

# Chapitre

## Généralités sur les réseaux électriques



### Dans ce chapitre :

1. Introduction
2. Description des réseaux modernes
3. Le système de protection
4. Le centre de contrôle ou dispatching
5. Conclusion

### Travaux Dirigés

Exercices

## 1.Introduction

*L'énergie électrique* est la forme d'énergie la plus largement répandue car elle est facilement transportable à un rendement élevé et un coût raisonnable. Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures dont le but est d'acheminer de l'énergie électrique à partir de centres de production vers les consommateurs d'électricité (charge).

Le premier réseau électrique a vu le jour aux Etats Unis en 1882 et a été conçu par Thomas Edison. C'était un réseau local à courant continu et servait à assurer l'éclairage de la région de Manhattan. La distribution de l'énergie était assurée par des câbles souterrains.

Avec l'invention du transformateur par *William Stanley* en 1885 et celle du moteur à courant alternatif par *Nikola Tesla* en 1888, les réseaux à courant alternatif commencèrent à prendre le pas sur les réseaux à courant continu du fait qu'il était devenu possible d'acheminer plus de puissance, sur de plus grandes distances, grâce à des niveaux de tension plus élevés.



*Figure (1.1) : Transformateur de Stanley*



*Figure (1.2) : Moteur de Tesla*

Un autre avantage non négligeable du courant alternatif est la suppression du collecteur donc des problèmes de commutation dans les alternateurs ce qui a permis de construire des alternateurs de grande puissance à moyenne tension. Les réseaux étaient d'abord monophasés, puis triphasés (2.3 kV en 1893) et à différentes fréquences (28Hz à 133Hz). Progressivement, la nécessité de mise en fonctionnement en parallèle et d'interconnexion des différents réseaux a conduit à la standardisation de la fréquence :

- 60 Hz aux Etats Unis et au Canada.
- 50 Hz pour la majorité des pays en Afrique, Asie et Europe.

Les niveaux de tensions ont eux aussi évolué graduellement jusqu'à atteindre aujourd'hui l'Ultra Haute tension 765 kV en service aux Etats Unis depuis 1969.

Le transport d'énergie électrique sur de très grandes distances, est devenu plus avantageux en courant continu qu'en alternatif et ce, grâce au développement de l'électronique de puissance. Ainsi, il est plus économique de convertir la THT ou UHT de l'alternateur au continu, de transporter l'énergie électrique à l'aide de deux lignes et de la reconvertir à l'autre extrémité. Des études ont montré qu'il était avantageux de recourir au courant continu lorsqu'il s'agissait de transporter de l'énergie électrique sur des distances supérieures ou égales à 500 km.

Les lignes à courant continu n'ayant pas de réactance, sont donc capables de faire transiter plus de puissance que des lignes à courant alternatif avec des conducteurs de même section. L'utilisation du courant continu est particulièrement avantageuse, lorsqu'il s'agit d'interconnecter deux grands réseaux distants l'un des l'autre ou de traverser des cours d'eau ou mer (entre îles). La liaison en courant continu, agit alors, comme un lien asynchrone entre deux systèmes rigides, éliminant ainsi, les problèmes d'instabilité inhérents aux interconnexions réalisées en courant alternatif.

L'inconvénient majeur de la liaison en courant continu, est la production d'harmoniques qui nécessite un filtrage robuste et un système de compensation d'énergie réactive important, aux deux extrémités de la ligne.

## 2. Description des réseaux modernes

Un réseau d'énergie électrique est aujourd'hui un ensemble de circuits complexes interconnectés comme le montre le schéma de principe de la (Fig. (1.5)).

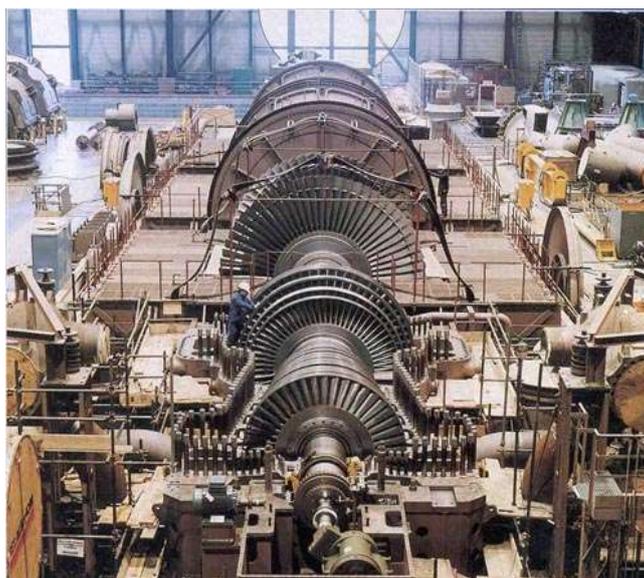
Le réseau électrique peut être subdivisé en quatre parties essentielles :

- La production d'énergie électrique
- Le transport et la répartition
- La distribution
- Les charges

### 2.1. La production :

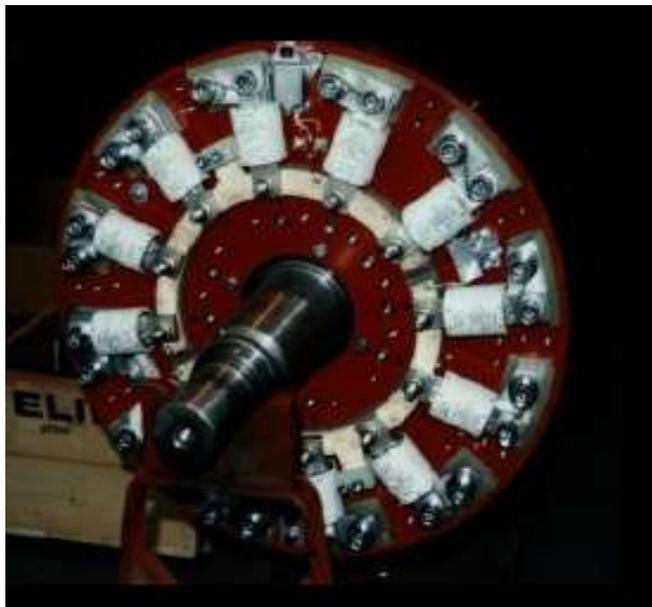
#### → *L'alternateur :*

L'un des composants majeurs des réseaux électriques est la génératrice à courant alternatif triphasé plus connue sous la dénomination de génératrice synchrone ou alternateur (Fig. (1.3)).



