

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane MIRA de Bejaia



Faculté de Technologie  
Département de Génie Electrique



# Memoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en électrotechnique  
Option : Réseaux électriques

## Thème

*Contribution à la planification  
de l'énergie réactive dans les  
réseaux de transport*

Soutenue le : 06 / 10 / 2021

**Préparé par :**

Mr. ANKIK LYES

Mr. NADOUR TOUFIK

**Devant le jury composé de :**

Mr : A. BOUZIDI      Encadreur

Mme : AOUZELLAG    Présidente

Mme : Zidane        Examinatrice

Année Universitaire : 2020/2021

# Remerciements

*Nous remercions en premier lieu « Allah » pour nous Avoir donné la force, le courage et la volonté Nécessaire pour réaliser ce travail.*

*Nous exprimons nos profonds remerciements et tous nos respects pour nos très chers parents, qui nous ont éduqués, encadré et soutenu par tous les moyens, jours après jours, depuis notre naissance jusqu'à ce jour-là. Nos sincères remerciements pour notre promoteur Mr A. BOUZIDI pour ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du travail.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail en acceptant d'examiner notre mémoire et de l'enrichir par leurs recommandations.*

*Nos remerciements vont également à tous les Personnes qui de loin ou de près ont contribué à la réalisation de ce modeste travail.*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*A mon père*

*À l'être la plus chers à mon cœur,*

*Ma mère, qui a toujours cru en moi et  
encouragées.*

*A ma sœur SONIA*

*A ma nièce DINA*

*A mes Frères : AZDINE et BILLAL*

*A toute ma famille*

*A mes chers amis et collègues et en  
particulier mes copains de chambre de J501*

*SAID et RIAD*

*A la fin je dédier chaleureusement ce mémoire à  
mon binôme LYÉS*

*NADOUR*

*TOUFIK*

# *Dédicaces*

*Je dédie ce modeste travail*

*À mon père*

*À l'être la plus chers à mon cœur,*

*Ma mère, qui a toujours cru en moi et  
encouragées.*

*À mes chères sœurs SYLIA ET NAWEL*

*À mes deux anges ALICE et MOUHAMED*

*À mes chères cousins et cousines*

*À toute ma famille*

*À mes chers amis et collègues et en  
particulier mes copains de chambre de J501*

*RIAD ET SAID*

*À la fin je dédier chaleureusement ce mémoire à  
mon binôme Toufik et ma bien aimé Siham*

*ANKIK*

*LYES*

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau I.1. Domaine de tension  | 09 |
| Tableau I.2. Puissance, rendement et durée de vie de quelques centrales  | 17 |
| Tableau I.3. Coût de revient d'un MWh pour certains équipements.   | 18 |
| Tableau I.4. Surface occupée par les différentes centrales   | 18 |
| Tableau I.5. Disponibilité des différents systèmes.  | 19 |
| Tableau I.6. Centrales de production nationale et leurs capacités.   | 19 |
| Tableau V.1. Données des lignes  | 65 |
| Tableau V.2. Données des accès   | 65 |
| Tableau V.3. Les performances de la tension  | 69 |
| Tableau V.4. Les puissances transitant dans les lignes   | 69 |
| Tableau V.5. Résultats dans le cas sans compensation avec la contingence (N-1)                                       | 70 |
| Tableau V.6. Profil et stabilité de tension dans le cas de compensation 0.5pu accès 7 sans contingence               | 72 |
| Tableau V.7. Les performances de la tension avec 0.5 (pu) a l'accès 7 sans contingences                              | 72 |
| Tableau V.8. Les puissances transitant dans les lignes avec 0.5 (pu) a l'accès 7 sans contingence                    | 73 |
| Tableau V.9. Résultats dans la condition N-1(contingence) avec compensation 0.5pu                                    | 74 |
| Tableau V.10. Profil et stabilité de tension avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1                               | 75 |
| Tableau V.11. Les performances de la tension avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1                               | 75 |
| Tableau V.12. Les puissances transitant dans les lignes avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1                    | 76 |
| Tableau V.13. Résultats dans la condition N-1(contingence) avec compensation 0.5 pu accès 7 et 0.5 (pu) accès 1      | 76 |
| Tableau V.14. Coût et pertes des systèmes dans le cas de compensation avec 0.5 et 0.5 (pu)                           | 78 |
| Tableau V.15. Coût et pertes des system dans le cas de compensation avec 0.5 et 0.4 (pu)                             | 78 |
| Tableau V.16. Les performances de la tension avec une compensation dynamique de 0.4 (pu) accès 7 et 0.3 (pu) accès 1 | 79 |
| Tableau V.17. Coût et pertes des system dans le cas de compensation avec 0.3 et 0.4 (pu)                             | 79 |

## Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.1.</b> Schéma d'un réseau électrique  | 05 |
| <b>Figure I.2.</b> Structure des réseaux de transport et de distribution (schéma unifilaire)                        | 05 |
| <b>Figure I.3.</b> Ligne aérienne   | 07 |
| <b>Figure I.4.</b> Lignes électriques sous terre  | 08 |
| <b>Figure I.5.</b> Câble électrique sous terrain  | 08 |
| <b>Figure I.6.</b> Fréquences normalisées et tensions domestiques mondiales   | 08 |
| <b>Figure I.7.</b> Topologies des réseaux électriques   | 10 |
| <b>Figure I.8.</b> Centrale thermique à flamme  | 11 |
| <b>Figure I.9.</b> Principe d'une centrale nucléaire  | 12 |
| <b>Figure I.10.</b> Principe d'une centrale diesel  | 13 |
| <b>Figure I.11.</b> Principe d'une centrale hydraulique   | 14 |
| <b>Figure I.12.</b> Centrale solaire photovoltaïque   | 14 |
| <b>Figure I.13.</b> Centrales solaires thermiques   | 15 |
| <b>Figure I.14.</b> Principe d'une éolienne   | 15 |
| <b>Figure I.15.</b> La biomasse   | 16 |
| <b>Figure I.16.</b> Énergie géothermique  | 16 |
| <b>Figure II.1.</b> Creux de tension et coupure brève   | 26 |
| <b>Figure II.2.</b> Exemple de variations rapides de la tension   | 27 |
| <b>Figure II.3.</b> Déséquilibre de tension   | 28 |
| <b>Figure II.4.</b> Exemple de fluctuation de la fréquence  | 28 |
| <b>Figure II.5.</b> Tension distordue à partir des harmoniques  | 29 |
| <b>Figure III.1.</b> Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation              | 38 |
| <b>Figure III.2.</b> Influence de la puissance réactive   | 39 |
| <b>Figure III.3.</b> Principe de la compensation d'énergie réactive   | 39 |
| <b>Figure III.4.</b> Compensation individuelle  | 40 |
| <b>Figure III.5.</b> Compensation par groupe  | 41 |
| <b>Figure III.6.</b> Compensation globale centralisée   | 41 |
| <b>Figure III.7.</b> Installation série   | 42 |
| <b>Figure III.8.</b> Installation shunt   | 43 |
| <b>Figure III.9.</b> Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie  | 46 |
| <b>Figure IV.1.</b> Courbe P-V  | 53 |
| <b>Figure IV.2.</b> Courbe Q-V  | 53 |
| <b>Figure V.1.</b> Structure du réseau étudié   | 64 |
| <b>Figure V.2.</b> Organigramme de simulation   | 68 |
| <b>Figure V.3.</b> Courbe de charge pour le cas sans contingence et sa compensation                                 | 70 |
| <b>Figure V.4.</b> Courbes de charge pour le cas sans compensation avec contingence                                 | 71 |
| <b>Figure V.5.</b> Courbe de charge pour le cas de compensation avec 0.5(pu) dans l'accès 7 sans contingence        | 73 |
| <b>Figure V.6.</b> Courbes de charge pour le cas avec compensation de 0.5(pu) dans l'accès 7 avec contingence       | 74 |
| <b>Figure V.7.</b> Courbe de charge pour le cas de compensation avec 0.5(pu) dans l'accès 7 et 1 sans contingence   | 76 |
| <b>Figure V.8.</b> Courbes de charge pour le cas avec contingence et avec compensation de 0.5pu dans l'accès 7 et 1 | 77 |

---

## Sommaire

|   |    |
|---|----|
| Liste des tableaux .....                                    | 1  |
| Liste des figures .....                                     | 2  |
| Introduction générale.....                                  | 1  |
| Chapitre I. Généralités sur l'énergie électriques .....     | 3  |
| I.1. Introduction : .....                                   | 3  |
| I.2 Origine et histoire.....                                | 4  |
| I.3. Définition de l'électricité .....                      | 4  |
| I.4. Description des réseaux électrique : .....             | 5  |
| I.5. Structure générale des réseaux électriques.....        | 5  |
| I.5.1. Production .....                                     | 6  |
| I.5.2. Transport .....                                      | 6  |
| I.5.3. Distribution .....                                   | 6  |
| I.5.4. Consommation .....                                   | 6  |
| I.6. Lignes électriques.....                                | 6  |
| I.6.1. Ligne aérienne .....                                 | 6  |
| I.6.2. Les lignes souterraines .....                        | 7  |
| I.7. Caractéristique générale des réseaux électriques ..... | 8  |
| I.7.1. Fréquence .....                                      | 8  |
| I.7.2. Domaine de tension.....                              | 9  |
| I.7.3. Type de couplage .....                               | 9  |
| I.8. Topologies des réseaux électriques .....               | 9  |
| I.8.1. Réseau maillé .....                                  | 10 |
| I.8.2. Réseau radial .....                                  | 10 |
| I.8.3. Réseau arborescent.....                              | 10 |
| 1.8.4. Réseaux bouclée .....                                | 10 |
| I.9. Production d'énergie électrique .....                  | 11 |
| I.9.1. Energies fossiles.....                               | 11 |
| I.9.2. Energies Renouvelable.....                           | 12 |
| 1.10. Caractéristiques des centrales de production.....     | 15 |
| 1.10.1. Puissance fournit .....                             | 15 |

---

|   |    |
|---|----|
| 1.10.2. Rendement .....   | 15 |
| 1.10.3. Durée de vie.....   | 16 |
| I.10.4. Coût de production .....  | 16 |
| 1.10.5. Surface exigée.....   | 17 |
| I.10.6. Disponibilité .....   | 17 |
| I.10.7. Emission du CO2 .....   | 17 |
| I.11. Capacité de production et potentialités en énergie électrique .....             | 17 |
| I.12. Conclusion.....   | 20 |
| Chapitre II. Prévision et Planification des Réseaux Electriques .....                 | 21 |
| II.1. Introduction.....   | 21 |
| II.2. Qualité de la tension.....  | 21 |
| II.2.1. Amplitude .....   | 21 |
| II.2.2. Fréquence.....  | 21 |
| II.2.3. La forme d'onde.....  | 22 |
| II.2.4. Symétrie .....  | 22 |
| II.3. Réglage de tension .....  | 22 |
| II.3.1. Réglage de tension primaire (les premières secondes après perturbation) ..... | 22 |
| II.3.2. Le réglage secondaire de la tension .....                                     | 23 |
| II.3.3. Le réglage tertiaire de tension.....  | 23 |
| II.4. Dégradation de la qualité de tension.....                                       | 23 |
| II.4.1. Chute de tension.....   | 23 |
| II.4.2. Bosse de tension.....   | 24 |
| II.4.3. Creux de tension .....  | 24 |
| II.4.4. Variation lente de tension .....  | 25 |
| II.4.5. Variation ou fluctuation rapide de tension (FLIKER) .....                     | 25 |
| II.4.6. Déséquilibre de tension.....  | 25 |
| II.4.7. Variation ou fluctuation de fréquence .....                                   | 26 |
| II.4.8. Harmoniques .....   | 26 |
| II.5. Prévision des systèmes électrique .....   | 27 |
| II.5.1. Définition .....  | 27 |
| II.5.2. Horizon de prévision.....   | 28 |



---

|   |    |
|---|----|
| II.5.3. Méthodes de prévisions .....  | 28 |
| II.5.4. Caractéristiques de prévision .....                                   | 29 |
| II.5.5. Prévision de la consommation .....                                    | 29 |
| II.5.6. Paramètres influençant la consommation d'électricité .....            | 30 |
| II.6. Planification des réseaux électriques .....                             | 32 |
| II.6.1. Planification des systèmes électriques .....                          | 32 |
| II.6.2. Etapes de planification .....   | 32 |
| II.6.3. Type de planification .....   | 33 |
| II.6.4. Objectifs de planification .....                                      | 34 |
| II.6.5. Horizon de la planification .....                                     | 34 |
| II.7. Conclusion .....  | 35 |
| Chapitre III. Compensation d'énergie réactive .....                           | 36 |
| III.1. Introduction .....   | 36 |
| III.2. Energie Réactive .....   | 36 |
| III.3. Influence de l'énergie réactive .....                                  | 36 |
| III.4. Principe de Compensation de puissance réactive .....                   | 37 |
| III.5. Objectifs de compensation .....  | 37 |
| III.6. Méthodes de compensation de puissance réactive .....                   | 38 |
| III.7. Moyens de compensations de puissance réactive .....                    | 40 |
| III.7.1. Batterie de condensateur .....                                       | 40 |
| III.7.2. Inductances .....  | 42 |
| III.7.3. Compensateur synchrone .....   | 42 |
| III.7.4. Moteur asynchrone synchronisé .....                                  | 42 |
| III.7.5. Groupe thermique et hydraulique .....                                | 42 |
| III.7.6. Compensateurs statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS) ..... | 43 |
| III.8. Conclusion .....   | 48 |
| Chapitre IV. Planification d'énergie réactive .....                           | 49 |
| IV.1. Introduction .....  | 49 |
| IV.2. Variables du problème .....   | 49 |
| IV.2.1. Profil de tension ( $V_{prof}$ ) .....                                | 49 |
| IV.2.2. Stabilité de la tension .....   | 50 |
| IV.2.3. Pertes du système .....   | 51 |

