

12/04

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

DEPARTEMENT GENIE ELECTRIQUE
OPTION : AUTOMATIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

PROJET DE FIN D'ETUDE

Thème

Commande Décentralisée par Logique Floue
Appliquée à un Réseau Multi-Machines

Dirigé par :

D. BOUKHETALA

F. BOUDJEMA

présenté par :

HATTAB Mohamed

Ecole Nationale Polytechnique
10 Avenue Hassen badi, B. P.182, El-Harrach, Alger.

إن العمل المقدم من خلال هذه المذكرة تتمثل في تأليف منظم لامركزي باستعمال المنطق غير الواضح. لهذا الغرض، قمنا في بادئ الأمر باستخراج النموذج الرياضي العام للاخطي للشبكة الكهربائية، و قمنا بدراسة حالة خاصة تتمثل في شبكة من ثلاث محطات توليد. القسم الثاني من المذكرة كان مخصصا للتحكم غير الواضح الذي قمنا بتطبيقه في القسم الثالث و الأخير من المذكرة على الشبكة الكهربائية المدروسة.

الكلمات المفتاحية: الشبكة الكهربائية، المنطق غير الواضح، التحكم اللامركزي.

Résumé :

Le travail présenté dans ce mémoire consiste en une synthèse d'une loi de commande décentralisée par logique floue. Pour cela, nous commençons par développer un modèle non linéaire d'un réseau électrique à trois machines. La deuxième partie est dédiée à la commande par logique floue, qui sera appliquée ensuite à la commande du réseau électrique étudié.

Mots clés : réseau électrique, logique floue, commande décentralisée.

Abstract:

This work consists of the design of a decentralized controller by using fuzzy logic theory. First, the nonlinear mathematical model of a three machines power system is developed. The second part is developed to the fuzzy logic control, which will be applied to the control of the studied power system.

Key words: power system, fuzzy logic, decentralized control.

Remerciements

Ce travail a été effectué au sein du laboratoire de commande des Processus (LCP) de l'Ecole Nationale Polytechnique (ENP) sous la direction des Monsieur D. Boukhetala, Chargé de cours à l'ENP et Monsieur F. Boudjema, professeur à l'ENP, qu'ils trouvent ici l'expression de toute ma gratitude pour les conseils avisés et l'encouragement constant qu'ils n'ont cessés de prodiguer tout au long de cette étude.

Que mes amis, H. Labdellaoui et A. Loucif trouvent ici toute ma gratitude pour leur encouragement moral.

Que tous ceux qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre soient assurés de ma reconnaissance. Je remercie mes parents et toute la famille, ainsi que le personnel de la bibliothèque de l'ENP.

Enfin, je ne pourrais terminer ces remerciements sans une pensée à mes enseignants, du lycée de Bordj El Bahri.

Que les autres enseignants, qui sont à l'origine de mon savoir, reçoivent mes vifs remerciements.

Sommaire



Introduction générale	1
Chapitre 1 : Réseaux Electrique	
Modélisation et Stabilité	
1.1 Introduction	3
1.2 Présentation Générale	4
1.3 Modélisation	5
1.3.1. Générateur	5
1.3.2. Modèle de la partie mécanique.	5
1.3.3. Modèle de la partie électrique.	6
1.4. Lignes de transmission	11
1.4.1. Repère D-Q.	11
1.4.2. Calcul e la matrice admittance.	13
1.4.3. Calcul de la matrice réduite.	13
1.4.4. Calculs des Courants	14
1.5. Régulateurs de tension, Stabilisateurs et régulateurs de vitesse.	15
1.6. Recapitulatif	17
1.7. Stabilité des réseaux électriques	18
1.8. Simulation	20
1.9. Conclusion	21
Chapitre 2 : Logique Floue	
Modélisation et Commande	
2.1 Introduction	24
2.1.1 Bref historique	25
2.2 Bases Mathématiques de la Logique Floue	25

2.2.1. sous-ensemble floue	25
2.2.2. caractéristique des sous-ensembles flous	27
2.2.3. Variable linguistique floue.	28
2.2.4. Opérateur de la logique floue.	28
2.2.5. Logique floue.	30
2.2.6. Règles floues	31
2.2.7. Raisonnement.	32
2.3. Modélisation par logique floue	33
2.3.1. Introduction	33
2.3.2. structure générale d'un modèle flou	34
2.4. Commande par logique floue	37
2.4.1. Type de régulateurs	37
2.4.2. Synthèse des régulateurs flous	40
2.4.3. Les avantages	41
2.5. Conclusion	41
Chapitre 3 :	La commande décentralisée par logique floue
	Application au Réseau Multi-Machine
3.1. Introduction	42
3.2. Commande décentralisée	43
3.3. Récapitulatif du modèle dynamique du système multi-machine	43
3.4. Application et simulation	45
3.5. Conclusion	50
Conclusion Générale	59
Bibliographie	61
Annexes	63
Annexe 1 : les paramètres du réseau à trois machines.	63
Annexe 2 : Normes et Conormes Triangulaire.	69

Introduction Générale

De nos jours, les problèmes liés au fonctionnement des systèmes complexes ont pris une importance considérable. Vu leur caractère complexe, leur taille considérable et le nombre important de variables intervenant dans leurs fonctionnements, les méthodes de commande classiques dites centralisées sont en général difficile à synthétiser et parfois pratiquement irréalisables.

Pour remédier à ces problèmes, une nouvelle structure de commande a été développée. Dans cette structure, dite décentralisée [SIL 76], [WAN 95] le système est décomposé en plusieurs sous systèmes interconnectés chacun commandé par une station de commande locale qui n'a accès qu'aux variables intervenant aux niveaux du sous-système.

Parmi les techniques modernes connues par leurs robustesses, nous pouvons citer : la commande par mode de glissement [MAT 88] et la commande par logique floue [LEE 90]. Cette dernière technique a été appliquée avec succès dans divers processus industriels. Dans cette approche, différentes méthodes pour la synthèse des régulateurs flous ont été proposées. Parmi ces méthodes, on peut citer celle de Takagi-Sugeno [WAN 99], [CHEN 99] basé sur l'extraction de règles floues à partir d'un ensemble de données entrée/sortie du système et celle de Mamdani, la différence principale entre la méthode de Mamdani et la méthode de Takagi-Sugeno est dans l'étape d'inférence, la fonction d'appartenance de la sortie pour la méthode de Sugeno est linéaire ou constante.

Dans le présent travail, nous présentons la méthode de Mamdani appliquée à un réseau d'énergie électrique. Vu son caractère interconnecté et le nombre de variables intervenant dans son fonctionnement, il semble être parmi les meilleurs exemples de systèmes complexes interconnectés [AND 77].

Le présent mémoire est structuré en trois chapitre :

Le premier chapitre concerne la modélisation des réseaux électrique en considérant une représentation à deux axes pour les machines synchrones. De plus, les différents types de stabilité rencontrés dans les études des réseaux électriques, à savoir la stabilité statique, la stabilité dynamique et la stabilité transitoire, sont présentés et l'accent est mis sur l'étude de la stabilité transitoire sous l'effet des perturbations rapides et d'amplitude importante. Des simulations du système en boucle ouverte, montrant les effets d'un court-circuit triphasé et de l'accroissement de la puissance mécanique, sont présentées à la fin de ce chapitre.

Le deuxième chapitre traite la théorie de la logique floue, ainsi que son utilisation dans la modélisation et la commande des systèmes dynamiques. Les notions élémentaires de la logique floue sont d'abord présentées suivies par leur utilisation dans la structure de différents types de régulateurs flous.

Dans le troisième chapitre, nous exposons la méthode de Mamdani. Cette méthode est utilisée pour la synthèse de régulateur flou décentralisé. Pour valider cette méthode, une application sur un réseau électrique de trois machines est effectuée et des résultats de simulation avec des tests de perturbations sont présentés.

Chapitre 1

Réseaux Electriques

Modélisation et Stabilité

1.1 Introduction

Le réseau électrique est un système dynamique décrit généralement par un modèle mathématique complexe est de dimension élevée. Dans la plupart des cas, le réseau électrique est caractérisé par plusieurs sous-systèmes géographiquement éloignés [AND 77].

Les éléments constituant un réseau électrique sont en général:

- Stations de génération de la puissance électrique.
- Station de transformation ou de distribution de l'énergie électrique générée, vers les consommateurs (usines, cités, éclairage public...)
- Les consommateurs utilisant la puissance électrique dans leurs champs de travail
- Les lignes de transmission, qui acheminent l'énergie électrique vers les consommateurs.

Vu de cette manière, le réseau électrique est un système fortement interconnecté, qui nécessite un traitement délicat et compliqué aussi bien sur le plan de planification que sur celui de l'optimisation et de la commande.

A cause de la structure interconnectée et l'éloignement géographique des sous-système, la décentralisation du réseau électrique pour l'étude et la conception s'impose. Ainsi, dans la suite de ce travail, l'approche décentralisée sera utilisée.

Le présent chapitre sera consacré à la modélisation du réseau électrique en commençant par une description succincte de ses différents composants. Un modèle non linéaire assez complet sera obtenu pour l'étude de la stabilité du réseau électrique sous ses différentes formes et l'accent sera mis sur la stabilité transitoire.

1.2 Présentation Générale

La figure (1.1) montre un type de réseau électrique multi-machines. Les générateurs sont présentés par des tensions après une impédance, connectés aux lignes de transmission par des nœuds dits "nœuds générateurs".

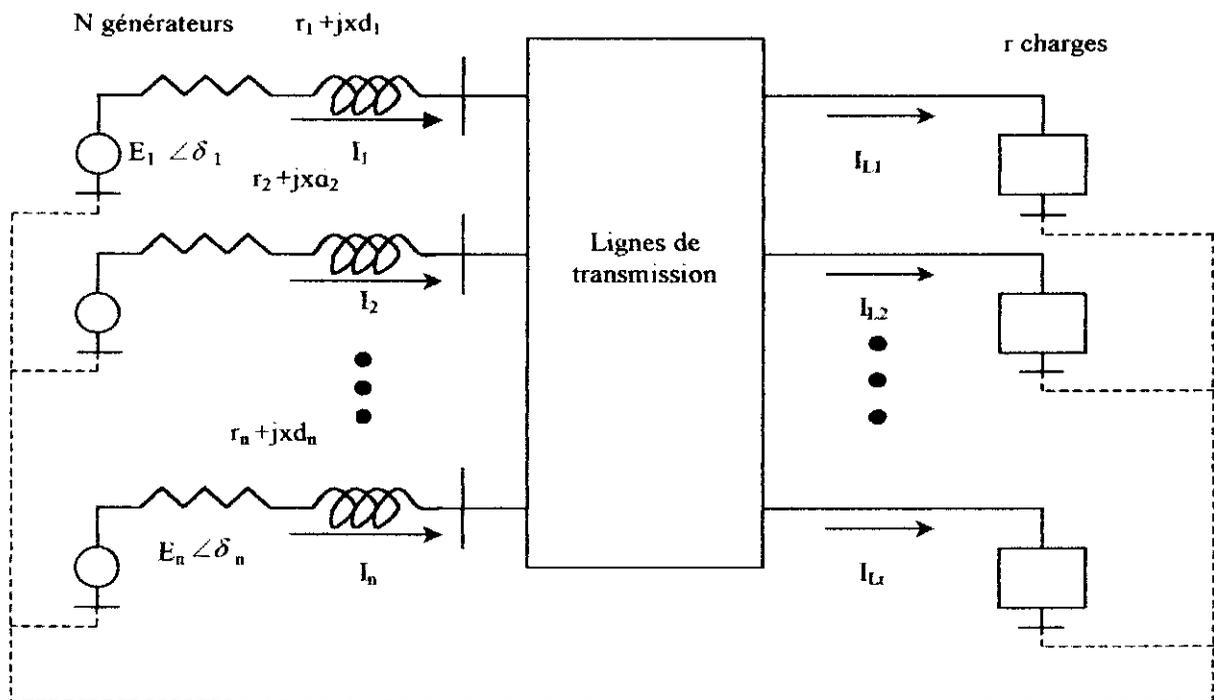


Fig.I.1 Schéma représentatif d'un réseaux électrique multi-machine

1.3 Modélisation

Dans cette section, nous allons modéliser quelques constituants des réseaux électriques, à savoir, les générateurs, les lignes de transmission, les charges, et montrer quelques types de régulateurs utilisés.

1.3.1 Générateurs

Les générateurs, dits aussi alternateurs, sont des machines synchrones utilisées pour la génération du courant électrique à partir de la puissance mécanique fournie par des turbines ou autres dispositifs. Les alternateurs possèdent deux parties : une partie statique dite stator et une partie tournante dite rotor. Ces parties-ci sont équipées d'un ensemble de bobines bien placées utilisées pour la génération d'un courant électrique de forte puissance à partir d'un champ magnétique et d'une puissance mécanique fournie.

Aussi, l'alternateur peut être vu d'une autre manière, nous constatons bien qu'il comporte une partie mécanique et une partie électrique.

1.3.2 Modèle de la partie mécanique

L'équation mécanique de la machine synchrone est bien déterminée. Pour l'obtenir, nous utilisons les trois hypothèses de base suivantes :

- La vitesse du rotor de la machine ne varie pas trop par rapport à celle du synchronisme.
- La puissance mécanique reste constante sans l'action du gouverneur.

La première hypothèse permet d'égaliser la puissance mécanique et le couple en grandeurs relatives.

Les courants induits dans les bobines du rotor génèrent un couple qui s'oppose au mouvement relatif du rotor par rapport à la vitesse du synchronisme.

De ces hypothèses, nous pouvons formuler les deux équations différentielles de première ordre suivantes :

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_i(t) - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i(t) = -\frac{D}{2H}(\omega_i(t) - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi} - P_{ei}(t)) \end{cases} \quad (1.1)$$

avec :

δ : l'angle électrique

ω : la pulsation instantanée, vitesse instantanée,

$\omega_0 = 2\pi f_0$: la pulsation de base, vitesse de synchronisme,

f_0 : la fréquence de base,

H : constante d'inertie électrique,

D : coefficient d'amortissement

P_m : puissance mécanique,

P_e : puissance électrique générée.

1.3.3 Modèle de la partie électrique

Le modèle de la partie électrique est trop compliqué à établir à cause de la distribution des effets magnétiques dans l'espace et dans le temps. Ceci est dû, à la fois, à la rotation du rotor et à la géométrie des bobines et leurs emplacements dans la machine.

□ Transformation de Park

La transformation de Park simplifie la modélisation des machines à courant alternatif en substituant les enroulements de phases a, b, c, fixés par rapport au stator, par deux enroulements d , pour l'axe direct et, q pour l'axe en quadrature, tournant à la même vitesse que le rotor.

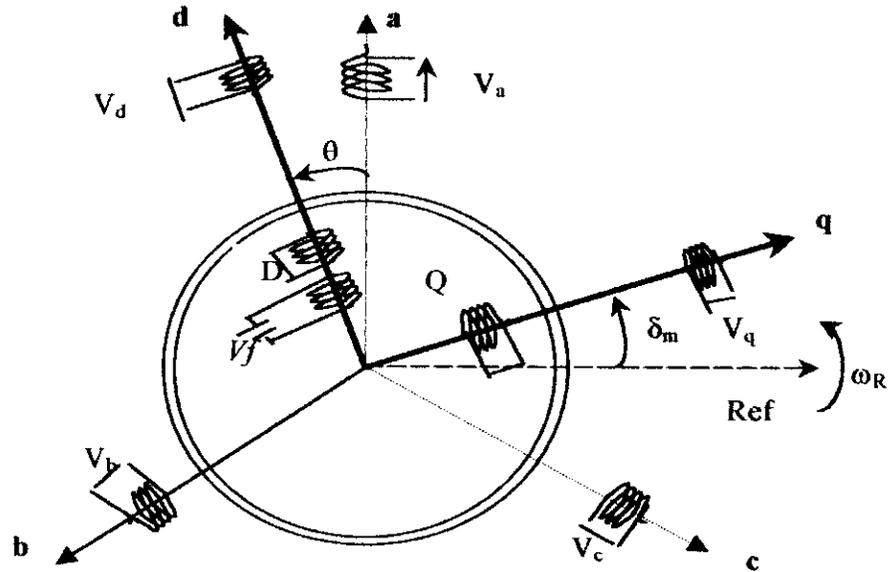


Fig I.2 : Principe de la transformation de Park.

La matrice de transformation de Park s'écrit [OUR 95]

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{pmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \sin \theta & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{pmatrix} \quad (1.2)$$

□ **Équations électriques de la machine**

Appliquée aux équations électriques de la machine, la transformation de Park conduit aux équations suivantes [OUR 95]:

$$\begin{aligned}
 V_d &= -r I_d - \omega \lambda_q - \frac{d\lambda_d}{dt} \\
 V_q &= -r I_q + \omega \lambda_d - \frac{d\lambda_q}{dt} \\
 V_f &= r_f I_f + \frac{d\lambda_f}{dt} \\
 0 &= r_D I_D + \frac{d\lambda_D}{dt} \\
 0 &= r_Q I_Q + \frac{d\lambda_Q}{dt}
 \end{aligned}
 \tag{1.3}$$

avec :

V_d, V_q et V_f : les tensions aux bornes des enroulements d, q et f ;
 $\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_D, \lambda_Q$: les flux dans les enroulements d, q, f, D et Q ;
 I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q : les courants dans les enroulements d, q, f, D et Q ;
 r, r_f, r_D, r_Q : les résistances des enroulements d, q, f, D et Q ;
 Les flux $\lambda_d, \lambda_q, \lambda_f, \lambda_D$ et λ_Q sont liés aux courants I_d, I_q, I_f, I_D, I_Q par la relation matricielle
 Suivante :

$$\begin{bmatrix} \lambda_d \\ \lambda_q \\ \lambda_f \\ \lambda_D \\ \lambda_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & kM_f & kM_D & 0 \\ 0 & L_q & 0 & 0 & kM_Q \\ kM_f & 0 & L_f & M_R & 0 \\ kM_D & 0 & M_R & L_D & 0 \\ 0 & kM_Q & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \\ I_f \\ I_D \\ I_Q \end{bmatrix}
 \tag{1.4}$$

Avec :

L_d, L_q, L_f, L_D, L_Q : les inductances propres des enroulement d, q, f, D, Q;
 M_R : l'inductance mutuelle entre les enroulements f et D;
 M_f, M_D et M_Q : les inductances mutuelles entre les enroulements statoriques et les enroulements rotoriques f, D et Q
 k : coefficient constant induit par la transformation de Park, $k=(3/2)^{1/2}$.