*Figure (1.3) : Groupe Turboalternateur*

Les génératrices synchrones ont deux champs tournants au synchronisme. L'un est produit au niveau du rotor lorsqu'il est entraîné à la vitesse synchrone et est excité par du courant continu. L'autre, est produit par les enroulements statoriques lorsqu'ils sont parcourus par le courant triphasé des charges. Le courant continu nécessaire aux enroulements rotoriques pour créer le champ magnétique est fourni par le système d'excitation. Les anciens systèmes d'excitation étaient des génératrices à courant continu montées sur le même arbre. Elles alimentaient les enroulements du rotor de l'alternateur par le biais de contacts glissants sur des bagues. Aujourd'hui on utilise de génératrices à courant alternatif équipées de redresseurs tournants et connus sous le nom de système d'excitation «brushless». Le système d'excitation permet de maintenir et de contrôler le transit d'énergie réactive (Fig. (1.4))



*Figure (1.4) : Excitatrice a Diodes Tournantes*

Du fait de la suppression de la commutation, les alternateurs sont en mesure de générer de grandes puissances à haute tension. Dans les centrales électriques, la puissance des alternateurs varie de 50MW à 1500MW.

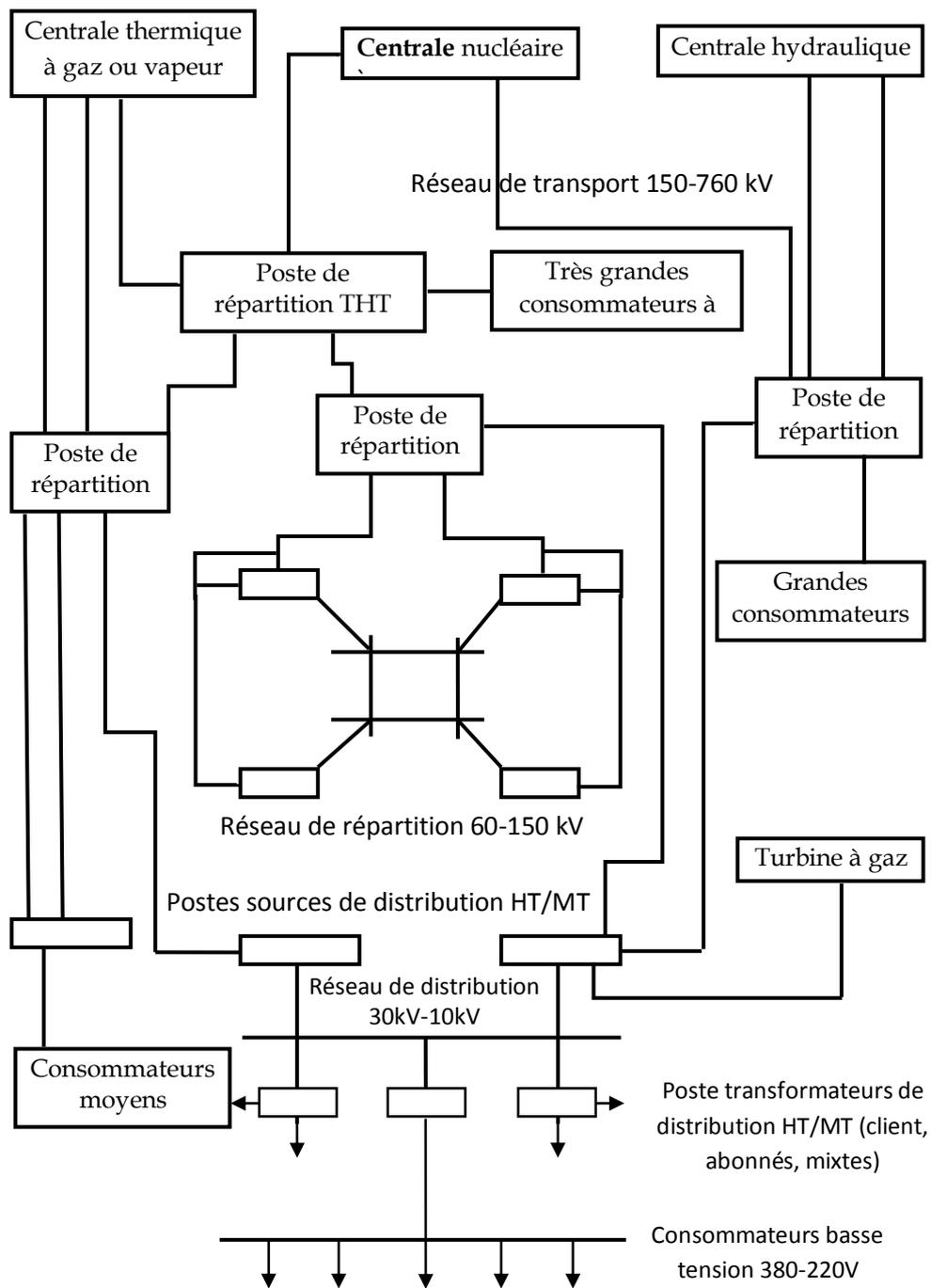


Figure (1.5) : Schéma de principe d'un réseau d'énergie électrique

La source d'énergie mécanique est soit :

- Une turbine hydraulique installée au niveau d'un barrage, d'un torrent, de la mer, de chutes d'eau,... etc. d'où le nom de centrale hydraulique (Fig. (1.6)).