---

|  |    |
|--|----|
| IV.2.4. Coût des ressources d'énergie réactive .....   | 52 |
| IV.3. Fonction objectif.....   | 52 |
| IV.4. Ecoulement de puissances .....   | 53 |
| IV.4.1. Objectif de calcul d'écoulement de puissance.....  | 53 |
| IV.4.2. Classification des variables de l'écoulement de puissance .....  | 53 |
| IV.5. Méthodes de calcul d'écoulement de puissances .....  | 54 |
| IV.5.1. Méthode de Newton-Raphson .....  | 54 |
| IV.5.2. Formulation des équations de la méthode de Newton Raphson.....   | 55 |
| IV.6. Méthodes d'optimisation de la puissance réactive [3] .....   | 56 |
| IV.6.1. Méthodes d'optimisation déterministes .....  | 56 |
| IV.6.2. Méthodes d'optimisations stochastiques .....   | 59 |
| IV.7. Conclusion.....  | 62 |
| ChapitreV. Application et résultats V.1. Topologie des réseaux.....  | 63 |
| V.2. Description du problème.....  | 65 |
| V.3. Programme de simulation .....   | 66 |
| V.3.1. Organigramme de simulation .....  | 67 |
| V.4. Eventualité et scénarios .....  | 67 |
| V.5. Résultats et interprétation .....   | 67 |
| V.5.1. Etude du réseau sans compensation.....  | 68 |
| V.5.2 Etude du réseau avec une compensation statique 0.5 (pu) dans l'accès 7.....                                    | 71 |
| V.5.3. Etude du réseau avec une Compensation statique avec 0.5 (pu) dans l'accès 7 et 1<br>.....                     | 74 |
| V.5.4. Etude du réseau avec une Compensation dynamique de 0.5 (pu) dans l'accès 1 et<br>0.4 (pu) dans l'accès 7..... | 78 |
| V.5.5. Etude du réseau avec une Compensation dynamique de 0.3 (pu) dans l'accès 1 et<br>0.4 (pu) dans l'accès 7..... | 79 |
| V.6. Conclusion .....  | 80 |
| Conclusion générale .....  | 81 |
| Références bibliographiques .....  | 83 |
| Résumé .....   | 86 |

## Nomenclatures

$V_{\text{prof}}$  : L'indice de performance de la tension.

$P_{\text{loss}}$  : Pertes du système

$P_{\text{cost}}$  : Coût engendré par l'installation des ressources énergétiques réactives

$P_{\text{stab}}$  : L'indice de stabilité de la tension

$V_i$  : Grandeur de tension de l'accès  $i$ .

$V_i^{\text{set}}$  : Tension de référence de l'accès  $i$ .

$V_m^s$  : Pertes du système.

$V_m^r$  : Grandeurs de tension d'émission et de réception de la ligne  $m$ .

$\varphi_m$  : Différence d'angle de phase de la ligne  $m$ .

$g_m$  : La conductance.

Nb : Nombre de lignes.

$C_{fi}$  : Coût d'installation fixe de la ressource de puissance réactive de l'accès  $i$ .

$C_{vi}$  : Coût variable (par kVAr) de la ressource de la puissance réactive de l'accès  $i$  (le coût d'investissement).

$Q_i$  : Capacité de la ressource de la puissance réactive de l'accès  $i$ .

Nc : Nombre total de points d'allocation des ressources de la puissance réactive.

PQ : Accès charge

PV : Accès générateur

Slack bus : Accès bilan

Jdb : Jeu de barre

Nl : L'accès départ.

Nr : L'accès final.

R : Résistance de la ligne.

X : Réactance de la ligne.

L : Longueur de la ligne.

Na : Numéro de l'accès.

Ta : Type de l'accès.

$|V|$  : Amplitude de la tension des accès.

Angle : Le déphasage de la tension.

Pli : La puissance active de la charge à l'accès i.

Qli : La puissance réactive de la charge à l'accès i.

Pgi : La puissance active des générateurs à l'accès i

Qgi : La puissance réactive des générateurs à l'accès i.

Qimin : La puissance réactive minimale à l'accès i.

Qmax : La puissance réactive maximale à l'accès i.

Qinj : La puissance réactive injecté à l'accès i.

Cfi : Coût fixe des ressources réactive

Cvi : Coût variable des ressources réactive

ACLF : Alternatif courant load flow

Acpf : Alterntif courant power flow

Ybus : Matrice admittance

## Introduction générale

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, permet de fournir la puissance électrique nécessaire aux différents consommateurs d'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie doit être fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. [1]

Au cours des dernières années à cause des expansions des zones rurales et l'augmentation du facteur démographique, la demande en énergie électrique ne cesse d'augmenter ; en conséquences des contraintes importantes sont imposées vis-à-vis cette augmentation.

Cette forte demande engendre aussi des gros problèmes au niveau des réseaux en terme de stabilité et qualité de tension (La difficulté de maintenir un profil de tension acceptable), Les lignes fonctionnent parfois proches de leurs limites et la sécurité du système ne peut plus être garantie.

Les centrales et les infrastructures existantes n'arrivent pas à combler cette demande ce qui exige des investissements importants de nouvelles centrales, transformateurs et lignes électriques, souvent les structures économiques des pays ne le permet pas de moins à court terme.

La conjugaison de tous ces paramètres fait que le réseau électrique de transport est de plus en plus sollicité

Cette situation a entraîné des recherches intensives pour optimiser l'exploitation des réseaux électriques et tenter d'atteindre les limites thermiques des lignes. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension qui doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, la tension est alors plus basse lorsque le réseau est surchargé en transit de puissance.

De ce fait la compensation par l'énergie réactive dans les réseaux de transport et de distribution répond à ces contraintes et apporte une solution aux problèmes rencontrés par les exploitants et planificateurs de ces systèmes. [2] [3]

La compensation par l'énergie réactive permette d'améliorer le profil des tensions, de réduire le transit de puissance réactive et du courant dans les lignes, de réduire les pertes et d'augmenter la capacité de transit du réseau en terme de puissance active, elle permette aussi d'améliorer la stabilité du réseau.

C'est dans ce contexte que rentre notre travail, il s'agit d'améliorer le profil de la tension et la stabilité d'un réseau électrique. Notre étude portera sur un réseau type de 8 accès comportant 10 lignes, la simulation est élaborée sur un programme réalisé sous MATLAB. Le réseau présente un profil de tension et un indice de stabilité bas, sera étudié au départ sans compensation dans les conditions normales et dans les conditions de contingence (N-1) en relevant à chaque fois l'indice de performance de la tension et l'indice de stabilité. Le réseau sera ensuite étudié avec une compensation statique par la suite dynamique dans les conditions normales et les conditions de contingence (N-1) en relevant les mêmes indices.

Le programme, en utilisant la compensation dynamique, permet une planification de l'énergie réactive en optimisant le coût des ressources de cette dernière, les pertes du système, en maintenant un meilleur comportement en terme de la stabilité et du profil de la tension.

A travers ce travaille on donne un aperçue générale sur les réseaux électriques et la production de l'énergie électrique dans le premier chapitre, puis on va aborder dans le deuxième chapitre la notion de qualité et dégradation de tension et une introduction à la prévision et planification (car tous planification et précédé par une prévision) de manier générale. En entame dans le troisième chapitre avec des généralités sur l'énergie réactive et la compensation de cette dernière, dans le quatrième chapitre on présente notre problème de planification (fonction objectif et ces variable) et la procédure suivie dans notre traitement du problème lié à la planification de l'énergie réactive, le chapitre Cinq sera consacré aux résultats et interprétation.

En fin ce manuscrite se termine avec une conclusion générale.

## Chapitre I. Généralités sur l'énergie électriques

### I.1. Introduction :

L'énergie électrique est un facteur essentiel de développement et de l'évolution des sociétés humaines, que cela soit sur le plan de l'amélioration des conditions de vie ou sur le plan du développement des activités économiques. Le système électrique de puissance est à la base de cette énergie, il fonctionne dans un environnement en évolution continue (charges, puissance de génération, et topologie du réseau). L'augmentation de la dépendance électrique de la société moderne implique des systèmes de puissance exploitables à cent pour cent de leur capacité avec une sûreté maximale. Les réseaux d'électricité ont été conçus dans le but de veiller à la fiabilité de la fourniture de l'énergie électrique. Les réseaux relient entre elles toutes les unités de production cela vise à assurer une fonction de secours en cas de pannes et/ou de défaillances.

L'optimisation et la disponibilité de l'énergie électrique, ainsi que les réseaux, permettent d'acheminer l'énergie produite par des sources délocalisées vers les points de consommation par l'acheminement de l'énergie produite en masse à un endroit défini, cette énergie est produite par des machines raccordées en grande partie aux niveaux de tension supérieurs et transporté vers des consommateurs en général disséminés sur un territoire donné et raccordés à des niveaux de tension inférieurs elles permettant de créer des synergies entre les différents systèmes de production renouvelables (hydraulique, solaire et éolien) et les systèmes thermique ; (classique, nucléaire, géothermal), voire, à terme, profiter d'une gestion coordonnée des faisceaux horaires, etc...

Suite à la libéralisation du secteur électrique, le réseau vise également à remplir un rôle dans la facilitation du marché de l'électricité et à faire en sorte qu'un maximum de transactions commerciales puisse s'exécuter. Dans ce contexte, le réseau doit permettre toute transaction entre différents nœuds du réseau et au-delà des frontières des états.

L'objectif est en effet de permettre à tout utilisateur de choisir librement son fournisseur d'électricité et le type de production sur base de critères qui lui sont propres (prix, qualité du service, électricité verte, ...)

Le but premier d'un réseau d'énergie est de pouvoir satisfaire la demande des consommateurs.

L'énergie électrique ne peut pas encore stocker économiquement et en grande quantité l'énergie électrique, il faut pouvoir maintenir en permanence l'égalité (entre l'énergie produite et celle consommé).

$$\text{Production} = \text{Consommation} + \text{pertes. [4]}$$

## I.2 Origine et histoire

L'électricité a été découverte il y a 26 siècles, Thalès, un savant grec, l'a découvert six (06) siècles avant J.C. en frottant un morceau d'ambre avec un tissu, il a découvert l'électricité statique. Il a fallu des siècles pour comprendre comment la produire. Ce n'est qu'en l'an 1799 que le savant italien Alessandro Volta à découvert le moyen de produire un courant électrique. Il a inventé la première pile électrique composée de disques d'argent et de cuivre séparés par du carton humide.

Arago et Ampère inventent l'électroaimant qui va servir à l'invention du télégraphe pour envoyer des messages en morse. Au 20ème siècle : Pierre et Marie Curie découvraient la radioactivité qui donnera naissance à l'énergie nucléaire. L'électricité a bouleversé notre vie à jamais : l'électricité a connu un développement important pendant le vingtième siècle, dans l'industrie, l'éclairage public et le chemin de fer avant d'entrer dans les foyers. Différents moyens de production de l'électricité sont développés : centrales hydraulique, thermique, éolien, puis nucléaire. [4]

## I.3. Définition de l'électricité

Electricité est un mot provenant du grec électron signifiant ambre jaune. Les anciens Grecs avaient découvert qu'en frottant l'ambre jaune, celui-ci produisait une attirance sur d'autres objets et, parfois des étincelles. Ils ont donc appelé cette force électricité. L'électricité est un phénomène physique dû aux différentes charges électriques de la matière, se manifestant par une énergie. L'électricité désigne la branche de la physique qui étudie les mouvements décharges, les phénomènes électriques et leurs applications. Pour les scientifiques, l'électricité est très liée au magnétisme, ils ont donc créé une discipline, l'électromagnétisme, qui regroupe l'étude des phénomènes électrique et magnétiques.

C'est au cours du 21<sup>ème</sup> siècle que les propriétés de l'électricité ont commencées à être comprises. Sa maîtrise a permis l'avènement de la seconde révolution industrielle.

Aujourd'hui l'énergie électrique est omniprésente : à partir de différentes sources d'énergie (hydraulique, thermique, nucléaire...) l'électricité est de nos jours employée à de très nombreux usages domestiques et industriels. [4]



#### I.4. Description des réseaux électrique :

Les réseaux électriques sont constitués par l'ensemble des appareils destinés à la production, au transport, à la distribution et à l'utilisation de l'électricité depuis les centrales de production jusqu'aux maisons de campagne les plus éloignées figure I.1.

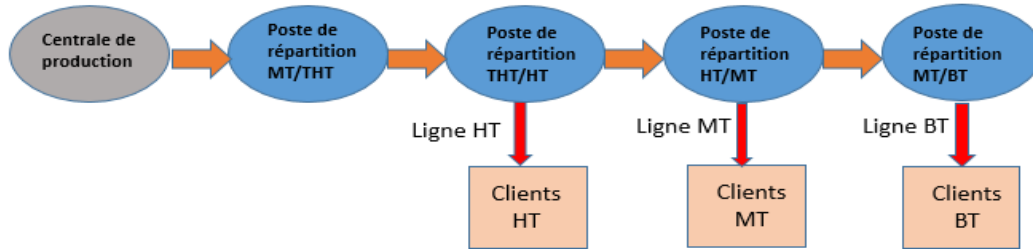


Figure I.1. Schéma d'un réseau électrique

Le réseau de transport est maillé afin que la perte d'un de ses éléments n'interrompe pas la fourniture d'énergie aux consommateurs ou aux réseaux de distribution qui y sont connectés. Ce maillage se retrouve au niveau des interconnexions entre pays qui sont réalisées par des lignes à courant alternatif à très haute tension ou par des liaisons à courant continu. [5]

Ce maillage ne se justifie pas économiquement dans les réseaux de distribution, étant donné le nombre limité de consommateurs touchés par la perte d'une liaison. Ces réseaux fonctionnent donc selon une structure radiale. Ces différentes structures sont schématisées dans la Fig. I. 2.

