

17/621.759

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université 8Mai 1945 – Guelma

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrotechnique et Automatique



**Mémoire de fin d'étude  
Pour l'obtention du diplôme de Master Académique**

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Electriques.

---

---

**ANALYSE DE LA STABILITE D'UN RESEAU  
ELECTRIQUE**

---

---

Présenté par :  
**ELBAH MERIEM.  
BRAHIMI ALA.**

Sous la direction de :

**M : GOUAIDIA SAID.**

Jun. 2012





## *Remerciement*

*C'est avec un grand plaisir que nous apportons ce modeste travail à tous ceux qui nous ont gratifiés de leur soutien et de leur confiance. Louanges à dieu, qui nous a donné vie et santé pour le parachèvement de ce travail.*

*Et nous voudrions exprimer toute notre gratitude à :*

*Monsieur l'encadreur : **GOUAIDIA SAID**, pour la confiance qu'elle nous a témoignée en acceptant de diriger ce travail et pour nous avoir accordé de son temps et avoir mis à notre disposition ses compétences et ses conseils pour une meilleure maîtrise du sujet*

*Les membrés des jurys, qu'ils nous ont fait le grand honneur de bien vouloir accepter de jurer notre travail.*

*Tous les enseignants du département de génie électrotechnique et automatique, pour leurs précieux conseils.*

*Nos collègues, qui à travers nos réunions nous ont apporté leurs critiques et leurs encouragements.*

*Nos familles, qui durant nos études, nous ont toujours donné la possibilité*

*Faire ce que nous voulions et qui ont toujours cru en nous.*

# *Dédicace*

*Je dédie le fruit de mes efforts, qui est nous  
Mémoire de fan d'étude a mes chers parents qui  
M'ont toujours suent me soutenir et m'entourer  
Par leur amour, affection et encouragement.*

*A ma sœur Sassia, a ma belle sœur.*

*Et mes frères Hicham, Saleh et Ali.*

*Sons oublier Zohra*

*Et les enfants Hanen, Alaa, Mohamed amine et Dersafe*

*A mon chérie Mohamed et tout la famille Manhan*

*A tous mes professeurs notamment mon*

*encadreur monsieur GOUAIDIA SAID*

*et a tous mes amies et connaissance.*

*Meriem*



# *Dédicace*

*Je dédie se travail a*

*Tous les cœurs qui en pensé a mon avenir*

*Tous ceux qui ont contribué a mon bonheur*

*Tous ceux qui m'ont encouragé*

*Toute la famille Brahimi*

*A mes amis : Hicham ; Walid et Youssef*

*Et tous mes amis et mes collègues qui ont empli  
ma vie de souvenir inoubliable.*

*Ala*

---

**Sommaire****Introduction générale.....(1)****Chapitre (I) : Définitions et généralités.**

I-1- Les réseaux électriques.....	(4)
I-1-1-Grandeurs électriques.....	(5)
I-1-2-Disposition spatiale.....	(5)
I-1-3- Données temporelles.....	(6)
I-2-La stabilité d'un réseau électrique.....	(6)
I-2-1-Stabilité dynamique des réseaux industriels.....	(6)
I-2-1-1-Les régimes de la stabilité des réseaux industriel.....	(7)
I-2-2-La stabilité statique d'un réseau électrique.....	(8)
I-2-3-La stabilité transitoire d'un réseau électrique.....	(11)
I-3- Les machines synchrones.....	(12)
I-3-1-Diagramme vectoriel d'une machine synchrone.....	(12)
I-3-2-Caractéristiques de puissances.....	(14)
I-3-3-Equation de mouvement dynamique.....	(18)

**Chapitre (II) : Modélisation d'un réseau électrique.**

II-1- Introduction.....	(21)
II-2- Modélisation mathématique des réseaux électriques.....	(21)

---

II-2-1- Modélé de l'alternateur.....	(21)
II-2-2- Modèle de la ligne de transport.....	(22)
II-2-3-Modèle du transformateur.....	(22)
II-2-4- Modélisation des charges.....	(23)
II-3-La stabilité dynamique des machines synchrones couplées à un réseau de puissance infinie.....	(24)
II-5-Critère des aires égales.....	(27)
II-6-conclusion.....	(36)
<b>Chapitre (III) : Simulation d'un réseau électrique.</b>	
III-1-Introduction.....	(37)
III-2-Modèle classique du système à plusieurs machines.....	(37)
III-3-Calcul de la matrice admittance et la puissance électrique.....	(38)
III-4-Schéma générale du réseau a étudié .....	(42)
III-4-1-Générateurs et transformateurs.....	(43)
III-4-2-Les Lignes et Les Charges.....	(44)
III-4-3-Les tensions et Les angles internes des Générateurs.....	(44)
III-4-4-Admittances des Shunts.....	(45)
III-4-5-Calcul de la matrice admittance lors d'un défaut a la terre au jeu de barre sept(7).....	(47)
III-4-6-Calcul de la matrice admittance après débranchement du défaut.....	(49)
III-5-Modélisation par SIMULINK.....	(51)

---

III-5-1- Simulation du réseau a Neuf Nœuds.....	(51)
III-5-2-Schéma « simulink » de Réseau à Neuf Nœuds.....	(52)
III-5-3-Schéma de Bloc simulink de calcule de la puissance électrique.....	(53)
III-5-4-les schémas de bloc simulink de calcule des admittances.....	(54)
III-5-5-les courbe de « simulink ».....	(55)
III-6-Conclusion.....	(62)
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>(63)</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>(64)</b>

---

**INTRODUCTION**

**GENERALE.**



---

**Introduction générale :**

L'électricité est parmi les énergies qui ont une courbe de consommation croissante selon le temps dans tous les développés, et toutes les projections confirment cette tendance. En effet l'électricité présente des avantages spécifiques et souvent uniques par rapport aux autres formes d'énergies :

-L'électricité est carrefour privilégié de conversion des différentes formes d'énergies entre elles. On ne peut pas imaginer que l'énergie mécanique peut se transformer en énergie chimique ou lumineuse sans passer par l'électricité ?

-La substitution d'électricité à d'autres énergies primaires permet souvent une amélioration marquée des rendements, et donc de l'efficacité énergétique globale des processus.

-L'électricité permet la décentralisation des moteurs et des contrôles. Mettant ainsi à disposition du citoyen moyen une foule d'esclaves mécaniques et électroniques à faire pâlir d'envie un patricien romain.

-A l'exception du chauffage, l'utilisation de l'énergie renouvelable passe peu ou prou par le « vecteur » électrique (production, transport et distribution).

-L'électricité est le vecteur privilégié, sinon unique de l'information et de la consommation (même le photon qui voyage dans une fibre optique est produit et modulé par des électrons...).

-L'électricité est une énergie propre dans les phases de transport, de distribution et de d'usage final : pas de pollution, ni de gaz à effet de serre sauf l'ozone. Elle l'est également dans la phase de production s'il s'agit de nucléaire, d'hydraulique, de solaire ou d'éolien.

Malgré cette liste des avantages, non exhaustive, cette énergie présente

une faiblesse majoritaire : elle ne se stocke pratiquement pas, sauf en quantités minimales et à un coût élevé dans des accumulateurs. On peut la stocker indirectement (stations de pompage, volants d'inertie) mais cela reste marginal. Il faut à tout moment la produire en fonction de la demande immédiate : l'exemple absolu du « flux tendu » ! c'est cette faiblesse qui explique le rôle encore minime de l'électricité dans le secteur des transports routiers.

Autre conséquence de la difficulté à stocker l'électricité, si le réseau est alimenté par une source intermittente et aléatoire, il faut prévoir en réserve une source de capacité égale prête à la suppléer.

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc en permanence, la production doit s'adapter à la consommation.

De ce fait, l'ensemble : (production, acheminement, utilisation), constitue un système complexe appelé « Réseau électrique » qui doit être stable.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissée au niveau de la tension de l'utilisateur final.

Un réseau électrique se compose de trois parties principales :

- Les stations de génération (centrale) : ont pour but de produire l'énergie électrique.
- Les lignes de transmission : constituent un lien entre les centrales et le système de distribution.

-Le système de distribution : connecte tous les charges individuelles aux lignes de transmission.

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation, et pour assurer cet équilibre il faut garantir la stabilité du réseau électrique.

L'énergie électrique est produite en même temps qu'elle est consommée, donc en permanence, la production doit s'adapter à la consommation. De ce fait, l'ensemble production, acheminement utilisation constitue un système complexe appelé réseau électrique que doit être stable.

---

CHAPITRE I :  
DEFINITIONS  
ET  
GENERALITE.



### I-1- Les réseaux électriques :

Le réseau électrique a été construit et dimensionné pour transporter l'énergie électrique produite par les centres de production jusqu'aux centres de consommation les plus éloignés. Ainsi, les transits de puissances circulent de l'amont depuis les productions d'énergie électrique de type grosses centrales thermiques, hydraulique ou nucléaire, vers l'aval représenté par les consommateurs. Le « système » réseau électrique met donc en œuvre des milliers de kilomètres de ligne, des milliers de poste de transformation, ainsi que de nombreux organes de coupure et d'automates de réglage, dimensionnés pour assurer le bon fonctionnement de la fourniture d'énergie électrique. Ainsi, des contrôles hiérarchisés assurent la tenue en tension et en fréquence ; ceux-ci couplés aux divers automates, ont la charge de garantir la continuité de service du système. Cependant le réseau peut être soumis à des perturbations se propageant vite et sur une partie étendue, et qui peuvent avoir un impact critique pour tout le système électrique. Ces perturbations peuvent être, entre autres, accentuées par des productions locales ajoutées sur le réseau de distribution.

Un réseau électrique peut être de petite puissance ou très puissant, dans tout les cas, ses caractéristique s'expriment en termes de :

- Grandeurs électriques.
- Disposition spatiale.
- Données temporelles.



**I-1-1-Grandèurs électriques :**

- ❖ La fréquence : 50 ou 60 Hz selon les pays.
- ❖ La tension de quelques centaines de volts à quelques centaines de kv, selon qu'il s'agit de telle ou telle partie du réseau.

Ces grandeurs de base sont influencées par l'intensité du courant qui circule dans les lignes et les câbles ; laquelle est liée aux puissances actives et réactives générées, transportées et consommées.

- ❖ La puissance active est produite par les alternateurs à partir d'énergie thermique ou mécanique, et consommée également sous forme thermique ou mécanique par les récepteurs.
- ❖ La puissance réactive est produite ou consommée dans tous les éléments du réseau. Il faut noter qu'en régime dynamique, l'énergie active est « stockée » par les machines tournantes (inertie), et que l'énergie réactive l'est également, sous forme magnétique (exemple : transformateur ou machine tournante) ou capacitive (exemple : câble).

**I-1-2-Disposition spatiale :**

La structure topologique est à échelle :

- ❖ Des continents,
- ❖ Des pays, des régions,
- ❖ Des sites industriels (centaines de mètres à dizaines de kilomètres),
- ❖ Des bâtiments du tertiaire.

Dans les deux premiers cas il y a trois niveaux dans l'acheminement d'énergie :

- Le transport,
- La répartition.

- La distribution.

### **I-1-3- Données temporelles :**

Les variations de l'équilibre entre l'offre et la demande énergétiques entraînent des perturbations des grandeurs électriques que sont la fréquence et la tension que l'on doit maintenir dans des fourchettes acceptables.

### **I-2-La stabilité d'un réseau électrique :**

La stabilité caractérise le comportement dynamique des groupes de production d'énergie électrique. Elle peut se définir comme leur aptitude à conserver un état d'équilibre en régime normal et à retrouver cet état en régime perturbé du réseau.

#### **I-2-1- La Stabilité dynamique des réseaux industriels :**

L'énergie électrique étant très difficilement stockable, il doit y avoir en permanence équilibre entre la production et la consommation. En effet, dans un réseau électrique les seules énergies stockées sont l'énergie cinétique des machines tournantes et l'énergie des condensateurs ; leurs capacités de stockage sont de quelques secondes.

Les générateurs, les récepteurs et les réseaux électriques qui les relient ont des inerties mécaniques et électriques qui rendent difficile le maintien d'un équilibre garantissant une fréquence et une tension relativement constantes. Normalement, face à une variation de puissance, le système électrique, après quelques oscillations, retrouve un état stable.

Dans certains cas, le régime oscillatoire peut diverger. Des études sont nécessaires pour déterminer les moyens à mettre en œuvre afin d'éviter ce phénomène et garantir la stabilité du réseau électrique.

---

Elles le sont particulièrement dans le cas des réseaux industriels qui comportent un ou des groupes générateurs et des moteurs.

#### **I-2-1-1-Les régimes de la stabilité des réseaux industriel :**

Elle est caractérisée par les variations de puissances actives et réactives transitées dans le réseau et se mesure par les variations dans le temps des tensions, des courants et des fréquences associées à ces puissances.

Plusieurs définitions caractérisent les régimes de la stabilité des réseaux :

##### **-La stabilité en régime statique :**

Le réseau a un comportement stable ; cela signifie que lorsqu'il est soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

##### **- la stabilité en régime transitoire :**

Lorsque l'on passe d'un état stable statique à un autre, suite à une perturbation durable voulue ou non, ce changement d'équilibre s'accompagne d'un régime variable oscillatoire amorti considéré comme acceptable vis-à-vis des intervalles de tension, de fréquence et de durée prédéfinis ( $\Delta U, \Delta f$ , durée  $\rightarrow$  inférieurs à une valeur max).

##### **-l'instabilité en régime transitoire :**

Elle est observée lorsque, suite à une perturbation importante, le régime oscillatoire est divergent. Il induit une perte d'alimentation.



**- la stabilité en régime dynamique :**

Le réseau est apte à éviter tout régime oscillatoire divergent et à revenir à un état stable acceptable. Ceci inclut l'intervention éventuelle des protections et des automatismes.

Les études de stabilité dynamique consistent à :

- envisager les principaux scénarios critiques tels que court-circuit, perte des groupes de production, perte de l'alimentation du distributeur, variation de charge importante, ...
- prédire le comportement du réseau face à ces perturbations
- préconiser les moyens à mettre en œuvre tels que types de protection et réglages, délestages - réalésages, configurations interdites, ... qui permettent d'éviter l'instabilité.

Ces études permettent donc de comprendre le comportement du réseau et de déterminer les moyens de minimiser les risques de perte d'alimentation.

**I-2-2-La stabilité statique d'un réseau électrique :**

Le réseau a un comportement stable. C'est-à-dire que soumis à de petites perturbations, il revient à son point de fonctionnement initial ceci avec d'éventuelles oscillations amorties jusqu'au retour à l'équilibre.

La stabilité statique désigne la capacité du système de se rétablir par lui-même après de faibles perturbations.

Si l'angle  $\delta$  subit une faible variation positive  $\Delta\delta$  à partir du point a (figure I-1) la puissance du générateur subira également une variation  $\Delta P$  positive.