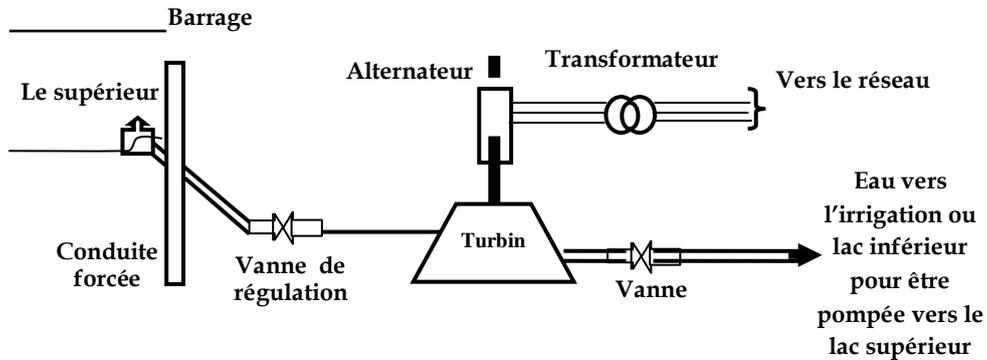
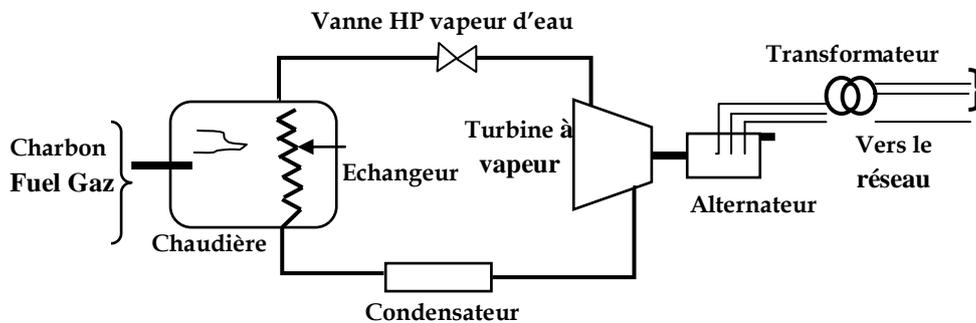
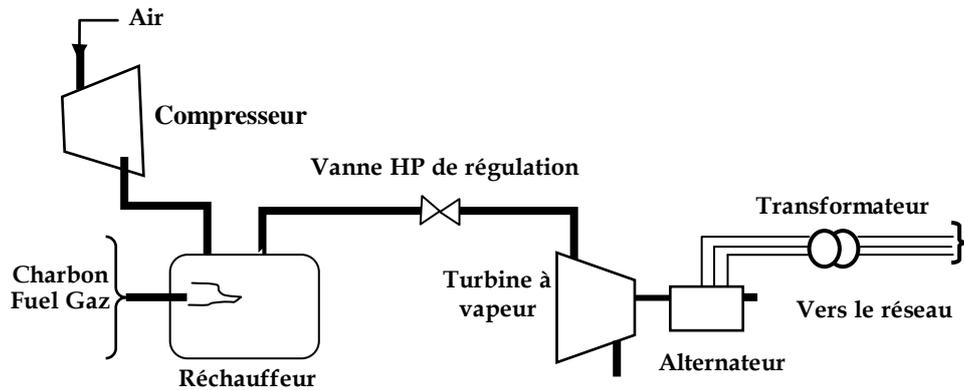


Figure (1.6) : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique

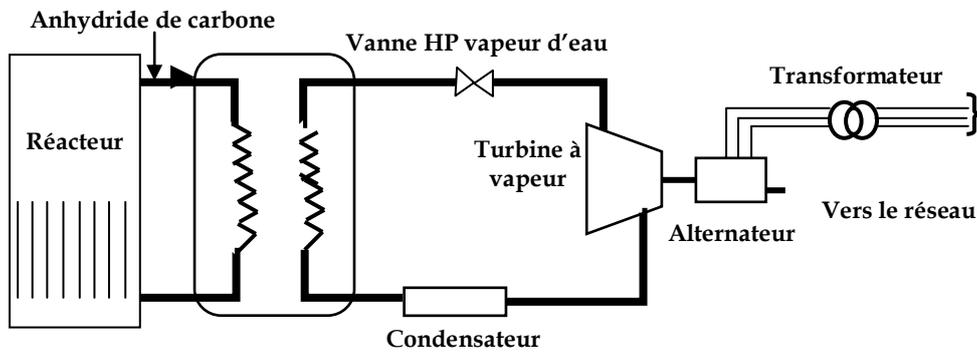
- Une turbine thermique propulsée par de la vapeur d'eau ou par un gaz chaud et qui sont obtenus par la combustion de houille, charbon, fuel, gaz naturel et par la fusion ou fission nucléaire ; d'où les appellations de centrale à vapeur, centrale à gaz et centrale nucléaire (Figs. (1.7), (1.8), (1.9)).



*Figure (1.7) : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'une centrale thermique à vapeur*



*Figure (1.8) : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'une centrale thermique à gaz*



*Figure (1.9) : Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire*

Les turbines à vapeur fonctionnent relativement à grande vitesse 3000 ou 1500 tr/min pour une fréquence de 50 Hz et 3600 ou 1800 tr/min pour une fréquence de 60 Hz. Les alternateurs qui y sont couplés sont à pôles lisses, bipolaires (3600-3000 tr/min) ou quadripolaires (1800-1500 tr/min). La relation liant la vitesse  $v$  de rotation de l'alternateur, exprimée en tr/min, en fonction de la fréquence  $f$  et du nombre de pôles  $p$  est la suivante :

$$v = \frac{f}{2p} tr/min \quad (1.1)$$

Les turbines hydrauliques fonctionnent par contre à de petites vitesses. Leurs alternateurs sont à pôles lisses avec un grand nombre de pôles.