□ **Hypothèses simplificatrices**

Afin de donner un modèle simplifié du générateur, les hypothèses suivantes seront considérées

- La vitesse du rotor est toujours proche de celle de synchronisme de telle manière qu'elle peut être comme constante.
- Toutes les inductances utilisées sont indépendantes des courants.
- Les inductances des bobines peuvent être présentées par une constante plus des harmoniques sinusoïdales de l'angle du rotor.
- Les bobines distribuées peuvent être considérées comme concentrées.
- La machine peut être considérée comme une tension après une impédance.
- Pas de pertes dues à l'hystérésis.
- Les réactances mutuelles existent seulement au niveau du stator.
- L'effet des amortisseurs est négligé.
- La saturation du circuit magnétique est négligée.
- Les résistances statoriques sont négligeables.

□ **Modèle électrique**

Nous allons faire un changement de variables qui nous permet d'obtenir les équations électriques de la machine. Ce changement de variable va ramener toutes les grandeurs électriques du rotor au stator.

$$E'_q = \frac{1}{\sqrt{3}} \left(\omega_f \cdot \frac{k M_f}{L_f} \right) \cdot \lambda_f \quad (1.5)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{3}} (\omega_r \cdot k M_f) \cdot i_f \quad (1.6)$$

$$E_{fd} = \frac{1}{\sqrt{3}} (\omega_r \cdot k M_f) v_f \quad (1.7)$$

Où

E'_{q} : la f.e.m transitoire d'axe directe.

E : la f.e.m transitoire à vide.

E_{fd} : la f.e.m d'excitation.

Sous les hypothèses précédentes, nous pouvons obtenir les équations suivantes pour la tension terminale ainsi que pour ses composantes directes et en quadrature

$$V_q = E'_{qi} - x_{di} I_{di} \quad (1.8)$$

$$V_d = x_{di} I_{qi} \quad (1.9)$$

$$V_t = \sqrt{V_q^2 + V_d^2} \quad (1.10)$$

Avec :

V_d : composante de la tension terminale sur l'axe d.

V_q : composante de la tension terminale sur l'axe q.

I_d : composante du courant sur l'axe d.

I_q : composante du courant sur l'axe q.

x_d' : réactance transitoire sur l'axe d.

Dans le modèle dynamique de la partie électrique de la machine, nous pouvons prendre plusieurs choix, suivant la considération des régimes transitoires, sub-transitoires et aussi les axes d et q. dans ce qui suit nous allons considérer seulement l'axe *d* et le régime transitoire. Ce choix réduit le nombre d'équations différentielles de la partie électrique à une seule équation [ZHU 98], [OUR 95].

$$E'_q = \frac{1}{T} \cdot (E_{fd} - E'_q - (x_d - x'_d) \cdot I_d) \tag{1.11}$$

Pour la puissance électrique développée, nous avons plusieurs formules et celle correspondant à notre choix est la suivante :

$$Pe = E'_q \cdot I_q \tag{1.12}$$

1.4 Lignes de transmission

1.4.1 Le repère D-Q

Dans un réseau électrique multi-machine, les générateurs sont interconnectés via un réseau de lignes de transmission. Afin d'établir les expressions des courants générés, la modélisation de ceux-ci doit être ramenée à un repère D-Q lié au mouvement de l'ensemble des machines qui tournent à la vitesse de synchronisme.

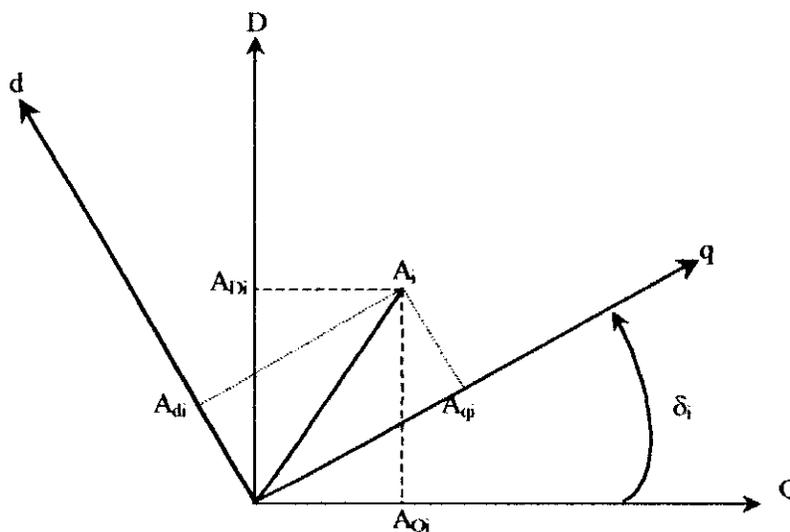


Fig.1.3 Les repères (d-q) et (D-Q).

Le passage d'un repère local (d-q), lié au générateur (G_i) au repère (D-Q) se fait par une transformation linéaire.

Soit A_i une grandeur dans le repère (d-q)_i, nous pouvons écrire

$$\bar{A} = A_{dq} = A_{qi} + jA_{di} \quad (1.13)$$

Cette même grandeur, dans le repère D-Q, peut être écrite comme suit

$$\bar{A} = A_{DQ} = A_{Qi} + jA_{Di} \quad (1.14)$$

Et l'équation du passage sera

$$\bar{A} = \bar{A}_{dq} \cdot e^{j\delta_i} \quad (1.15)$$

l'application de cette transformation au différents repères (d-q) conduit à la transformation linéaire de la matrice [T] définie par:

$$[\bar{A}_{DQ}] = [T] \cdot [\bar{A}_{dq}] \quad (1.16)$$

avec

$$[\bar{A}_{dq}] = [\bar{A}_{dq1} \cdots \bar{A}_{dqm}]^T \quad (1.17)$$

$$[\bar{A}_{DQ}] = [\bar{A}_{DQ1} \cdots \bar{A}_{DQn}]^T \quad (1.18)$$

et

$$[T] = [T_{ik}] \quad (1.19)$$

telle que

$$\begin{cases} T_{ii} = \exp(j\delta_i) \\ T_{ik} = 0 \text{ pour } i \neq k \end{cases} \quad (1.20)$$

1.4.2 Calcul de la matrice admittance

La matrice d'admittance $[\bar{Y}]$ est calculée suivant les étapes ci-après [AND 77]

- Les impédances (admittances) équivalentes aux charges sont connectées entre les nœuds de référence,
- Des nœuds additionnels sont ajoutés pour les tensions internes des générateurs,
- Les inductances transitoires des générateurs sont connectées entre ces nœuds additionnels et les nœuds terminaux des générateurs.
- Toutes les impédances sont converties en admittances,
- Les éléments de la matrice $[Y]$ seront calculés comme suit :
 - ✓ Y_{ii} est la somme de toutes les admittances connectées au nœud i .
 - ✓ Y_{ij} est l'opposé de l'admittance qui lie le nœud i et le nœud j .

1.4.3 Calcul de la matrice admittance réduite

Soit le réseau électrique multi-machine comportant n nœuds liés aux générateurs et m nœuds liés aux charges. Les courants électriques, au niveau des nœuds, sont liés aux tensions par la formule suivante

$$[I] = [Y] \cdot [V] \quad (1.21)$$

décomposant les vecteurs $[I]$ et $[V]$ en deux sous vecteur, les premiers sous vecteurs liés aux nœuds des générateurs, notés $[\bar{I}_G]$ et $[\bar{V}_G]$ et les autres liés aux nœuds des charges, notés $[\bar{I}_L]$ et $[\bar{V}_L]$.

Utilisant le fait que les courants injectés aux nœuds des charges sont nuls.

$$[I] = \begin{bmatrix} [\bar{I}_G] \\ [0] \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

nous obtenons

$$\begin{bmatrix} \overline{I}_G \\ [0] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Y}_{GG} & \overline{Y}_{GL} \\ \overline{Y}_{LG} & \overline{Y}_{LL} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \overline{V}_G \\ \overline{V}_L \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

donc pour les courants aux nœuds des générateurs, nous pouvons écrire :

$$\overline{I}_G = \overline{Y}_{GG} \cdot \overline{V}_G + \overline{Y}_{GL} \cdot \overline{V}_L \quad (1.24)$$

et au niveau des nœuds des charges, nous aurons :

$$[0] = \overline{Y}_{LG} \cdot \overline{V}_G + \overline{Y}_{LL} \cdot \overline{V}_L \quad (1.25)$$

des deux équations (1.24) et (1.25) on tire l'expression qui lie les courants et les tensions au niveau des nœuds des générateurs

$$\overline{I}_G = \overline{Y}_{GG} \cdot \overline{V}_G - \overline{Y}_{GL} \cdot \overline{Y}_{LL}^{-1} \cdot \overline{Y}_{LG} \cdot \overline{V}_G \quad (1.26)$$

la matrice réduite \overline{Y}_r est définie par

$$\overline{Y}_r = \overline{Y}_{GG} - \overline{Y}_{GL} \cdot \overline{Y}_{LL}^{-1} \cdot \overline{Y}_{LG} \quad (1.27)$$

1.4.4 Calcul des courants

De ce qui précède, on peut calculer les courants aux nœuds des générateurs par l'équation matricielle suivante :

$$\overline{I}_G = \overline{Y}_r \cdot \overline{V}_G \quad (1.28)$$

Le calcul doit être fait dans le repère global (D-Q), puis les résultats seront ramenés aux repères locaux (d-q)_i. nous trouvons, pour $[V_G] = [E_q]$ et en négligeant les effets transitoires sur l'axe q, les expressions des composantes d et q des courants au niveau des nœuds des générateurs [ZHU 98] :

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_k) \quad (1.29)$$

$$I_{di} = \sum_{k=1}^n E_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_k) \quad (1.30)$$

$$i = 1, \dots, n$$

avec

$$[\bar{Y}_r] = [\bar{Y}_{ik}]_{i=1, \dots, n; k=1, \dots, n} \quad (1.31)$$

$$\bar{Y}_{ik} = Y_{ik} \cdot e^{j\theta_k}$$

1.5 Régulateurs de tension, stabilisateurs et régulateurs de vitesse

Pour la simulation des réseaux électriques en vue de l'évaluation de la stabilité transitoire, les différents régulateurs doivent être pris en compte. Les deux régulateurs principaux d'un générateur sont les régulateurs de la tension terminale (AVR, Automatic voltage Regulator) et les gouverneurs de vitesse. Nous pouvons aussi citer les stabilisateurs qui améliorent la stabilité du réseau électrique.

A Régulateurs de tension, (AVR, Automatic Voltage Regulators)

Il en existe plusieurs types classiques [AND 77], [ARR 90], mais ceux-ci sont peu fiables car ils sont dimensionnés en linéarisant autour d'un point de fonctionnement et une forte perturbation risque de déstabiliser le système.

Le régulateur de la tension terminale génère un signal de commande pour l'appliquer aux bornes du circuit d'excitation de la machine. Ce signal de commande est établi à partir de l'erreur qui existe entre la valeur instantanée de la tension terminale et la valeur de consigne. D'autres signaux peuvent être utilisés par les régulateurs de la tension terminale.

B. Stabilisateurs, (PSS, power System Stabilizers)

Les stabilisateurs améliorent la stabilité du réseau électrique en développant une commande à partir du signal de l'erreur de la vitesse, donc de la fréquence. Cette commande est appliquée au circuit d'excitation de la machine. En fait, l'excitation de la machine est la somme de deux commandes : La première due au régulateur de tension, et l'autre due au stabilisateur.

L'objectif des stabilisateurs est de ramener la vitesse, donc la fréquence, à sa valeur de synchronisme d'une manière plus rapide que les gouverneurs de vitesse.

C. Gouverneurs (GOV)

Les gouverneurs qui sont des régulateurs de vitesse, donc de fréquence, agissent sur la puissance mécanique fournie à la machine. Ils sont lents par rapport aux stabilisateurs, de sorte que parfois, la puissance mécanique est considérée comme constante. D'ailleurs, c'est ce qui est généralement considéré pour l'étude d'un effet rapide comme dans le cas de la stabilité transitoire par exemple.

1.6 Récapitulatif

Soit le réseau électrique à n machines le modèle non linéaire est le suivant

Les équations mécaniques :

$$\dot{\delta} = \omega_i - \omega_0 \quad (1.31)$$

$$\dot{\omega}_i = -\frac{D}{2H}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi} - P_{ei}) \quad (1.32)$$

Les dynamiques électriques du générateur :

$$\dot{E}'_{qi} = \frac{1}{T_{d0}}(E_{fd} - E'_{qi} + (x'_d - x'_d)I_d) \quad (1.33)$$

Les équations électriques :

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_k)$$

$$I_{di} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_k) \quad (1.34)$$

$$P_{ei} = E'_{qi} \cdot I_{qi} \quad (1.35)$$

$$Q_{ei} = E'_{qi} I_{di} \quad (1.36)$$

$$V_{tqi} = E'_{qi} - x'_{di} I_{di} \quad (1.37)$$

$$V_{tdi} = x'_{di} I_{qi} \quad (1.38)$$

$$V_i(t) = \sqrt{V_{tqi}^2(t) + V_{tdi}^2(t)} \quad (1.39)$$

avec $i = 1, \dots, n$ le numéro du générateur.

1.7 Stabilité des réseaux électrique

1.7.1 Introduction

La stabilité d'un réseau d'énergie électrique est défini comme étant l'aptitude de celui-ci à fonctionner au voisinage du synchronisme lorsqu'il est sollicité par une ou plusieurs perturbations [OUR 95].

La perturbation crée un déséquilibre entre la production et la consommation dans le réseau électrique. Ce déséquilibre induit la variation de l'énergie cinétique provoquant ainsi l'évolution des angles rotoriques accompagnées par des oscillations dynamiques.

Les perturbations sont causées par des défauts qui surviennent sur le réseau électrique. Parmi ces défauts, les courts-circuits, suivis de l'ouverture de lignes ; les modifications de charges ; la rupture d'une interconnexion et le déclenchement accidentel d'une machine ou d'un transformateur. Les défauts peuvent être classés par leur rapidité et par leur amplitude.

Le but de cette partie est de montrer les différents types de stabilité rencontrés dans les réseaux électriques.

Stabilité statique

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique sujet à une perturbation lente et de faible amplitude. le système reste stable sous l'action des dispositifs de régulation conventionnels.

L'utilisation d'un modèle linéaire pour l'étude de ce type de stabilité et pour le dimensionnement des régulateurs est suffisante.

Stabilité dynamique

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique sujet à une perturbation rapide mais de faible amplitude. le système est stabilisé par des dispositifs de commande supplémentaires (stabilisateurs).

L'utilisation d'un modèle linéaire pour l'étude de ce type de stabilité et pour le dimensionnement des régulateurs est suffisante.

Stabilité transitoire

Elle correspond à la stabilité d'un réseau électrique siège d'une perturbation rapide et sévère. cette perturbation allant, le plus souvent, jusqu'à dépasser la capacité des dispositifs de commande. Pour stabiliser le système, il est nécessaire d'utiliser des régulateurs non linéaires ainsi que d'autres dispositifs particuliers

L'utilisation d'un modèle non linéaire du réseau électrique est nécessaire pour l'évolution de la stabilité transitoire.

○ **L'étude de la stabilité transitoire**

Pour étudier la stabilité transitoire, il faut :

- Etablir le modèle non linéaire du système.
- Trouver l'écoulement de l'énergie (généralement donné).
- Trouver le régime établi (le point de fonctionnement).
- Connaître les paramètres nécessaires :
 - Constante d'inertie H ,
 - Les réactances transitoires x_d'
 - Les impédances des lignes de transmission avant, pendant et après le défaut,
 - La matrice réduite [Yr] pour chaque cas,
 - La durée du défaut,
 - L'instant d'ouverture de ligne pour un court-circuit
 - L'instant de la fermeture de ligne pour un court-circuit.

1.8 Simulation

Pour simplifier la simulation nous allons utiliser un réseau électrique constitué de trois machines connectées entre eux et un bus infini fig. (1.5) les paramètres de ce réseau électrique sont donnés dans l'annexe 1.

