

### 2.1 Introduction

L'étude de la circulation de puissance des réseaux électriques (ou load flow) est effectuée pour déterminer les plans de tensions en régime permanent. Une fois le plan de tensions obtenu, on détermine la circulation des puissances active et réactive dans le réseau. Dans ce chapitre, nous présentons la modélisation et la simulation du système étudié en régime permanent. Le réseau électrique d'étude est un système à 5 nœuds comprenant 2 nœuds générateurs et 3 nœuds de charge.

### 2.2 Modélisation d'un Réseau

Un réseau est constitué d'un ensemble d'éléments. On entend par éléments les composants qui peuvent intervenir dans un réseau tel que les alternateurs, les transformateurs, les lignes, les câbles, etc... La combinaison de tous ces éléments donne lieu à un nombre assez grand d'équations qu'il est impossible de résoudre manuellement. Aussi l'appel à l'ordinateur devient une nécessité impérieuse. [7]

Le modèle de ligne retenu est un schéma en  $\pi$  entre les deux nœuds  $i-j$ .

En posant la puissance apparente nodale  $S_i$  en fonction de la puissance générée  $S_{Gi}$  et la puissance demandée  $S_{Di}$ :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} = V_i J_i^* \tag{2.1}$$

On prend la structure de la Fig. 1.1 ci-dessous comme un exemple de modélisation.

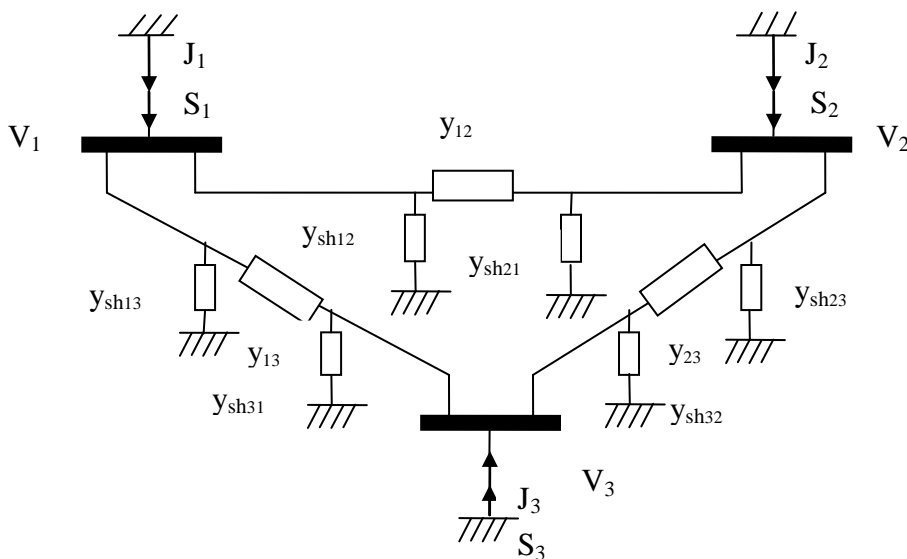


Fig.2.1 Schéma simplifié d'un réseau à 3 nœuds

La loi des nœuds concernant les courants permet d'avoir :

$$J_1 = V_1 y_{sh12} + V_2 y_{sh13} + (V_1 - V_2) y_{12} + (V_1 - V_3) y_{13} \quad (2.2)$$

$$J_2 = V_2 y_{sh23} + V_2 y_{sh21} + (V_2 - V_3) y_{23} + (V_2 - V_1) y_{21} \quad (2.3)$$

$$J_3 = V_3 y_{sh31} + V_3 y_{sh32} + (V_3 - V_1) y_{31} + (V_3 - V_2) y_{32} \quad (2.4)$$

Les équations (2.2), (2.3), et (2.4) peuvent s'écrire aussi :

$$J_1 = V_1 (y_{sh12} + y_{sh13} + y_{12} + y_{13}) - V_2 y_{12} - V_3 y_{13} \quad (2.5)$$

$$J_2 = -V_1 y_{21} + V_2 (y_{sh23} + y_{sh21} + y_{23} + y_{21}) - V_3 y_{13} \quad (2.6)$$

$$J_3 = -V_1 y_{31} - V_2 y_{32} + V_3 (y_{sh31} + y_{sh32} + y_{31} + y_{32}) \quad (2.7)$$

Les équations (2.5), (2.6), et (2.7) peuvent s'écrire sous la forme matricielle (2.8) ci-dessous:

$$[J] = [Y][V] \quad (2.8)$$

Où :

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ J_3 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} y_{sh12} + y_{sh13} + y_{12} + y_{13} & -y_{12} & -y_{13} \\ -y_{21} & y_{sh23} + y_{sh21} + y_{23} + y_{21} & -y_{23} \\ -y_{31} & -y_{32} & y_{sh31} + y_{sh32} + y_{31} + y_{32} \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

$[Y]$  est la matrice admittance nodale du réseau.

