

### **III.1 .Introduction**

Un système de puissance à plusieurs zones a pour avantage de renforcer la continuité de service en donnant la possibilité aux différentes zones d'être solidaire les unes des autres en permettant un échange d'énergie entre elles quand c'est nécessaire, cet échange pouvant se faire à travers des lignes d'interconnexion. La gestion d'un tel système est beaucoup plus complexe que si le système ne comportait qu'une zone [19]

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à un système à deux zones qui dans son principe de fonctionnement est le même qu'un système à plusieurs zones. L'approche est la même que ce que nous avons adopté précédemment à savoir, on examine le comportement du système quand il n'est équipé d'aucune régulation, ensuite nous l'étudions quand il est régulé

### **III.2. Modélisation du système**

#### **III.2.1 Principe**

Les zones (réseaux) du système sont connectées à travers des lignes de transmission assurant l'échange d'énergie entre elles. Toute variation de charge dans le réseau se répercute sur tout le système et la valeur de la fréquence dans chaque zone est affectée. Du fait de l'interconnexion, les fréquences des zones évoluent différemment en phase transitoire pour finalement prendre la même valeur en régime stationnaire du fait justement de la forte dépendance entre les zones. Cette gestion de réseau n'est pas sans défi quand le réseau est intelligent.

Le gestionnaire de ce type de réseau (réseau à plusieurs zones) est donc confronté aux avantages et aux inconvénients qu'impliquent l'interconnexion des zones et la difficulté d'exploitation de ce type de réseau [21]

Comme avantages, on peut citer

- une meilleure régulation de la fréquence,
- une assistance mutuelle en cas d'incident ;
- réduction de la réserve primaire.

Comme inconvénients, on peut citer :

- propagation des effets d'incidents d'une zone à l'autre,
- difficulté de gestion d'une production décentralisée (injection des sources d'énergie dans le système),

- difficulté d'amortissement des oscillations électromécaniques lentes (0.1 à 0.5 Hz),
- complexité de gestion des outils de protection (temporisation des disjoncteurs, etc...).

### III.2.2 Echange de puissance entre les zones

La figure III.1 ci-dessous schématise la connexion des deux zones au travers d'une ligne de liaison de réactance  $X_{12}$ . Les tensions aux niveaux des zones 1 et 2 sont respectivement

$$V_1 = |V_1| \angle \delta_1 \quad \text{et} \quad V_2 = |V_2| \angle \delta_2$$



Figure III.1 : Interconnexion de 2 zones

En fonctionnement normal, la puissance qui s'écoule dans la ligne de liaison de la zone 1 et vers la zone 2 est donnée par la relation (III.1) ci-dessous :

$$P_{\text{tie},12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{III.1})$$

Une petite variation de charge quelconque dans le réseau donne lieu à une petite variation de puissance dans la ligne d'interconnexion telle qu'exprimée par la relation (III.2) ci-dessous :

$$\Delta P_{\text{tie},12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (\text{III.2})$$

La puissance synchronisante du système est telle que :

$$T_{12} = \frac{|V_1||V_2|}{X_{12}} \cos(\delta_1 - \delta_2) \quad (\text{III.3})$$

Tenant compte de l'expression (III.3), La relation (III.2) peut s'écrire donc sous la forme (III.4) ci-dessous :

$$\Delta P_{tie,12} = T_{12} (\Delta\delta_1 - \Delta\delta_2) \quad (III.4)$$

La variation de l'angle rotorique  $\Delta\delta$  en fonction de la variation de fréquence est telle que :

$$\Delta\delta = 2\pi \int_0^t \Delta f dt \quad (III.5)$$

L'expression (III.4) s'écrit alors :

$$\Delta P_{tie,12} = 2\pi T_{12} \left( \int_0^t \Delta f_1 dt - \int_0^t \Delta f_2 dt \right) \quad (III.6)$$

Exprimée dans le domaine de Laplace, la relation (III.6) s'écrit sous la forme (III.7) :

$$\Delta P_{tie,12}(s) = \frac{2\pi T_{12}}{s} [\Delta f_1(s) - \Delta f_2(s)] \quad (III.7)$$

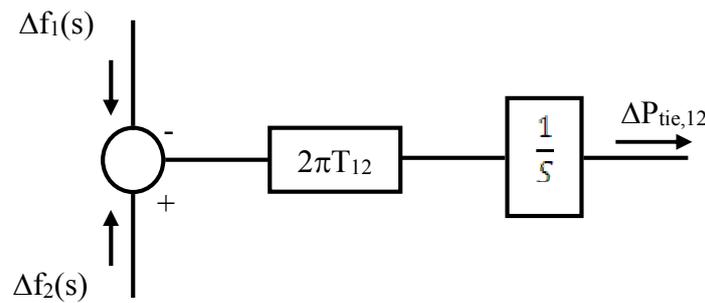


Figure III.2 : Bloc diagramme de l'équation (III.7)

De même l'échange de puissance de la zone 2 vers la zone 1 s'écrit sous la forme (III.8) ci-dessous :

$$\Delta P_{tie,21} = 2\pi T_{21} \left( \int_0^t \Delta f_2 dt - \int_0^t \Delta f_1 dt \right) \quad (III.8)$$