Puisque la puissance de la turbine  $P_0$  ne dépend pas de  $\delta$  et que son couple est accélérateur alors que le couple du générateur est de freinage pour ces raisons le rotor sera freiné. L'angle  $\delta$  diminuera et l'alternateur reviendra au régime de travail ( $P_m = P_0$ ).

Si le régime initial correspondant au point b ou  $\Delta\delta > 0$  et  $\Delta P < 0$  il résulte un moment d'accélération qui fera augmenter plus loin  $\Delta\delta$  et par suite  $\Delta P$  et continue ainsi à augmenter jusqu'à la sortie du synchronisme de la machine.

Le régime correspondant au point b est instable, ces considérations permettent de conclure que le régime stable est caractérisé par le fait que le signe de variation de  $\delta$  et de  $P$  est le même c'est-à-dire si :  $\Delta\delta > 0 \rightarrow \Delta P > 0$  le régime est stable.

Le critère peut être écrit comme suit :

$$\frac{\Delta P}{\Delta\delta} > 0 \quad \text{ou} \quad \frac{\partial P}{\partial\delta} > 0 \dots\dots\dots (I-1)$$

$$\frac{\partial P}{\partial\delta} = \frac{E U}{X_S} \cos \delta \dots\dots\dots (I-2)$$

$\frac{\partial P}{\partial\delta}$  : est appelée puissance de synchronisation.



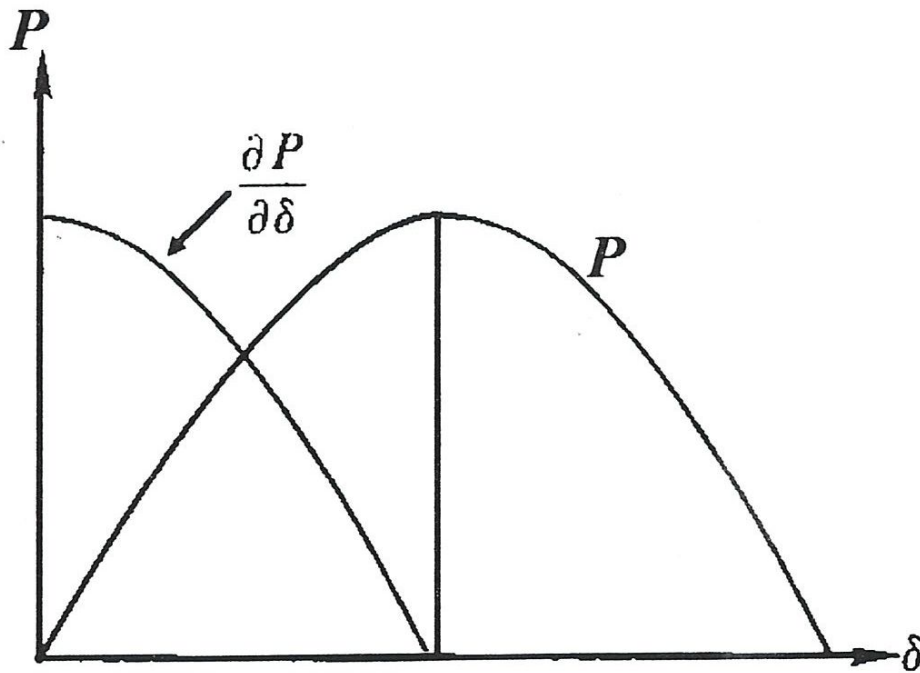
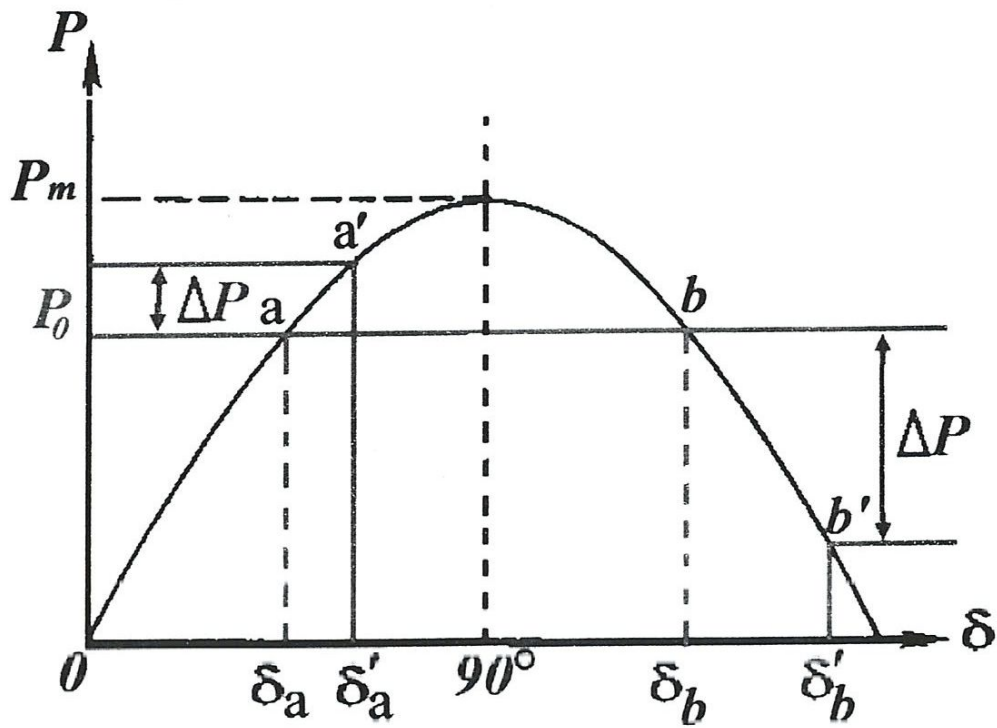


Figure I-1 : variation de la puissance du générateur.

### I-2-3-La stabilité transitoire d'un réseau électrique :

L'intérêt essentiel dans l'étude de la stabilité transitoire des réseaux électriques est d'éviter dans la mesure du possible la perte de synchronisme dans le cas où le circuit à la suite d'un défaut triphasé proche des groupes de production. En outre il faut que le régime de fonctionnement qui s'établit après l'élimination du défaut se termine par un niveau de tension acceptable aux bornes du générateur.

Lorsque l'on passe d'un état stable statique à un autre, suite à une perturbation durable voulue ou non, ce changement d'équilibre s'accompagne d'un régime variable oscillatoire amorti considéré comme acceptable eu égard à des fourchettes prédéfinies de  $\Delta U$ ,  $\Delta f$ ,  $\Delta t$ .

L'instabilité en régime transitoire est observée lorsque, suite à une perturbation importante, le régime oscillatoire est divergent, il induit une perte d'alimentation ou un nouvel état stable inacceptable (ex : moteur qui « rampe »).

Tout d'abord, nous supposons que la machine synchrone est dans un régime permanent de marche synchrone raccordée à un système électrique (de tension et fréquence constante), par l'intermédiaire d'une réactance.

Une perturbation brusque fait que l'équilibre établi entre le couple mécanique et le couple électrique n'est plus respecté et l'angle  $\delta$  commence à dévier de sa position initiale.

Ce régime est oscillatoire mais si l'angle  $\delta$  dépasse une certaine valeur, le synchronisme est perdu.

### I-3- Les machines synchrones :

Les machines synchrones sont fréquentes dans les réseaux industriels. Elles peuvent être installées pour les besoins suivant :

- ❖ Récupération de l'énergie d'un processus exothermique ou cogénération.
- ❖ Besoin d'une source électrique complémentaire pour :
  - contrat effacement jours de pointe (EJP),
  - secours,
  - pointes,
- ❖ Compensation d'énergie réactive.

Elles jouent un rôle prédominant dans les phénomènes de stabilité des réseaux.

#### I-3-1-Diagramme vectoriel d'une machine synchrone :

Le 1<sup>er</sup> cas à effectuer avant de tracer le diagramme d'une machine synchrone est de transformer les quantités du système triphasé à des nouvelles composantes par la transformation de Park. Ces nouvelles quantités sont dites composantes directes et de quadrature, ou composantes d et q. il est important de savoir que ces nouvelles composantes sont propres au rotor et que les réactance sur l'axe q sont différentes, et notées pendant le fonctionnement normal  $X_d$  et  $X_q$ .

Pour les machines à pôles saillants, la distribution du flux le long de l'entrefer est non uniforme, ceci oblige à représenter la machine suivant deux axes, on a  $X_d \approx X_q$  pour une machine à pôles lisses, alors que pour les machines synchrones à pôles saillants :  $X_d \geq X_q$ .

Le tableau ci-dessous illustre les valeurs typiques des réactances  $X_d$  et  $X_q$ , en unités relatives, pour les machines synchrones à pôles saillants et à pôles lisses.

	Pôles lisses	Pôles saillants
$X_d$	1,0÷2,3	0,6÷1,5
$X_q$	1,0÷2,3	0,4÷1,0

### Valeurs typiques de $X_d$ et $X_q$ pour les machines synchrones

Toutes les résistances sont négligées dans ce qui ne va pas altérer l'analyse. La figure 11-3 représente le diagramme vectoriel d'une machine synchrone lors d'un fonctionnement en régime stable.

Faisons d'abord la supposition que la machine synchrone est reliée à un système Electro-Energétique de puissance infini ( $S_{sys} = \infty$  et donc  $U =$  constante) voir schéma ci-dessous :

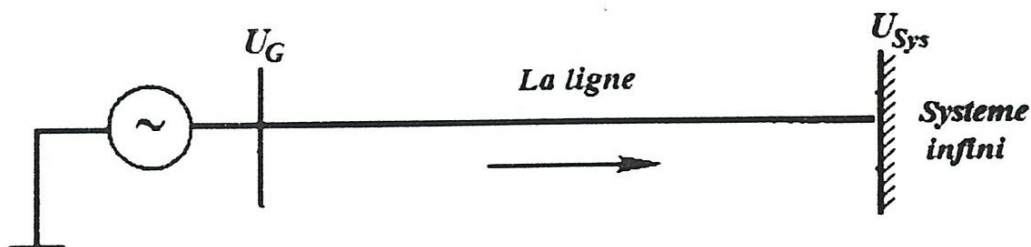


Figure 1-2 : Schéma de la machine synchrone est relié à un système Electro-Energétique de puissance infini.



Et le diagramme suivant :

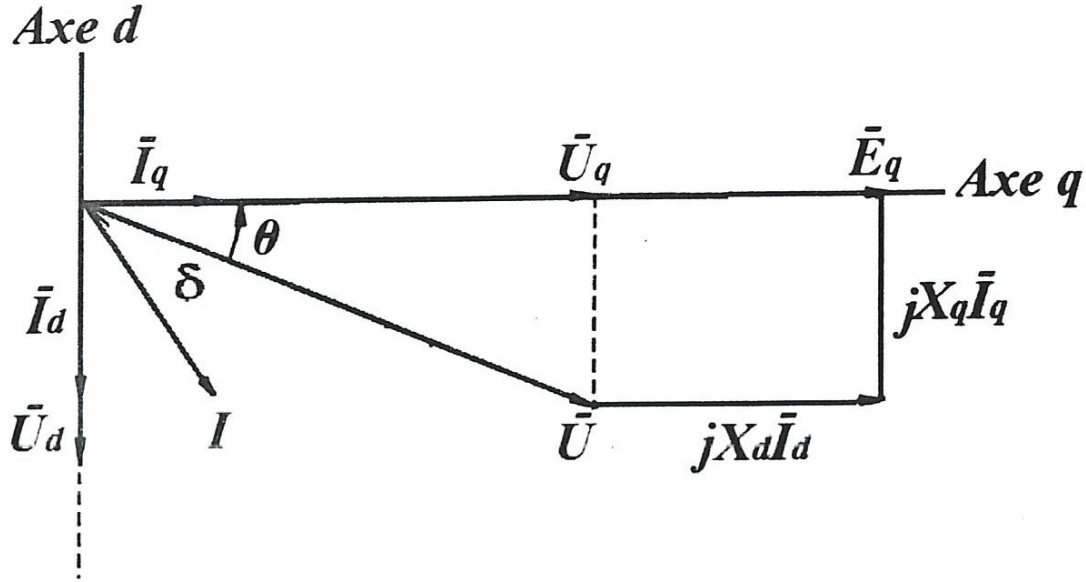


Figure I-3 : Diagramme vectoriel d'une machine synchrone lors d'un fonctionnement en régime stable.

I-3-2-Caractéristiques de puissances :

On a:  $E_q = U + jX_d I_d + jX_q I_q$

On a: 
$$\begin{cases} U_d = X_q I_q \\ U_d = E_q - X_q I_q \end{cases} \dots\dots\dots(1)$$

On a aussi:  $S \square = P + jQ = U \square \hat{I}$



$$s = (U_d + jU_q) [I_d + jI_q] \dots\dots\dots(2)$$

On a choisi les axe d est q tel que l'axe réel coïncide avec l'axe d est l'axe imaginaire avec l'axe q. A partir de l'équation (1) on peut avoir :

$$\begin{cases} I_d = \frac{E_q - U_q}{X_d} \\ I_q = \frac{U_d}{X_q} \end{cases}$$

Et en remplaçant dans l'équation (2) on tire les expressions de P et Q :

$$\begin{cases} P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\delta \\ Q = \frac{E_q U}{X_d} \cos \delta - U^2 \left( \frac{\cos^2 \delta}{X_d} + \frac{\sin^2 \delta}{X_q} \right) \end{cases}$$

La représentation de P( $\delta$ ) est donnée par la Figure I-4 :

La puissance est formée de deux composantes :

Une fondamentale  $\left( \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta \right)$

Et une autre harmonique  $\left( \frac{U^2}{2} \left( \frac{1}{X_d} - \frac{1}{X_q} \right) \sin 2\delta \right)$  que est très néfaste sur le fonctionnement de la machine puisqu'elle a pour effet de diminuer l'angle critique  $\delta_{cr} < 90^\circ$  et comme avantage d'augmenter l'amplitude de la puissance  $P_m$  mais cette composante est souvent négligée lors de l'étude des machines synchrones et notamment pour les machines synchrones à pôles lisses ou :  $X_d \approx X_q$  et on se contente de la formule suivante :

$$P = \frac{E_q U}{X_d} \sin \delta$$

La représentation est donnée par la figure suivante :

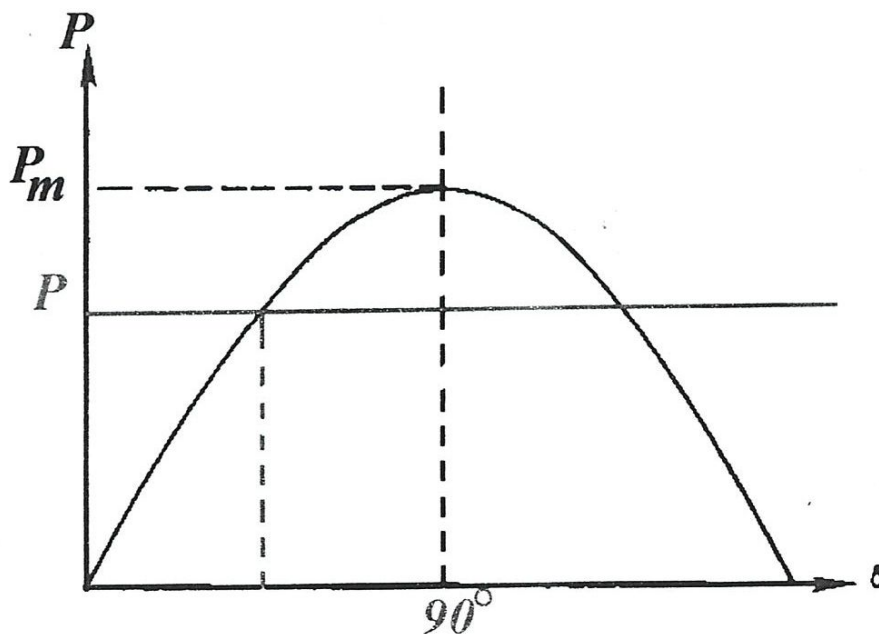


Figure I-4 : caractéristique de la puissance pour une machine synchrone à pôles lisses et à pôles saillants.

