations différentielles de la (IV.3) à la (IV.9). Les étapes de ce processus sont énumérées de la façon suivante [47]:

1. Le calcul du vecteur des courants de génération :

$$I_{Gi} e^{j\gamma_i} = \frac{(P_{Gi} - jQ_{Gi})}{V_i e^{-j\theta}} \tag{IV.14}$$

2. Calcul du vecteur des angles  $\delta_{i0}$ :

$$\delta_{i0} = \text{angle de } [V_i e^{j\theta_i} + (R_{si} + jX_{qi})] I_{Gi} e^{j\gamma_i} \tag{IV.15}$$

3. Calcul des vecteurs  $I_{di}$ ,  $I_{qi}$ ,  $V_{di}$  et  $V_{qi}$  pour chacune des machines :

$$I_{di} + jI_{qi} = I_{Gi} e^{j(\gamma_i - \delta_i + \frac{\pi}{2})} \tag{IV.16}$$

$$V_{di} + jV_{qi} = V_i e^{j(\theta_i - \delta_i + \frac{\pi}{2})} \tag{IV.17}$$



4. Calcul des tensions  $E'_{di}$  de l'équation:

$$E'_{di} = V_{di} + R_{si}I_{di} - X'_{qi}I_{qi} \quad (IV.18)$$

5. Calcul des tensions  $E'_{qi}$  de l'équation:

$$E'_{qi} = V_{qi} + R_{si}I_{qi} + X'_{di}I_{di} \quad (IV.19)$$

6. Calcul de  $E_{fdi}$  en utilisant l'expression :

$$E_{fdi} = E'_{qi} + (X_{di} - X'_{di})I_{di} \quad (IV.20)$$

7. Calcul de  $V_{Ri}$ ,  $R_{fi}$  et  $V_{refi}$  de l'équation:

$$V_{Ri} = (k_{Ei} + S_{Ei}(E_{fdi})) E_{fdi} \quad (IV.21)$$

$$R_{fi} = \frac{k_{fi}}{T_{fi}} E_{fdi} \quad (IV.22)$$

$$V_{refi} = V_i + \frac{V_{Ri}}{k_{Ai}} \quad (IV.23)$$

8. Finalement, il est possible de calculer :

$$T_{mi} = E'_{di}I_{di} + E'_{qi}I_{qi} + (X'_{qi} - X'_{di})I_{di}I_{qi} \quad (IV.24)$$

De ces valeurs, les vecteurs d'état sont formulés avec la structure suivante :

$$x = [E'_q \ E'_d \ \delta \ V \ \omega \ E_{fd} \ R_f \ V_R]$$

$$y = [I_d \ I_q \ V \ \theta]$$

$$u = [\omega_0 \ V_{refi} \ T_m]$$

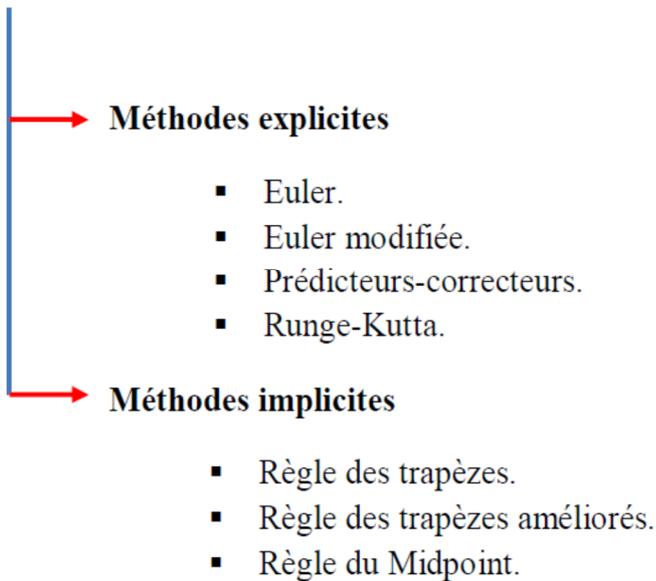
Où  $\omega_0$  est la vitesse synchrone avant le défaut. Les autres variables d'état proviennent des calculs préliminaires (1 à 8) et de l'information de l'écoulement de puissance.

De plus, il convient de calculer à l'avance les coefficients des équations différentielles de la (IV.3) à la (IV.9) sous forme matricielle. Pour la programmation, ces valeurs constantes sont reliées dans une matrice de 16 colonnes, où la ligne  $i$  contient l'information pour la machine  $i$ . À la différence du modèle classique, les réactances transitoires  $X'_d$  ne sont pas additionnées aux matrices d'admittance d'avant, de pendant et d'après le défaut. Les processus de définition du défaut et de réduction de Kron se réalisent de la même façon que pour le modèle classique.

## IV.6 Méthode d'intégration pour résolution des équations différentielles

Pour résoudre le système d'équation différentielle, Il existe deux classes de méthode d'intégration que l'on peut utiliser:

### Méthodes Indirectes



#### IV.6.1 Les méthodes explicites

Pour les algorithmes explicites, chaque équation différentielle, après application d'une Formule d'intégration, est résolue individuellement.

#### IV.6.2 Les méthodes implicites [50]

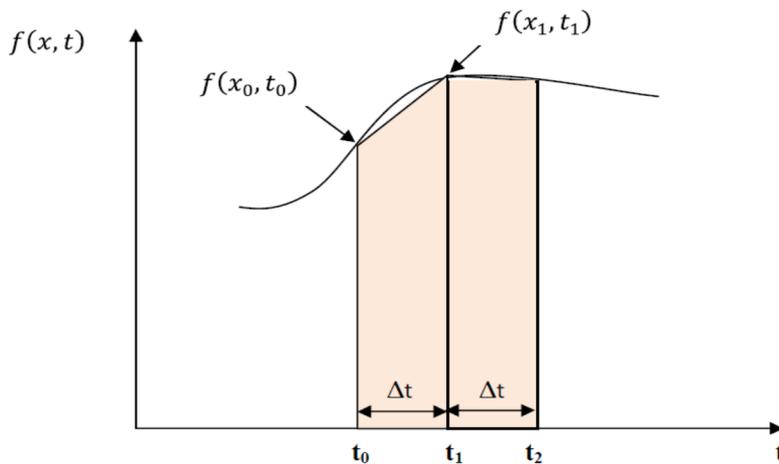
Pour les algorithmes implicites, le système d'équations différentielles est transformé en un System d'équation algébrique DAE par discrétisation puis résolu dans sa globalité.

##### ➤ Règle des trapèzes :

La méthode d'intégration implicite la plus simple est celle de règle de trapézoïdal qui emploie l'interpolation des fonctions sous l'intégrale [15]

Considère l'équation différentielle suivante : avec : La solution de a peut être exprime en forme d'intégrale :

$$x_1 = x_0 + \int_{t_0}^{t_1} f(x, t) dt \quad (IV.25)$$



**Figure IV.4** Interpolation linéaire par un trapèze

La règle de trapèze emploie l'interpolation linéaire, suivant les indications de la figure (IV.4) Ceci implique que le secteur sous l'intégrale est rapproché par des trapèzes. La règle trapézoïdale de l'équation différentielle est :

$$x_1 = x_0 + \frac{\Delta t}{2} [f(x_0, t_0) + f(x_1, t_1)] \tag{IV.26}$$

Formule générale de  $x$  pour  $t = t_{n+1}$  est :

$$x_{n+1} = x_n + \frac{\Delta t}{2} [f(x_n, t_n) + f(x_{n+1}, t_{n+1})] \tag{IV.27}$$

### IV.7 Formulation et résolution des équations différentielles – méthode implicite

Pour résoudre les EDA avec la méthode implicite, le système d'équations différentielles est intégré, afin d'obtenir une approximation numérique de la solution des équations  $f(x, y)$  .