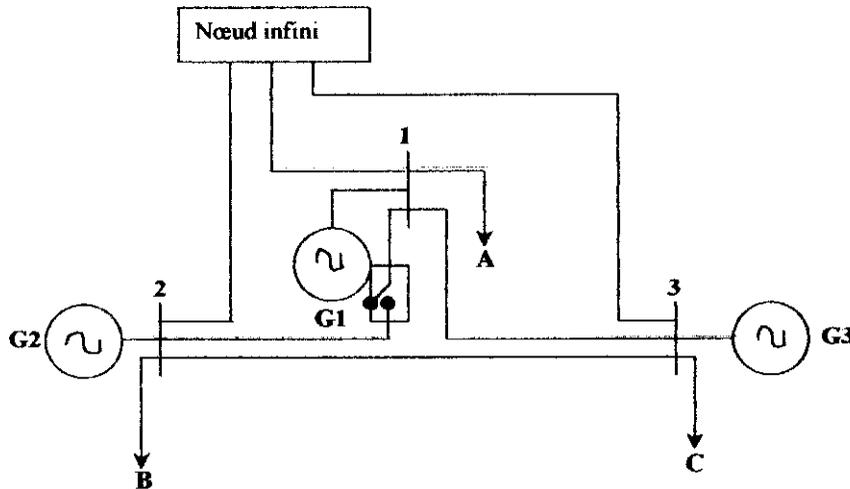


Fig.1.5 : Topologie du réseau électrique à trois machines utilisé.

Nous avons choisi deux défauts pour tester la stabilité de réseau électrique. Le premier est un court-circuit triphasé et l'autre est un accroissement brutal de la valeur de la puissance mécanique fournie à une machine constituant le réseau électrique.

L'effet d'un court-circuit triphasé

Un court-circuit triphasé est appliqué à l'instant $t = 0.1 \text{ sec}$ sur la ligne liant les nœud (1) et (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. La durée de ce court-circuit est de 0.1 sec, ce qui implique qu'il y aura l'ouverture de cette ligne à l'instant $t = 0.2 \text{ sec}$. La ligne reste ensuite ouverte.

L'effet de l'accroissement brutal de la puissance mécanique

Un accroissement brutal de 20% de la puissance mécanique fournie à la machine (G1) est appliqué à l'instant $t = 0.1 \text{ sec}$ est demeuré à cette valeur.

La figure (1.9) la déstabilisation du système sous l'effet de ce défaut, et le point de fonctionnement change.

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre le modèle non linéaire d'un réseau électrique à trois machines a été élaboré en vue de la commande décentralisée.

Les différents types de stabilité rencontrés dans le réseau électrique sont brièvement présentés où nous avons insisté sur la stabilité transitoire.

Les simulations en boucle ouverte ont montré l'effet d'un court-circuit triphasé et aussi l'effet d'un accroissement brutal de la puissance mécanique fournie à une machine. A travers les résultats obtenus, une commande en boucle fermée s'impose afin de maintenir la tension terminale à sa valeur de consigne et garantir la stabilité de réseau électrique.

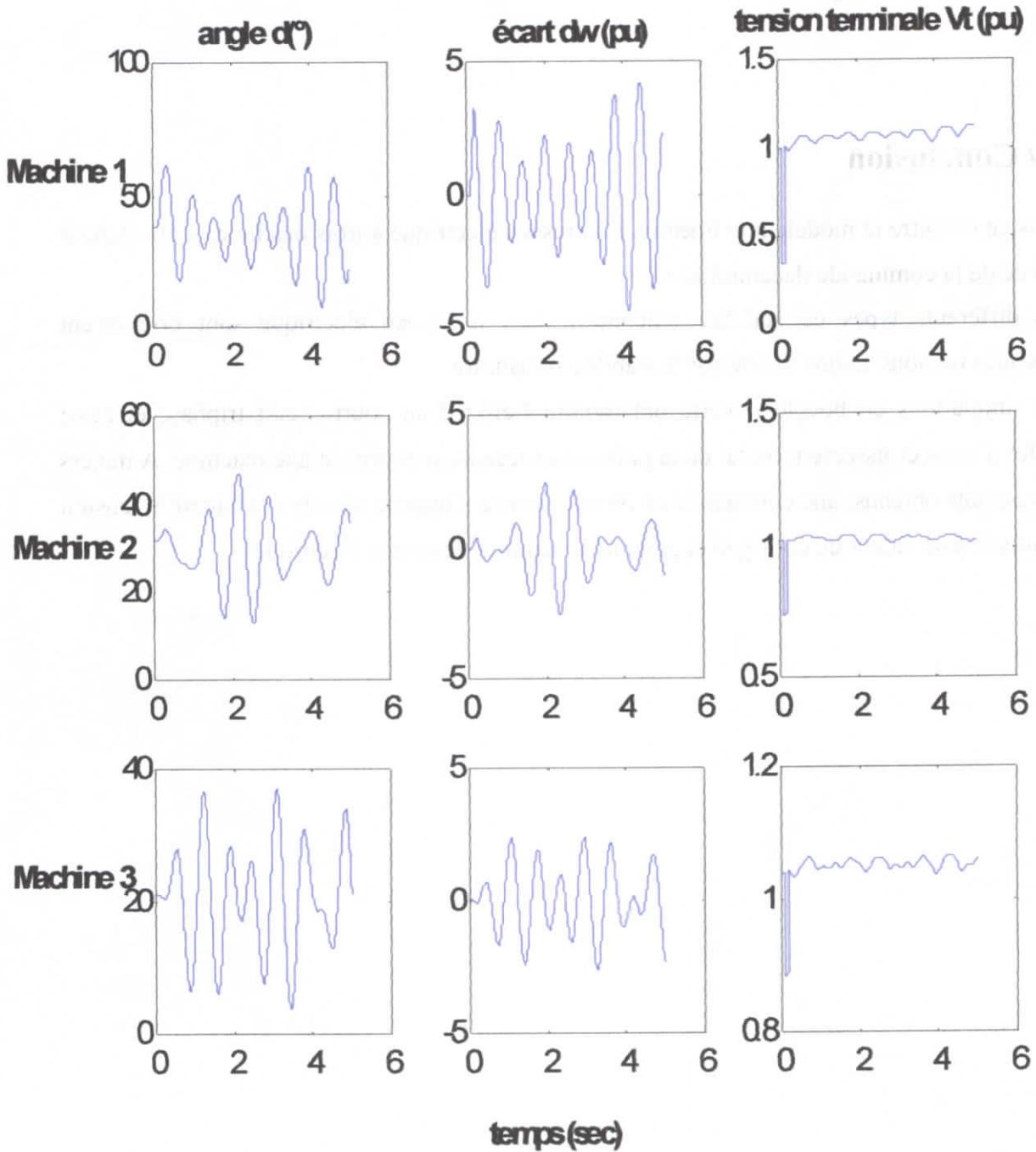


Fig 1.6 : Réseau électrique à trois machines avec court-circuit triphasé et en boucle ouverte.

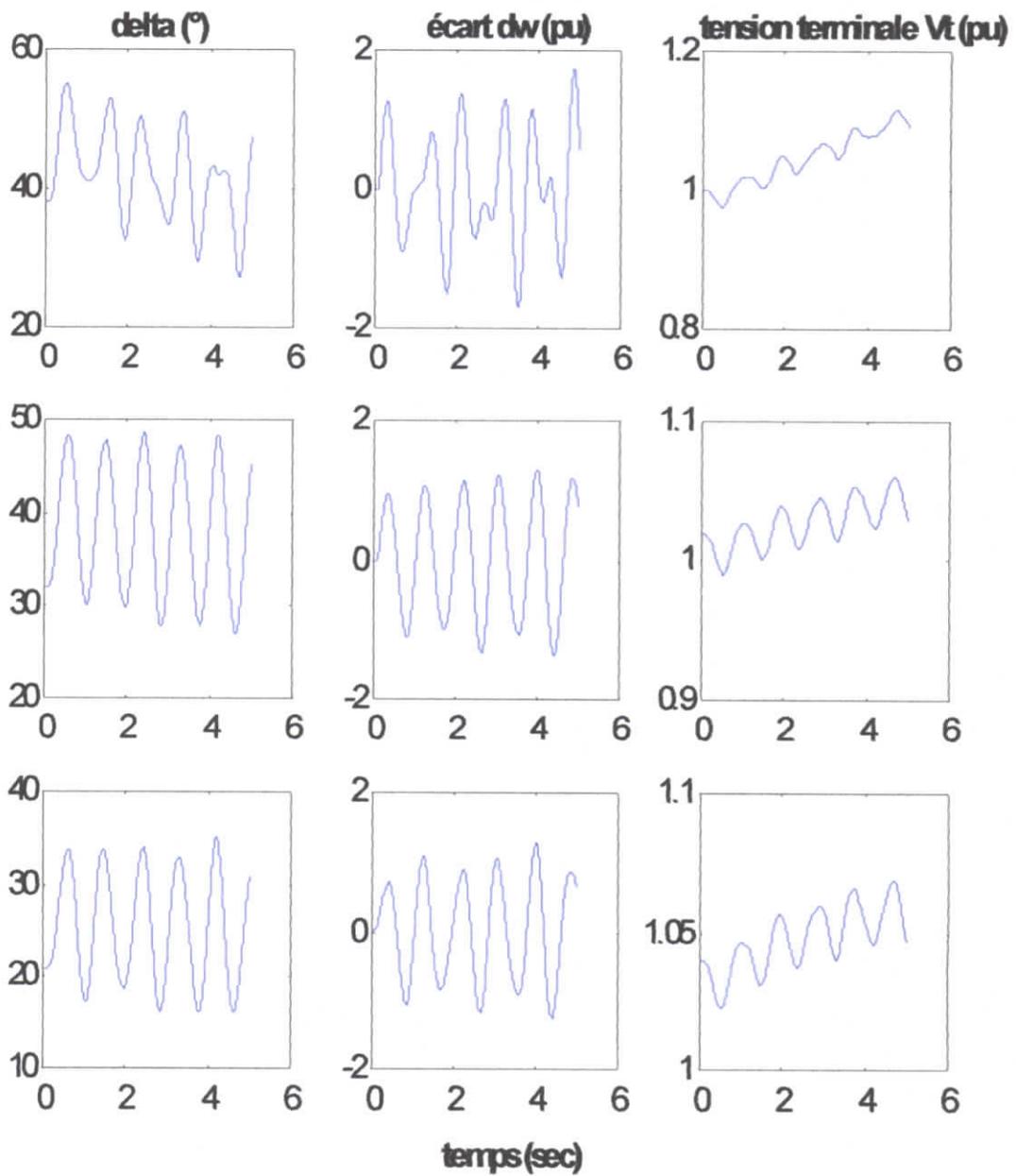


Fig 1.6 : Réseau électrique à 3 machines avec un accroissement de 20% de la puissance mécanique en boucle ouverte.

Chapitre 2

Logique floue

Modélisation et Commande

2.1 Introduction

Depuis quelques années, on trouve sur le marché des appareils de grande consommation (appareils de photos, vidéo, ...) qui sont présentés en faisant intervenir un réglage par logique floue ou « *fuzzy-logic* » ou encore « *fuzzy-control* ». Au-delà de l'argument publicitaire évident, il est intéressant de comprendre ce nouveau concept de réglage et de l'appliquer à certains types de problèmes de réglage rencontrés.

Le principe du réglage par la logique floue s'approche de la démarche humaine dans le sens que les variables traitées ne sont pas des variables logiques (au sens de la logique binaire par exemple) mais des variables *linguistiques*, proches du langage humain de tous les jours. De plus, ces variables linguistiques sont traitées à l'aide des règles qui font référence à une certaine connaissance du comportement du système à régler.

La logique floue est une branche des mathématiques et, à ce titre, toute une série de notions fondamentales est développée. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base. Dans ce qui suit on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par la logique floue [MAM 74].

2.1.1 Bref historique

Les quelques points de repères historiques suivants permettent de situer dans le temps le développement de la logique floue et ses applications au réglage:

- 1965 Le Prof. L. A. Zadeh de l'Université de Berkeley (Californie) pose les bases théoriques de la logique floue.
- 1973 L. A. Zadeh propose d'appliquer la logique floue aux problèmes de réglage.
- 1974 Première application du réglage par la logique floue appliquée à une turbine à vapeur. Suivie en 1980 par une application sur un four à ciment et en 1983 sur un épurateur d'eau.
- 1985 Premiers produits industriels (Japon) utilisant le principe de la Logique floue appliqué à des problèmes de réglage et de Commande. Développement de processeurs dédiés à des Applications de réglage par la logique floue.

2.2 Bases Mathématique de la logique floue

2.2.1 Sous-ensemble floue

Cette notion permet l'appartenance partielle d'un élément à un ensemble donné [KAU 87], [DUB 87]. La seule condition qu'une fonction d'appartenance doit satisfaire vraiment est qu'elle faut varier entre 0 et 1.

Il s'agit d'établir une relation entre le degré de vérité de la variable floue et la grandeur d'entrée correspondante (figure 2.1). On parle de *fuzzification* :

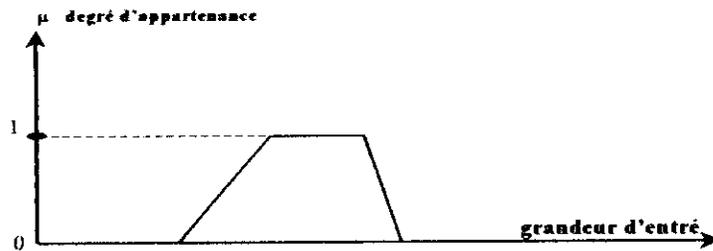


Fig 2.1 ensemble floue

On peut évidemment choisir n'importe quelle forme pour les fonctions d'appartenance. Cependant, en pratique, on utilise les formes trapézoïdales et les formes en cloche (gaussiennes).

La figure (2.2) présente quelques types de fonctions d'appartenances usuelles. Nous y trouvons

- 1) **Type triangulaire** : correspondant au sous-ensemble floue Z de l'ensemble de référence X . elle est caractérisée par trois paramètres a , b et c .
- 2) **Type trapézoïdal** : correspondant au sous-ensemble floue Z de l'ensemble de référence X . elle est caractérisée par quatre paramètres a , b , c et d .
- 3) **Type en cloche** : c'est une forme générale qui peut regrouper d'autres types de fonctions d'appartenance.
- 4) **Type gaussien** : est un cas particulier des fonctions d'appartenance en cloche. Elles sont caractérisées par deux paramètres qui sont le centre et la variance d'une fonction gaussienne.

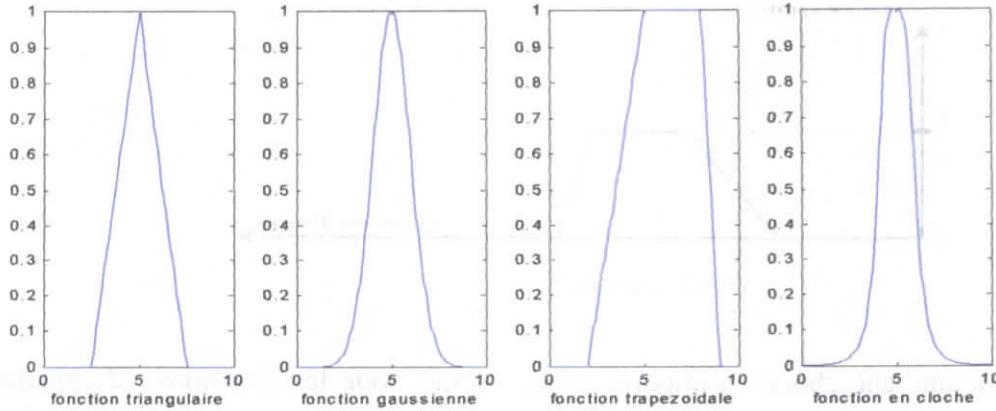


fig.2.2 : Quelques types de fonctions d'appartenance.

Un ensemble flou est une extension d'un ensemble classique. Si X est l'univers de discours (il contient tous les sous-ensembles flou pris en considération) et ses éléments sont dénotés par x , alors un sous-ensemble flou A dans X est défini comme un ensemble de paires rangées :

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in X\} \tag{2.1}$$

$\mu_A(x)$ est appelé le degré d'appartenance de x dans A . cette fonction fait correspondre chaque élément de X une valeur d'appartenance compris entre 0 et 1.

2.2.2 Caractéristiques des sous-ensembles flous

Soit X un univers, et A un sous-ensemble flou de fonction d'appartenance μ_A

Noyau de A :

$$\text{Noy}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) = 1\} \tag{2.2}$$

Support de A :

$$\text{Supp}(A) = \{x \in X \mid \mu_A(x) > 0\} \tag{2.3}$$

Hauteur de A :

$$H(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x) \tag{2.4}$$

Cardinalité de A :

$$|A| = \sum_{x \in X} \mu_A(x) \tag{2.5}$$

2.2.3 Variable linguistique floue

Contrairement aux variables binaires qui sont définies par les deux états « vrai » ou « faux », les variables floues présentent toute une gradation entre la valeur *vrai* et la valeur *faux* [ZAD 88]. Comme exemple de variables linguistiques, nous pouvons prendre la variable floue « Age » qui prend pour valeurs floues les attributs qualitatifs « Très-jeune », « jeune » et « Agé »

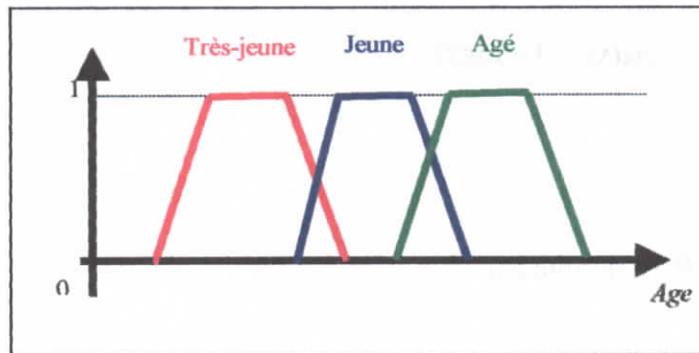


fig.2.3 : exemple de variable linguistique.