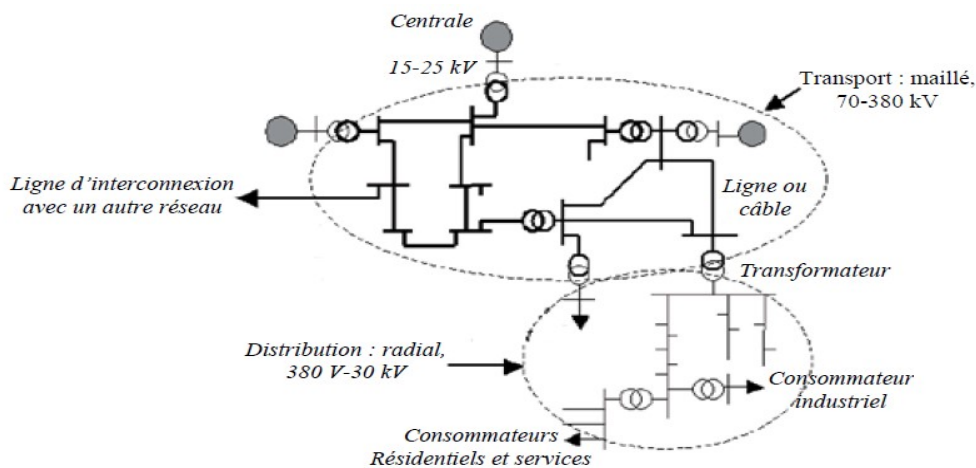


Figure I.2. Structure des réseaux de transport et de distribution (schéma unifilaire)

#### I.5. Structure générale des réseaux électriques

De façon générale un réseau électrique est composé de quatre grande parties ;

### **I.5.1. Production**

Elle consiste en la génération de l'ensemble de la puissance active consommée par le réseau tout entier. En grande majorité, les tensions associées à cette production sont produites sous la forme de systèmes triphasés par l'intermédiaire d'alternateurs entraînés à partir de divers types de sources d'énergie dites « primaires » ou par des convertisseurs continue-alternatif.

### **I.5.2. Transport**

Il consiste à acheminer les puissances produites par les unités de production auprès des lieux de consommation. Les grandes centrales étant en général groupées autour des fleuves, des cours d'eau et des océans, le « grand transport » consiste à parcourir de longues distances en direction des extrémités des territoires nationaux.

L'ordre de grandeur de ces distances impose, entre autre, le fait de véhiculer l'énergie électrique sous très haute tension.

### **I.5.3. Distribution**

Elle consiste en un maillage fin du territoire permettant à chaque utilisateur d'être à proximité d'une liaison au réseau. C'est l'ultime ramification des lignes et des installations qui permet également un passage progressif des très hautes tensions du transport aux basses tensions de la consommation.

### **I.5.4. Consommation**

Chaque récepteur électrique connecté au réseau consomme une puissance active et une puissance réactive. La consommation domestique, qui est généralement majoritaire, est très ramifiée et se fait sous basse tension souvent monophasée 220 V ou triphasé 380 V. Certains « clients » industriels (grosses usines, ferroviaire, etc.) sont directement reliés en moyenne, haute ou très haute tension.

## **I.6. Lignes électriques**

Les lignes électriques relient les postes entre eux. À l'intérieur d'un poste, on trouve pour chaque niveau de tension un jeu de barres qui relie les départs lignes et les départs transformateurs.

### **I.6.1. Ligne aérienne**

Une ligne électrique aérienne est une structure utilisée dans la transmission et la distribution d'énergie électrique pour transmettre l'énergie électrique d'un poste A à un poste B sur de distances variantes. Il se compose de plusieurs infrastructures, elles sont données comme suit :

- Les pylônes
- Les câbles conducteurs, Câbles de garde.
- Les isolateurs
- Les parafoudres
- Les éclateurs à corne
- Les disjoncteurs
- Les fusibles
- Les interrupteurs
- Les transformateurs



**Figure I.3.** Ligne aérienne

### I.6.2. Les lignes souterraines

Elles sont composées de différents parties assemblées d'une manière concentrique, les principaux composants sont : au centre un conducteur permet de transporter l'électricité, ensuite vient une isolation électrique pour empêcher le courant de s'écouler vers la terre, le tout est entourer d'une gaine métallique afin de confiné le champ électrique à l'intérieure du câble et d'une protection extérieure qui assure une bonne propriété mécanique et le protège des agressions externes. [6]

L'impacte environnementale et esthétique des investissements liés à l'installation des nouvelles lignes électriques aérienne est néfaste surtout dans les zones ruraux et habitable, c'est pour cela qu'on opte pour le choix des câbles électriques souterraine dans ces zones.



Figure I.4. Lignes électriques sous terraines

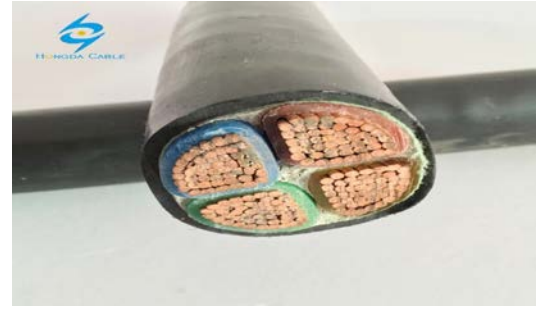


Figure I.5. Câble électrique sous terraines

## I.7. Caractéristique générale des réseaux électriques

Les réseaux électriques, en très grande majorité, transportent l'énergie électrique sous la forme de systèmes triphasés. Les dispositions et grandeurs caractéristiques de ces systèmes sont ainsi :

- Fréquence
- Niveaux Tension
- Type de couplage

### I.7.1. Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge. [7]

Dans la plus grande partie du monde, la fréquence est de 50 Hz (Europe, Asie, Afrique), par contre on trouve une fréquence de 60 Hz en Amérique du Nord, Japon (voir carte plus bas). Sauf mention explicite du constructeur, la majeure partie des appareils fonctionnent en 50 ou 60 Hz.

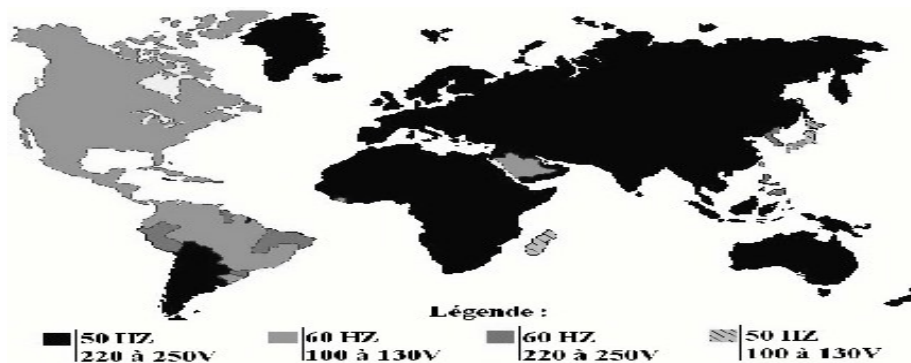


Figure I.6. Fréquence normalisées et tensions domestiques mondiales

### I.7.2. Domaine de tension

Le domaine de tension que l'on trouve généralement près des ouvrages électriques correspond à la classification des installations électriques) et par le niveau de tension (haute et basse).

Actuellement selon la norme C.E.I, on distingue cinq (5) domaines de tension différents :

Très Basse Tension (TBT)

Basse Tension (BTA)

Basse Tension(BTB)

Haute Tension A (HTA)

Haute Tension B (HTB)

- Les domaines de tensions de ces cinq derniers sont illustrés comme suivant :

Tableau I.1. Domaine de tension

| Domaine de tension | Courant alternatif   | Courant continu         |
|--------------------|----------------------|-------------------------|
| TBT                | $U \leq 50V$         | $U \leq 120V$           |
| BTA                | $50 < U \leq 500V$   | $120 < U \leq 750V$     |
| BTB                | $500 < U \leq 1000V$ | $750 \leq U \leq 1500V$ |
| HTA                | $1000 < U \leq 50KV$ | $1500 < U \leq 75KV$    |
| HTB                | $U > 50KV$           | $U > 75KV$              |

### I.7.3. Type de couplage

Les réseaux électriques sont considérés comme des système triphasée, d'où ils partagent les mêmes modes de couplage Etoile ou tringle et ces couplages sont choisi selon le niveau de tension et le type de réseaux ;

- Réseaux de transport et de la répartition HTB et HTA (généralement neutre non distribuée) → triangle
- Réseaux de distribution locale BT (neutre distribuée) → étoile

## I.8. Topologies des réseaux électriques

Les topologies sont différentes d'un type de réseau à un autre. La topologie est dictée par : le niveau fiabilité recherché, la flexibilité et la maintenance, ainsi que les coûts d'investissement et d'exploitation. Les différentes topologies qu'on trouve usuellement sont illustrées sur la Figure I.7.

### 1.8.1. Réseau maillé

Cette topologie est presque la norme pour les réseaux de transport. Tous les centres de production sont liés entre eux par des lignes THT au niveau des postes d'interconnexion, ce qui forme un maillage. Cette structure permet une meilleure fiabilité mais nécessite une surveillance à l'échelle nationale voire continentale. [8]

### 1.8.2. Réseau radial

C'est une topologie simple qu'on trouve usuellement dans la distribution MT et BT. Elle est composée d'une ligne alimentée par des postes de distribution MT ou BT alimentés au départ par un poste source HT ou MT. En moyenne tension cette structure est souvent alimentée des deux côtés afin d'assurer la disponibilité. [8]

### 1.8.3. Réseau arborescent

Cette structure est très utilisée en milieu rural et quelque fois en milieu urbain où la charge n'est pas très sensible aux interruptions. Elle est constituée d'un poste de répartition qui alimente plusieurs postes de distribution (BT) grâce à des piquages à différents niveaux des lignes alimentant les postes MT/BT. [8]

### 1.8.4. Réseaux bouclée

Cette topologie est surtout utilisée dans les réseaux de répartition et distribution MT. Les postes de répartition HT ou MT alimentés à partir du réseau THT sont reliés entre eux pour former des boucles, ceci dans le but d'augmenter la disponibilité. Cependant, il faut noter que les réseaux MT ne sont pas forcément bouclés [8]

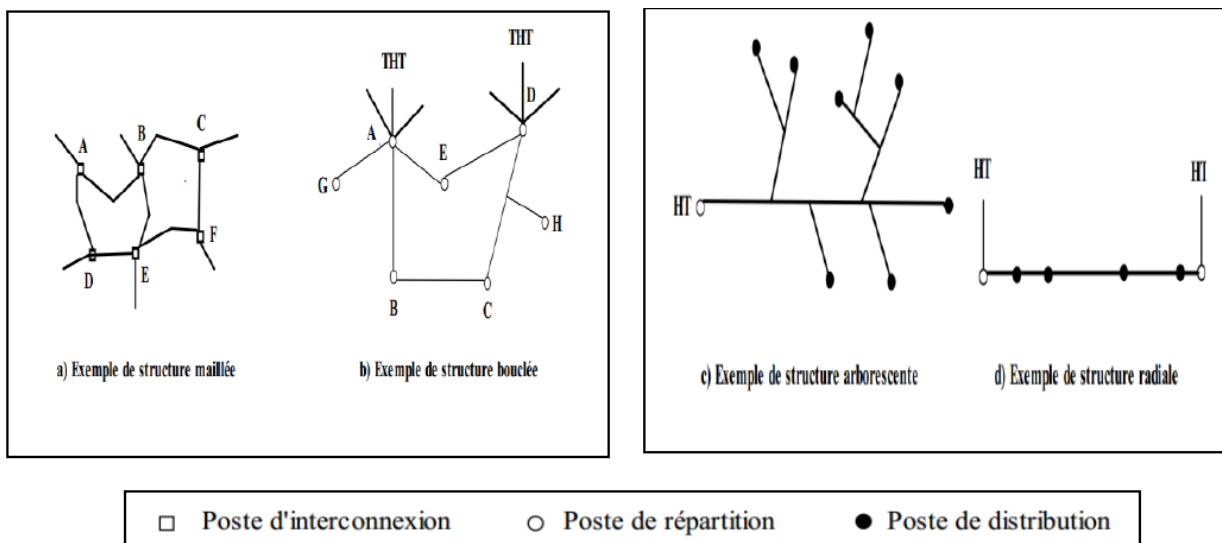


Figure I.7. Topologies des réseaux électriques

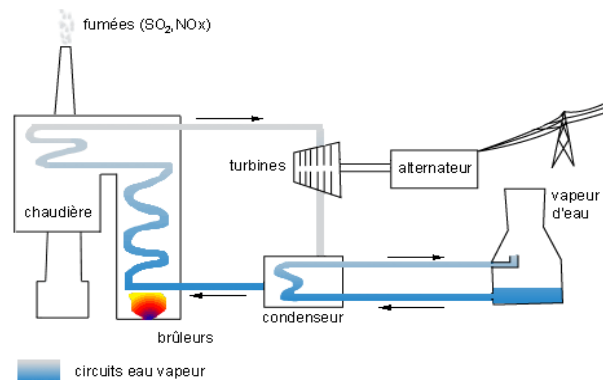
## I.9. Production d'énergie électrique

### I.9.1. Energies fossiles

On appelle « énergie fossile » l'énergie produite par la combustion du charbon, du pétrole ou du gaz naturel. Ces combustibles riches en carbone et hydrogène, sont issus de la transformation de matières organique enfouies dans le sol pendant des millions d'années (d'où le terme fossile). [9]

- **Centrale thermique a flamme**

Les centrales thermiques à flamme sont aussi appelées centrales thermiques classiques. Elles utilisent comme combustible le fioul, le gaz naturel et le charbon. Elles représentent, en Europe, 40 % de l'équipement et fournissent actuellement le complément nécessaire pour ajuster la production à la consommation. Elles servent également en cas de vagues de froid ou en cas de demande inattendue de consommation. En cas d'urgence, douze minutes suffisent pour commencer à produire de l'électricité pour les plus performantes. [10]



**Figure I.8.** Centrale thermique a flamme

- **Centrale thermique nucléaire**

Les centrales nucléaires convertissent les différents types d'énergie fossiles comme l'uranium et plutonium en énergie électrique par le phénomène fission des noyaux des éléments combustibles d'où l'expression « nucléaire ».