Cette solution reliée aux équations algébriques  $g(x, y)$  constitue un nouveau groupe d'équations non linéaires. Encore une fois, la plus grande difficulté est de calculer la matrice Jacobienne de  $f$  et  $g$  par rapport aux variables d'état

$$x = [E'_q \ E'_d \ \delta \ V \ \omega \ E_{fd} \ R_f \ V_R] \text{ et } y = [I_d \ I_q \ V \ \theta] \tag{IV.28}$$

Pour le cas où les méthodes trapézoïdales et Newton Raphson sont utilisées pour trouver la solution du groupe d'équations, les étapes de calcul sont formulées comme suit [51]:

1. Estimer  $x_{t+h}$  avec l'expression:

$$x_{t+h} = x_t + hf(x_t, y_t) \tag{IV.29}$$



Avec cette valeur, une première estimation de  $f(x_{t+h}, y_{t+h})$  est faite.

2. La méthode trapézoïdale implicite, formulée par l'équation (IV.27), est appliquée au Système d'équations différentielles  $\dot{x} = f(x, y)$  comme suit:

$$x_{t+h} = x_t + \frac{h}{2} [f(x_{t+h}, y_{t+h}) + f(x_t, y_t)] \tag{IV.30}$$

$$0 = g(x_{t+h}, y_{t+h}) \tag{IV.31}$$

Pour la première itération  $x_t = x_0$  et  $y_t = y_0$ . En appliquant la méthode de Newton

Raphson aux équations (IV.30) et (IV.31) :

$$\begin{bmatrix} x_{t+h}^{(k+1)} \\ y_{t+h}^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_{t+h}^{(k)} \\ y_{t+h}^{(k)} \end{bmatrix} - [J^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} F^{(k)} \\ G^{(k)} \end{bmatrix} \tag{IV.32}$$

Où :

$$F^{(k)} = x_t - x_{t+h}^{(k)} + \frac{h}{2} [f(x_{t+h}^{(k)}, y_{t+h}^{(k)}) + f(x_t, y_t)] \tag{IV.33}$$

$$G^{(k)} = g(x_{t+h}^{(k)}, y_{t+h}^{(k)}) \tag{IV.34}$$

La matrice Jacobienne est donnée par l'expression ci-dessous

$$[J^{(k)}] = \begin{bmatrix} -I + \frac{h}{2} \frac{df}{dx} & \frac{h}{2} \frac{df}{dy} \\ \frac{dg}{dx} & \frac{dg}{dy} \end{bmatrix}_{\substack{x=x_{t+h}^{(k)} \\ y=y_{t+h}^{(k)}}} \tag{IV.35}$$

Les dimensions ainsi que la structure de la matrice Jacobienne sont représentées à la Figure (IV.5). Les équations qui la composent sont plus amplement détaillées à l'Annexe B. Pour un réseau, avec  $m$  générateurs, la matrice Jacobienne possède des dimensions  $7m+4m$ . La plupart des coefficients de cette matrice sont nuls. Par conséquent, il convient d'y appliquer des techniques de matrices creuses.

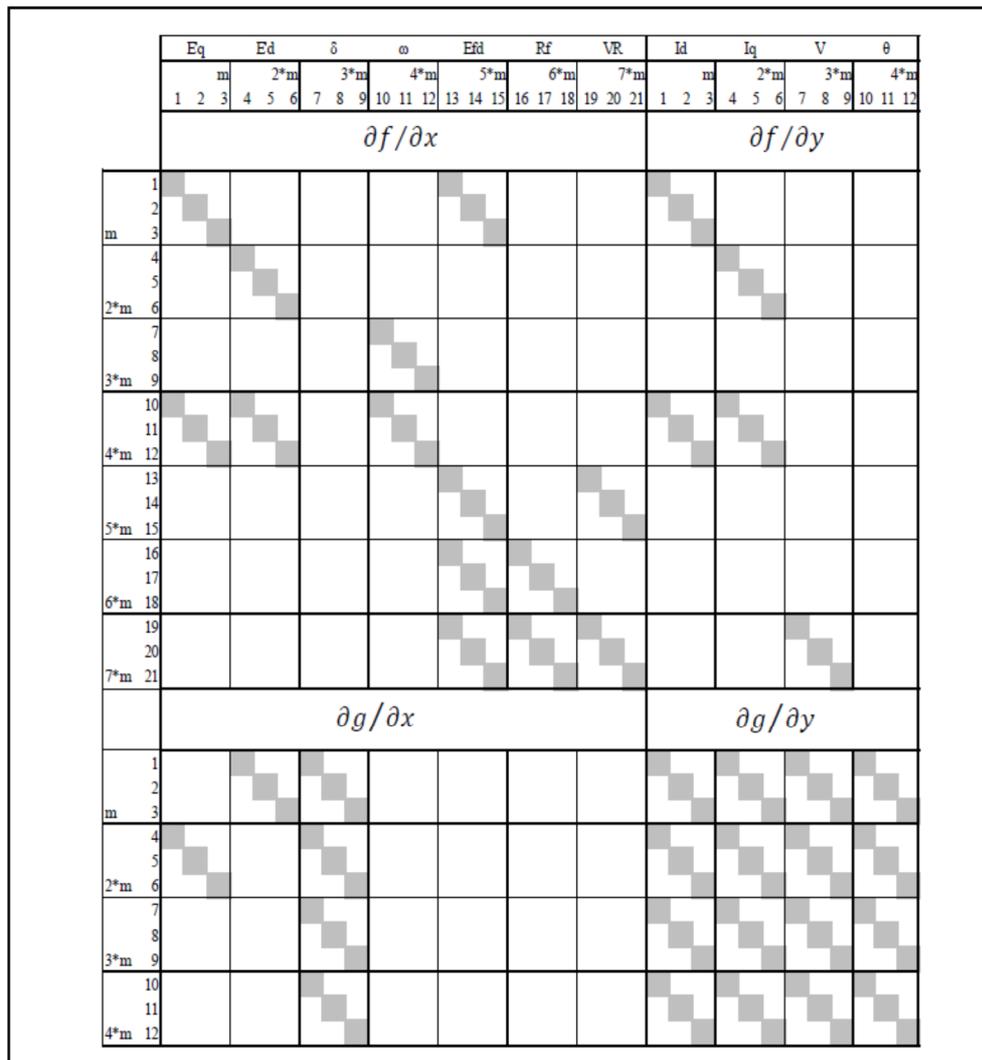


Figure IV.5 Structure de la matrice Jacobienne - méthode implicite

3. Les valeurs des vecteurs d'état sont calculées jusqu'au moment où les vecteurs d'état  $x$  et  $y$  Atteignent le niveau de précision défini par l'utilisateur.

Le processus se poursuit jusqu'au moment où la fin de la simulation arrive  $t_k \geq t_e$ .

Algorithme de stabilité transitoire – modèle détaillé).