L'élément diagonal de la matrice admittance relatif au nœud  $i$  est la somme de toutes les admittances élémentaires et shunt aboutissant en ce nœud. L'élément non diagonal relatif à la liaison  $i-j$  est égal à l'admittance élémentaire de la liaison précédée du signe moins.

On peut noter que :

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^3 (y_{ij} + y_{shij}) \quad (2.13)$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad \text{pour } i \neq j \quad (2.14)$$

L'extension des résultats précédents à un réseau à n nœuds donne :

$$[J] = \begin{bmatrix} J_1 \\ J_2 \\ \vdots \\ J_n \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

$$[V] = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

$$[Y] = \begin{bmatrix} Y_{11} & \cdots & Y_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Les éléments de la matrice admittance sont tels que :

$$Y_{ii} = \sum_{j=1}^n (y_{ij} + y_{shij}) \quad (2.18)$$

$$Y_{ij} = -y_{ij} \quad \text{pour } i \neq j \quad (2.19)$$

La puissance apparente au nœud i est donnée par la relation :

$$S_i = V_i J_i^* \quad (2.20)$$

Avec :

$$V_i = |V_i| e^{j\theta_i} \quad (2.21)$$

Au nœud i, le courant  $J_i$  est tel que :

$$J_i = \frac{S_i}{V_i^*} = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (2.22)$$

Tenant compte des relations (2.8) et (2.20), on obtient :

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} = Y_{i1}V_1 + Y_{i2}V_2 + \dots + Y_{in}V_n \quad (2.23)$$

La relation (1.23) peut s'écrire sous la forme :

$$P_i - jQ_i - Y_{i1}V_1V_i^* + Y_{i2}V_2V_i^* + \dots + Y_{in}V_nV_i^* = 0 \quad (2.24)$$

L'expression (2.24) est non linéaire. Sa résolution n'est possible que numériquement.

### 2.3 Classification des nœuds

Dans l'étude de la répartition des charges chaque nœud est décrit par quatre variables dont deux de ces variables sont imposées. Les quatre variables sont:

- Puissance active P.
- Puissance réactive Q.
- Module de la tension V.
- Angle de la tension  $\theta$ . [7]

Selon que les grandeurs P, Q,  $|V|$  et  $\theta$  sont connues ou inconnues en chaque nœud et en les combinant, on peut classer les nœuds en trois types.

Nœuds	Type 1	Type 2	Type 3
<b>Variables connues</b>	P, Q	P, $ V $	$ V , \theta$
<b>Variables inconnues</b>	$ V , \theta$	Q, $\theta$	P, Q

Tableau 2.1 : Classification des types de nœuds du réseau.

### 2.4 Bilan de puissance

Le bilan de puissance active du réseau s'écrit :

$$\sum P_G = \sum P_D + \text{pertes de puissance actives du réseau} \quad (2.25)$$

La somme des puissances actives générées  $P_G$  est égale à la somme des puissances actives absorbées par les charges  $P_D$  augmentée des pertes de puissance active du réseau dues aux résistances des lignes et des câbles.

Le bilan de puissance réactive du réseau s'écrit :

$$\sum Q_G = \sum Q_D + \text{génération ou consommation de puissance réactive par le réseau} \quad (2.26)$$

La somme des puissances réactives générées  $Q_G$  est égale à la somme des puissances réactives consommées/produites par les charges  $Q_D$  augmentées de la somme des consommations/productions réactives du réseau (réactance des lignes, des câbles, transformateurs, banc de condensateurs, etc...).[7]

## 2.5 Méthodes numériques de calcul de la circulation de puissance

L'équation non linéaire (2.24) se présente sous la forme :

$$f(X) = 0 \quad (2.27)$$

Une telle équation peut être résolue par une méthode itérative de calcul qui utilise l'approche suivante basée sur les étapes ci-dessous :

1. Choix d'une valeur initiale
2. Cette valeur initiale est utilisée dans l'équation (2.27) pour calculer une nouvelle et 2<sup>ème</sup> valeur plus précise.
3. La 2<sup>ème</sup> valeur est utilisée pour le calcul d'une 3<sup>ème</sup> valeur plus précise que la 2<sup>ème</sup> etc.....