Dans une centrale électrique, plusieurs alternateurs fonctionnent en parallèle pour contribuer, à la satisfaction de la puissance appelée à cet instant précis, par toutes les charges reliées au réseau. Ils sont connectés entre eux en un point commun, communément appelé nœud.

Aujourd'hui, une importance particulière est accordée à la protection de l'environnement ainsi qu'à la préservation des sources fossiles d'énergie. C'est dans cette perspective que des recherches ont été orientées, vers les énergies renouvelables et vers le développement de nouveaux moyens, permettant l'utilisation de l'énergie de soleil et de la terre pour la production de l'énergie électrique. Parmi ces nouvelles énergie, nous citerons les plus importantes et qui ont trouvé un début d'application, à savoir : l'énergie solaire, éolienne, des marées et des biomasses (Fig. (1.10)).



*(a) Energie solaire : champ de modules photovoltaïques*



*(b) Centrale solaire à tour sur la Plate-forme solaire d'Almería en Espagne*



*(c) Centrale solaire avec capteur à réflecteur parabolique et miroir (USA)*



*(d) Ferme éolienne de 10 Turbines (5MW) au large du Danemark*



(e) Usine marémotrice de la Rance

*Figure (1.10) : Différents types de centrales de production d'énergie renouvelable*

➔ **Le transformateur :**

Le second composant essentiel des réseaux électriques est le transformateur (Figures (1.11) et (1.12)). Il permet le transfert de puissance avec un rendement élevé d'un niveau de tension vers un autre. La puissance transmise au secondaire est à peu près celle du primaire et en conséquence le produit  $VI$  au secondaire est approximativement égal à celui du primaire. Ainsi, dans un transformateur élévateur, toute élévation de tension au secondaire, s'accompagne d'une diminution dans le même rapport, du courant du secondaire, ce qui entraîne la diminution des pertes dans les lignes et rend possible l'acheminement de l'énergie électrique sur de longues distances.

Des contraintes d'isolation, ainsi que d'autres liées à des problèmes techniques de conception ne permettent pas pour l'heure de générer au niveau des alternateurs, des tensions supérieures à 30 kV. Ainsi, un transformateur élévateur est nécessaire pour pouvoir transporter l'énergie électrique. Aux extrémités réceptrices des lignes, un transformateur abaisseur est utilisé pour ramener la tension à un niveau acceptable pour la distribution et l'utilisation.

## Réservoir d'huile et accessoires

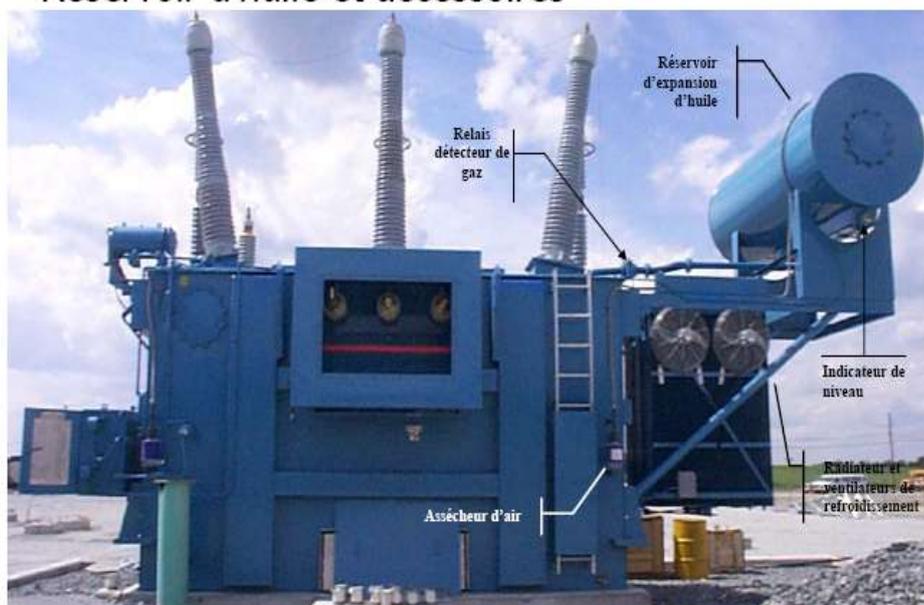


Figure (1.11) : Transformateur de répartition



Figure (1.12) : Transformateur régulateur en charge

## 2.2. Le transport et la répartition :

Le rôle du réseau aérien de transport est d'acheminer l'énergie électrique à partir des centrales situées à différents endroits du territoire jusqu'au réseau de distribution qui en dernier lieu alimente les charges. Les lignes de transport assurent aussi l'interconnexion des réseaux régionaux, ce qui permet, non seulement d'assurer une répartition économique de l'énergie électrique dans les régions elles-mêmes dans les conditions normales d'exploitation, mais aussi, un transfert inter-régional de l'énergie, dans les situations d'urgence.

Les niveaux de tension utilisés pour le transport diffèrent d'un pays à un autre, mais une tendance à une normalisation existe. Font partie du réseau de transport toutes les lignes dont le niveau de tension est supérieur à 60 kV. En Algérie les tensions usitées pour le transport sont de 90 kV, 150 kV, 220 kV et en cours de réalisation 400 kV. Aux Etats-Unis, les tensions sont normalisées à 69 kV, 115 kV, 138 kV, 161 kV, 230 kV, 345 kV, 500 kV, et 756 kV. Les lignes de transport dont la tension est supérieure à 500 kV sont dites à ultra haute tension, celles dont la tension est supérieure à 150 kV, mais inférieure à 500 kV, sont dites à très haute tension (THT). Ces seuils varient d'un pays à un autre.