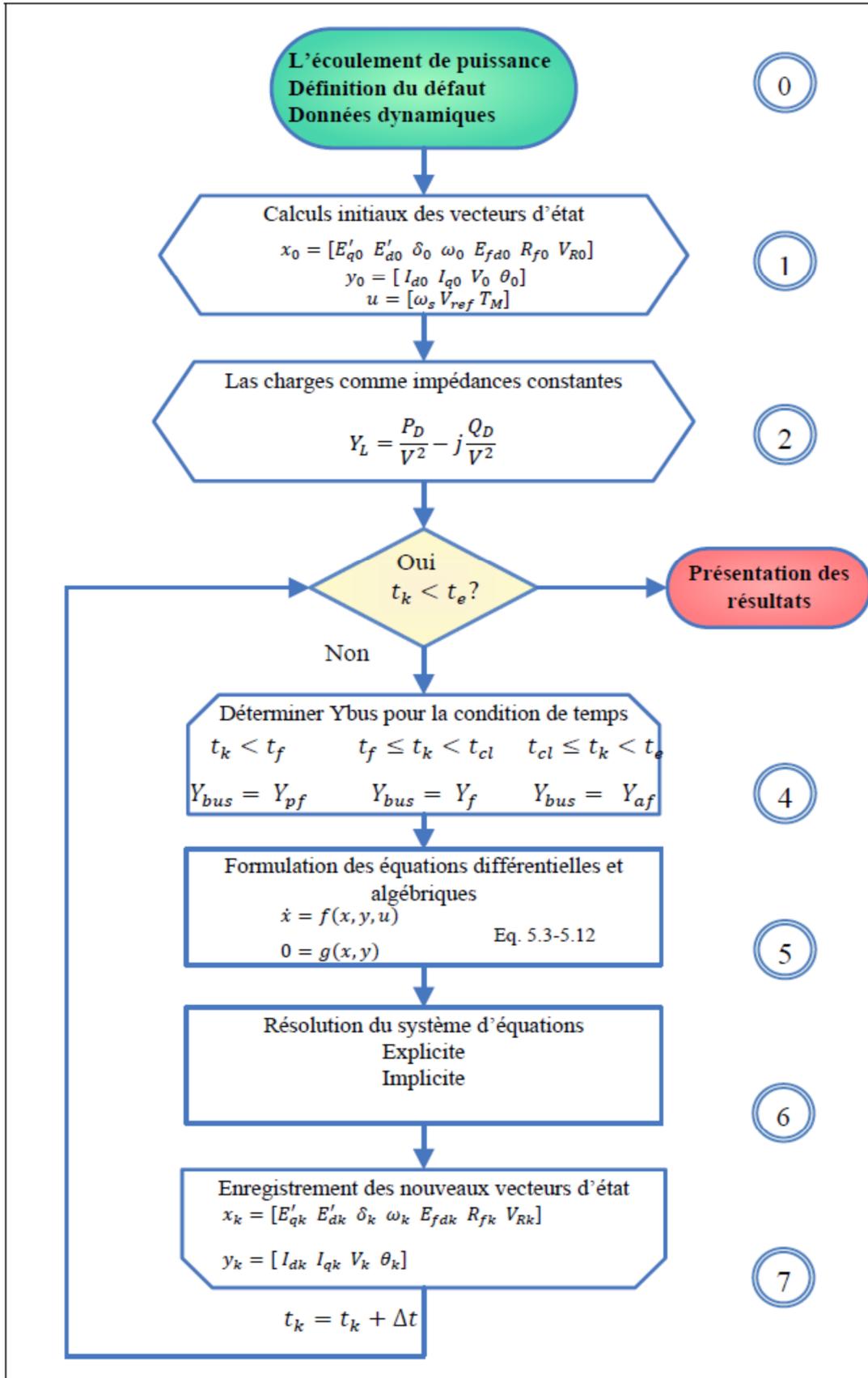


Figure IV.6 Algorithme de stabilité transitoire – modèle détaillé.



## IV.8 Algorithme d'évaluation de la stabilité transitoire

L'analyse de la stabilité transitoire est préoccupée par le comportement du réseau suite à une perturbation importante. L'objectif principal de cette analyse est de déterminer si toutes les machines restent en synchronisme. Un deuxième objectif est de déterminer si les niveaux de tension des nœuds restent dans des marges acceptables. Ces niveaux de tension doivent être déterminés à chaque pas d'intégration. La sortie de cette simulation comprend les trajectoires des angles internes des machines synchrones, des fréquences rotorique et les tensions aux différents nœuds en fonction du temps.

L'analyse suit la procédure suivante :

### IV.8.1 Calcul matrice admittance du réseau ( $Y_{bus}$ ).

La première étape dans les études de la stabilité transitoire est le calcul de la matrice admittance du réseau ( $Y_{bus}$ ).

### IV.8.2 Calcul d'écoulement de puissance

Après le calcul de  $Y_{bus}$  en passe au calcul de l'écoulement de puissance en état stable avec la méthode de Newton-Raphson.

### IV.8.3 Calcul des conditions initiales

Après le calcul de l'écoulement de puissance en passe au calcul des conditions initiales des différentes machines (II.88)-(II.99), ces solutions déterminent l'état d'équilibre des machines synchrones par rapport à la topologie du réseau.

### IV.8.4 Introduction des données relative au problème de la stabilité transitoire

- Données des machines
- Données des régulateurs de tension
- Nature du défaut (triphase pour notre étude)
- Temps d'élimination du défaut  $t_e$
- Temps maximum de simulation  $t_{max}$

### IV.8.5 Calculs préliminaires à effectuer

- Conversion des charges en admittance équivalentes.
- Calcul des matrices admittances du réseau pendant et après le défaut.

### IV.8.6 Résolution du système d'équation différentielle et algébrique (DAE) pendant le défaut

Les équations différentielles (II.33)-(II.39) et algébriques (II.46)-(II.51) sont résolues

Simultanément par l'utilisation d'une méthode itérative (Newton-Raphson).

La résolution de toutes les équations algébriques (variables d'états, les tensions et les courants) se fait dans le même processus itératif. Le processus de calcul est répété pour chaque pas d'intégration jusqu'au temps maximal d'intégration. Les résultats obtenus pour le pas d'intégration précédant sont utilisés comme solution initiale pour le prochain pas d'intégrations.

#### IV.8.7 Détermination du temps critique d'élimination du défaut

Pour des temps d'élimination de défauts successifs  $t_e$ , le système d'équation différentielles et algébriques est résolu pendant et après l'élimination du défaut. À chaque fois, nous analysons les courbes des angles rotoriques. Si la différence entre les angles rotoriques par rapport à une référence (machine 1 pour notre cas) atteint un maximum et diminue et revient à leur état stable par la suite, alors le système est stable pour le  $t_e$  choisi. Si la différence entre les angles continue à augmenter dans le temps, alors les générateurs correspondants vont perdre le synchronisme et le système est instable. Après plusieurs simulations, le temps critique d'élimination du défaut CCT est déterminé.

#### IV.8.8 Affichage des résultats

##### Exemple d'application réseau 3 machines 9 barres – WSCC

Ce cas d'étude est amplement utilisé dans les études de stabilité. Il comporte trois générateurs, trois charges, neuf barres, six lignes et trois transformateurs. La figure (IV.7) montre la configuration de ce réseau. Les données nécessaires pour la simulation sont décrites à l'Annexe A et l'Annexe B.

