

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
المركز الجامعي لعين تموشنت
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent
Institut des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE
Filière : Génie électrique
Spécialité : Réseaux Electrique et technique de la haute tension
Thème

*MODELISATION NUMERIQUE D'ECOULEMENT DE
PUISSANCE DANS UN RESEAU ELECTRIQUE A CINQ
NOEUDS PAR LA METHODE DE GAUSS SEIDEL*

Présenté Par :

- 1) M^{elle}.BOUAZZA ABID Amina
- 2) M^{elle}.KAOUADJI Abir

Devant les jurys composés de :

Dr. Aissou Massinissa	MCB	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr. Younes Mohammed	Professeur	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Encadreur
Mr. Berrached Djelloul	MAA	C.U.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Mr.TORKI BOUSSÂAD	Ingénieur	SONELGAZ	Examineur

Année universitaire 2014/2015

Laboratoire : Structure Intelligente

Dédicaces

Tout d'abord, je remercie le bon DIEU le tout puissant et miséricordieux de m'avoir donné la volonté et la force afin d'accomplir ce travail ainsi que l'audace de passer à travers toutes les épreuves durant ces longues années d'études.

Je dédie ce présent travail en signe de respect, reconnaissance et remerciement :

A mes chers parents qui m'ont apporté leur aide et leur compréhension, je pris dieu qu'ils vivent assez longtemps pour leur rendre toute la tendresse et l'amour qu'ils m'ont donné.

A ma source d'affection ma grand- mère que je chérie le plus au monde.

A mes chères sœurs Wahiba, Souhila, ainsi que leurs maris Amine et Fathi, à ma petite sœur Imene et mon frère Reda, pour leur encouragement et leur soutien moral.

A ma source de bonheur et de joie, ma nièce Sihem et mon neveu Samy.

A la mémoire de ma très chère cousine Sihem

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, et le respect que j'ai toujours eu pour toi, tu resteras à jamais dans mon cœur, que Dieu, le miséricordieux, t'accueille dans son éternel paradis

A mes cousines que j'aime profondément Amani et Wafaa, ainsi qu'à toute ma famille.

A mes chères copines : Abir, Karima et Warda, qui m'ont procuré les plus heureux et joyeux des souvenirs et qui m'ont confirmé que l'amitié double les joies et réduit de moitié les peines.

A la personne qui m'as aidé à surmonter toutes les difficultés, je la remercie, sans doute pas assez, pour son précieux soutien, sa patience, son sourire réconfortant, et pour avoir cru en moi.

BOUAZZA ABID Amina

Dédicaces

- *Merci Allah (mon Dieu) de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire, la patience d'aller jusqu'au bout du rêve et le bonheur de lever mes mains vers le ciel et dire "Ya Kayoum".*
 - *Je dédie ce mémoire aux êtres les plus chers à mon cœur :*
 - *Ma maman, source de tendresse, de sacrifice et d'amour qui a toujours cru en moi et encouragé ; Mon papa, qui m'a toujours soutenu et qui a fait tout son possible pour m'aider ; Vous avez comblé ma vie de tendresse, d'affection et de compréhension, rien au monde ne pourra compenser les efforts et les sacrifices que vous avez consenti pour mon bien être et la poursuite de mes études dans de bonnes conditions. Aucune dédicace, ne saura exprimer à sa juste valeur le profond amour que je vous porte. Puisse Dieu, vous procure santé, bonheur et longue vie.*
 - *A ma très chère grand-mère "Mima " que Dieu lui donne santé et prospérité; Ainsi qu'a mes oncles : Brahim, Smain et leurs femmes Nabila, Amel ; Sans oublier mes chères tantes : Nabahat , Soumia et leurs maris Zenagui, Mohamed chafii.*
 - *A mes adorables cousins et cousines et surtout mon petit prince charmant Ramzy et ma petite puce Douâa surnommée "La Doude".*
 - *A toute ma famille KAOUADJI et BOUDGHENE STAMBOULI.*
 - *A mes chères copines et sœurs : Amina, Karima, Nadjwa, Warda et Soumia.*
 - *A une personne si chère à mon cœur Tata Saïda, elle était toujours présente par son soutien moral et son Douâa, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'amour et l'affection que je porte pour elle.*
 - *Enfin je laisse la plus grande dédicace à ma sœur chérie et adorée "Rihouma chouchou" que Dieu la protège, lui procure la réussite et la santé dans sa vie, sans oublier mon oncle préféré "Maitre ADEL" qui m'a procuré soutien et courage.*

KAOUADJI Abir

Remerciements

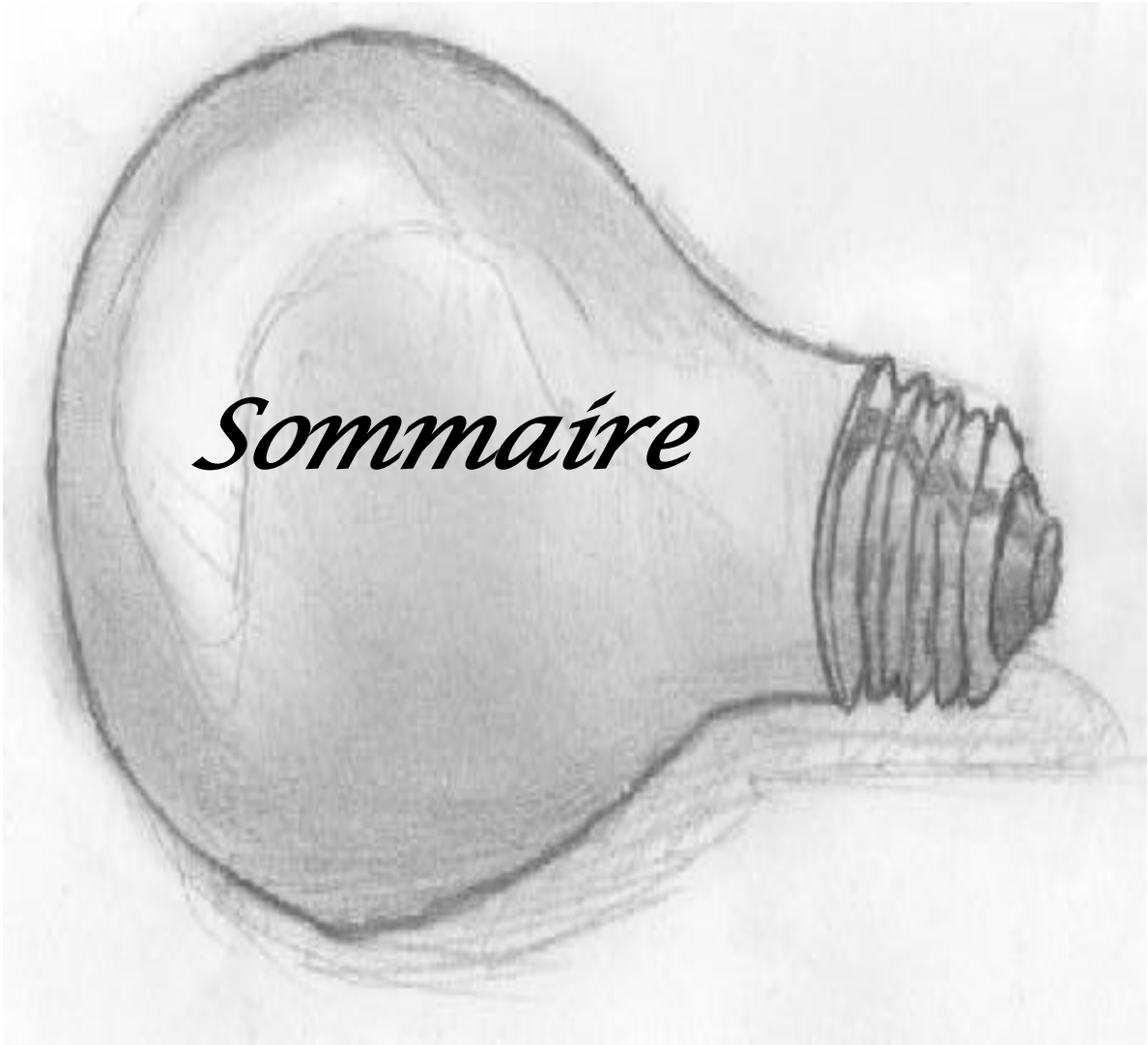
Tout d'abord, merci pour le bon « DIEU » qui nous a donné la volonté et le courage pour le parachèvement de ce travail.

Nous tenons à remercier Professeur YOUNES Mohammed notre encadreur qui n'a pas lésiné sur les moyens et sur son temps pour nous apporter son aide précieuse et qui nous a permis de mener à bien ce travail.

*Nous tenons ainsi à remercier les membres de jury Dr.AISSOU et
Mr.BERRACHED.*

A Mr. BENAZZA chef de Département de Génie Electrique du Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain Témouchent et à tous nos Professeurs, nous tenons à leur exprimer toutes nos reconnaissances pour leurs dévouements, la confiance qu'ils nous ont accordé, leur rigueur et la qualité des commentaires et suggestions dont ils nous ont fait part.

Nous remercions tous les ami(e)s de près et de loin qui ne nous ont pas privé de leurs soutiens, leurs bonnes humeurs quotidiennes.



Sommaire

	Pages
INTRODUCTION GENERALE	1

Chapitre I *Systèmes électro-énergétiques*

I-1_ INTRODUCTION	2
I-2_ SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE	2
I-2.1_ <i>Centrales thermiques</i>	2
I-2.1.1_ <i>Centrales thermiques classiques</i>	2
I-2.1.2_ <i>Centrales nucléaires</i>	5
I-2.2_ <i>Centrales hydroélectriques</i>	6
I-3_ MACHINE SYNCHRONE	9
I-3.1_ <i>Constitution</i>	9
I-3.2_ <i>Principe de fonctionnement</i>	10
I-3.3_ <i>Couplages des alternateurs sur le réseau</i>	11
I-3.4_ <i>Conséquences d'un mauvais couplage</i>	12
I-4_ CONCLUSION	13

Chapitre II

Écoulement d'énergie électrique

II-1_ INTRODUCTION	14
II-2_ HISTORIQUE	14
II-3_ LES DIFFERENTS RESEUX	15
II-4_ FONCTIONNEMENT DES RESEAUX ELECTRIQUES	15
II-4.1_ <i>Architecture des réseaux électriques</i>	15
II-4.1.1_ <i>Poste source</i>	15
II-4.1.2_ <i>Poste de transformation</i>	16
II-4.1.3_ <i>Réseau de transport</i>	16
II-4.1.4_ <i>Réseau de répartition</i>	17

II-4.1.5_ Réseau de distribution	17
II-4.1.6_ Consommation	18
II-4.1.7_ Lignes de transmission	19
II-4.1.7.1_ Pertes et chute de tension dans les lignes	20
II-4.1.7.2_ Compensation de la puissance réactive	21
II-5_ INTERCONNEXION DES RESEAUX	23
II-5.1_ Rôle de l'interconnexion	23
II-6_ EQUILIBRE DU SYSTEME ELECTRIQUE	24
II-7_ CONCLUSION	25

Chapitre III

PROBLEME D'ECOULEMENT DE PUISSANCE

III-1_ INTRODUCTION	26
III-2_ OBJECTIF DE CALCUL D'ECOULEMENT DE PUISSANCE	26
III-3_ MODELISATION DES ELEMENTS DE PUISSANCE D'UN RESEAU ELECTRIQUE	27
III-3.1_ Générateur de puissance	27
III-3.2_ Ligne de transport	27
III-3.3_ Charges	28
III-4_ CLASSIFICATION DES NŒUDS D'UN RESEAU ELECTRIQUE	28
III-5_ FORMULATION DU PROBLEME D'ECOULEMENT DE PUISSANCE	29
III-5.1_ Equations d'écoulement de puissance	29
III-5.2_ Bilan de puissances	33
III-5.3_ Classification des variables d'écoulement de puissance	33
III-6_ RESOLUTION DES EQUATIONS D'ECOULEMENT DE PUISSANCE	34
III-6.1_ Méthode de Gauss Seidel	34
III-6.2_ Algorithme de Gauss Seidel	34
III-6.3_ Application de la méthode de Gauss Seidel	34
III-6.4_ Organigramme	35
III-6.5_ Exemple d'application	36
III-6.6_ Interprétation des résultats	41
III-7_ CONCLUSION	41
CONCLUSION GENERALE	43

Bibliographies

Liste des Abréviations

Résumé



Introduction
Générale

INTRODUCTION GENERALE

Le rôle principal de toute entreprise chargée de la production d'énergie électrique est d'assurer à tout moment, et en tout lieu, la couverture des demandes des utilisateurs en puissances actives et réactives sous tension et fréquence normales. L'entreprise doit en outre garantir une qualité acceptable de la puissance avec un coût d'exploitation réduit. Pour bien exploiter un réseau électrique donné, il faut tout d'abord résoudre les problèmes d'ordre technique et économique. Souvent, on se trouve confronté à un problème, qui est celui de la répartition économique des puissances. Au début, la solution utilisée consiste à charger ou à faire produire au maximum les unités ayant le meilleur rendement. Cette solution n'est pas rentable puisque l'abus de fonctionnement des machines diminue leurs durées de vie et par conséquent, les frais d'entretien et de maintenance augmentent considérablement. L'extension et la complexité du réseau, laisse le choix aux chercheurs pour le développement de nouvelles méthodes afin de contribuer à l'allègement de ce problème.

Le problème de la répartition économique d'énergie a pris une importance considérable avec l'importance de la demande du fait qu'elle est sortie de la catégorie de luxe. Il faut donc planifier les puissances actives et réactives de chaque centrale électrique, de telle sorte que le coût total de fonctionnement du réseau entier soit minimal. Ce processus est appelé l'écoulement de puissance optimal, et parfois, il est connu comme le problème du dispatching économique.

La complexité des problèmes d'optimisation de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique surtout avec la dérégulation du marché d'électricité et le développement de la production décentralisée fait en sorte qu'il est souvent difficile d'utiliser des méthodes exactes d'optimisation compte tenu du manque de flexibilité des méthodes classiques pour intégrer diverses contraintes spécifiques.

L'objectif principal de ce travail est d'établir un programme de calcul d'écoulement de puissance qui répondra à deux contraintes à savoir : la tension et le bilan de puissance. Le travail effectué est divisé en trois chapitres :

Le premier chapitre représente la description et le principe de fonctionnement des différents moyens de production de l'énergie électrique.

Le second chapitre décrit le système de transport et de distribution permettant l'acheminement de l'électricité produite vers tous les points d'utilisation.

Le troisième chapitre sera consacré au calcul d'écoulement de puissance par la mise en équations du système de puissance en régime permanent, par l'application de la méthode de Gauss Seidel.

Chapitre I

Systemes

Électro-énergétiques

1-Introduction.

2-Systèmes de production d'électricité.

3-Machine synchrone.

4-Conclusion.

I-1_ INTRODUCTION

Pour satisfaire la demande d'électricité il existe une grande variété de moyens de production, dont les caractéristiques technico-économiques sont très dissemblables.

Pour fournir une énergie propre, sûre et compétitive tout en tenant compte de l'environnement, les compagnies d'électricité sont orientées vers le développement des parcs de production qui utilisent et combinent toutes les énergies concevables et disponibles.

Les principaux types de centrales électriques en service sont :

- Les centrales à combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz naturel) dites centrales thermiques classiques ;
- Les centrales nucléaires qui sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques ;
- Les centrales hydroélectriques.

La production de l'énergie électrique résulte de diverses transformations. Par exemple, la production de l'énergie électrique d'origine mécanique est basée principalement sur la transformation de l'énergie primaire sous forme potentielle pour les turbines hydrauliques et calorifique pour les turbines à vapeur en une énergie électrique.

I-2_ SYSTEMES DE PRODUCTION D'ELECTRICITE

I-2.1_ Centrales thermiques

L'énergie thermique peut être convertie en énergie électrique ou en énergie mécanique pour être exploitée. La conversion en énergie électrique passe dans un premier temps par la conversion de la chaleur en énergie mécanique (moteur, turbine) pour faire tourner des générateurs électriques produisant de l'électricité.

Les centrales de production électriques utilisent ce principe avec du charbon, du pétrole (Centrales thermiques classiques) ou de l'uranium enrichi (centrales nucléaires) pour produire la chaleur initiale, la plupart ont une capacité comprise entre 200 MW et 2000 MW afin de réaliser des économies d'une grosse installation [1].