Et enfin on peut représenter la machine par le schéma simplifié suivant :

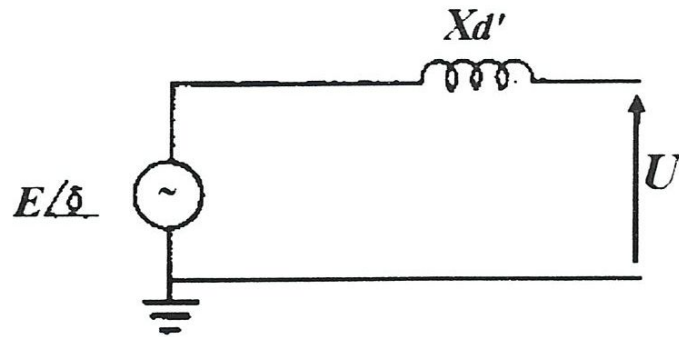


Figure I-5 : représentation de la machine synchrone.

Ce qui nous donne le diagramme vectoriel suivant :

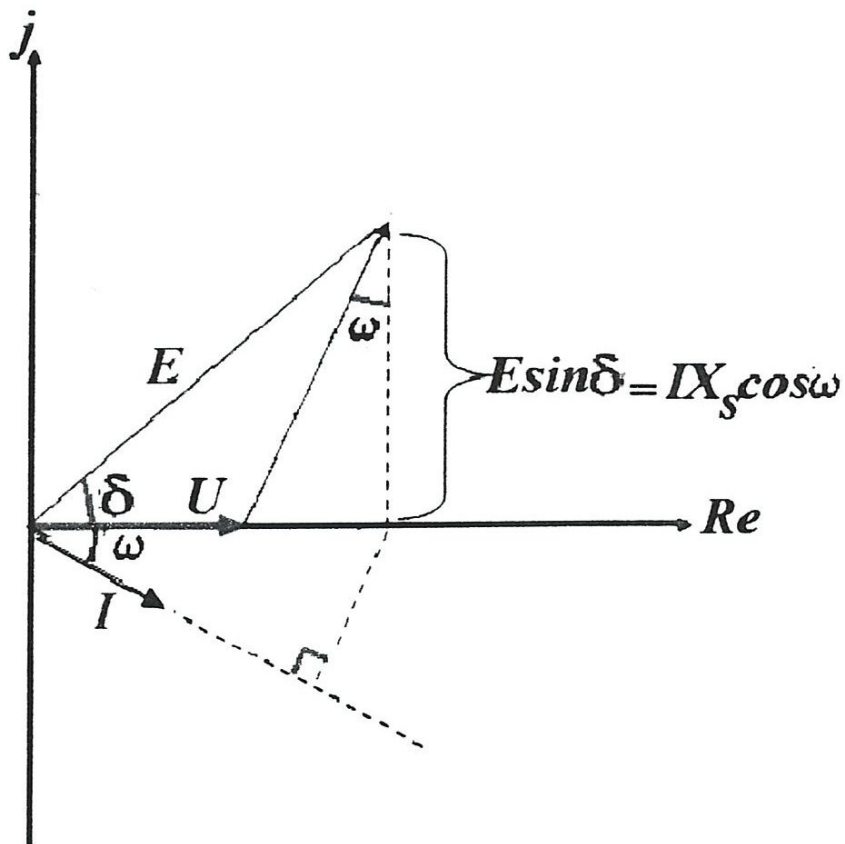


Figure I-6 : Diagramme vectorielle d'une machine synchrone.

**I-3-3-Equation de mouvement dynamique :**

Le moment d'inertie et le couple d'accélération d'une machine synchrone peuvent s'écrire comme suit :

$$J \frac{d^2 \delta_m}{dt^2} = C_a \dots\dots\dots (3)$$

Ou :

J : moment d'inertie

$\delta_m$ : angle mécanique

$C_a$ : couple d'accélération avec  $C_a = C_m - C_e$ : couple d'accélération (la différence entre le couple mécanique et le couple électrique).

Les couples électriques et mécaniques peuvent être de freinage ou d'accélération selon le mode fonctionnement de la machine synchrone. Puisque la machine est un générateur, le couple d'entraînement  $C_m$  est un couple mécanique et celui de freinage ou de charge  $C_e$  est un couple électrique.

Pendant le régime statique,  $C_m = C_e$  et donc  $C_a = 0$ .

La relation entre l'angle mécanique et l'angle électrique (angle du rotor) peut être exprimée comme suit :

$$J \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = C_a \dots\dots\dots (4)$$

On peut supposer la vitesse angulaire de la machine dévie peu de la vitesse de synchronisme  $\omega_s$ .

En multipliant les deux membres de l'équation (4) par  $\omega_s$  on aura :

$$\omega_s J \cdot \frac{2}{P} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \omega_s C_a = P_a \dots\dots\dots(5)$$

Une constante souvent utilisé est la constante d'inertie H et qui est rapport l'énergie stockée en WATT-Secondes et la puissance nominale de la machine en VA comme suit :

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \omega_s}{S}$$

D'où on peut tire :

$$J \omega_s = \frac{2HS}{\omega_s}$$

On remplaçant dans l'équation (5) on trouve que :

$$\frac{2HS}{\omega_s} \frac{2}{P} \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_a$$

Si on posse :  $\omega_0 = \frac{2}{P} \omega_s$  alors :

$$\frac{2HS}{\omega_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = \frac{P_a}{S}$$



Et donc l'équation de mouvement dynamique en unités relatives est :

$$\frac{2HS}{\omega_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a$$

$$M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_a$$

Avec :

M : moment angulaire.

$$M = \frac{2H}{\omega_0} = \frac{H}{\pi f}$$

---

CHAPITRE II :

MODELISATION

D'UN

RESEAU.

**II-1- Introduction :**

Dans ce chapitre présente la modélisation des différents composants du réseau électrique à savoir : les générateurs d'énergies électriques, les lignes de transports, les transformateurs et les charges électriques. Et la stabilité dynamique de machine synchrone ; et le critère des aires.

**II-2- Modélisation mathématique des réseaux électriques :****II-2-1- Modèle de l'alternateur :**

Le groupe turbo-alternateur est considéré comme le cœur du réseau électrique, il assure la production de l'énergie électrique demandée par le consommateur. Dans notre cas, le groupe turboalternateur est modélisée par une source de tension constante qui injecte, au niveau du nœud auquel il est connecté, une puissance active  $P_g$  et réactive  $Q_g$ .

L'alternateur possède deux boucles de régulation automatique, une pour le réglage automatique de la puissance AGC (Automatique Génération Control) et l'autre pour le réglage automatique de la tension AVR (Automatique Voltage Régulateurs).

La production de l'énergie réactive dans un générateur est limitée l'équation (II.1) :

$$Q_g^{min} \leq Q \leq Q_g^{max} \dots\dots\dots (II.1)$$

Cette limitation est due principalement à la limite thermique du bobinage statorique et rotorique ainsi que la limitation de l'angle rotorique permise (30°).

**II-2-2- Modèle de la ligne de transport :**

La ligne de transport a été modélisée par un schéma équivalent en qui se compose d'une impédance série (résistance  $R$  en série avec une réactance inductive  $X$ ), et une admittance shunt qui consiste en une susceptance capacitive  $B$  (due à l'effet capacitif de la ligne avec la terre) en parallèle avec une conductance d'isolation  $G$ . Voir la figure (II-1) :

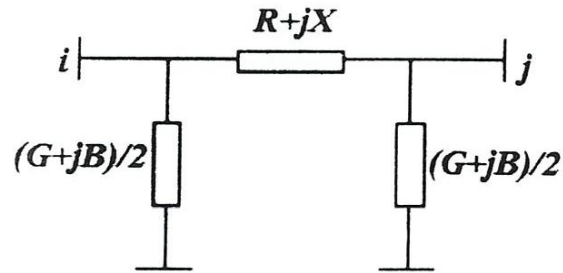


Figure II-1 : Modèle en  $\Pi$  d'une ligne électrique.

**II-2-3- Modèle du transformateur :**

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation  $a$  et

L'impédance de fuite. Les rapports  $a_{ij}$  sont inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance  $B_{ij}$  sont vues comme des fonctions de rapports de transformation  $a$  (figure II.2).

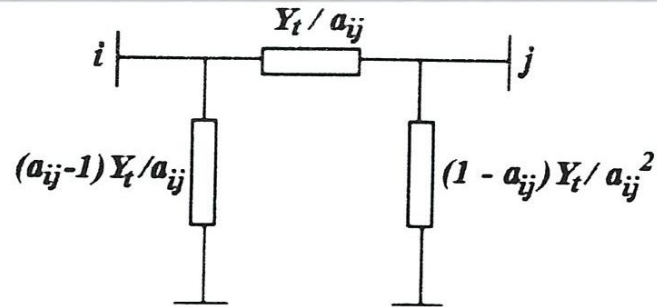


Figure II-2 : Modèle d'un transformateur.

Dans un réseau électrique, les transformateurs qui sont connectés directement à la charge sont des transformateurs réglables en charge. Ils disposent des régulateurs automatiques de la tension dans des limites permises de fonctionnement, indépendamment des fluctuations de tension primaire.

#### II-2-4- Modélisation des charges :

La modélisation de la charge joue un rôle très important dans l'étude et l'analyse de la sécurité de tension. Dans la littérature, il existe deux types de modélisation des charges électriques à savoir, la modélisation statique et celle dynamique. La modélisation dynamique est relativement compliquée ; la puissance consommée par la charge est une fonction de la tension et du temps ; Elle est utilisée généralement pour l'étude et l'analyse de la stabilité transitoire. La modélisation statique est mieux adaptée aux programmes d'écoulement de puissance.

Dans cette section, on présente différents modèles statiques qui expriment la puissance active et réactive de la charge en fonction de la tension de nœud. Le modèle exponentiel de la charge est défini par les équations (II.2) et (II.3).



$$P = P_0 \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_p} \dots\dots\dots (II.2)$$

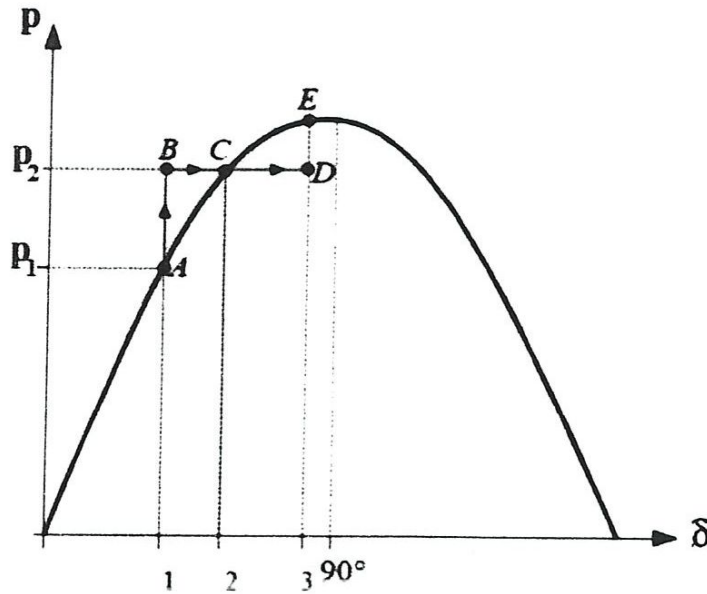
$$Q = Q_0 \times \left(\frac{V}{V_0}\right)^{n_q} \dots\dots\dots (II.3)$$

Avec :

- $P_0$  et  $Q_0$ : puissance active et réactive consommées à une tension de référence  $V_0 = 1 pu$ .
- $n_p$  et  $n_q$ : constantes dépendant du type de la charge.
- En pratique, les valeurs de  $n_p$  et  $n_q$  de différents types de charges sont trouvées empiriquement

### II-3-1 La stabilité dynamique d'une machine synchrone couplée à un réseau de puissance infinie :

Les problèmes de stabilité dynamique résultent du passage de la machine d'un état stable à un autre. Considérons le cas d'une machine couplée au réseau de distribution publique qui subit un à-coup de puissance mécanique fournie par la turbine, celle-ci passe brusquement d'une puissance fournie  $P_1$  à une puissance fournie  $P_2$



**Figure II-3: déplacement du point de fonctionnement de l'alternateur suite à une augmentation de la puissance mécanique.**

L'augmentation lente de la puissance de  $P_1$  à  $P_2$  ferait passer lentement du point  $A$  au point  $C$  en restant sur la courbe. Mais l'application brusque de cet échelon de puissance n'amène pas directement au point  $C$ . Il est en effet impossible, compte tenu des inerties mécaniques, de passer d'un angle interne  $\delta_1$  à un angle  $\delta_2$  brusquement. Ainsi, la machine passe instantanément du point  $A$  au point  $B$  ; ensuite l'angle  $\delta$  augmente de  $\delta_1$  à  $\delta_2$ .

Mais en arrivant au point  $C$  la stabilisation n'est pas immédiate, l'inertie mécanique de la machine amène son fonctionnement jusqu'au point  $D$ . De celui-ci, la décélération jusqu'au point  $C$  finit par se stabiliser, après éventuellement quelques oscillations.

Les calculs effectués à partir des énergies mécanique et électrique de la machine montrent que la position du point  $E$  est définie par la loi des aires ; les aires  $ABC$  et  $CDE$  sont égales.

En effet, on peut montrer que l'aire  $ABC$  est proportionnelle à l'énergie mécanique emmagasinée lorsque la machine passe du point  $B$  au point  $C$  et l'aire  $CDE$  lorsqu'elle passe du point  $D$  au point  $C$ .

