

Chapitre 01

Les énergies renouvelables dans les réseaux électriques

Le réseau électrique achemine l'électricité des centrales de productions principalement situées sur le réseau de transport vers les clients via le réseau de distribution. Dans ce cas, la circulation d'électricité est unidirectionnelle. Le problème majeur de l'exploitant est de maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle.

Le raccordement aux réseaux d'unités de production décentralisées doit respecter certaines contraintes techniques et impose généralement des aménagements dans le réseau pour assurer un fonctionnement correct de ce dernier, en particulier dans les réseaux de distribution qui n'ont pas été à l'origine conçus et développés pour accueillir des unités de production.

1. Description et exploitation des réseaux électriques

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de génération jusqu'aux consommateurs.

- Le bloc production électrique, regroupant l'ensemble des éléments des unités de production, tels que les alternateurs, les moteurs, les turbines etc...
- Les blocs transport et distribution regroupant l'ensemble des éléments d'acheminement d'énergie électrique vers les consommateurs.

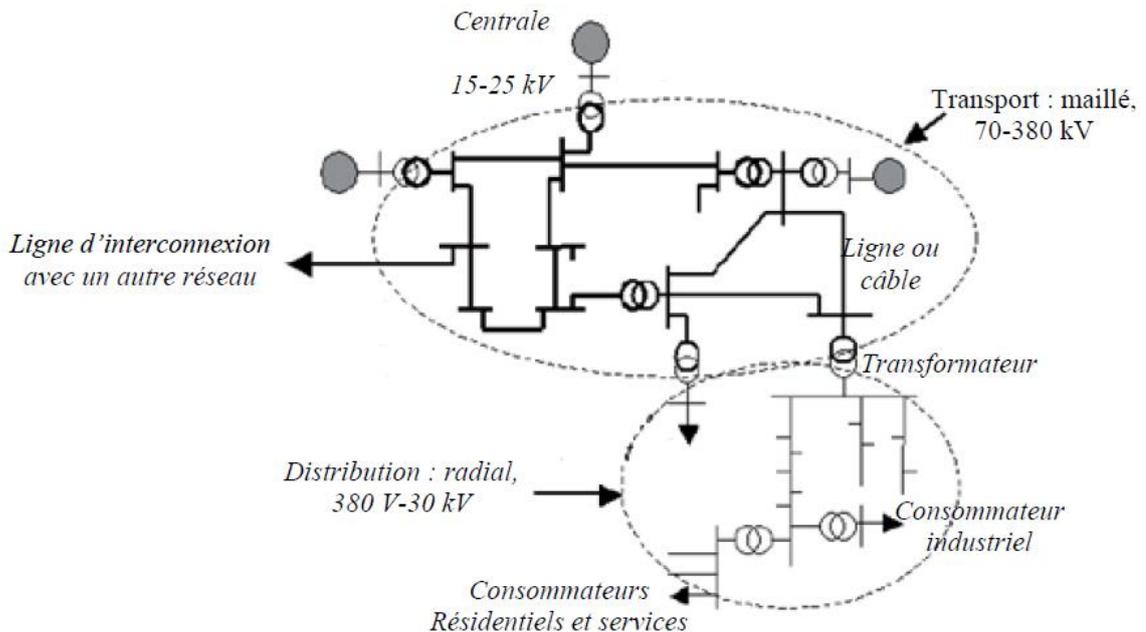


Fig.I.1: Structure des réseaux de transport et de distribution

L'énergie électrique produite est directement injectée sur le réseau de transport maillé à très haute tension pour être transportée sur de grandes distances avec un minimum de pertes. Elle "descend" ensuite sur les réseaux de répartition, puis ceux de distribution d'où elle est distribuée aux gros consommateurs et aux réseaux de distribution à basse tension.

Généralement, le réseau est composé dans le sens du transit de l'énergie comme montré sur la figure I.2 :

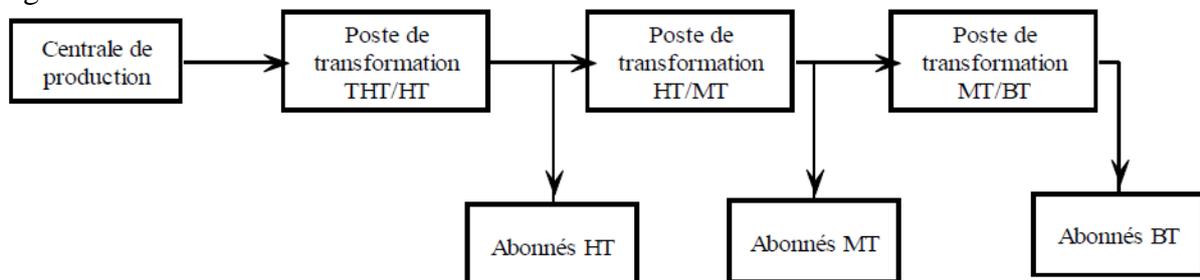


Fig.I.2 : Chemin de l'énergie électrique

Les réseaux électriques sont hiérarchisés. La plupart des pays mettent en oeuvre (selon CEI) :

- ✓ Un réseau de transport THT 220 800 kV
- ✓ Un réseau de répartition HT 60 170 kV
- ✓ Un réseau de distribution MT 5 36 kV

✓ Un réseau de livraison de l'abonné BT 400/230 V

2. Topologie des réseaux électriques

✓ Les réseaux de transport d'énergie et d'interconnexion sont liés entre eux sous forme des boucles, réalisant ainsi une structure semblable aux mailles d'un filet (figure I.3.a).