Les lignes de transport aboutissent toutes à des sources dites de répartition. Ces dernières permettent d'assurer la commutation des lignes d'une part, et d'abaisser la tension à des niveaux permettant la répartition de l'énergie électrique d'autre part. Il est à noter que de très grands centres de consommation industriels sont directement alimentés à partir du réseau de transport.

Comme indiqué sur la Fig. (1.5), la portion de réseau reliant les postes sources de répartition aux postes sources de distribution, au travers de transformateurs abaisseurs est dite réseau de répartition. Nous remarquerons qu'il n'existe pas de délimitation franche des niveaux de tension entre les réseaux de transport et de répartition. Il est communément admis, que pour le réseau de répartition, les tensions situées sont comprises entre 60 kV et 150 kV. Notons aussi que, de grandes unités industrielles sont alimentées par le réseau de répartition.

### 2.3. Distribution

Le réseau de distribution est la partie de réseau reliant les postes sources de distribution (Fig. (1.13)) aux postes de consommateurs. Les lignes du réseau primaire de distribution sont d'un niveau de tension compris entre 5.5 kV et 36 kV et alimentent les charges d'une zone géographique bien précise.

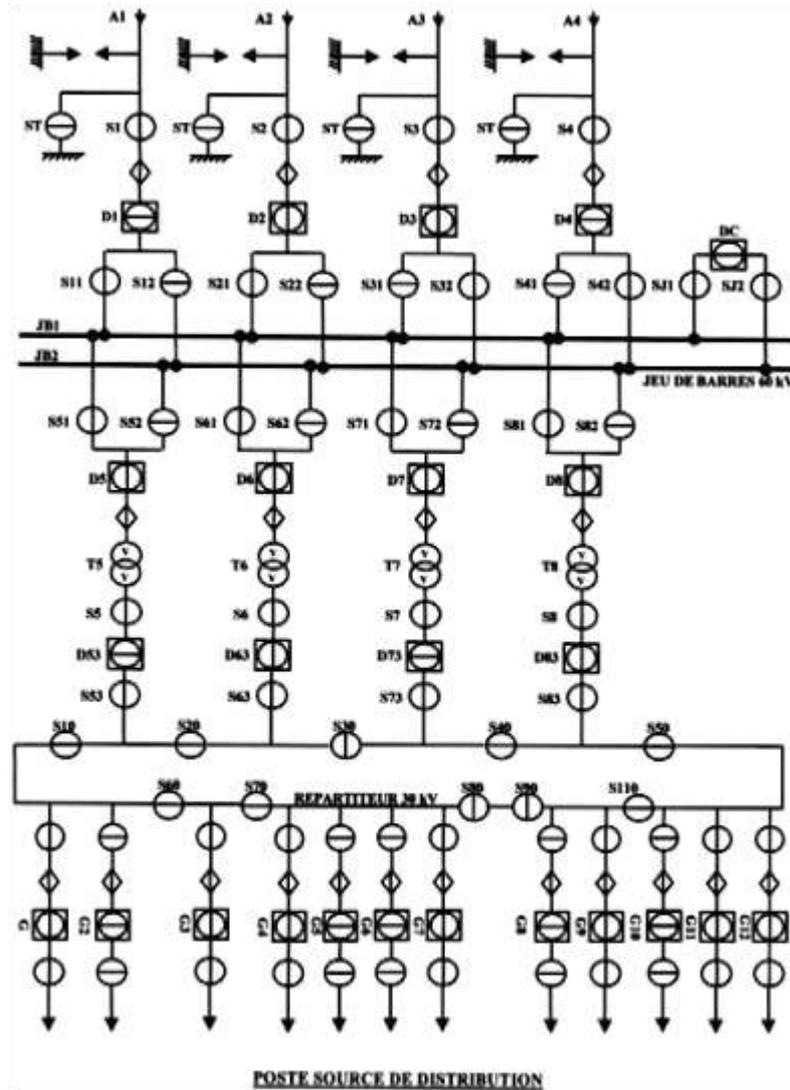


Figure (1.13) : Schéma d'un poste source de distribution

Certaines petites unités industrielles sont directement alimentées par le réseau primaire moyen tension (MT). Le réseau secondaire de distribution est généralement à basse tension pour un usage commercial et résidentiel. En Algérie, la basse tension est de 380/220V triphasé-4 conducteurs. Dans certains pays, elle est encore en triphasé 220/127 V- 4 conducteurs.

Le réseau de distribution est à la fois, aérien et souterrain. Ce dernier a connu ces dernières décennies un accroissement rapide qui fait qu'il représente aujourd'hui la majeure partie du réseau de distribution.

#### **2.4. Les charges :**

Les charges sont à caractère industriel, commercial et résidentiel. Si de très grandes charges industrielles peuvent être directement alimentées par le réseau de transport, les petites charges le sont par le réseau primaire de distribution.

Les charges industrielles sont des charges composées où les moteurs représentent la plus grande part. Ces charges composées sont fonction de la fréquence et de la tension et constituent la majeure partie de la charge totale d'un réseau électrique. Les charges à caractère commercial et résidentiel sont celles liées essentiellement à l'éclairage, le chauffage et la climatisation. Elles sont indépendantes de la tension et de la fréquence et absorbent très peu d'énergie réactive.

La puissance active fournie à la charge s'exprime en kilowatts ou en mégawatts. L'amplitude de la puissance totale fournie, varie durant une journée et doit être à chaque instant, adaptée à la demande du consommateur.