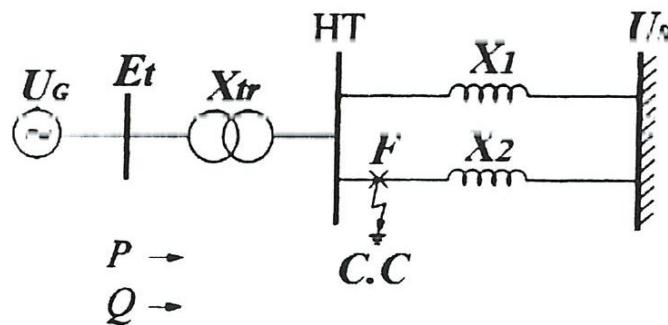
En conséquence, l'angle interne maximal  $\delta_{\max}$  peut être supérieur à  $90^\circ$  de façon transitoire.

La limite de stabilité dynamique est donc plus élevée que la limite de stabilité statique.

Toutefois, il peut arriver que la différence entre  $P1$  et  $P2$  soit tellement importante qu'il n'y ait pas de point  $D$  qui permette de satisfaire la loi des aires. L'alternateur accélère du point  $B$  au point  $C$ , puis jusqu'au point  $X$ . A ce point, il continue à accélérer en restant sur la courbe et la puissance transmise au réseau diminue pour devenir négative (marche en moteur). L'angle  $\delta$  croît continuellement et il y a perte de synchronisme par survitesse.

II-5-Critère des aires égales :

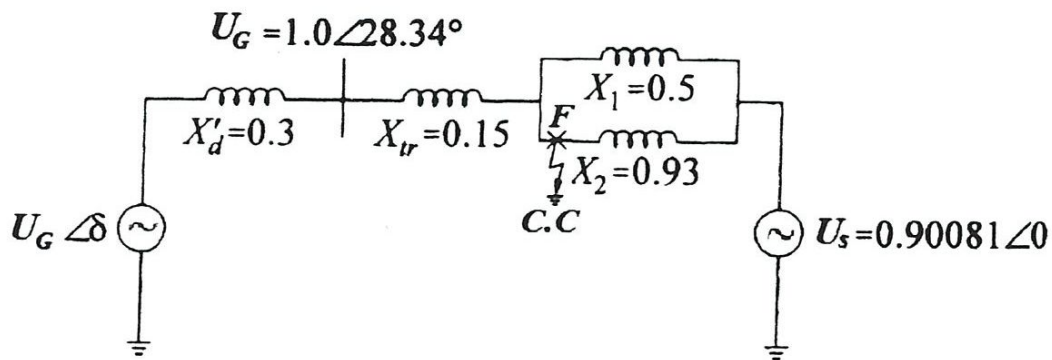
Pour pouvoir comprendre la méthode des aires égales. Proposons-nous l'étude d'un système Electro-Energétique de puissance infinie. Ce système est constitué d'une machine synchrone branchée à un système de puissance infinie par l'intermédiaire d'un transformateur et deux lignes de transport en parallèle, ou on a supposé un court circuit triphasé (figure II-4).



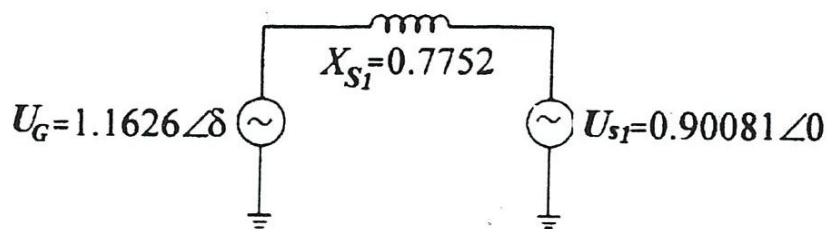
FigureII-4 : machine infinie système de bus.

Les données de ce système sont résumées en unité relative dans le tableau suivant :

S	$X'_d$	$X_T$	$X_{L1}$	$X_{L2}$	$U_G$	$U_S$	H
$0.9+j0.436$	0.3	0.15	0.5	0.93	$1\angle 28.34^\circ$	$0.90081\angle 0^\circ$	3.5



(a) : circuit équivalent.



(b) : Circuit équivalent de système avant le défaut.

On a besoin de calculer les paramètres du système avant le défaut et cela se fait comme suit :



- La résistance  $X_S$  :

$$\begin{aligned}X_{S1} &= X'_d + X_T + (X_1 // X_2) \\ &= 0.3 + 0.15 + \frac{0.5 \cdot 0.93}{0.5 + 0.93} \\ &= 0.7752\end{aligned}$$

- Le courant  $I_G$  :

$$I_G = \frac{S}{U_G} = \frac{0.9 - j0.436}{1 \angle -28.34^\circ}$$

- La F.E.M de générateur  $E_G$  :

$$\begin{aligned}E_G &= U_G + jX'_d I_G = 1 \angle -28.34^\circ + j0.3 \left( \frac{0.9 - j0.436}{1 \angle -28.34^\circ} \right) \\ &= 1.1626 \angle 41.77^\circ\end{aligned}$$

- L'angle initial  $\delta_0$  :

$$\delta_0 = 41.77^\circ$$

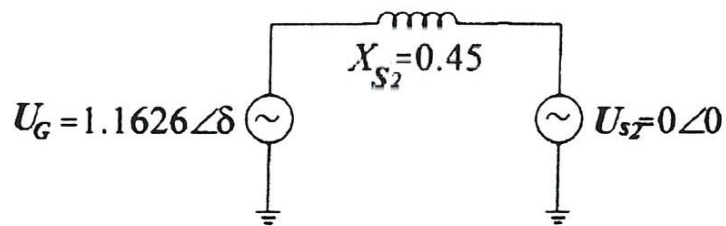
- La puissance maximale  $P_{max1}$  :

$$\begin{aligned}P_{max1} &= \frac{E_G U_S}{X_S} = \frac{1.1626 \cdot 0.90081}{0.7752} \\ &= 1.351\end{aligned}$$

- La puissance mécanique initiale :

Pour  $\delta = \delta_0$ ,  $P_{e1} = P_m$  on suppose  $P_{e1} = P_0$

$$\begin{aligned} P_{e1} &= P_{max1} \sin \delta_0 \\ &= 1.351 \sin (41.71^\circ) \\ &= 0.9 \end{aligned}$$



(c) : Circuit équivalent de système durant le défaut.

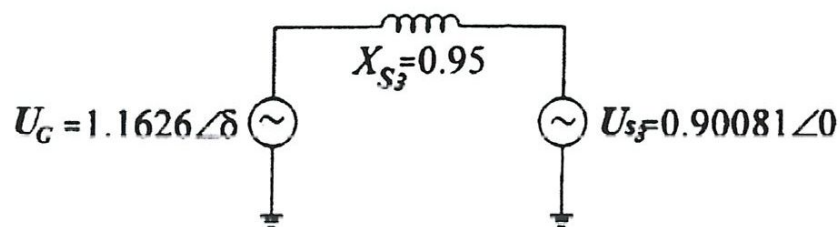
Le calcul des paramètres de système avant le défaut et cela se fait comme suit :

- La résistance  $X_S$  :

$$\begin{aligned} X_{S2} &= X'_d + X_T \\ &= 0.3 + 0.15 \\ &= 0.45 \end{aligned}$$

$$P_{e2} = \frac{E_G U_S}{X_S} \sin \delta_0 = 0 \text{ et } U_S = 0$$

La puissance on a affaire a un court-circuit triphasé, la puissance électrique  $P_{e2}$  est nulle ( $P_{e2} = 0$ ) quand le défaut est encore la, Quand le défaut est coupe au temps  $t_{deb}$  ou on a débranché la ligne en défaut.



(d) : Circuit équivalent de système après le défaut.

- La résistance  $X_S$  :

$$\begin{aligned} X_{S3} &= X'_d + X_T + X_1 \\ &= 0.3 + 0.15 + 0.5 \\ &= 0.95 \end{aligned}$$

- La puissance maximale  $P_{max1}$  :

$$\begin{aligned} P_{max3} &= \frac{E_G U_S}{X_{S3}} = \frac{1.1626 * 0.90081}{0.95} \\ &= 1.1024 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}P_{e3} &\stackrel{?}{=} P_{max3} \text{Sin} \delta_3 \\ &= \frac{1.1626 \cdot 0.90081}{0.95} \text{Sin} \delta_3 \\ &= 1.1024 \text{Sin} \delta_3\end{aligned}$$

- L'angle  $\delta_{cr}$  :

Se calcule de la manier suivant

$$\delta_{cr} = 180^\circ - \delta_3$$

On suppose  $P_{e1} = P_0$

$$P_0 = 1.1024 \text{Sin} \delta_3$$

$$\begin{aligned}\delta_3 &= \text{arc Sin} \frac{P_0}{P_{max3}} \\ &= \text{arc Sin} \frac{0.9}{1.1024} \\ &= 54.73^\circ\end{aligned}$$

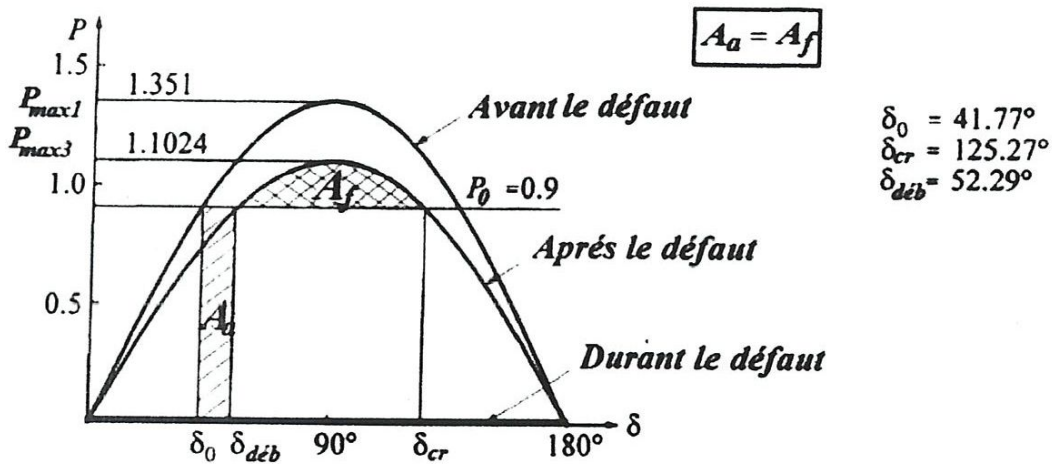
$$\begin{aligned}\delta_{cr} &= 180^\circ - 54.73^\circ \\ &= 125.27^\circ\end{aligned}$$



- L'angle limité de débranchement  $\delta_{deb}$  :

C'est l'angle limite ou on doit éliminer le défaut sinon on basculera en état d'instabilité. Cet angle peut être calculé à partir de la relation  $A_a = A_f$

Tel que :



FigureII-5 : Diagramme de puissance-angle.

$$A_a = \int_{\delta_0}^{\delta_{deb}} (P_0 - P_{max2} \sin \delta) d\delta$$

$$A_f = \int_{\delta_{deb}}^{\delta_{cr}} (P_{max3} \sin \delta - P_0) d\delta$$

$$A_a = A_f \Rightarrow A_a - A_f = 0$$

$$\int_{\delta_0}^{\delta_{deb}} (P_0 - P_{max2} \sin \delta) d\delta - \int_{\delta_{deb}}^{\delta_{cr}} (P_{max3} \sin \delta - P_0) d\delta = 0$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow & P_0 (\delta_{deb} - \delta_0) + P_{max2} (\cos \delta_{deb} - \cos \delta_0) + P_0 (\delta_{cr} - \delta_{deb}) \\ & + P_{max3} (\cos \delta_{cr} - \cos \delta_{deb}) = 0 \Rightarrow \end{aligned}$$

$$(P_{max3} - P_{max2}) \cos \delta_{deb} = P_0 (\delta_0 - \delta_{cr}) + P_{max2} \cos \delta_0 + P_{max3} \cos \delta_{cr}$$

$$\delta_{deb} = \arccos \left( \frac{P_0 (\delta_{cr} - \delta_0) \frac{\pi}{180} + P_{max3} \cos \delta_{cr} - P_{max2} \cos \delta_0}{P_{max3} - P_{max2}} \right)$$

$$\delta_{deb} = \arccos \left( \frac{0.9(125.27^\circ - 42.77^\circ) \frac{3.14}{180} + 1.1024 \cos 125.27^\circ}{1.1024} \right)$$

$$\delta_{deb} = 52.29^\circ$$

- Le temps limité de débranchement  $t_{deb}$  :

Après avoir déterminé l'angle de débranchement ( $\delta_{deb}$ ) on doit déterminer le temps limites de débranchement ( $t_{deb}$ ) pour cela on se base sur l'équation de mouvement du rotor :

$$\frac{M d^2 \delta}{dt^2} = P_0 \Rightarrow \frac{d\delta}{dt} = \frac{P_0}{M} T$$

Qui est une équation différentielle de premier ordre et qui a pour solution :

$$\delta = \delta_0 + \frac{1}{2} \frac{P_0}{M} t^2$$

Si  $\delta = \delta_{deb} = 52.29^\circ$  alors le temps limite de débranchement  $t_{deb}$  est donné par la forme suivant :

$$t_{deb} = \sqrt{\frac{2M(\delta_{deb} - \delta)}{P_0}}$$

$$\Rightarrow t_{deb} = \sqrt{\frac{2(0.18)(0.912-0.729)}{0.9}}$$

$$t_{deb} = 0.087s$$

### II-6-Conclusion:

Nous avons modélisés les différents composants du réseau électrique à savoir : les générateurs d'énergies électriques, les lignes de transport, les transformateurs et les charges électriques. Et les problèmes de stabilité dynamique résultent du passage de la machine d'un état stable pour théorie et calculer, l'information des plus importants coincements la stabilité et l'instabilité du réseau, la relation entre la stabilité de réseau électrique et la loi des aires

Si :

$A_a < A_f$ : Le système est stable.

$A_a > A_f$ : Le système est instable.

Le but de calculer  $t_{deb}$  c'est l'installation de protection et de disjoncteur à réponse rapide.



---

CHAPITRE III :  
SIMULATION  
D'UN  
RESEAU  
ELECTRIQUE.

## III-1-Introduction :

Pour mieux assimiler la notion de puissance, on s'est proposé d'étudier un système électrique composé de neuf (9) jeux de barre et trois (3) générateurs, et de calculer ses paramètres avant, pendant et après un défaut simulé à l'un de ses jeux de barres.