✓ Les réseaux de répartition, qu'ils alimentent, ont fréquemment une structure bouclée (figure I.3.b) et peuvent alors être exploités soit en boucle fermée (le réseau est dit bouclé) soit en boucle ouverte (le réseau est alors dit débouclé). Certaines alimentations se font aussi en antenne ou encore en piquage en prélevant une partie de l'énergie circulant sur une ligne reliant deux postes.

✓ Ces réseaux de répartition fournissent l'énergie aux réseaux de distribution à moyenne tension assurant l'alimentation d'un grand nombre d'utilisateurs, soit directement, soit après transformation en basse tension. Leur configuration et leur mode d'exploitation sont variables. On peut trouver, selon les pays, des réseaux maillés exploités débouclés, des réseaux aux structures en antenne (figure I.3.c) ou radiale (figure I.3.d).

D'une façon générale, ce sont les caractéristiques des sources de production, les besoins des utilisateurs et l'expérience d'exploitation qui, ajoutés à des considérations économiques, conduisent à choisir la structure topologique des réseaux.

- ✓ Les postes sources HT/MT, alimentés par le réseau de transport ou de répartition ;
- ✓ Le réseau MT, constitué des départs issus des sources (en lignes aériennes ou câbles enterrés) ;
- ✓ Les postes MT/BT de distribution publique;
- ✓ Le réseau BT, sur lequel sont raccordés les branchements desservant la clientèle.