Le diagramme journalier de l'évolution de la charge (Fig. (1.14)), étant la sommation des consommations, exprimées par différents types de consommateurs pendant 24 heures, renseigne sur les habitudes de consommation de ces derniers. La plus grande valeur de la charge durant 24 heures est dite « pointe de charge » ou « pic de charge ». Les plages horaires durant lesquelles elle est atteinte sont dites « heures de pointe ». De petites centrales à démarrage rapide sont utilisées en appoint pour faire face à la demande pendant ces quelques heures. Dans le but d'estimer le degré d'utilisation ou d'exploitation d'une centrale électrique, un indice ou facteur de charge est défini comme étant le rapport de la valeur moyenne de la

charge pendant une période déterminée par la valeur de pointe de cette même période. Le facteur de charge journalier ( $F.C_j$ ) est :

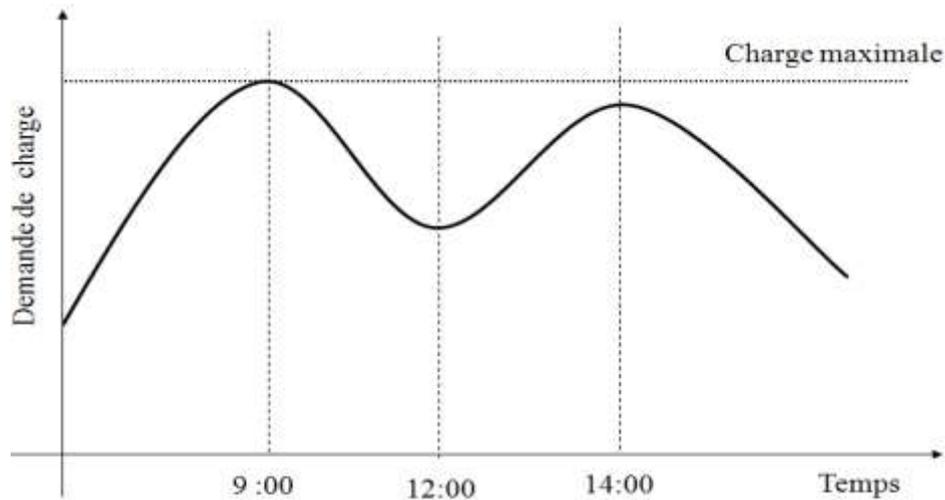
$$F.C_j = \frac{\text{charge moyenne}}{\text{charge de pointe}}$$

En multipliant le numérateur et le dénominateur par 24 heures, nous obtenons :

$$F.C_j = \frac{\text{charge moyenne} * 24\text{hrs}}{\text{charge de pointe} * 24\text{hrs}} = \frac{\text{puissance absorbée en 24hrs}}{\text{charge de pointe} * 24\text{hrs}}$$

Pour qu'une centrale soit exploitée de manière économique, il faudrait que son facteur de charge global soit élevé. Aujourd'hui, cet objectif est atteint lorsqu'il est compris entre 55 et 70%.

Il existe d'autres ratios de gestion, permettant au producteur de l'énergie électrique, d'apprécier entre autres le degré d'utilisation et d'exploitation des capacités installées.



*Figure (1.14) : Exemple de courbe journalière de la charge*

### 3. Le système de protection

A l'instar des alternateurs, des transformateurs et des lignes, d'autres dispositifs existent (Fig. (1.15)), pour assurer, non seulement un fonctionnement normal, mais aussi, la protection des équipements et du personnel d'exploitation du réseau. Cela englobe, les transformateurs de mesures, les disjoncteurs, les interrupteurs, les sectionneurs, les fusibles, les éclateurs et sont directement reliés au réseau. Ces dispositifs permettent d'interrompre volontairement, et à tout moment, la fourniture d'énergie électrique, mais aussi, automatiquement à la survenance d'une quelconque perturbation (défaut). Les équipements de contrôle associés à ces dispositifs ainsi que les relais de protection sont installés dans des salles de contrôle.



*(a) Disjoncteur au SF6*



*(b) Sectionneur*



(c) Transformateur de Courant TC



(d) Parafoudre

*Figure (1.15) : Différents dispositifs de protection*

## 4. Le centre de contrôle ou dispatching

Pour un fonctionnement fiable et économique d'un réseau d'énergie électrique, il est indispensable de surveiller, contrôler le réseau, dans sa globalité à partir d'un centre de contrôle ou centre de conduite ou encore dispatching (Figures (1.16), (1.17)). Les dispatchings modernes sont dits centres de contrôle de l'énergie. Ces derniers sont équipés d'ordinateurs traitants en temps réel les signaux provenant d'un dispositif d'acquisition de données. Ces ordinateurs effectuent leurs traitements de données selon une structure hiérarchique permettant de coordonner, et de répondre, aux différentes exigences, liées aussi bien au fonctionnement normal du réseau, qu'aux situations d'urgences. Ils alertent les opérateurs, dès que toute

situation anormale de fonctionnement est décelée, leur permettant ainsi, d'apprécier l'événement, et de prendre les mesures adéquates, en agissant par l'intermédiaire de leur console sur les éléments du réseau et ainsi remédier à cette situation. Des outils de simulation ainsi qu'un ensemble de logiciels, écrit dans un langage de haut niveau, sont implémentés pour assurer un fonctionnement efficace et un contrôle fiable du réseau.