## III-2-Modèle classique du système à plusieurs machines :

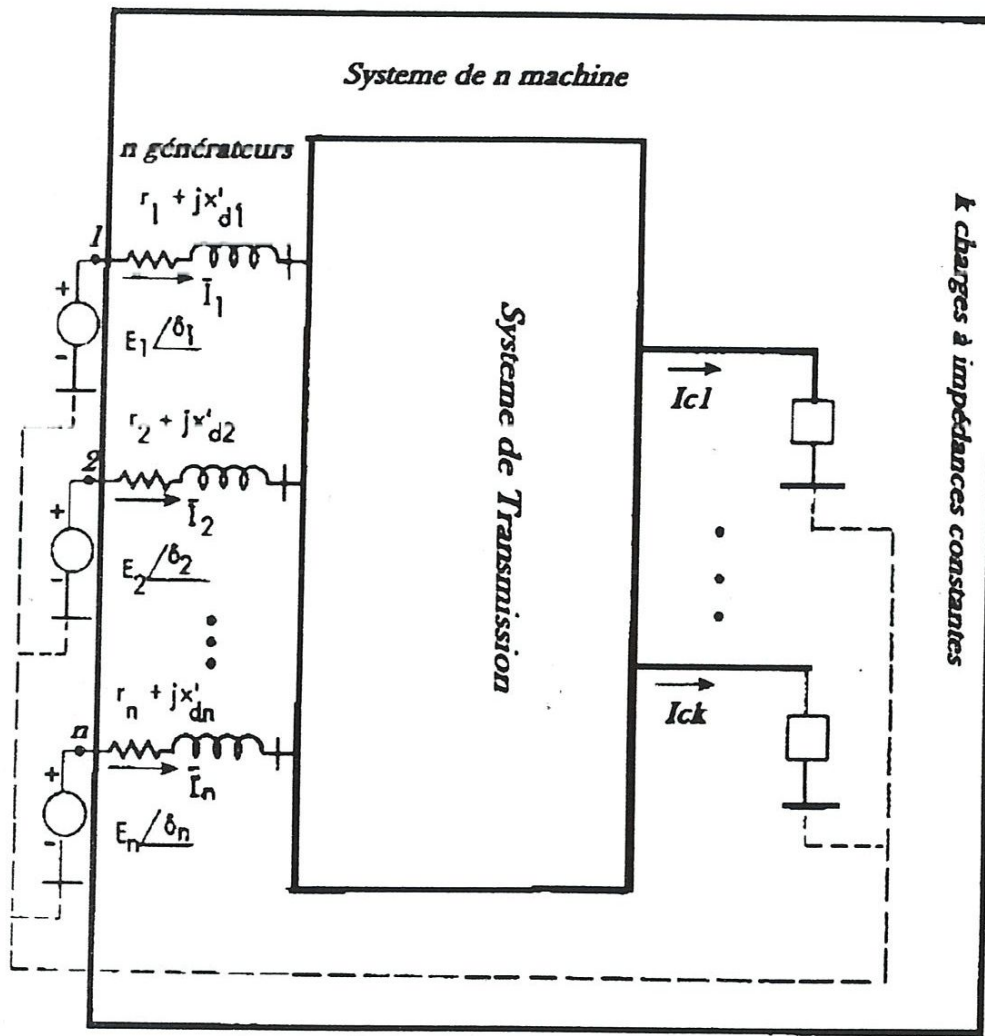


Figure (III-1) : Schéma de système multi-machine.

Les amplitudes de  $E_1, E_2, \dots, E_n$  sont supposées constantes et ont pour valeur, les valeurs avant le défaut.

Le réseau passive représenté ci-dessus possède  $n$  nœuds avec des sources actives.

La matrice admittance du réseau est décrite par :

$$\bar{I} = \bar{Y} \cdot \bar{E}$$

Où  $\bar{Y}$  comprend les éléments de la diagonale  $\bar{Y}_{ii}$  et les éléments de  $\bar{Y}_{ij}$  par définition on a calculé la matrice admittance et la puissance électrique.

### III-3-Calcul de la matrice admittance et la puissance électrique :

La matrice admittance :

Avant d'aborder l'étude de la stabilité d'un système électrique on doit tout d'abord, préparer les données de ce dernier en les étapes suivantes :

- 1- Toutes les données du système sont converties a une base commune; une puissance de base de 100MVA et fréquemment utilisée.
- 2- Les charges sont converties en impédances ou admittances équivalentes cela se fait au moyen de la formule suivant :

$$Y_{ch} = G_{ch} + jB_{ch}$$

$$Y_{ch} = \frac{P_{ch}}{U_{ch}^2} - j \left( \frac{Q_{ch}}{U_{ch}^2} \right)$$

- 3- La matrice admittance  $Y$  pour chaque condition du réseau est calculée en l'étape suivant :

- a- L'impédance équivalente des charges sont connectées entre les nœuds de charge et les nœuds de référence.
- b- Toutes les impédances sont converties en admittance pour les éléments hors la diagonale :

$$Y_{ij} = \frac{-1}{Z_{ij}}$$

$Z_{ij}$  : est l'impédance entre les nœuds i et j.

Pour les éléments de la diagonale :

$$Y_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n Y_{ij}$$

$$\begin{cases} Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij} \\ Y_{ii} = G_{ii} + jB_{ii} \end{cases}$$

Enfin on éliminé tout les nœuds sauf ceux avec un générateur et on obtient ainsi la matrice admittance réduite par la méthode de KRON.

$$Y_{bus} V_{bus} = I_{bus}$$

$$\begin{bmatrix} Y_{nn} & Y_{nm} \\ Y_{mn} & Y_{mm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_n \\ V_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_n \\ 0 \end{bmatrix}$$

n : nombre des nœuds de générateur dans le système.

m : nombre des nœuds restants.

Nous adonné :

$$Y_{nn}V_n + Y_{nm}V_m = I_n$$

$$Y_{mn}V_n + Y_{mm}V_m = 0$$

$$V_m = -Y_{mm}^{-1} Y_{mn}V_n \Rightarrow$$

$$Y_{nn}V_n - Y_{nm}Y_{mm}^{-1}Y_{mn}V_n = I_n$$

$$\Rightarrow V_n (Y_{nn} - Y_{nm}Y_{mm}^{-1}Y_{mn}) = I_n$$

$$V_n Y_{red} = I_n \Rightarrow Y_{red} = Y_{nn} - Y_{nm}Y_{mm}^{-1}Y_{mn}$$

$$\text{Et : } Y_{mn} = Y_{nm}^t$$

$$\Rightarrow Y_{red} = Y_{nn} - Y_{nm}Y_{mm}^{-1}Y_{nm}^t$$

$Y_{red}$  : C'est la matrice réduite désirée. Elle est de démenions ( $n \times n$ ) ou  $n$  est le nombre de générateur.

Remarque : Cette réduction ne peut être utilisée qu'avec la supposition que les charges sont traitées comme des impédances constantes.

La puissance électrique :

La puissance électrique au nœud  $i$  du réseau électrique, qui est la puissance fournie par la machine  $i$ , est donnée par :



$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad i=1, 2, 3, \dots, n$$

Ou :

$$\overline{Y}_{ij} = Y_{ij} \angle \theta_{ij} = G_{ij} + B_{ij}$$

= l'admittance négative entre les nœuds i et j.

$$\overline{Y}_{ii} = Y_{ii} \angle \theta_{ii} = G_{ii} + B_{ii}$$

= l'admittance du nœud i

Les équations du mouvement sont alors données par :

$$\frac{2H_i}{\omega_m} \frac{d\omega_i}{dt} + D_i \omega_j = P_{mi} - \left[ E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij} \cos(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \right]$$

Et :

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_i - \omega_m \quad i=1, 2, \dots, n$$

Il convient de noter qu'avant la perturbation ( $t = 0$ )  $P_{mi0} = P_{ei0}$  ; De ce fait :

$$P_{mi0} = E_i^2 G_{ii0} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n E_i E_j Y_{ij0} \cos(\theta_{ij0} - \delta_{i0} + \delta_{j0})$$

L'indice 0 est employé pour indiquer les conditions avant le régime transitoire.

Car lors du changement des paramètres du réseau pendant le défaut,

### III-4-Schéma générale du réseau a étudié :

Le schéma ci-dessous, illustre qu'on doit étudier :

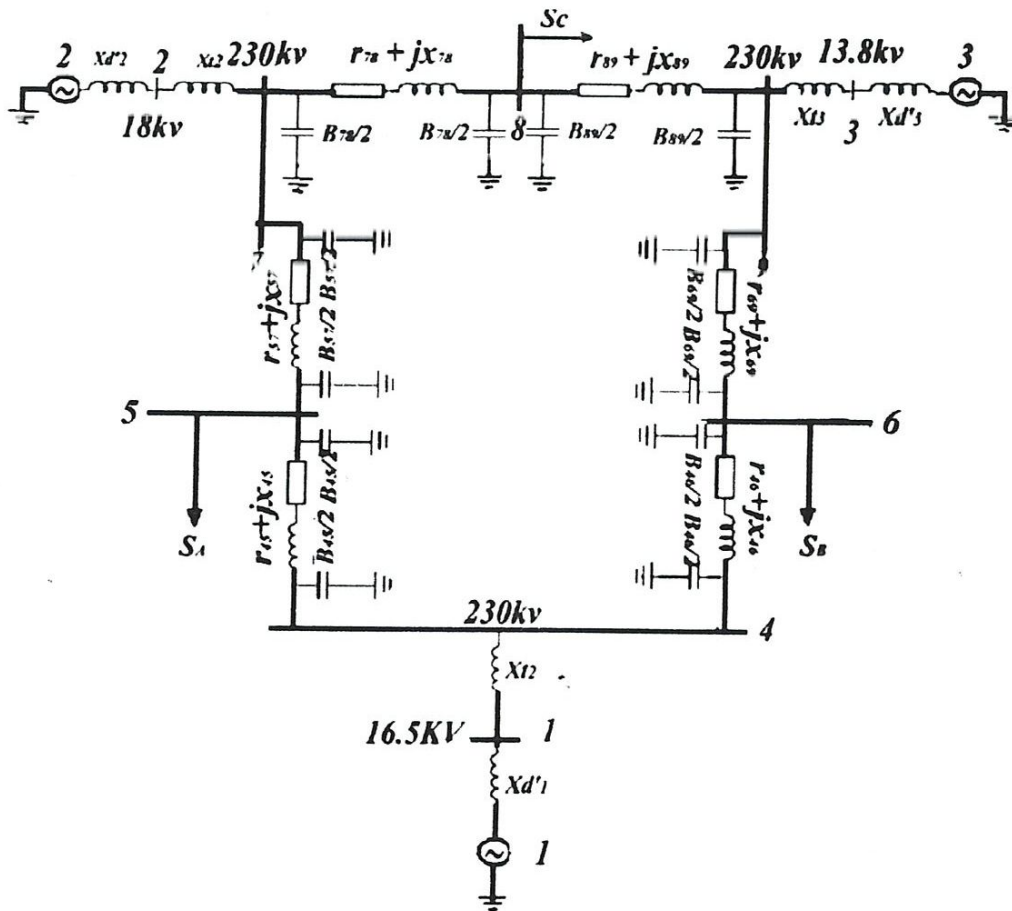


Figure (III-2) : Schéma du Réseau à Neuf Nœuds.

Les données de ce réseau sont en unités relatives et sont présentées dans les tableaux suivants :

### III-4-1-Générateurs et transformateurs :

Les Générateurs :

Générateurs \ Réactances internes	$x_d'$
Générateur 1	0.0608
Générateur 2	0.1198
Générateur 3	0.1813

Les Transformateurs :

Transformateurs \ Réactances	$x_t$
Transformateur 1	0.0576
Transformateur 2	0.0625
Transformateur 3	0.0586

Pour simplifier les calculs, on additionne les réactances internes des générateurs et réactances des transformateurs, on obtient ainsi :

	<b>r</b>	<b>x</b>
1-4	0	0.1184
2-7	0	0.1823
3-9	0	0.2399

**III-4-2-Les Lignes et Les Charges :**

Les Lignes :

Paramètres Lignes	r	X
4-5	0.0100	0.0850
4-6	0.0170	0.0920
5-7	0.0320	0.1610
6-9	0.0390	0.1700
7-8	0.0085	0.0720
8-9	0.0119	0.1008

Les charges :

Puissance Charges	P	Q
Charge A	1.2610	-0.5044
Charge B	0.8777	-0.2929
Charge C	0.9690	-0.3391

Après calculer, on aura les résultats, représentés en tableaux suivants :

**III-4-3-Les tensions et Les angles internes des Générateurs :**

$E_1 \angle \delta_{10}$	$1.0566 \angle 2.2717^\circ$
$E_2 \angle \delta_{20}$	$1.0502 \angle 19.7315^\circ$
$E_3 \angle \delta_{30}$	$1.0170 \angle 13.1752^\circ$

**III-4-4-Admittances des Shunts :**

		<b>G</b>	<b>B</b>
Charge A	<b>5-0</b>	<b>1.2610</b>	<b>-0.2634</b>
Charge B	<b>6-0</b>	<b>0.8777</b>	<b>-0.0346</b>
Charge C	<b>8-0</b>	<b>0.9690</b>	<b>-0.1601</b>
	<b>4-0</b>	<b>0</b>	<b>0.1670</b>
	<b>7-0</b>	<b>0</b>	<b>0.2275</b>
	<b>9-0</b>	<b>0</b>	<b>0.2835</b>

Le tableau suivant résumé les calculs qu'on a réalisés pour les admittances :

		<b>Tronçon</b>	<b>G</b>	<b>B</b>
Les Générateur	<b>G1</b>	1-4	0	-8.4459
	<b>G2</b>	2-7	0	-5.4855
	<b>G3</b>	3-9	0	-4.1684
Ligne De Transmission		4-5	1.3652	-11.6041
		4-6	1.9422	-10.5107
		5-7	1.1876	-5.9751
		6-9	1.2820	-5.5882
		7-8	1.6171	-13.6980
		8-9	1.1551	-9.7843
Admittance Des Shunts	Charge A	5-0	1.2610	-0.2634
	Charge B	6-0	0.8777	-0.0346
	Charge C	8-0	0.9690	-0.1601
		4-0	0	0.1670
		7-0	0	0.2275
		9-0	0	0.2835



Notons que quelque  $i$  et  $j$  on a :  $Y_{ij}=Y_{ji}$

Enfin la matrice admittance  $Y$  (avant le défaut) est représenté comme suit :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-j8.4459	0	0	j8.4459	0	0	0	0	0
2	0	-j5.4855	0	0	0	0	j5.4855	0	0
3	0	0	-j4.1684	0	0	0	0	0	j4.1684
4	j8.4459	0	0	3.3074 j30.3937	1.3652+ j11.6041	-1.9422+ j10.5107	-1.9422+ j10.5107	0	0
5	0	0	0	-1.3652+ j11.6041	3.8138- j17.8426	0	-1.1876+ j5.9754	0	0
6	0	0	0	-1.9422+ j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820+ j5.5882
7	0	j5.4855	0	0	-1.1876+ j5.9751	0	2.8047- j24.9311	-1.6171+ j13.6980	0
8	0	0	0	0	0	0	-1.6171+ j13.6980	3.7412- j23.9424	-1.1551+ j9.7843
9	0	0	j4.1684	0	0	-1.2820+ j5.5882	0	-1.1551+ j9.7843	2.4371- j19.2574