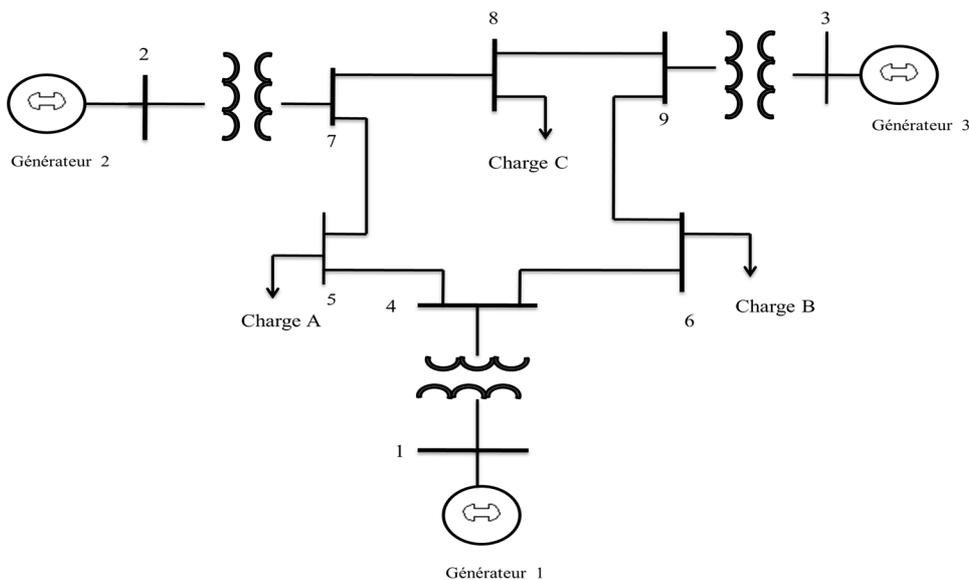
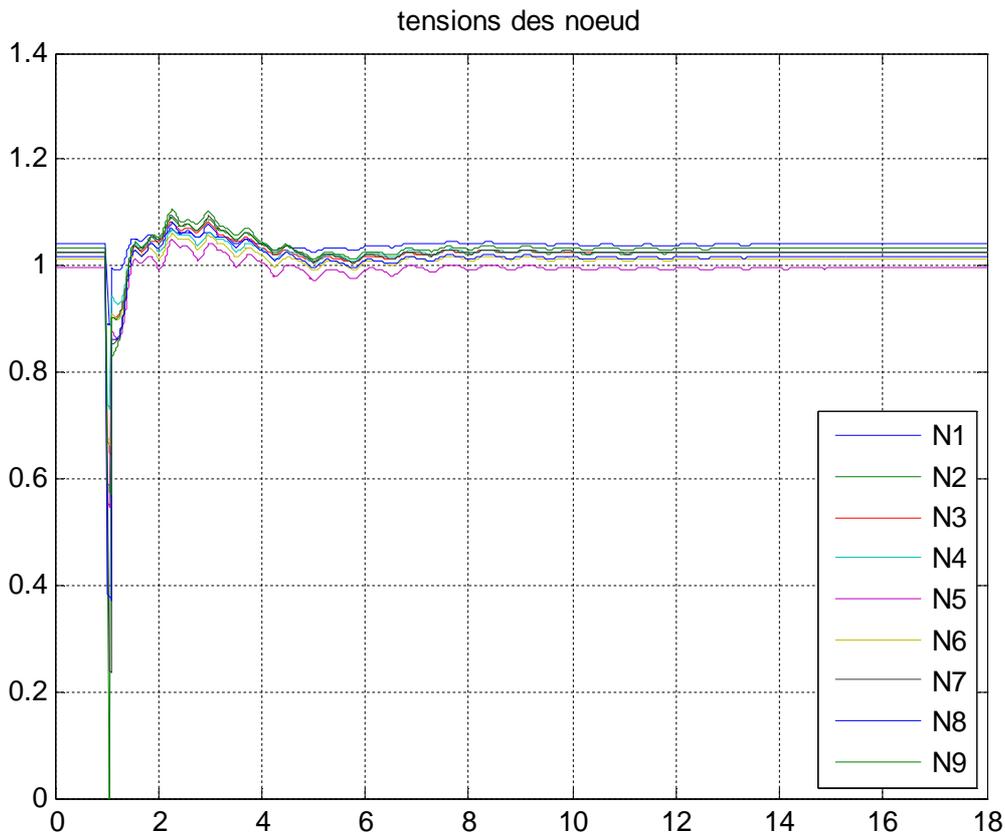


Figure IV.7 Réseau IEEE 9 nœuds 3 machines - défaut au nœud 9.



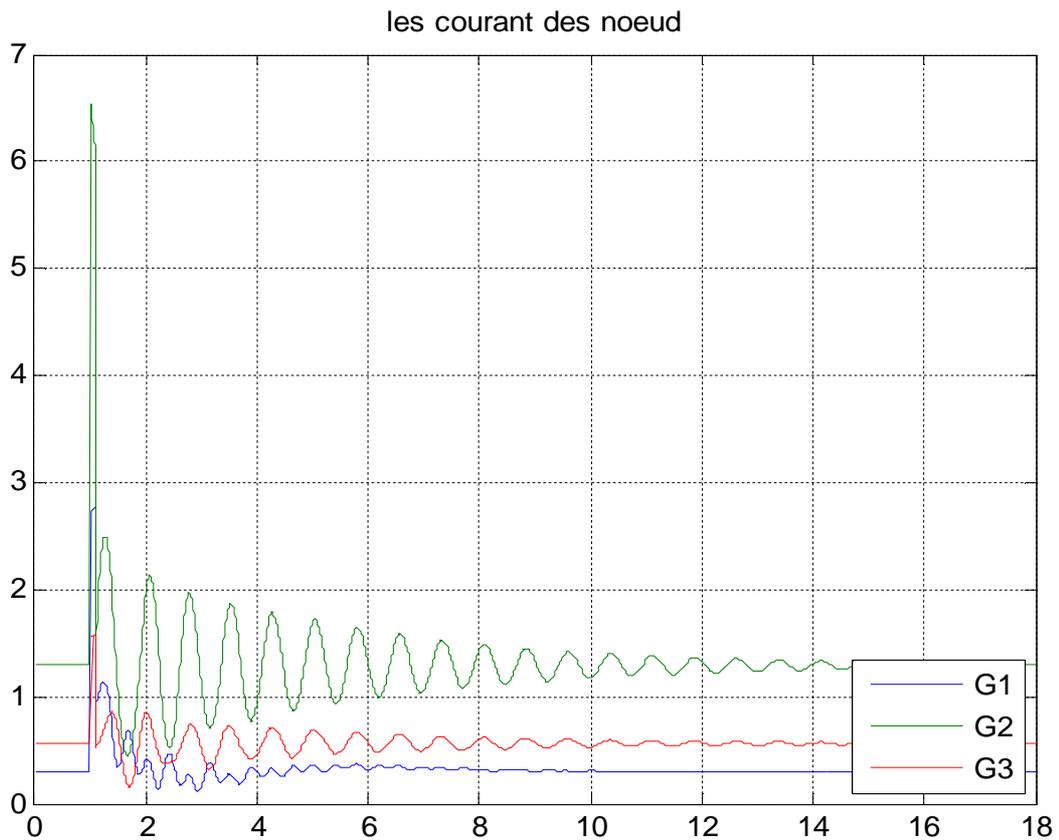
**Figure IV.8** les résultats des tensions d'un défaut proche de nœud 2

D'après les résultats de simulation, on remarque 3 phases différentes :

- Phase avant le défaut.
- Phase pendant le défaut.
- Phase après élimination de défaut.

La figure (IV.8) illustre les tensions terminales des nœuds pour un système stable.

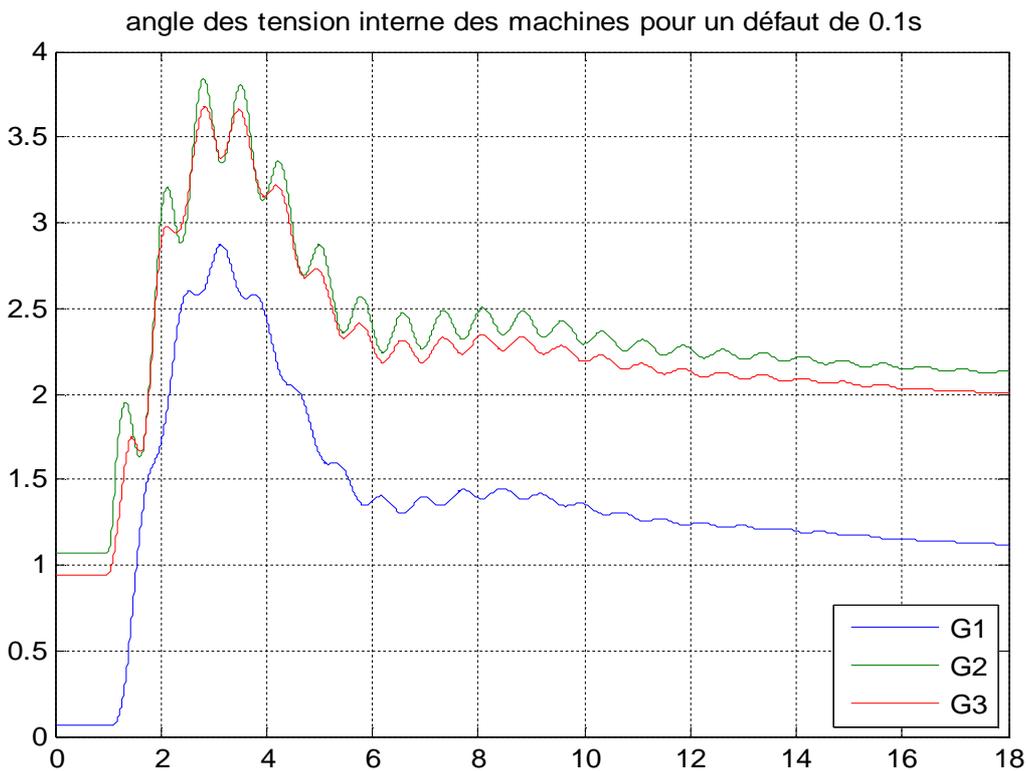
- Pendant la phase avant défaut, les tensions gardent leurs valeurs constantes.
- Dès l'apparition du défaut, toutes les tensions diminuent et prennent des valeurs très basses avec des petites oscillations jusqu'à  $t_e$ .
- Après élimination du défaut, toutes les tensions augmentent avec des petites oscillations jusqu'à ce qu'elles retournent à leurs valeurs d'état initial.