Les méthodes numériques les plus utilisées sont la méthode de Gauss, méthode de Gauss-Seidel et la méthode de Newton-Raphson. Dans ce travail, nous utilisons la méthode de Newton-Raphson qui a l'avantage d'avoir une convergence plus rapide par rapport à celles de Gauss et de Gauss-Seidel. [8]

## 2.6 Etude du réseau a 5 nœuds

Le réseau étudié de la Fig. 1.3 est un réseau 220kV à 5 nœuds et 2 machines.

La tension de base du réseau retenue est 220kV et la puissance de base 100MVA.

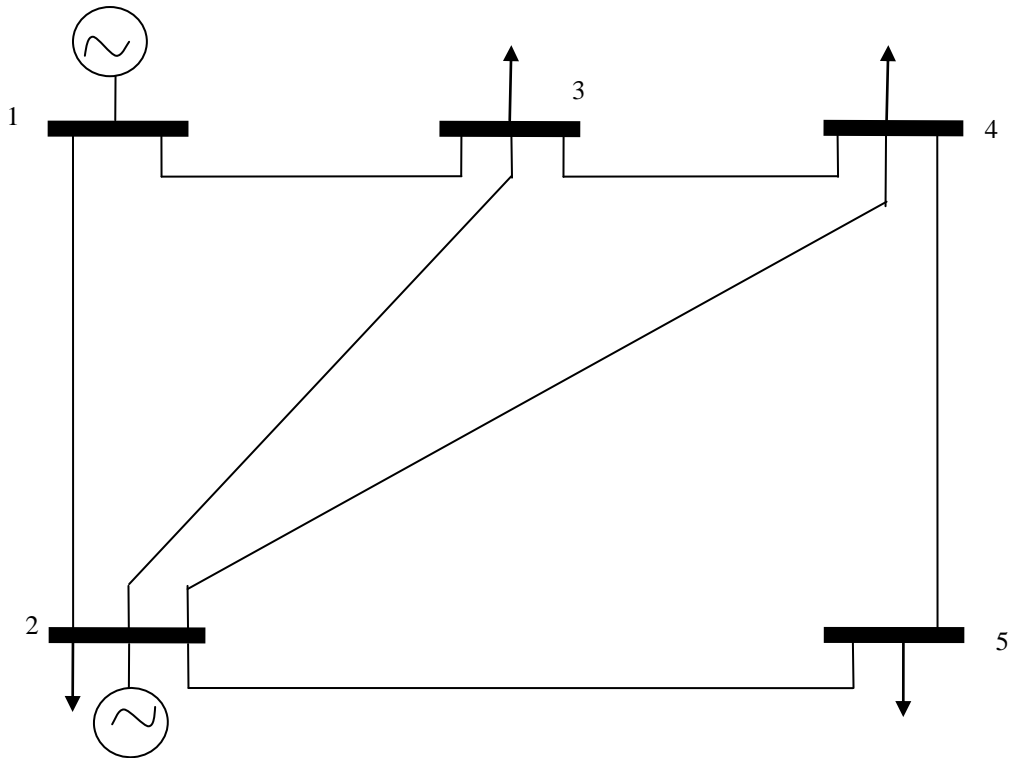


Fig. 2.2 : description du schéma du réseau a 5 nœuds

Tableau 2.2 : Les données et les caractéristiques des lignes.

Ligne i-j	$Z_{ij}$ (p.u.)	$y_{shji}$ (p.u.)
1-2	$0.02+j0.06$	$0+j0.060$
1-3	$0.08+j0.24$	$0+j0.05$
2-3	$0.06+j0.18$	$0+j0.040$
2-4	$0.06+j0.18$	$0+j0.040$
2-5	$0.04+j0.12$	$0+j0.03$
3-4	$0.01+j0.03$	$0+j0.020$
4-5	$0.08+j0.24$	$0+j0.005$

Tableau 2.3 : Les données charges du réseau en p.u calculées avec la puissance de base de 100MVA

Nœud	$P_D$ (p.u.)	$Q_D$ (p.u.)
1	Non spécifiée	Non spécifiée
2	0.20	0.10
3	0.45	0.15
4	0.40	0.05
5	0.60	0.10

Les puissances actives et réactives générées au nœud 1 sont déterminées par l'équilibre production d'une part et consommation et pertes d'autre part.