La matrice réduite du système avant le défaut est :

$$Y_{redavd} = \begin{bmatrix} 0.846 - j2.988 & 0.287 + j1.513 & 0.210 + j1.226 \\ 0.287 + j1.513 & 0.420 - j2.724 & 0.213 + j1.088 \\ 0.210 + j1.226 & 0.213 + j1.088 & 0.277 - j2.368 \end{bmatrix}$$

III-4-5-Calcul de la matrice admittance lors d'un défaut a la terre au jeu de barre sept (7) :

Cela peut être représenté par le schéma de la figure (III-3) :

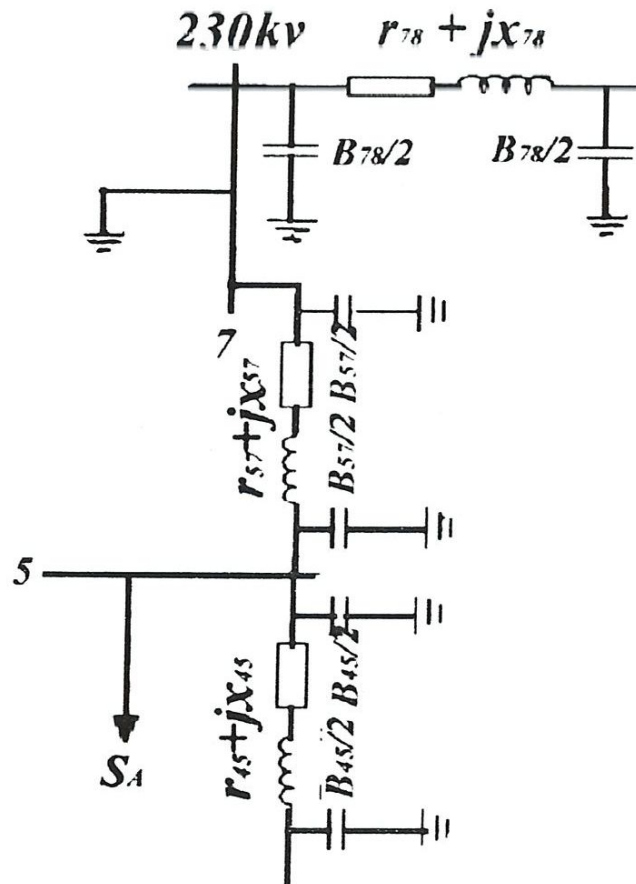


Figure (III-3) : Schéma de défaut a la terre au jeu de barre sept (7).

La conséquence de ce court-circuit est que la ligne et la colonne N°7 de la matrice admittance vont s'annuler.

Alors la nouvelle matrice calculée lors du défaut,  $Y$  (durant défaut), est de la forme suivante :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-j8.4459	0	0	j8.4459	0	0	0	0	0
2	0	-j5.4855	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	-j4.1684	0	0	0	0	0	j4.1684
4	j8.4459	0	0	3.3074- j30.3937	-1.3652+ j11.6041	-1.9422+ j10.5107	0	0	0
5	0	0	0	-1.3652+ j11.6041	3.8138- j17.8426	0	0	0	0
6	0	0	0	-1.9422+ j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820+ j5.5882
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	3.7412- j23.6424	-1.1551+ j9.7843
9	0	0	j4.1684	0	0	-1.2820+ j5.5882	0	-1.1551+ j9.7843	2.4371- j19.2574

La matrice réduite lors du défaut est :

$$Y_{reddéf} = \begin{bmatrix} 0.657 - j3.816 & 0.000 + j0.000 & 0.070 + j0.631 \\ 0.000 + j0.000 & 0.000 - j5.486 & 0.000 + j0.000 \\ 0.070 + j0.631 & 0.000 + j0.000 & 0.174 - j2.796 \end{bmatrix}$$

### III-4-6-Calcul de la matrice admittance après débranchement du défaut :

Pour diminuer les effets du court-circuit, nous avons débranché la ligne (5-7) ce que fait que le circuit ressemble maintenant au schéma suivante :

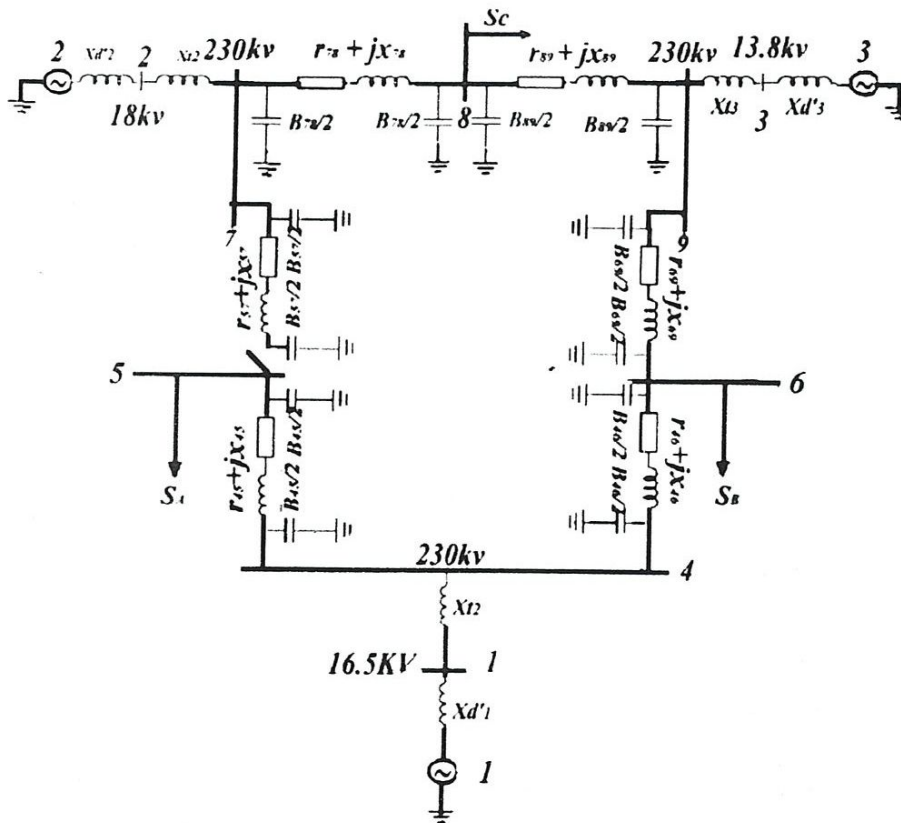


Figure (III-4) : Schéma du réseau après débranchement du défaut.

La matrice admittance après le défaut,  $Y$  (après défaut), est la forme suivante :

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	-j8.4459	0	0	j8.4459	0	0	0	0	0
2	0	-j5.4855	0	0	0	0	j5.4855	0	0
3	0	0	-j4.1684	0	0	0	0	0	j4.1684
4	j8.4459	0	0	3.3074- j30.3937	-1.3652+ j11.6041	-1.9422+ j10.5107	0	0	0
5	0	0	0	-1.3652+ j11.6041	2.6262- j11.8675	0	0	0	0
6	0	0	0	-1.9422+ j10.5107	0	4.1019- j16.1335	0	0	-1.2820+ j5.5882
7	0	0	0	0	0	0	1.6171- j8.9559	0	0
8	0	0	0	0	0	0	-1.6171- j13.6980	3.7412- j23.6424	-1.1551+ j9.7843
9	0	0	j4.1684	0	0	-1.2820+ j5.5882	0	-1.1551+ j9.7843	2.4371- j19.2574



La matrice réduite après le débranchement du défaut est :

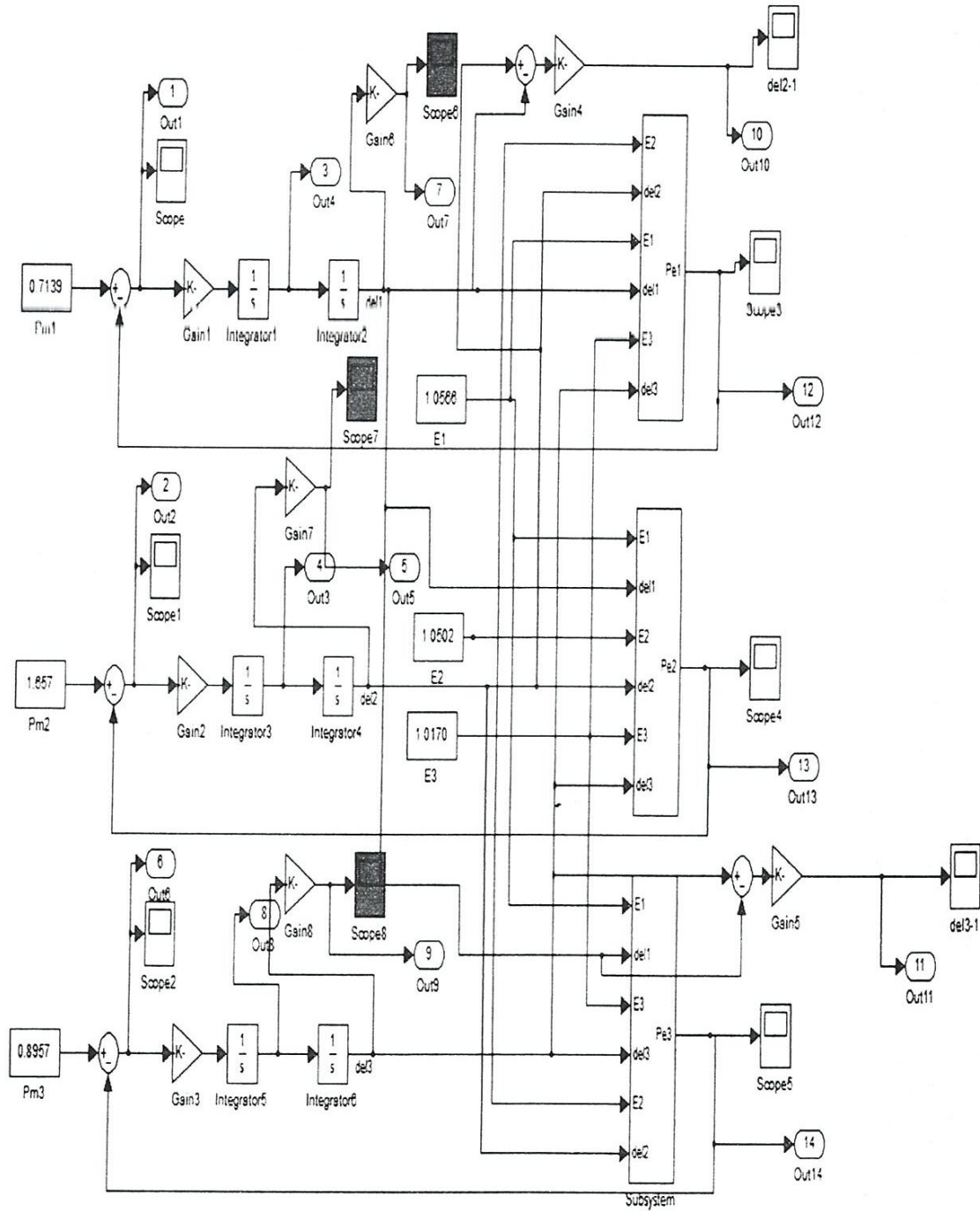
$$Y_{redapd} = \begin{bmatrix} 1.181 - j2.229 & 0.138 + j0.726 & 0.191 + j1.079 \\ 0.138 + j0.726 & 0.389 - j1.953 & 0.199 + j1.229 \\ 0.191 + j1.079 & 0.199 + j1.229 & 0.273 - j2.342 \end{bmatrix}$$

### III-5-Modélisation par SIMULINK :

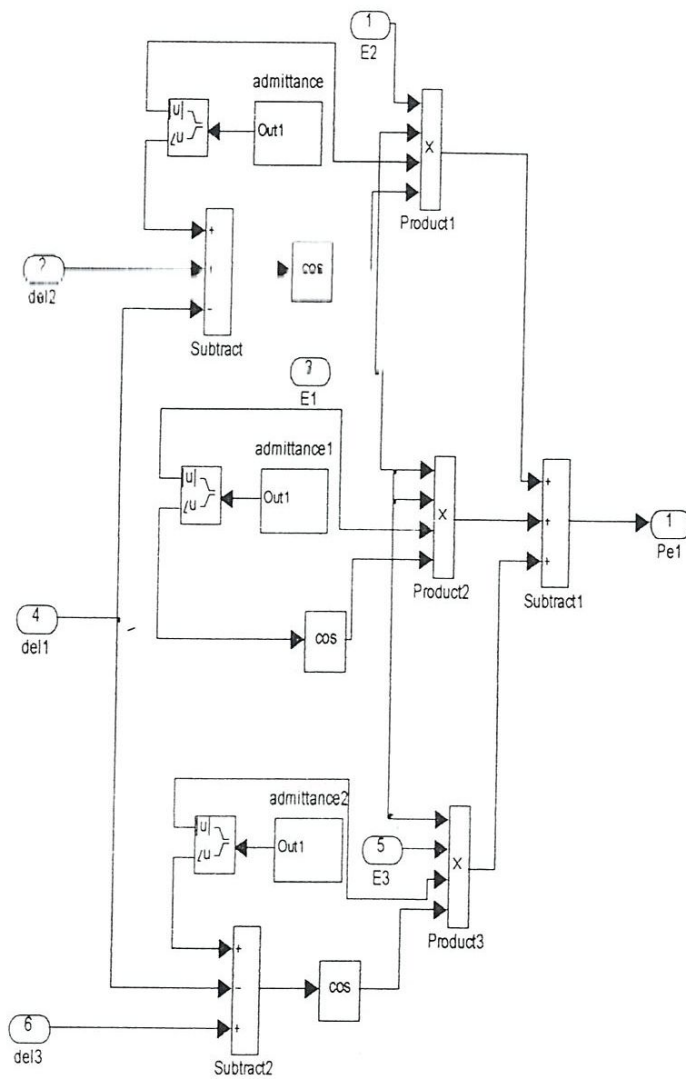
#### III-5-1- Simulation du réseau à Neuf Nœuds :

En utilisant un Simulink MATLAB, et pour des valeurs différentes de  $t_d$ , on trace les courbes  $\delta_i(t)$  et  $\delta_{ij}(t)$  qui sont respectivement, les courbe de variation des angles par rapport au temps et les courbes des angles différentiels entre l'angle  $\delta_i$  et l'angle  $\delta_j$  et tracer les courbes de la puissance électrique par rapport au temps  $P_e(t)$  et les courbes de la puissance d'accélération par rapport au temps  $P_a(t)$ .

