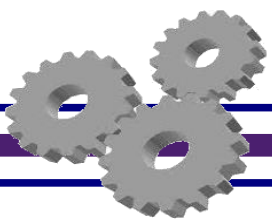


# Écoulement de Puissance (Load Flow)

L'analyse Load Flow (LF) est une terminologie qui représente un ensemble d'analyses numériques et de procédures effectuées à l'ordinateur permettant de déterminer la distribution de puissance dans un système donné, encore plus important.

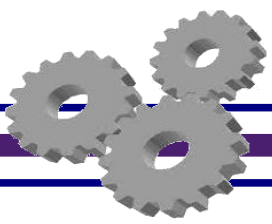
Comment contrôler cette répartition de puissance.



# Écoulement de Puissance (Load Flow)

Voici ci-après les objectifs les plus importants du LF.

1- La détermination des puissances réactives et actives dans la ligne de transmission basée sur certaines considérations à priori associées au récepteur ou au générateur.

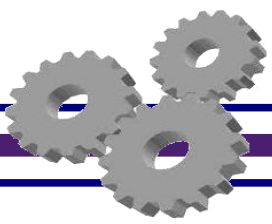


## Écoulement de Puissance (Load Flow)

Voici ci-après les objectifs les plus importants du LF.

2- Le calcul des différences de potentiel à chaque nœud ou jeu de barres (bus en terminologie anglo-saxon).

3- La vérification du fait qu'aucune ligne n'est surchargée. La surcharge peut signifier que la ligne est proche de la stabilité thermique.

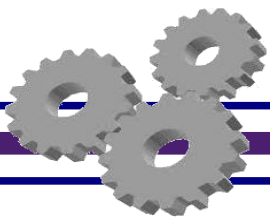


## Écoulement de Puissance (Load Flow)

Voici ci-après les objectifs les plus importants du LF.

4- La surveillance de la ligne en cas de ré-enclenchement.

5- La détermination de l'écoulement de puissance spécifique qui conduit à un dispatch optimum en calculant l'état du réseau ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ,  $\delta$ ,...) dans des hypothèses données de production et de consommation.



## Écoulement de Puissance (Load Flow)

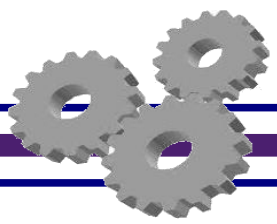
À chaque jeu de barres (nœud), sont définis les 4 paramètres :

P: puissance active injectée ou soutirée;

Q: puissance réactive injectée ou soutirée;

V: module de la tension;

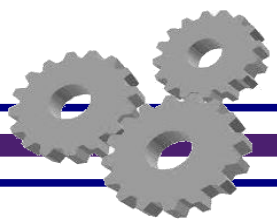
$\delta$ : déphasage de la tension.



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

L'analyse Load Flow (LF) d'un réseau de distribution contenant une centaine de jeux de barres et de lignes de transmission apparaît comme un processus complexe.

Le point de départ d'un problème de flux de puissance est un schéma unifilaire du système électrique, à partir duquel les données d'entrée pour les solutions informatiques peuvent être obtenues. Les données d'entrée se composent de données de bus, de données de lignes de transmission et de données de transformateurs.

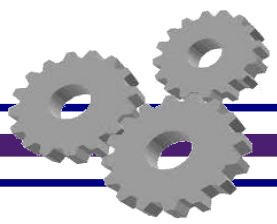


## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

Considérons un réseau très simplifié avec seulement deux jeux de barres

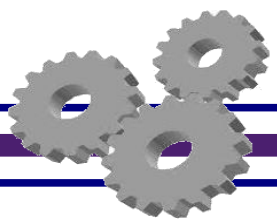






## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

Lors de l'analyse des systèmes d'alimentation, les tensions complexes de bus ainsi que les injections de courants complexes sont inconnues. Sont plutôt connues la puissance complexe consommée par la charge et la puissance injectée par les générateurs ainsi que leurs amplitudes de tension.

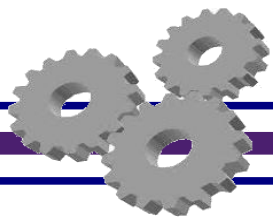


## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

Par conséquent, nous ne pouvons pas utiliser directement les équations  $Y_{bus}$ , mais devons plutôt utiliser les équations de bilan de puissance.

L'étude du LF est réalisée dans des conditions stables à l'état d'équilibre où la génération totale doit être égale à la charge totale + les pertes totales.

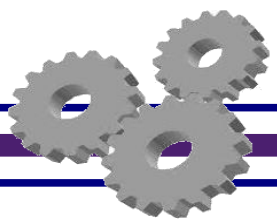
$$P_G = P_C + \sum \text{Pertes} \quad \text{et} \quad Q_G = Q_C + \sum \text{Pertes}$$



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

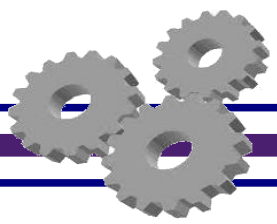
Les objectifs de l'étude LF sont de calculer :

- les tensions de bus;
- le courant de dérivation et le flux de puissance;
- les pertes du système;
- la puissance réactive des dispositifs de contrôle de tension et le réglage des dispositifs de contrôle tels que les changeurs de prises en charge.