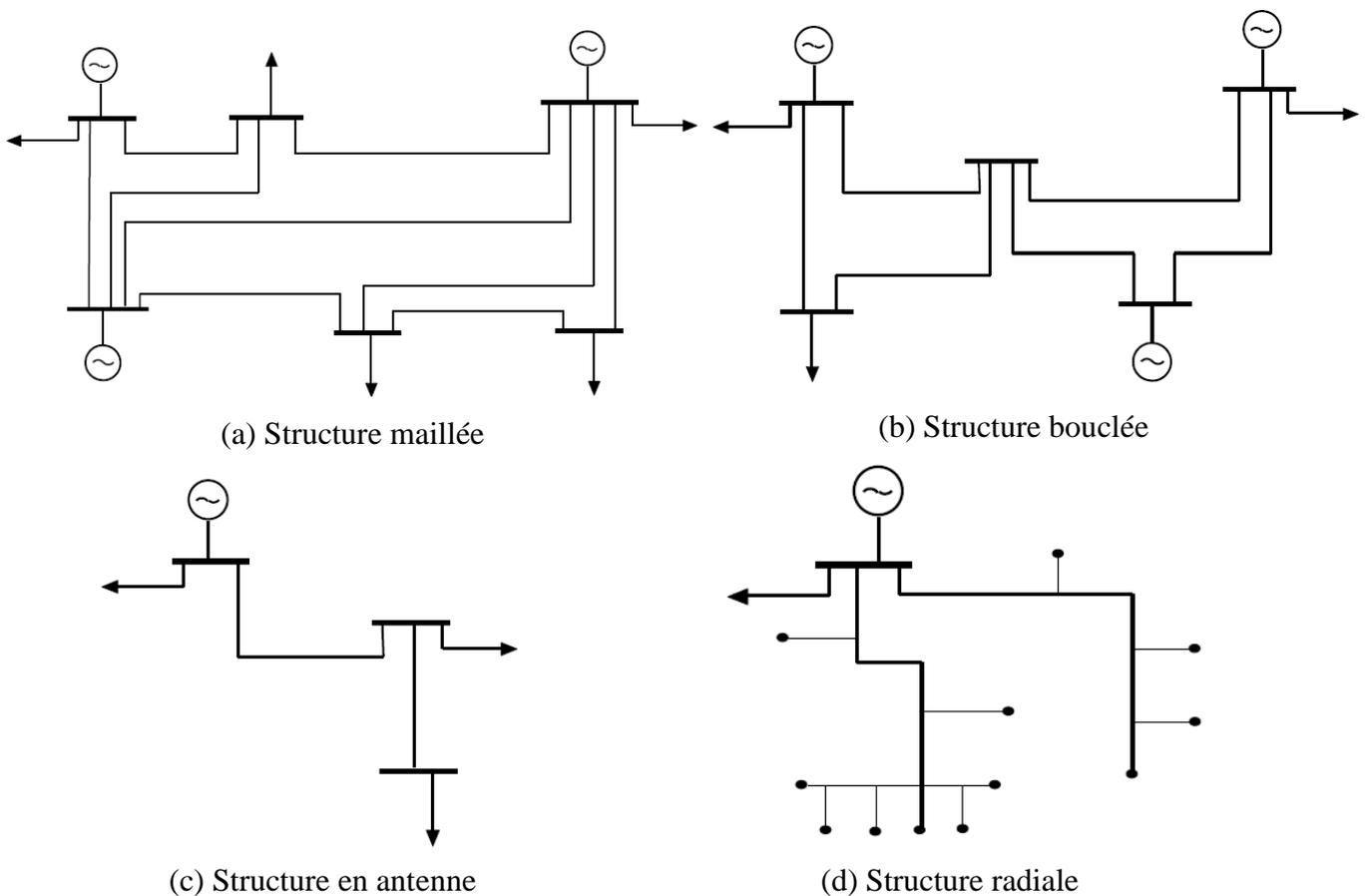


Fig.I.3 : Topologies des réseaux électriques

3. Calcul de la chute de tension dans les lignes (HT, MT, BT de longueur < 300km)

Quelques simplifications peuvent être introduites dans le schéma équivalent de la ligne dans les cas suivants :

- ✓ $G \approx 0$ pour une tension $US < 225$ kV (HT)
- ✓ $C \approx 0$ pour une tension $US < 60$ kV (MT)
- ✓ $L \approx 0$ pour une tension $US < 1$ kV (BT)

3.1. Ligne du 3ème ordre HT ($G \approx 0$)

La figure I.4 représente le circuit équivalent d'une ligne HT :

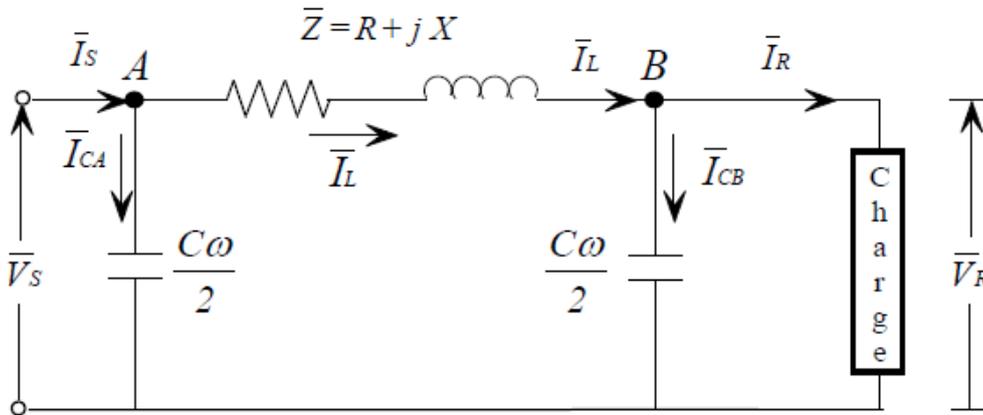


Fig .I.4 : Schéma unifilaire d'une ligne

Le diagramme vectoriel de cette ligne est représenté sur la figure I.5

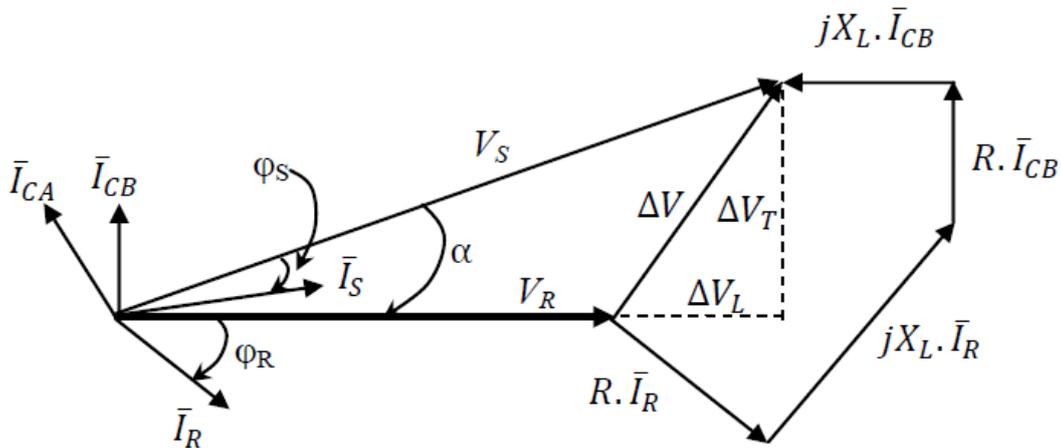


Fig .I.5 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne HT

Développons l'équation générale comme suit :

$$\bar{V}_S = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_L = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot (\bar{I}_R + \bar{I}_{CB}) = \bar{V}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_R + \bar{Z} \cdot \bar{I}_{CB} \quad \text{où} \quad \begin{cases} \bar{I}_{CB} = j \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_R \\ \bar{I}_{CA} = j \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_S \\ \bar{Z} = R + jL\omega \end{cases}$$