La puissance active générée au nœud 2 est égale à 40MW et sa puissance réactive égale à 30MVAR quand le nœud est de type 1. Si le nœud est de type 2, la plage de variation de puissance réactive en ce nœud est  $[-3p.u, +3p.u]$

### 2.6.1 Réseau comprenant des nœuds de type 1 et 3

Le nœud 1 pris comme nœud bilan. Le générateur du nœud 2 fournit 40MW et 30MVAR. Avec cette configuration, on obtient le plan de tensions indiquée du tableau 2.4

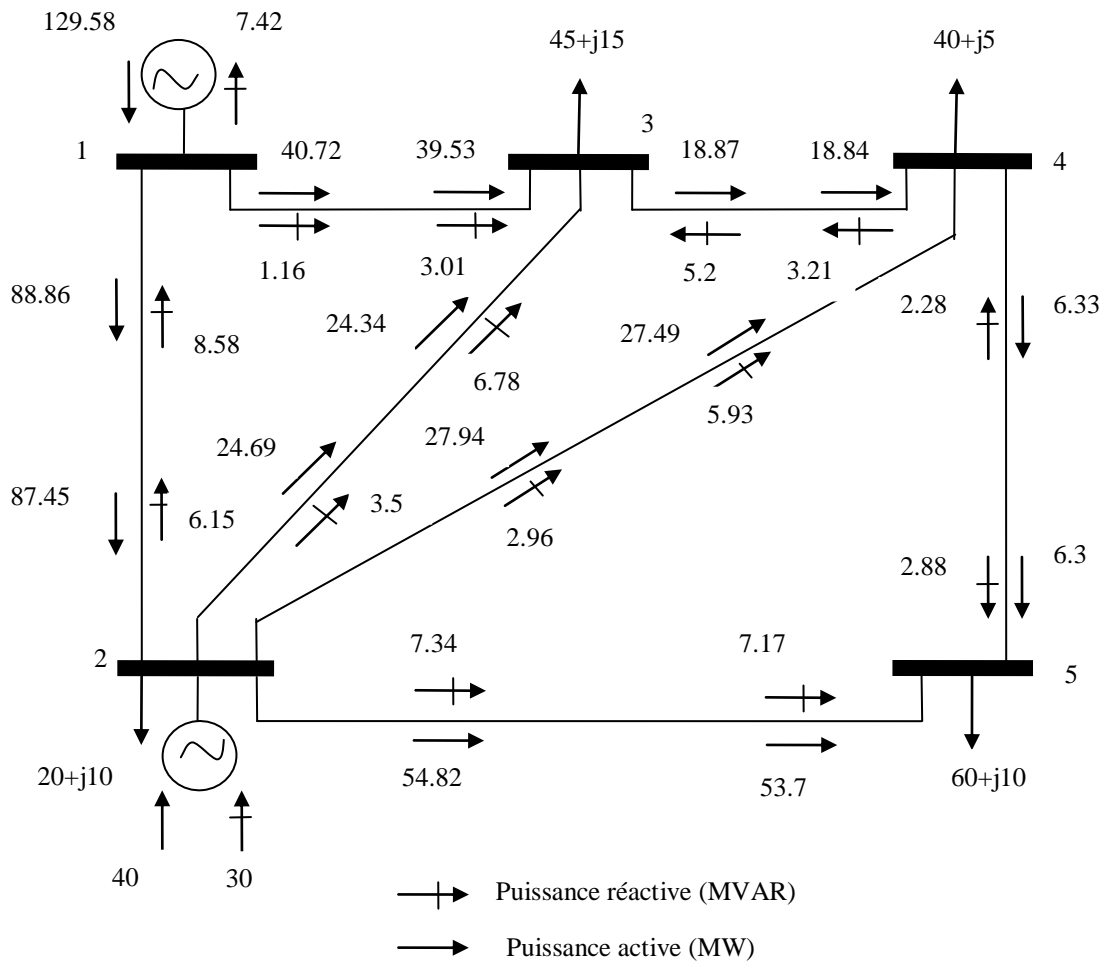


Fig. 2.3 : Le schéma du réseau 5 noeuds non contrôlé en tension

Tableau. 2. 4 : Le plan de tension du réseau 5 nœuds non contrôlé en tension.