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

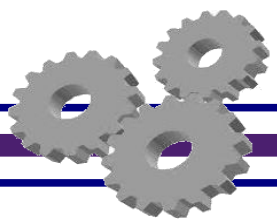
L'étude de flux de charge (LF) est une étude de base pour déterminer les conditions de fonctionnement en régime permanent à vérifier par rapport aux limites. Il est utilisé avec d'autres études de système d'alimentation telles que la planification et l'expansion future, l'évaluation de la sécurité et la stabilité transitoire.



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

L'analyse Load Flow ne peut jamais être réalisée de manière simple pour les raisons suivantes :

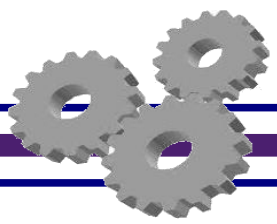
- Les charges du réseau d'énergie électrique ne se comportent pas de manière à pouvoir les représenter par une impédance constante.
- En situation réelle, la force électromotrice  $E$  du générateur n'est jamais explicitement connue.



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

En lieu et place d'une résolution « circuit électriques », on écrit plutôt les équations de notre réseau avec des variables qui peuvent être facilement mesurables et qui ont des significations pratiques. Ces variables sont :

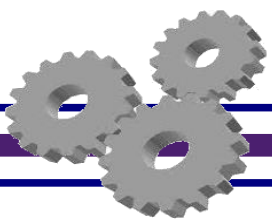
1. les puissances actives et réactives;
2. les amplitudes des tensions au niveau des jeux de barres.



## NÉCESSITÉ DE L'ANALYSE LOAD FLOW

Une analyse typique LF est donc un système d'équations en termes de tensions et puissances et non en terme de tension et courants.

LF est donc la résolution d'un système d'équations non-linéaires. Ce qui élimine la possibilité de solution analytique dans la plupart des cas. Les solutions numériques se font à l'aide d'ordinateurs.



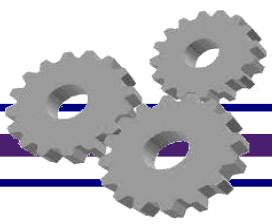
## CLASSEMENT DES BUS

On remarque à partir des équations de puissance injectée que chaque bus ( $i$ ) a quatre variables:  $V_i$ ,  $\delta_i$ ,  $P_i$  et  $Q_i$  et deux équations.

Selon les données sur les bus, ceux-ci peuvent être classés comme suit:

Type de bus	Connues	Inconnues
Bus de charge (PQ)	$P, Q$	$ V , \delta$
Bus de contrôle (Tension contrôlée) (PV)	$P,  V $	$Q, \delta$
Slack bus, bus balancier	$ V , \delta$	$P, Q$





## CLASSEMENT DES BUS

Avant de résoudre le problème LF, les pertes du système sont inconnues et en même temps l'équilibre de puissance doit être atteint. Par conséquent, le bus avec la plus grande centrale est choisi comme bus balancier. La puissance de sortie est calculée après résolution du problème LF. Étant donné que le flux de puissance dépend de la différence d'angles, le bus balancier est choisi comme bus de référence, son angle est nul.



## DONNÉES REQUISES POUR L'ÉTUDE LF

Les données requises pour effectuer une étude LF sont les données de bus et de ligne.

Les données de bus comprennent :

- le nom ou le numéro de bus;
- le type de bus et ses variables connues;
- les limites de l'équipement et les dispositifs de contrôle tels que les limites maximales et minimales de VAR sur les générateurs.

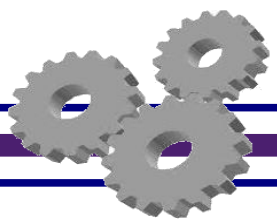


---

## DONNÉES REQUISES POUR L'ÉTUDE LF

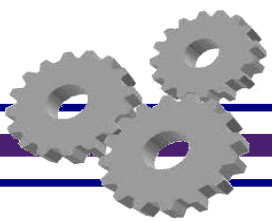
Les données de ligne comprennent :

- les bus de démarrage et de fin;
- la résistance;
- la réactance;
- la capacité de dérivation;
- le réglage de prise le cas échéant; et
- les limites et valeurs nominales de l'équipement.



## DONNÉES REQUISES POUR L'ÉTUDE LF

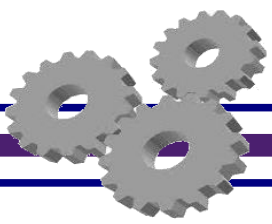
Le problème LF est un problème algébrique non linéaire et est résolu à l'aide de méthodes numériques itératives telles que les méthodes de Gauss-Seidel et de Newton-Raphson. Cependant, pour des réseaux très simples, la solution mathématique exacte peut être trouvée.



## Informations provenant d'études de flux de puissance

Les informations de base contenues dans la sortie de flux de charge sont :

- Toutes les amplitudes de tension de bus et tous les angles de phase par rapport au bus balancier;
- Toutes les injections de puissance active et réactive du bus;
- Tous les flux de puissance complexes des extrémités d'envoi et de réception.