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \bar{V}_R + R \cdot \bar{I}_R + jL\omega \cdot \bar{I}_R + R \cdot \bar{I}_{CB} + jL\omega \cdot \bar{I}_{CB} \\ X_L = L\omega \\ \bar{I}_S = \bar{I}_R + \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB} \end{cases}$$

En faisant la projection sur l'axe des réels, l'expression de la chute de tension longitudinale est donnée comme suit :

$$\Delta V_L = R \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R + X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R - X_L \cdot \bar{I}_{CB} \quad (1.1)$$

En remplaçant I_{CB} par son expression $C\omega/2 \cdot V_R$ et en multipliant de part et d'autre l'égalité par 3, on obtient :

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot R \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R - \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \frac{C\omega}{2} \cdot \bar{V}_R \quad (1.2)$$

Ou bien,

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot R \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R \frac{U_R}{U_R} + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R \frac{U_R}{U_R} - \sqrt{3} \cdot X_L \cdot \frac{C\omega}{2} \cdot \frac{U_R}{U_R} \bar{V}_R \quad (1.3)$$

Sachant que $Q_{CB} = C\omega \cdot U^2$

Finalement,

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R + X_L \cdot \left(Q_R - \frac{Q_{CB}}{2} \right)}{U_R} \quad (1.4)$$

De la même manière, en faisant la projection sur l'axe des imaginaires, l'expression de la chute de tension transversale est donnée comme suit :

$$\Delta V_T = X_L \cdot \bar{I}_R \cos \varphi_R - R \cdot \bar{I}_R \sin \varphi_R + R \cdot \bar{I}_{CB} \quad (1.5)$$

En suivant les mêmes étapes que précédemment, on obtient :

$$\Delta U_T = \frac{X_L \cdot P_R - R \cdot \left(Q_R - \frac{Q_{CB}}{2} \right)}{U_R} \quad (1.6)$$

La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (1.7)$$

On peut aussi écrire

$$\Delta U = \Delta U_L + j \Delta U_T \quad (1.8)$$

La régulation de la tension est donnée comme suit :

$$\text{Regulation}\% = \frac{|U_S| - |U_R|}{|U_R|} \cdot 100 \quad (1.9)$$

✓ *Angle électrique*

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L} \right) \quad (1.10)$$

$$\bar{I}_S = \bar{I}_R + \bar{I}_{CA} + \bar{I}_{CB} = I_R \cos \varphi_R - I_{CA} \sin \alpha + j(I_{CA} \cos \alpha + I_{CB} - I_R \sin \varphi_R) \quad (1.11)$$

$$\varphi_S = \alpha - \arctg \frac{I_{Sr\acute{e}actif}}{I_{Sactif}} \quad (1.12)$$

3.2. Ligne du 2ème ordre MT ($G' \approx 0, C' \approx 0$)

En se basant sur le circuit équivalent représenté sur la figure I.6, on trace le diagramme vectoriel des tensions et courants (figure I.7).

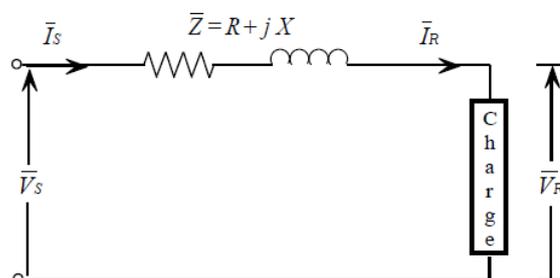


Fig.I.6 : Schéma unifilaire d'une ligne courte

✓ **Diagramme vectoriel**

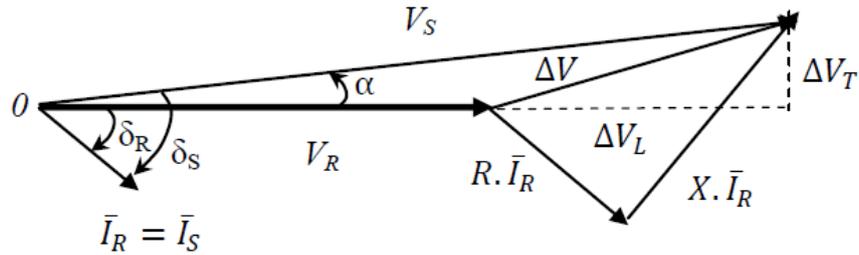


Fig.I.7 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne MT

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \bar{V}_R + R \cdot \bar{I}_R + jX_L \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = \bar{I}_R \end{cases}$$

✓ **Chute de tension**

En suivant le même raisonnement que dans le cas d'une ligne de 3^{ème} ordre, nous obtenons :

✓ La chute de tension longitudinale

$$\Delta U_L = \sqrt{3} \cdot R \cdot I_R \cdot \cos \varphi_R + \sqrt{3} \cdot X_L \cdot I_R \cdot \sin \varphi_R \quad (1.13)$$