2.2.4 Opérateurs de la logique floue

Afin de manipuler les sous-ensembles flous, il est nécessaire de définir certaines opérations élémentaires.

Soit *A* et *B* deux sous-ensembles flous dans *X* caractérisés respectivement par $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$.

a. Egalité

On dit que *A* et *B* sont égaux si et seulement si :

$$\mu_A(x) = \mu_B(x) \quad \forall x \in X \tag{2.6}$$

b. Inclusion

On dit que A est inclus dans B si et seulement si :

$$\mu_A(x) \leq \mu_B(x) \quad \forall x \in X \quad (2.7)$$

c. complément

Le complément A^c de A est défini par :

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \forall x \in X \quad (2.8)$$

d. Intersection

L'intersection de A et B est définie par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = T(\mu_A(x), \mu_B(x)) \dots \dots \forall x \in X \quad (2.9)$$

Où T (en général l'opérateur Min) est une norme triangulaire (voir l'annexe 2).

e. Union

L'union de A, B est définie par

$$\mu_{A \cup B}(x) = S(\mu_A(x), \mu_B(x)) \dots \dots \forall x \in X \quad (2.10)$$

où S (en général l'opérateur Max) est une conorme triangulaire (voir l'annexe 2).

f. Produit cartésien

Soient A_1, A_2, \dots, A_n des sous-ensemble des sous-ensemble flous dans X_1, X_2, \dots, X_n respectivement. Produit cartésien de A_1, A_2, \dots, A_n , est un sous-ensemble flou dans l'espace produit de X_1, X_2, \dots, X_n ayant pour fonction d'appartenance

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n}(x_1, x_2, \dots, x_n) = \text{Min}(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (2.11)$$

g. Relation floue

Soient U_1, U_2, \dots, U_n des univers de discours. Une relation floue est un sous-ensemble flou dans $U_1 * U_2 * \dots * U_n$ exprimé comme suit :

$$R_{U_1 * U_2 * \dots * U_n} = \{(x_1, \dots, x_n), \mu_R(x_1, \dots, x_n)\} \in U_1 * U_2 * \dots * U_n \quad (2.12)$$

2.2.5 Logique floue

Dans la suite de notre exposé, nous donnerons quelques définitions concernant la logique floue et ces éléments de base.

Soient X une variable floue et A une caractéristique.

a. la proposition floue

Une proposition floue est une description de la variable floue donnée sous la forme suivante

$$\langle\langle X \text{ est } A \rangle\rangle$$

A cette proposition est associé un degré de vérité appartenant à l'intervale $[0, 1]$.

b. la conjonction

La conjonction de deux propositions est une autre proposition réalisée à l'aide de l'opérateur Et. Par exemple

« X_1 est A_1 » *et* « X_2 est A_2 »

Mathématiquement, le degré de vérité de la conjonction de deux propositions est obtenu par une norme triangulaire agissant sur les degrés de vérités des deux propositions initiales.

c. la disjonction

La disjonction de deux propositions est une autre proposition achevée en utilisant l'opérateur Ou, par exemple :

« X_1 est A_1 » ou « X_2 est A_2 »

En terme mathématique, le degré de vérité associé à cette proposition est le résultat de l'application d'une norme triangulaire sur les deux degrés de vérité associés aux deux propositions initiales.

d. L'implication

L'implication construit une proposition à l'aide des opérateurs Si et Alors comme suit :

Si « X_1 est A_1 » Alors « X_2 est A_2 »

Le degré de vérité associé à cette dernière proposition est le résultat de l'application d'une norme triangulaire sur les deux degrés de vérité des deux propositions initiales.

2.2.6 Règles floue

Une règle floue est une relation exprimée à l'aide d'une implication. Par exemple

SI « ERREUR est POSITIVE » ET « VARIATION D'ERREUR est NEGATIVE »

ALORS « COMMANDE est GRANDE »

Cette règle est constituée de trois propositions

La prémisse (1) : «*ERREUR est POSITIVE* »

La prémisse (2) : « *VARIATION D'ERREUR est NEGATIVE* »

La conséquence : « *COMMANDE est GRANDE* »

La conjonction des prémisses, l'implication et la conséquence forment la règle floue.

2.2.7 Raisonnement

Cela consiste à manipuler des propositions floues par des règles floues dans le but d'obtenir une décision. Deux modes de raisonnement inspirés de la logique classique sont utilisés:

Le MP (modus ponens) et le MT(modus tollens).

Soient P et C deux propositions logiques.

- Le MP est défini par $P \Rightarrow C$ qui signifie que si P est vraie alors C sera vraie aussi.
- Le MT est défini par $\bar{C} \Rightarrow \bar{P}$ qui signifie que si C est fautive alors P sera fautive.

En logique floue, ces deux modes de raisonnement sont généralisés pour traiter les propositions floues.

- Le GMP (Generalized Modus Ponens)

Règle floue: si X est A alors Y est B

μ_A μ_B

fait observé : X est A'

$\mu_{A'}$

déduction : Y est B'

$\mu_{B'}$

- **Le GMT (Generalized Modus Tollens)**

Règle floue: si X est A alors Y est B

$$\mu_A \quad \mu_B$$

fait observé : X est B'

$$\mu_{B'}$$

déduction : Y est A'

$$\mu_{A'}$$

2.3 Modélisation par logique floue

2.3.1 Introduction

Les tentatives de modélisation des événements imprécis ont été déjà commencées avec le professeur L.A.Zadeh en 1971, mais le travail a été limité aux systèmes discrets. Dès cette date, des travaux traitant la modélisation des systèmes en utilisant les concepts de la logique floue ont été conduits. D'abord, la modélisation a été traitée par les ensembles flous (modélisation floue symbolique). Ensuite, l'utilisation des nouveaux concepts a conduit à d'autres types de modèles flous.

Récemment, des résultats ont été obtenus. Parmi lesquels, nous pouvons citer :

- Modélisation floue en utilisant les modèles de type de Mamdani [16].
- Modélisation floue en utilisant les modèles de types Takagi-Sugeno [24].
- Modélisation floue en utilisant les nombres flous.

2.3.2 Structure générale d'un modèle flou

Comme le montre la figure (2.4) un modèle flou d'un système dynamique se compose de :

- Un bloc de fuzzification
- Un bloc d'inférence
- Une base de règles ou de connaissances
- Un bloc de défuzzification

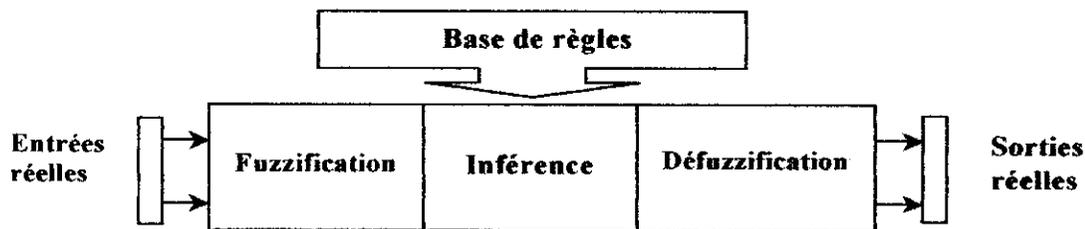


Fig.2.4 : Structure générale d'un modèle flou d'un système dynamique.

A. Etape de fuzzification

L'étape de fuzzification consiste à définir des ensembles flous pour les variables d'entrées et de sorties. Pour chacune ces variables, on doit connaître a priori son interval de définition. Dans la plupart des cas, le régulateur flou reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie du processus et le signal de consigne ainsi que la variation de cette erreur.

B. Etape d'inférence

C'est l'étape où l'on établit les règles floues qui permettent d'aboutir à la commande en fonction des valeurs de l'erreur et de sa variation.

En général, la commande dépend non seulement de l'erreur mais de sa variation. Les règles floues lient la variable de sortie aux variables d'entrées afin de tirer les conclusions ou déductions floues.

Il existe plusieurs méthodes d'inférence [MEN 95], par exemple

Mamdani (*Max* , *Min*)

Larsen (*Max* , *Prod*)

Sugeno (*Somme* , *Prod*)

Une règle floue comporte une prémisse du genre « si l'erreur est négative ET la variation de l'erreur est négative » et une déduction floue de type « Alors U est positive grande ». dans le cas où les deux variables d'entrées sont définies, chacune, par trois ensembles flous, on aboutit à 9 règles floues, par exemple

e Δe	N	Z	P
N	PG	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	NG

Après l'édition des règles, il reste à calculer les degrés d'appartenance de la variable de sortie à tous les ensembles flous qui lui sont associés.

1. Si (e est N) ET (Δe est N) **ALORS** u est PG
2. Si {(e est N) ET (Δe est Z) OU (e est Z) ET (Δe est N)} **ALORS** u est P
3. Si (e est P) ET (Δe est P) **ALORS** u est NG.

Chaque règle est composée de prémisses liées par l'opérateur **Et**, **Ou** et donne lieu à une implication par l'opérateur **Alors**.

C. Etape défuzzification

Lors de la fuzzification, pour chaque variable d'entrée réelle, on calcule ses degrés d'appartenance aux ensembles flous qui lui sont associés.

Dans l'étape de défuzzification, on réalise l'opération inverse, à savoir, obtenir une valeur réelle de la sortie à partir des surfaces obtenues dans l'étape d'inférence.

Il existe plusieurs méthodes de défuzzification parmi lesquelles nous pouvons citer :

- Méthode du maximum qui donne comme valeur celle qui a le plus grand degré d'appartenance.
- Méthode du centre de gravité qui donne comme valeur le centre du sous-ensemble flou calculé suivant la formule

$$Z_0 = \frac{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j) \cdot w_j}{\sum_{j=1}^n \mu_z(w_j)}$$

avec :

Z : le sous-ensemble flou obtenu par le moteur d'inférence

Z_0 : le centre du sous-ensemble flou Z

$w_j, j = 1, \dots, n$; n points uniformément répartis sur l'univers de discours,

μ_z : fonction d'appartenance associée au sous-ensemble flou Z .

Base de règles

La base de règles est construite à partir de :

- L'expérience des opérateurs, formulées en terme de règles
- L'utilisation des méthodes d'apprentissage et/ou d'identification,
- L'utilisation des partitionnements de l'espace d'état.

2.4 Commande par Logique Floue

L'objectif de la commande par logique floue consiste à piloter un système en utilisant les connaissances et/ou l'expérience d'un opérateur humain qualifié. Ces connaissances sont formulées à l'aide d'un ensemble de règles de conduites basées sur un vocabulaire symbolique [LEE 90a], [LEE 90b]. En fait, un régulateur flou n'est rien d'autre qu'un système flou.

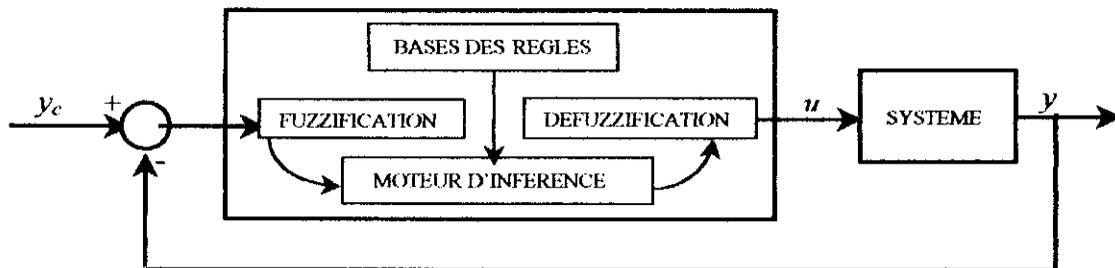


Fig.2.5 : schéma de commande par logique floue.

2.4.1 Types de régulateur flou

Il existe plusieurs types de régulateurs flous, parmi lesquels nous pouvons citer :

a. Régulateur flou de type Mamdani

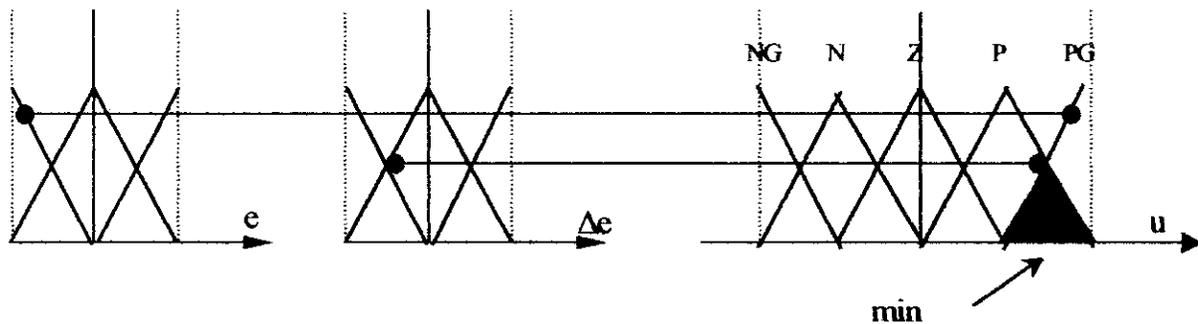
La méthode de Mamdani consiste à utiliser l'opérateur **min** pour **Et** et l'opérateur **Max** pour le **Ou**.

Plusieurs règles peuvent être activées en même temps, i.e que chacune de leurs prémisses possède un degré d'appartenance non nul. Ceci dépend des types de fonctions d'appartenance utilisées ; en l'occurrence toute les règles sont, à chaque instant d'échantillonnage, plus au moins activées si l'on choisit des fonctions d'appartenance de forme gaussienne.

L'agrégation de ces règles, est opération qui doit aboutir à une seule valeur de la variable de sortie, se fait par l'opérateur **Max**, comme si les règles étaient liées par l'opérateur **Ou**.

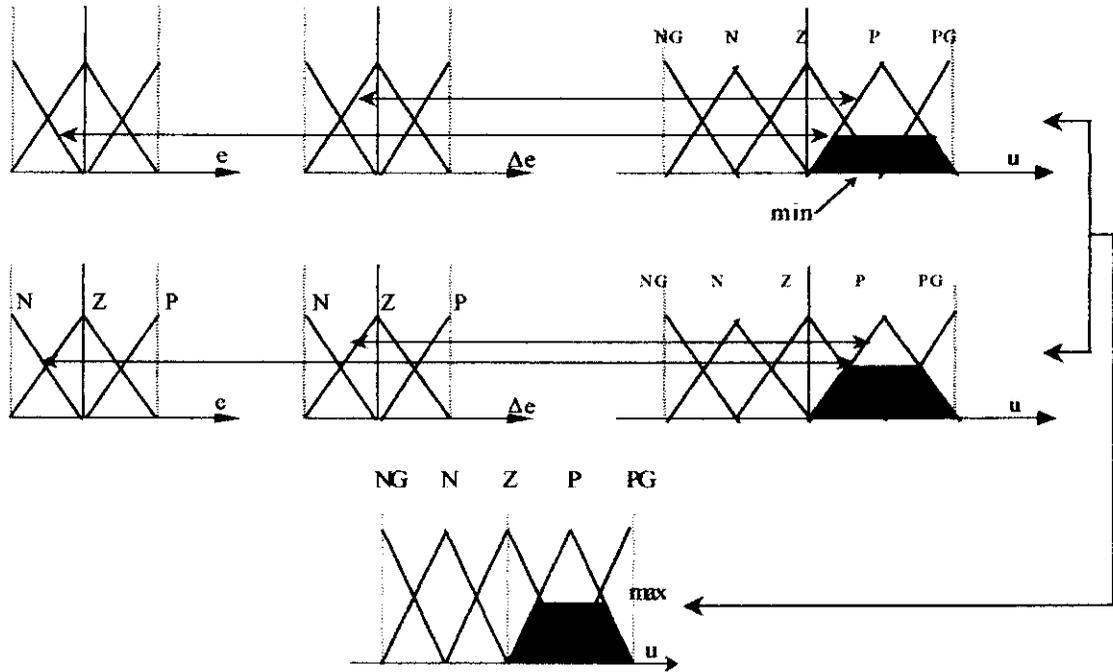
Cette méthode peut être illustrée, comme suit, dans le cas de l'agrégation des règles 1 et 2. Chaque prémisses de la règle 1 est mise en évidence par l'écrêtage de la fonction d'appartenance **PG** soit par le degré d'appartenance de e à l'ensemble N , soit par celui de Δe à l'ensemble N .

Comme les clauses de la prémisses de la règle sont liées par l'opérateur **ET**, on écrète l'ensemble **PG** de la variable u par le minimum des 2 degrés d'appartenance, comme le montre la figure suivante :

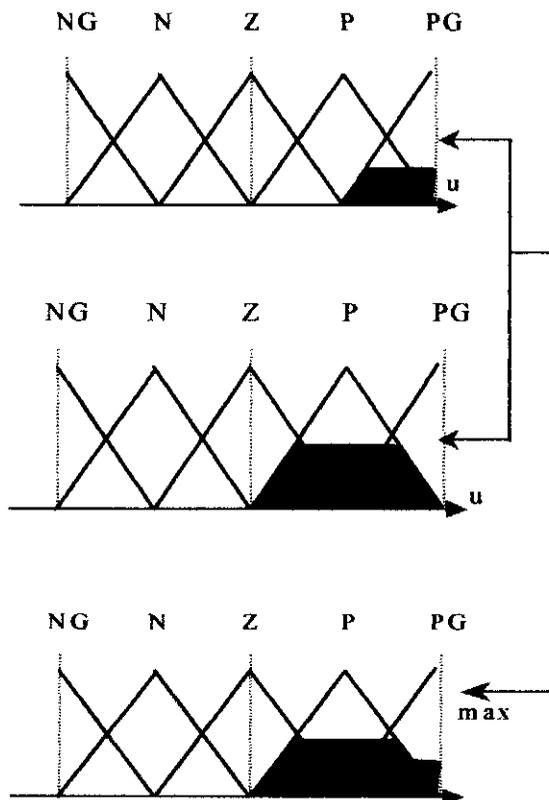


La règle 2 possède 2 prémisses liées par l'opérateur **Ou**. Pour chacune de ces prémisses, on réalise la même opération que pour la règle 1.