III-5-2-Schéma « simulink » de Réseau à Neuf Nœuds :

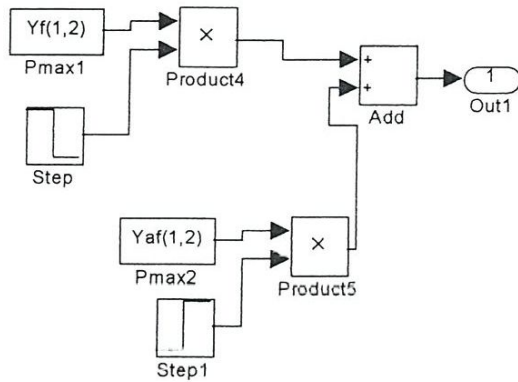


III-5-3-Schéma de Bloc simulink de calcul de la puissance électrique :

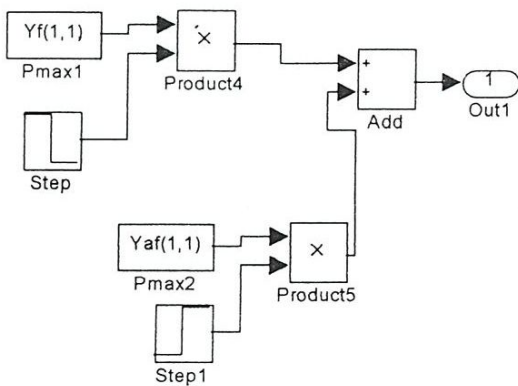


## III-5-4-les schémas de bloc simulink de calcul des admittances :

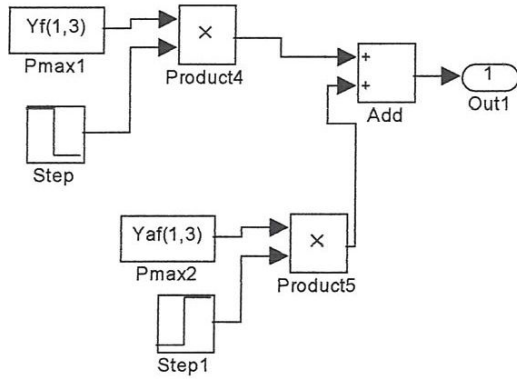
a) Admittance :



b) Admittace1 :



c)Admittance2 :



III-5-5-Les courbe de « simulink » :

Pour  $t_d=0.10$  seconde :

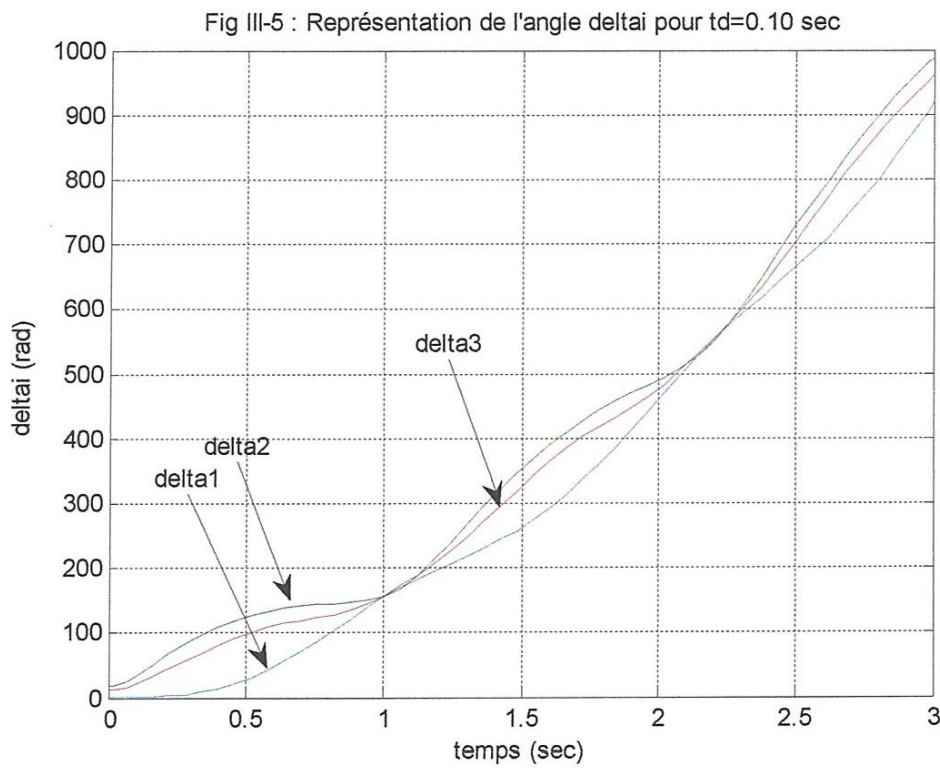
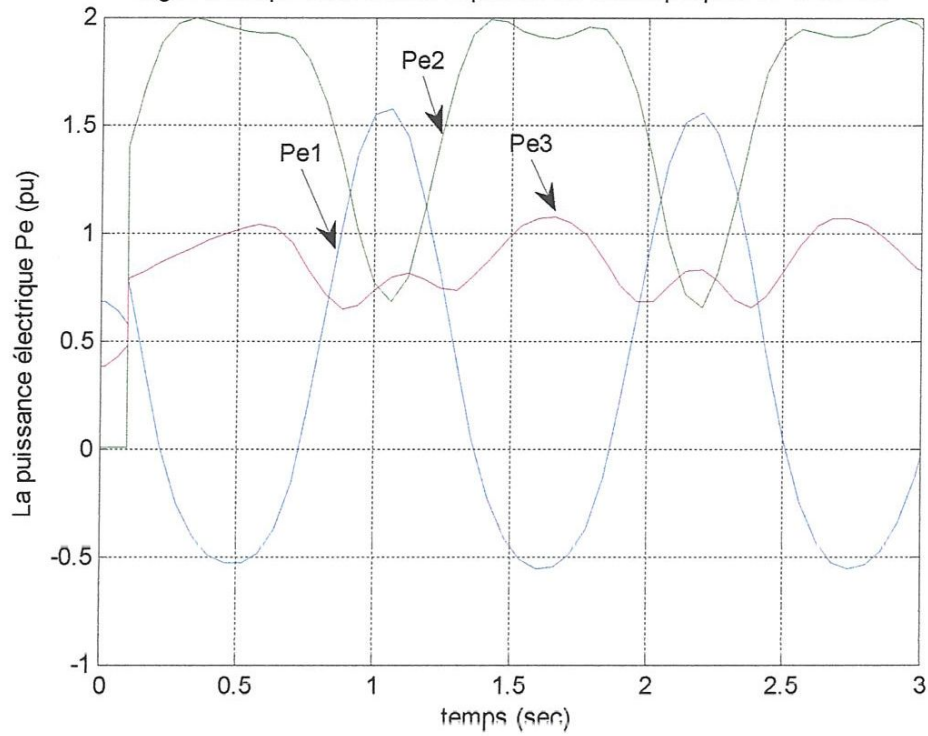
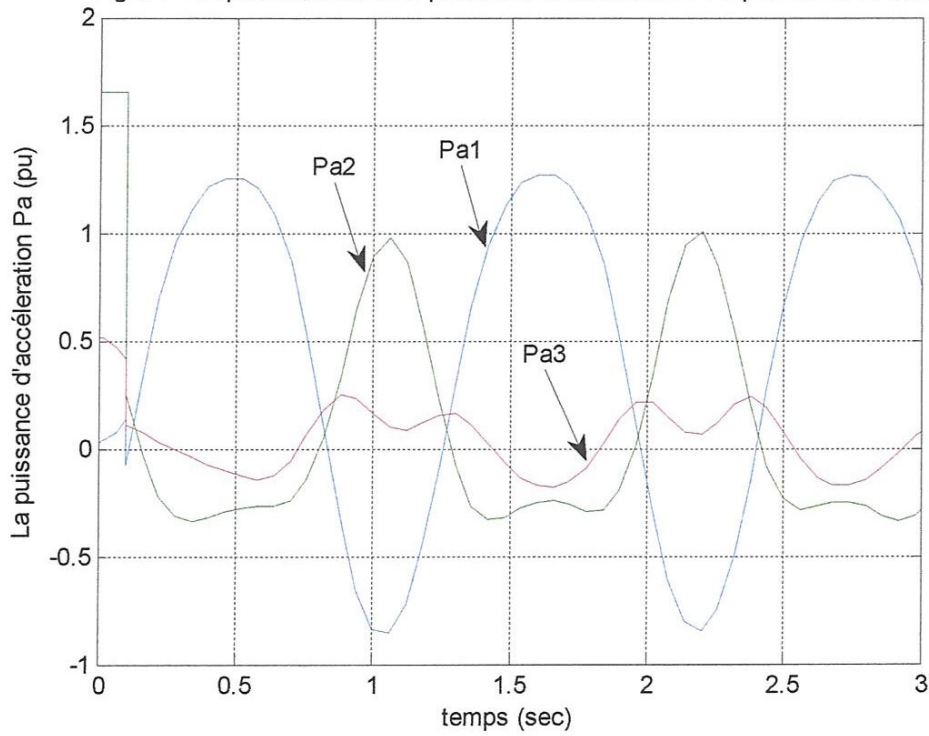
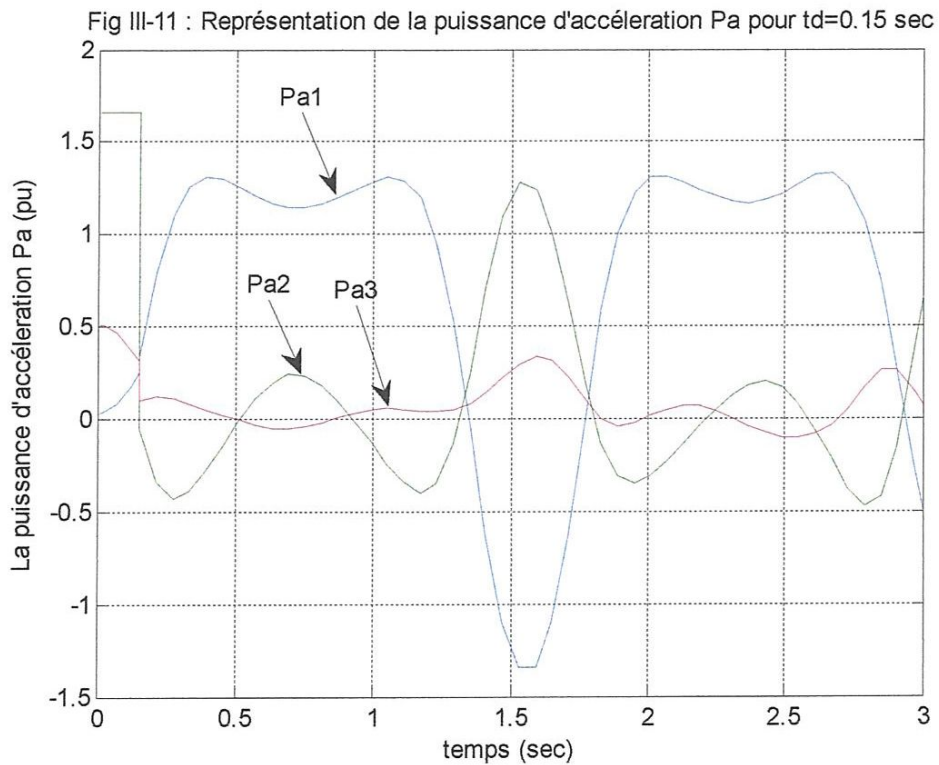
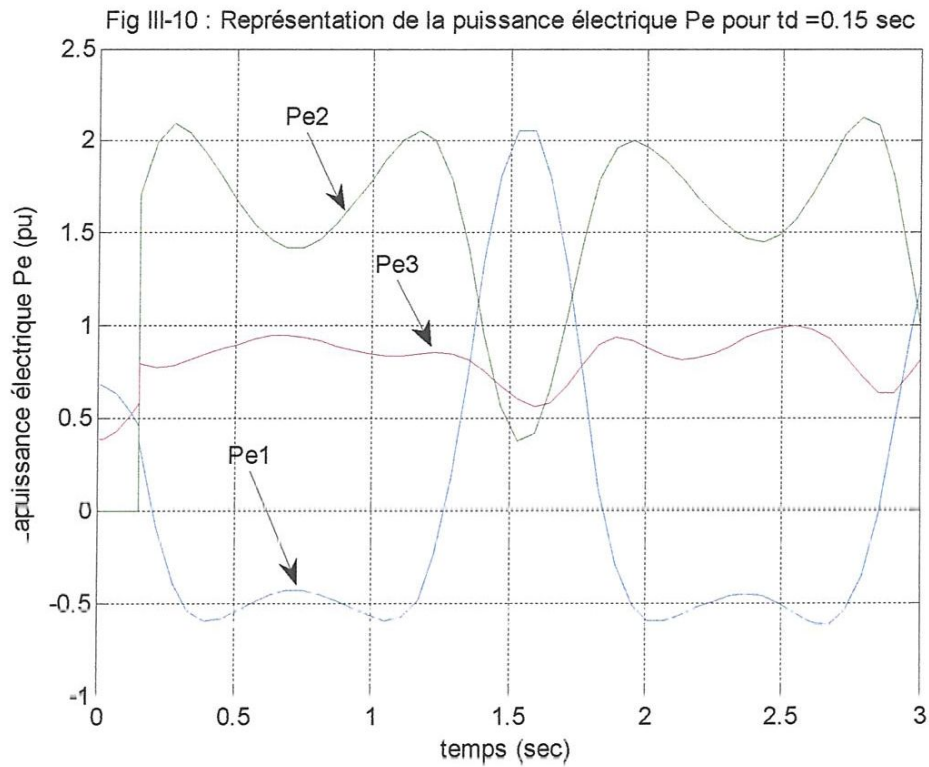
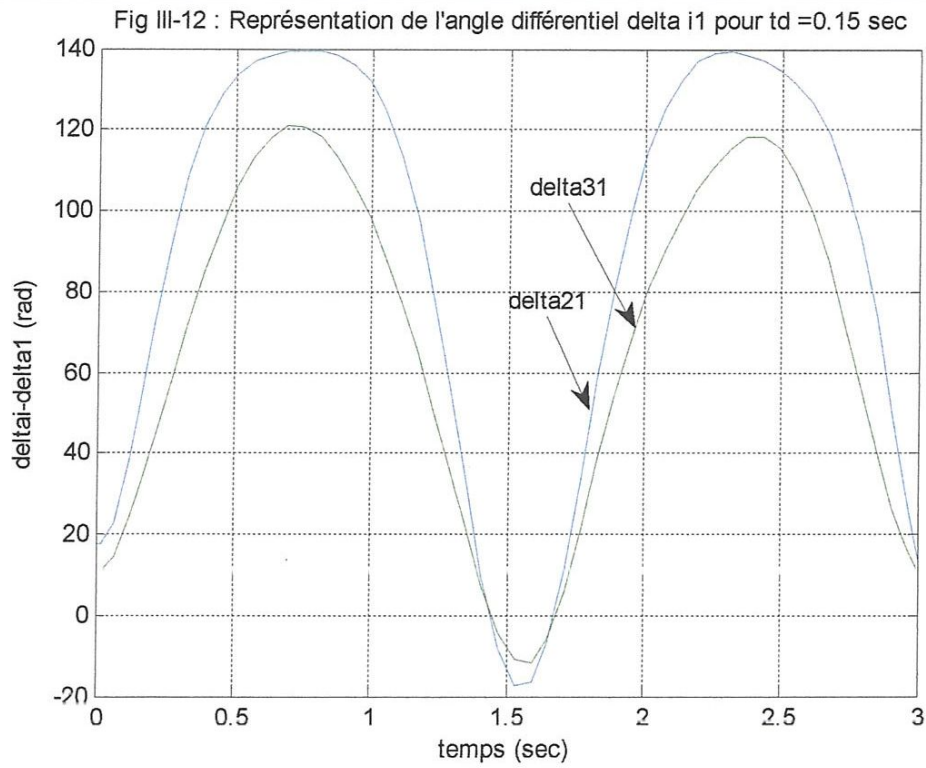