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R + X_L \cdot Q_R}{U_R}$$

✓ La chute de tension transversale

$$\Delta U_T = \sqrt{3} \cdot X_L \cdot I_R \cdot \cos \varphi_R - \sqrt{3} \cdot R \cdot I_R \cdot \sin \varphi_R \quad (1.14)$$

$$\Delta U_T = \frac{X_L \cdot P_R - R \cdot Q_R}{U_R}$$

✓ La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad (1.15)$$

✓ **Angle électrique**

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L} \right) \quad (1.16)$$

$$\varphi_S = \varphi_R + \alpha$$

3.3. Ligne du 1^{ère} ordre BT ($G \approx C' \approx L' \approx 0$)

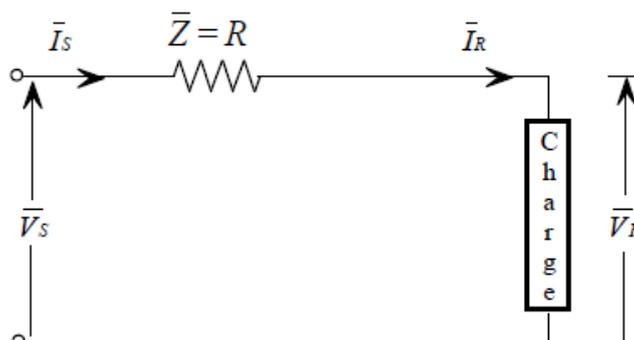


Fig.I.8 : Paramètres linéiques de la ligne BT

✓ **Diagramme vectoriel**

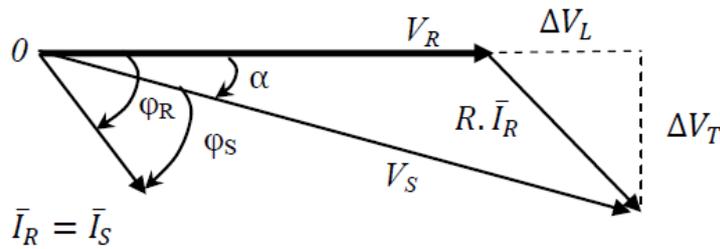


Fig.I.9 : Représentation vectorielle des tensions et courants de la ligne BT

$$\begin{cases} \bar{V}_S = \bar{V}_R + R \cdot \bar{I}_R \\ \bar{I}_S = \bar{I}_R \end{cases}$$

✓ **Chute de tension**

En procédant de la même manière que précédemment, on obtient :

✓ Les chutes de tension longitudinale et transversale sont :

$$\Delta U_L = \frac{R \cdot P_R}{U_R} \quad (1.17)$$

$$\Delta U_T = \frac{R \cdot Q_R}{U_R}$$

✓ La tension à la source est alors donnée par :

$$U_S = \sqrt{(U_R + \Delta U_L)^2 + \Delta U_T^2} \quad \text{ou} \quad V_S = \sqrt{(V_R + \Delta V_L)^2 + \Delta V_T^2} \quad (1.18)$$

✓ **Angle électrique**

$$\alpha = \arctg \left(\frac{\Delta U_T}{U_R + \Delta U_L} \right) \quad (1.19)$$

$$\varphi_S = \varphi_R - \alpha$$

4. Puissances active et réactive transmise par une ligne

A partir du schéma équivalent de la figure I.4, les expressions des puissances active et réactive transportées à travers la ligne seront développées dans cette partie.

La puissance à la réception est donnée par :

$$\bar{S}_R = 3 \cdot \bar{V}_R \cdot \bar{I}_R^* \quad \text{ou} \quad \bar{S}_R^* = 3 \cdot \bar{V}_R^* \cdot \bar{I}_R$$

Sachant que $\bar{V}_R = V_R \angle 0^\circ$, $\bar{Z} = Z \angle \varphi_Z$ et $\bar{V}_S = V_S \angle \alpha$

$$\bar{Z} = R + jX \quad \text{et} \quad \bar{Y} = \frac{G}{2} + j\frac{B}{2} = j\frac{B}{2}$$

$$\bar{I}_R = \bar{I}_L - \bar{I}_Y = \frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{\bar{Z}} - \bar{Y} \cdot \bar{V}_R$$

$$\bar{S}_R^* = 3 \cdot \bar{V}_R \cdot \left(\frac{\bar{V}_S - \bar{V}_R}{\bar{Z}} \right) - 3 \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V}_R^2 = \frac{3 \cdot \bar{V}_R \cdot \bar{V}_S}{\bar{Z}} - \frac{3 \cdot \bar{V}_R^2}{\bar{Z}} - 3 \cdot \bar{Y} \cdot \bar{V}_R^2$$

$$\bar{S}_R^* = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j\alpha}}{Z e^{j\varphi_Z}} - \frac{3 \cdot V_R^2}{Z e^{j\varphi_Z}} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = \frac{3 \cdot V_R \cdot V_S e^{j(\alpha - \varphi_Z)}}{Z} - \frac{3 \cdot V_R^2 e^{-j\varphi_Z}}{Z} - 3 \cdot jY \cdot V_R^2 = P + jQ$$