Soit dans le domaine de Laplace :

$$\Delta P_{tie,21}(s) = \frac{2\pi T_{21}}{s} [\Delta f_2(s) - \Delta f_1(s)] \quad (III.9)$$

avec

$$T_{21} = \frac{|V_2||V_1|}{X_{21}} \cos(\delta_2 - \delta_1) \quad (III.9)$$

Si  $S_{b1}$  et  $S_{b2}$  sont les puissances nominales prises comme puissances de bases des zones 1 et 2 respectivement, on aura la relation entre les deux puissances synchronisantes donnée par l'expression (III.10) ci-dessous

$$T_{21} = -\frac{S_{b1}}{S_{b2}} T_{12} = a_{12} T_{12} \quad (III.10)$$

avec

$$a_{12} = -\frac{S_{b1}}{S_{b2}}$$

Si la même puissance de base est retenue pour les deux zones,  $a_{12} = -1$ . Et par suite :

$$\Delta P_{tie,21} = a_{12} \Delta P_{tie,12} = -\Delta P_{tie,12} \quad (III.11)$$

Le schéma bloc du système à deux zones est représenté sur la figure III.3 ci-dessous :

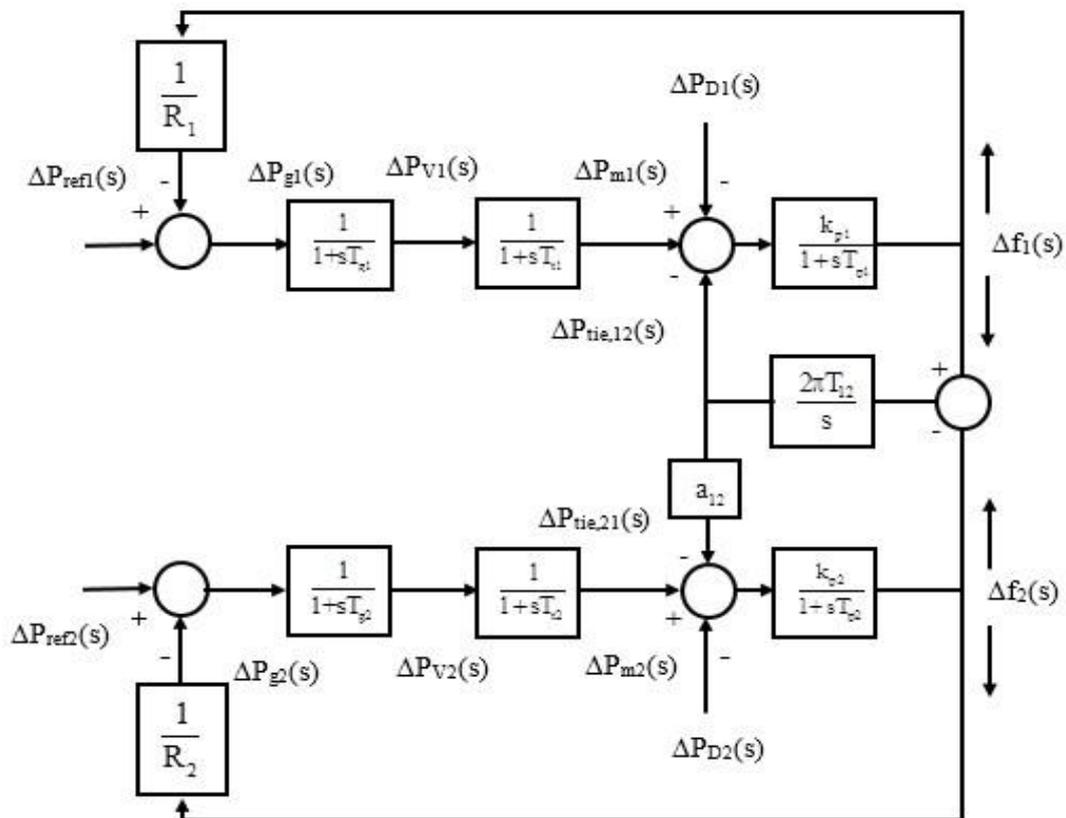


Figure III.3 : Bloc diagramme d'un système à deux zones

### III.3. Système non régulé

Nous considérons le système à deux zones avec les paramètres du tableau III.1 ci-dessous :

Tableau III.1 Caractéristiques du réseau

	H(s)	D	K <sub>p</sub>	T <sub>P</sub> (s)	T <sub>t</sub> (s)	T <sub>g</sub> (s)	R(pu)	R (Hz/pu)
Zone1	5	0.01	100	20	0.3	0.08	0.04	0.04x50=2.0
Zone2	5	0.0083	120	24	0.4	0.1	0.05	0.05*50=2.5

Le coefficient d'amortissement  $D_i$  et le temps de réponse  $T_{pi}$  pour la machine  $i$  sont déterminés par les relations (III.12) et (III.13) ci-dessous :

$$D_i = \frac{1}{K_{pi}} \quad (III.12)$$

$$T_{pi} = \frac{2H_i}{f_0} K_{pi} \quad (III.13)$$

Pour un système non régulé, les puissances de référence restent constantes car il n'y a aucune commande donc  $\Delta P_{ref1} = \Delta P_{ref2} = 0$ . Les variations de charge respectives des zones 1 et 2 sont  $\Delta P_{D1}$  et  $\Delta P_{D2}$ . La variation de fréquence est liée à la variation de puissance par le statisme d'où les relations (III.12) et (III.13) pour chacune des zones :

$$\Delta P_{m1} = -\frac{1}{R_1} \Delta f_0 \quad (III.12)$$

$$\Delta P_{m2} = -\frac{1}{R_2} \Delta f_0 \quad (III.13)$$

L'équilibre des puissances dans chaque zone est exprimé comme suit :

$$\begin{cases} \Delta P_{m1} - \Delta P_{D1} - \Delta P_{tie,12} = D_1 \Delta f_0 \\ \Delta P_{m2} - \Delta P_{D2} - \Delta P_{tie,21} = D_2 \Delta f_0 \end{cases}$$