**Figure IV.9** les résultats des courants d'un défaut proche de nœud 2

La figure (IV.9) illustre les courants terminaux des nœuds pour un système stable.

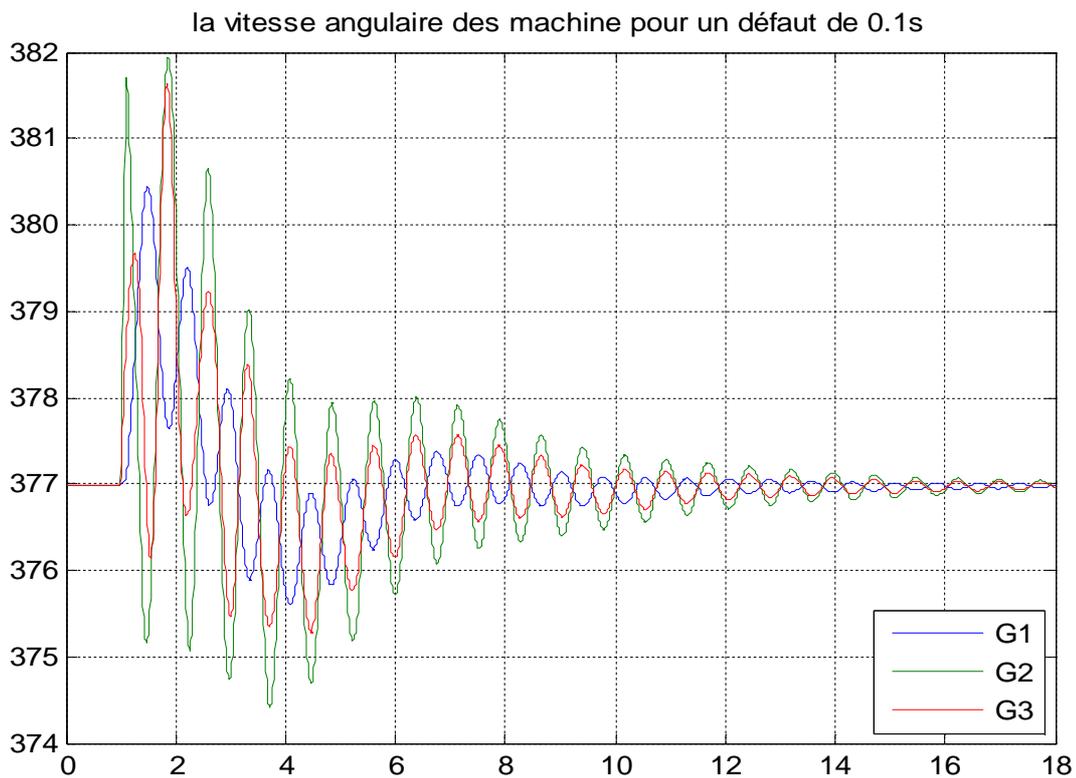
- Pendant la phase avant défaut, les courants terminaux des nœuds gardent leurs valeurs constantes.
- Dès l'apparition du défaut, toutes les courants augmentent et prennent des valeurs très grand avec grands oscillations jusqu'a te.
- Après élimination du défaut, tous les courants diminuent avec des petites oscillations jusqu'a ce qu'elles retournent à leurs valeurs d'état initial.



**Figure IV.10** les résultats les différences des angles internes d'un défaut proche de nœud 2

La figure (IV.10) illustre les différences des angles internes par rapport au centre d'angle des générateurs pour un système stable.

- Pendant la phase avant défaut, les différences des angles internes gardent leurs valeurs constantes.
- Dès l'apparition du défaut, on remarque que les différences des angles internes augmentent jusqu'à un certain point.
- Après élimination du défaut, on remarque que les différences des angles internes oscillent autour de leurs points initiaux afin de retrouver l'état initial.



**Figure IV.11** les résultats les vitesses des générateurs d'un défaut proche de nœud 2

La figure (IV.11) illustre les vitesses des générateurs pour un système stable.

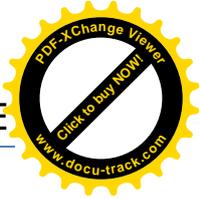
- Pendant la phase avant défaut, les vitesses gardent leurs valeurs constantes.
- Dès l'apparition du défaut, en remarque que les vitesses augmentent jusqu'a te.
- Après élimination du défaut, en remarque que les vitesses oscillant autour de leurs point initial a fin de retrouver l'état initial.

## IV.9 Conclusion

Ce chapitre à porte sur la présentation des modèles détaillée de différents éléments du réseau d'énergie électrique pour l'étude de la stabilité transitoire avec certaines approximations des équations générales. Ces modèles traduits sous la forme mathématique de systèmes d'équations nous permettrons de faire l'étude de l'évolution de la stabilité transitoire par des méthodes d'intégration numérique (la règle de trapèze), ce qui sera discute dans le chapitre qui suit a travers des simulations sur des exemples de réseau électrique.



**CONCLUSION GENERALE**



L'étude de la stabilité transitoire des réseaux de transport d'énergie électrique constitue un sujet important pour la planification et l'exploitation des réseaux, comme nous avons pu le constater tout le long de ce mémoire.

Notre travail de recherche a été consacré à la méthode de l'évaluation de la stabilité transitoire et nous avons proposé un programme comprenant les modèles classique et détaillé de la machine synchrone, ceux la sont utilisés pour simuler leur comportement dynamique suite à une perturbation.

Le programme, développé en Matlab®, est logiquement structuré et documenté afin de faciliter sa compréhension et les futures modifications et adaptations. De plus, plusieurs outils ont été utilisés afin d'augmenter la vitesse d'exécution et sauvegarder l'espace mémoire des ordinateurs : la réduction de Kron, les techniques pour les matrices creuses, les techniques d'intégration à pas de temps variable, etc.

Nous avons également utilisé la méthode basée sur le critère d'égalités des aires pour l'étude d'évaluation de la stabilité transitoire de système mono-machine.

Un outil mathématique puissant, dénommé le critère d'égalités des aires, se basant sur l'énergie emmagasinée et l'énergie dissipée par le rotor permet de prédire la stabilité et l'instabilité du réseau.

Pour appliquer le critère d'égalités des aires, le réseau aussi grand qu'il soit, est converti en un réseau mono machine appelé OMIB. Pour ce faire, les machines sont divisées en deux groupes : les machines critiques et les machines non critiques.

Après avoir rappelé les différentes méthodes utilisées dans la littérature pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique, nous avons présenté la problématique de modélisation des réseaux d'énergie électrique pour les études de la stabilité transitoire. L'avantage de la méthode d'intégration numérique est la possibilité d'inclure des modèles détaillés des différents composants du réseau ainsi que le système de régulation a en général un grand effet pour assurer la stabilité du système, et par suite, cette méthode fournit des résultats précis sur la stabilité transitoire.

Pour valider le programme élaboré, nous avons fait plusieurs exécutions sur le réseau étudié, Plusieurs cas ont été considérés selon le type de défaut de court circuit à savoir le temps, la position et la charge.

Nous avons constaté que le système influencé par quelques défauts par rapport à un autre, à titre exemple la position de court circuit dans le système provoque l'isolement d'un des groupes de générateurs.