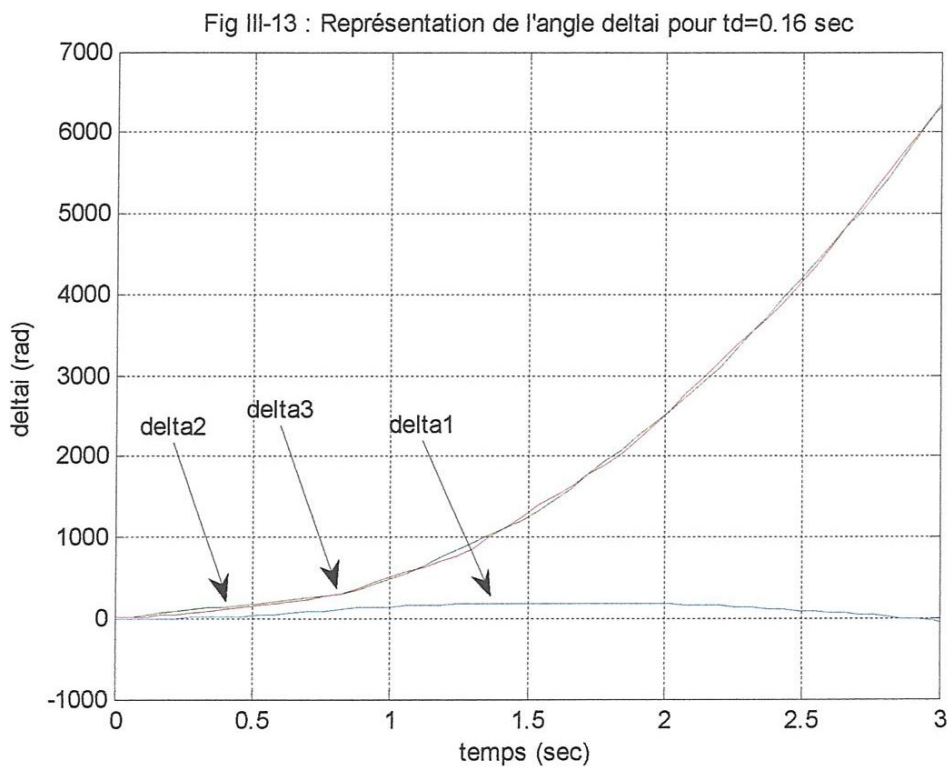


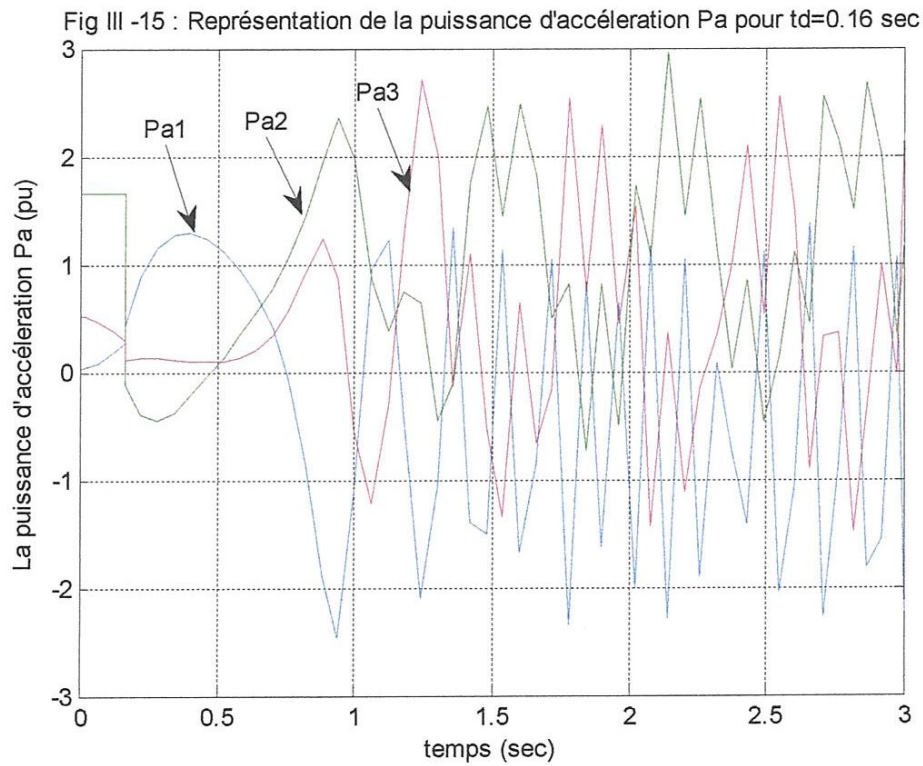
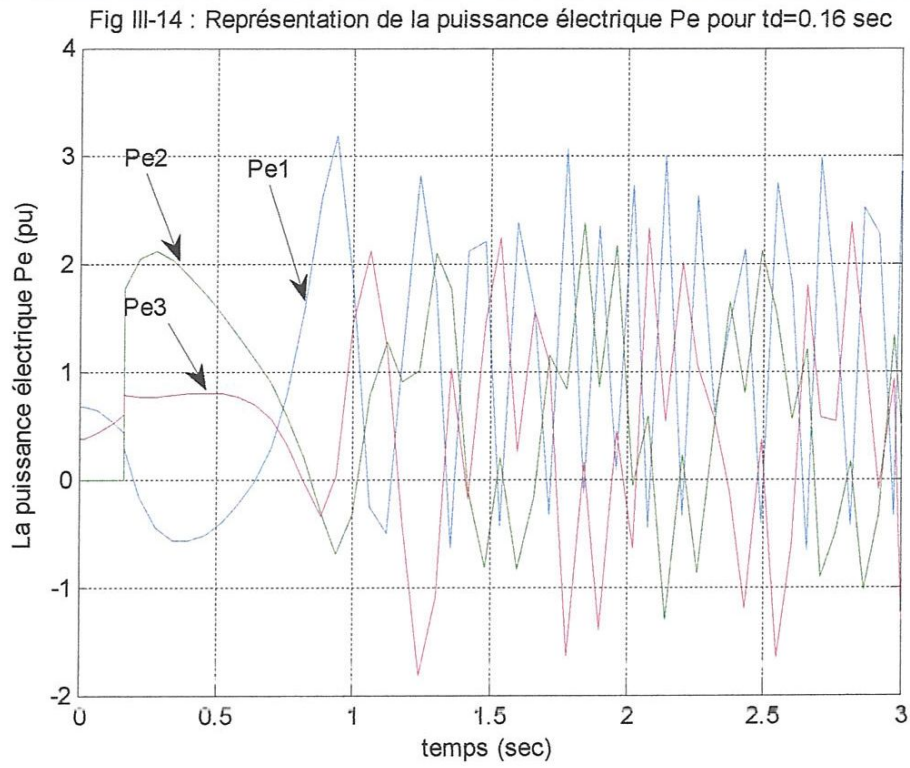
Fig III-6 : Représentation de la puissance électrique pour  $t_d=0.10$  secFig III-7 : Représentation de la puissance d'accélération  $P_a$  pour  $t_d=0.10$  sec



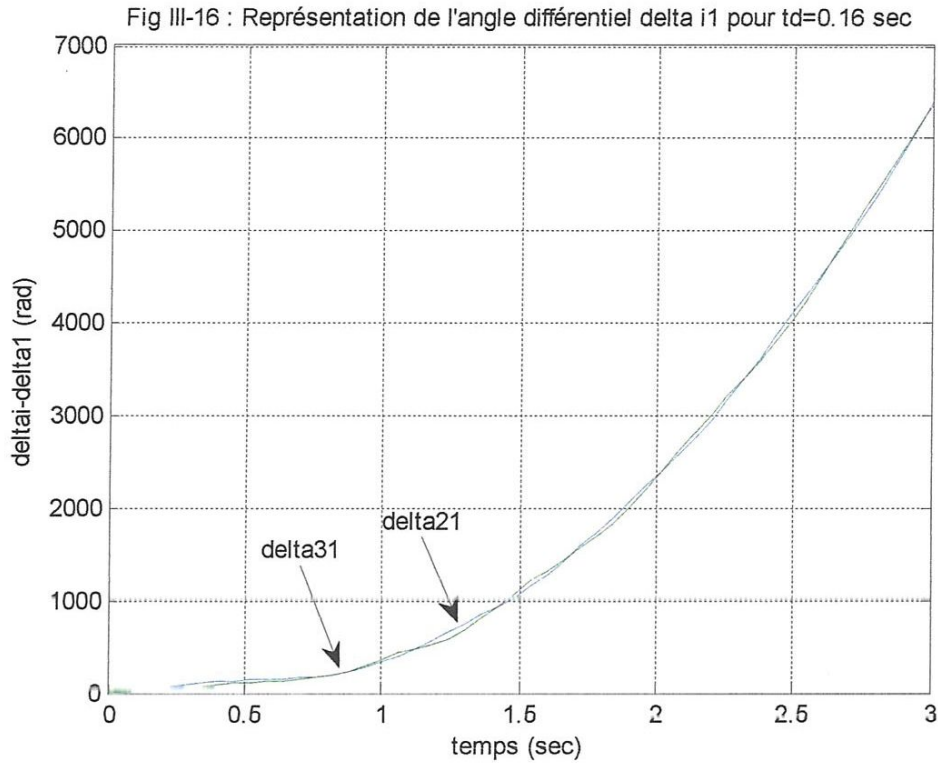


Pour  $t_d = 0.16$  seconde :









Dans les courbes des angles différentiels en fonction du temps  $\delta_{ij} = f(t)$  pour  $t_d=0.10$  et  $t_d=0.15$  seconde la différence ne dépasse pas  $180^\circ$ , pour le temps de court-circuit  $t_d=0.16$  seconde le système se divise deux systèmes (machines stables et machines instables). On peut constater que le temps limite de débranchement du défaut considéré est entre 0.15 et 0.16 secondes.



**III-6-Concluſion :**

Pour l'étude de la stabilité transitoire d'un système multi-machine, nous avons développé un modèle complet en utilisant Simulink. Qui est fondamentalement représenté par les fonctions de transfert et de schéma fonctionnel des équations de système.

Les blocs sont disponibles dans la bibliothèque de Simulink et également dans d'autres boîtes à outils compatibles comme Power System Blockset. Ainsi le modèle de Simulink est non seulement plus adapté pour une étude analytique d'un système typique, mais peut également incorporer les nouveaux outils pour l'optimisation des paramètres. Un modèle de Simulink est très facile à utiliser, avec une capacité interactive énorme. Typiquement, pour l'étude de la stabilité transitoire le modèle facilite la solution rapide et précise des équations non-linéaires à savoir l'équation d'oscillation. L'utilisateur peut facilement choisir ou modifier le type du « solver », les tailles d'étape, la tolérance, la période de simulation, les options etc.... Avec l'aide d'un menu approprié de Simulink. Tout paramètre au sein de n'importe quel bloc ou sous-ensemble du modèle peut être facilement modifié par simple commande du logiciel MATLAB pour suivre le changement du réseau original du système dû au défaut ou à une action de correction.

---

CONCLUSION

GENERALE.

Ce travail nous a permis de faire plusieurs conclusions concernant le fonctionnement du réseau stable et instable, et on a pu voir que l'étude de la stabilité constitue une grande partie de la planification des réseaux électriques et son amélioration ne fait qu'augmenter les performances du réseau tout en diminuant les pertes ce qui rend le transport de l'énergie électrique plus économique.

Comme solutions d'amélioration de la stabilité, on propose :

- Augmenter la constante d'inertie des générateurs ce qui rend les rotors plus difficiles à accélérer lors de l'apparition d'une perturbation, même si cela revient très cher.
- Augmenter la tension du système ce qui augmentera l'amplitude de la puissance électrique par rapport à la puissance mécanique et de nous donner une grande marge de stabilité.
- Installation de protection et disjoncteurs à réponse rapide.
- Installation d'un système de valve dans les turbines à vapeur : par le contrôle rapide de puissance mécanique durant et après le défaut, l'accélération du rotor peut être diminuée. Cette méthode présente l'inconvénient de ne pas être possible à appliquer dans les centrales de production d'énergie nucléaire pour des raisons de sécurité, elle n'est pas utilisée largement puisqu'elle soumet les turbines à d'énormes contraintes.
- Installation de résistances de freinage qui sont des résistances shunt connectées par les disjoncteurs après un défaut proche d'un générateur. La charge électrique de la machine est dès lors plus grande et le risque de perdre le synchronisme est réduit.

---

# BIBLIOGRAPHIE

- 1) Cahier de cours du module « Régime transitoire » de master 2 électrotechnique –M . BOUDFEL.
- 2) Cahier de cours du module « Modélisation des système d'énergie électrique » de master 2 électrotechnique –M . GOUAIDIA SAID.
- 3) Cahier technique N°185 – stabilité dynamique des réseaux électriques industriels- B. de METZ-Noblat,G.Jeanjean-Schneider electric- janver 1997.
- 4) Elements of power system analysis- Wiliam D.Stevenson,JR-Mc Graw Hill international editions – 1982.
- 5) Modeling and analysis of electric power systems- Goran Anderson powrc system laboratory ETH Zurich-mars 2004.
- 6) Analyses numériques pour ingenious- Jaques Gauven- Edition de l'école polytechnique de Montréal.
- 7) Eléments électrotechniques pour la compréhension des réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique (CD système d'énergie électrique- guide de référence) ELEC International Symposium Edition 1998.
- 8) Power-system – stabilité – and- control-djvi.
- 9) Conference on modeling and simulation of electrical systems- centre universitaire de Guelma -07&08 nov 1995.
- 10) Mémoire étude de la stabilité des réseaux électriques 2004.
- 11) MATLAB/Simulink-based transient stability analysis of a multimachine power system.



---