Tenant compte des relations (III.11), (III.12) et (III.13), on obtient :

$$\begin{cases} \left( D_1 + \frac{1}{R_1} \right) \Delta f_0 + \Delta P_{tie,12} = \Delta P_{D1} \\ \left( D_2 + \frac{1}{R_2} \right) \Delta f_0 + a_{12} \Delta P_{tie,12} = \Delta P_{D2} \end{cases}$$

Soit

$$\begin{cases} \beta_1 \Delta f_0 + \Delta P_{tie,12} = \Delta P_{D1} \\ \beta_2 \Delta f_0 + a_{12} \Delta P_{tie,12} = \Delta P_{D2} \end{cases} \quad (III.14)$$

$$\text{avec } \beta_1 = D_1 + \frac{1}{R_1} \quad \text{et} \quad \beta_2 = D_2 + \frac{1}{R_2}$$

La résolution de relation (III.14) permet d'avoir :

$$\Delta f_0 = -\frac{\Delta P_{D2} - a_{12} \Delta P_{D1}}{\beta_2 - a_{12} \beta_1} \quad (III.15)$$

$$\Delta P_{tie,12} = -\frac{\beta_1 \Delta P_{D2} - \beta_2 \Delta P_{D1}}{\beta_2 - a_{12} \beta_1} \quad (III.16)$$

Les deux zones sont supposés de mêmes puissances nominales (de base) donc  $a_{12} = -1$ .

Pour une variation de charge au niveau de la zone1  $\Delta P_{D1} = 0.01 \text{ pu}$  et une variation de charge nulle au niveau de la zone 2 soit  $\Delta P_{D2} = 0 \text{ pu}$ , la variation de fréquence et la variation de puissance d'échange au régime stationnaire sont déterminées par utilisation des expressions (III.15) et (III.16) et sont telles que :

$$\Delta f_0 = -0.0109 \text{ Hz}$$

$$\Delta P_{tie,12} = -0.0044 \text{ pu}$$

Les variations de puissance mécanique dans chaque zone sont telles que :

$$\Delta P_{m1} = \frac{\Delta f_0}{R_1} = \frac{-0.0109}{-0.04} = 0.0054 pu$$

$$\Delta P_{m2} = \frac{\Delta f_0}{R_2} = \frac{-0.0109}{-0.05} = 0.0044 pu$$

Le bloc diagramme de simulation de la figure III.4 utilisant les paramètres ci-dessous permet d'avoir les résultats des figures III.5a et III.5b confirmant les résultats obtenus ci-dessus.