Les résultats de simulations nous ont permis aussi de déduire que les méthodes d'intégration numérique pour l'évaluation de la stabilité transitoire nécessitent plusieurs simulations pour la détermination du temps critique d'élimination du défaut. Le temps de calcul est alors important, ce qui en fait un obstacle pour l'application de cette méthode en temps réel. Cet obstacle a poussé les recherches vers d'autres alternatives pour l'évaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique d'une façon plus rapide et offrant la possibilité de mesurer le degré de stabilité.

Il apparaît dans ce travail l'importance de la simulation, pour que les chercheurs qui utiliseront ces outils puissent avoir un aperçu sur la façon dont réagit un réseau en modifiant les paramètres de celui-ci. N'ayant plus à faire tous les calculs, il leur sera plus aisé de travailler sur de grands réseaux, et avoir un résultat rapide qui leur permettra d'arriver à faire leur propres conclusions.

Ce travail n'est pas une fin en soi, il peut et doit être encore largement amélioré, les éléments qui peuvent lui être adjoints sont :

- L'implémentation des études sur les réseaux de neurones ou algorithmes génétiques appliqués aux réseaux électriques
- Introduire la méthode SIME qui allie un programme du domaine du temps et le CAE constitue un outil très intéressant pour l'étude de la stabilité
- L'analyse des harmoniques

Et tout ceci sera facilement réalisable par l'utilisation des logicielles commerciales, la programmation sur Matlab et le code source qui est fourni à tous les utilisateurs pour qu'ils puissent implémenter leurs propres idées.



**Annexes**



## Annexe A : Réseau d'étude (*IEEE 09-BUS (WSCC)*)

### A.1 Les paramètres des générateurs

BUS	PG	QG	Q MAX	Q MIN	VG	P MAX
	MW	MVAR	MVAR	MVAR	[pu]	MW
1	71,64102	27,04592	300	-300	1,04	250
2	163	6,65366	300	-300	1,025	300
3	85	-10,8597	300	-300	1,025	270

Paramètres	GEN 1	GEN 2	GEN 3
$r_a$ (p.u)	0.0	0.0	0.0
$X_d$ (p.u)	0.0608	0.1198	0.1813
H(p.u)	23.64	6.4	3.01
$T_{d0}$ (s)	10.960	6.0000	5.89
$T_q$ (s)	0.0	0.535	0.60
$X_q$ (p.u)	0.0969	0.8645	1.2578
$X_d$ (p.u)	0.01460	0.8958	1.3125
D(p.u)	0.0	0.07	0.05

### A.2 les paramètres des lignes du réseau de transport

BUS	TYPE	PD	QD	GS	BS	VM	VA	BASE
		MW	MVAR	MW	MVAR	[pu]	[degrés]	[kV]
1	3	0	0	0	0	1.0400	0.0000	345
2	2	0	0	0	0	1.0250	9.2800	345
3	2	0	0	0	0	1.0250	4.6648	345
4	1	0	0	0	0	1.0258	-2.2168	345
5	1	125	50	0	0	0.9956	-3.9888	345
6	1	90	30	0	0	1.0127	-3.6874	345
7	1	0	0	0	0	1.0258	3.7197	345
8	1	100	35	0	0	1.0159	0.7275	345
9	1	0	0	0	0	1.0324	1.9667	345



BARRE		R	X	B	
F_BUS	t_BUS	[pu]	[pu]	[pu]	
1	4	0	0.0576	0	1.0000
4	6	0.017	0.092	0.158	1.0000
6	9	0.039	0.17	0.358	1.0000
3	9	0	0.0586	0	0.940
9	8	0.0119	0.1008	0.209	1.0000
7	8	0.0085	0.072	0.149	1.0000
2	7	0	0.0625	0	0.921
7	5	0.032	0.161	0.306	1.0000
5	4	0.01	0.085	0.176	1.0000

### A.3 Données des régulateurs de tension (Tirée de Pai, Sen Gupta et al. (2005, p. 269))

Données des régulateurs de tension				
Générateur		1	2	3
$K_A$	Pu	20	20	20
$T_A$	Pu	0.2	0.2	0.2
$K_E$	Pu	1	1	1
$T_E$	Pu	0.314	0.314	0.314
$K_F$	Pu	0.063	0.063	0.063
TF	Pu	0.35	0.35	0.35
$S_E(E_{fd})$		$0.0039 * e^{1.555 * E_{fd}}$		

## Annexe B : EVALUATION DU JACOBIEN – MODÈLE DÉTAILLÉ

Tableau-B .1- Formation de la sous matrice J1 :

	$E'_q$	$E'_d$	$\delta$	$\omega$	$E_{fd}$	$R_f$	$V_R$
$\frac{df_1}{dx}$	$1 + \frac{h}{2 * T d'_0(i)}$	0	0	0	$\frac{-h}{2 * T d'_0(i)}$	0	0
$\frac{df_2}{dx}$	0	$1 + \frac{h}{2 * T q'_0(i)}$	0	0	0	0	0
$\frac{df_3}{dx}$	0	0	1	$\frac{-h}{2}$	0	0	0
$\frac{df_4}{dx}$	$\frac{h * I_q(i)}{2 * M(i)}$	$\frac{h * I_d(i)}{2 * M(i)}$	0	$1 + \frac{h * D(i)}{2 * M(i)}$	0	0	0
$\frac{df_5}{dx}$	0	0	0	0	$1 + \frac{h * KE(i)}{2 * T_E(i)} + \frac{h * SE(i)}{2 * T_E(i)}$	0	$\frac{-h}{2 * T_E(i)}$
$\frac{df_6}{dx}$	0	0	0	0	$\frac{-h * KF(i)}{2 * T_F(i)^2}$	$1 + \frac{h}{2 * T_F(i)}$	0
$\frac{df_7}{dx}$	0	0	0	0	$\frac{h * KA(i) * KF(i)}{2 * TA(i) * TF(i)}$	$\frac{-h * KA(i)}{2 * TA(i)}$	$1 + \frac{h}{2 * TA(i)}$

Tableau-B .2- Formation de la sous matrice J2 :

	$I_d(i)$	$I_q(i)$
$\frac{df_1}{dx}$	$\frac{h * (X_d(i) - X'_d(i))}{2 * T'_{d0}(i)}$	0
$\frac{df_2}{dx}$	0	$\frac{-h * (X_q(i) - X'_q(i))}{2 * T'_{q0}(i)}$
$\frac{df_3}{dx}$	0	0
$\frac{df_4}{dx}$	$\frac{h}{2 * M(i)} * (E'_d(i) + X'_q(i) - X'_d(i)) * I_q(i)$	$\frac{h}{2 * M(i)} * (E'_q(i) + X'_q(i) - X'_d(i)) * I_d(i)$
$\frac{df_5}{dx}$	0	0
$\frac{df_6}{dx}$	0	0
$\frac{df_7}{dx}$	0	0

**Tableau-B .3- Formation de la sous matrice (J3):**

	$V(i)$	$\theta(i)$
$\frac{df_1}{dx}$	0	0
$\frac{df_2}{dx}$	0	0
$\frac{df_3}{dx}$	0	0
$\frac{df_4}{dx}$	0	0
$\frac{df_5}{dx}$	0	0
$\frac{df_6}{dx}$	0	0
$\frac{df_7}{dx}$	$\frac{h * KA(i)}{2 * TA(i)}$	0

**Tableau-B .4- Formation de la sous matrice (J4):**

	$E'_q$	$E'_d$	$\delta$	$\omega$	$E_{fd}$	$R_f$	$V_R$
$\frac{df_{21}}{dx}$	$-X'_q$	$R_s(i)$	$(R_s(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))) - X'_d(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$	0	0	0	0
$\frac{df_{22}}{dx}$	$-R_s(i)$	0	$(-R_s(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))) - X'_d(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$	0	0	0	0