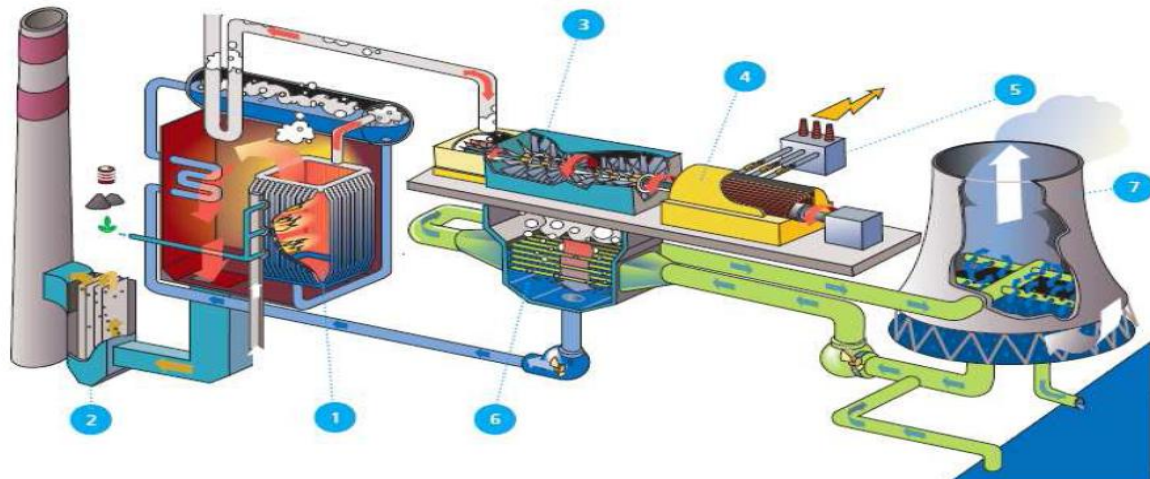
I-2.1.1_ Centrales thermiques classiques

Dans une centrale thermique classique, appelée aussi centrale à flamme, l'énergie électrique est produite, à partir de l'énergie thermique de combustion d'un fossile (charbon, pétrole, gaz naturel, etc.), préalablement convertie en énergie mécanique par une turbine [2].

❖ Centrale à vapeur

Une centrale thermique comprend une ou plusieurs unités thermiques. Chaque unité se compose principalement d'une chaudière ou d'un générateur de vapeur, d'une turbine et d'un turboalternateur comme il est montré à la figure 1. Le principe de fonctionnement d'une unité thermique se résume comme suit [2]:

Le combustible, charbon, fioul ou gaz, est brûlé dans une chaudière. La chaleur dégagée transforme l'eau en vapeur. La turbine est alors alimentée de la chaudière par la vapeur et la pression. La turbine à vapeur transforme l'énergie cinétique d'un flux de vapeur d'eau en énergie mécanique, entraînant le turboalternateur couplé à cette turbine qui génère ainsi l'électricité. La vapeur redevient ensuite eau en traversant le condenseur, puis repart pour un nouveau cycle vers la chaudière.



- | | |
|-----------------------|----------------------------|
| 1. Chaudière à vapeur | 5. Transformateur |
| 2. Electrofiltre | 6. Condenseur |
| 3. Turbine à vapeur | 7. Tour de refroidissement |
| 4. Alternateur | |

Figure 1 : Centrale thermique à vapeur

❖ *Turbine à gaz* [3]

Les turbines à gaz fonctionnent de façon similaire aux turbines à vapeur sauf que les gaz de combustion sont utilisés pour activer les aubes de turbine au lieu de la vapeur. Outre la turbine commande également un compresseur tournant pour comprimer l'air, qui est ensuite mélangé aux combustibles gazeux ou liquides dans une chambre de combustion (Figure2). Plus la compression est importante, plus la température et le rendement dans une turbine à gaz sont élevés. Les gaz d'échappement de la turbine sont émis à l'atmosphère.

Contrairement à la turbine à vapeur, la turbine à gaz ne dispose pas de chaudières ou d'alimentation en vapeur, de condenseurs ou d'un système d'élimination de la chaleur perdue.

Les coûts d'investissement sont donc beaucoup plus faibles pour une turbine à gaz que pour une turbine à vapeur. Dans les applications de production électrique, les turbines à gaz sont généralement utilisées lors des pointes de charge, lorsqu'un démarrage rapide et des périodes courtes de fonctionnement sont nécessaires.

Dans les turbines à gaz, seuls des combustibles propres peuvent être directement utilisés, principalement du gaz naturel avec souvent du carburant diesel comme appoint.

Les combustibles contenant des cendres nécessitent des systèmes d'épuration ou une purification du gaz associée à la gazéification.

Les turbines à gaz sont également utilisées en alimentation de secours et lors des pointes de charge, sur le réseau électrique.

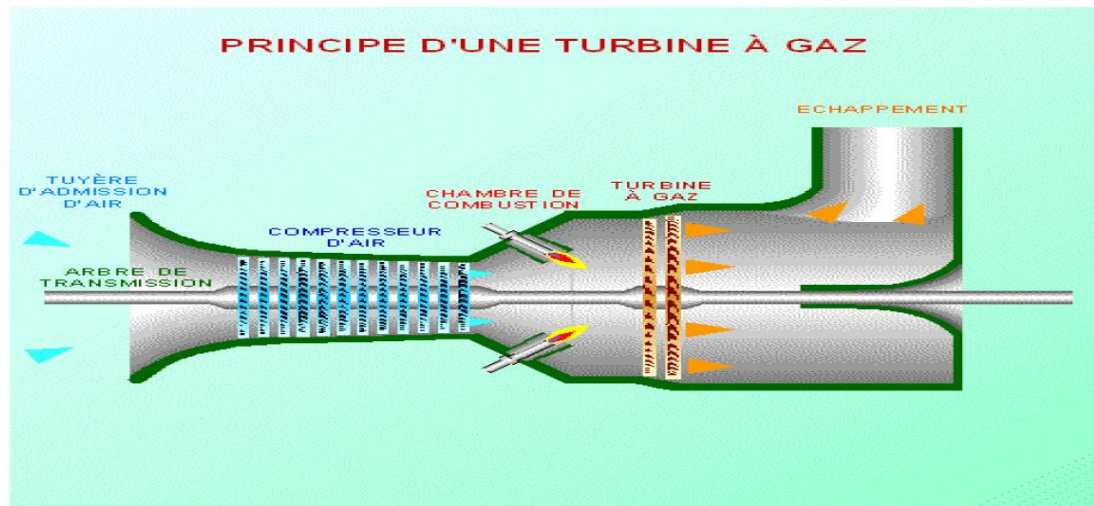


Figure 2 : Turbine à gaz

❖ Centrale à cycle combiné [3]

L'utilisation des turbines à gaz par des sociétés du service public est désormais reconnue au niveau industriel, et la température des gaz résiduaire est autour des 500 °C ou plus. Cette température crée la possibilité d'appliquer un procédé à cycle vapeur supplémentaire. De tels systèmes optimisent les procédés gaz et vapeur pour optimiser le rendement électrique. Les principes du cycle combiné peuvent également être appliqués aux moteurs à combustion.

Le recours à la technologie des centrales à cycle combiné permet d'améliorer encore l'efficacité énergétique d'une centrale à gaz naturel. Ce type d'installation associe deux turbines : une turbine à gaz et une turbine à vapeur, chacune entraîne une génératrice (dynamo ou alternateur) qui produit de l'électricité. Il existe également des centrales où on associe deux turbines à gaz à une turbine à vapeur.

Dans une centrale à cycle combiné (Figure 3), la combustion du gaz naturel est effectuée dans une première turbine. En sortie, les fumées sont encore très chaudes (environ 500 °C). Leur énergie est captée dans un échangeur de chaleur sous forme de vapeur à haute pression. Pour que le rendement de l'échange soit optimal, il est nécessaire de disposer d'une source froide efficace : eau de rivière, eau de mer ou aéroréfrigérant. La vapeur actionne une seconde turbine (la turbine à vapeur), de puissance généralement inférieure à la première.

Grâce à la combinaison de ces cycles thermodynamiques, le rendement des centrales électriques à cycle combiné peut ainsi atteindre 58 %, alors que celui des centrales à cycle simple ne dépasse pas 40 %. Ce rendement très élevé de production d'électricité s'accompagne d'une réduction significative des émissions des polluants atmosphériques.

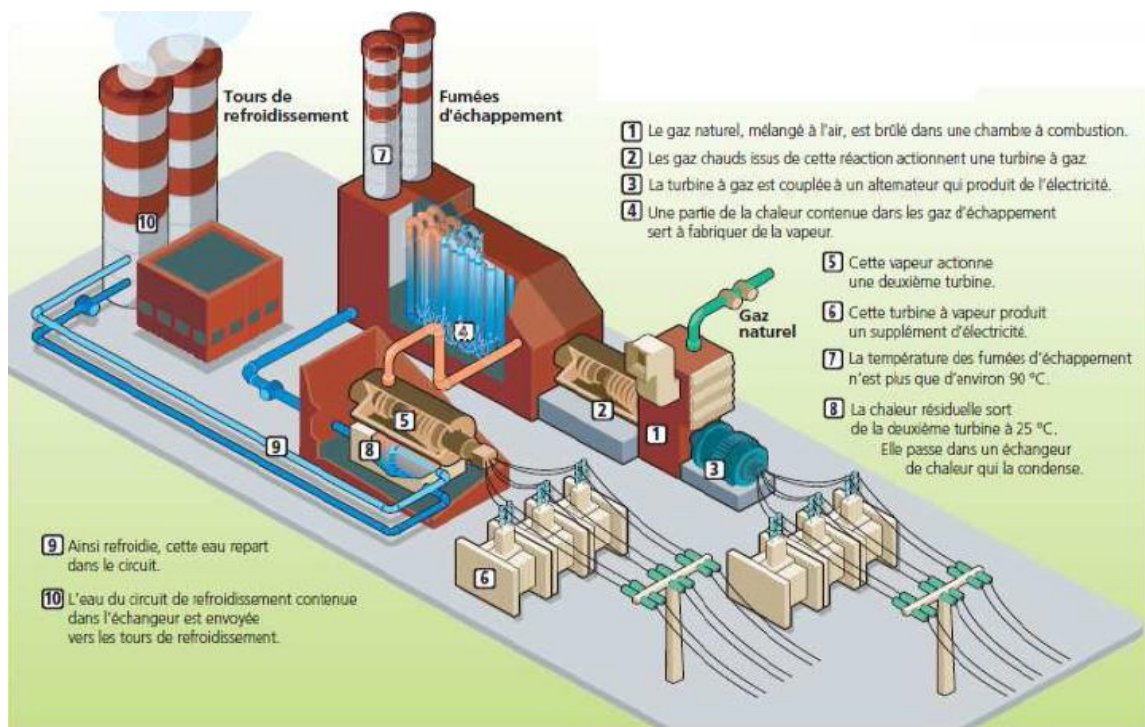


Figure 3 : Centrale à cycle combiné

I-2.1.2_ Centrales nucléaires

Le caractère limité des réserves de combustibles fossiles et la nécessité d'utiliser ces combustibles comme matières premières pour l'industrie chimique entrent en contradiction avec la nécessité d'assurer le développement de production d'énergie électrique, cette contradiction ne peut être résolue que par le développement de l'énergie nucléaire.

A l'époque de la première conférence internationale sur l'utilisation de l'énergie atomique à des fins pacifiques (Genève 1955) il n'y avait en exploitation qu'une seule centrale nucléaire d'une puissance de 5MW. C'était la première centrale nucléaire au monde, mise en service en U.R.S.S. au mois de juin 1954, l'expérience acquise au cours de la mise en service et du fonctionnement de cette centrale a démontré qu'il était réellement possible de produire de l'énergie électrique utilisable à une échelle industrielle à partir de l'énergie nucléaire. Il faut noter que les centrales nucléaires sont également des centrales que l'on peut qualifier de thermiques [4].

Dans une centrale nucléaire telle qu'elle est montrée sur la figure 4, la chaleur est générée par fission nucléaire d'uranium. Cette chaleur produit de la vapeur qui est ensuite acheminée dans une turbine, qui actionne un générateur. Le refroidissement du circuit de la vapeur peut avoir lieu directement, par l'eau du lac, du fleuve ou dans un circuit via une tour de refroidissement.

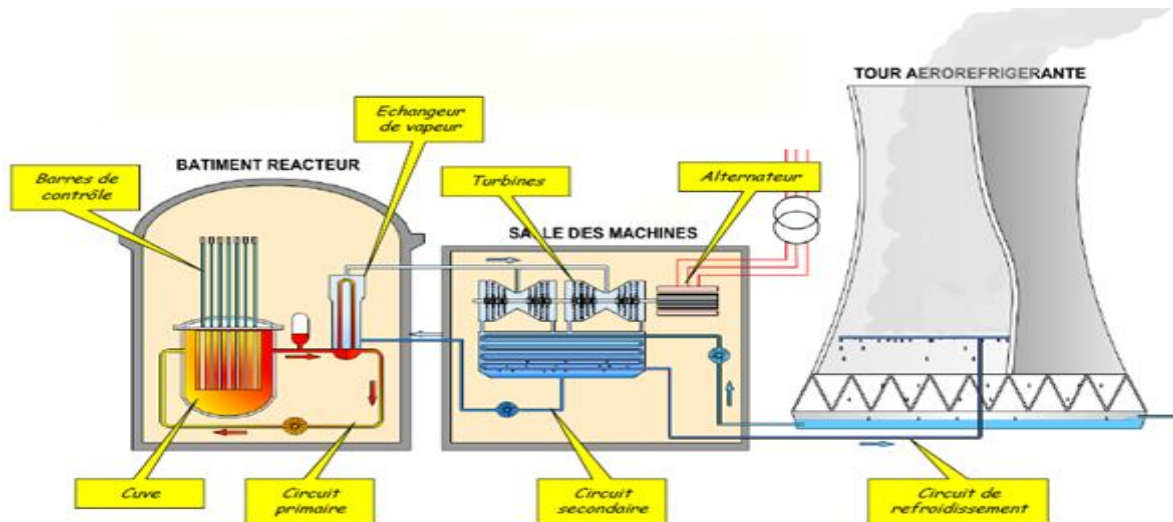


Figure 4 : Schéma descriptif d'une centrale nucléaire

Un groupe turbo alternateur est un ensemble de production électrique constitué d'un arbre tournant à 1500 tr/min dans les centrales nucléaires françaises, portant une turbine et un alternateur. La turbine, entraînée par la détente de la vapeur du circuit secondaire, est composée d'un corps haute pression (HP) et de plusieurs corps basse pression (BP).

❖ *Combustible nucléaire*

Le combustible d'une centrale nucléaire contient des atomes fissiles dont on va extraire de l'énergie par fission. Les principaux atomes fissiles sont l'uranium 233, l'uranium 235, le plutonium 239 et le plutonium 241. Seul l'uranium 235 se trouve à l'état naturel. C'est donc le plus souvent qui est utilisé comme combustible dans les centrales nucléaires. Le combustible nucléaire est placé dans le cœur du réacteur.

I-2.2_ Centrales hydroélectriques

L'énergie hydraulique qui provient de la captation de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux, c'est une énergie renouvelable et une source d'énergie propre et non polluante de l'environnement, économique et fiable. La mise en service est simple et très rapide, en effet lorsque l'eau est stockée, il suffit d'ouvrir les vannes pour commencer le cycle de production d'électricité. Ces caractéristiques lui permettent d'être très flexible pour la régulation de la charge électrique, elle est avantageusement utilisée lors des pics de consommation, ce qui permet d'éviter la mise en route coûteuse des autres types de centrales électriques reliés au même système. L'hydroélectricité met en valeur une richesse naturelle importante et produit une énergie propre et entièrement renouvelable, sans aucune émission de gaz à effet de serre. Leur principal désavantage est qu'elles ne sont pas des énergies qui peuvent répondre à des certains besoins, à des moments sûrs, c'est-à-dire que la production d'énergie électrique est dépendante des conditions météorologiques [5].

En contre partie, les aménagements hydrauliques nécessitent une dure de réalisation qui s'étend sur des années et un lourd investissement initial nécessaire à la construction de barrage.

Toutefois, ces aménagements deviennent à long terme des équipements très rentables car ils :

- Exploitent une énergie primaire gratuite et renouvelable, d'où le coût de production est très bas et constant ;
- Nécessitent une maintenance réduite ;
- Ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années.

Les centrales hydrauliques ont été les premières usines à produire industriellement de l'énergie électrique au début du XXème siècle. L'adoption de l'énergie hydroélectrique par rapport aux autres types d'énergies dépend principalement de la disponibilité des ressources hydriques et de l'investissement. Un autre facteur encourage cette adoption est la double utilisation des eaux des barrages. En effet l'eau utilisée pour produire l'énergie électrique sera réutilisée pour d'autres fins telles que l'irrigation et l'alimentation en eau potable après traitement [2].

L'énergie hydroélectrique utilise la force de l'eau, c'est-à-dire, la combinaison d'un débit et d'une chute afin de produire de l'énergie électrique. Autrement dit, l'énergie potentielle de l'eau retenue dans le réservoir hydroélectrique dans une vallée, passe dans le canal d'écoulement d'eau, elle actionne une turbine hydraulique (ce qui entraîne sa rotation), la turbine est couplée à un alternateur qui va produire à son tour de l'électricité, l'eau est ensuite libérée au pied du barrage et reprend le cours normal de la rivière (Figure 5).

Les centrales hydroélectriques sont classées en trois grandes catégories selon la hauteur de chute d'eau et par voie de conséquence, selon le débit on trouve [6]:

- Les centrales électriques de haute chute (hauteur de chute $>200\text{m}$) ;
- Les centrales électriques de moyenne chute ($30\text{m} < \text{hauteur de chute} < 200\text{m}$) ;
- Les centrales électriques de basse chute (hauteur de chute $< 30\text{m}$).