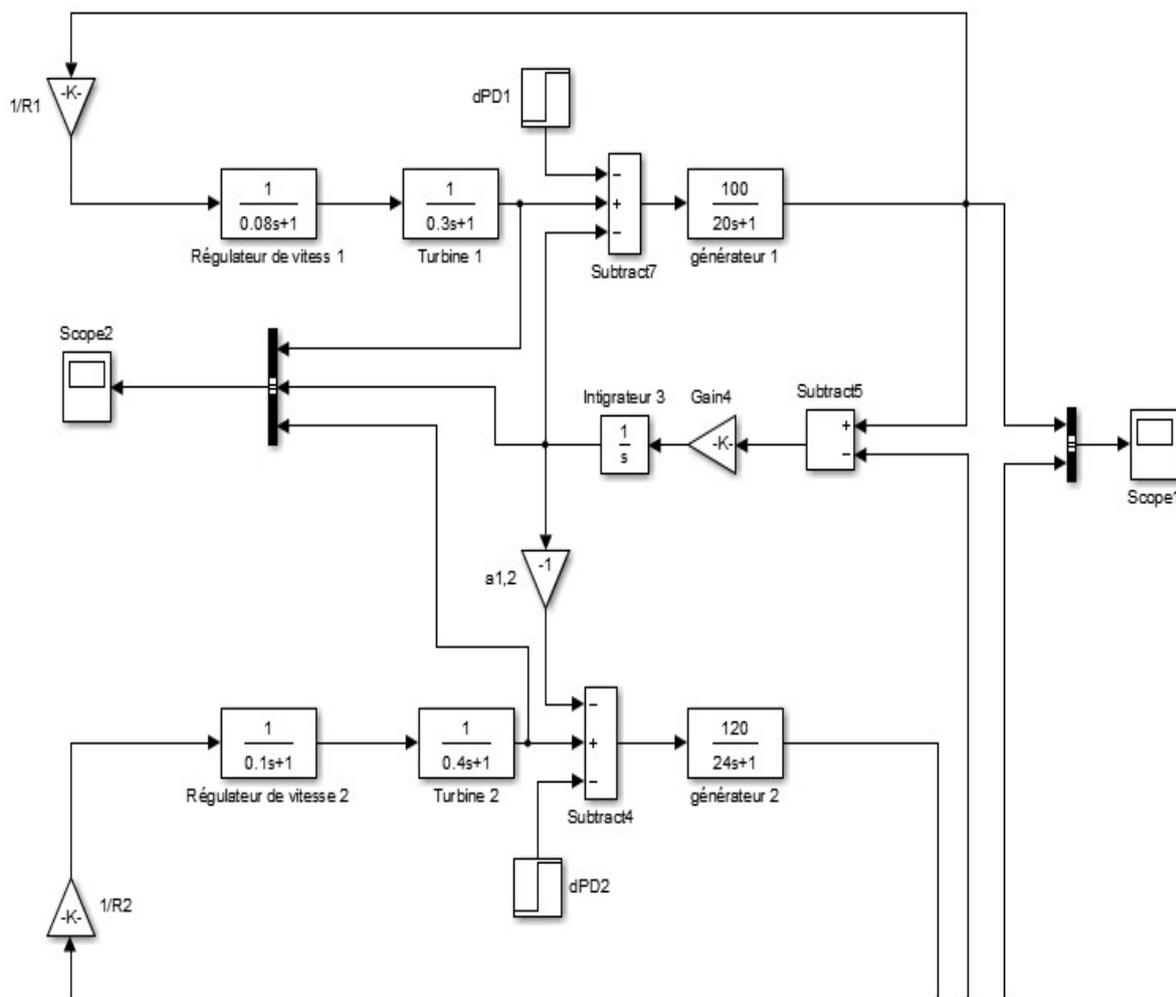
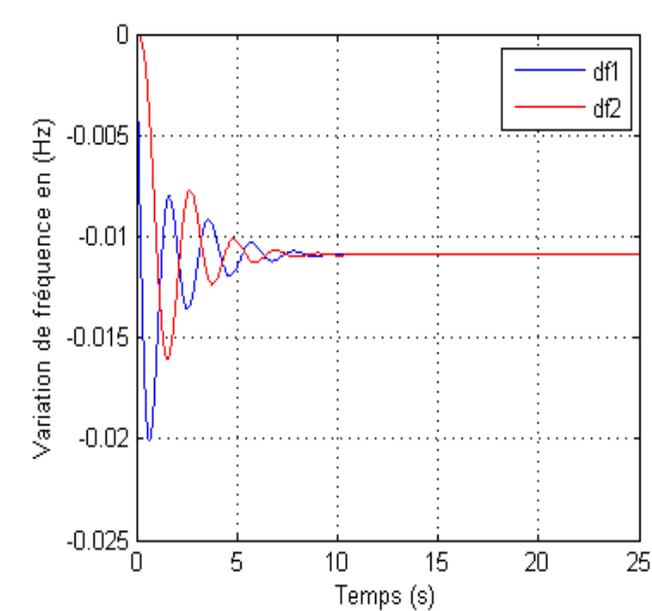
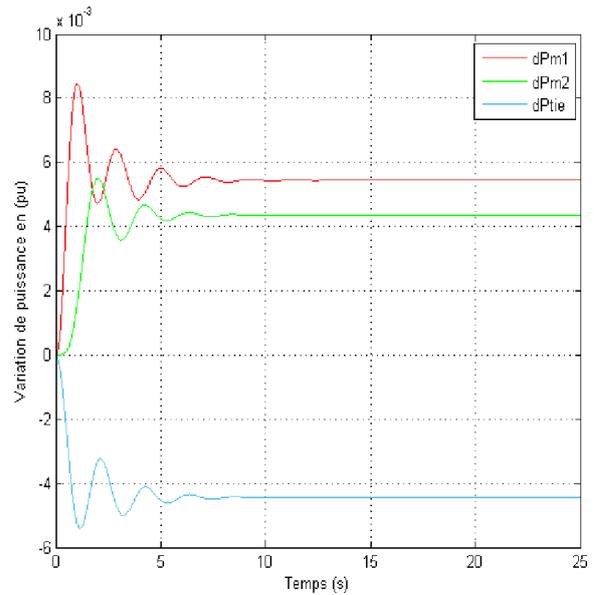


Figure III.4 : Bloc de simulation

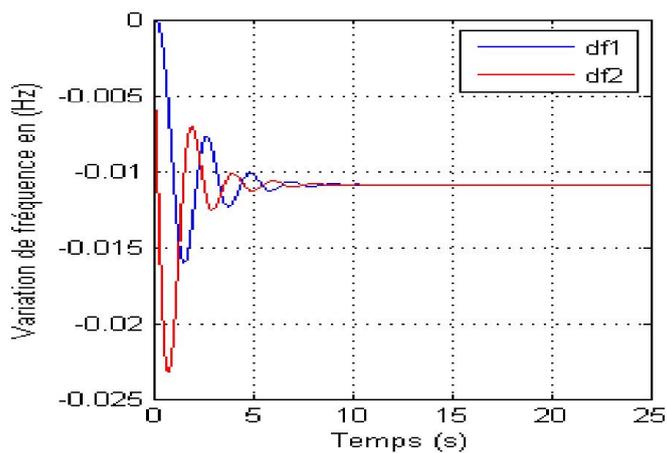
Les résultats des figures III.5c et III.5c sont obtenus quand la variation de charge est observée dans la zone 2 avec  $\Delta P_{D2}=0.01pu$  alors qu'il n'y a aucune variation de charge dans la zone 1 ( $\Delta P_{D1}=0$ )



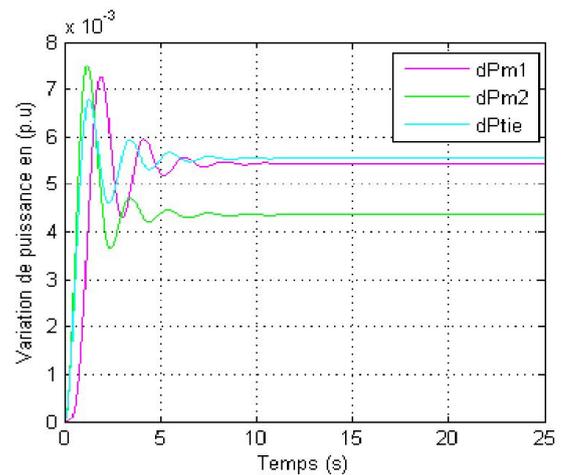
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III.5 : Variation des fréquences et des puissances

Pour une variation de charge égale dans chaque zone et telle que  $\Delta P_{D1} = \Delta P_{D2} = 0.01 \text{ pu}$ , et dans les mêmes conditions de valeurs pour  $\beta_1$  et  $\beta_2$  et pour  $a_{12} = -1$ , on obtient la variation de fréquence en régime stationnaire  $\Delta f_0 = -0.0218 \text{ Hz}$  confirmé par les résultats de la figure III.6 a ci-dessous.