Ces centrales ne rejettent pas de gaz à effet de serre mais elles produisent des déchets radioactifs dans le stockage pose un grave problème pour l'environnement. [2]

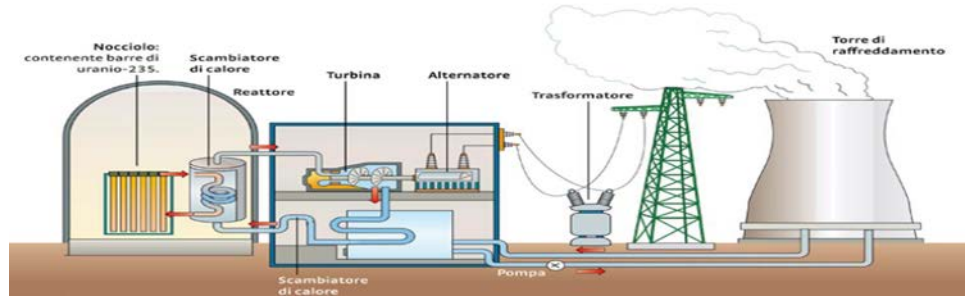


Figure I.9. Principe d'une centrale nucléaire

- **Centrale diesel**

Les centrales électriques diesel (nommées également groupes électrogènes) sont équipées d'un moteur diesel et d'un alternateur. Opérant en compagnie en tant qu'unités de production d'électricité, elles constituent un choix idéal sur les sites de production éloignés ou pour assurer l'alimentation de secours de grandes banques, d'hôpitaux, d'aéroports ou de villes entières. Certains pays et états insulaires produisent la majorité de leur électricité avec des centrales électriques diesel. [11]

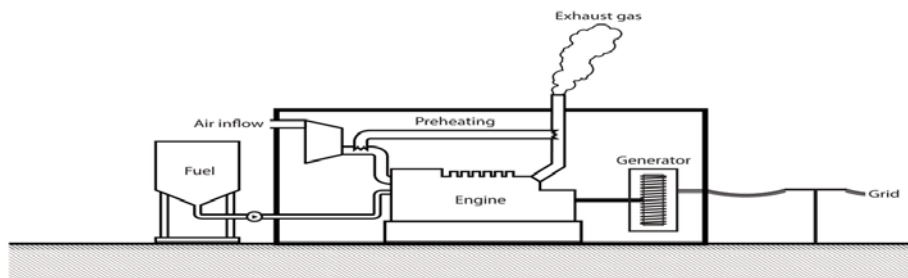


Figure I.10. Principe d'une centrale diesel

### I.9.2. Energies Renouvelable

Les énergies renouvelables désignent un ensemble de moyen de production de l'énergie à partir des sources ou de ressource : théoriquement illimitées, disponibles sans limite, reconstituées plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

- **Centrale hydraulique**

Dans une centrale électrique hydraulique, l'eau acquiert une énergie cinétique qui fait tourner une turbine. La turbine entraîne l'alternateur. Ce dernier convertit une partie de l'énergie mécanique de rotation de la turbine en énergie électrique. [11]



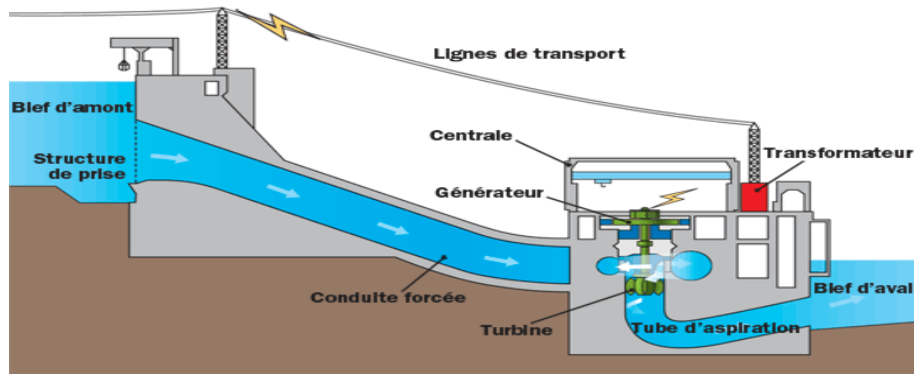


Figure I.11. Principe d'une centrale hydraulique

- **Centrale solaire photovoltaïque (PV)**

Le principe des centrales solaires photovoltaïques est extrêmement simple. Elles sont constituées d'un champ de modules solaires photovoltaïques reliés entre eux en série ou en parallèle, et branches sur un ou plusieurs onduleurs. L'énergie est directement transformée en électricité dans les panneaux, et passe ensuite dans le réseau électrique vers la ville la plus proche. [12]

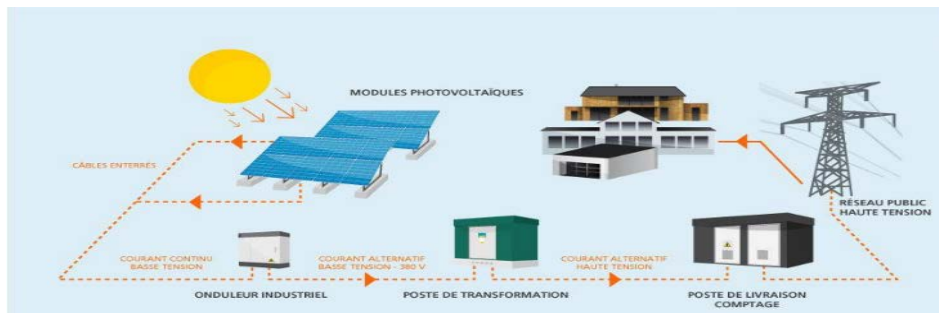


Figure I.12. Central solaire photovoltaïque

- **Centrale solaire thermique (par rayonnement)**

La solaire thermodynamique est l'une des valorisations du rayonnement solaire direct. Cette technologie consiste à concentrer le rayonnement solaire pour chauffer un fluide à haute température et produire ainsi de l'électricité ou alimenter en énergie des procédés industriels.

L'énergie solaire étant peu dense, il est nécessaire de la concentrer, via des miroirs réflecteurs, pour obtenir des températures exploitables pour la production d'électricité. Le rayonnement peut être concentré sur un récepteur linéaire ou ponctuel. Le récepteur absorbe l'énergie réfléchiée par le miroir et la transfère au fluide thermodynamique. Les systèmes à concentration en ligne ont généralement un facteur de concentration inférieur à celui des concentrateurs ponctuels. [13]

Il existe 3 types de centrales solaires thermiques, en fonction de la méthode de focalisation des rayons solaires :

- a) Les centrales à collecteurs cylindriques.
- b) Les centrales à tour.
- c) Les centrales à collecteurs paraboliques.

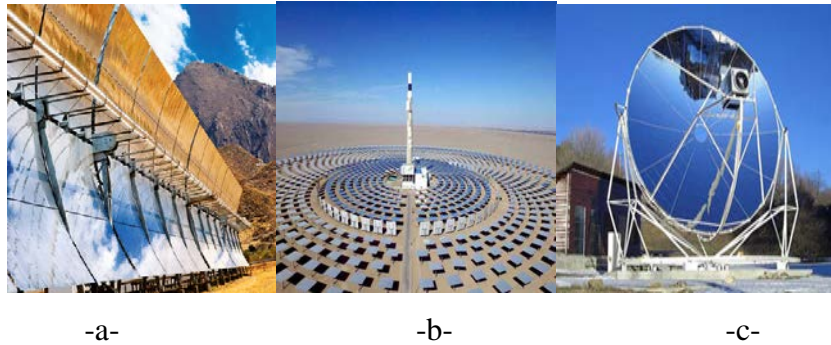


Figure I.13. Centrales solaires thermiques

- **Central éolienne**

Le rotor entraîne un axe dans la nacelle, appelé arbre, relié à un alternateur. Grâce à l'énergie fournie par la rotation de l'axe, l'alternateur produit un courant électrique alternatif.

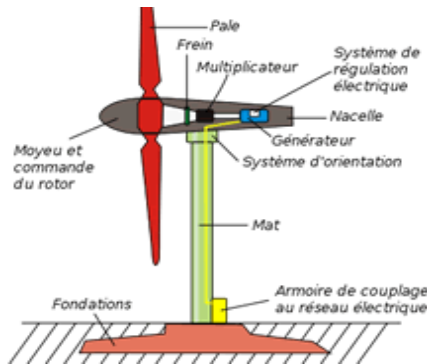


Figure I.14. Principe d'une éolienne

- **L'énergie biomasse**

La biomasse est l'ensemble de la matière organique d'origine végétal ou animal constituent après différents voies de conversion une source d'énergie renouvelable. Elle permette ainsi de produire de l'électricité ou de la chaleur. [14]



**Figure I.15.** La biomasse

- **L'énergie géothermique**

L'énergie géothermique provient de la chaleur accumulée dans le sous-sol. Elle est perpétuellement réapprovisionnée par la radioactivité des roches et la proximité du magma au-dessous de la croûte terrestre. L'exploitation par l'homme de cette énergie renouvelable porte le nom de géothermie. [11]



**Figure I.16.** Energie géothermique

## **1.10. Caractéristiques des centrales de production**

Chaque centrale défère d'une autre et a ces propres caractéristiques qui rentre dans la planification d'investissement des types de centrale à mettre en production pour un choix et un emplacement optimal on tient en compte sept caractéristiques majeurs comme suite :

### **1.10.1. Puissance fournit**

On définit la puissance fournie comme étant la puissance générée par un système ou une installation ou un système quelconque, après avoir fourni à son entrée une autre puissance parfois d'une forme différente.

$$\text{Puissance fournie} = \text{Puissance absorbée} - \text{Pertes}$$

### **1.10.2. Rendement**

Le rendement est le rapport entre l'énergie apportée par une source primaire et l'énergie électrique produite.  $\eta = \frac{P_s}{P_e}$

Ps : La puissance de sortie.

Pe : La puissance d'entrée.

### 1.10.3. Durée de vie

La durée de vie correspond au délai entre la mise en service et le démantèlement de l'installation ou à la fin de vie des organes majeurs tel que prévu dans le dimensionnement.