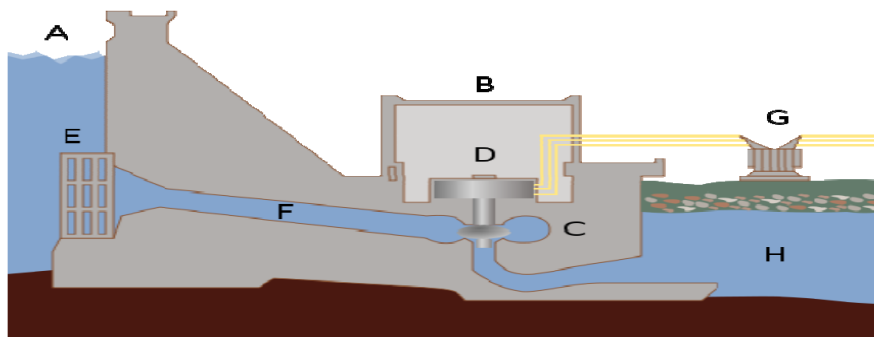


Figure 5 : Constitution d'une centrale hydroélectrique

A - réservoir, B - centrale électrique, C - turbine, D - générateur, E - vanne,
F - conduite forcée, G - lignes haute tension, H - rivière.

❖ **Turbine hydraulique**• **Turbine de Kaplan**

Une turbine Kaplan est une turbine hydraulique à hélices de type propulsion (Figure 6). Elle a été inventée en 1912 par l'ingénieur Viktor Kaplan. Elle est adaptée pour les faibles chutes, et pour les très grands débits de 5000 à 100 000 l/s. La vitesse de rotation varie de 50 à 250 tr/min.

La turbine Kaplan se différencie des autres turbines à hélices par ses pales dont on peut faire varier l'angle en opération. Cela lui permet d'avoir un rendement énergétique élevé pour plusieurs conditions de débit d'eau. Son rendement varie entre 90% et 95%.

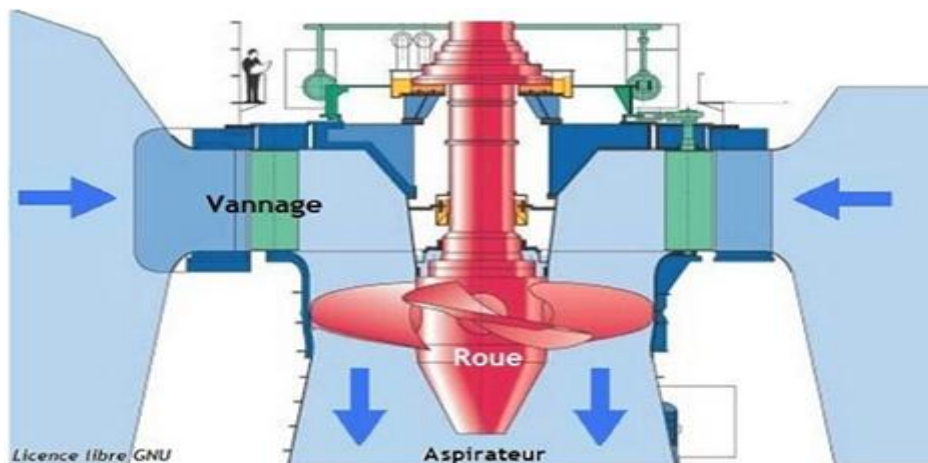


Figure 6 : Turbine de Kaplan [5]

• **Turbine de Francis**

Une turbine Francis est une turbine hydraulique de type à réaction (Figure 7). Elle est adaptée pour des hauteurs de chutes moyennes, pour des puissances et débits moyens (de quelques kilowatts à plusieurs centaines de mégawatts avec des débits jusqu'à 30 000 l/s). Diamètre de la roue entre quelques décimètres et environ 10 mètres. Vitesse de rotation entre 70 et 3 000 tr/min. Rendement énergétique entre 80 % et 95 %.

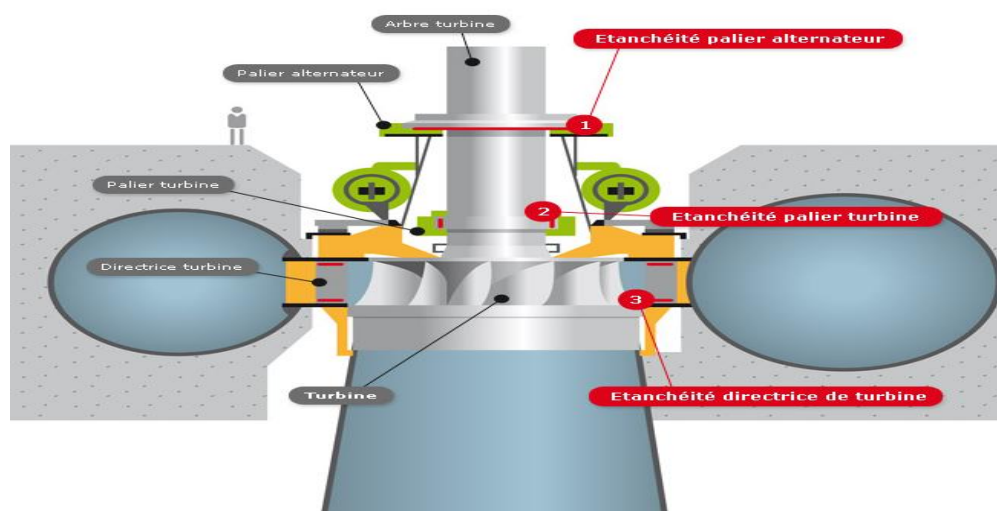


Figure 7 : Turbine de Francis [5]

- **Turbine de Pelton**

Une turbine Pelton est un type de turbine hydraulique utilisée dans les centrales hydroélectriques (Figure 8). Elle a été inventée en 1879 par Lester Allan Pelton, en Californie. Cette turbine est du type « à action » car l'énergie potentielle de l'eau s'écoulant dans une conduite forcée est transformée en énergie cinétique par l'intermédiaire d'un jet d'eau qui agit directement sur les augets de la roue.

D'après le calcul de la vitesse spécifique, ces turbines sont adaptées à des chutes dites « hautes chutes » avec un faible débit d'eau ($< 15 \text{ m}^3/\text{s}$). La vitesse maximale du jet en sortie de l'injecteur satisfait la relation $V_m = \sqrt{2gh}$. Cette conception permet un rendement exceptionnel de l'ordre de 90 %.

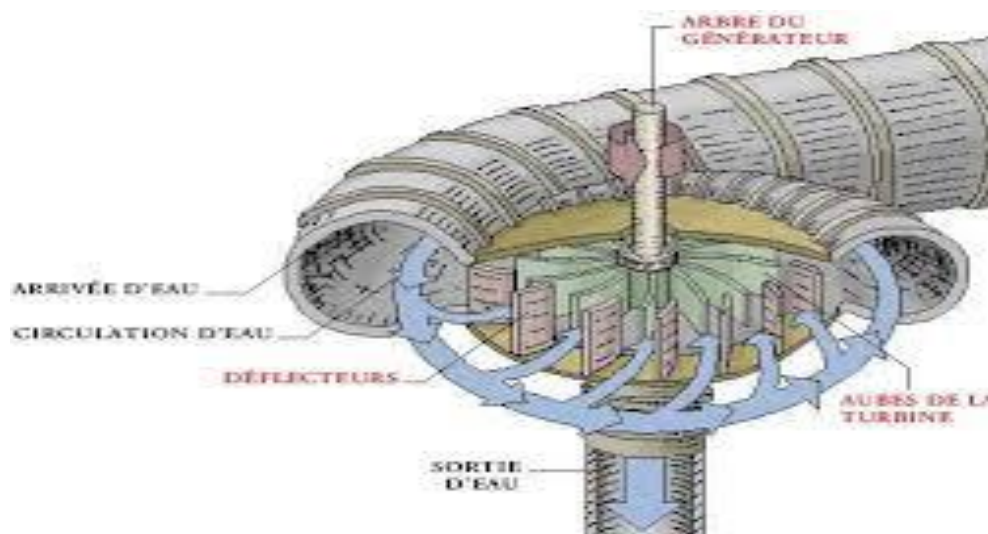


Figure 8 : Turbine de Pelton [5]

I-3_ MACHINE SYNCHRONE

I-3.1_ Constitution [7,8]

On nomme machine synchrone (alternateur), les générateurs de courant alternatif. La plupart sont des machines très puissantes en service dans les centrales thermiques ou hydrauliques.

Un alternateur est composé des ensembles suivants (Figure 9):

a- Stator (induit) : C'est la partie fixe, il est composé de la carcasse, du circuit magnétique et des bobinages. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de 120° .

b- Rotor (inducteur) : C'est la partie mobile, dont la fonction consiste à créer le champ magnétique d'excitation. Il est constitué par un électro-aimant dont les enroulements sont parcourus par le courant continu d'excitation.

Il existe deux grandes familles de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique :

- **Rotor à pôles saillants** : Pour des vitesses périphériques réduites. Ce sont les alternateurs de vitesse < 1500 tr/min, produisant l'énergie à 50 Hz dans les centrales hydrauliques.
- **Rotor à pôles lisses** : Cette construction assure une grande robustesse mécanique. Elle est adoptée pour les alternateurs de fortes puissances dont la fréquence de rotation est élevée (3000 et 1500 tr/min), associée aux turbines à vapeur (centrales thermiques et nucléaires).

c- Collecteur : Il est également mobile, dont le rôle est de transformer le courant induit alternatif en courant unidirectionnel.

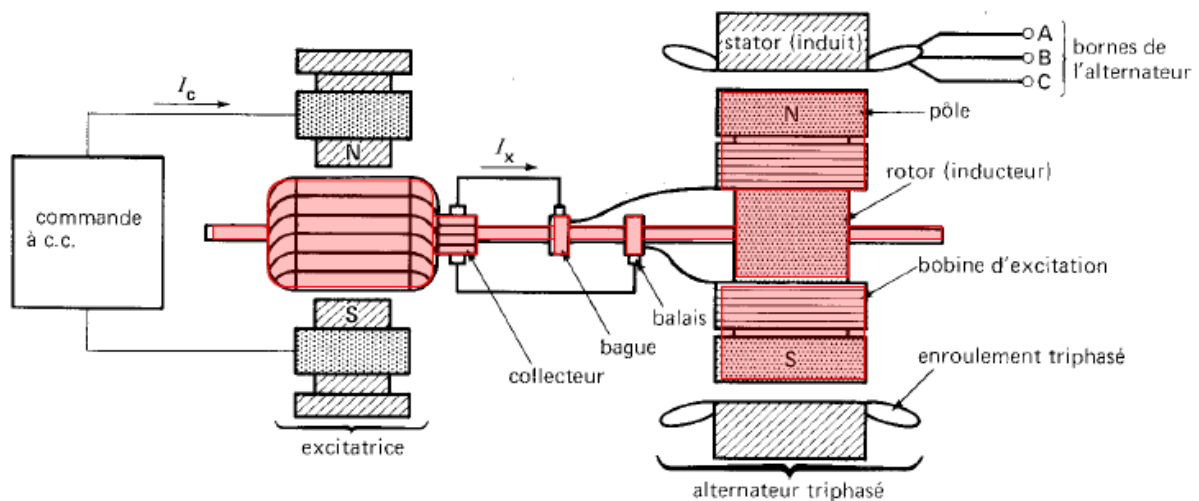


Figure 9 : Vue d'ensemble d'un alternateur

I-3.2_ Principe de fonctionnement

Une génératrice synchrone transforme la puissance mécanique ($T\Omega$) en puissance électrique (VI). Le rotor est un électro-aimant (induit) alimenté par une source de tension continue à partir d'un collecteur commandé par le courant I_C (génératrice excitatrice), entraîné à une vitesse de synchronisme N_s transmis d'un arbre à un autre par une turbine, il crée un champ magnétique tournant. Ce dernier crée des forces électromotrices dans les trois bobinages logés dans la partie fixe de l'alternateur (stator) selon une disposition de telle sorte que chaque force électromotrice est décalée par rapport à l'autre de 120° . Cet angle qui donne l'opportunité au système triphasé tel que la somme instantanée des trois phases est nulle dans une situation équilibrée. Cette opportunité offre une économie intéressante de matériel (conducteur) par rapport au transport monophasé. Selon le couplage des enroulements statoriques (étoile ou triangle) la tension aura un multiplicateur de $\sqrt{3}$.

La fréquence de rotation du champ tournant est le facteur principal et unique de la fréquence de la force électromotrice. Le réglage de cette fréquence doit être contrôlé en temps réel du fait que les abonnés exigent ce paramètre inchangé (45 Hz à 55 Hz pour la plus part des pays).

I-3.3_ Couplage des alternateurs sur le réseau

Une centrale à courants alternatifs comporte plusieurs alternateurs. On a généralement le choix entre l'emploi d'un seul alternateur puissant ou la répartition de la puissance électrique entre plusieurs unités. C'est, le plus souvent, la deuxième solution qui est préférable ; non seulement parce qu'en prévision d'un accident sur l'unique alternateur il faudrait disposer d'une machine de secours de même puissance, mais encore parce que la puissance demandée par un réseau est très variable : un seul générateur prévu pour la charge maximale fonctionnerait souvent à fraction de charge et son rendement moyen serait médiocre [9].

Le couplage est l'opération qui consiste à connecter les bornes de l'alternateur à celle du réseau triphasé pour débiter de la puissance électrique. On n'effectue le couplage que lorsque les bornes homologues de l'alternateur et du réseau sont au même potentiel, sinon la connexion s'accompagne de courants importants susceptibles de provoquer des chutes de tension, la disjonction des appareils de protection est un couple très important qui pourront causer la rupture de l'accouplement rotor- turbine.

Pour éviter cela, il faut réaliser les conditions suivantes :

- La tension de l'alternateur doit être égale à celle du réseau ;
- La fréquence de l'alternateur doit être la même que celle du réseau ;
- La tension de l'alternateur doit être en phase avec celle du réseau ;
- La séquence des phases de l'alternateur doit être la même que celle du réseau.

Pour réaliser ses conditions on doit faire plusieurs réglages :

- Réglage de la vitesse du groupe (la vitesse de synchronisme N_s) ;
- Réglage de la valeur efficace de la tension (entre phase et neutre) fournie par l'alternateur : on règle le courant d'excitation ;
- Vérification de l'ordre de phases des tensions des deux cotés : l'alternateur (E_1, E_2, E_3) et le réseau (V_1, V_2, V_3).

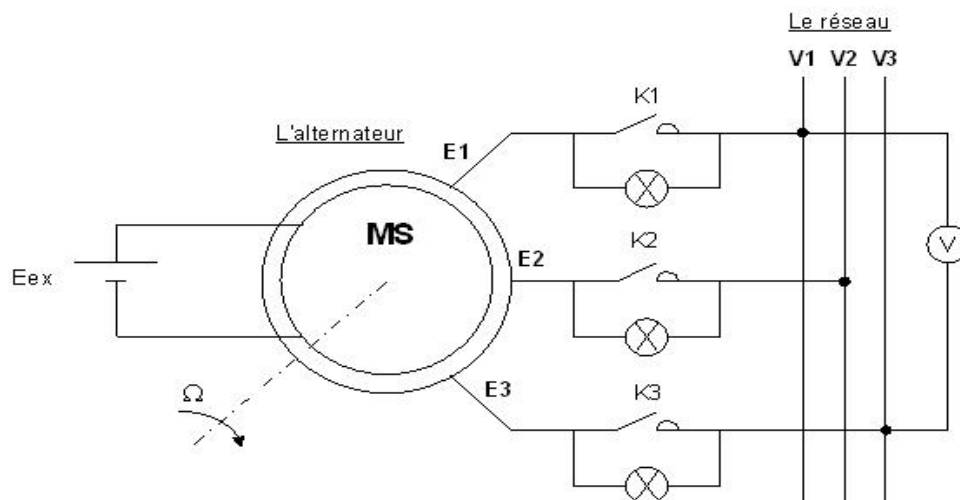


Figure 10 : Couplage d'un alternateur sur le réseau

Le couplage entre le réseau électrique et un alternateur peut être exécuté en utilisant trois lampes témoins (figure 10) .Le couplage est opéré en fermant simultanément les interrupteurs (K1, K2, K3) à l'extinction simultanée des lampes.

La Table.1 montre les cas probables lors de vérification :

TABLE. 1 :
VERIFICATION DES CONDITIONS DE COUPLAGE.

Cas probables	Causes	Action
Les lampes clignotent mais sans passage par l'extinction.	Tensions et fréquences différentes.	Agissant sur le couple moteur de la turbine jusqu'à ce que les luminosités stabilisent puis en agit sur le courant inducteur.
Les lampes clignotent passant par l'extinction.	Même tensions avec des fréquences différentes.	Agir sur le couple moteur puis régler le courant inducteur.
Les lampes sont allumées en constance.	-Même fréquences et même tensions avec déphasage. -Même fréquences, tensions différentes avec ou non déphasage.	-Agir sur le couple moteur légèrement puis revenir aussitôt que les lampes s'éteignent. -Agir sur le couple moteur vers un autre point puis agir sur le courant inducteur.
Les lampes clignotent toute à la fois, avec une extinction de l'une où les deux autres présentent une forte luminosité.	Succession différente de séquences des phases.	Intervertir deux phases.