**Tableau-B .5- Formation de la sous matrice (J5):**

	$Id(i)$	$Iq(i)$
$\frac{df_{21}}{dx}$	$R_s^2 + X'_q * X'_d$	0
$\frac{df_{22}}{dx}$	0	$R_s^2 + X'_q * X'_d$

**Tableau-B .6- Formation de la sous matrice (J6):**

	$V(i)$	$\theta(i)$
$\frac{df_{21}}{dx}$	$(R_s(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))) - X'_d(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$	$(-R_s(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))) - X'_d(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$
$\frac{df_{22}}{dx}$	$R_s(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i)) - X'_d(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$	$(R_s(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))) - X'_d(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$

**Tableau-B .7- Formation de la sous matrice (J7):**

	$E'_q$	$E'_d$	$\delta$	$\omega$	$E_{fd}$	$R_f$	$V_R$
$\frac{df_{31}}{dx}$	0	0	$(I_d(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))) - I_q(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$	0	0	0	0
$\frac{df_{32}}{dx}$	0	0	$(-I_d(i) * V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))) - I_q(i) * V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$	0	0	0	0

**Tableau-B .8- Formation de la sous matrice (J8):**

	$I_d(i)$	$I_q(i)$
$\frac{df_{31}}{dx}$	$V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$	$V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$
$\frac{df_{32}}{dx}$	$V(i) * \cos(\delta(i) - \theta(i))$	$-V(i) * \sin(\delta(i) - \theta(i))$

**Formation de la sous matrice (J9):**

La matrice J9 est une matrice de dimension (2N\*2N), elle est composée de 4 sous matrice J91, J92, J93, J94, les dimensions des sous matrices sont les même (N, N).

N : nombre de nœuds.

$$J9 = \begin{bmatrix} J91 & J92 \\ J93 & J94 \end{bmatrix}$$

Formation de la sous matrice J91 :

$$J91 = \begin{bmatrix} \frac{dF_{31}(1)}{dV_1} & \dots & \frac{dF_{31}(1)}{dV_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{31}(N)}{dV_1} & \dots & \frac{dF_{31}(N)}{dV_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{11} & \dots & L_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_{N1} & \dots & L_{NN} \end{bmatrix}$$

Les éléments  $L_{ij}$  sont les dérivées partielles de F31 par rapport aux modules des tensions des nœuds  $|V_j|$ .

Pour  $i=1 \dots m \quad i \neq j$

$$L_{ij} = [-V_i * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i= m+1 \dots N$

$$L_{ij} = [-V_j * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i=1 \dots m \quad i = j$ :

$$L_{ii} = |I_{di} \sin(\delta_i - \theta_i) + I_{qi} \cos(\delta_i - \theta_i) + 2 * G_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})|$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$L_{ii} = [2 * G_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Formation de la sous matrice J92 :

$$J92 = \begin{bmatrix} \frac{dF_{31}(1)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{31}(1)}{d\theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{31}(N)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{31}(N)}{d\theta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_{11} & \dots & E_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{N1} & \dots & E_{NN} \end{bmatrix}$$

Les éléments  $E_{ij}$  sont les dérivées partielles de F31 par rapport aux déphasages des tensions des nœuds  $\theta_j$ .

Pour  $i = 1 \dots m \quad i \neq j$

$$E_{ij} = [-V_i * V_j * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$E_{ij} = [-V_j * V_i * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = 1 \dots m \quad i = j$ :

$$E_{ii} = |I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) + I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) + 2 * G_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})|$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$E_{ii} = [2 * G_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Formation de la sous matrice J93 :

$$J93 = \begin{bmatrix} \frac{dF_{32}(1)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{32}(1)}{d\theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{32}(N)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{32}(N)}{d\theta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & \dots & M_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ M_{N1} & \dots & M_{NN} \end{bmatrix}$$

Les éléments  $M_{ij}$  sont les dérivées partielles de F32 par rapport aux modules des tensions des nœuds  $|V_j|$ .

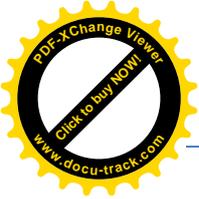
Pour  $i = 1 \dots m \quad i \neq j$

$$M_{ij} = [-V_i * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$M_{ij} = [-V_j * Y_{ij} * \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = 1 \dots m \quad i = j$ :



$$M_{ii} = |I_{di} \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{qi} \sin(\delta_i - \theta_i) + 2 * B_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})|$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$M_{ii} = 2 * B_{Li} V_i - \sum_{j=1}^N V_j Y_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})$$

Formation de la sous matrice J94 :

$$J94 = \begin{bmatrix} \frac{dF_{32}(1)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{32}(1)}{d\theta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{dF_{32}(N)}{d\theta_1} & \dots & \frac{dF_{32}(N)}{d\theta_N} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} O_{11} & \dots & O_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ O_{N1} & \dots & O_{NN} \end{bmatrix}$$

Les éléments  $O_{ij}$  sont les dérivées partielles de  $F_{32}$  par rapport aux déphasages des tensions des nœuds  $\theta_j$ .

Pour  $i = 1 \dots m \quad i \neq j$

$$O_{ij} = [-V_i * V_j * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$O_{ij} = [V_i * V_j * Y_{ij} * \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})]$$

Pour  $i = 1 \dots m \quad i = j$  :

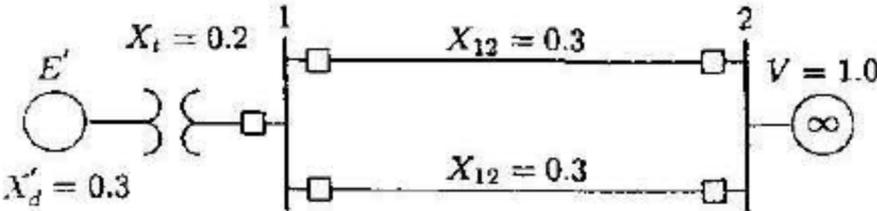
$$O_{ii} = |I_{di} V_i \cos(\delta_i - \theta_i) - I_{qi} V_i \sin(\delta_i - \theta_i) - \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})|$$

Pour  $i = m+1 \dots N$

$$O_{ii} = - \sum_{j=1}^N V_i V_j Y_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j - \alpha_{ij})$$

**Annexe C :**

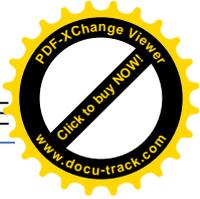
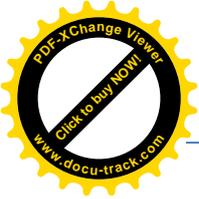
Un générateur synchrone connecté à un bus infini comme le montre la figure (c.1) est caractériser par les paramètres donnée dans le tableau (c .1) :



symbols	nom	valeur
f	fréquence	60 Hz
H	Constante d'inertie	9,94 MJ/MVA
Pe	L'énergie	0,6 p.u
PH	facteur de puissance	0.8
V	La tension	1p.u
X	la réactance de transfert	0.65 p.u
E'	Tension interne	1.35 p.u