Nœuds	Module  Vi  (pu)	Angle i (radian)	Module  Vi  (kV)	Angle θi (degré)	Nombre d'itérations
1	1.06000	0.0000	233.2	0.00000	5
2	1.04744	-0.0490	230.4363	-2.80635	
3	1.02418	-0.0872	225.3186	-4.99697	
4	1.02357	-0.0930	225.1846	-5.32914	
5	1.01794	-0.1073	223.9461	-6.15026	

Tableau. 2.5 : Le plan de circulation de puissance du réseau 5 noeuds non contrôlé en tension.

Branches Sij	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Branches Sji	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Pertes actives transitées (MW)	Pertes Réactives transitées (MVAR)
1-2	88.86382	-8.5794	2-1	-87.45337	6.14865	1.41045	-2.4383
1-3	40.72301	1.1583	3-1	-39.53106	-3.01386	1.19196	-1.85547
2-3	24.69432	3.5464	3-2	-24.34280	-5.20216	0.35152	-3.23757
2-4	27.93612	2.9619	2-4	27.93612	2.96197	0.44134	-2.96560
2-5	54.822293	7.3429	5-2	-53.69768	-7.16712	1.12525	0.17577
3-4	18.87386	-5.2021	4-3	-18.83825	3.21235	0.03560	-1.98981
4-5	6.33303	-2.2847	5-4	-6.30232	-2.83279	0.03071	-5.11758

La circulation de puissance obtenue dans ces conditions est donnée dans la Fig. 2.4. On note des pertes de puissance active  $P_L$  et réactive  $Q_L$  égale à :

$$P_L = 4.59 \text{ MW}$$

$$Q_L = -17.42 \text{ MVAR}$$

Les pertes de puissance réactive  $Q_L$  étant négative montrent que le réseau de transmission fournit la puissance réactive au système. Ceci est caractéristique d'un réseau sous chargé.

### 2.6.2 Réseau comprenant les 3 types de nœuds

Le nœud 1 est pris comme nœud bilan, le nœud 2 est de type 2 contrôlé en tension et le module de cette dernière maintenu à 1p.u. La puissance réactive générée en ce point varie



dans la plage  $[-3p.u, +3p.u]$  avec 100MVA comme puissance de base. Avec cette configuration, on obtient le plan de tensions du tableau 2.4.