Une fois l'alternateur est couplé sur le réseau avec un courant inducteur J_0 et un couple moteur de la turbine C_0 , cet alternateur n'échange aucune puissance avec le réseau. Devenant propriétaire du réseau, la fréquence et les tensions aux bornes des enroulements statoriques seront celles du réseau. A une diminution du courant $J < J_0$, l'induit réagira pour compenser cette démagnétisation causé par l'inducteur (on dit alors une réaction d'induit magnétisante), A une augmentation du courant $J > J_0$, l'induit réagira pour compenser cette sur magnétisation causé par l'inducteur (on dit alors une réaction d'induit est démagnétisante). A une augmentation du couple moteur $C > C_0$, la puissance mécanique au delà de la puissance de couplage, se transforme en courant actif qui s'injecte vers le réseau (l'alternateur fourni de la puissance au réseau), A une diminution du couple moteur $C < C_0$, la puissance mécanique au delà de la puissance de couplage, se transforme en courant actif qui provient du réseau vers l'alternateur (l'alternateur absorbe de la puissance du réseau) [1,7].

I-3.4_ Conséquences d'un mauvais couplage [7]

- **Le non-respect de l'égalité des fréquences**

Le non-respect des fréquences peut provoquer des retours de puissances ou des couplages en opposition de phases qui peuvent détériorer l'alternateur et les artifices d'excitation et créer des incidents sur les autres groupes.

- **Le non-respect de l'égalité des tensions**

Cela implique que la différence des tensions n'est pas nulle entre l'alternateur et le réseau, ce qui va provoquer des courants de circulation dans les enroulements de l'alternateur. Ce phénomène est susceptible d'endommager l'alternateur et les artifices d'excitation tels que : les diodes, le régulateur de tension etc.

- **Le non-respect de la concordance des phases**

Le non respect de cette condition conduit à un couplage en opposition de phase avec des courants de circulation très forts qui peuvent endommager le disjoncteur, l'alternateur et les artifices d'excitation. Le couplage en opposition de phase peut provoquer des incidents sur les autres groupes.

De façon générale disant qu'un mauvais couplage peut détériorer un groupe, créant ainsi son immobilisation temporaire ou définitives, causant ainsi des pertes financières.

I-4_ CONCLUSION

Nous avons illustré dans ce chapitre les différentes manières de production d'électricité les plus dominantes dans le monde.

Pour répondre à la consommation croissante d'électricité, il a fallu inventer et construire des usines capables de produire de l'électricité en grande quantité, le choix d'un système de production d'électricité dépend de nombreux facteurs spécifiques à chaque pays : le niveau de développement, la disponibilité des ressources énergétiques (l'énergie primaire), la situation géographique et le besoin en énergie qui se traduit en matière de disponibilité et de puissance fournie.

Dans une centrale électrique, on utilise une source d'énergie primaire que l'on va convertir en énergie électrique, deux pièces maîtresses de ces générateurs d'électricité assurent cette conversion : la turbine et l'alternateur, donc le principe de base de la production d'électricité repose sur la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique c'est-à-dire que la plupart des installations de production d'électricité font exactement le même travail : elles transforment l'énergie cinétique (l'énergie du mouvement), en un flux d'électrons que l'on appelle « électricité ».

Enfin l'aspect essentiel de la nouvelle politique d'électricité est l'efficacité énergétique grâce à laquelle on espère de réaliser d'importantes économies d'énergie.

Chapitre II

Ecoulement d'énergie électrique

1-Introduction.

2-Historique.

3-Les différents réseaux.

4-Fonctionnement des réseaux électriques.

5-Interconnexion des réseaux.

6-Equilibre des systèmes électriques.

7-Conclusion.

II-1_ INTRODUCTION

Un réseau électrique encore appelé système de puissance est constitué par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis la centrale de production jusqu'aux consommateurs finals, il se compose des éléments variés interconnectés (générateurs, transformateurs, lignes de transport, de distribution et des charges) plus ou moins nombreux selon la taille du réseau formant un système complexe.

L'énergie produite est utilisée dans des centres de consommation disposés de manière diffuse à des lieux souvent éloignés des lieux de production, il est donc nécessaire de la produire en temps réel et de la transporter en tout point du système où cette énergie est demandée pour satisfaire la demande de consommation.

Donc on peut dire qu'un système d'énergie électrique interconnecté est une entreprise complexe qui peut être subdivisée en sous-systèmes suivants :

- Les systèmes de production ;
- Systèmes de transmission ;
- Systèmes de distribution ;
- Les points d'utilisation et les consommateurs.

Les réseaux de transport et d'interconnexion assurent l'acheminement de l'énergie depuis ces unités vers les lieux de consommation à travers des lignes électriques aériennes ou souterraines.

II-2_ HISTORIQUE [10]

Dès 1882, EDISON a réalisé la première distribution d'électricité en courant continu sous une tension de 110 V pour l'éclairage et si la première transmission à distance a été réalisée en 1882 entre Miesbach et Munich (57 Km, 2000 V), il est vite apparu que la solution pour un transport à distance devrait passer par une tension plus élevée pour diminuer le volume de cuivre (Depez en 1981) et donc utiliser le courant alternatif et le transformateur dont le principe était breveté par Gaulard et Gibbs en 1881.

Les générateurs triphasés sont de conception plus simple que les machines à courant continu et la coupure de courant plus facile. En 1891, une liaison en courant alternatif sous 15 KV reliait une centrale sur le Neckar à Lauffan à Francfort (sur une distance de 176 Km). Vers 1920, la fréquence de 50 Hz est normalisée en Europe et la tension passe à 132 KV grâce notamment à l'invention des isolateurs suspendus. Les raisons de ce transport à distance proviennent, au début, de la distance entre les centrales hydrauliques et les villes. Lorsque des centrales thermiques sont développées, il est vite apparu qu'une complémentarité existait entre ces divers modes de production, d'où une meilleure utilisation des ressources par une interconnexion tant au sein d'un pays qu'entre pays voisins.

Les liaisons internationales vont alors rapidement se développer : en 1922 une liaison à 150 KV entre la France et la Suisse, en 1929 une liaison entre l'Autriche et l'Allemagne en 225 KV, en 1935 tout, l'est de la France est interconnecté avec la Belgique, la Suisse et l'Allemagne, interconnexion sous 380 KV de l'Europe occidentale en 1985, extension vers l'Europe de l'est (Pologne, Hongrie,...etc.) et le grand Maghreb dans les années 1990.

II-3_ LES DIFFERENTS RESEAUX [11]

Il existe différents types de réseaux :

- Le réseau HT (Haute Tension) qui est utilisé pour le transport et la répartition de l'électricité ; Il se décompose en deux sous-réseaux :
 - Le réseau HTB (Haute Tension B) qui sert à l'alimentation générale du niveau national (réseau 400kV) au niveau régional (réseau 63kV ou 90kV) ;
 - Le réseau HTA (Haute Tension A) qui est le réseau de distribution local en moyenne tension (rayon de 10 à 20km autour d'un poste source) ;
- Le réseau BT (Basse Tension) (tension inférieure à 1000V) qui sert à la distribution électrique dans les quartiers ou communes (rayon d'environ 500m autour des postes de distribution).

II-4_ FONCTIONNEMENT DES RESEAUX ELECTRIQUES

II-4.1_ *Architecture des réseaux électriques*

Les réseaux électriques sont décomposés en trois sous-systèmes : la génération, le transport et la distribution. Chaque sous-système est relié par des postes sources chargés de l'adéquation des niveaux de tension.

La distinction des différents sous-systèmes se base, non seulement dans une différence de niveau de tension mais aussi dans les fonctions que chacun doit assumer (Figure 2).

II-4.1.1_ *Poste source* [12]

Les postes-sources sont à l'interface du réseau de transport et du réseau de distribution. Ils sont raccordés au réseau de transport 90, 63 kV ou 225 kV dans les zones de forte densité de consommation. Le poste-source bénéficie d'équipements de surveillance, de protection et de télécommande.

L'exigence de disponibilité justifie souvent l'équipement d'installations permettant au poste source de fonctionner avec la perte d'une ligne d'alimentation côté transport ou d'un transformateur HTB/HTA côté distribution.

II-4.1.2_ Poste de transformation

Des transformateurs jouent le rôle d'échangeurs et permettent de passer d'un réseau à un autre. Ils sont utilisés à la sortie des centrales et entre les réseaux de tensions différentes pour élever ou abaisser la tension (Figure 1).

Les postes de transformation regroupent généralement plusieurs transformateurs et se trouvent à la convergence entre plusieurs lignes. Il est ainsi possible de réguler les flux d'énergie en fonction de la demande ou des éventuels incidents pouvant survenir sur une ligne, sur un transformateur ou sur les appareillages.

On trouve sur les réseaux électriques deux types de transformateurs de puissance :

- Les autotransformateurs qui n'ont pas d'isolement entre le primaire et le secondaire. Ils ont un rapport de transformation fixe quand ils sont en service, mais qui peut être changé si l'autotransformateur est mis hors service ;
- Les transformateurs avec régleurs en charge sont capables de changer leur rapport de transformation quand ils sont en service. Ils sont utilisés pour maintenir une tension constante au secondaire (la tension la plus basse) et jouent un rôle important dans le maintien de la tension.

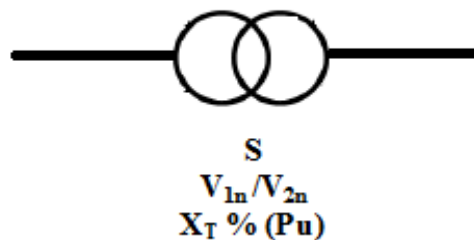


Figure 1 : Symbole d'un transformateur.

II-4.1.3_ Réseau de transport [13]

Constitué de lignes à très haute tension (ligne THT en 400kV-225kV), alimenté par les centrales électriques à partir des postes élévateurs de tension (10-20kV/400-225kV).

Le rôle principal du réseau de transport est la liaison entre les grands centres de consommation et les moyens de production. Ce rôle est particulièrement important car on ne peut pas stocker l'énergie électrique à grande échelle à l'heure actuelle.

Le réseau de transport permet aussi d'échanger de la puissance, à travers des lignes d'interconnexion entre pays ou grandes zones relevant de gestionnaires de réseaux différents.

Le réseau de transport et d'interconnexion est le véritable nœud du système électrique, il permet la fourniture à chaque instant de la puissance demandée par le consommateur dans des conditions garanties de fréquence et de tension.

Un réseau de transport doit être exploité d'une manière particulière: il doit être exploité dans les limites de fonctionnement autorisées. Ces limites ou contraintes du réseau sont exprimées par des valeurs maximales ou minimales sur certaines variables du réseau (fréquence, écoulement de puissance sur les lignes ou transformateurs, niveau de tension, etc.). Si ces limites sont dépassées, le réseau risque de devenir instable. Outre les sources classique qui alimentent nos réseaux actuels (centrale thermique, nucléaires, hydrauliques). Pour que l'énergie électrique soit utilisable, le réseau de transport et de distribution doivent satisfaire les exigences suivantes :

- Assurer au client la puissance dont il a besoin ;
- Fournir une tension stable dont les variations n'excède pas $\pm 10 \%$ de la tension nominale ;
- Fournir une fréquence stable dont les variations n'excède pas $\pm 0,1$ Hz ;
- Fournir l'énergie à un prix acceptable ;
- Maintenir des normes de sécurité rigoureuses ;
- Veiller à la protection de l'environnement.

II-4.1.4_ Réseau de répartition [13]

Comporte des lignes en haute tension (ligne HT 90kV-63kV), alimenté par le réseau THT grâce à des transformateurs (postes de transformation intermédiaires entre le réseau de transport et le réseau de distribution). Le but de ces réseaux est d'amener l'énergie du réseau de transport aux centres de consommation d'énergie les plus importants. Ces centres de consommation sont publics ou privés (plus de 10 MVA), essentiellement des industries de l'acier, des produits chimiques, le chemin de fer.

Il est organisé normalement sous forme de boucle et avec un transit de l'énergie souvent bidirectionnel, la structure de ces réseaux est essentiellement aérienne, par contre, lorsqu'ils sont proches des villes, les lignes deviennent des câbles enterrés.

II-4.1.5_ Réseau de distribution [13]

Ce réseau est composé de deux parties : le réseau de distribution à moyenne tension (MT) 20kV et le réseau de distribution à basse tension (BT) 220V-380V.les réseaux de distribution comprennent l'ensemble des canalisations et des branchements afin d'acheminer l'énergie électrique du réseau de répartition (ou de transport) aux clients résidentiels et aux petits clients industriels.

La structure des réseaux de distribution est bouclée et exploitée en radial. Néanmoins, certains pays disposent de réseaux maillés avec la possibilité d'une exploitation en boucle fermée.

II-4.1.6_ Consommation [4]

La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau pour une période de temps déterminée. Cela correspond à une consommation d'énergie. La consommation d'énergie électrique appelée sur un réseau de transport est la somme des consommations des appareils électriques branchés à chaque instant. L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels) étant donné la pluralité de leurs utilisations individuelles de l'énergie électrique, elle varie à chaque moment.

Connaître la consommation de l'électricité d'une période future est importante pour l'exploitation du système électrique. Pour ce faire, une multitude de variables sont traditionnellement utilisées pour expliquer et prédire le niveau de consommation d'électricité parmi lesquels : la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine (jour ouvrable, week-end), le prix, etc. L'impact de la plupart de ces variables est lié aux conditions climatiques, aux habitudes de consommation, aux rythmes de vie et au pays considéré.

Naturellement, plus la prévision est réalisée en avance par rapport au moment de la consommation, moins elle est précise, Bien que la prévision de la consommation s'affine lorsque l'on s'approche de la période prévue, il existe encore des écarts entre les prévisions faites la veille et la consommation réelle.

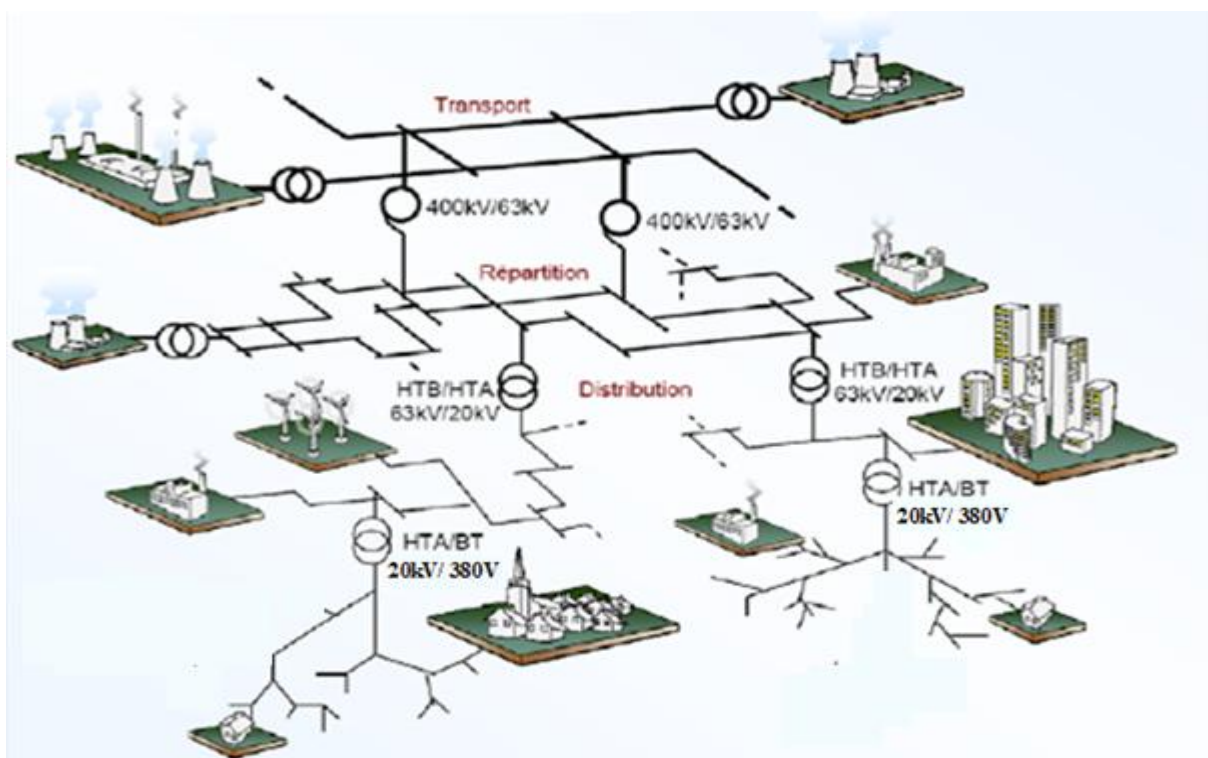


Figure 2 : Architecture des différents sous-systèmes des réseaux électriques.

II-4.1.7_ Lignes de transmission

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terna.

Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes : de 4, rarement plus de 2, mais d'autres pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporter à leur pylônes jusqu'à 8 ternes. Les pylônes sont tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques (Figure 3). Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur. Un câble de garde, constitué d'un seul conducteur, surplombe parfois les lignes électriques. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie : il est relié au réseau de terre et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne, évitant ainsi les "creux de tension" perturbant les clients.