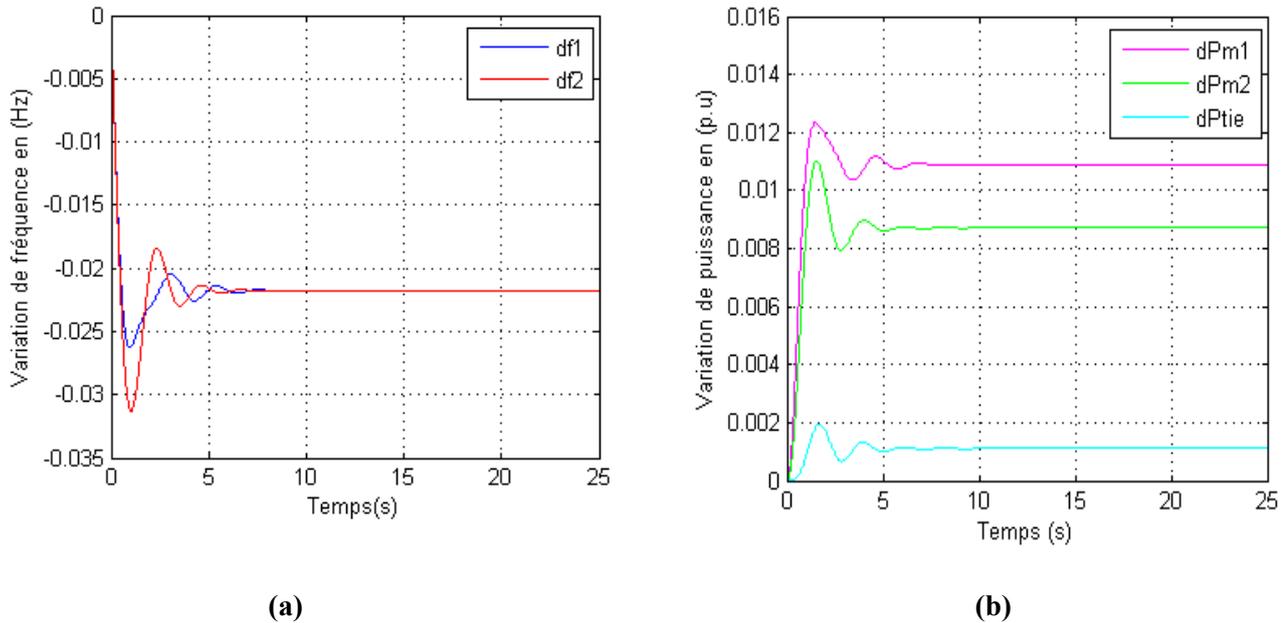


Figure III.6 : Variation des fréquences et des puissances

### III.4. Système régulé

Dans un système interconnecté composé de plusieurs zones, le rôle du réglage automatique de la production (AGC : Automatic Generation Control) est de répartir toute variation de charge entre les différentes zones constituant le système énergétique et ce dans l'objectif de garder le synchronisme pour l'ensemble du réseau.

Ceci est atteint lorsque l'action du contrôle maintient :

- La fréquence à la valeur nominale programmée ;
- La puissance d'échange nette avec les zones voisines aux valeurs planifiées.

Pour le système à deux zones, à l'état stationnaire,  $\Delta f_0$  doit être nul pour qu'on retrouve le synchronisme. Pour atteindre cet objectif, les écarts de réglage de zone (ACE : Area Control Error) sont introduits sous la forme des relations (III.7) et (III.8) données ci-dessous [20.23].

$$ACE_1 = \Delta P_{12} + B_1 \Delta f_1 \quad (III.17)$$

$$ACE_2 = \Delta P_{21} + B_2 \Delta f_2 \quad (III.18)$$

Tenant compte des expressions (III.17) et (III.18), la commande du système à deux zones est de la forme suivante :

$$\Delta P_{ref,1} = -k_{I1} \int (\Delta P_{tie,12} + B_1 \Delta f_1) dt \quad (III.19)$$

$$\Delta P_{ref,2} = -k_{I2} \int (\Delta P_{tie,21} + B_2 \Delta f_2) dt \quad (III.20)$$

Dans le domaine de Laplace, les relations (III.19) et (III.20) s'écrivent sous la forme suivante :

$$\Delta P_{ref,1}(s) = -\frac{k_{I1}}{s} (\Delta P_{tie,12}(s) + B_1 \Delta f_1(s)) \quad (III.21)$$

$$\Delta P_{ref,2}(s) = -\frac{k_{I2}}{s} (\Delta P_{tie,21}(s) + B_2 \Delta f_2(s)) \quad (III.22)$$

$k_{I1}$  et  $k_{I2}$  sont des coefficients constants.  $B_1$  et  $B_2$  sont des coefficients liés au statisme et à l'amortissement et égaux à  $\beta_1$  et  $\beta_2$  déterminés précédemment [23.24].

La figure III.7 ci-dessous représente le système régulé et la figure III.8 est l'illustration de ce bloc diagramme dans Matlab/Simulink.