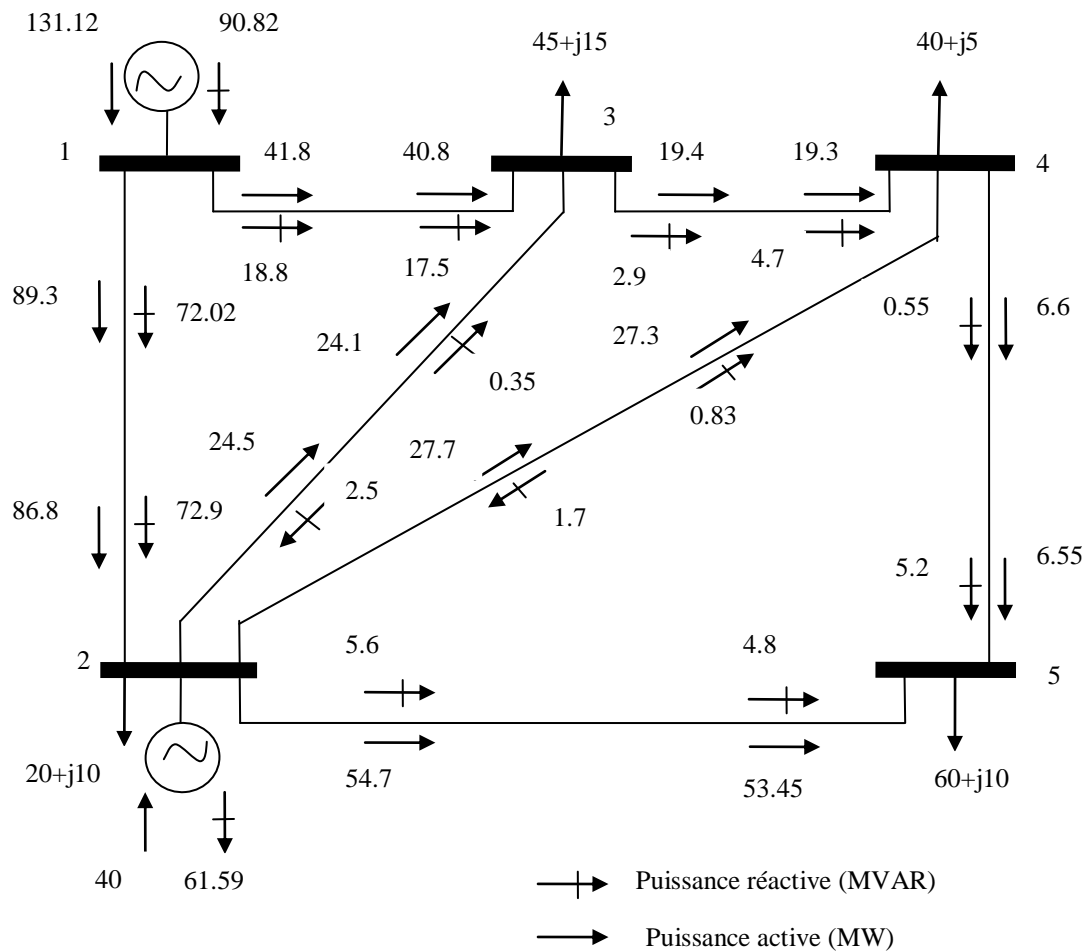


Fig. 2.4 Le schéma du réseau 5 noeuds contrôlé en tension

Tableau. 2. 6 : Le plan de tension du réseau 5 noeuds contrôlé en tension.

Nœuds	Module $ V_i $ (pu)	Angle $i$ (radian)	Module $ V_i $ (kV)	Angle $\theta_i$ (degré)	Nombre d'itérations
1	1.06000	0.0000	233.200	0.0000	5
2	1.00000	-0.0360	220.000	-2.06123	
3	0.98725	-0.0809	217.1943	-4.63669	
4	0.98413	-0.0865	216.5090	-4.95702	
5	0.97170	-0.1006	213.7731	-5.76495	

Tableau. 2.7 : Le plan de circulation de puissance du réseau 5 noeuds contrôlé en tension.

Branches Sij	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Branches Sji	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Pertes actives transitées (MW)	Pertes Réactives transitées (MVAR)
1-2	89.33138	73.99518	2-1	-86.84551	-72.90839	2.48587	1.08680
1-3	41.79085	16.82034	3-1	-40.27302	-17.51250	1.51783	-0.69216
2-3	24.47266	-2.51849	3-2	-24.11315	-0.35230	0.35951	-2.87079
2-4	27.71300	-1.72391	4-2	-27.25215	-0.83056	0.46085	-2.55448
2-5	54.65985	5.55794	5-2	-53.44485	-4.82921	1.21501	0.72873
3-4	19.38618	2.86480	4-3	-19.34611	-4.68775	0.04007	-1.82296
4-5	6.59825	0.51832	5-4	-6.55515	-5.17079	0.04310	-4.65247

La circulation de puissance obtenue dans ces conditions est donnée dans la Fig. 2.5. On note des pertes de puissance active  $P_L$  et réactive  $Q_L$  égale à :

$$P_L = 6.12 \text{ MW}$$

$$Q_L = -10.72 \text{ MVAR}$$

### 2.6.3 Résultats de circulation de puissance par la méthode découplée rapide

#### 2.6.3.1 Réseau du réseau 5 noeuds non contrôlé en tension.

Tableau. 2.8 : Le plan de tension du réseau 5 noeuds non contrôlé en tension.

Nœuds	Module $ V_i $ (pu)	Angle $\theta_i$ (radian)	Module $ V_i $ (kV)	Angle $\theta_i$ (degré)	Nombre d'itérations
1	1.06000	0	233.2	0.000	5
2	1.0474	-0.0490	230.4363	-2.8063	
3	1.0242	-0.0872	225.3186	-4.9970	
4	1.0263	-0.0930	225.1846	-5.3291	
5	1.0179	-0.1073	223.9461	-6.1503	

Tableau. 2.9 : Le plan de circulation de puissance du réseau 5 nœuds contrôlé en tension.