*Figure (1.16) Centre de Contrôle : Dispatching*



*Figure (1.17) Centre de Contrôle : vue d'ensemble d'un réseau électrique*

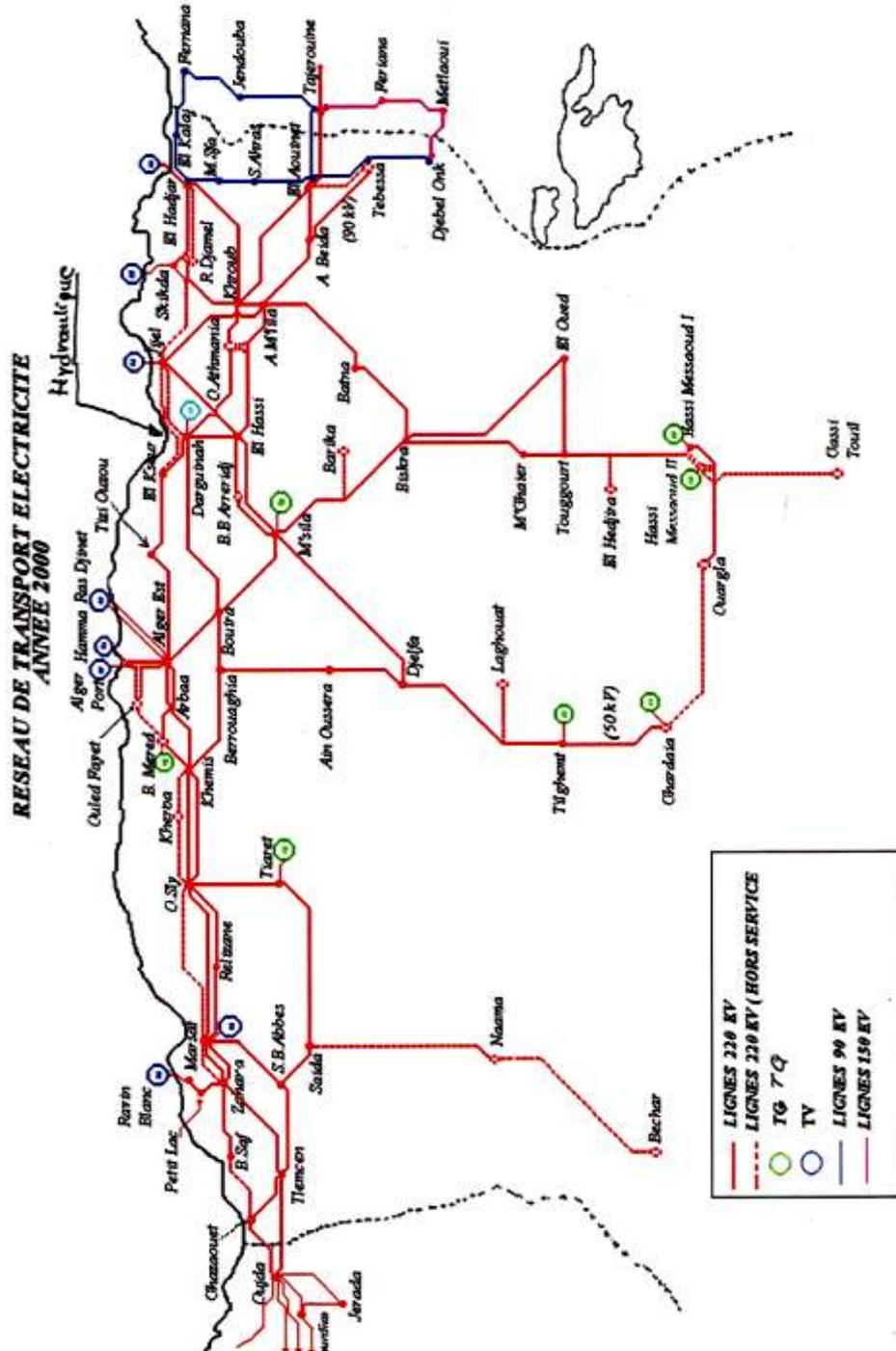
## 5. Conclusion

La conception, et le fonctionnement d'un réseau électrique, nécessitent que soient effectuées, différentes analyses de son comportement, aussi bien en situation normale, qu'anormale, l'objectif étant, d'assurer un haut niveau de sécurité, de fiabilité et un coût de production optimal. Pour ce faire, une simulation du fonctionnement du réseau est réalisée et ce, par la modélisation de chacun de ses différents composants et la mise en œuvre de méthode d'analyse.

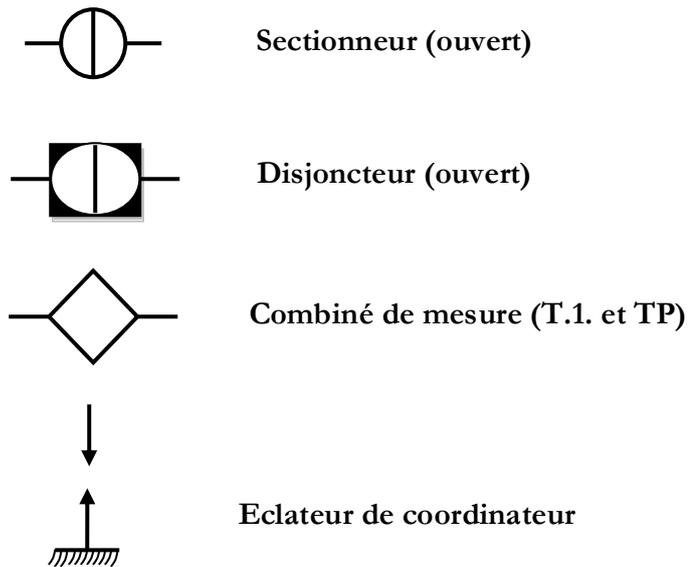
Parmi ces analyses nous citerons :

- ✦ L'évaluation des paramètres des lignes
- ✦ Les performances des lignes et des compensations
- ✦ L'écoulement d'énergie
- ✦ Les situations de défauts symétriques et dissymétriques
- ✦ La stabilité de fonctionnement du réseau

Toutes ces fonctions seront développées dans les différents chapitres de cet ouvrage.