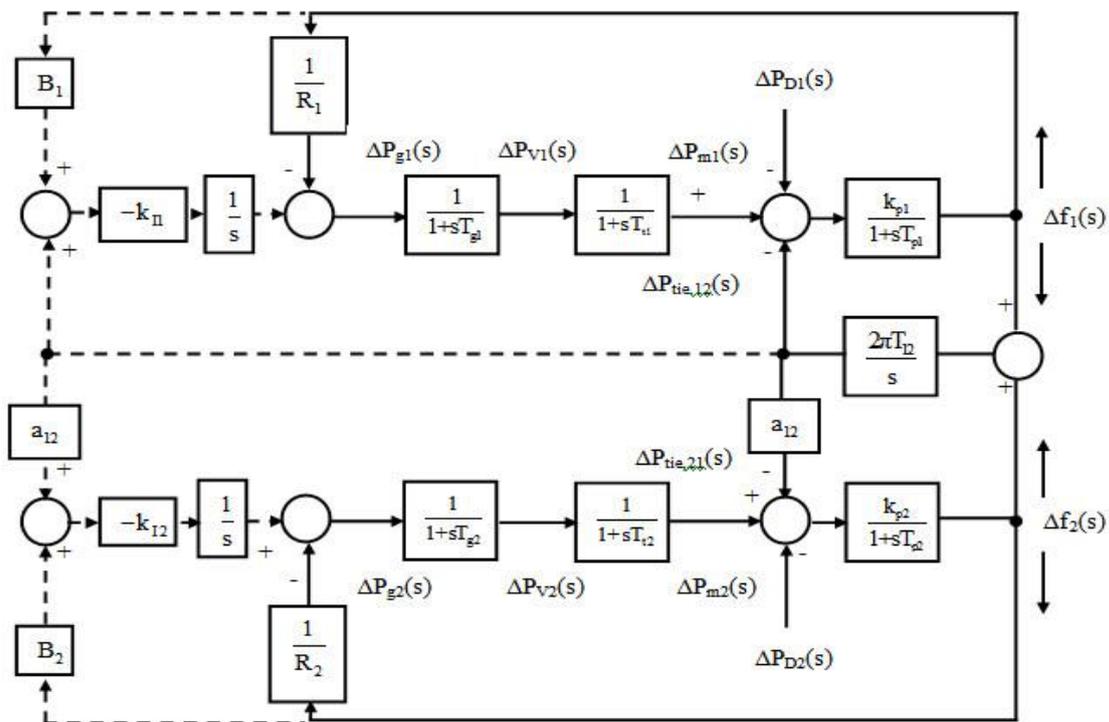


Figure III.7 : Bloc diagramme de réglage automatique de la production (AGC)