Finalement, les puissances active et réactive transmises de la source vers la charge sont :

$$\begin{cases} P_R = \frac{3.V_R.V_S}{Z} \cos(\alpha - \varphi_Z) - \frac{3.V_R^2}{Z} \cos \varphi_Z \\ Q_R = \frac{3.V_R.V_S}{Z} \sin(\alpha - \varphi_Z) + \frac{3.V_R^2}{Z} \sin \varphi_Z - 3.Y.V_R^2 \end{cases}$$

$$\bar{S}_R = P_R - jQ_R$$

5. Contrôle de l'équilibrage de fréquence et de la tension

La régulation de la fréquence et de la tension sont des services vitaux, appelés services systèmes (ou même abusivement services auxiliaires) ne pouvant être fournis que par les producteurs. Avec l'essor de la production distribuée que l'on connaît dans certains pays, la participation, à ces services, des nouvelles petites unités de production, devient une nécessité.

Parmi les services système, on retrouve :

- ✓ Le réglage de tension et de puissance réactive ;
- ✓ Le réglage de fréquence et de puissance active.

5.1. Réglage hiérarchisé de la fréquence

La fréquence représente la vitesse des groupes de production synchrones – tous les alternateurs tournent à la même vitesse électrique. La stabilité de la fréquence est assurée par l'équilibre entre la production et la consommation : une production supérieure à la consommation entraînera une augmentation de fréquence et inversement. Les centres de productions sont donc régulés pour garantir la stabilité de la fréquence et son maintien à une valeur nominale de référence. Ceci est rendu possible grâce à la constitution de réserves de puissance réparties sur différents groupes de production et aux différents réglages hiérarchisés, intervenant successivement, qui leurs sont associés : les réglages primaire, secondaire et tertiaire.

5.1.1. Réglage primaire de fréquence : RPF

Le réglage primaire de la fréquence est basé sur le constat qu'un déséquilibre entre la production et la consommation induit une variation de fréquence due à la variation de vitesse des groupes alternateurs classiques. Il assure une correction rapide, en quelques secondes, et décentralisée des écarts offre-demande. Ce réglage suit une relation linéaire entre la fréquence (imposée par la vitesse des groupes tournants) et la puissance. Ceci est illustré par la figure (I.10).

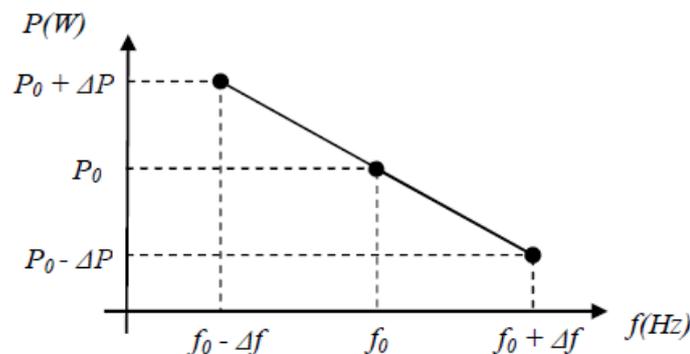


Fig.I.10 : Réglage primaire de fréquence

Le régulateur de vitesse impose une variation linéaire entre la fréquence et la puissance active du groupe (figure. I.11). Ce qui donne à ce réglage une caractéristique statique.

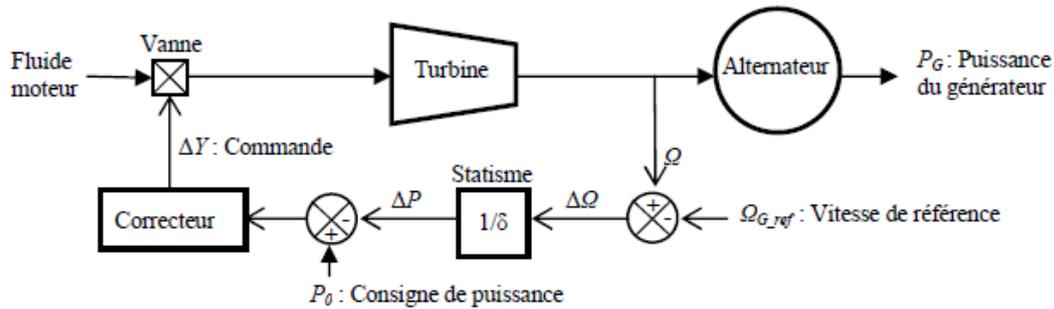


Fig.I.11 : Intégration d'un statisme dans une boucle de régulation de vitesse

5.1.2. Réglage secondaire de fréquence : RSF

Les RSF est plus lent que le réglage primaire (quelques minutes) et il intervient une dizaine de seconde après la stabilisation de la fréquence par le réglage primaire. L'objectif du réglage secondaire est de ramener la fréquence à sa valeur nominale tout en rétablissant les échanges de puissance entre les partenaires à leur valeur contractuelle. Pour cela un réglage automatique centralisé dans les centres nationaux de dispatching envoie de nouvelles consignes de puissance aux groupes participants au RSF. Ces groupes sont choisis selon leurs capacités dynamiques à moduler leur production et leur coût.