Figure 3 : Lignes électriques

II-4.1.7.1_ Pertes et chute de tension dans les lignes

❖ Perte par effet joule

Le passage de courant dans un conducteur provoque un dégagement de chaleur en raison des frottements des électrons qui circulent dans le conducteur : c'est l'effet Joule. Une partie de la puissance électrique se transforme donc par effet Joule en puissance thermique.

❖ Perte par effet couronne

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés à l'apparition d'une conductivité d'un gaz dans l'environnement d'un conducteur porté à une haute tension. Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation.

L'effet de couronne se produit sur tous les conducteurs et lignes soumis à une haute tension. Dès que le champ électrique à la surface du conducteur devient suffisamment grand (supérieur au champ d'ionisation de l'air $\approx 30\text{kV/cm}$), l'air s'ionise et forme autour du conducteur une couronne lumineuse (Figure 4). La lumière de la décharge couronne n'est visible que sur les lignes THT ($V \geq 400\text{kV}$) lorsqu'il fait sombre.

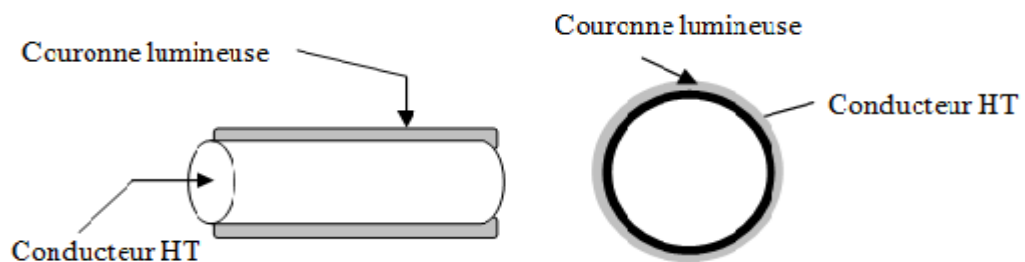


Figure 4 : Décharge couronne sur un conducteur HT.

❖ Chute de tension

La chute de tension d'une liaison est la différence entre les tensions à ses extrémités. Pour veiller à la bonne marche des appareils alimentés, il faut que la chute de tension ne dépasse pas des limites préalablement fixées [14]. Pour les réseaux à construire, les valeurs des chutes de tensions maximales par rapport à la tension nominale du réseau sont fixées lors de l'étude indiquée à la Table. 1 :

TABLE. 1 :
SEUILS DES CHUTES DE TENSION [15]

Type de réseau	ΔV %
Réseaux souterrains	3
Réseaux éclairage public	3
Réseaux aériens	5

II-4.1.7.2_ Compensation de la puissance réactive

Le gestionnaire du réseau de transport d'électricité, doit veiller à la compensation des pertes électriques résultant du transit sur son réseau, la compensation de la puissance réactive est un sujet à fort enjeu, tant d'un point de vue technique que d'un point de vue économique.

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré, toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel, il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive autant que possible à l'endroit où elle est consommée. La consommation excessive, pour une centrale industrielle de l'énergie réactive, entraîne des dépenses élevées. Pour réduire ces dernières, il faut agir sur le cos de l'installation. En effet, dès qu'il y a diminution du cos (fi), le courant de charge d'une centrale électrique et des postes de transformation augmente, malgré que la puissance distribuée reste la même. C'est pour quoi le cos (fi) de puissance, caractérisant la puissance installée, est souvent appelé facteur de puissance. Parmi les moyens de compensations : batteries de condensateur.

La compensation peut se faire de façons concernant l'utilisation des batteries :

❖ Compensation parallèle

La compensation parallèle (shunt) consiste à enclencher des condensateurs shunt connectés entre les phases du réseau et la terre à différents endroits sur le réseau pour modifier l'impédance des lignes (Figure 5), dans le but de maintenir des niveaux de tension acceptables suivant l'état de charge du réseau, la figure 6 est une représentation Fresnel illustrant cette compensation.

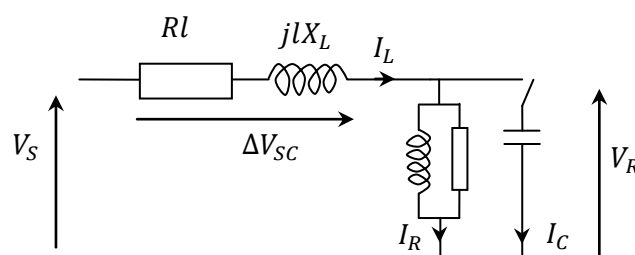


Figure 5 : Compensation parallèle d'une ligne

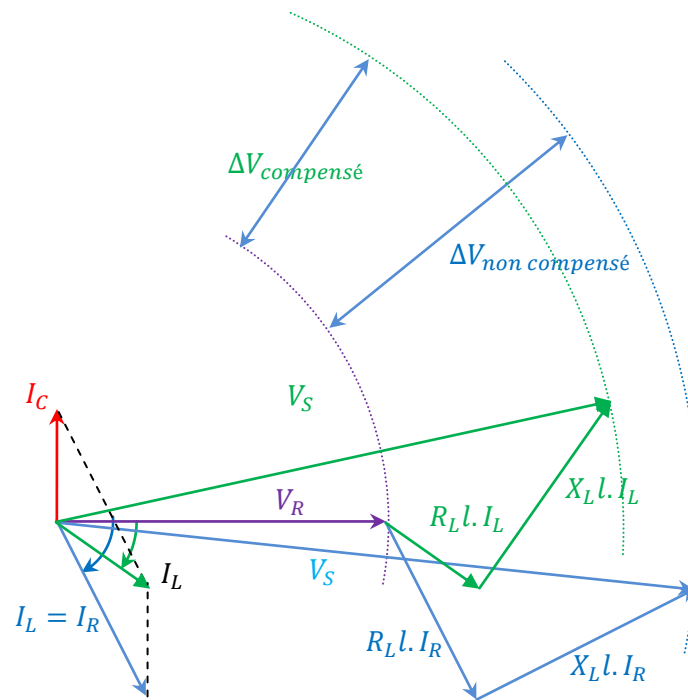


Figure 6 : Représentation Fresnel en compensation parallèle d'une ligne

❖ **Compensation série**

L'équation : $P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta$ montre que la puissance active échangée entre deux systèmes peut être augmentée si l'on réduit l'impédance de la liaison. C'est ce que réalise la compensation série par l'adjonction d'un condensateur en série avec la ligne (Figure7). Les condensateurs sont placés en série sur une ligne dont ils compensent partiellement la réactance inductive de la ligne. La compensation série est utilisée sur certaines lignes à haute tension à la fois très chargées et très longues.

La représentation Fresnel (Figure8) illustre la compensation série.

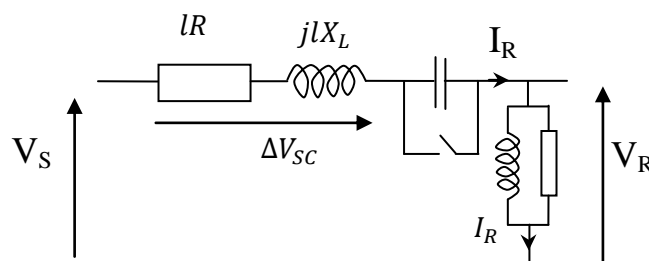


Figure 7 : Compensation série d'une ligne

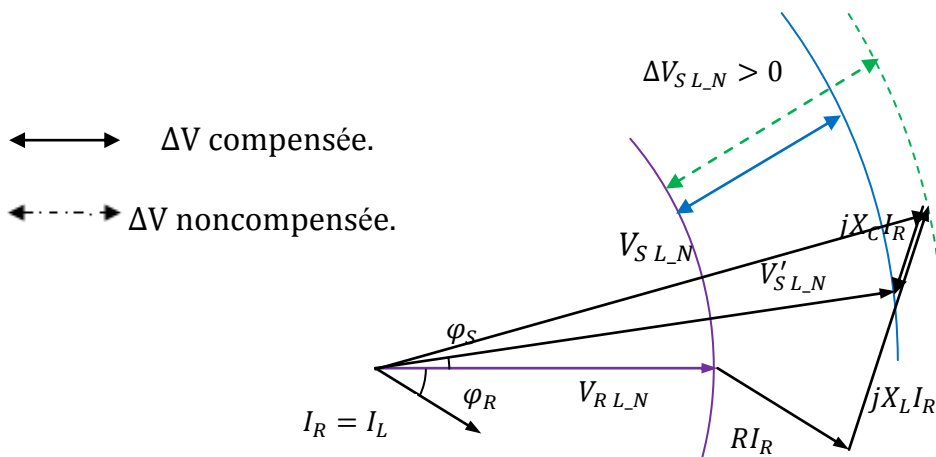


Figure 8 : Représentation Fresnel en compensation série d'une ligne

❖ Comparaison entre la compensation shunt et la compensation série

L'effet d'ajouter un condensateur en parallèle avec la ligne à pour conséquence de diminuer la chute de tension dans la ligne. Aussi pour une valeur de capacitance élevée, il est possible que la chute de tension soit neutralisée. Donc le rôle principal de la compensation parallèle est de réduire la chute de tension causée par la charge dans la ligne.

Les compensateurs série ont été utilisés avec succès pendant de nombreuses années, pour améliorer la stabilité et les aptitudes de charge des réseaux de transport haute tension.

La compensation série est aussi utilisée pour régulariser la tension au long de la ligne lorsque la charge subit à des variations brusque, par contre leur utilisation dans les lignes longue est très fréquente. L'impédance de la ligne réduite, augmente la stabilité du réseau électrique, qui nous permet de transiter des grandes puissances.

II-5_ INTERCONNEXION DES RESEAUX [16]

On appelle interconnexion électrique une liaison entre deux réseaux électriques qu'ils soient nationaux, régionaux ou internationaux généralement synchrones (fonctionnant à une fréquence de 50 ou 60 hertz). Le citoyen, même s'il dispose d'une source de production locale ou décentralisée, ne se sent donc en sécurité que lorsqu'il est raccordé à un réseau général. C'est pourquoi, dans le monde entier, les réseaux électriques ont eu tendance à se développer constamment, à s'étendre et à se rejoindre pour former des ensembles de plus en plus vastes, reliés entre eux, ou plutôt interconnectés.

II-5.1_ Rôle de l'interconnexion

Les réseaux de transport d'électricité interconnectés, permettent de faire passer l'énergie d'un pays à un autre, il est ainsi possible de compenser la défaillance brutale d'un équipement de production ou de transport d'électricité en faisant appel aux producteurs et

transporteurs des pays voisins. Ces interconnexions sont donc prioritairement utilisées pour assurer la sûreté de fonctionnement des réseaux de transport d'électricité. Ces interconnexions permettent également à un fournisseur d'électricité de vendre son énergie directement à un client situé dans un autre pays.

La mise en parallèle des systèmes de production-transport-consommation permet de réaliser des économies en tirant partie, par des importations exportations, des différences de prix à la production dans les diverses zones des pays. L'interconnexion apporte donc à la fois un avantage technique sur la sécurité d'alimentation et économique sur les coûts de production.

II-6_ EQUILIBRE DU SYSTEME ELECTRIQUE

L'équilibre du système électrique exige qu'à tout moment, la puissance injectée (la production) soit égale à la puissance soutirée (la consommation) plus les pertes générées sur le réseau. Ainsi, les systèmes électriques subissent une forte contrainte d'équilibre en temps réel entre les injections et les soutirages.

Cet équilibre production-consommation est nécessaire tout d'abord car les systèmes électriques à courant alternatif fonctionnent comme une « grande » machine synchronisée. Le fonctionnement de cette machine est très complexe et particulièrement vulnérable aux instabilités. Ces instabilités se produisent principalement quand l'équilibre production consommation n'est pas respecté. Assurer l'équilibrage continu, même lors des incidents, est un moyen de maintenir la stabilité du système. Le défaut d'une ligne ou d'une unité de production peut provoquer des phénomènes en cascade pouvant se développer rapidement.

Ainsi, des écarts, même mineurs, de la fréquence de référence peuvent déstabiliser ou endommager des éléments du système de transport. Si lors d'un incident, les actions correctives nécessaires ne sont pas effectuées, le système peut défaillir complètement (black out). Afin de se prémunir contre les ruptures de l'alimentation électrique, une règle fondamentale de sécurité, appelée « règle du N-1 », est appliquée par tous les gestionnaires de réseau. Cette règle consiste à garantir le bon fonctionnement du réseau même en cas de défaillance d'un élément du réseau de transport ou d'une unité de production. Dans ce cas l'électricité doit pouvoir être acheminée par une autre partie du réseau, ou fournie depuis une autre unité de production. Le respect de cette règle ne suffit pas à garantir l'absence totale de coupures, mais permet d'en réduire considérablement le nombre.

II-7_ CONCLUSION

Ce chapitre sert à étudier en générale les réseaux électriques, on a commencé par un aperçu sur l'historique du réseau électrique, ensuite on a donné une vue globale sur les caractéristiques et le comportement du système électrique.

L'exploitation d'un réseau de production, de transport et de distribution d'énergie électrique est soumise à de nombreuses contraintes; la première d'entre elles, consiste à assurer l'équilibre entre la production et la consommation; c'est une contrainte technique. Risquer de ne pouvoir la respecter c'est mettre en danger la stabilité du réseau.

C'est aussi une contrainte économique : assurer un niveau de production fixé à chaque instant par la demande est une chose, assurer cette production au moindre coût est une autre. En général, les charges de réseau sont imposées par le consommateur. Elles se traduisent par une consommation ou une fourniture de puissance active ou réactive. Toutes les puissances consommées doivent être produites et acheminées via le réseau de transport et de distribution. Fixer les niveaux de production des centrales ne permet pas de savoir comment la puissance transite dans le réseau, alors que la connaissance des transites de puissance est nécessaire pour s'assurer que les lignes ne sont pas surchargées, d'où l'objectif du calcul de répartition des puissances.

Chapitre III

Problème d'écoulement de puissance

- 1-Introduction.
- 2-Objectif de calcul d'écoulement de puissance.
- 3-Modélisation des éléments de puissance d'un réseau électrique.
- 4-Classification des nœuds d'un réseau électrique.
- 5-Formulation du problème d'écoulement de puissance.
- 6-Résolution des équations d'écoulement de puissance.
- 7-Conclusion.

III-1_ INTRODUCTION

L'analyse de la répartition des puissances dans un réseau électrique composé d'un nombre de générateurs, lignes de transmission et des charges est très importante pour les études, la planification, l'exploitation ainsi que le contrôle d'un réseau électrique. Cela permet de connaître les conditions de production et de charge et les niveaux des tensions du réseau. L'optimisation d'écoulement de puissance (power flow OPF) consiste à répartir les puissances actives et réactives demandées entre les différentes centrales interconnectées dans un réseau électrique avec un coût minimal. Cette distribution doit évidemment respecter les limites de production des centrales de telle façon que le producteur doit connaître parfaitement le comportement de son réseau du point de vue des transits de puissances exigeant un facteur de puissance acceptable aux consommateurs réduisant ainsi les chutes de tension (par injection de la puissance réactive) et les capacités de transport des lignes électriques et les transformateurs. Le consommateur s'impose par sa demande en puissance active tout en exigeant une fiabilité et une continuité du service.

L'étude de l'écoulement de puissance permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent, ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent.

Le calcul de l'écoulement de puissance se fait en utilisant des méthodes d'optimisation classiques, les équations de l'écoulement de puissance sont non linéaires et leur résolution se fait par une méthode itérative, la méthode de Gauss Seidel conduit à des calculs plus rapides que les méthodes directes lorsque le nombre d'itérations est inférieur au tiers du nombre d'inconnues, et son temps de calculs d'une itération est relativement réduit par rapport aux autres méthodes. L'écoulement de puissance est alors obtenue qui est, d'une part, réalisable physiquement, et d'autre part, offre une valeur minimale de la fonction objective.

III-2_ OBJECTIF DE CALCUL D'ECOULEMENT DE PUISSANCE [17]

Plusieurs travaux ont été appliqués pour différentes méthodes déterministes et évolutionnaires avec certaines contraintes.

L'optimisation de l'écoulement de puissance dans un réseau électrique se fait en incluant les puissances minimales et maximales produites par les générateurs ($P_{\min} \leq P_G \leq P_{\max}$), les puissances apparentes maximales qui transitent au niveau des lignes de transport, ainsi que les modules de tension au niveau des jeux de barres (les conserver entre les limites tolérées ($V_{\min} \leq V \leq V_{\max}$), il faut également assurer l'équilibre entre la production et la consommation.

III-3_ MODELISATION DES ELEMENTS DE PUISSANCE D'UN RESEAU ELECTRIQUE

Lorsqu'on veut calculer l'écoulement de puissance dans un réseau électrique, il n'est pas nécessaire de modéliser tous les éléments qui constituent ce réseau, mais on ne modélise que les éléments qui interviennent réellement, tels que les générateurs de puissance, les charges et les lignes de transport. Le modèle doit être suffisamment simple tout en traduisant principalement la réalité du comportement. Dans cette section, on utilise des grandeurs réduites(en unité relative pu) [18].