Ces trois caractéristiques sont représentées dans le tableau suivant :

Tableau I.2. Puissance, rendement et durée de vie de quelques centrales. [13]

| Installation         | Puissance          | Rendement (%) | Durée de vie |
|----------------------|--------------------|---------------|--------------|
| Centrale thermique   | 200 à 800MW        | 35 à 40       | ~40ans       |
| Centrale hydraulique | 200 à 800 MW       | ~80           | Indéterminé  |
| Centrale nucléaire   | 900 à 1400 MW      | 30 à 35       | 40 à 60 ans  |
| Eolien               | 0.5 à 8 MW         | 20 à 25       | ~ 25 ans     |
| Solaire (PV)         | Quelques KW à 20MW | ~10           | ~ 25 ans     |

### 1.10.4. Coût de production

Tableau I.3. Coût de revient d'un MWh pour certains équipements. [13]

| Type d'équipement | Le cout (en €/MWh)     |
|-------------------|------------------------|
| Nucléaire         | 39 à 42                |
| Gaz               | 70 à 80                |
| Charbon           | 60 à 70                |
| Hydraulique       | 35 grosses ;80 petites |
| Eolienne terre    | 70 à 90                |
| Eolienne mer      | 120 à 140              |
| Photovoltaïque    | 200 à 300              |
| Biomasse          | 110 à 220              |

### 1.10.5. Surface exigée

Tableau I.4. Surface occupée par les différentes centrales [13]

| Installation       | Surface(km <sup>2</sup> ) |
|--------------------|---------------------------|
| Centrale nucléaire | 0.2                       |
| Solaire PV         | 100                       |
| Hydraulique        | 300 à 400                 |
| Éolien             | 500                       |
| Biomasse           | 0.3                       |

### 1.10.6. Disponibilité

La disponibilité d'un équipement ou d'un système est une mesure de performance. Cet indicateur-qualité est obtenu en divisant la durée durant laquelle ledit équipement ou système est opérationnel par la durée totale durant laquelle on aurait souhaité qu'il le soit. Elle s'exprime en heures de fonctionnement annuel, on trouve ainsi pour les différents systèmes :

Tableau I.5. Disponibilité des différents systèmes. [15]

| Installations                     | Disponibilité h/ans |
|-----------------------------------|---------------------|
| Centrale a flamme(gaz et charbon) | 8000                |
| Barrage hydraulique               | ~2000               |
| Nucléaire                         | ~7500               |
| Eolien                            | ~2000               |
| Solaire PV                        | ~2000               |

### 1.10.7. Emission du CO2

L'émission du dioxyde de carbone et d'autres déchets radioactifs ont un impact négatif sur l'aspect environnemental, et à cet effet on cherche toujours à minimiser ces polluants. [4]

## I.11. Capacité de production et potentialités en énergie électrique

- Centrales de production nationale

Le tableau suivant résume les centrales qui compose le parc de production nationale de l'énergie électrique, un parc dominé par le cycle combiné avec cinq (5) centrales d'une puissance totale de 5007 MW représentant un pourcentage de 35.87%, elles sont suivies par seize (16) centrales à gaz d'un totale de 4701 MW, avec un pourcentage de 33.67%, et puis neuf (9) centrales à vapeur qui produisent un total de 3833 MW (27.46%), viendront ensuite treize (13) centrales

hydrauliques avec un total de 269.208 MW soit 1.93%, et enfin 150 MW de la puissance totale nette est produite par la nouvelle centrale hybride de Hassi-R'Mel qui représente 1.07% de la production totale. [2]

Tableau I.6. Centrales de production nationale et leurs capacités. [2]

| Type de la Centrale | Nom de la centrale | Puissance nette nominale (MW) | Energie primaire (Combustible) | Site         |
|---------------------|--------------------|-------------------------------|--------------------------------|--------------|
| Turbine à gaz (TG)  | Adrar              | 100                           | Gaz                            | Adrar        |
|                     | Bab Ezzouar        | 108                           | Gaz                            | Alger        |
|                     | Annaba             | 80                            | Gaz                            | Annaba       |
|                     | Boufarik           | 96                            | Gaz                            | Blida        |
|                     | Larbaa             | 500                           | Gaz                            | Blida        |
|                     | Tilghemt           | 200                           | Gaz                            | Laghouat     |
|                     | SKB                | 500                           | Gaz                            | Alger        |
|                     | M'Sila             | 730                           | Gaz                            | M'Sila       |
|                     | Kahrama            | 318                           | Gaz                            | Oran         |
|                     | Hassi Messaoud I   | 120                           | Gaz                            | Ouargla      |
|                     | Hassi Messaoud II  | 200                           | Gaz                            |              |
|                     | HassiMessaoudSud   | 72                            | Gaz                            |              |
|                     | F'Krina            | 300                           | Gaz                            | OumelBouaghi |
|                     | RelizaneRelizane   | 465                           | Gaz                            |              |
| Tiaret I & II       | 420                | Gaz                           | Tiaret                         |              |
| Total               | /                  | 4701                          | /                              | /            |
| Thermique à vapeur  | Ras Djinet         | 672                           | Gaz/ Diesel                    | Boumerdes    |
|                     | Jijel              | 588                           | Gaz/ Diesel                    | Jijel        |
|                     | Marsat             | 840                           | Gaz/ Diesel                    | Oran         |
|                     | Ravin Blanc        | 133                           | Gaz/ Diesel                    | Oran         |
|                     | Skikda             | 262                           | Gaz/ Diesel                    | Skikda       |

|                         |                   |         |             |               |
|-------------------------|-------------------|---------|-------------|---------------|
|                         | Hamma II          | 418     | Gaz/ Diesel | Alger         |
|                         | Berrouaghia       | 500     | Gaz         | Media         |
|                         | Toifza            | 220     | Gaz         | Nâama         |
|                         | Marsat El Hadjadj | 200     | Gaz         | Oran          |
| Total                   | /                 | 3833    | /           | /             |
| Cycles Combinés<br>(CC) | HadjretEnnous     | 1227    | Gaz         | Tipaza        |
|                         | SKS Skikda        | 880     | Gaz         | Skikda        |
|                         | KoudietEddraouch  | 1200    | Gaz         | El Taref      |
|                         | M'Sila            | 500     | Gaz         | M'Sila        |
|                         | Targa             | 1200    | Gaz         | AïnTimouchent |
| Total                   | /                 | 5007    | /           | /             |
| Centrale Hydrauliques   | Darguina          | 71.5    | Eau         | Bejaia        |
|                         | IghilEmda         | 24      | Eau         | Kherrata      |
|                         | Mansouria         | 100     | Eau         | Jijel         |
|                         | Erraguene         | 16      | Eau         | Jijel         |
|                         | Souk El Djemaa    | 8.085   | Eau         | Tizi Ouzou    |
|                         | Tizi Meden        | 4.458   | Eau         | Tizi Ouzou    |
|                         | Ighzernchebel     | 2.712   | Eau         | Tizi Ouzou    |
|                         | Ghrib             | 7.000   | Eau         | Ain Defla     |
|                         | Gouriet           | 6.425   | Eau         | Tizi Ouzou    |
|                         | Bouhanifia        | 5.700   | Eau         | Mascara       |
|                         | Oued Fodda        | 15.600  | Eau         | Chlef         |
|                         | Beni Behdel       | 3.500   | Eau         | Tlemcen       |
|                         | Tessala           | 4.228   | Eau         | Mila          |
| Total                   | /                 | 269.208 | /           | /             |
| Centrales Hybride       | HassiR'mel        | 150     | Gaz-Solaire | Laghouat      |

## **I.12. Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une vision générale sur l'énergie électrique et sur la structure globale des réseaux électriques et l'étude de ces différents composants nécessaires. On a abordé aussi les différents types de centrales de production d'énergie électrique et leurs critères économique et environnementaux. Le but de cette étude c'est de pouvoir alimenter la demande des consommateurs dans de bonnes conditions et assurer le rapport : consommation = production + pertes vu la contrainte de stockage d'énergie électriques.

Après avoir présenté un aperçu sur les réseaux électriques, nous allons présenter dans le chapitre suivant, les différents éléments perturbent les réseaux électriques et l'objectif d'une planification et prévision vis-à-vis ces éléments.



## Chapitre II. Prévision et Planification des Réseaux Electriques

### II.1. Introduction

La tension et la fréquence sont des paramètres les plus importants pour l'exploitation d'un système électrique. En effet, ces grandeurs sont les garants du bon fonctionnement de l'exploitation du réseau du point de vue du consommateur puisque certaines machines tournantes ou autres appareils (transformateurs, convertisseurs, etc.) sont dimensionnés pour des valeurs de fréquences et de tensions fixes du point de vue de l'exploitant. Un contrôle efficace de tension et de fréquence garantit une bonne qualité de tension et une bonne continuité de service. [16]

Dans ce chapitre on va aborder la qualité de tension et les différentes perturbations qui peuvent apparaître dans un réseau. Pour faire face à ces problèmes, il est indispensable de comprendre l'origine des perturbations des réseaux électriques et de les éviter avant leurs apparitions et de chercher les solutions appropriées permettant l'atténuation des effets les plus nuisibles d'où la nécessité de la **prévision** et de la **planification** dans cette problématique.

### II.2. Qualité de la tension

L'énergie électrique doit être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions possède quatre caractéristiques principales illustrée comme suit : amplitude ; fréquence ; forme d'onde ; symétrie

#### II.2.1. Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de  $\pm 10\%$  autour de la valeur nominale. [17]

#### II.2.2. Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 HZ ou 60 HZ selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'ilotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge.

Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes. [17]

### II.2.3. La forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être la plus proche possible d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale et peut en général être considérée comme une onde fondamentale à 50HZ associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50HZ appelées également harmoniques.

Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents mais non-périodiques, alors dénommés bruits. [17]

### II.2.4. Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre. [17]

## II.3. Réglage de tension

Le réglage de la tension en régime normal dans les réseaux électriques de transfert et de répartition nécessite une coordination temporelle et spatiale des actions de contrôle pour assurer un contrôle rapide et performant et pour hériter des actions qui pourraient avoir des conséquences graves sur la stabilité et la sûreté du réseau.

On distingue trois (3) type de réglage de tension comme suite :

### II.3.1. Réglage de tension primaire (les premières secondes après perturbation)

Le réglage primaire de tension est assuré par les groupes de production équipé d'un régulateur primaire de tension. Grace à ce régulateur les alternateurs fixent la tension a une valeur de consigne sur leurs points de raccordement. Le principe est d'agir sur l'excitation des alternateurs pour garder le niveau de tension désiré. En effet, si l'alternateur est surexcité celui-ci va produire de la puissance réactive ce qui aura pour effet d'accroitre la tension à son point de connexion, inversement, dans le cas d'une sous-excitation de l'alternateur, il va absorber de la puissance réactive et conduira donc à diminuer la tension a ces bornes. Ceci est réalisable dans les limites propres de chaque alternateur. [16]

Le réglage primaire de la tension peut être l'un des trois types suivants :

Type 1 : réglage de puissance réactive constante au point livraison.

Type 2 : réglage de tension au point de livraison.

Type 3 : réglage de la tension aux bornes du stator des groupes selon une consigne.

### II.3.2. Le réglage secondaire de la tension

Endéans les 15 minutes après perturbation. Ce réglage de tension est envisagé par région ou zone. Ces zones sont des parties de réseau dont les évolutions du plan de tension sont sensiblement différentes. Sur cette zone est défini un nœud particulièrement représentatif de l'évolution de la tension. Le principe est de réguler la tension en ce point pilote du réseau en agissant sur les productions de puissance réactive des groupes participants au réglage. Les mesures de tension sont fournies au réglage secondaire de tension qui calcule de nouvelles consignes de tension pour les groupes réglant dans le but de fixer la tension au point pilote

### II.3.3. Le réglage tertiaire de tension

Dans les 15 à 30 minutes après perturbation Le réglage tertiaire est nécessaire pour coordonner les actions entre deux zones régies par des RST différents. Ce réglage est effectué par les opérateurs de dispatching régional et comprend le calcul des tensions aux points pilotes. Ces réglages hiérarchisés permettent de réguler la tension sur les réseaux HTB (transport et répartition). Pour le réseau de distribution, le contrôle se fait localement à l'aide de systèmes gérant l'apport en puissance réactive nécessaire afin de limiter le transit de cette puissance sur les réseaux amont via les postes HTB\HTA qui occasionnent des pertes supplémentaires.

## II.4. Dégradation de la qualité de tension

Les perturbations de tension sont la cause la plus fréquente d'un large éventail de perturbations dans les systèmes d'alimentation industriels et commerciaux. Les perturbations peuvent être transitoires, de courte durée, de longue durée ou périodiques.

Comme cela peut être des défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc... Ces défauts peuvent résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...). [18]

**On peut citer comme exemple des installations perturbants** : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

### II.4.1. Chute de tension

Lorsque le transit de la puissance dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de tension. La tension est alors plus basse au bout de

ligne qu'3 son origine, et plus la ligne est charg3e en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

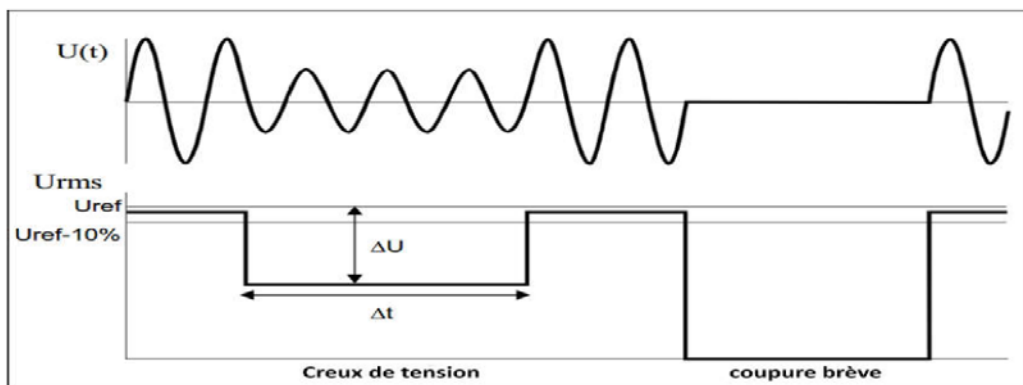
Un r3seau dans lequel la consommation est 3loign3e de la production, pr3sentera un profil de tension diff3rent de celui d'un r3seau dans lequel production et consommation sont uniform3ment r3parties. Chaque centrale impose la tension 3 sa sortie, et la tension 3volue dans le r3seau en fonction de la consommation et les distance qui s3pare cette derni3re a la premi3re. C'est pourquoi dans les r3seaux maill3s THT, la tension est diff3rente suivant l'endroit o3 l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux n3uds du r3seau o3 les centrales d3bitent, et relativement basse aux points de consommation 3loign3s des centrales [19].

#### II.4.2. Bosse de tension

La bosse de tension est une augmentation de la tension au-dessus de la tension nominale 1.1 pu pour une dur3e de 0.5 cycle 3 60 s. Elle est caract3ris3e par son amplitude et sa dur3e. Elle peut causer l'3chauffement et la destruction des composants.

#### II.4.3. Creux de tension

Les creux de tension sont produits par des court-circuit survenant dans le r3seau g3n3ral ou dans les installations de la client3le. Seules les chutes de tension sup3rieures 3 10 % sont consid3r3es ici (les amplitudes inf3rieures rentrent dans la cat3gorie des "fluctuations de tension"). Leur dur3e peut aller de 10 ms 3 plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les d3fauts sont normalement 3limin3s en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s 3 quelques secondes en MT).