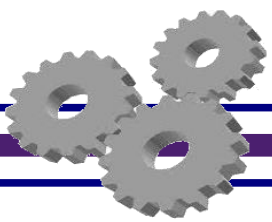


## Informations provenant d'études de flux de puissance

Les pertes de ligne individuelles peuvent être déduites en soustrayant la puissance complexe à l'extrémité de réception de la puissance complexe à l'extrémité d'émission.

Les pertes totales du système représentent l'écart entre les sommes des puissances complexes de toutes les charges et générateurs.

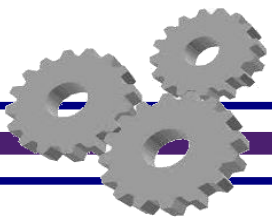
$$\Sigma \text{ Pertes} = \Sigma P_G - \Sigma P_C$$



## Informations provenant d'études de flux de puissance

L'information la plus importante obtenue à partir du flux de charge est le profil de tension du système.

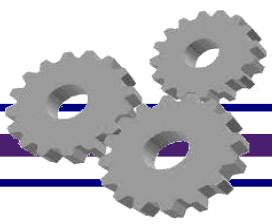
Un programme de flux de puissance peut être mis en place pour fournir des alertes si la tension sur un bus donné dépasse, par exemple,  $\pm 5\%$  de la valeur nominale.



## Informations provenant d'études de flux de puissance

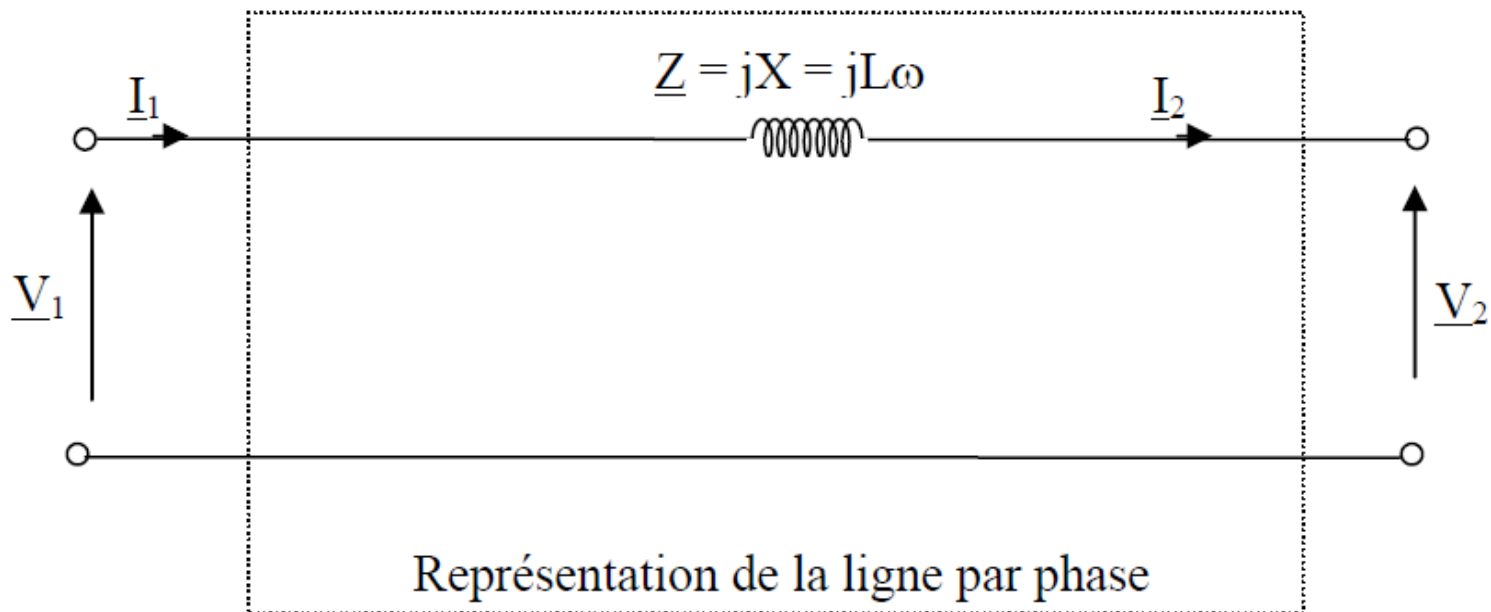
Si  $|V|$  varie considérablement sur le système, il en résultera des flux réactifs importants, qui conduiront à une augmentation des pertes de puissance réelle et, dans les cas extrêmes, à une probabilité accrue d'effondrement de la tension.

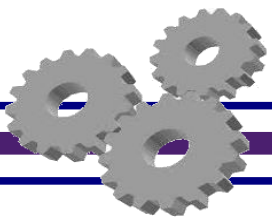




## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

Considérons une ligne de transmission sans perte où l'on néglige la résistance linéique et l'admittance, représentée par la figure suivante:

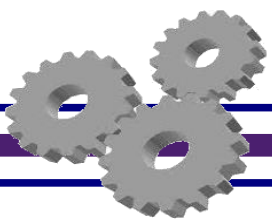




## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

On souhaite déterminer les puissances active et réactive au niveau du générateur et du récepteur. Sachant qu'on a un déphasage  $\delta$  entre  $\underline{V}_1$  et  $\underline{V}_2$  tel que  $\delta = \angle \underline{V}_2 - \angle \underline{V}_1$ .