III-3.1_ Générateur de puissance

Les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de puissance (Figure 1). Un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance générée et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes.

$$P_{Gi \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi \max}$$

$$Q_{Gi \min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi \max}$$

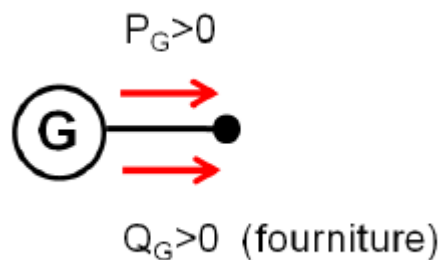


Figure 1 : Symbole d'un générateur [18]

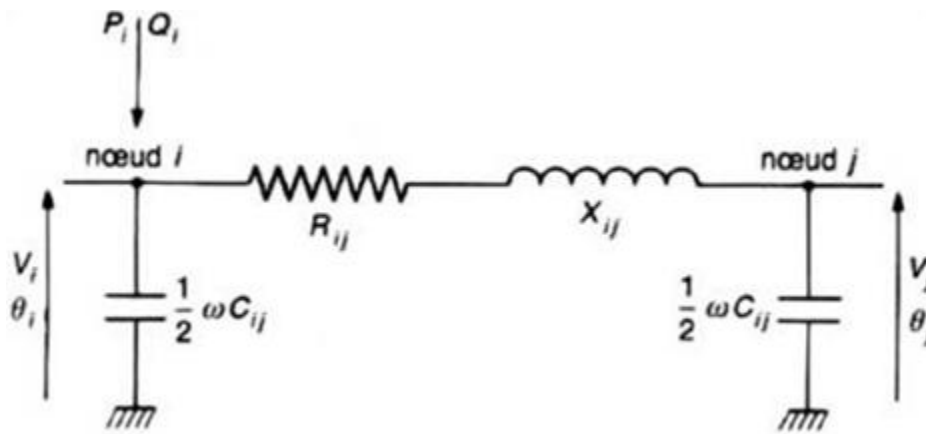
III-3.2_ Ligne de transport

Une ligne électrique entre les jeux de barres i et j sera représentée par le schéma équivalent en π , illustré dans la figure 2.

Les pertes longitudinales totales par effet joule dans l'ensemble des conducteurs de la ligne sont représentées par la résistance $R(\Omega)$.

L'énergie magnétique emmagasinée dans l'ensemble de conducteurs de la ligne est représentée par la réactance longitudinale totale $X(\Omega)$.

La capacité totale de la ligne est répartie équitablement aux deux jeux de barres, dans le cas d'une ligne courte, la capacité C peut être ignorée, son élimination n'a que très peu d'effet sur la tension ou le courant. Il apparaît que les capacités sont prises en compte si la longueur de la ligne est supérieure à 80km ou si la tension est supérieure à 69kV. Les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables.



- R_{ij} résistance de la ligne ij
- X_{ij} réactance de la ligne ij
- ωc_{ij} susceptance de la ligne ij
- V_i module de la ligne au nœud i
- θ_i phase de la ligne au nœud i
- P_i puissance active injectée au nœud i
- Q_i puissance réactive injectée au nœud i
- $\omega=2\pi f$

Figure 2 : schéma équivalent en π de la ligne [18].

III-3.3_ Charges

Les charges représentent les consommateurs connectés au réseau. Elles correspondent à des injections négatives de puissance aux nœuds. Les charges sont modélisées par des puissances constantes indépendantes de la tension nodale (Figure 3) :

$$S_{Ch} = P_{Ch} + jQ_{Ch}$$

Où S_{Ch} est la puissance complexe de la charge.

P_{Ch} la puissance active et Q_{Ch} la puissance réactive.

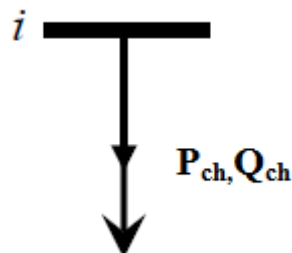


Figure 3 : Symbole de charge [18]

III-4_ CLASSIFICATION DES NŒUDS D'UN RESEAU ELECTRIQUE

Dans un système de puissance, chaque nœud est caractérisé par quatre grandeurs; puissances actives et réactives, l'amplitude de la tension et l'angle de déphasage. Dans la solution de l'écoulement de puissance, deux d'entre elles sont spécifiées et les deux autres grandeurs

sont à déterminer à partir de la solution des équations. Et d'après la dépendance entre ces grandeurs [19], les nœuds sont classifiés en trois catégories [20]:

- **Nœud de référence (balancier, slack bus)**

C'est un jeu de barre connecté à une source de tension considérée constante, et son angle de phase est pris comme référence de calcul (δ_i toujours égale à zéro).le module de tension V_i est spécifiée et les puissances actives et réactives de charge sont connus (P_{Chi} , Q_{Chi}) la solution des équations d'écoulement de puissance permet de calculer les puissances générées (P_{Gi} et Q_{Gi}) ainsi que les puissances injectées P_i et Q_i .

- **Nœud de générations (PV bus)**

C'est un jeu de barre ou les puissances demandées (P_{Chi} , Q_{Chi}) et les puissances actives générées sont connues P_{Gi} , les puissances actives injectées (P_i) sont spécifiées. Le calcul d'écoulement de puissance permet de déterminer les puissances réactives générées (Q_{Gi}) et injectées (Q_i) et leur phase de tension

- **Nœud de charge (PQ bus)**

Ce sont les jeux de barre de la demande clientèles, on connait les puissances demandées (P_{Chi} , Q_{Chi}) ainsi que les puissances générées (P_{Gi} et Q_{Gi}) afin de spécifier les puissances injectées (P_i, Q_i).le module et la phase de tension seront déterminés à partir du calcul d'écoulement de puissance.

III-5_ FORMULATION DU PROBLEME DE L'ECOULEMENT DE PUISSANCE

III-5.1_ Equations d'écoulement de puissance [21]

Dans les études d'écoulement de puissance, l'hypothèse de base est que le système d'énergie considéré est un système triphasé équilibré fonctionnant en régime permanent avec une fréquence constante. La construction du modèle mathématique duquel on peut prédire la forme (aspect) de l'écoulement de puissance, est essentielle pour la compréhension du mécanisme de l'écoulement de puissance.

Les réseaux électriques réels peuvent contenir des centaines de jeux de barre, de générateurs et de milliers de branches, donc pour un système de n jeux de barre on aura :

- n variables : V_i (module de la tension du jeu de barre i) ;
- n variables : δ_i (angle de phase de la tension du jeu de barre i) ;
- m variables : P_{Gi} (puissance active générée au jeu de barre i) ;
- m variables : Q_{Gi} (puissance réactive générée au jeu de barre i) ;
- p variables : P_{Chi} (puissance active demandée au jeu de barre i) ;
- p variables : Q_{Chi} (puissance réactive demandée au jeu de barre i).

Avec $i=1,2,\dots,n$.

Soit le réseau de la figure (4) composé de deux jeux de barres :

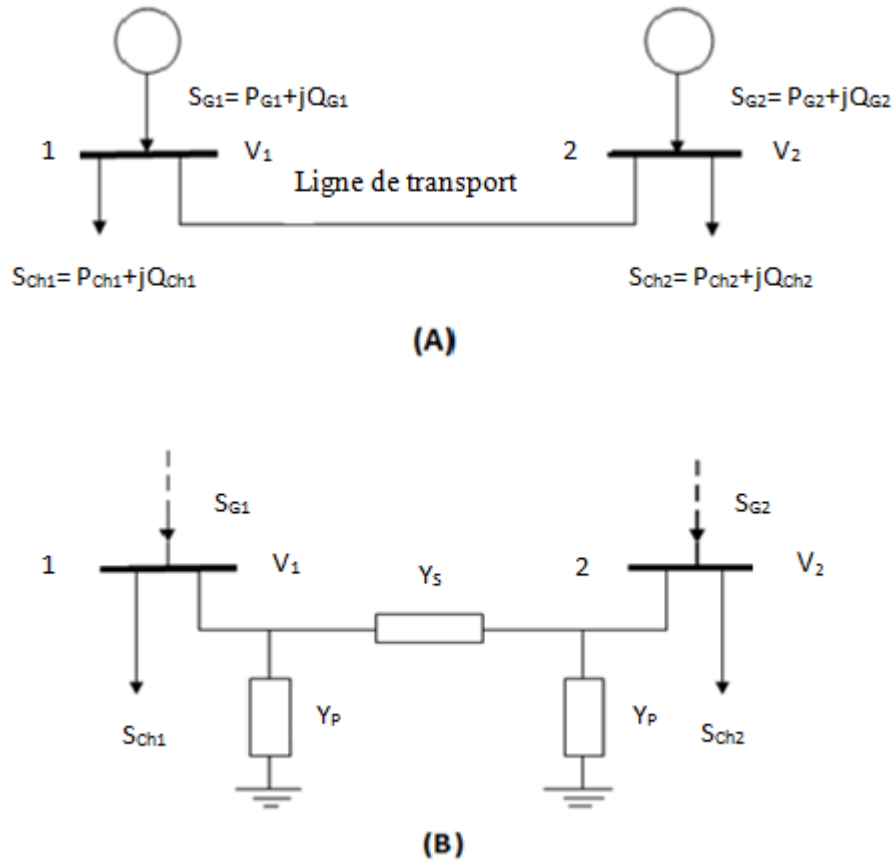


Figure 4 : Schéma unifilaire d'un réseau à deux nœuds [21]

Pour élaborer les équations d'EP en procède comme suit :

$$S_1 = S_{G1} - S_{Ch1} \Rightarrow S_1 = (P_{G1} - P_{Ch1}) + j(Q_{G1} - Q_{Ch1})$$

$$S_2 = S_{G2} - S_{Ch2} \Rightarrow S_2 = (P_{G2} - P_{Ch2}) + j(Q_{G2} - Q_{Ch2})$$

$$\text{Formule générale : } S_i = S_{Gi} - S_{Chi} \Rightarrow S_i = (P_{Gi} - P_{Chi}) + j(Q_{Gi} - Q_{Chi}) \quad (1)$$

La puissance apparente aux nœuds « 1 » et « 2 » sont données par la relation suivante :

$$S_1 = V_1 I_1^*$$

$$S_2 = V_2 I_2^*$$

$$\text{Formule générale : } S_i = V_i I_i^* \quad (2)$$

En relief au schéma (5) nous exprimons les courants injectés aux nœuds « 1 » et « 2 » par :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = V_1 Y_p + (V_1 - V_2) Y_S$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = V_2 Y_p + (V_2 - V_1) Y_S$$

Formule générale :

$$I_i = \frac{S_i^*}{V_i^*} = V_i Y_p + (V_i - V_j) Y_s \quad (3)$$

Cette équation peut être écrite sous la forme suivante :

$$I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} = y_{11} V_1 + y_{12} V_2$$

$$I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} = y_{21} V_1 + y_{22} V_2$$

Sous forme générale

$$I_{ij} = \frac{S_{ij}^*}{V_i^*} = y_{ii} V_i + y_{ij} V_j \quad (4)$$

Tel que :

$$\begin{aligned} y_{ii} &= Y_p + Y_s \\ y_{ij} &= y_{ji} = -Y_s \quad i \neq j \\ y_{jj} &= Y_p + Y_s \end{aligned} \quad (5)$$

Ces équations peuvent être écrites sous forme matricielle :

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad (6)$$

Le vecteur des courants :

$$I_{bus} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

Vecteur des tensions :

$$V_{bus} = \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \dots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (9)$$

Donc la matrice admittance sera donc:

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ Y_{11} & Y_{12} & \dots & Y_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \dots & Y_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

D'après la nouvelle notation de la matrice admittance nous pouvons exprimer les composantes réelles et imaginaires de la puissance injectée en chaque nœud de la manière suivante :

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = I_1 V_1^* = (Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2) V_1^*$$

$$S_1^* = P_1 - jQ_1 = I_2 V_2^* = (Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2) V_2^*$$

Formule générale :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = V_i^* \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n Y_{ij} V_j \quad i = 1 \dots n \quad (11)$$

En coordonnée polaire :

$$P_1 = P_{G1} + P_{ch1}$$

$$P_1 = |y_{11}| |V_1^2| \cos(\gamma_{11}) + |y_{12}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12})$$

$$P_2 = P_{G2} + P_{ch2}$$

$$P_2 = |y_{21}| |V_1| |V_2| \cos(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{12}) + |y_{22}| |V_2^2| \cos(\gamma_{22})$$

$$Q_1 = Q_{G1} + Q_{ch1}$$

$$Q_1 = -|y_{11}| |V_1^2| \sin(\gamma_{11}) - |y_{12}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_2 - \delta_1 + \gamma_{12})$$

$$Q_2 = Q_{G2} + Q_{ch2}$$

$$Q_2 = -|y_{21}| |V_1| |V_2| \sin(\delta_1 - \delta_2 + \gamma_{12}) - |y_{22}| |V_2^2| \sin(\gamma_{22})$$

Formules générales :

$$S_i^* = P_i - jQ_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})} \quad i = 1 \dots n \quad (12)$$

$$P_i = \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (13)$$

$$Q_i = - \sum_{\substack{i=1 \\ i \neq j}}^n |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (14)$$

Les équations (13) et (14) sont des équations algébriques non linéaires en régime permanent.

III-5.2_ Bilan de puissances

Le bilan de puissance active du réseau s'écrit : La somme des puissances actives générées par les générateurs est égale à la somme des puissances actives absorbées par les charges, augmentée des pertes actives dans le réseau.

L'équilibre des puissances actives donne :

$$\sum P_{Gi} = \sum P_{Chj} + \sum P_{perte} = \sum P_{Chj} + P_L \quad (15)$$

Où P_L : représente les pertes de puissances actives dans les lignes.

Le bilan de puissance réactive du réseau s'écrit : La somme des puissances réactives générées par les générateurs est égale à la somme des puissances réactives consommées par les charges augmentées de la somme des pertes réactives dans les lignes.

L'équilibre des puissances réactives donne :

$$\sum Q_{Gi} = \sum Q_{Chj} + \sum Q_{perte} = \sum Q_{Chj} + Q_L \quad (16)$$

Où Q_L : représente la puissance réactive absorbée par les inductances des lignes.

$$P_L = P_L(|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2) \quad (17)$$

$$Q_L = Q_L(|V_1|, |V_2|, \delta_1, \delta_2) \quad (18)$$

Les équations (17) et (18) impliquent les angles (δ_1, δ_2) ainsi que leurs différences.

III-5.3_ Classification des variables de l'écoulement de puissance [21]

Généralement le fonctionnement d'un système électrique peut être décrit en fonction de six variables pour chaque nœud considéré [$P_{Gi}, Q_{Gi}, P_{Chi}, Q_{Chi}, V_i, \delta_i$] :

- **Variables de perturbation (Variables contrôlées)**

Ce sont les puissances $P_{Ch1}, P_{Ch2}, Q_{Ch1}, Q_{Ch2}, \dots, P_{Chn}, Q_{Chn}$ demandées par les charges.

- **Variables d'état**

Ce sont les tensions en module et en phase représentant l'état du système $|V_1|, |V_2| \dots |V_n|$ et $\delta_1, \delta_2 \dots \delta_n$.

- **Variables de contrôle**

Ce sont les puissances de source $P_{G1}, P_{G2}, \dots, P_{Gn}, Q_{G1}, Q_{G2}, \dots, Q_{Gn}$.

III-6_ RESOLUTION DES EQUATIONS D'ECOULEMENT DE PUISSANCE

III-6.1_ Méthode de Gauss Seidel [22]

C'est une méthode itérative, relative à la matrice admittance Y_{Bus} . Elle ne nécessite pas beaucoup d'espace mémoire et sa programmation est relativement simple.

Pour un système à plusieurs variables, la méthode de Gauss Seidel utilise, à chaque itération, la valeur la plus récente calculée.

III-6.2_ Algorithme de Gauss Seidel

Bien qu'on doive résoudre un système d'équation (n) on va commencer par une seule équation à résoudre itérativement $F(x)=0$.

Pour s'adapter à la méthode on écrit : $x=F(x)$.

Exemple

Soit la fonction $F(x) = x^2 - 5x + 4 = 0$

Formulation $F(x) \quad x = \frac{1}{5}x^2 + \frac{4}{5}$

X_1, X_2 sont les racines de l'équation $F(x) = 0$

Cherchons l'Algorithme :

Nous commençons par le point $x^{(0)}$ (itération initiale).

Alors, la solution est obtenue itérativement, à partir d'une valeur initiale x^0 .

D'où :

$$X(v+1) = F(x(v)) \quad (19)$$

Tel que v: le numéro d'itération.