L'opérateur **OU** étant remplacé par l'opérateur **Max**, on prendra le maximum des 2 surfaces obtenues.



L'agrégation des règles 1 et 2 se fait en prenant en chaque point de l'ensemble de définition de la variable de sortie (univers de discours), le maximum des surfaces obtenues.



Si les règles 1 et 2 sont activées en même temps, la fonction d'appartenance de la variable de sortie est symbolisée par la surface pleine ci-dessus.

b. Régulateur flou de Sugeno

La méthode de **Mamdani**, datant de 1975, est beaucoup plus répandue dans la théorie du contrôle de procédés. La méthode de **Sugeno** (1985) en diffère au niveau de la définition de la variable de sortie et, par conséquent, des méthodes de défuzzification.

Rien ne change au niveau de la fuzzification des variables d'entrée. La variable de sortie prend, soit une valeur constante (singleton) indépendant des valeurs des entrées, soit une combinaison linéaire de celles-ci.

Ce singleton sera, lors de l'étape de défuzzification, pondéré par les degrés d'appartenance des variables d'entrée.

La règle générale d'une règle de type **Sugeno** est, pour un système à 2 entrées $e1$ et $e2$

$$\text{Si } e1 \text{ est } A \text{ ET } e2 \text{ est } B \text{ ALORS } \text{sortie} = p \cdot e1 + q \cdot e2 + r$$

Avec A et B qui sont des fonctions d'appartenance, respectivement, de $e1$ et $e2$, et p , q , r des constantes choisies par l'utilisateur pour définir la combinaison linéaire des entrées.

2.4.2 Synthèse des régulateurs flous

La synthèse des régulateurs flous passe par les étapes suivantes :

- Choix des variables d'entrée et des variables de sortie du régulateur,
- Détermination de la plage de variation de chaque variable d'entrée et chaque variable de sortie
- Construction de sous-ensembles flous dans chaque plage.
- Choix des fonctions d'appartenance associées aux sous-ensembles flous.
- Choix des méthodes d'inférence, et de défuzzification.
- Construction de la base de règles
- Si nécessaire, faire une normalisation des plages de variation des variables d'entrées ou de sorties.

La dernière étape nécessite la fixation d'un ensemble de gains dits gains de normalisation, [LIU 93], [BOS 92], [HRE 92].

2.4.3 Les avantages

A. La méthode de Mamdani

- Elle est intuitif.
- Elle a l'acceptation répandue.
- C'est bien assorti à l'entrée humaine.

B. La méthode de Sugeno

- Elle fonctionne bien avec les techniques linéaires (par exemple, régulateur PID).
- Elle fonctionne bien avec l'optimisation et les techniques adaptatives.
- Elle garanti la continuité de la surface de la sortie.
- C'est bien assorti aux analyses mathématiques.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description succincte de la logique floue avec quelques notions juste nécessaires pour les développements qui suivent. Deux types de régulateurs flous ont été présentés à savoir :

- Régulateur de type de Mamdani
- Régulateur de type de Sugeno

Le régulateur de type de Mamdani a été adopté pour la commande décentralisée du réseau électrique dont les développements seront donnés dans le chapitre qui suit.

Chapitre 3

La Commande Décentralisée par logique Floue Application à un Réseau Multi-machines

3.1 Introduction

Le système d'énergie électrique possède des dynamiques d'incertitude dues à plusieurs effets tels que la foudre, les tempêtes sévères et les pannes d'équipement, en plus les interconnexions entre les générateurs. La variation de la réactance effective de la ligne de transmission due aux défauts est un exemple de l'incertitude sur la dynamique du système.

Cependant, les commande conventionnelles basées sur le modèle linéaire du réseau électrique ne peuvent pas résister à ces situations du à leurs dynamiques non linéaire. D'où la nécessité d'utiliser une commande robuste pour remédier à ces problèmes.

Récemment, la commande par logique floue s'est avérée intéressante pour le contrôle des systèmes complexes et a été largement utilisée afin d'obtenir des performances meilleures pour les systèmes ayant des modèles mal définis ou bien ayant de nombreuses variables intervenant dans leur fonctionnement [TAK 85],[MAM 74]. Lorsque on a une structure complexes, la décentralisation de la commande par logique floue s'avère nécessaire car elle permet de diminuer le nombre de règles floues d'une manière considérable. Dans ce qui suit, nous allons adopté la structure décentralisée en utilisant la logique floue. La commande synthétisée sera appliquée en simulation à un réseau électrique à trois machines.

3.2 Commande décentralisée

Une commande décentralisée est une structure dont laquel le système est décomposé en plusieurs sous-systèmes interconnectés qui peuvent être géographiquement éloigné tel que le réseau électrique. Elle consiste à commander chaque sous-système avec une unité de commande qui n'a accès qu'aux variables locales. Cette unité est appelée station de commande.

la figure (3.1) schématise la structure de commande décentralisée

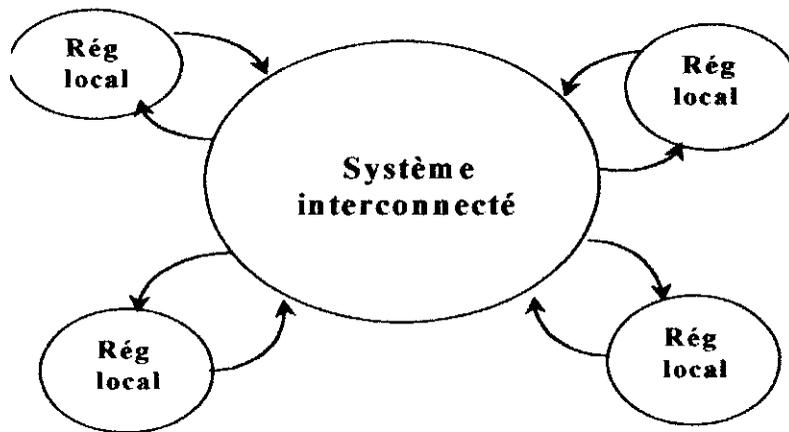


Fig 3.1: Schéma de structure d'une commande décentralisé.

3.3 Récapitulatif du modèle dynamique du système multi-machines

Dans ce qui suit, on considère un modèle dynamique non linéaire d'un système multi-machines généralement composé de n machines synchrones. Les équations mécaniques et électriques de la *i*^{ème} machine sont données par:

Les équations mécaniques :

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_i - \omega_0 & (3.1) \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D}{2H}(\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega_0}{2H_i}(P_{mi} - P_{ei}) & (3.2) \end{cases}$$

Les dynamiques électriques du générateur :

$$\dot{E}'_{qi}(t) = \frac{1}{T_{d0}} (E_{fd} - E'_{qi} + (x_d - x'_d) I_d) \quad (3.3)$$

Les équations électriques :

$$I_{qi} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \cos(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (3.4)$$

$$I_{di} = \sum_{k=1}^n E'_{qk} \cdot Y_{ik} \cdot \sin(\delta_{ik} - \theta_{ik}) \quad (3.5)$$

$$P_{ei} = E'_{qi} \cdot I_{qi} \quad (3.6)$$

$$Q_{ei} = E'_{qi} I_{di} \quad (3.7)$$

$$V_{tqi}(t) = E'_{qi} - x_{di} I_{di}(t) \quad (3.8)$$

$$V_{tdi}(t) = x_{di} I_{di}(t) \quad (3.9)$$

$$V_i(t) = \sqrt{V_{d^2}(t) + V_{q^2}(t)} \quad (3.10)$$

Chaque générateur est décrit par un modèle dynamique du 3^{ème} ordre:

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_i - \omega_0 \\ \dot{\omega}_i = -\frac{D}{2H} (\omega_i - \omega_0) + \frac{\omega}{2H_i} (P_{mi} - P_{ei}) \\ \dot{E}'_{qi} = -\frac{1}{T_{d0}} E_{qi} + \frac{1}{T_{d0}} E_f \end{cases} \quad (3.11)$$

Les variables d'états sont définies comme suit:

$$\begin{cases} x_{1i} = \delta_i - \delta_{i0} \\ x_{2i} = \omega_i - \omega_0 \\ x_{3i} = E'_{qi} \end{cases} \quad (3.12)$$

Donc, le système peut être représenté par les équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dx_{1i}}{dt} = x_{2i} \\ \frac{dx_{2i}}{dt} = \lambda_{1i} x_{2i} + \lambda_{2i} f_i(x_{1i}, x_{3i}) \\ \frac{dx_{3i}}{dt} = \frac{1}{T_{\omega}} (x_{3i} - \lambda_{3i} I_{di} - E_{fi}) \end{cases} \quad (3.13)$$

Tel que $\lambda_{1i} = \frac{D_i}{2H_i}$ $\lambda_{2i} = \frac{\omega_0}{2H_i}$ $\lambda_{3i} = x_{di} - x'_{di}$

avec la fonction non linéaire définie par

$$f(x_{1i}, x_{3i}) = P_{mi} - P_{ei}$$

le vecteur d'état sera alors $x = [\Delta\delta_i \Delta\omega_i \Delta E_{qij}]^T$

3.4 Application et Simulation

Une commande floue décentralisée est appliquée sur un réseau électrique à trois machines.

Le régulateur flou reçoit comme variables d'entrée, l'erreur entre la sortie de processus et le signal de consigne ainsi que la variation de l'erreur.

Dans ce qui suit nous allons utiliser deux régulateurs flous de type Mamdani le premier assure le réglage de la fréquence (donc de la vitesse) et l'autre régulateur assure le réglage de la tension terminale (voir figure 3.3).

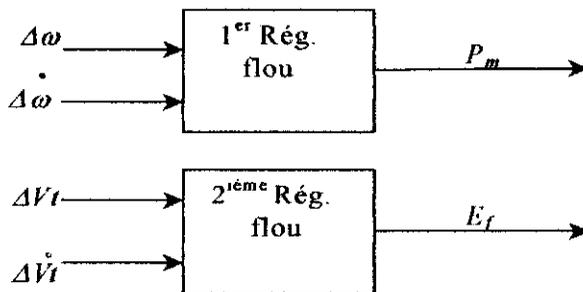


Fig 3.3 schéma du régulateur flou pour le sous-système i

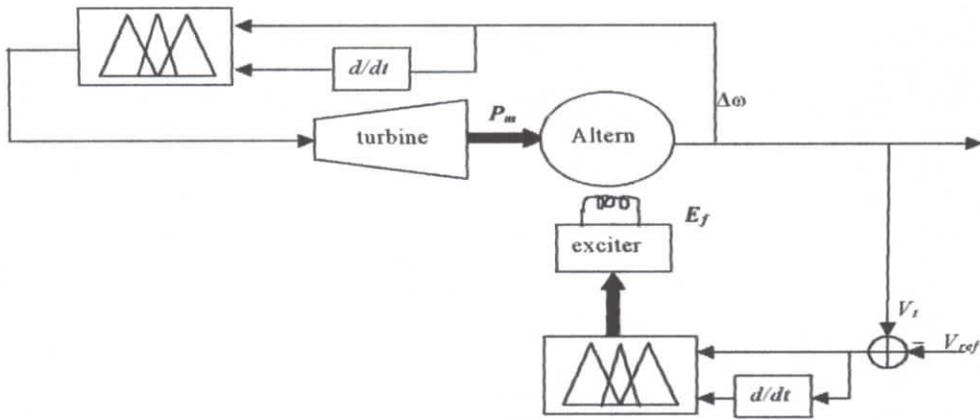


Fig 3.4 : schéma de régulation en boucle fermée

3.4.1 Application

A. Synthèse de Régulateur Flou

Le régulateur flou associé à ce modèle dynamique flou est donné par :

Si (e est dans R_{ii}) est (Δe est dans R_{im}) Alors
 U_{ii} est dans R_{ir}

$i=1, \dots, n$

R : l'ensemble flou.

Réseau électrique à trois machines

- Premier régulateur flou

Le tracé des fonctions d'appartenance des deux entrées $\Delta\omega$ et $\Delta\dot{\omega}$

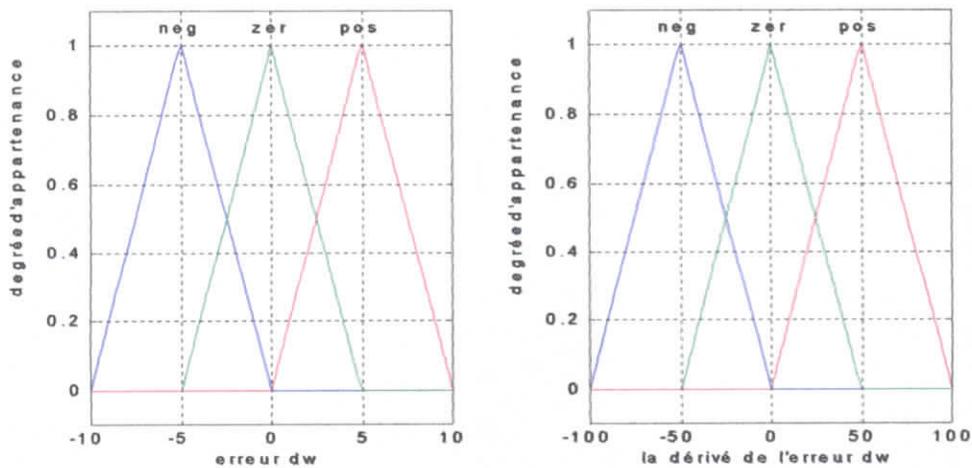


fig 3.5: fonction d'appartenance de $\Delta\omega$ et $\Delta\dot{\omega}$

le tracé des fonctions d'appartenance de la variable de sortie

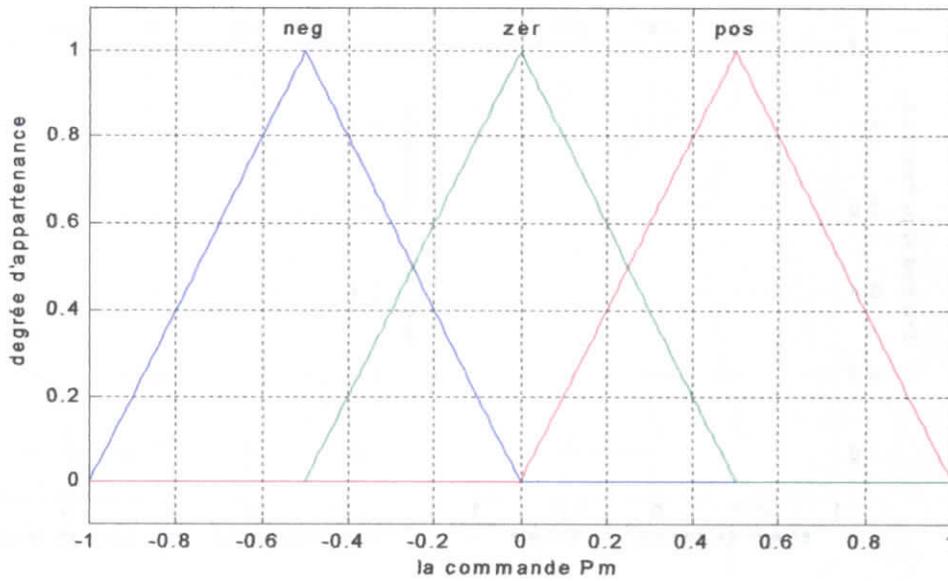


Fig.3.6 : fonction d'appartenance de la 1^{ère} sortie de commande P_m

les règles floues lient la variable de sortie aux variables d'entrée afin de tirer des conclusions ou déductions floues sont présentés dans ce tableau

$\Delta\omega$ / $\Delta\dot{\omega}$	N	Z	P
N	P	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

Avec N , Z et P sont des sous-ensembles flous de fonctions d'appartenance triangulaire.

• Deuxième régulateur flou

Les fonctions d'appartenance des deux entrées du deuxième régulateur :

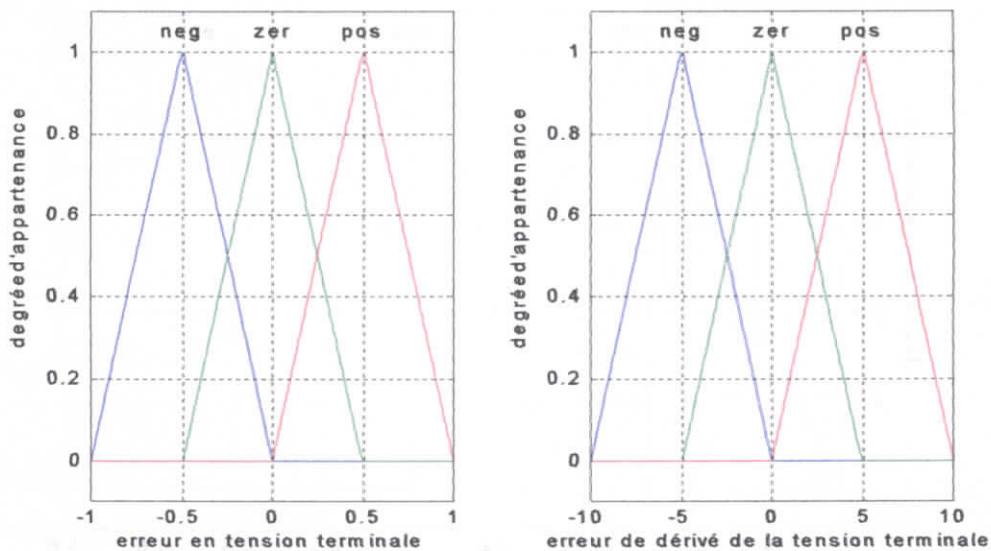


fig 3. 7: fonctions d'appartenance du deuxième régulateur flou

Les fonctions d'appartenance de La commande Ef (tension d'excitation).