Branches Sij	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Branches Sji	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Pertes actives transitées (MW)	Pertes Réactives transitées (MVAR)
1-2	88.86378	-8.57948	2-1	-87.45333	6.14865	1.41045	-2.43083
1-3	40.72301	1.15839	3-1	-39.53106	-3.01386	1.19196	-1.85547
2-3	24.69433	3.54641	3-2	-24.34281	-6.78398	0.35152	-3.23757
2-4	27.93613	2.96197	4-2	-27.49479	-5.92757	0.44134	-2.96560
2-5	54.82295	7.34297	5-2	-53.69770	-7.16720	1.12525	0.17577
3-4	18.87386	-5.20216	4-3	-18.83825	3.21235	0.03560	-1.98981
4-5	6.59825	0.51832	5-4	-6.55515	-5.17079	0.04310	-4.65247

La circulation de puissance obtenue dans ces conditions est donnée dans la Fig. 2.5. On note des pertes de puissance active  $P_L$  et réactive  $Q_L$  égale à :

$$P_L = 4.58683 \text{ (MW)}$$

$$Q_L = -17.42108 \text{ (MVAR)}$$

### 2.6.3.2 Réseau 5 noeuds contrôlé en tension

Tableau. 2.10: plan de tension du réseau 5 noeuds contrôlé en tension.

Nœuds	Module  Vi  (pu)	Angle i (radian)	Module  Vi  (kV)	Angle $\theta_i$ (degré)	Nombre d'itérations
1	1.0600	0.0000	233.2000	0.0000	5
2	1.000	-0.0360	220.0000	-2.0612	
3	0.9872	-0.0809	217.1943	-4.6367	
4	0.9841	-0.0865	216.5090	-4.9570	
5	0.9717	-0.1006	213.7731	-5.7650	

Tableau. 2.11 : Le plan de circulation de puissance du réseau 5 nœuds contrôlé en tension.

Branches Sij	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Branches Sji	puissances actives transitées (MW)	Puissances réactives transitées (MVAR)	Pertes actives transitées (MW)	Pertes Réactives transitées (MVAR)
1-2	89.33138	73.99518	2-1	-86.84551	-72.90839	2.48587	1.08680
1-3	41.79085	16.82033	3-1	-40.27302	-17.51249	1.51783	-0.69217
2-3	24.4726	-2.5185	3-2	-24.1131	-0.3522	0.3595	-2.8707
2-4	27.7130	-1.7239	4-2	-27.2521	-0.8305	0.4608	-2.5544
2-5	54.6598	5.5579	5-2	-53.4448	-4.8291	1.2150	0.7287
3-4	19.3861	2.8647	4-3	-19.3461	-4.6877	0.0400	-1.8229
4-5	6.5982	0.5183	5-4	-6.5551	-5.1707	0.0431	-4.6524

La circulation de puissance obtenue dans ces conditions est donnée dans la Fig. 2.5. On note des pertes de puissance active  $P_L$  et réactive  $Q_L$  égale à :

$$P_L = 6.12223 \text{ (MW)}$$

$$Q_L = -10.77734 \text{ (MVAR)}$$

### 2.7 Commentaire sur les résultats

- ✓ L'écoulement de puissance est plus important sur la ligne de transmission connectée entre les deux nœuds générateurs (entre le nœud1 et 2). Cette ligne de transmission est aussi celle qui présente des pertes en puissance active les plus élevées puisque transitant les puissances les plus élevées.
- ✓ Le générateur du nœud 1 fournit une quantité supérieure à la demande totale de puissance réactive du réseau, Le générateur du nœud 2 absorbe l'excédent de puissance réactive du réseau et joue alors le rôle d'un compensateur synchrone.
- ✓ Les pertes de puissance active dans le cas où la tension du nœud 2 est réglée à 1pu sont plus élevées que dans le cas où la tension n'était pas contrôlée. Ceci s'explique par le fait que dans le second cas la chute de tension entre les nœuds 1et 2 de tensions respectives  $V_1=1.06pu$  et  $V_2=1pu$  est plus importante que dans le premier cas où on avait  $V_1=1.06pu$  et  $V_2=1.047$ .
- ✓ Dans les deux cas de figure, les pertes de puissance réactive sont négatives ce qui indique que le réseau est sous chargé.

**2.8 Conclusion**

Nous avons modélisé le réseau et examiné les méthodes de Newton Raphson et la méthode rapide découplée de Newton Raphson que nous avons utilisées sur le réseau d'étude à 5 nœuds. Le contrôle de tension permet la maîtrise de la circulation de puissances et par conséquent les pertes de puissances actives. L'examen des pertes de puissance réactive montre que nous avons à faire à un réseau sous chargé