Le critère d'arrêt se base sur la comparaison entre la différence absolue des variables indépendantes de deux ordres successifs et un seuil de tolérance ϵ initialement fixé :

$$\left| X_i^{(v+1)} - X_i^{(v)} \right| < \epsilon \quad i = 1 \dots n \quad (20)$$

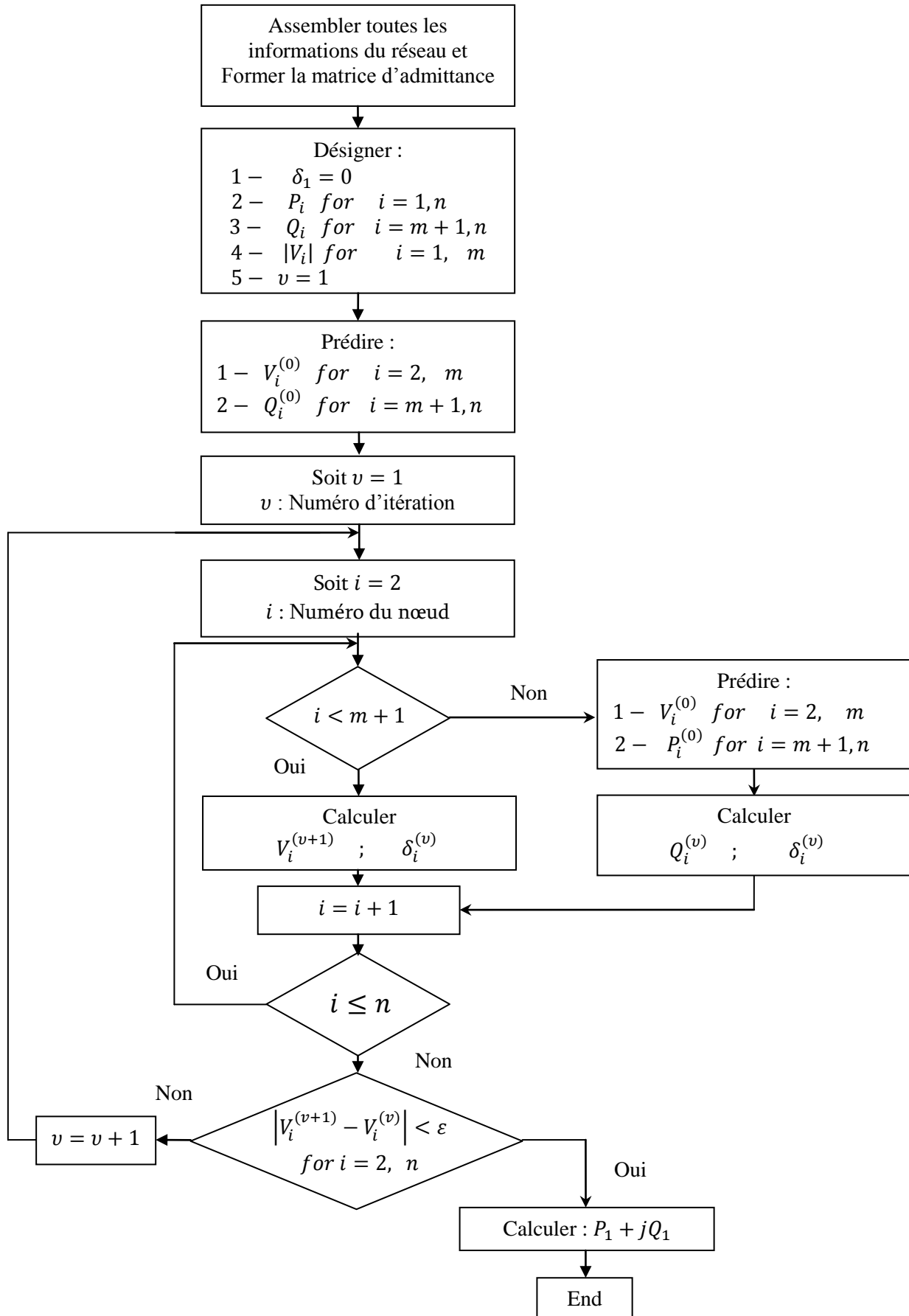
III-6.3_ Application de la méthode de G.S [21]

$$P_i - jQ_i = V_i^* y_{ii} V_i + V_i^* \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j \quad i = 1 \dots n \quad (21)$$

Ainsi on constate que les valeurs P, Q, dépend essentiellement de V_i^* et V_j , qui peuvent être calculées pour chaque itération selon l'algorithme suivant :

$$V_i^{(v+1)} = \frac{1}{y_{ii}} \left[\frac{P_i - jQ_i}{(V_i^{(v)})^*} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} V_j^{(v)} \right] \quad i = 1 \dots n \quad (22)$$

III-6.4_ Organigramme



III-6.5_ Exemple d'application

Topologie : soit un réseau électrique défini dans le schéma de la figure (5) avec une série de charges à alimenter à partir de deux générateurs dispersés G_1 , G_5 reliés entre eux par un réseau de liaison maillé ayant 5 nœuds. Les capacités de production des différents générateurs étant connues, les lignes de transmission sont de 200MVA, 215kV (unifilaire), ayant des distances données dans la table. 1 :

TABLE. 1 :
LANGUEUR DES LIGNES DE TRANSMISSION

Liaison entre les nœuds	Longueur (km)
1-2	80
1-5	115
2-3	120
2-5	150
3-4	120
3-5	100
4-5	130

Les paramètres inductifs et résistifs sont :

$$R = 0,074 \Omega/km$$

$$X_L = 0,457 \Omega/km$$

$$X_C = 0,277 M\Omega/km$$

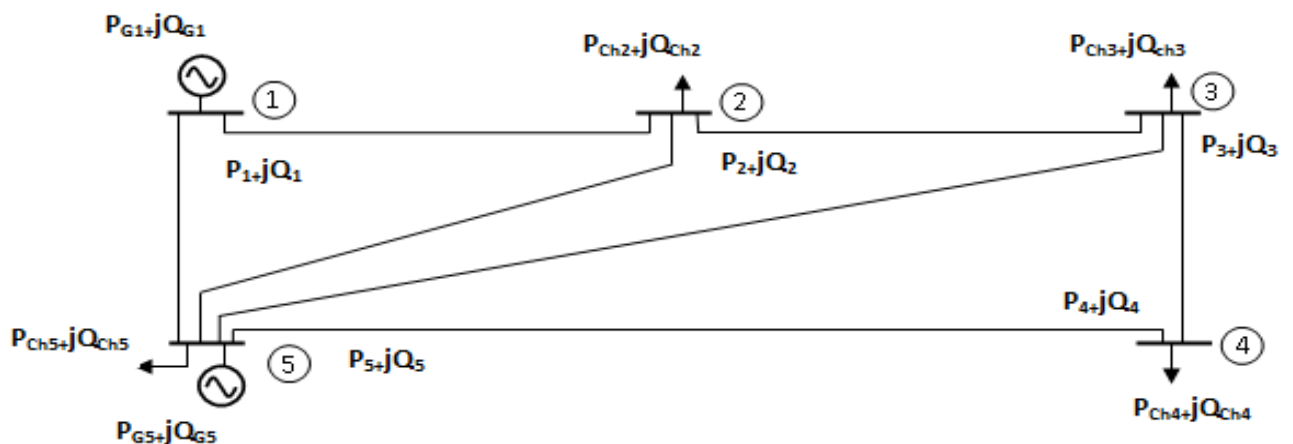


Figure 5 : Topologie du réseau pris comme exemple de calcul

Dans la table. 2, sont données les impédances et les admittances de lignes, exprimées en valeurs réduites dont la base de la puissance apparente égale à 200 MVA.

TABLE. 2 :
PARAMETRES DES LIGNES DU RESEAU ETUDIE

Lignes	Impédance	Susceptance (Y/2)
1-2	0.0256+j0.1581	j0.0334
1-5	0.0368+j0.2273	j0.0480
2-3	0.0384+j0.2372	j0.0501
2-5	0.0480+j0.2965	j0.0626
3-4	0.0384+j0.2372	j0.0501
3-5	0.0320+j0.1977	j0.0417
4-5	0.0416+j0.2570	j0.0542

Dans la table. 3, sont données les valeurs de tension du nœud de référence « nœud 1 », les puissances générées et les puissances de charge dans chaque nœud.

TABLE. 3 :
TENSION NODALE ET LES PUISSANCES DES NŒUDS

Nœuds	Tension nodale (pu)		Puissance générée (pu)		Charge (pu)	
	Amplitude	Phase	P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q(pu)
1	1.05	0°	-	-	0	0
2	-	-	0	0	0.56	0.42
3	-	-	0	0	0.65	0.64
4	-	-	0	0	0.60	0.62
5	1.02	-	0.48	-	0.44	0.31

D'après les valeurs données, on calcule d'abord la matrice admittance Y_{bus} :

10.501∠ - 80.723	6.2405∠99.198	0∠0	0∠0	4.3412∠99.198
6.2405∠99.198	13.585∠ - 80.704	4.1603∠99.198	0∠0	3.3283∠99.198
0∠0	4.1603∠99.198	13.173∠ - 80.704	4.1603∠99.198	4.9924∠99.198
0∠0	0∠0	4.1603∠99.198	7.8977∠ - 80.681	3.8403∠99.198
4.3412∠99.198	3.3283∠99.198	4.9924∠99.198	3.8403∠99.198	16.298∠ - 80.686

Il s'agit de calculer la tension aux nœuds 2, 3 et 4, tout en respectant les normes de tension (une précision qui ne dépasse pas 5% au tour de 1 pu).

On suppose des valeurs primaires des tensions : $V_2; V_3$ et V_4

La tension au nœud «1» est imposée à 1,05 pu, avec l'angle qu'on choisi $\delta_1 = 0$

Ces valeurs sont regroupées dans la table. 4 :

TABLE. 4 :
VALEURS DE TENSIONS AUX DIFFERENTS NŒUDS

Tension (pu)	Module (pu)	Phase δ
V_1	1.05	0°
V_2	0.95	-13.5°
V_3	0.95	-13.5°
V_4	0.95	-13.5°
V_5	1.02	0°

Le calcul itératif se base sur l'équation (22).

Tel que :

$$V_2^{(1)} = \frac{1}{y_{22}} \left[\frac{P_2 - jQ_2}{(V_2^{(0)})^*} - y_{12} V_1 - y_{32} V_3 - y_{42} V_4 - y_{52} V_5 \right]$$

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ_3}{(V_3^{(0)})^*} - y_{13} V_1 - y_{23} V_2 - y_{43} V_4 - y_{53} V_5 \right]$$

$$V_4^{(1)} = \frac{1}{y_{44}} \left[\frac{P_4 - jQ_4}{(V_4^{(0)})^*} - y_{14} V_1 - y_{24} V_2 - y_{34} V_3 - y_{54} V_5 \right]$$

On calcul ΔV après chaque itération en utilisant l'expression (20).

$$\varepsilon = 10^{-5}$$

La condition est vérifiée à la 19^{ème} itération (satisfaction du critère d'arrêt).

Les tensions calculées sont données à la Table. 5 comme suit :

TABLE. 5 :
VALEURS DE TENSIONS AUX DIFFERENTS
NŒUDS APRES 19 ITERATIONS

Tension (pu)	Module (pu)	Phase δ
V_1	1.05	0°
V_2	0.96	-8.61°
V_3	0.89	-14.26°
V_4	0.86	-16.53°
V_5	1.02	-10.09°

Les puissances injectées sont déterminées par les équations (13) et (14).

TABLE. 6 :
PUISSANCES AUX DIFFERENTS NŒUDS

Nœuds	Puissance générée (pu)		Puissance injectée (pu)		Charge (pu)	
	P(MW)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q(pu)
1	1.8739	0.4775	1.8739	0.4775	0	0
2	0	0	-0.56	-0.42	0.56	0.42
3	0	0	-0.65	-0.64	0.65	0.64
4	0	0	-0.60	-0.62	0.60	0.62
5	0.48	1.527	0.04	1.217	0.44	0.31

TABLE. 7 :
PERTES TOTALES DANS LES LIGNES

Pertes actives (pu)	Pertes réactives (pu)
0.1039	0.0145

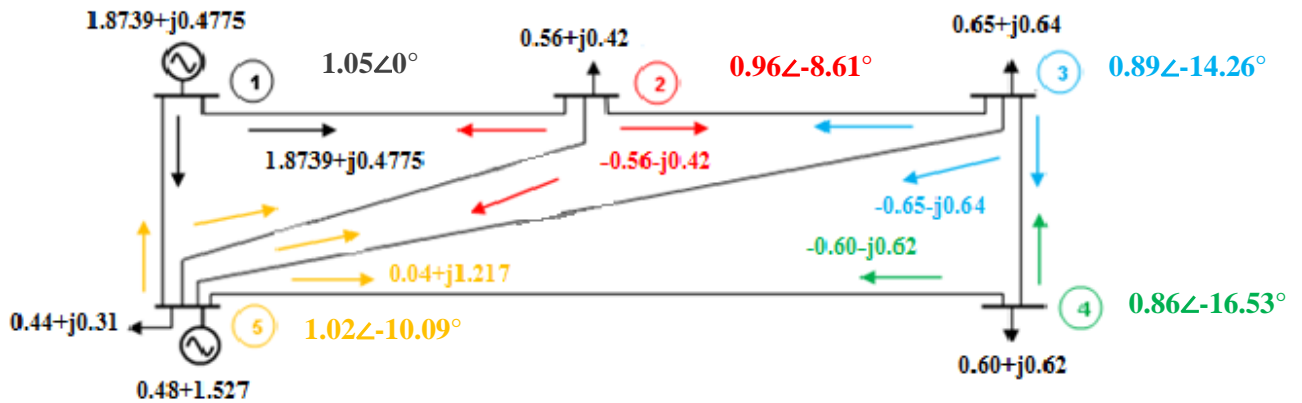


Figure 6 : Résultats de calcul par la méthode de Gauss Seidel

Les valeurs de tensions nodales $|V_3|$ et $|V_4|$ obtenues après 19 itérations sont refusées d'après la norme imposée (limite tolérée $0.95 < V < 1.05$). A cette situation il est impératif d'insérer des batteries de condensateur à fin de remonter les valeurs de tensions. A ce stade les puissances réactives injectées deviennent inconnues relativement au calcul précédent.

On pose : $V_3 = 0.98 \angle -10^\circ$ Pu et $V_4 = 0.98 \angle -10^\circ$ Pu

Les puissances réactives injectées sont calculées en utilisant la formule suivante :

$$V_3^{(1)} = \frac{1}{y_{33}} \left[\frac{P_3 - jQ'_3}{(V_3^{(0)})^*} - y_{13} V_1 - y_{23} V_2 - y_{43} V_4 - y_{53} V_5 \right]$$

$$V_4^{(1)} = \frac{1}{y_{44}} \left[\frac{P_4 - jQ'_4}{(V_4^{(0)})^*} - y_{14} V_1 - y_{24} V_2 - y_{34} V_3 - y_{54} V_5 \right] \quad (23)$$

D'où

$$Q'_3 = Q_3 + Q_{c3} \quad (24)$$

$$Q'_4 = Q_4 + Q_{c4} \quad (25)$$

Tel que :

TABLE. 8 :
VALEURS DES TENSIONS AUX DIFFERENTS
NŒUDS APRES LA COMPENSATION

Tension (Pu)	Module (pu)	Phase δ
V ₁	1.05	0°
V ₂	0.99	-8.6°
V ₃	0.98	-14.17
V ₄	0.98	-16.31
V ₅	1.02	-9.7

TABLE. 9 :
PUISSANCES AUX DIFFERENTS NŒUDS APRES LA COMPENSATION

Nœuds	Puissance générée (pu)		Puissance injectée (pu)		Charge (pu)	
	P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q (pu)	P (pu)	Q(pu)
1	1.8411	0.3045	1.8411	0.3045	0	0
2	0	0	-0.56	-0.42	0.56	0.42
3	0	0.4153	-0.65	-0.2247	0.65	0.64
4	0	0.4928	-0.60	-0.1272	0.60	0.62
5	0.48	0.5386	0.04	0.2288	0.44	0.31

TABLE. 10 :
PERTES TOTALES DANS LES LIGNES APRES COMPENSATION

Pertes actives (pu)	Pertes réactives (pu)
0.071117	-0.23866

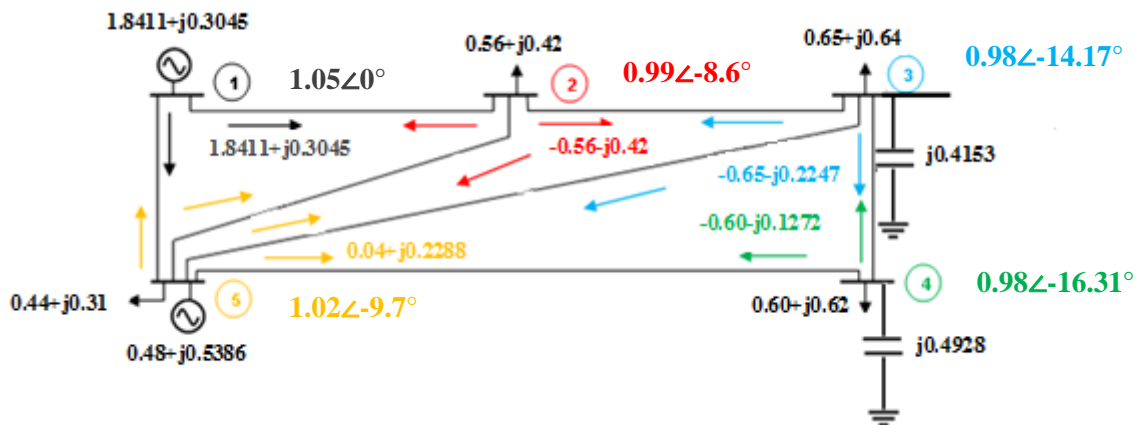


Figure 7 : Résultats de calcul par la méthode de Gauss Seidel après compensation

III-6.6_ Interprétation des résultats

Le calcul de l'écoulement de puissance a été exécuté dans le but de trouver les puissances que doivent générer les nœuds de production pour que chaque nœud du réseau reçoive une tension normalisée et une puissance qu'il la désire.