5.1.3. Réglage tertiaire de fréquence : RTF

Le réglage tertiaire est manuel : il est effectué par les opérateurs du réseau depuis le centre de dispatching. Cette réserve tertiaire permet d'une part de compléter le RSF; si cette réserve s'est trouvée insuffisante pour ramener la fréquence à sa valeur nominale, mais également de compenser la différence entre production et consommation lors de variation lente de cet écart. Cette réserve doit être mobilisable dans un délai de 15 minutes. En somme, les réserves secondaire et tertiaire doivent être dimensionnées pour faire face aux pointes de consommations, alors que la réserve primaire doit faire face aux variations rapides de fréquence. La figure I.12 représente le réglage hiérarchisé de fréquence.

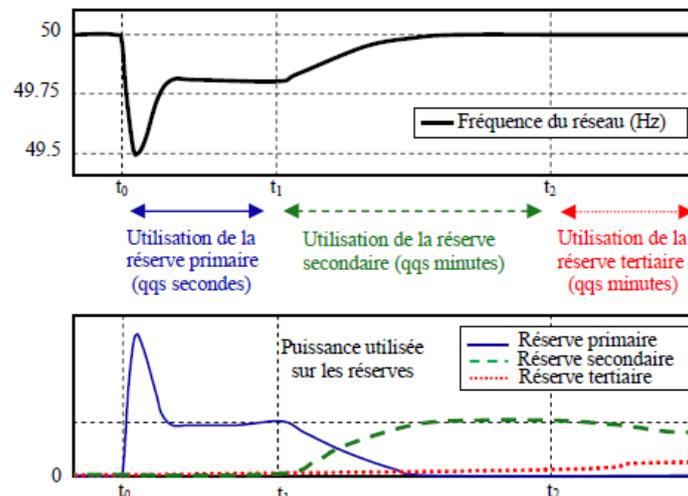


Fig.I.12 : Réglage hiérarchisé de fréquence : emploi des différentes réserves suite à un défaut

5.2. Réglage de la tension

Les charges présentes sur le réseau électrique consomment, d'une part, une certaine quantité de puissance active et, généralement, une quantité plus ou moins importante de puissance réactive selon leurs types. Cette puissance réactive consommée est en partie fournie par les groupes de productions essentiellement connectés au réseau de transport et en partie, par des

dispositifs de compensations d'énergie réactive, généralement, placés au plus près de la consommation pour éviter les transits élevés de puissance réactive dans le réseau de transport vers le réseau de distribution. En effet, dans les réseaux de transport, les lignes ont un caractère plus inductif que résistif et le transit de puissance réactive induit de forte chute de tension. De plus, le fait de faire transiter de la puissance réactive dans une ligne diminue la puissance active maximale transmissible par celle-ci.

Toutes les unités de production, y compris les éoliennes, doivent pouvoir fonctionner dans un domaine de fonctionnement déterminé par un graphique avec en ordonnée la tension (U) et en abscisse le rapport entre la puissance réactive et la puissance active maximale (Q/P_{max}). Un exemple de domaine de fonctionnement dénommé trapèze $[U, Q]$ est représenté dans la figure IV.13

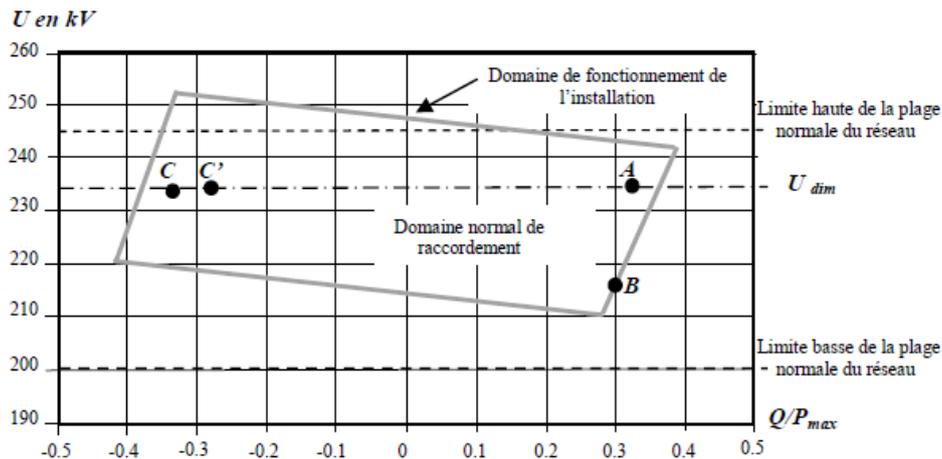


Fig.I.13 : Exemple de domaine normal de fonctionnement d'une installation de production

Les unités de production doivent assurer un contrôle de la tension et/ou de la puissance réactive au point de livraison. Trois types de réglage primaire sont :

- Type 1 : réglage à puissance réactive constante ;
- Type 2 : réglage de la tension à une valeur variant linéairement en fonction de la puissance réactive avec une pente ajustable ;
- Type 3 : réglage de la tension selon une consigne asservie aux ordres provenant du réglage secondaire de la tension.