**Figure II.1.** Creux de tension et coupure br3ve

Ils sont caract3ris3s par leurs : amplitude et dur3e et peuvent 3tre monophas3s ou triphas3s selon le nombre de phases concern3es. Les creux de tension peuvent provoquer le d3clenchement

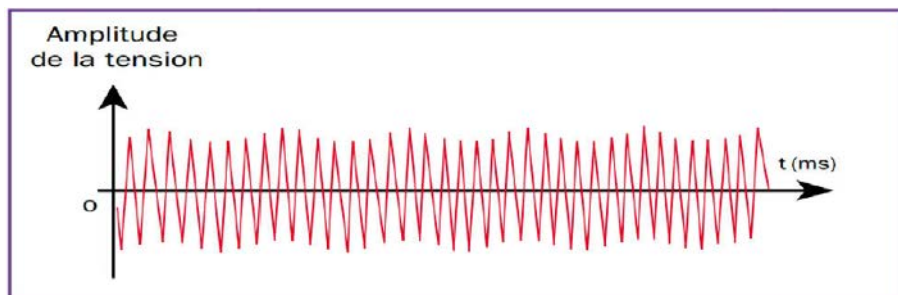
d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée exc dent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits...). [19]

#### II.4.4. Variation lente de tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison des modifications des charges alimentées par le réseau. Les appareils usuels peuvent supporter sans inconvénients des variations lents de tension dans une plage d au moins  $\pm 10\%$  de la tension nominal. [20]

#### II.4.5. Variation ou fluctuation rapide de tension (FLIKER)

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires figure II.2, sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc. [19] [21]



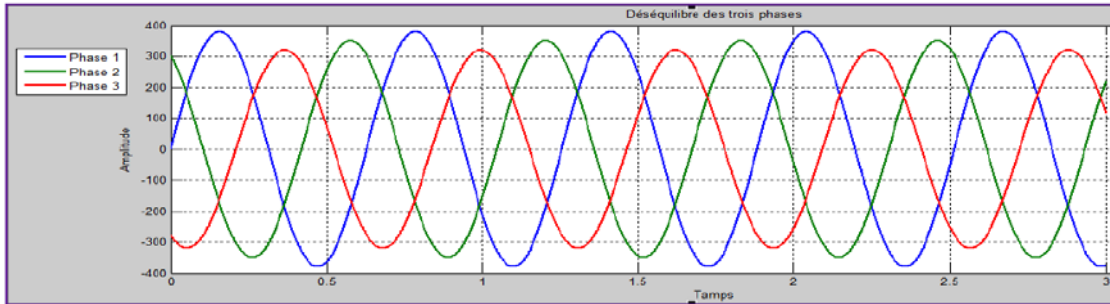
**Figure II.2.** Exemple de variations rapide de la tension

Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement de l'éclairage (Flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas quelques dixièmes de pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à 10 %.

#### II.4.6. Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau. Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions.

Mais cela peut également être engendré, à des niveaux de tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. [22]

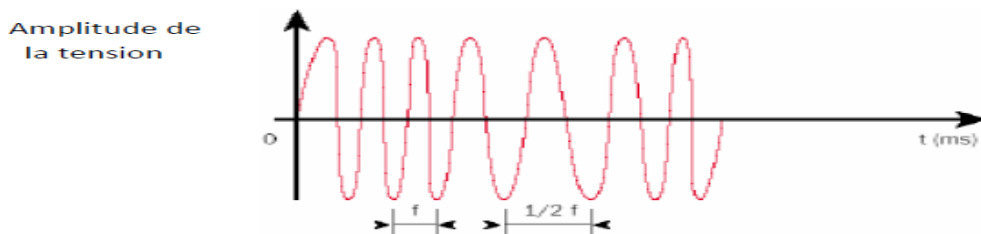


**Figure II.3.** Déséquilibre de tension

Un système triphasé est dit déséquilibré lorsque les trois tensions qui le compose ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de  $120^\circ$ .

#### II.4.7. Variation ou fluctuation de fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle  $50 \text{ Hz} \pm 1\%$  comme illustré sur la figure II.4.



**Figure II.4.** Exemple de fluctuation de la fréquence

#### II.4.8. Harmoniques

La problématique des harmoniques dans le réseau électrique, également appelée pollution harmonique, n'est pas un phénomène nouveau. Néanmoins, du fait que de plus en plus de charges non linéaires se connectent au réseau, la problématique des harmoniques est devenue très répandue.

Les charges non linéaires provoquent une distorsion des courants et donc des tensions, ce qui peut entraîner un mauvais fonctionnement des dispositifs raccordés au réseau. D'où, l'intérêt d'éliminer ou de minimiser ces harmoniques.

Un récepteur d'énergie est considéré par le réseau électrique comme une charge perturbatrice s'il absorbe des courants non sinusoïdaux ou des courants déséquilibrés ou s'il consomme de la puissance réactive. Les deux premiers types de perturbations peuvent déformer ou déséquilibrer les tensions du réseau lorsque l'impédance de celui-ci n'est pas négligeable. Le troisième réduit la capacité de production ou de transmission de la puissance active des générateurs, des transformateurs et des lignes électriques.

Les harmoniques de courant, une fois injectés par des charges non linéaires, se propagent à travers le réseau électrique en affectant la forme d'onde des tensions aux différents points du réseau. Cette propagation n'est limitée que par les bifurcations (points de division des courants) et les impédances du réseau qui dépendent généralement de la fréquence des courants harmoniques. La présence des harmoniques de courant se révèle essentiellement à travers leurs effets sur la tension du réseau. [23]

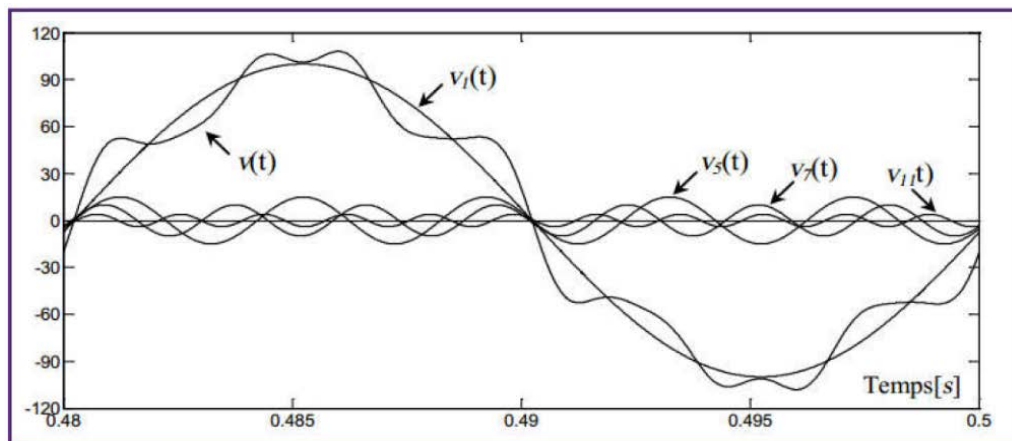


Figure II.5. Tension distordue à partir des harmoniques

## II.5. Prédiction des systèmes électrique

### II.5.1. Définition

La prédiction est définie comme un ensemble de techniques ayant pour but d'envisager une situation à une échéance plus ou moins lointaine. La prédiction de la consommation électrique de l'anglais « *electrical load forecasting* » représente une projection des profils temporels des consommations d'électricité sur une période prédéfinie. Cette prédiction peut être envisagée soit en énergie consommée sur une période donnée (en kWh), soit en puissance maximale anticipée (en kW). D'un point de vue mathématique, si  $P(t)$  désigne la puissance électrique moyenne consommée à l'instant  $t$ , la prédiction est l'action d'anticiper la consommation future  $P(t + \Delta t)$  avec  $\Delta t$  l'horizon de la prédiction, variable selon le contexte d'application. [24]

### II.5.2. Horizon de prévision

L'horizon de la prévision se décompose en trois termes selon de la demande qui influe sur plusieurs aspects de l'entreprise aussi bien au niveau d'opération journalière que des décisions stratégiques.

#### a) **Court terme**

Généralement mesurer en jour ou en semaine et peut aller jusqu'à un an. Au niveau opérationnelle, la demande peut amener à déterminer le créneau de travail et elle influe également les fonctions d'approvisionnement, d'expédition et de réception.

#### b) **Moyen terme**

Généralement mesurer en années peut aller jusqu'à dix ans. Le niveau la demande a un impact sur les stocks de sécurité et sur les contrats avec des clients et les fournisseurs et les prévisions permettant une planification de la production.

#### c) **Long terme**

Peut aller jusqu'à 20 ans et plus. Les prévisions de la demande permettent de prendre des décisions stratégiques concernant :

La planification des capitaux

La structure de réseau

Les stratégies de pilotage des réseaux de production et de distribution. [25]

### II.5.3. Méthodes de prévisions

- **Méthodes extrapolatives**

Ces méthodes utilisent le passé de la variable elle-même.

Seul le passé de la variable est utilisé en vue de la prévoir sans apport d'information

Extérieure.

- **Méthodes explicatives**

Celles-ci utilisent les valeurs passées et présentes d'une ou de plusieurs variables pour prévoir y. L'ensemble d'information utilisé comporte des facteurs extérieurs qui peuvent influencer le futur de y en plus du passé de la variable y elle-même. [26]



#### II.5.4. Caractéristiques de préviation

- **Elles sont généralement incertaines**

Les ressources requises et les plans de production peuvent demander à être modifiés si les prévisions de la demande ne sont pas exactes. Le système de planification doit être suffisamment robuste pour réagir en cas d'erreur de préviation non anticipée.

- **Une bonne préviation est plus qu'une valeur numérique**

Puisque les prévisions sont généralement incertaines, une bonne préviation doit également inclure une mesure de l'erreur anticipée pour la préviation, et celle-ci peut prendre la forme d'une étendue ou d'une mesure de l'erreur.

- **Prévisions agrégées sont plus précises**

L'erreur faite pour la préviation pour une ligne de produits est généralement moindre que l'erreur faite dans préviation de vente d'un seul produit

- **Prévisions à long terme sont moins précises**

Cette caractéristique est assez intuitive. On peut prévoir plus exactement les ventes à Court terme que celles à long terme.

- **Prévisions ne remplacent pas la vraie information**

Une technique de préviation donnée peut donner de bonnes prévisions dans la plupart des cas, mais il peut y avoir une information disponible concernant la demande future qu'on ne peut pas anticiper en regardant les données historiques. [25]

#### II.5.5. Préviation de la consommation

Les prévisions de la consommation électrique sont essentielles pour le fonctionnement et la planification d'une entreprise de service public, elles aide à prendre des décisions importantes, y compris des décisions d'achat et de production de l'électricité, de consommation de charge et de développement d'infrastructure. [27]

La méthode de préviation s'appuie sur le caractère cyclique de la consommation. On peut identifier trois cycles temporels : [4]

- **Un cycle annuel**

Important pour la constitution et la gestion des stocks d'énergie. Les prévisions annuelles nationales sont réalisées à partir d'arbustes macro-économiques et d'hypothèses de croissance par

secteurs d'activités. Elles tiennent compte en particulier du niveau de croissance économique général, de l'effet de stockage et déstockage des industries, de l'évolution démographique et de la part de l'électricité dans la consommation énergétique domestique, ainsi que de l'essor de nouvelles technologies.

- **Un cycle hebdomadaire**

En passant de l'échelle annuelle à l'échelle hebdomadaire, on commence à percevoir nettement la variabilité de la consommation.

- **Les prévisions journalières**

En passant à l'observation de l'évolution heure par heure de la puissance appelée, on a une idée plus claire du défi que représente l'équilibre permanent entre production et consommation.

### II.5.6. Paramètres influençant la consommation d'électricité

Les paramètres influençant la consommation d'électricité sont présentés ci-dessous par ordre d'importance : [4]

#### a) Météorologie

Les données météorologiques sont les premiers éléments influençant la consommation d'électricité. Ainsi, l'évolution des conditions météorologiques tout au long de l'année est, pour une bonne part, à l'origine des variations cycliques annuelles de la consommation.

Pour établir une prévision, chaque entreprise productive d'électricité doit impérativement utiliser en particulier deux grandeurs, fournies par la Météo :

- **La température**

Mesurée grâce à des capteurs. Ces variations se traduisent par des modifications de l'utilisation du chauffage électrique en hivers ou de la climatisation en été.

- **La nébulosité**

La nébulosité représente le taux de couverture nuageuse (Utilisée par les pays qui ont le ciel généralement nuageux). Cette grandeur s'exprime en octal et varie de 0 à 8 (0 correspond à un ciel compl tement dégagé et 8 à un ciel couvert). La nébulosité est issue d'une observation humaine du ciel. La nébulosité a une influence sur l'utilisation de l'éclairage, mais aussi sur le chauffage en modifiant les effets du rayonnement solaire dans les habitations.

### **b) Activité économique**

L'activité économique des entreprises a également une forte influence sur la consommation. Ces effets sont directement observables sur les courbes de consommation annuelle (creux de consommation au moment des vacances d'été) et hebdomadaire (consommation moindre les weekend). Ainsi, les jours fériés modifient profondément le profil de la consommation le jour considéré.