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 = \underline{I}$$



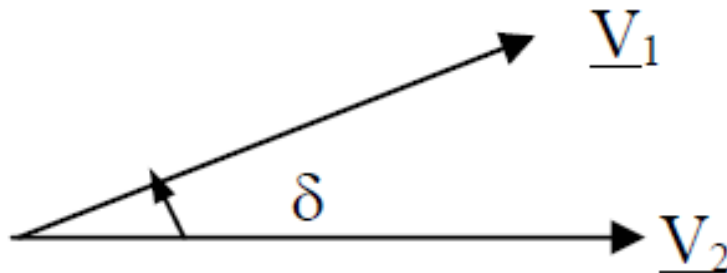
## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

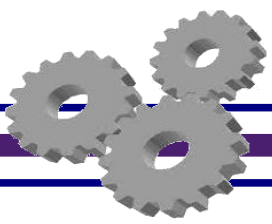
La puissance complexe au générateur et au récepteur sera :

$$\underline{S}_1 = \underline{P}_1 + j\underline{Q}_1 = \underline{V}_1 \underline{I}^*$$

$$\underline{S}_2 = \underline{P}_2 + j\underline{Q}_2 = \underline{V}_2 \underline{I}^*$$

On choisit  $\underline{V}_2$  comme origine des phases tel que :





## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

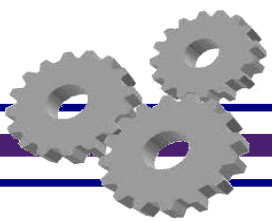
Le courant dans la ligne :

$$\underline{I} = (\underline{V}_1 - \underline{V}_2) / \underline{Z}$$

$$\underline{S}_1 = \underline{V}_1(\underline{V}_1^* - \underline{V}_2^*) / \underline{Z}^* = (V_1^2 - V_1 V_2 e^{j\delta}) / (-jX) = \\ (V_1 V_2 / X) \sin\delta + j(V_1^2 - V_1 V_2 \cos\delta) / X$$

$$P_1 = (V_1 V_2 / X) \sin\delta \text{ W}$$

$$Q_1 = (V_1^2 - V_1 V_2 \cos\delta) / X \text{ Var}$$



## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

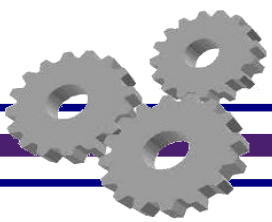
Le courant dans la ligne :

$$\underline{I} = (\underline{V}_1 - \underline{V}_2) / \underline{Z}$$

$$\underline{S}_2 = \underline{V}_2 (\underline{V}_1^* - \underline{V}_2^*) / \underline{Z}^* = (-V_2^2 + V_1 V_2 e^{-j\delta}) / (-jX) = \\ (V_1 V_2 / X) \sin\delta + j(-V_2^2 + V_1 V_2 \cos\delta) / X$$