5.2.1. Réglage primaire de tension : RPT

Le réglage primaire agit au niveau local, avec une constante de temps de l'ordre de 100ms, sur la tension aux bornes des groupes pour faire face à des variations rapides de la tension qui peuvent être induites par des variations de demande de puissance réactive, par des défauts ou par des manoeuvres sur le réseau. Le RPT est le premier à intervenir suite à une perturbation. Le principe est d'agir sur l'excitation de ces machines pour garder le niveau de tension désirée. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. Le RPT permet donc, dans la limite des réserves primaires des groupes (en réactif), de maintenir l'équilibre local entre la production et la consommation de puissance réactive et de répondre rapidement aux fluctuations aléatoires de la tension.

5.2.2. Réglage secondaire de tension : RST

Le réglage secondaire de tension a pour but de faire face, de manière coordonnée, à de fortes mais lentes fluctuations de la tension à l'échelle régionale. Ce que le réglage primaire ne peut assurer seul. Le RST est automatisé et centralisé par régions (dites zones de réglage) comme représentée sur la figure (I.14). Ces zones de réglages doivent être indépendantes du point de vue de la tension. Cela signifie que chaque zone est en théorie insensible à toute variation de tension pouvant survenir dans une zone voisine. Il a pour objet de limiter les transits de

puissance réactive sur les lignes d'interconnexion et de maintenir la tension en certains nœuds représentatifs de la tension de chaque zone à sa valeur de consigne. Ces nœuds spécifiques sont appelés nœuds pilotes (il y en a un par zone de réglage).

5.2.3. Réglage tertiaire de tension : RTT

Le réglage tertiaire, manuel, effectué par le dispatching national, consiste à réévaluer, à intervalles de quinze minutes, les consignes de tension des nœuds pilotes de chaque zone de réglage selon des critères technico-économiques dont les principaux sont les suivants:

- Exploiter le réseau en assurant au mieux sa sûreté;
- Respecter les contraintes de fonctionnement des matériels;
- Minimiser les pertes et les coûts de production;
- Utiliser au mieux la capacité des ouvrages de transport.

Le RTT a pour but d'assurer une bonne tenue globale du plan de tension et d'éviter des situations engendrant des surcoûts ou des risques pour le système électrique. La figure (I.14) représente le réglage réarçhique de la tension.

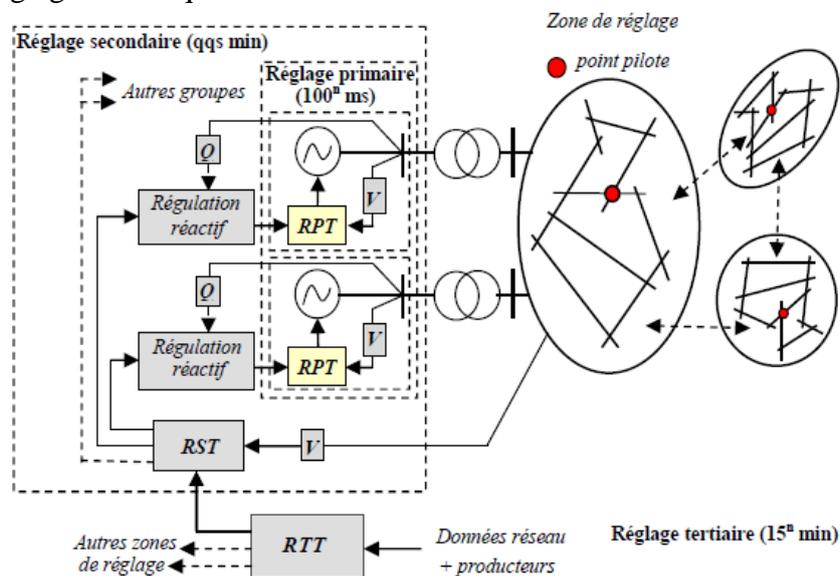


Fig.I.14 : Réglage hiérarchisé de tension

6. Raccordement au réseau électrique de la production décentralisée

L'insertion des productions décentralisées dans les réseaux de transport et de distribution génère un certain nombre de problèmes et contraintes. Car, ces réseaux n'étaient pas conçus initialement pour accueillir ce type de production. Ces problèmes seront traités dans les prochains chapitres. Parmi les impacts de l'insertion de PDs on trouve :

- ✓ Impact sur le sens de transit de puissance ;
- ✓ Impact sur le plan de tension ;
- ✓ Impact sur le plan de protection ;
- ✓ Impact sur la stabilité du système.

7. L'intérêt apporté par l'insertion des ressources renouvelables

- Energie indépendante, la matière première (le rayonnement solaire, vent...) est renouvelable et gratuite ;
- L'énergie produite est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets ;
- Une ressource illimitée, contrairement aux combustibles fossiles.