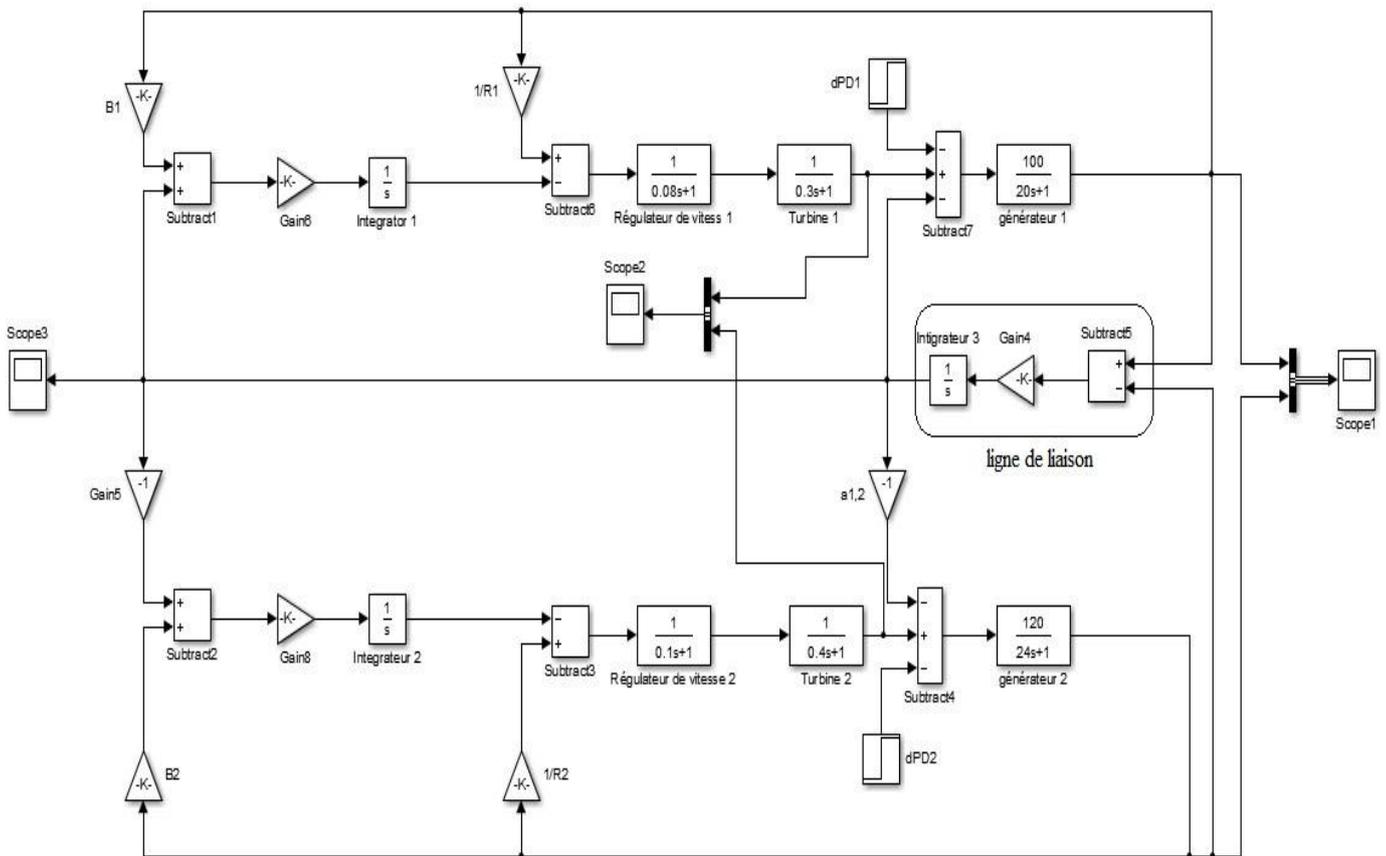


Figure III.8 : Bloc de simulation du système régulé dans Matlab/Simulink

Une variation de charge dans chaque zone est telle que  $\Delta P_{D1} = \Delta P_{D2} = 0.01 \text{ pu}$  permet d'avoir les résultats de la figure III.9. Pour  $\Delta P_{D1} = 0.01 \text{ pu}$  et  $\Delta P_{D2} = 0 \text{ pu}$ , nous avons obtenu les résultats de la figure III.10. On observe dans chaque cas l'efficacité de la régulation dans la mesure où la variation de fréquence dans chaque zone après une période transitoire s'annule d'où le rétablissement du synchronisme du système dans son ensemble.