➔ *Caractéristiques des principaux appareils du poste :*



➔ Disjoncteur :

- D1...D8 :  $U_n = 60 \text{ kV}$ ,  $I_n = 1250 \text{ A}$ , puissance de coupure = 1500 MVA
- D73, D63, D53, D83 :  $U_n = 23 \text{ kV}$ ,  $I_n = 800 \text{ A}$ , puissance de coupure = 300 MVA
- G1...G12 :  $U_n = 23 \text{ kV}$ ,  $I_n = 630 \text{ A}$ , puissance de coupure = 330 MVA
- ➔ Combinés de mesure ou transformateurs d'intensité simples.
- ➔ Combinés de ligne : 300-600 / 5A  $\frac{60000}{\sqrt{3}} / \frac{110}{\sqrt{3}}$
- ➔ T.T. de protection des transfos : 250/5A.
- ➔ T.1. des départs 20KV : 300/5A.
- ➔ Transformateurs de puissance
- ➔ 27MVA 60/20 kV Yyo Neutre primaire N isolé
- ➔ Neutre secondaire n à la masse à travers  $R_n = 12\Omega$  1000A
- ➔ UCC=13%



# Travaux Dirigés

## « Généralités sur les réseaux électriques »

### **Exercice 1**

La demande de charge journalière d'un réseau électrique est approximée par l'expression :

$P = 2 - 0.3 * \cos(0.5417t - 1) * e^{-0.01 * t}$  GW, où  $t$  est le temps de la journée en heures.

Calculer :

- Les temps de demande maximale (heures de pointe)
- Les puissances demandées correspondantes
- La puissance moyenne demandée
- Si la capacité de production des centrales est de 2 GW, calculer la puissance à importer pendant la première pointe.

### **Exercice 2**

Une machine synchrone couplée en Y est connectée à un réseau infini (tension et fréquence imposées et constantes). La tension terminale est de 5 kV, et la f.e.m. équivalente est de 4.8 kV. La réactance synchrone de la machine est de 10  $\Omega$ .

Calculer la puissance mécanique maximale avant que la machine perde le synchronisme.

---

**Exercice 3**

---

Une machine synchrone triphasée 11 kV, 11 MW, Y avec une réactance synchrone de  $9 \Omega$ . La machine est raccordée à un nœud infini.

- Calculer la tension d'excitation pour une production maximale de 11 MW.
- Si la puissance mécanique ne varie pas, calculer la valeur du courant lorsque l'excitation croît de 10%.

---

**Exercice 4**

---

Une machine Synchrone 120 MW est raccordée a un réseau infini via deux lignes de transport en parallèle chacune ayant une réactance de  $6\Omega$  avec les transformateurs. La réactance synchrone de la machine est de  $9 \Omega$ . La tension dans le nœud infini est de 110 kV.

- Déterminer la tension d'excitation équivalente qui correspond à une puissance de 120 MW transitée vers le nœud infini.
- Si l'une des deux lignes de transport est ouverte, est ce que le groupe peut délivrer la même quantité de puissance?

---

**Exercice 5**

---

On désire calculer le nombre de lignes de transport en parallèle nécessaires à transiter une puissance de 6000 MW avec une des lignes hors service. Supposer constante la tension aux extrémités de chaque ligne de telle sorte que :

$$P = \frac{V_s V_r}{X_{line}} \sin(\theta_1 - \theta_2)$$

- Déterminer le nombre minimal de lignes de transport (proche du plus grand nombre entier) pour les deux cas suivants lorsque le déphasage maximum entre les deux extrémités de la ligne est de  $30^\circ$ :

- a) Chaque ligne a  $X_{line} = 120 \Omega$  et fonctionne à la haute tension 140 kV.
- b) Chaque ligne a  $X_{line} = 90 \Omega$  et fonctionne à la très haute tension 410 kV.

---

**Exercice 6\***

---

Le débit de gaz alimentant un générateur de vapeur est égale à  $10^3$  kg/h. Ce gaz pouvant être assimilé à du méthane pur, possède un pouvoir calorifique de 214 kcal / mole.

- 1) Calculer en MW la puissance produite dans le générateur.
- 2) On veut produire la même puissance dans un réacteur nucléaire. Calculer la quantité journalière d'Uranium nécessaire (une perte de masse de 1g nécessite 1kg d'Uranium pour la réaction de fission).

---

**Exercice 7\***

---

- ▷ Déterminer le nombre de réactions de fission de  $U_{235}$  nécessaire pour obtenir 1MWj d'énergie. Quelle est la masse de  $U_{235}$  correspondante ?
- ▷ Calculer la valeur de l'unité de masse atomique (u.m.a) en kg puis en MeV/C<sup>2</sup>.

---

**Exercice 8\***

---

- ▷ Quelle est la puissance d'une pile atomique qui consomme 0.4 kg en 1 jour avec une perte de masse de  $U_{235}$  égale à 0.1% ?
- ▷ Déterminer le nombre de neutrons libérés sachant qu'une réaction de fission libère en moyenne statistique 2.5 neutrons.

### **Exercice 9\***

---

Une centrale hydraulique comprend 3 groupes dont la vitesse nominale est de 187.5 tr/mn. Chaque alternateur a une puissance nominale de 60MVA avec un facteur de puissance de 0.85. La hauteur de chute est de 62 m, le débit maximal est  $300 \text{ m}^3/\text{s}$  et le débit moyen vaut  $176.5 \text{ m}^3/\text{s}$ . La production annuelle est de 500 GWh. Déterminer:

- 1) Le type de turbine utilisé et son principe de fonctionnement.
- 2) Le rendement d'un groupe.
- 3) Le nombre annuel d'heures de fonctionnement.

### **Exercice 10\***

---

Une centrale thermique débitant 100 MVA d'Energie Electrique fonctionne avec un facteur de puissance de 0.85. Le rendement du transformateur est de 0.85 et celui de l'alternateur est de 0.9. Le cycle de vapeur, produisant la puissance mécanique à partir de la combustion d'un gaz de pouvoir calorifique égale à  $12000 \text{ kcal/kg}$ , a un rendement de 0.4. Le rendement du générateur de vapeur est de 0.85.

Si la transformation en vapeur de 1 litre d'eau nécessite 500 kcal, calculer :

- 1) Le débit du combustible dans le générateur de vapeur.
- 2) Le débit de vapeur qui décrit le cycle.