### **c) Horaire légal**

Cette grandeur est spécifique aux pays qui utilisent ce type de changement horaire (horaire d'été ou horaire d'hiver), influence également la consommation d'électricité en décalant la journée par rapport à l'heure solaire. L'horaire d'été a pour effet de pratiquement supprimer la pointe de consommation du soir. La consommation journalière maximale est alors atteinte le matin, entre 09h00 et 13h00(France). En hiver au contraire, la pointe de consommation a lieu à 19h00. Ce changement durable de la forme de consommation est appelé une rupture.

### **d) Evénements exceptionnels**

Certains événements exceptionnels peuvent perturber le profil de la consommation en voici quelques exemples :

- ✓ La finale de la coupe du monde provoque une augmentation de la consommation pendant la mi-temps. (Mise en route de moteurs : réfrigérateurs, pompes à eau...)
- ✓ Les moments d'éclipse provoquent une chute de la consommation pendant quelques minutes.
- ✓ Les tempêtes en entraînant d'importantes coupures de clientèle, perturbent pendant plusieurs jours la consommation d'électricité

### **e) Effet ramadhan**

L'étude des différents impacts que peuvent avoir ces événements religieux sur l'activité économique d'un pays montre que selon le secteur d'activité étudié, un même événement engendrer une hausse ou une baisse de l'activité du secteur en question.

## **II.6. Planification des réseaux électriques**

### **II.6.1. Planification des systèmes électriques**

La planification des systèmes électriques est une des composantes de la planification du développement énergétique et économique. Elle vise donc à déterminer la stratégie la moins coûteuse qui permet de développer à long terme des systèmes de production, de transport et de distribution pour que ceux-ci répondent à la demande prévue tout en respectant un certain nombre de conditions techniques, économiques et politiques.

La planification des systèmes électriques a toujours porté essentiellement sur l'expansion de la production. En effet, le coût de construction des lignes de transport est relativement faible par rapport à celui des centrales nucléaires et les investissements nécessaires pour distribuer l'électricité aux consommateurs, bien qu'importants, sont largement indépendants des systèmes de production et de transport. [28]

### **II.6.2. Etapes de planification**

Les principales phases de la planification d'un système électrique sont schématiquement les suivantes : [29]

#### **a) Diagnostique de l'existant**

Il s'agit de faire l'état des lieux des éléments du réseau actuel comme les postes de transformation, les lignes, ainsi que l'ensemble des nouveaux clients. Alors une analyse externe est effectuée pour évaluer la sensibilité des clients aux facteurs environnementaux. Tous les problèmes rencontrés par le réseau seront intégrés dans les objectifs de la planification.

#### **b) Prévision de la consommation**

Avant toute planification, on doit évaluer la consommation et la production sur le réseau à l'aide des informations adéquates pendant une période d'étude.

#### **c) Construction de la cible long terme**

Elle est construite grâce au diagnostic du réseau existant et de prévisions d'évolution. La cible long terme (Project visée) dépend surtout des grands choix techniques et du budget disponible et l'élément le plus structurant dans cette dernière est le choix de l'architecture et les orientations structurales du réseau électrique.

**d) Etablissement des réseaux intermédiaires**

Un ensemble de stratégies cohérent est défini pour passer du réseau initial à la cible long terme. Pour chacune d'elle, une analyse technico-économique est effectuée afin de déterminer le cout et la date de réalisation optimale de chaque opération. Le bilan économique actualisé peut ainsi être réalisé et la stratégie la plus économique est choisie.

**e) Passage de la cible théorique à la cible pratique**

Une durée d'étude moyenne est fixé entre 5 et 10 ans. La cible pratique est la cible théorique pour laquelle le coût et les indices de fiabilités du réseau sont évalués pour une période de 10 ans. Avant d'arriver au terme de cette période, on fonction de l'évolution des hypothèses de planification la cible long terme est réévaluée, ainsi que la stratégie des réseaux intermédiaires pour l'atteindre.

**II.6.3. Type de planification**

- **Planification de l'extension des réseaux**

La planification de l'extension des réseaux s'aligne sur une vision à moyen et à long-terme, basée sur le réseau existant. Dues aux incertitudes d'une planification à long-terme, différents scénarios sur l'évolution possible de la demande et de la production sont à analyser. Des cas d'utilisation extrêmes des réseaux projetés sont à considérer (worst-case scenarios). Les résultats doivent comporter une marge suffisante dans les différents cas d'utilisation. [30]

- **Planification opérationnelle**

La planification opérationnelle focalise sur des travaux d'entretien à moyen et court terme et des travaux à proximité des ouvrages. Il s'agit de planifications opérationnelles hebdomadaires ou journalières. L'estimation de charges prévisionnelles des réseaux est concrète et basée sur des estimations ou prévisions qui sont pas sûres. Par conséquent, les imprévus et les différents cas de figure à évaluer sont limités. [30]

- **Gestion opérationnelle**

La gestion opérationnelle du réseau est déterminée par les étapes de planification précitées. L'adéquation de la charge, des injections des installations de production, des injections des réseaux limitrophes et des flux de transit sont à garantir en fonction des différentes configurations du réseau. La sécurité du réseau est à évaluer en continu. [30]

#### II.6.4. Objectifs de planification

L'objectif principal d'une planification des réseaux est de développer à moyen et à long terme le réseau de manière à garantir un fonctionnement sûr de ce dernier. Les aspects suivants sont à considérer :

- Les moyens financiers accordés par le régulateur (budget de réalisation du Project) ;
- Les délais d'obtention des autorisations administratives ;
- La stabilité du réseau ;
- La sécurité d'approvisionnement des clients finaux ;
- La sécurité des réseaux transfrontaliers ;
- La sécurité des personnes et des biens ;
- Le respect des contraintes environnementales et d'un développement durable. [30]

#### II.6.5. Horizon de la planification

Pour les infrastructures de production, de transport et de distribution de l'électricité ayant une durée de vie plus ou moins importante (de 5 ans pour certains groupes électrogènes à 30 ans notamment pour les réseaux de distribution), les études de planification ont des horizons temporels allant de quelques années à quelques décennies (20 ans, voire 30 ans).

De façon générale, plus l'horizon temporel est éloigné, plus les incertitudes sur les paramètres/hypothèses de planification deviennent trop fortes et risquent de transformer l'exercice de planification en une vaste spéculation. Ces incertitudes touchent notamment :

- A la demande et à son évolution sur le territoire et la période étudiés, d'autant plus lorsque cette demande intègre des hypothèses multisectorielles et d'aménagement du territoire.
- Aux options d'électrification et aux contraintes de leurs développements (coût, disponibilité, coût du combustible).
- Aux budgets d'investissements disponibles (locaux, nationaux, internationaux). Etc.
- L'horizon temporel peut également être dépendant d'autres horizons fixés par la politique nationale ou internationale.

Le choix de l'horizon n'est pas sans impact sur les décisions d'investissement : un horizon court pourra plaider en faveur d'une option moins onéreuse en investissement, en raison d'un retour sur

investissement plus rapide. Un horizon lointain pourra justifier la mise en place de solutions d'attente souvent désignées « pré-électrification » pour des localités programmées tardivement. [4]

## **II.7. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept qualité de l'énergie électrique, les définitions des principales perturbations affectants les réseaux électriques négativement sur plusieurs plans. D'où vient le rôle de la préviation et planifications des systèmes électriques pour faire face à des problèmes pareils futurs. Une bonne préviation de la demande et une bonne planification du réseau aboutit à un bon fonctionnement du système en d'autre terme elles améliorent la qualité et la continuité de service.

## Chapitre III. Compensation d'énergie réactive

### III.1. Introduction

Le transport de la puissance réactive sur de longues distances présente une série d'inconvénients tels-que les chutes de tension considérables, les pertes des lignes par effet Joule et moins de capacité pour le transport de la puissance active.

L'amélioration du facteur de puissance constitue sans doute un paramètre très important dans l'amélioration de la qualité de l'énergie du point de vue technique et économique. Parmi les Méthodes d'amélioration du facteur de puissance qui minimisent le transport de la puissance réactive dans les lignes électriques, on trouve la compensation de l'énergie réactive.

Dans ce chapitre, on va étudier le principe de la compensation, ainsi que les différents types des compensateurs de l'énergie réactive.

### III.2. Energie Réactive

Les réseaux électriques à courant alternatif fournissent l'énergie apparente qui correspond à la puissance (ou puissance appelée). Cette énergie se décompose en deux formes d'énergie :

- L'énergie active : transformée en énergie mécanique (travail) et en chaleur (pertes).
- L'énergie réactive : utilisée pour créer des champs magnétiques.

L'énergie réactive est utilisée par les circuits magnétiques de l'appareil en question. C'est elle qui crée les champs magnétiques des bobines ou des transformateurs. L'énergie réactive est nécessaire pour faire fonctionner l'appareil mais elle n'est pas transformée en travail direct contrairement à la puissance active (toutefois sans elle celui-ci ne pourrait pas fonctionner). Elle est exprimée en (VAR)

Les consommateurs de puissance réactive sont les moteurs asynchrones, les transformateurs, les inductances (ballasts de tubes fluorescents) et les convertisseurs statiques (redresseurs), les postes à soudure etc...

### III.3. Influence de l'énergie réactive

L'énergie réactive est un facteur très important qui influe sur la stabilité et l'équilibre du réseau électrique, ainsi que son fonctionnement. Les effets secondaires de ce facteur ce résume dans les points suivants [31] :



- ✓ La chute de tension dans les lignes et les postes de transformation.
- ✓ Les pertes supplémentaires actives dans les lignes, les transformateurs et les générateurs.
- ✓ Les variations de tension du réseau sont étroitement liées à la fluctuation de la puissance réactive dans le système de production.
- ✓ L'échauffement des câbles d'alimentation.

### III.4. Principe de Compensation de puissance réactive

Le principe de compensation peut être représenté par les deux figures ci-après. La figure III.1 illustre l'échange local d'énergie réactive entre le récepteur et le dispositif de compensation. Le courant total fourni par le réseau est réduit, le rendement de l'installation se trouve donc amélioré puisque les pertes par effet Joule sont proportionnelles au carré du courant. [32]

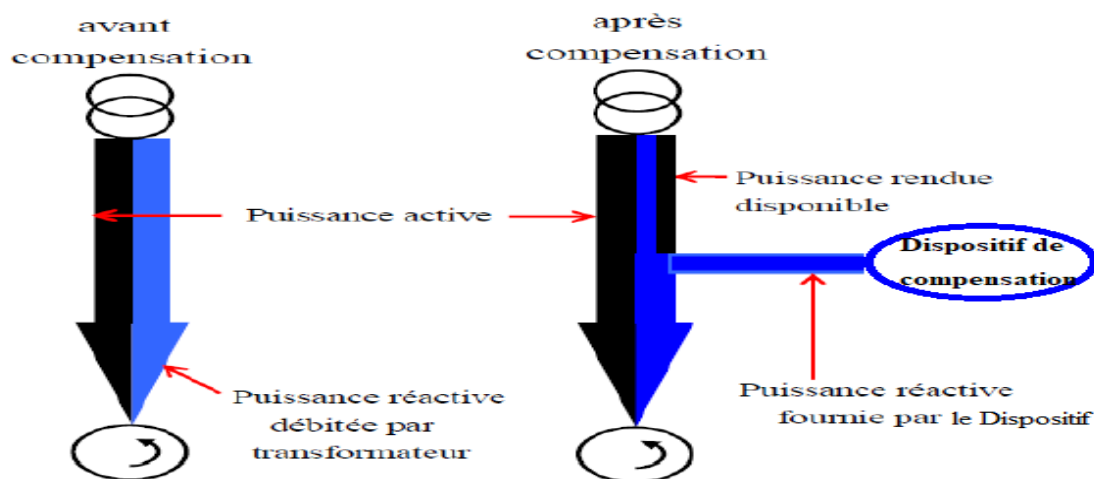


Figure III.1. Diagramme traduisant l'échange d'énergie et montrant l'intérêt de la compensation

### III.5. Objectifs de compensation

La circulation de l'énergie réactive a des incidences techniques et économiques importantes. En effet, pour une même puissance active  $P$ , la figure suivante montre qu'il faut fournir d'autant plus de puissance apparente, et donc de courant, que la puissance réactive est importante.

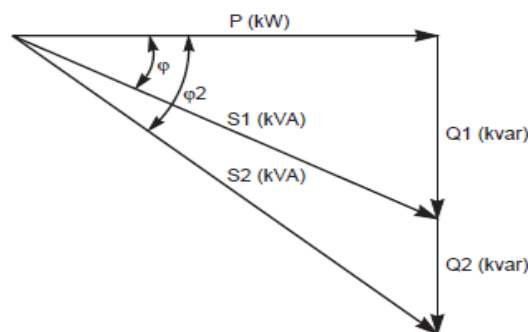
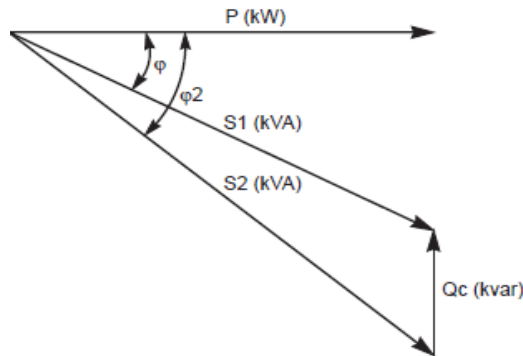


Figure III.2. Influence de la puissance réactive

Pour ces raisons, il est nécessaire de produire l'énergie réactive au plus près possible des charges, pour éviter qu'elle ne soit appelée sur le réseau.