**REFERENCES**



- [01] Richard G. Farmer Arizona State University Power System Dynamics and Stability
- [02] S.M. Sadeghzadeh, M. Ehsan, N. Hadj Said et al, "Improvement of Transient Stability Limit in Power System Transmission Lines Using Fuzzy Control of FACTS Devices", *IEEE Trans. On Power Systems*, vol. 13, No. 3, pp. 917-922, August 1998.
- [03] Jan Machowski Warsaw University of Technology, Poland Janusz W. Bialek The University of Edinburgh, UK . James R. Bumby Durham University, UK . Second Edition POWER SYSTEM DYNAMICS Stability and Control
- [04] F. Samouhi, "Application de la méthode de Lyapunov a l'aide de la stabilité dynamique de réseaux de transport d'énergie soumis à des perturbations", Thèse de doctorat de l'INPG, 21 Avril 1983.
- [05] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI " Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques" Thèse Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2003.
- [06] F L Alvarado, "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Workbook", volume 2, Final Report, Electric Power Institute, California, USA, June 1989.
- [07] Slimane RAMDANE " Programmation en MATLAB de la Stabilité Transitoire d'une Modélisation Interactive d'un Réseau Electrique par Intégration Numérique" mémoire magister 29 / Juin / 2008
- [08] H Kouara, " Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", Thèse de Magistère, université de Batna, Algérie, février 2006.
- [09] www.tvss.net, "Causes and Effects of Transient Voltages"
- [10] Fouad, A. A. and V. Vittal (1992). Power system transient stability analysis using the transient energy function method. Englewood Cliffs, N.J. Prentice-Hall.
- [11] Yu, G. L., B. H. Zhang, et al. (2008). Wide-Area Measurement Based Nonlinear Global Optimal Control for Power System Stability Enhancement. Developments in Power System Protection, 2008. DPSP 2008. IET 9th International Conference on.
- [12] Nguyen-Duc, H., A. Zerigui, et al. (2011). Power system losses minimization with
- [13] M. Crapp, "Stabilité et sauvegarde des réseaux d'énergie électrique" Bernes science transient stability constraints. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE. publication, LAVOISIER, 2003.
- [14] A. J. Wood et B.F. Wollenberg "Power generation, operation and control", Quinn-Woodbine, New York, 1983.
- [15] P Kundur, "Power System Control and Stability", McGraw-Hill, Inc. New York, 1994.



- [16] Ouali Abdelhamid "Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux électriques par les réseaux de neurones artificiels et les plans d'expériences" Mémoire magister
- [17] M. Crappe, "Stabilité et sauvegarde des réseaux électriques", Hermès Science, PARIS,2003.
- [18] S.M. Sadeghzadeh, "Amélioration de la stabilité transitoire et de l'amortissement des oscillations d'un réseau électrique à l'aide de SMES et de SSSC", Thèse de doctorat de l'INPG 13 Mars 1998.
- [19] Eskandar GHOLIPOUR SHAHRAKI " Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques" Thèse Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2003.
- [20] TECHNOLOGIES DES EQUIPEMENTS
- [21] Valentin Crastan " les réseaux d'énergie électrique 1 "
- [22] Michel Aguet et Jean-Jacques Morf " volume xii énergie électrique "
- [23] Manuel Reta-Hernández Universidad Autónoma de Zacatecas 2006 by Taylor & Francis Group, LLC.
- [24] ] A. Laifa, "Evaluation de la Stabilité de Tension d'un Réseau d'énergie électrique Développement et Application Des Indices De Stabilité ", thèse de Magister, Ecole Nationale polytechnique, 27 juin 1995.
- [25] B.Boussahoua, " Evaluation de la stabilité transitoire des réseaux d'énergie électrique par les méthodes énergétiques ", Thèse de Magister, ENP, Alger, Algérie, 2004.
- [26] M. Pavella et P. G. Murthy, "Transient stability of power systems: theory and practice", Library of congress cataloguing in publication, 1994.
- [27] V Legat " Mathématique et méthodes numériques...ou les aspects facétieux du calcul sur un ordinateur " Notes pour la partie méthodes numériques du cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université catholique de Louvain, 2001.
- [28] P Viot "Modélisation dynamique et Statistique des Systèmes Complexes" Laboratoire de Physique théorique des Liquides, Paris, France, décembre 2007
- [29] L Baghli, " Réalisation d'un Environnement Graphique avec Base de Données pour l'Analyse et la Simulation de Réseaux Electriques ", PFE, ENP Alger, Algérie 1994.
- [30] Hanselman, D. C. and B. Littlefield (2005). Mastering MATLAB 7. Upper Saddle River, N.J., Pearson/Prentice Hall. IEEE, T. F. (1992). "Transient stability test systems for direct stability methods." Power Systems, IEEE Transactions on 7(1): 37-43.
- [31] Champine, L. F., I. Gladwell, et al. (2003). Solving ODEs with MATLAB. Cambridge ;



- New York, Cambridge University Press.
- [32] **O Ouyaba, S Ramdane** "Etude et Analyse de la Stabilité Transitoire d'un Réseau Electrique incluant la Régulation par les Méthodes d'Intégration Numérique. " PFE, département génie électrique UAT, Laghouat, Algérie 2006.
- [33] M. El Hawary et J. Momoh, "Electric Systems, Dynamics, and Stability with Artificial Intelligence Applications", Marcel Dekker 2000.
- [34] Zimmerman, R. D., S. Murillo, et al. (2011). "MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education." *Power Systems, IEEE Transactions on* **26**(1): 12-19.
- [35] Anderson, P. M., A. A. Fouad, et al. (2003). *Power system control and stability*. Piscataway, N.J., IEEE Press ; Wiley-Interscience.
- [36] S.K.Tso et S.P.Cheung, "Fast prediction of transient stability margin in system with SVC control and HVDC link", *IEEE catalogue N°95TH9130*, pp. 456-461, 1995.
- [37] **LOAD-FLOW ANALYSIS IN POWER SYSTEMS** Badrul H. Chowdhury *Professor*  
*Electrical & Computer Engineering Department University of Missouri-Rolla*
- [38] **ELECTRIC POWER SYSTEMS A CONCEPTUAL INTRODUCTION** Alexandra von Meier Sebastopol, California August 2005
- [39] Jean-Claude Gianduzzo Enseignant-Chercheur en physique et électrotechnique à l'université de boreaux 1 " Dunod 2008-Electrotechnique- luc lasne"
- [40] Hasan ALKHATIB ETUDE DE LA STABILITE AUX PETITES PERTURBATIONS DANS LES GRANDS RESEAUX ELECTRIQUES : OPTIMISATION DE L REGULATION PAR UNE METHODE METAHEURISTIQUE Le 5 décembre 2008
- [41] Parks P. C. and Hahn V., *Stabilitätstheorie*, Springer-Verlag, Berlin, 1981.
- [42] Daniel RUIZ VEGA, Mania PAVELLA, « Stabilité transitoire : évaluation et commande » Stabilité et sauvegarde des réseaux électrique pp 51-95.
- [43] A. F. Rahimi, "A generalised equal-area criterion: a method for on line transient stability analysis", *IEEE*, pp. 684-688, 1990
- [44] (Brogan *et al.*, 2000). Brogan W.L., Lee G.K.F., Sage A.P., Kuo B.C., Phillips C.L., M-Harbor R.D., Jacquot R.G., McInroy J.E., Atherton D.P., Bay J.S., Baumann W.T. and Chow Y., *Control Systems, The Electric Engineering Handbook*, CRC Press LLC, Boca Raton, 2000.
- [45] Anderson, P. M., et A. A. Fouad. 1994. *Power system control and stability*, Rev. printin. Coll. « IEEE Press power systems engineering series ». New York: Institute of



- Electrical and Electronics Engineers, xiii, 464 p.
- [46] Pavella, Mania, Damien Ernst et Daniel Ruiz-Vega. 2000. *Transient stability of power systems : a unified approach to assessment and control*. Coll. « Kluwer international series in engineering and computer science SECS 581 ». Boston: Kluwer Academic Publishers, xviii, 237 p.
- [47] Sauer, P. W. and M. A. Pai (1998). *Power system dynamics and stability*. Upper Saddle River, N.J., Prentice-Hall.
- [48] Beaty, H. W. (2001). *Handbook of electric power calculations*. New York, McGraw-Hill.
- Burden, R. L. and J. D. Faires (2005). *Numerical analysis*. Belmont, CA, Thomson Brooks/Cole.
- [49] Padiyar (2008). *Power System Dynamics : Stability and Control*.
- Pai, M. A., D. P. Sen Gupta, et al. (2005). *Small signal analysis of power systems*. Harrow, Angleterre, Alpha Science International.
- [50] B. BUGGIANI, " Parallélisation des calculs de stabilité transitoire des réseaux électrique ", Thèse de doctorat, département d'électricité EPFL, 1995.
- [51] Sauer, P. W., B. C. Lesieutre, et al. (1993). "Maximum loadability and voltage stability in power systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* **15**(3): 145-153.