$$P_2 = (V_1 V_2 / X) \sin\delta \text{ W}$$

$$Q_2 = (V_1 V_2 \cos\delta - V_2^2) / X \text{ Var}$$

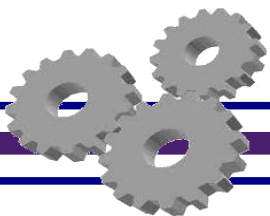


## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

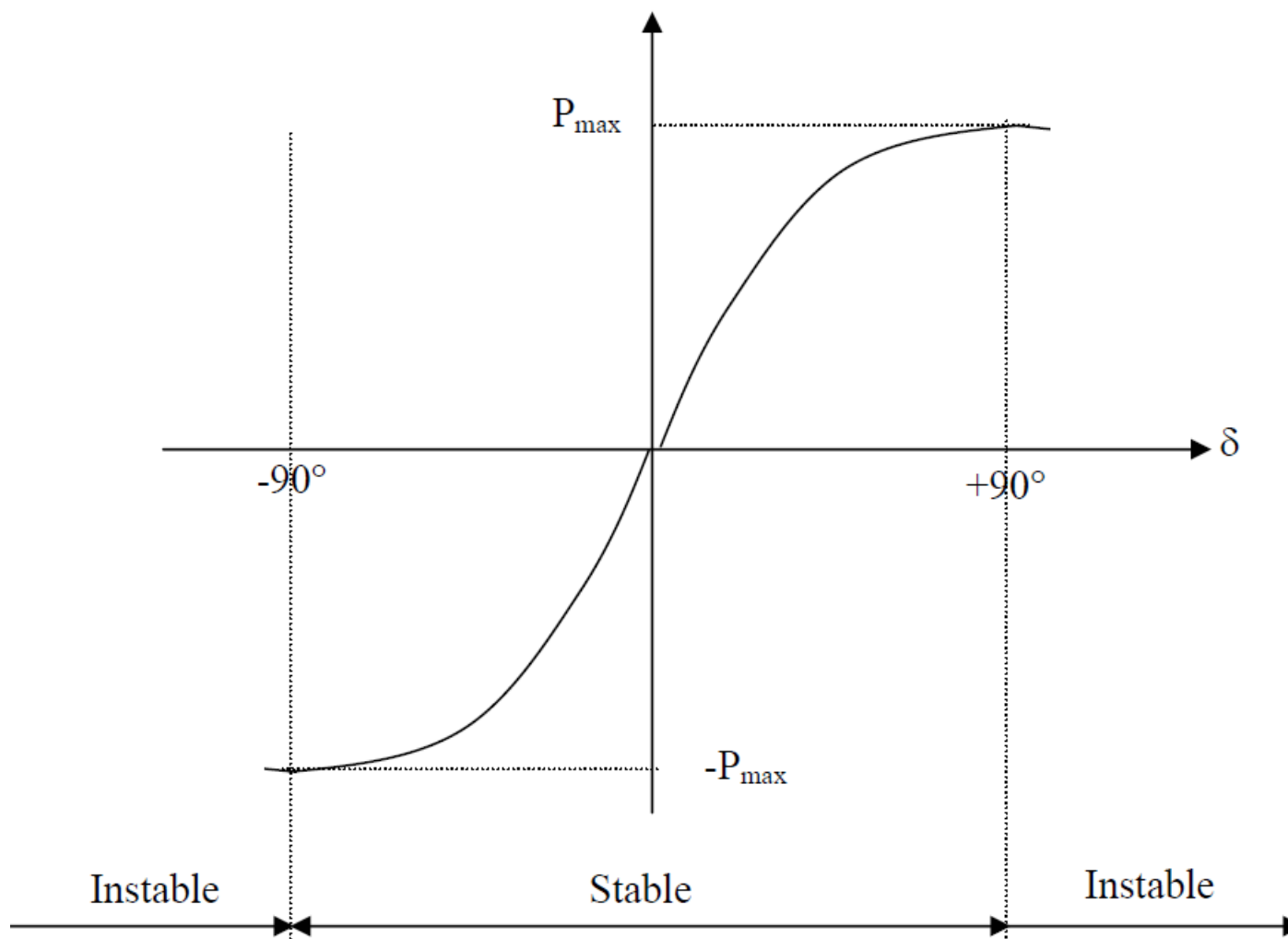
Les expressions de  $Q_1$  et  $Q_2$  montrent que la puissance réactive circulera dans la direction de tension la plus faible.

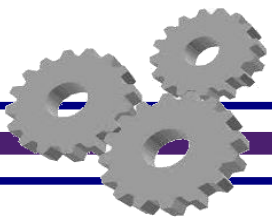
Comme on a négligé  $R$  ( $= 0$ ) alors  $P_1 = P_2 = P$ .

En supposant  $V_2$  et  $V_1$  constant, la seule manière de faire varier  $P$ , c'est  $\delta$ . La Figure suivante donne la variation de  $P$  en fonction de  $\delta$ .



# ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE





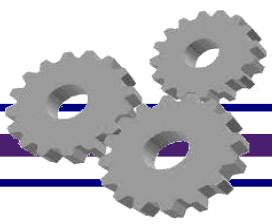
## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

Lorsque  $\delta$  augmente dans le sens positif (c'est à dire  $\underline{V}_1$  en avance sur  $\underline{V}_2$ ), la puissance augmente jusqu'à un maximum

$P_{\max} = |\underline{V}_1| |\underline{V}_2| / X$  qui a lieu lorsque  $\delta = 90^\circ$ .

Si  $\delta$  est inférieur à zéro, la puissance  $P_2$  devient négative. La transmission de puissance se fait alors de la droite vers la gauche !



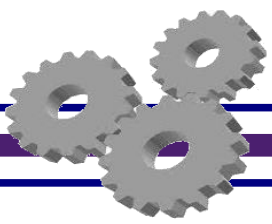


## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

Si le système opère à  $\delta \equiv 0^\circ$ , alors la puissance réactive moyenne circulant le long de la ligne est :

$$Q_{\text{moy}} = (Q_1 + Q_2)/2 = (|V_1|^2 - |V_2|^2)/2X$$

Cette équation montre l'étroite dépendance de la puissance réactive avec la différence de potentiel.



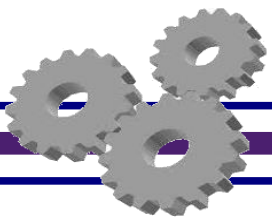
## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

Jusqu'à ce point les pertes par effet Joule  $RI^2$  de la ligne ont été négligées. Dans le cas contraire, Si cette ligne possède une résistance  $R$  par phase, alors la puissance perdue par effet Joule est :

$$P_{\text{ligne}} = R |I|^2 \quad \text{W}$$

On sait que  $\underline{S} = P + jQ = \underline{V}\underline{I}^*$

alors :  $I^* = (P + jQ) / V$  et  $I = (P - jQ)/V^*$



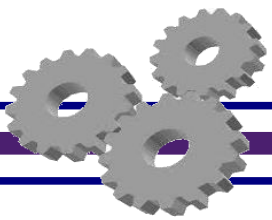
## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

D'où

$$I \cdot I^* = |I|^2 = (P^2 + Q^2) / |V|^2$$

ce qui permet de déduire que :

$$P_{\text{ligne}} = R[(P^2 + Q^2) / |V|^2] \text{ W}$$

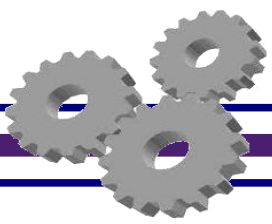


## ÉCOULEMENT DE PUISSANCE SUR UNE LIGNE COURTE

Cette expression indique que les puissances active et réactive contribuent toutes deux aux pertes. Il est donc important de réduire la puissance réactive de la ligne afin de réduire les pertes.