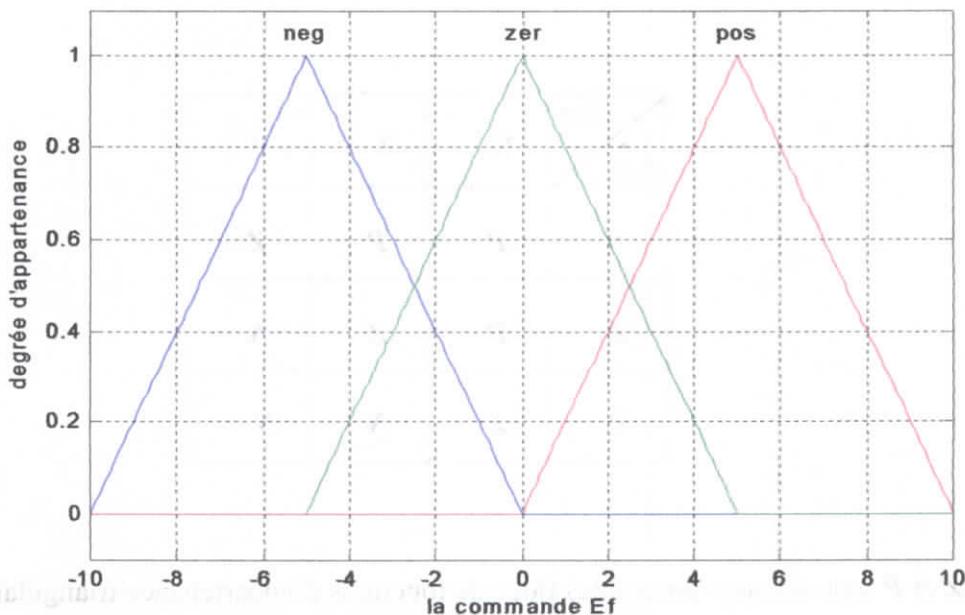


Fig.3.8 : fonction d'appartenance de la 2^{ème} sortie de commande Ef .

Les règles floues lient la variable de sortie aux variables d'entrée afin de tirer des conclusions floues sont dans le tableau dessous :

ΔV_t / $\Delta \dot{V}_t$	N	Z	P
N	P	P	Z
Z	P	Z	N
P	Z	N	N

B. Résultats de simulation

Pour tester les régulateurs synthétisés, nous avons effectué le même test sur le réseau électrique . Le test consiste en l'application d'un court-circuit triphasé de durée 0.1 sec sur la ligne qui lie le générateur *G1* au générateur *G2* à une distance de *G1* égale à 20% de la longueur de cette ligne.

C. Commentaires :

Les résultats de simulation présentés sur les figures montrent que le réglage de la vitesse de synchronisme et la tension terminale est obtenue ainsi que la stabilité transitoire est assurée. La perturbation est rejetée au bout de 3 sec.

Le test de la décentralisation de la commande est réalisé en supposons qu'une station de commande locale tombe en panne ce qui rend la commande nulle. Les simulations (3.11) jusqu'à (3.17) montrent que malgré la défaillance d'une station de commande locale, le système se stabilise au bout de 10 secondes assurant, plus en détail, le sous-système ayant subit la panne, son angle rotorique augmente de environ de 5(°) par contre, ceux des 2 autres sous-systèmes diminuent de 0.5(°). Les vitesse de synchronisme des sous-systèmes se rattrapent au bout de 10 seconde.

Les tensions terminales sont un peu affectées par ce test, plus particulièrement le sous-système concerné par la panne, le reste reviennent à ses valeurs de consignes

3.5 Conclusion :

Dans ce chapitre appliqué nous avons appliqué le réglage par logique floue par la méthode de Mamdani à un type de réseau électrique de trois machines avec l'implémentation de deux régulateurs, le premier assure le réglage de la vitesse de synchronisme donc la fréquence, tandis que le deuxième assure la stabilité de la tension terminale, un test de perturbation de rapide et de forte amplitude a montré la robustesse de ce type de réglage.

Un deuxième test concernant l'efficacité de la décentralisation, est réalisé par la simulation d'une défaillance d'une station de commande locale. Ce test a montré que les régulateur synthétisés non défaillants arrivent à supporter cette perturbation et, en plus, participent au réglage de la vitesse du générateur dont la station de commande est défaillante, ce qui assure la stabilité transitoire du réseau électrique.

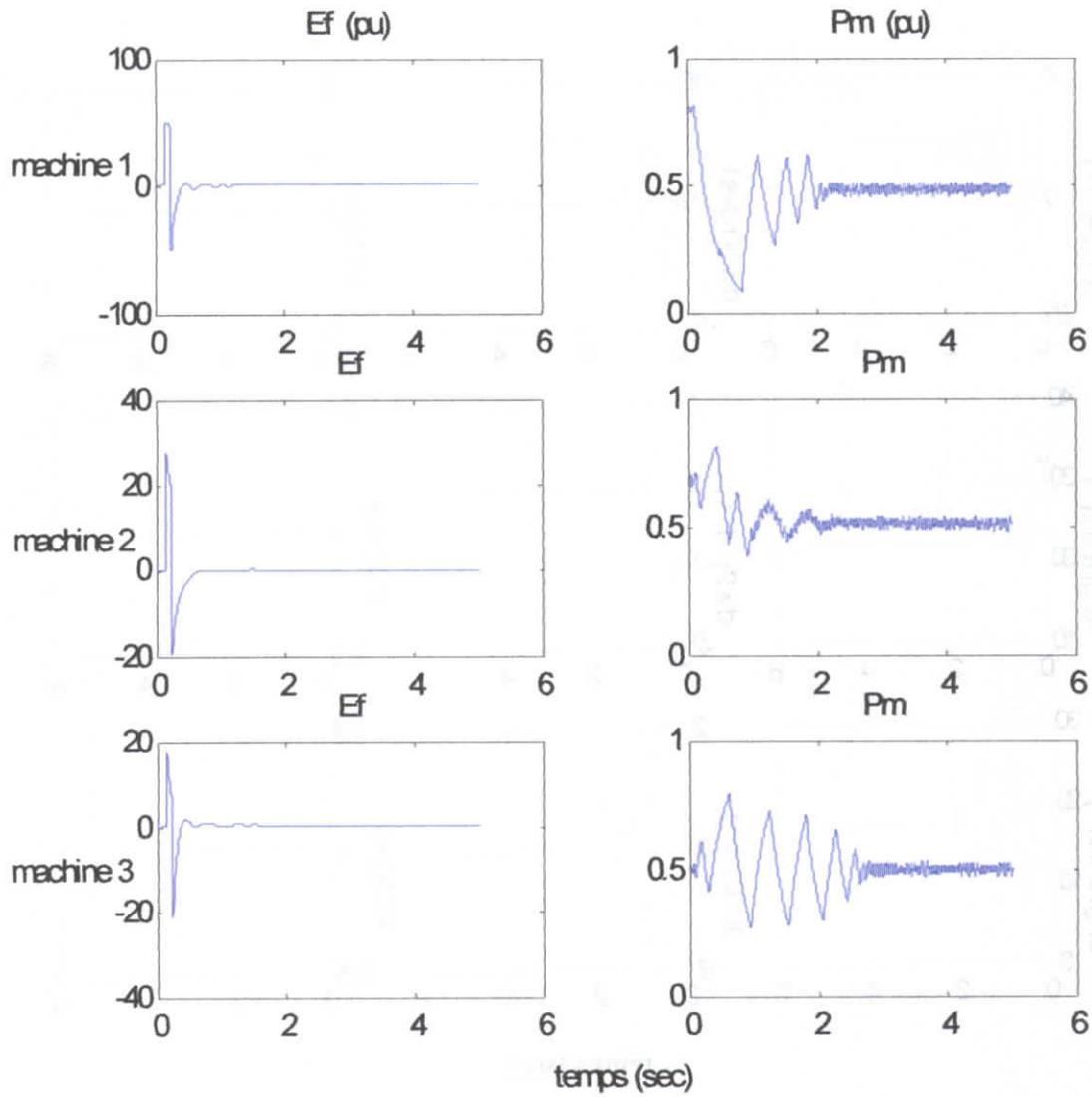


Fig : les deux commandes pour chaque sous-système

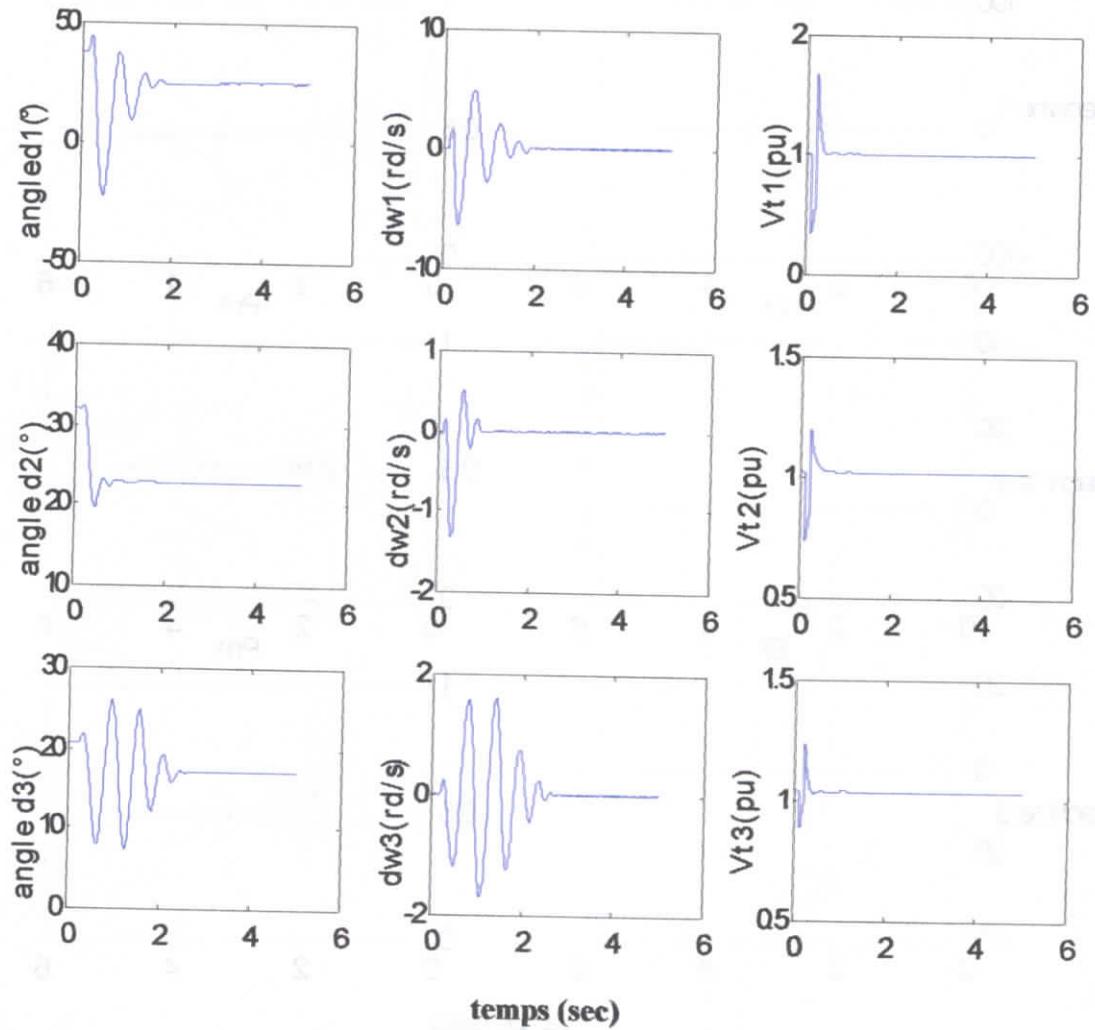


Fig . 3.8 Réseau électrique à trois machines avec un court-circuit triphasé

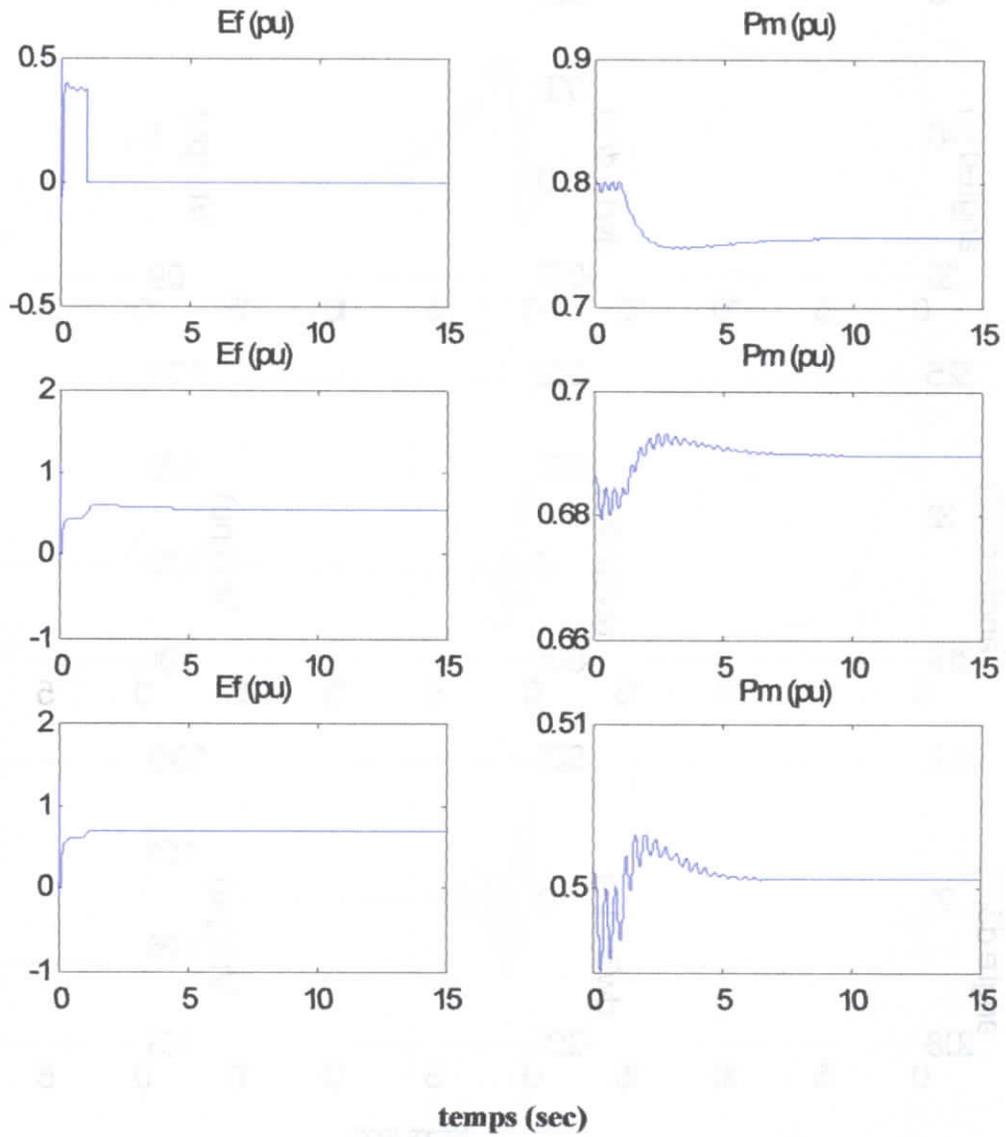


Fig 3.9 : Annulation de la commande du 1^{er} sous système.