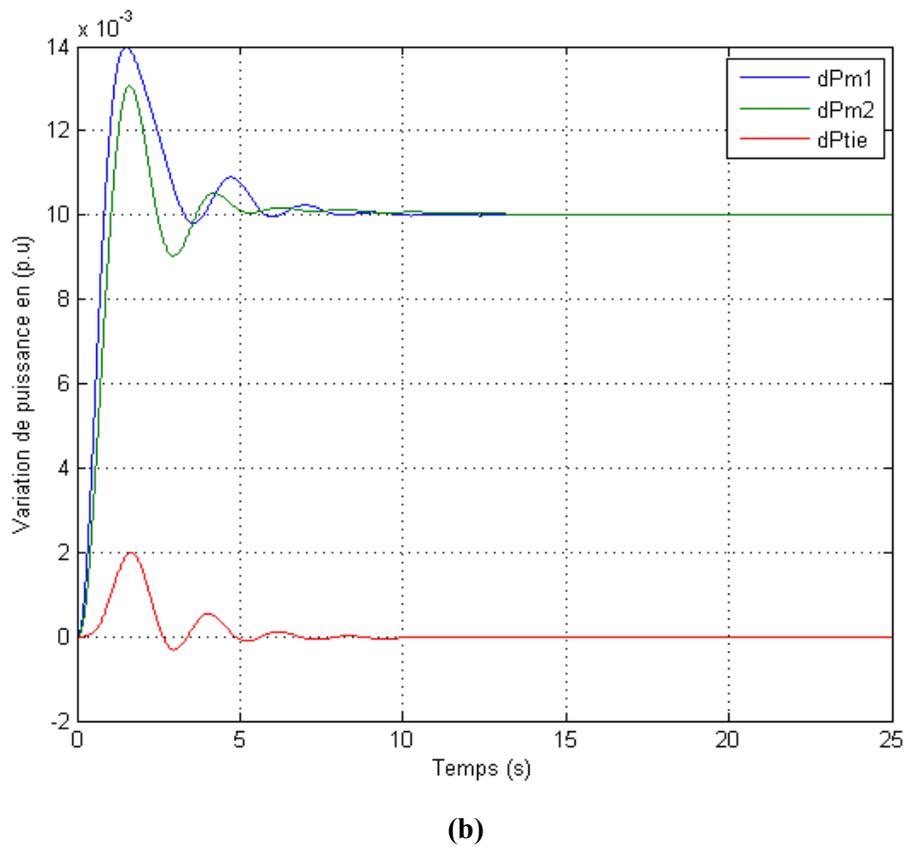
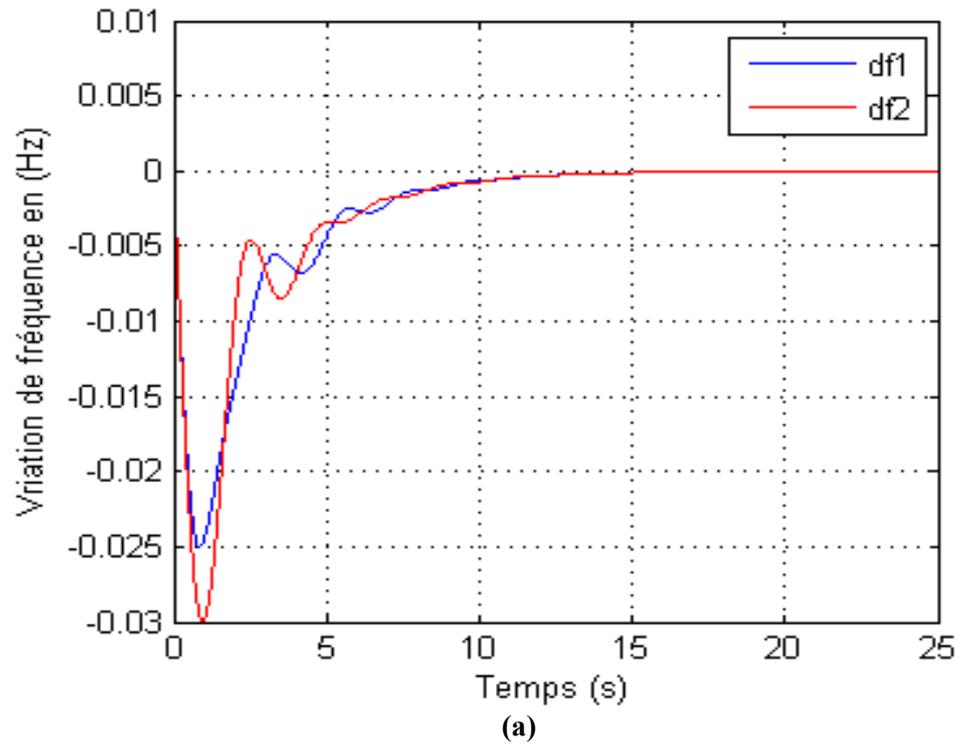
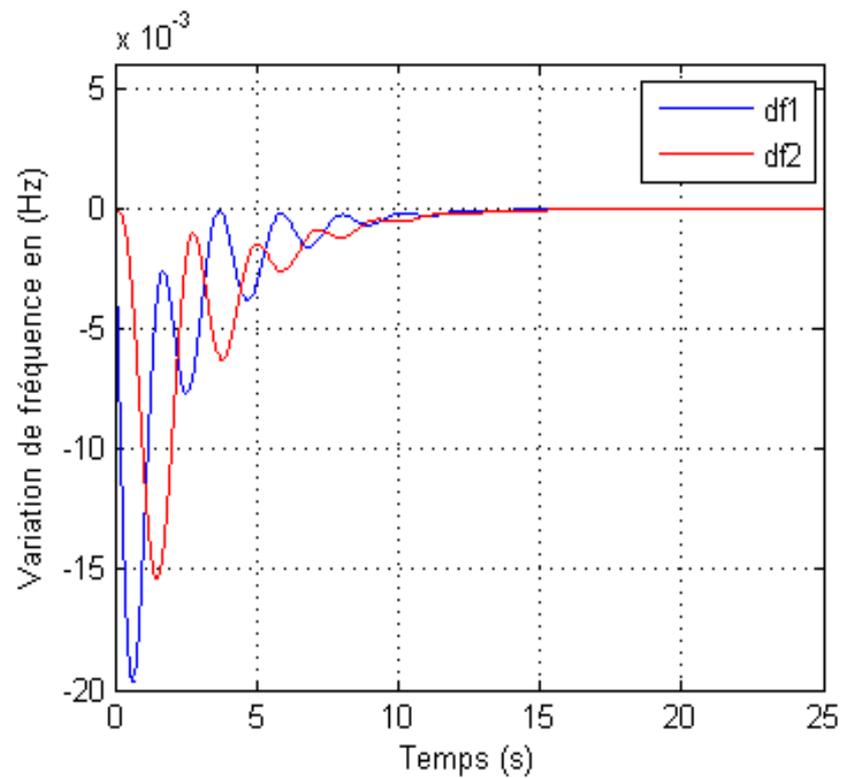
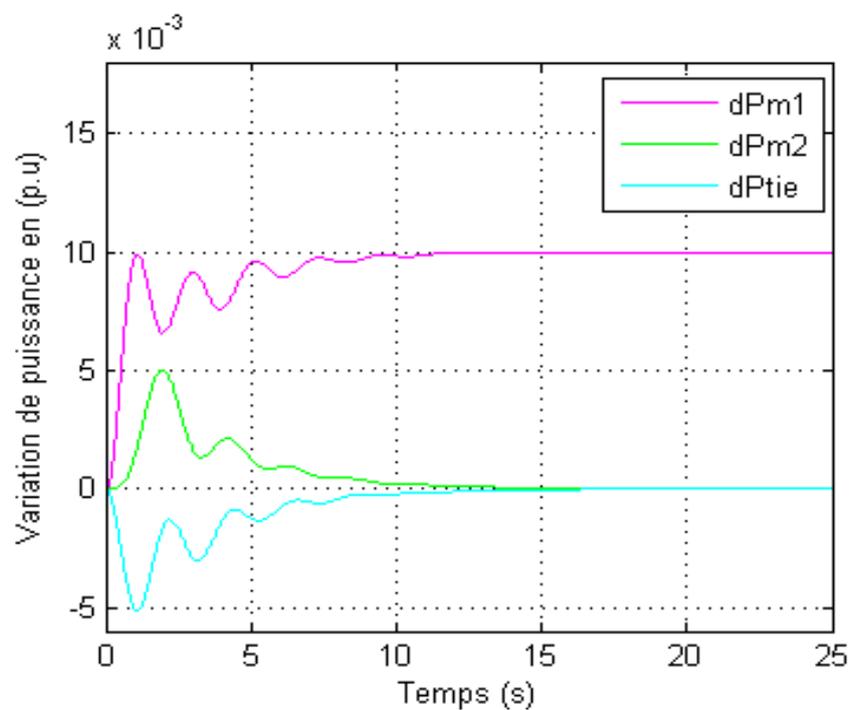


Figure III.9 Variation des fréquences et des puissances avec même variation de la charge



(a)



(b)

Figure III.10 : Variation des fréquences et des puissances avec une variation de la charge dans la zone (1)

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons étudié un réseau interconnecté à deux zones. Nous avons montré que les zones peuvent contribuer efficacement au réglage de la fréquence que la variation de charge se fasse dans chaque zone séparée ou dans les deux zones simultanées pour peu que la régulation soit correctement paramétrée. L'échange bidirectionnel de la puissance entre les zones a été examiné montré son efficacité dans le maintien de la fréquence par le soutien que peut apporter une zone à l'autre selon les besoins de puissance du système.