Note: En courant continu, il faut que  $|V_1| > |V_2|$  pour que la puissance circule dans la bonne direction. En alternatif, L'amplitude ne détermine pas la direction de la circulation mais c'est plutôt le déphasage.

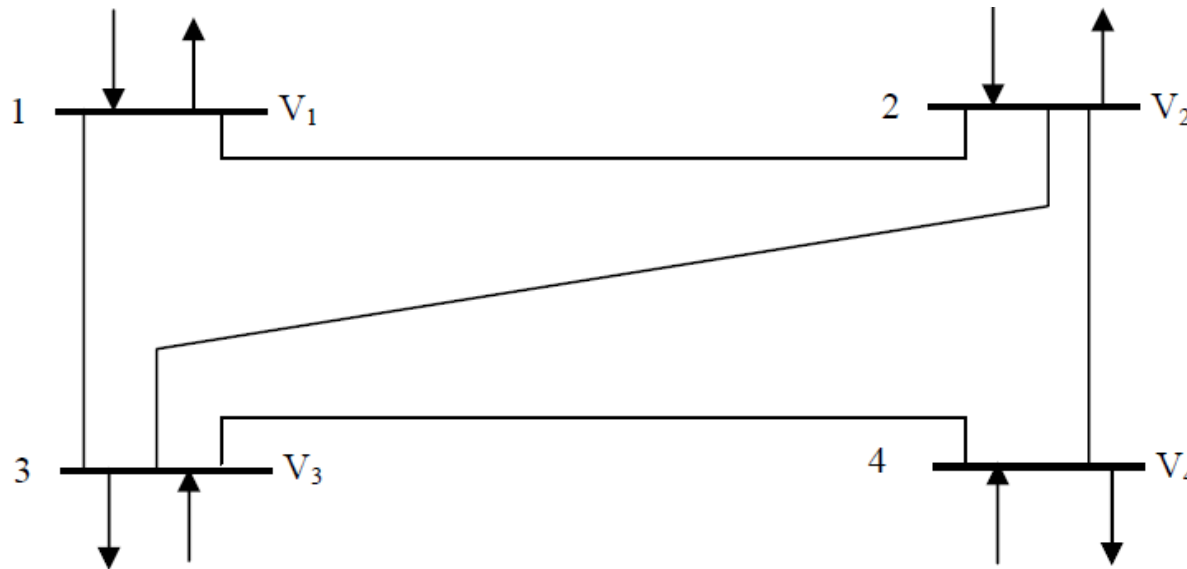
N.B.  $V$ ,  $I$ ,  $P$  et  $Q$  représentent les valeurs moyennes mesurées par exemple au milieu de la ligne.



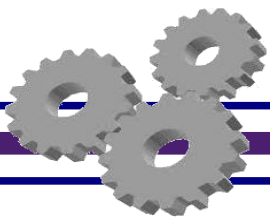
# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## Matrice d'admittance des jeux de barres

Soit le réseau simplifié suivant :



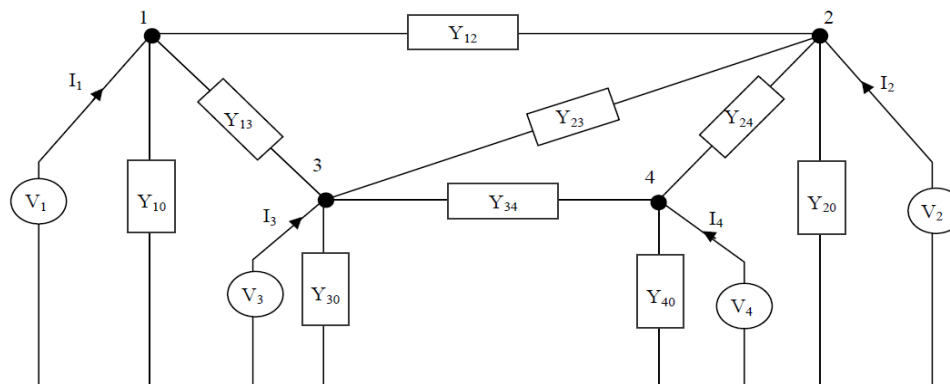
**Important:**  $S_{bus} = S_G - S_D$



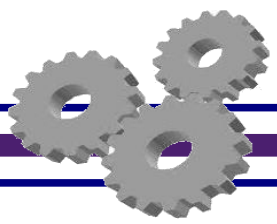
# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## Matrice d'admittance des jeux de barres

Ce système peut être représenté par le réseau électrique à la figure suivante :



$$\begin{cases} I_1 = V_1 Y_{10} + (V_1 - V_2) Y_{12} + (V_1 - V_3) Y_{13} \\ I_2 = V_2 Y_{20} + (V_2 - V_1) Y_{12} + (V_2 - V_3) Y_{23} + (V_2 - V_4) Y_{24} \\ I_3 = V_3 Y_{30} + (V_3 - V_1) Y_{13} + (V_3 - V_2) Y_{23} + (V_3 - V_4) Y_{34} \\ I_4 = V_4 Y_{40} + (V_4 - V_2) Y_{24} + (V_4 - V_3) Y_{34} \end{cases}$$