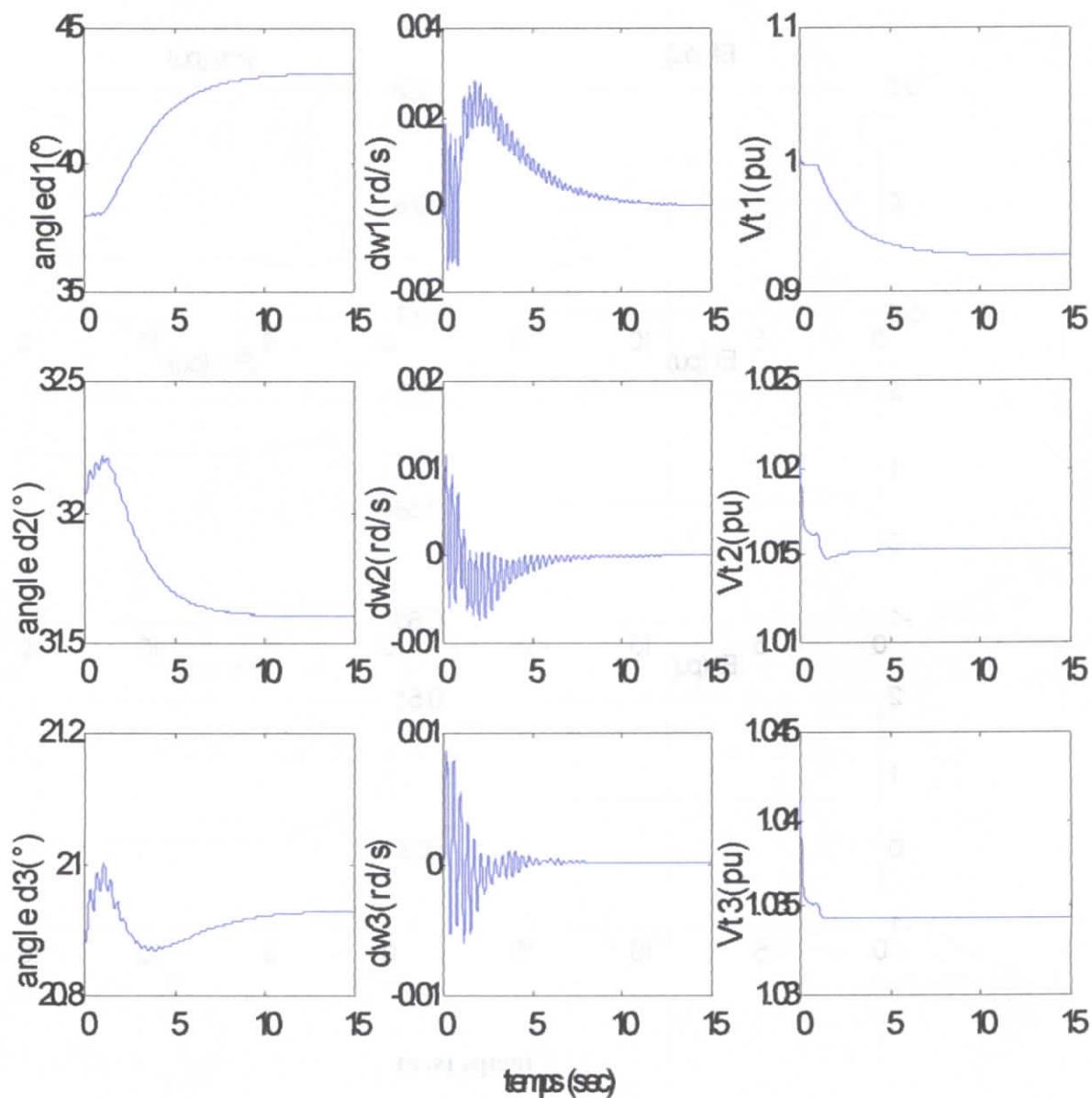


Fig : Réseau à 3 machines, test de défaillance de la commande du 1^{er} sous-système

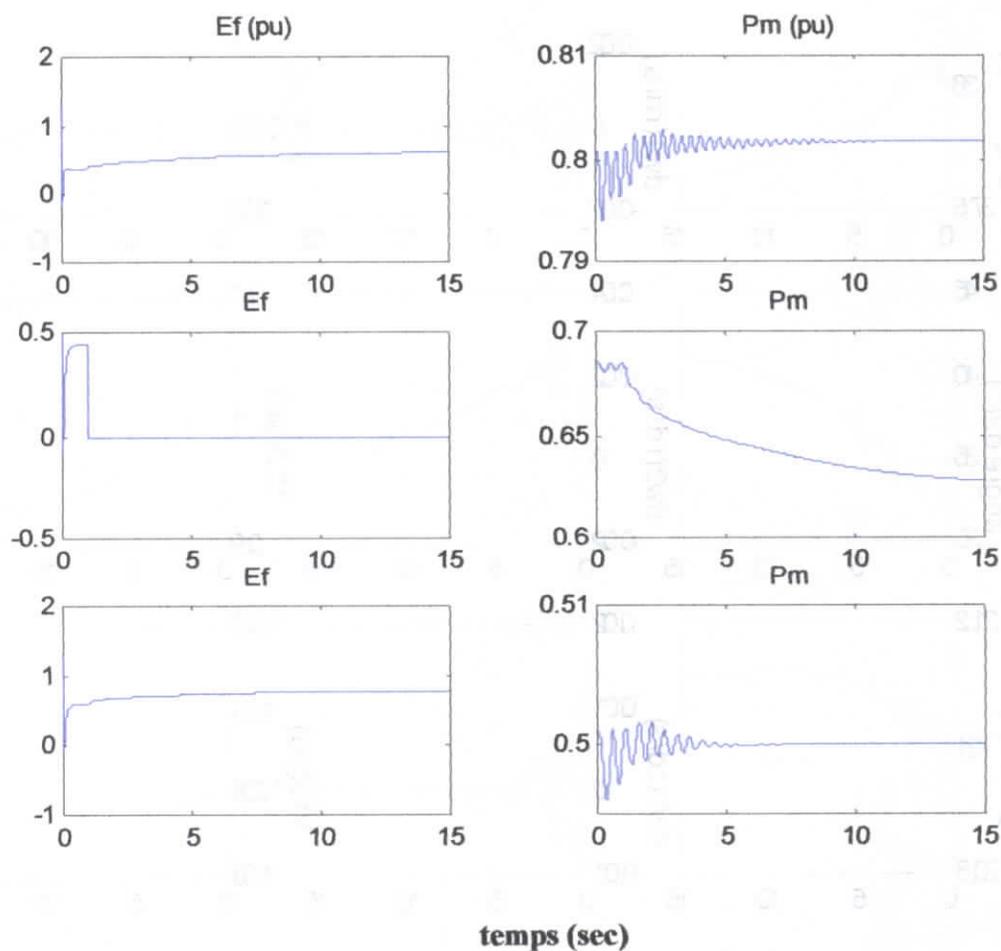


Fig 3.9 : Annulation la commande du 2^{ème} sous système

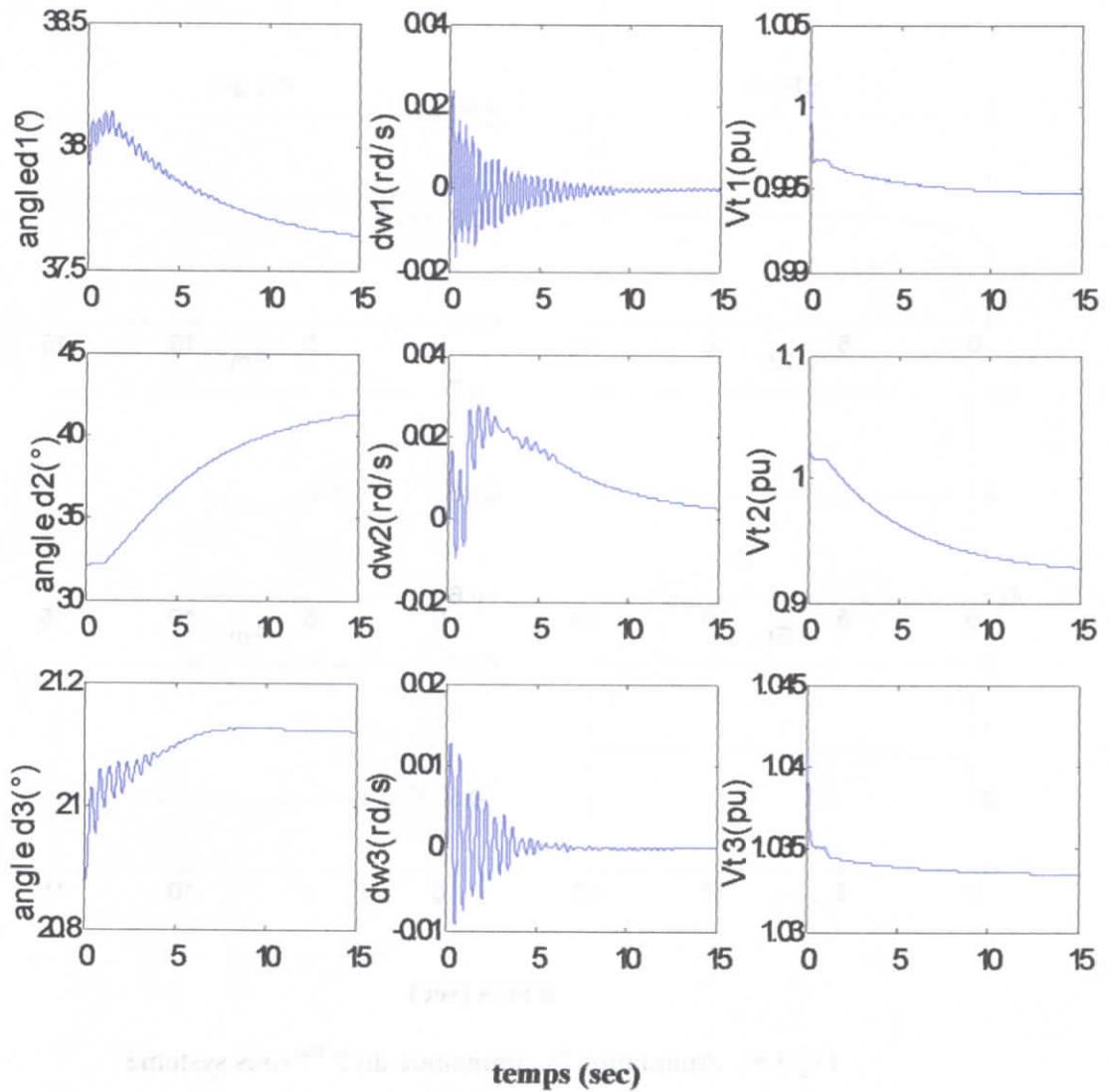


Fig : Réseau à 3 machines, test de défaillance de la commande du 2^{ème} sous-système

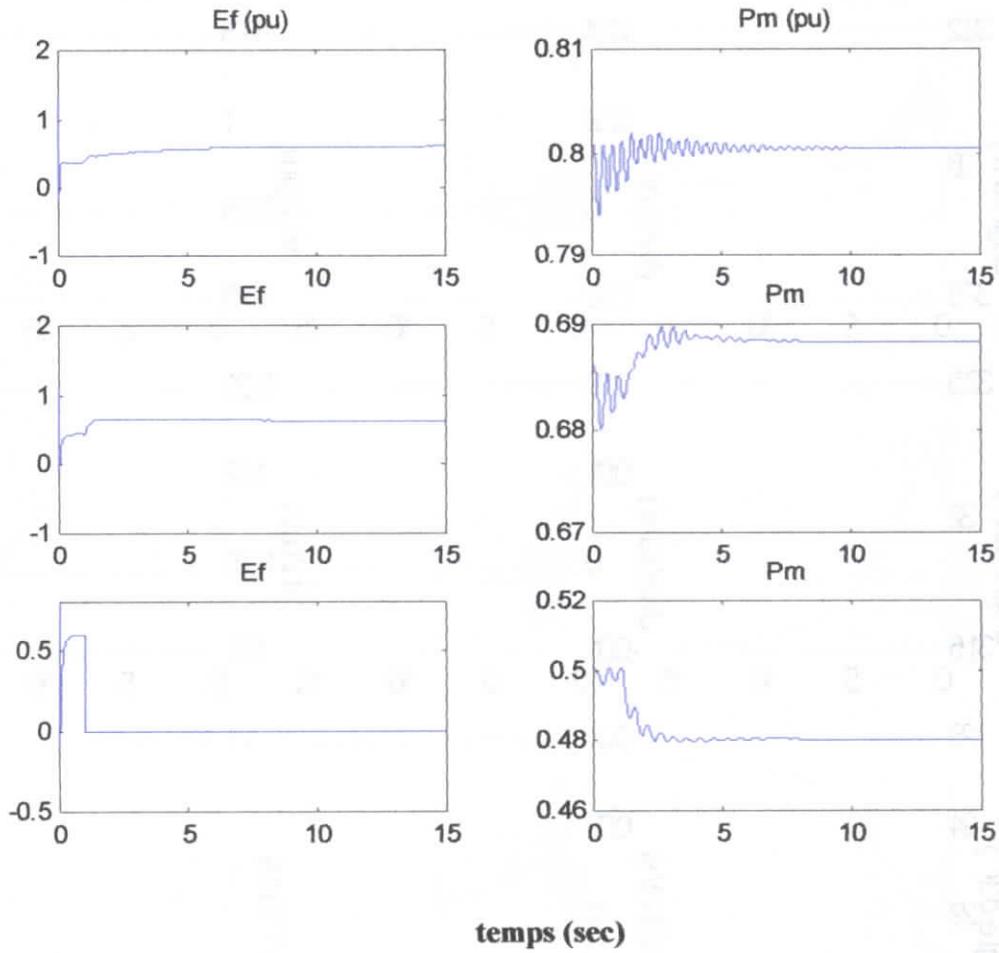


Fig 3.9 : Annulation de la commande du 3^{ème} sous système.

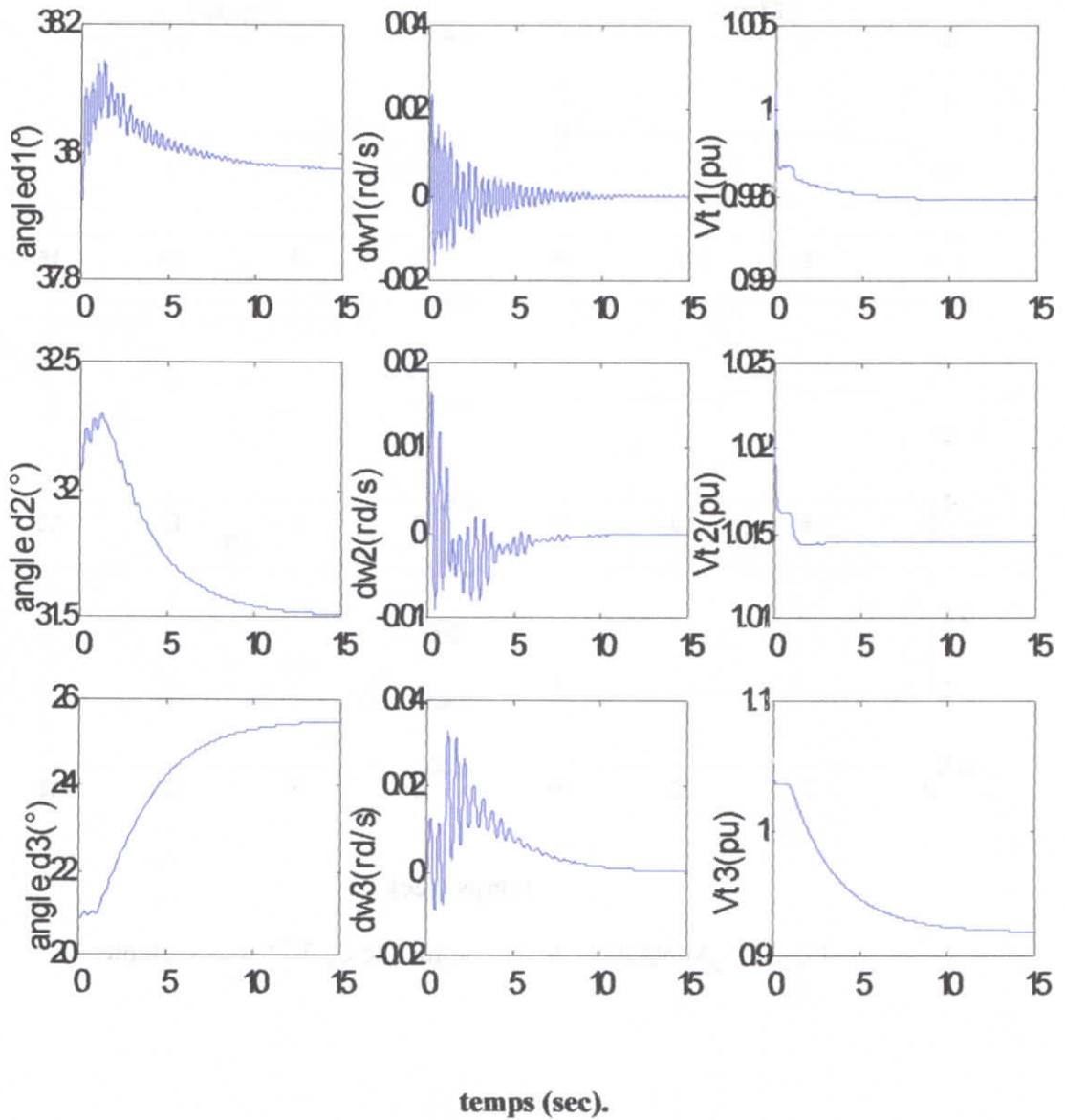


Fig : Réseau à 3 machines, test de défaillance de la commande du 3^{ème} sous-système

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la commande décentralisée par logique floue. Dans ce contexte, nous avons synthétisé un régulateur décentralisé flou de type Mamdani. La décentralisation simplifie largement la synthèse de la commande floue car elle conduit à une base de règles floues réduite. De plus, l'élaboration des règles floues devient simple car le nombre de variables intervenant dans le régulateur est réduit.

Le problème de la commande des systèmes mal connus ou ayant un grand nombre de paramètres peut être résolu par la technique de commande par logique floue qui fournit un support mathématique bien adapté au traitement de l'imprécision et de l'ambiguïté.