Le premier calcul a donné une satisfaction selon les puissances, mais selon la contrainte de tension, deux nœuds n'ont pas eu la tension normalisée, cela est pour la seule raison, c'est que le nœud de génération ont été limité en tension (nœuds 1 et 5). A cet effet, une compensation de l'énergie réactive au niveau des nœuds (3 & 4) devienne d'une nécessité incontournable.

Le deuxième calcul, a donné une satisfaction au niveau de tous les nœuds, malheureusement, l'énergie réactive injectée sur le réseau devient négative.

III-7_ CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons analysé le problème de l'écoulement de puissance d'une manière détaillée dans sa première partie, toutes les équations de l'écoulement de puissance sont ainsi abordées, des schémas unifilaires simplifiés ont été introduits afin de mieux représenter l'ensemble des éléments de notre réseau électrique (générateurs, lignes, charges électrique ... etc.), dans la deuxième partie, la solution du problème d'écoulement de puissance en utilisant une méthode numérique. la méthode de Gauss Seidel utilise la matrice d'admittance nodale Y_{Bus} , car elle est facile à générer et l'effort de sa programmation est modeste. A ce jour cette méthode est utilisée quand la taille du système n'est pas très grande. La solution du problème de l'écoulement de puissance fournit des informations de base utiles au sujet des performances électriques du système de puissance. Le planificateur de ce système peut facilement évaluer l'impact des différentes configurations de transmission et de

génération pour n'importe quel niveau de charge désiré. L'opérateur de système de l'écoulement de puissance peut évaluer l'effet de modifier le système (comme commuter une ligne, changeant un résultat de générateur, etc.) sur un logiciel d'exploitation avant qu'une telle mesure soit prise réellement.

A pencil sketch of a lightbulb, oriented horizontally. The bulb is shaded with light and dark pencil strokes to give it a three-dimensional appearance. The text "Conclusion Générale" is written in a black, italicized serif font across the middle of the bulb's body. The base of the bulb, showing the screw threads, is on the right side.

*Conclusion
Générale*

CONCLUSION GENERALE

La gestion d'un réseau de production, distribution d'énergie est devenue un enjeu tant économique que technique. Pour garantir une bonne conduite des réseaux qui se présentent généralement sous forme complexe, plusieurs contraintes doivent être prises en considération telle que les limites de transits de puissance, des tensions, puissances active et réactive. Il apparait donc la nécessité d'optimiser cette gestion afin de maximiser le profit de fonctionnement du réseau tout en respectant les contraintes imposées.

L'importance de l'étude de la répartition des puissances dans un réseau est capitale, elle nécessite l'élaboration d'une méthode de calcul numérique plus stable et efficace afin de répondre à ce besoin. Dans le présent travail, notre première préoccupation était de trouver une méthode numérique qui permet de résoudre le problème d'optimisation de la répartition des puissances. On peut remarquer aussi que toutes les étapes décrites, sont faciles à suivre, et les outils essentiels utilisés pour sa réalisation sont les méthodes numériques et informatiques. Les ordinateurs ont été conçus pour être capables de faire des calculs numériques très rapidement, nous déchargeons ainsi de la tâche fastidieuse de les effectuer à la main.

Le choix de la méthode a été porté sur la méthode de Gauss-Seidel pour le calcul de l'écoulement de puissances.

Deux démarches ont fait l'objet de notre étude :

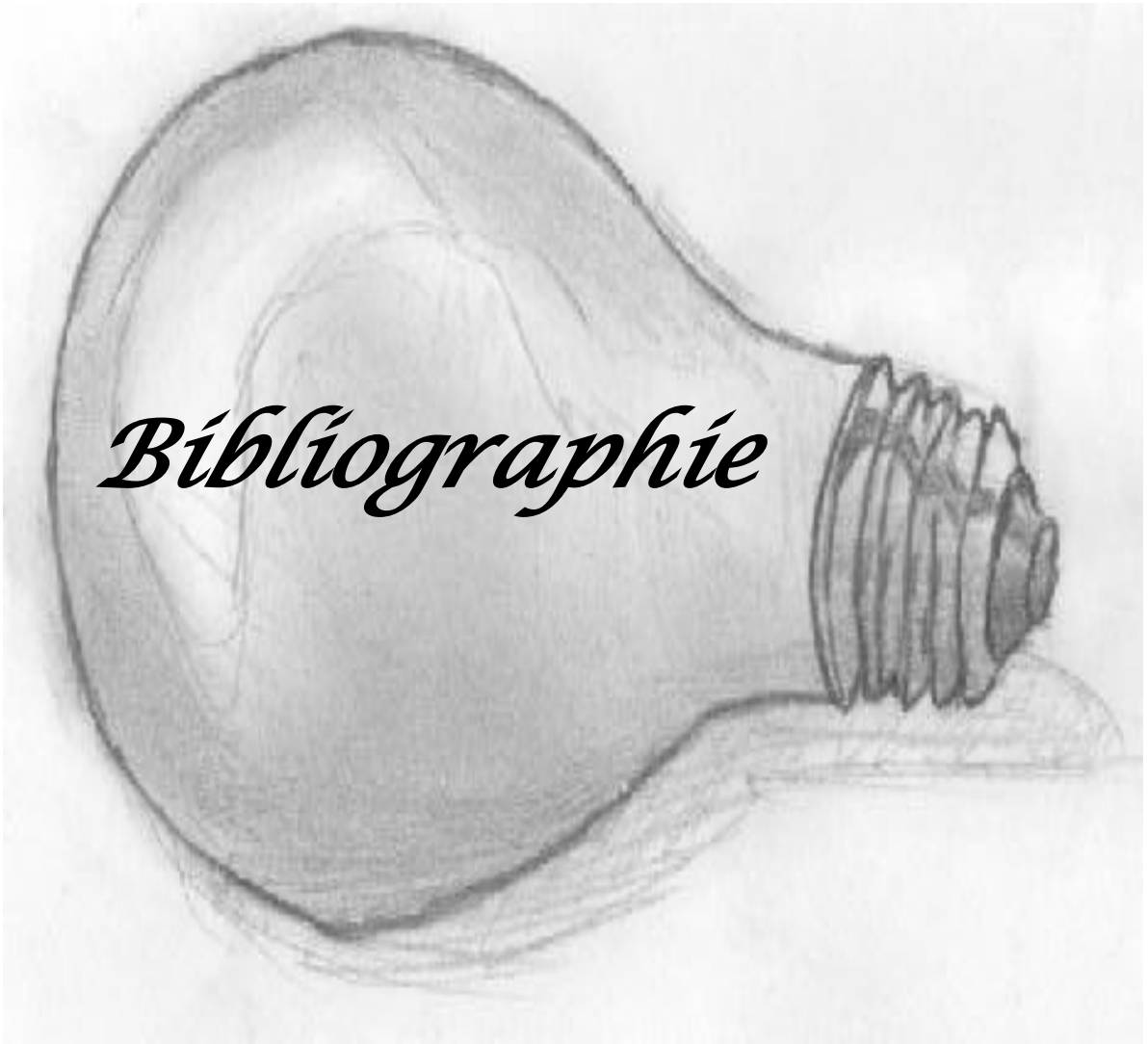
- La première fait appel à des fonctions implicites exprimant une variable en fonction des autres. Dans notre étude la variable étant les puissances actives et réactives générées par le nœud de référence. Elle permet de déterminer la répartition économique selon le coût du combustible.
- La deuxième nous permet de déterminer la répartition des puissances réactives selon le critère de minimisation des pertes actives.

Ces dernières ont été illustrés par une application dans un réseau à 5 nœuds, les résultats obtenus sont très satisfaisants et confirment bien la validité et l'efficacité de la méthode. De plus les valeurs trouvées se situent dans le domaine délimité par les contraintes fonctionnelles du réseau.

La compensation d'énergie réactive est également une question importante dans la mesure où elle fait l'objet de facturation de la part du gestionnaire de réseau.

L'optimisation des réseaux électriques restera toujours une recherche à la portée des électrotechniciens et toute personne spécialisée dans le domaine génie électrique.

Nous espérons que le résultat de notre travail sera d'un apport modeste, certes, mais néanmoins utile pour les prochaines recherches en vue d'aboutir à une meilleure maîtrise de cette technique.



Bibliographie

Bibliographie

- [1] Théodor Wildi. « Electrotechnique 3^{ème} édition », 2000.
- [2] Bensalem Ahmed. « Analyse et gestion de la production des centrales électriques liées aux réseaux électrique de grande taille. » Thèse de doctorat d'état, Université de El-Hadj Lakhdar Batna, 28 juin 2007.
- [3] Commission européenne. « Grandes installations de combustion. » Juillet 2006.
- [4] Fatah Amir. « Etude du fonctionnement des centres de production dans un système de marché libre de l'énergie électrique. » Thèse de magister en électrotechnique. Université de Batna, 2011/2012.
- [5] GE lycée Guillaume Apollinaire. Production, Transport et Distribution de l'énergie électrique. 2008/2009.
- [6] Prof.VSD Blanchard. Cours –document « PRODUCTION ÉLECTRIQUE.» 2013.
- [7] Bapio Bayala. « Machines électriques. » Formation continue– Techniciens Supérieurs Ingénieurs Electrotechniciens.
- [8] Conversion électromécanique d'énergie -cour CEB-3- .
- [9] Claude Chevassu. « Réseau national de ressources -électrotechnique-couplage des alternateurs. »
- [10] Delendi Louardi. « Contrôle de l'écoulement de puissance active par système FACTS. » Thèse de magister en électrotechnique, Université de El-Hadj Lakhdar, Batna, 26 juin 2009.
- [11] Khaled Alcheikh-Hamoud. « Modélisation des grands systèmes électriques interconnectés.» Engineering Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, French, 2010.
- [12] Régie d'électricité de Thônes « Description physique du réseau. », VI-09/01/2008.
- [13] Miguel Angel Fontela Garcia. « Interaction des réseaux de transport et de distribution en présence de production décentralisée. » Engineering sciences. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, French, 2008.
- [14] « Qualité de la tension des réseaux de distribution électrique : Estimations des proportions d'utilisateurs mal desservis. » Journées de Méthodologie Statistique – mars 2009.

- [15] Slimene Majdi. « Rapport de stage. » Ecole Nationale D'ingénieurs de SFAX.
- [16] Kraimia Mohamed Nassim. « Optimisation du coût de production des réseaux interconnectés. » Thèse de magister en électrotechnique. Université de Batna, 2010/2011.
- [17] M. BOUDOUR, A. HELLAL. « Réseau Electrique et concepts de base.», ISBN 978-9947-850-70-10 ,2010.
- [18] Souhil Mouassa. « Optimisation de l'écoulement de puissance par une méthode métaheuristique (technique des abeilles) en présence d'une source renouvelable (éolienne) et des dispositifs FACTS. »Thèse de magister en électrotechnique. Université Ferhat ABBAS SETIF, 2012.
- [19] Zehani Rim. « Contribution à l'analyse des méthodes de répartition optimale des puissances dans un réseau de transport d'énergie. » Thèse de magister en électromécanique. Université BADJI MOKHTAR-ANNABA-, 2007.
- [20] Ladjeroud Rafik. « Protection adaptive par relais à minimum d'impédance. »Thèse de magister en génie électrique. Université M'HMED BOUGARA faculté des hydrocarbures et de la chimie, 2005.
- [21] Mac Graw Hill. « Théories des systèmes électro-énergétiques ».ISBN :07084257-4-
- [22] Seddiki Zahira. « Optimisation de l'écoulement de puissances dans un système d'énergie électrique par la méthode de du point intérieur. » Thèse de magister en électromécanique. Université BADJI MOKHTAR-ANNABA-, 2007.



*Liste des
Abréviations*

Liste des abréviations

Abréviations	Significations
U.R.S.S	Union des républiques socialistes soviétiques
BP	Basse pression
HP	Haute pression
BT	Basse tension
MT	Moyenne tension
HT	Haute tension
HTA	Haute tension catégorie A
HTB	Haute tension catégorie B
THT	Très haute tension
g	Constante gravitationnelle
h	Hauteur
V_m	Vitesse maximale du jet
T	Moment du couple mécanique
Ω	Vitesse angulaire
V	Tension
V_{min}	Tension minimale
V_{max}	Tension maximale
I	Courant
I_c	Courant continu
I_x	Courant inducteur
V_1, V_2, V_3	Tensions du réseau
E_1, E_2, E_3	Tensions d'alternateur
K_1, K_2, K_3	Interrupteurs
C.C	Courant continu
MS	Machine synchrone
V_{1n}	Tension primaire du transformateur
V_{2n}	Tension secondaire du transformateur
V_S	Tension de la source
V_R	Tension de la réception
ΔV	Chute de tension
I_C	Courant capacitif
I_R	Courant résistif
I_L	Courant inductif
X_T	Réactance du transformateur
X_L	Réactance inductive de la ligne
X_C	Réactance capacitive de la ligne
R	Résistance
N	Pôle Nord
S	Pôle Sud
V	Volt
kV	Kilovolt
kV/cm	Kilovolt par centimètre
W	Watt
MW	Mégawatt
MVA	Méga voltampère

MVA _r	Méga voltampère réactif
m	Mètre
km	Kilomètre
m ³ /s	Mètre au cube par seconde
l/s	Litre par seconde
Tr/min	Toures par minute
cos	Cosinus
sin	Sinus
°C	Degré Celsius
Hz	Hertz
φ _S	Déphasage de la source
φ _R	Déphasage de la réception
OPF	Optimisation of Power flow
P	Puissance active
P _{min}	Puissance active minimale
P _{max}	Puissance active maximale
P _{Gi}	Puissance active générée au nœud i
P _i	Puissance active injectée du nœud i
P _{Chi}	Puissance active de charge du nœud i
Q	Puissance réactive
Q _{min}	Puissance réactive minimale
Q _{max}	Puissance réactive maximale
Q _{Gi}	Puissance réactive générée au nœud i
Q _i	Puissance réactive injectée du nœud i
Q _{Chi}	Puissance réactive de charge du nœud i
S	Puissance apparente
S _i	Puissance apparente injectée du nœud i
S _{Gi}	Puissance apparente générée au nœud i
S _{Chi}	Puissance apparente de charge du nœud i
pu	Per unit (unité relative)
GS	Gauss Seidel
EP	Ecoulement de puissance
Y	Admittance
Y _{Bus}	Matrice d'admittance
I _{Bus}	Vecteur des courants
V _{Bus}	Vecteur des tensions
G	Générateur
Ω	Ohm
i,j	Jeux de barres
δ _i	Phase de tension au nœud i
V _i	Module de tension au nœud i
V _i	Tension au nœud i
S _i [*]	Conjugué de la puissance apparente au nœud i
I _i [*]	Conjugué du courant au nœud i
V _i [*]	Conjugué de la tension au nœud i
ε	Epsilon critère d'arrêt

Résumé

La répartition des puissances est l'un des principaux problèmes qui se pose aux gestionnaires d'un système de production-transport d'énergie électrique. Il faut déterminer la répartition des puissances fournies par les centrales électriques alimentant un ensemble de consommateurs par l'intermédiaire d'un réseau bouclé, à un instant, donné tout en respectant des contraintes techniques et économiques.

On propose dans ce travail l'application d'une méthode numérique qui peut trouver des solutions optimales pour la répartition des puissances dans les systèmes électriques appelée la méthode de GAUSS SEIDEL. Les résultats obtenus montrent que cette méthode possède une grande flexibilité pour le traitement des problèmes très complexes et des contraintes multi objectifs.

Mots clés : Ecoulement de puissance, Compensation de la puissance réactive, Gauss Seidel.

المخلص

يعتبر توزيع القدرات في الشبكات الكهربائية واحدا من المشاكل الأساسية التي يمكن لشركات إنتاج و نقل الطاقة الكهربائية مواجهتها.

يجب تحديد توزيع القدرات المنتجة من طرف محطات توليد الكهرباء المغذية لمجموعة من المستهلكين عن طريق شبكة نقل حلقة، في زمن معين، وذلك من خلال الالتزام بقيود تقنية و اقتصادية.

نقترح في هذا العمل تطبيق لطريقة عددية التي يمكنها إيجاد الحلول المثلى لتوزيع القدرات في أنظمة الطاقة المسماة بطريقة جوس سايدل. أظهرت النتائج أن هذه الطريقة لها قدرة كبيرة من المرونة لمعالجة المشاكل المعقدة والقيود ذات الأهداف المتعددة.

الكلمات المفتاحية: فيض القدرة، تعويض القدرة المفاعلة، جوس سايدل.

Abstract

Power distribution is one of the main problems facing the managers of a production system-power transmission.

We must determine the distribution of powers supplied by the electrical production centers which provide a set of consumers via a looped network at a time, and that's by maintaining the technical and economic constraints.

It is proposed in this work applying a numerical method that can find optimal solutions for the distribution of powers in electrical systems called the method of Gauss SEIDEL. The results show that this method has great flexibility for handling complex problems and constraints multi goals.

Keywords: Power flow, Reactive power compensation, Gauss Seidel.