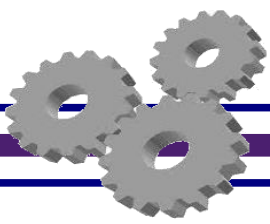


# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## Matrice d'admittance des jeux de barres

En appliquant la loi des nœuds aux points 1, 2, 3 et 4 on a les équations suivantes :

$$\begin{cases} I_1 = V_1 Y_{10} + (V_1 - V_2) Y_{12} + (V_1 - V_3) Y_{13} \\ I_2 = V_2 Y_{20} + (V_2 - V_1) Y_{12} + (V_2 - V_3) Y_{23} + (V_2 - V_4) Y_{24} \\ I_3 = V_3 Y_{30} + (V_3 - V_1) Y_{13} + (V_3 - V_2) Y_{23} + (V_3 - V_4) Y_{34} \\ I_4 = V_4 Y_{40} + (V_4 - V_2) Y_{24} + (V_4 - V_3) Y_{34} \end{cases}$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## Matrice d'admittance des jeux de barres

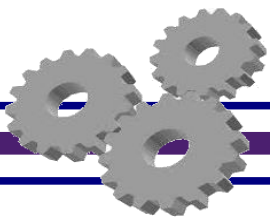
Après réarrangement, ces équations deviennent:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{10} + Y_{12} & Y_{13} & -Y_{12} & -Y_{13} & 0 \\ -Y_{12} & Y_{20} + Y_{12} + Y_{23} + Y_{24} & -Y_{23} & -Y_{24} \\ -Y_{13} & -Y_{23} & Y_{30} + Y_{13} + Y_{23} + Y_{34} & -Y_{34} \\ 0 & -Y_{24} & -Y_{34} & Y_{40} + Y_{24} + Y_{34} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$

Forme réduite:

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \\ V_4 \end{bmatrix}$$





# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## Matrice d'admittance des jeux de barres

où :

$$Y_{11} = Y_{10} + Y_{12} + Y_{13}$$

$$Y_{22} = Y_{20} + Y_{12} + Y_{23} + Y_{24}$$

$$Y_{33} = Y_{30} + Y_{13} + Y_{23} + Y_{34}$$

$$Y_{44} = Y_{40} + Y_{24} + Y_{34}$$

$$Y_{12} = Y_{21} = -Y_{12}$$

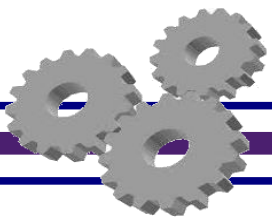
$$Y_{13} = Y_{31} = -Y_{13}$$

$$Y_{14} = Y_{41} = -Y_{14} = 0$$

$$Y_{23} = Y_{32} = -Y_{23}$$

$$Y_{24} = Y_{42} = -Y_{24}$$

$$Y_{34} = Y_{43} = -Y_{34}$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

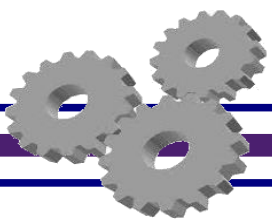
## Définitions:

$Y_{ii}$  = admittance propre (ou admittance du point moteur  $i$ )

$Y_{ki} = Y_{ik}$  = admittance mutuelle (ou admittance de transfert entre  $i$  et  $k$ ).

Pour un réseau général de  $N$  nœuds, on pourra écrire de ce qui précède :

$$\mathbf{I} = \mathbf{Y}_{bus} \mathbf{V}$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

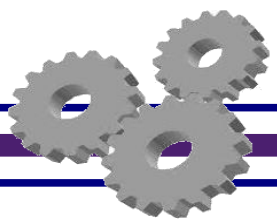
## Définitions:

avec :

$$Y_{\text{bus}} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & Y_{13} & Y_{14} \\ Y_{21} & Y_{22} & Y_{23} & Y_{24} \\ Y_{31} & Y_{32} & Y_{33} & Y_{34} \\ Y_{41} & Y_{42} & Y_{43} & Y_{44} \end{bmatrix}$$

Cette équation est appelée « équation nodale du réseau ».

$Y_{\text{bus}}$  désigne la matrice d'admittance des barres, tandis que  $V$  et  $I$  sont respectivement les matrices tensions et courants aux  $N$  nœuds (jeux de barres) du réseau.



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

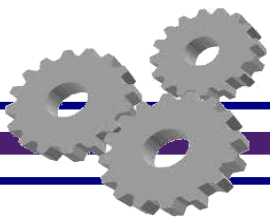
## Définitions:

On distingue trois types de nœuds :

**Noeud consommateur (Load bus)** : est un jeu de barre pour lequel  $P$  et  $Q$  sont connus tandis que  $V$  et  $\delta$  sont à déterminer.

**Noeud producteur (Generator bus)** : est un jeu de barre pour lequel l'amplitude de la tension générée  $V$  ainsi que la puissance correspondante  $P$  sont connues, tandis que  $Q$  et  $\delta$  sont à déterminer.