Dans le présent travail nous avons exploité les avantages de la méthode de Mamdani et pour valider la méthode, nous l'avons appliquée sur un type de réseau électrique en vue de régler la tension terminale et la vitesse de synchronisme des différents générateurs et d'améliorer la stabilité transitoire.

Le choix de réseau électrique est motivé par le fait qu'il représente de bon exemple des systèmes interconnectés, pour lesquels l'élaboration d'une étude profite pleinement de la technique de décentralisation. Pour cela, nous avons présenté la modélisation du réseau d'une manière un peu détaillée afin de pouvoir l'utiliser pour valider la méthode proposée en ayant pour objectif le réglage des tensions terminales des différents générateurs et l'amélioration de la stabilité transitoire du système. Celle-ci est étudiée dans le domaine temporel en appliquant au réseau des perturbations sévères : rapides et de fortes amplitudes.

L'utilisation de la logique floue s'est avérée intéressante pour le réglage des systèmes complexes car elle permet de construire une commande adéquate à partir d'un ensemble de commandes particulières. La méthode de commande de type Mamdani pour la commande des systèmes non linéaire continu a ouvert une nouvelle direction de recherche, l'application sur le modèle de réseau électrique a montré les bonnes performances de ce régulateur .

Le test de régulateur est basé sur l'application de perturbation sévère, rapide et de forte amplitude pour pouvoir évaluer la stabilité transitoire du réseau électrique.

Conclusion Générale

Le test est un court-circuit triphasé appliqué pendant une durée de temps limité suivi par l'ouverture de la ligne affectée. Le régulateur a pu surmonter cette perturbation et a parvenu à rétablir le réglage des tensions terminales de chaque générateur et assurer ainsi la stabilité transitoire.

Le deuxième test concernant l'efficacité de la décentralisation, est réalisé par la simulation d'une défaillance d'une station de commande locale. Ce test a montré que le régulateur synthétisé non défaillant arrive à supporter cette perturbation qui est due aux interconnexions et, en plus, participe au réglage de la vitesse du générateur dont la station de commande est défaillante, ce qui assure la stabilité transitoire du réseau électrique.

Bibliographie

- [AND 77] P.M. Anderson, A.A Fouad, « power system control and stability », The IOWA state university press, Ames, IOWA, 1977.
- [ARR 90] J.Arrilaga, C.P. Arnold, “ Computer analysis of power systems”, John Wiley and Sons, New York , 1990.
- [BEN 97] M. Ben Ghalia, “ modelling and robust control of uncertain dynamical systems using fuzzy set theory ,” *Int .J.Control*, vol.68,no.6,pp.1367-1395,1997.
- [BOS 92] A.Boslo,C. Manglavacchi, F.Drius, et M. Golak, « Fuzzy controller for generally loaded DC electric motor » in *IFAC (Intelligent Compenent and instruments for Control applications)*, Malaga, Spain, 1992.
- [BOU 93] B. Bouchon-Meunoer, *Logique Floue. PUF*,1993.
- [BUH 94] H.Buler « Réglage par logique floue » *PPR.*, 1994.
- [GEG 95] A.E. Gegov et P.M. Frank, “Decntralized fuzzy control of multivariable systems by active decomposition of control laws, “ *INT.J.Control*, vol.62,no.4, pp.781-798,1995.
- [GHA 96] O. Ghanayem, L. Reznik,“ A universal adaptation procedure for fuzzy controller with the application to power system stability control,“in *proceedings of the 35th Conference on Decision and Control*, Japan, pp. 1141-148,1996.
- [HEL 93] D.H. Hellendoorn et M. Reinfrank, An introduction to fuzzy Control. Springer Verlag,1993.
- [HIY 96] T. Hiyama, “Integrated fuzzy logic stabilizing controller for power systems,” in *Proc. 35th CDC*, Japan, pp. 2185-2190,1996.

- [HRE 92] R. Hreero, J. Landaluze, C. F. Nicolas, et R. Reyero, « Ahighly non linear fuzzy control algorithm for servo system positioning, » in IFAC (Intelligent component and Instruments for Control Applications), Malaga, Spain,1992.
- [KAU 87] A. Kauffman, Nouvelle logique floue pour l'intelligence Artificielle. Hermès, 1987
- [KET 92] R. Ketata, *Méthodologie de régulation Numérique Incluant la Logique Floue* Thèse de doctorat, no 199, INSA, Toulouse,1992.
- [LEE 90a] C. C. Lee. " *fuzzy Logic in control systems : fuzzy logic controller-part I.* " *IEEE Trans.syst,Man and Cybern.*,vol 20,pp. 404-418,Feb.1990
- [LEE 90b] C. C. Lee. " *fuzzy Logic in control systems : fuzzy logic controller-part II.* " *IEEE Trans. syst, Man and Cybern.*,vol 20,pp. 419-435,Feb.1990.
- [MAM 74] E. H. Mamdani. " Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant, " *in Proc.IEE* , vol. 121, pp. 1585-1588, 1974.
- [MEN 95] J. Mendel, " Fuzzy logic system for engineering. A tutorial ," in *Proc. IEEE*, vol 83, no3,pp.345-377, Mars,1995.
- [MOKH] Mokhtari, "Matlab 5,Simulink3"
- [OUR 95] M. A. Ourari , " *commande multivariable par mode de glissement appliquée aux réseaux électrique multimachines* ", Thèse de Magister,, ENP, 1995.
- [SAD 98] S. M. Sadeghzadeh, M. Ehsen, N. Hadj Said, R.Feuillet, « Improvement of transient stability limit in power system transmission lines using fuzzy control of FACTS devices, " *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13,no. 3,pp.917-922,
- [SCH 95] H. Scholten, « *Logique Floue et Régulation PID* » : Théorie et pratique de la régulation Active avec Interface à réaliser Soi-même et Programme d'Expérimentation. Publitronic,1995.

- [SER 89] H. Seraji, "Decentralized adaptative control of manipulators ; theory, simulation and experimentation " *IEEE Trans. Robotics and automation*, vol.5 no.2,pp. 183-201, Apr. 1989.
- [SHA 88] S. Shao, "Fuzzy self organizing controller and application for dynamic process " *Fuzzy Sets. Syst.*, vol.26, pp.151-164, 1988.
- [SIL 76] D.D. Siljak, M. B. Vukcevic, "Decentralization, stabilization and estimation of Large-scale systems," *IEEE Trans Automatic control*, pp.363-366, Jun. 1976.
- [TAK 83] T. Takagi et M. Sugeno, " Derivation of fuzzy control rules from human operators control actions" in *IFAC Fuzzy Information* , Marseille, France 1983,
- [TZA 90] S. Tzafestas, "Incremental Fuzzy PID control " *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 37, no 5, Oct. 1990.
- [USH 94] H. Ushida, T. Yamaguchi, K. Goto et T. Takagi, "Fuzzy-Neuro control using associative memories and its applications," in *Control Eng., Practice*, Vol.2, no. 1, ppp.129-145,1994.
- [WEN 98] j. Wen, S. Cheng, O. P. Malik, (1998) "Asynchronous generator fuzzy excitation conroller optimally designed qth a genetic algorithm," *IEEE Trans. Power Systems*, vol.13, no. 3, pp. 884-889,1998.
- [ZAD 88] L. A. Zadeh " Fuzzy logic " *IEEE Comput.Mag*, pp. 83-93, 1988
- [ZHU 98] C.Zhu, R. Zhou, Y. Wang, "A new decentralized nonlinear voltage controller for multi-machine power systems" *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 13, no. 1

Annexe 1

Les paramètres du réseau a trois machines

Paramètres du réseau

Nœud de départ	Nœud d'arrivée	$R(pu)$	$X_{ij} (pu)$
1	2	0.0923	0.5313
1	3	0.1293	0.7169
1	4	0.1782	0.7998
2	3	0.0628	0.4775
2	4	0.0666	0.3520
3	4	0.0926	0.6508

Paramètres des charges

$$A = 0.4257 - j 2.038 p.u.$$

$$B = 0.1121 - j 1.176 p.u.$$

$$C = 0.4218 - j 1.475 p.u.$$

Paramètres des machines

Machine	$X_d(p.u)$	$X_d'(p.u)$	$T_{ao}(s)$	$H(s)$	D	k_c
1	1.68	0.32	4.0	2.31	0	20
2	0.88	0.33	8.0	3.40	0	20
3	1.02	0.20	7.76	4.63	0	20

Points des fonctionnement

$$\delta_{10} = 37.93^\circ, V_{10} = 1.00 \text{ pu}, P_{m1} = 0.8 \text{ pu};$$

$$\delta_{20} = 32.07^\circ, V_{120} = 1.02 \text{ pu}, P_{m2} = 0.7 \text{ pu};$$

$$\delta_{30} = 20.88^\circ, V_{130} = 1.04 \text{ pu}, P_{m3} = 0.5 \text{ pu};$$

Calcul de la matrice admittance

D'abord, nous allons faire un changement de numérotation des différents nœuds. Ceci sera fait après l'ajout des nœuds additionnels correspondant aux nœuds internes des générateurs. Le défaut considéré ici est court-circuit triphasé survenant à la ligne de transmission qui lie le nœud (1) au nœud (2) à une distance du nœud (1) égale à 20% de la longueur de cette ligne. Ce défaut est poursuivi par l'ouverture de cette ligne de transmission.

- Avant le défaut

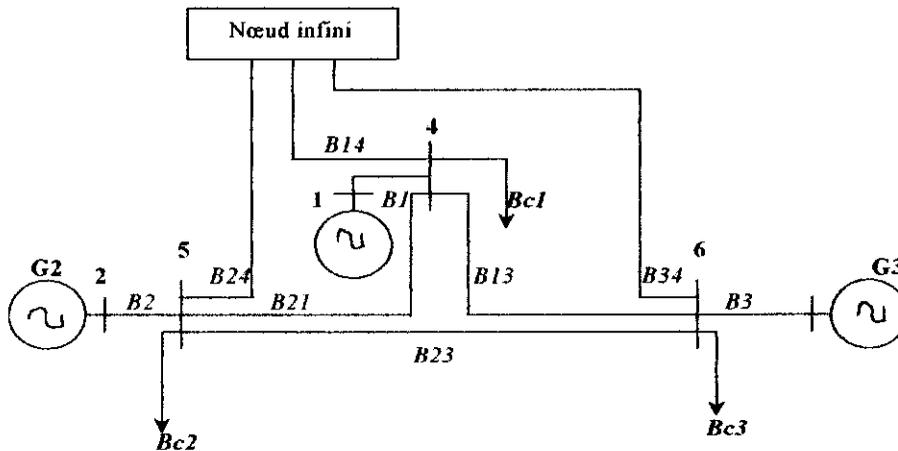


Fig.1.1 le réseau électrique avant le défaut.

Les différentes grandeurs B_{ij} sont données comme suit

$$B_i = -\frac{1}{x_{di} + x_{Ti}}, B_{ij} = -\frac{1}{2x_{ij}} \quad j \neq 4, B_{i4} = -\frac{1}{x_{i4}}$$

La matrice $[\bar{Y}]$ est donnée par

$$\overline{Y} = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 & 0 & -B_1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & 0 & -B_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & 0 & 0 & -B_3 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -B_1 & 0 & 0 & 0 & (B_1+B_2+B_3+B_4+B_5) & -B_2 & -B_3 & -B_4 \\ 0 & B_2 & 0 & 0 & -B_2 & (B_2+B_2+B_3+B_4+B_5) & -B_3 & -B_4 \\ 0 & 0 & B_3 & 0 & -B_3 & -B_3 & (B_3+B_3+B_4+B_5) & -B_4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -B_4 & -B_4 & -B_4 & (B_4+B_4+B_5) \end{bmatrix}$$

décomposons la matrice \overline{Y} en \overline{Y}_{GG} , \overline{Y}_{GL} , \overline{Y}_{LG} et \overline{Y}_{LL} ,

$$\overline{Y}_{GG} = \overline{Y}_{GL} = \overline{Y}_{LG} = \text{diag}(B_i)$$

Utilisant la formule

$$\overline{Y}_r = \overline{Y}_{GG} - \overline{Y}_{GL} \overline{Y}_{LL}^{-1} \overline{Y}_{LG}$$

nous pouvons tirer

$$\overline{Y}_r = \begin{bmatrix} 0.1827-j & 0.5941 & 0.0281+j & 0.3818 & 0.0193+j & 0.5030 & -0.1161+j & 1.1017 \\ -0.0281+j & 0.3818 & 0.1462 & -j & 1.8560 & 0.0386+j & 0.5227 & -0.1161+j & 1.3949 \\ 0.0193+j & 0.5030 & 0.0386+j & 0.5227 & 0.2633 & -j & 2.0235 & -0.1382+j & 1.580 \\ -0.1161+j & 1.1017 & -0.1013+j & 1.3949 & -0.1382+j & 1.5809 & 0.4209 & -j & 4.0000 \end{bmatrix}$$

• Pendant le défaut

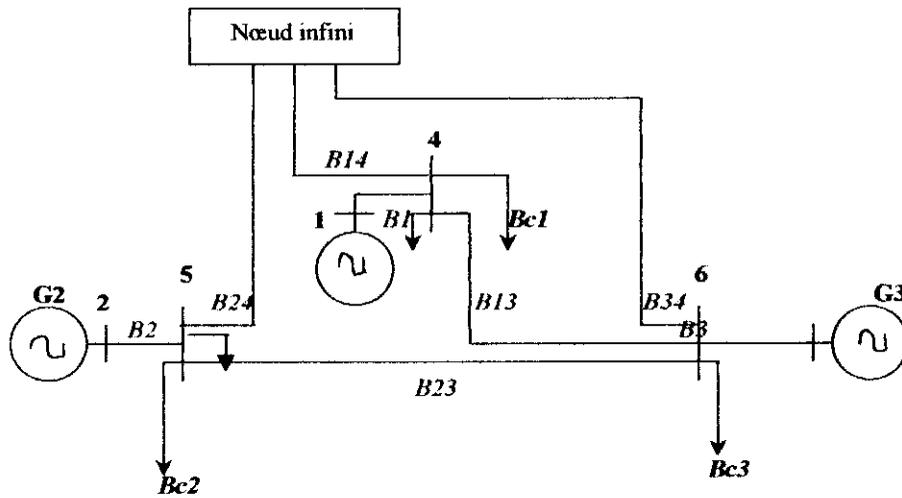


Fig. 1.2 le réseau électrique pendant le défaut

nous pouvons tirer

$$[\bar{Y}_r] = \begin{bmatrix} 0.1023 - j 2.4492 & 0.0017 + j 0.0227 & 0.0115 + j 0.1688 & -0.0245 + j 0.3384 \\ -0.0017 + j 0.0227 & 0.1382 - j 2.0067 & 0.0381 + j 0.3826 & -0.0564 + j 1.0757 \\ 0.0115 + j 0.1688 & 0.0381 + j 0.3826 & 0.2694 - j 2.1535 & -0.0818 + j 1.2871 \\ -0.0245 + j 0.3384 & -0.0564 + j 1.0757 & -0.0818 + j 1.2871 & 0.6454 - j 4.0000 \end{bmatrix}$$

• Après le défaut

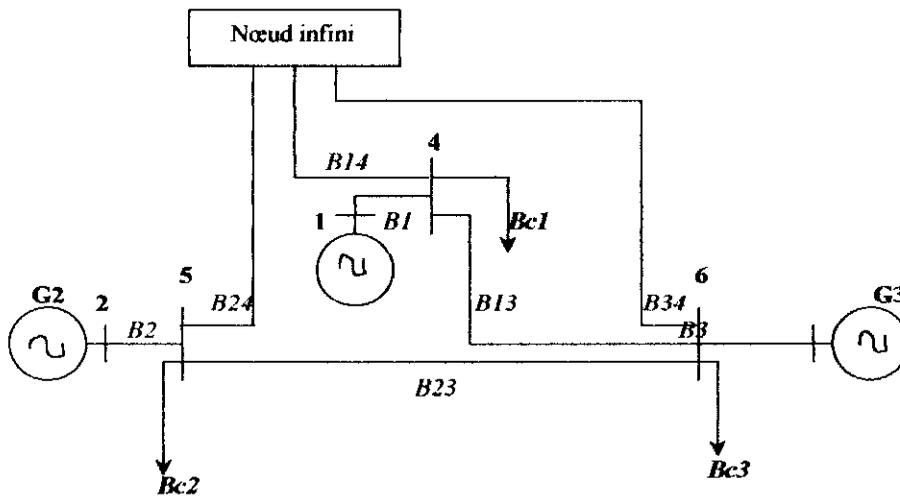


Fig. 1.3 le réseau électrique après le défaut

nous pouvons tirer

Annexe 2

Normes et Conormes triangulaires

Normes triangulaires

La norme triangulaire (t-norme) est une classe d'opérations binaires définies par

$$T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (3.1)$$

Qui satisfont les axiomes suivants

1. commutativité

$$\forall x,y \quad T(x,y) = T(y,x) \quad (3.2)$$

2. Associativité

$$\forall x,y,z \quad T(x,T(y,z)) = T(T(x,z),z) \quad (3.3)$$

3. Monotonie

$$\forall x,y,z,t \text{ si } x \leq z \text{ et } y \leq z \text{ alors } T(x,y) \leq T(z,t) \quad (3.4)$$

4. le 1 est l'élément neutre

$$T(x,1) = x \quad (3.5)$$

L'opération MIN est un exemple d'une T-norme

Conormes Triangulaires

La conorme triangulaire (t-conorme) est une classe d'opérations binaires définies par

$$\perp : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] \quad (3.6)$$

qui satisfont les axiomes suivants