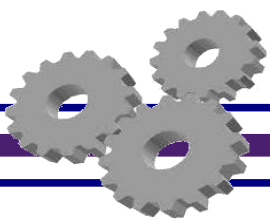
**Noeud bilan (Swing bus, slack bus)** : est une barre génératrice pour laquelle  $V$  et  $\delta$  sont spécifiés,  $P$  et  $Q$  sont à déterminer. C'est le plus souvent le nœud producteur le plus puissant. Il est pris comme référence. Vu le grand nombre de niveau de tension sur un réseau maillé, on choisira de résoudre les problèmes de LF en utilisant la représentation par unité :  $V \angle \delta = 1 \angle 0^\circ$  par unité.



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## PROCEDURES ITERATIVES

Dans le cas idéalisé, on peut obtenir l'expression analytique de l'écoulement de puissance. Cependant dans les systèmes réels, une expression explicite analytique n'est pas possible à cause des fluctuations de charges au niveau des jeux de barres d'une part et d'autre part parce que la tension au niveau du récepteur peut ne pas être connue à l'avance. Alors des méthodes numériques doivent être utilisées pour déterminer les inconnues, généralement à travers des procédures itératives.



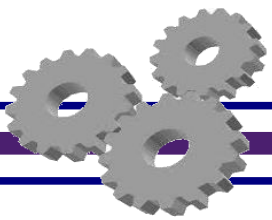
# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## PROCEDURES ITERATIVES

De ce qui précède, on peut écrire que le courant entrant dans le nœud  $k$  est donné par :

qui peut être réécrit comme suit:

$$I_k = Y_{kk} V_k + \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## PROCEDURES ITERATIVES

En résolvant pour  $V_k$ , on obtient:

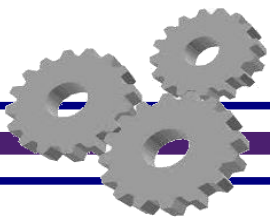
$$V_k = \frac{I_k}{Y_{kk}} - \frac{1}{Y_{kk}} \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n$$

Sachant que :  $S_k = V_k I_k^*$  alors  $S_k^* = V_k^* I_k$ .

On a :  $S_k^* = V_k^* I_k = P_k - jQ_k$ .

D'où:

$$I_k = \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*}$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

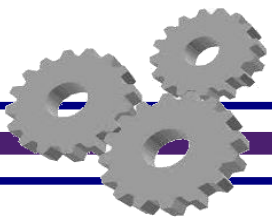
## PROCEDURES ITERATIVES

Finalemment pour les  $N$  nœuds:

$$V_k = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n \right) \text{ pour } k = 1, 2, \dots, N.$$

Cet ensemble de  $N$  équations constitue les équations de l'écoulement de puissance (Load Flow). Il se résout numériquement.



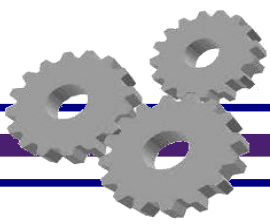


# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## MÉTHODES DE RÉOLUTION

On part des valeurs connues, on attribue des valeurs "fausses" aux variables inconnues et on calcule les nouvelles valeurs par le système non linéaire.

De nombreuses méthodes ont été utilisées (Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson, relaxation, résidus,...).



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

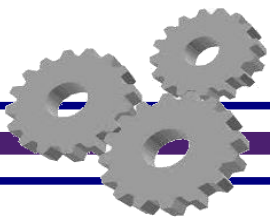
## MÉTHODES DE RÉOLUTION

### Gauss-Seidel

$$V_k^{(i+1)} = \frac{1}{Y_{kk}} \left( \frac{P_k - jQ_k}{(V_k^{(i)})^*} - \sum_{\substack{n=1 \\ n \neq k}}^N Y_{kn} V_n^{(i)} \right) \text{ pour } k = 1, 2, \dots, N.$$

Ou encore:

$$V_k(i+1) = \frac{1}{Y_{kk}} \left[ \frac{P_k - jQ_k}{V_k^*(i)} - \sum_{n=1}^{k-1} Y_{kn} V_n(i+1) - \sum_{n=k+1}^N Y_{kn} V_n(i) \right]$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## MÉTHODES DE RÉOLUTION

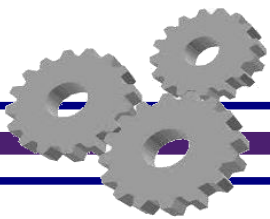
Avec la notation suivante:

$$V_n = V_n e^{j\delta_n} \quad \text{et} \quad Y_{kn} = Y_{kn} e^{j\theta_{kn}} = G_{kn} + jB_{kn}$$

$k, n = 1, 2, \dots, N$

On a:

$$S_k = P_k + jQ_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n e^{j(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})}$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

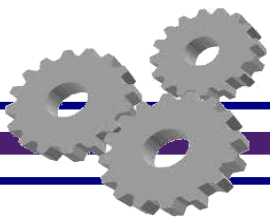
## MÉTHODES DE RÉOLUTION

Où:

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \cos(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$

Et

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N Y_{kn} V_n \sin(\delta_k - \delta_n - \theta_{kn})$$



# METHODE GENERALE DE CALCUL DES RESEAUX

## MÉTHODES DE RÉOLUTION

Où encore:

$$P_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n) + B_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n)]$$

$$Q_k = V_k \sum_{n=1}^N V_n [G_{kn} \sin(\delta_k - \delta_n) - B_{kn} \cos(\delta_k - \delta_n)]$$