Pour réduire la puissance apparente absorbée au réseau de la valeur  $S_2$  à la valeur  $S_1$ , on doit connecter une batterie de condensateurs fournissant l'énergie réactive  $Q_c$ , telle que :

$$|Q_c| = P \cdot (\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1) \quad (\text{III.1})$$



**Figure III.3.** Principe de la compensation d'énergie réactive

La compensation de l'énergie réactive a pour tâche :

- Compenser l'énergie réactive.
- Réduire les fluctuations de tension et les phénomènes de Flicker.
- Améliorer le facteur de puissance  $\cos \varphi$ .
- Améliorer le contrôle de la tension et la stabilité du réseau.
- Réduire des pertes actives totales.
- Maîtriser la répartition et les transits des puissances.
- Améliorer des oscillations de puissance et de tension susceptibles d'apparaître dans les réseaux à la suite d'un défaut.
- Améliorer la stabilité électromécanique des groupes de production.

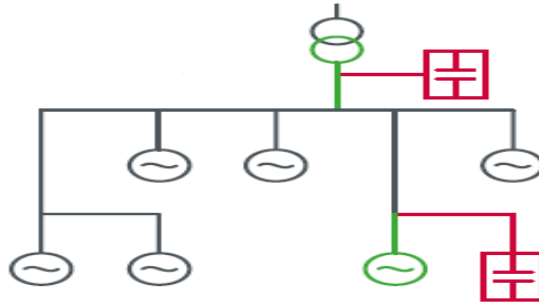
### III.6. Méthodes de compensation de puissance réactive

La compensation de la puissance réactive peut être réalisée sur tout point d'une installation.

Selon l'endroit où elle sera installée chaque méthode suivra une stratégie différente pour obtenir l'amélioration du facteur de puissance.

### a) Compensation individuelle

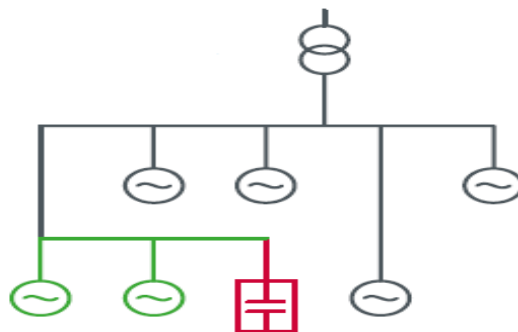
Compensation directe de la machine à compenser ; il s'agit de la solution technique la plus optimale pour réduire directement la consommation de réactif dans la charge. Son utilisation est habituelle pour les pompes, les moteurs ou les transformateurs. [33]



**Figure III.4.** Compensation individuelle

### b) Compensation par groupe

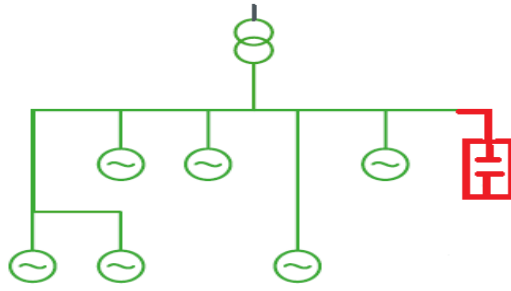
La compensation par groupes de charges est utilisée dans des installations où il existe une distribution sectorisée et large. Complément d'appui pour un système de compensation centralisée globale, augmentant la capacité de la ligne qui alimente le groupe de charges compensées. [33]



**Figure III.5.** Compensation par groupe

### c) Compensation globale centralisée

La compensation connectée à l'entrée de l'installation, habituellement utilisée pour la réduction de la facturation électrique pour surcharges par énergie réactive. [33]



**Figure III.6.** Compensation globale centralisée

### III.7. Moyens de compensations de puissance réactive

Il existe plusieurs sources qui sont capables de produire de l'énergie réactive, ce qui permet de les utiliser comme des moyens de compensation on peut les classer comme suit :

#### III.7.1. Batterie de condensateur

Les condensateurs offrent une solution pour améliorer le facteur de puissance. La fourniture de l'énergie réactive par les condensateurs est due à la présence du champ électrique. Cette énergie est en fonction de la capacité, de la tension aux bornes du condensateur et la taille de ces derniers. On donne [34]

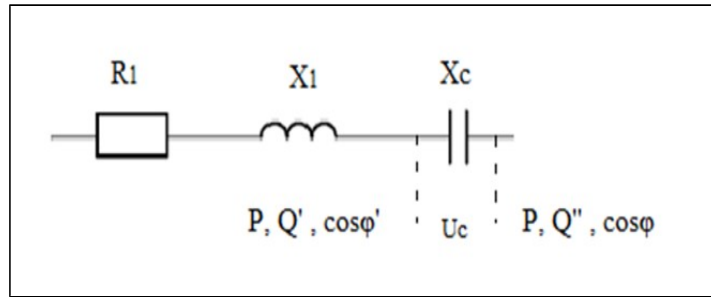
$$Q_c = C_w * V_c^2 \quad \text{(III.2)}$$

Les batteries de condensateurs sont actuellement le moyen le plus économiques et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux publics.

On distingue deux types d'installation des condensateurs :

#### ➤ Installation série

L'installation des batteries de condensateurs en série permet de compenser les chutes de tension sur les longues lignes de transport d'énergie réactive (THT et HT). En diminuant la réactance effective de la ligne, la capacité de transit de la puissance active peut être augmentée en diminuant les chutes de tension. La (figurIII.7) montre un modèle de réseau sur lequel un condensateur série est installé. [35]



**Figure III.7.** Installation série

La puissance active  $P$  est considérée constante avant et après l'installation du condensateur, par contre les paramètres  $Q'$ ,  $U'$  et  $\cos\phi'$  sont considérés à l'amont,  $U''$  et  $\cos\phi''$  à l'aval du condensateur.

Nous avons alors.

$$P = \sqrt{3} \cdot U' \cdot \cos\phi' \cdot I \text{ de l'amont.}$$

$$P = \sqrt{3} \cdot U'' \cdot \cos\phi'' \cdot I \text{ de l'aval.}$$

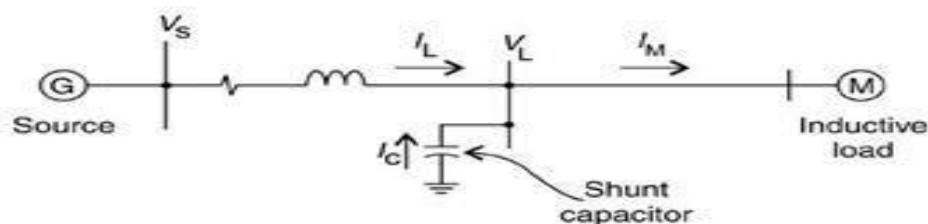
$$\frac{P}{P} = 1 = \frac{U' \cdot \cos\phi'}{U'' \cdot \cos\phi''} \Rightarrow \cos\phi' = \frac{U''}{U'} \cdot \cos\phi''$$

La puissance compensée est de

$$Q_C = Q' - Q'' = P (\tan\phi - \tan\phi')$$

➤ **Installation shunt**

Les condensateurs installés en parallèle (shunt) fournissent de la puissance réactive au système au point où elles sont connectées, principalement pour exploiter les longue lignes au-dessus de leurs puissance naturelle (requisse par une charge inductive). [34]



**Figure III.8.** Installation shunt

### III.7.2. Inductances

Les inductances ont un rôle complémentaire au rôle des batteries de condensateurs pour réaliser la stabilité de la tension. En effet, lors des heures creuses en régime surchargé, la puissance réactive produite n'est pas consommée totalement par les charges. C'est pour cette raison que les inductances sont installées sur les lignes THT ou HT, pour emmagasiner cet excédent d'énergie réactive et l'empêcher de transiter à travers les lignes. Ainsi les surtensions seront atténuées et en cas de besoin de cette énergie sera restituée au réseau. [35]

### III.7.3. Compensateur synchrone

Le compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant en moteur à vide. Ses fonctionnements en régime surexcité ou sous-excité lui permettent respectivement de fournir ou d'absorber l'énergie réactive. Comme il n'entraîne aucune charge, le compensateur synchrone n'absorbe pratiquement aucune puissance active (aux pertes près). Cette méthode permet de contribuer au contrôle et à la stabilité du réseau. [35]

### III.7.4. Moteur asynchrone synchronisé

Ce moteur démarre comme moteur asynchrone et lorsqu'il atteint une vitesse voisine de celle de moteur correspondent à la fréquence du réseau il s'accroche au réseau .il fonction alors comme débiteur d'énergie réactive si toutefois il est surpuissant par rapport à la machine qu'il entraîne. [34]

### III.7.5. Groupe thermique et hydraulique

Les groupes thermiques et hydrauliques peuvent également participer à la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux électriques. Grâce aux performances de leurs alternateurs notamment sur le plan dynamique, ces groupes qui constituent les sources de tension du réseau, peuvent contrôler la tension en absorbant ou en fournissant de l'énergie réactive, ce qui dépend des courants d'excitation des rotors des alternateurs plusieurs zones de limitation de fonctionnement sont à prendre en considération en raison de :

- L'échauffement des conducteurs du rotor et des tôles des circuits magnétiques, c'est une limitation de la quantité de puissance fournie (limite de courant du rotor).
- Des contraintes dues au courant du stator et à l'angle interne  $\delta$  qui doit être inférieur à  $\pi/2$  pour un fonctionnement stable à excitation constante et à tension du rotor fixe, c'est une limitation de puissance absorbée.

Les potentialités d'un groupe à absorber ou à fournir de l'énergie réactive dépendent également de la puissance active qu'il fournit de la tension aux bornes de son alternateur et de la prise du transformateur le reliant au réseau.

La modification de la production d'énergie réactive dans un groupe s'effectue en quelques dixièmes de seconde seulement. Il peut donc faire face aux fluctuations brusques de la demande. Cette performance dynamique fait du groupe un moyen accompli de compensation d'énergie réactive dans les réseaux de transport. [35]

### III.7.6. Compensateurs statiques d'énergie réactive (dispositifs FACTS)

#### *III.7.6.1. Définition des dispositifs FACTS*

Selon l'IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers), la définition du terme FACTS est la suivante : Systèmes de Transmission en Courant Alternatif comprenant des dispositifs basés sur l'électronique de puissance et d'autres dispositifs statique utilisés pour accroître la contrôlabilité et augmenter la capacité de transfert de puissance du réseau.

Avec leurs aptitudes à modifier les caractéristiques apparentes des lignes, les FACTS sont capables d'accroître la capacité du réseau dans son ensemble en contrôlant les transits de puissances. Les dispositifs FACTS ne remplacent pas la construction de nouvelles lignes. Elles sont un moyen de différer les investissements en permettant une utilisation plus efficace du réseau existant [36].

#### *III.7.6.2. Nécessité des dispositifs FACTS*

La compensation de l'énergie réactive au niveau des lignes de transmission permet la régulation du profil de la tension le long de ces lignes avec un bon contrôle de la puissance active transmise. Il est reconnu que, la stabilité peut être améliorée, quel que soit son type, si la compensation réactive du système de transmission varie rapidement. Les méthodes de compensation de l'énergie réactive classiques se basent sur les batteries de condensateurs ou les bobines fixes ou commandées mécaniquement. Ces méthodes sont non efficaces dans le contrôle du réseau électrique quand il est sévèrement perturbé.

Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT et GTO, le temps de réaction de ces dispositifs a diminué à quelques milli secondes. Il est possible donc de répondre à la demande par l'utilisation d'une compensation rapide en utilisant les dispositifs FACTS [37].

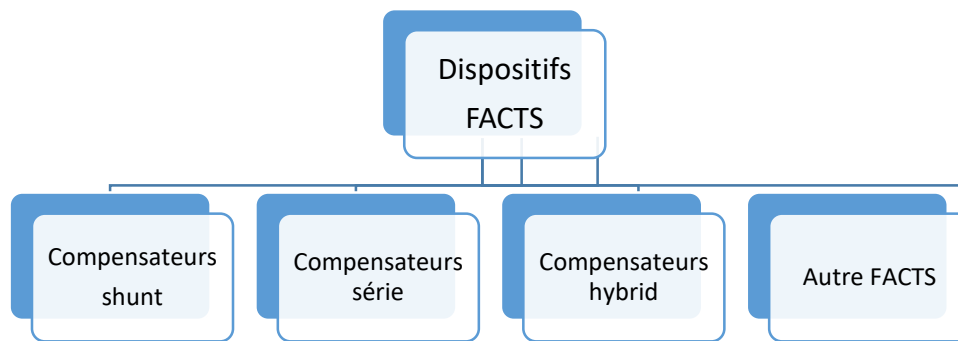
### III.7.6.3. Fonctionnement des FACTS

Un FACTS agit généralement en fournissant ou en consommant dynamiquement de la puissance réactive sur le réseau. Ceci a pour effet de modifier l'amplitude de la tension à son point de connexion, et par conséquent la puissance active maximale transmissible.

Les FACTS sont utilisés aussi pour le filtrage des courants harmoniques et la stabilisation de la tension. L'ordre de grandeur de la puissance d'un FACTS va de quelques MVA (*Méga Volts Ampères*) à quelques centaines de MVA.

### III.7.6.4. Classification des dispositifs FACTS [38]

Les dispositifs FACTS peuvent être classés en quatre catégories comme le montre la figure suivante :



**Figure III.9.** Classification des dispositifs FACTS selon la catégorie

#### a) Dispositifs shunt

##### a.1) Compensateur statique de puissance réactive (*Static Var Compensator- SVC*)

Un générateur (ou absorbeur) statique d'énergie réactive, shunt, dont la sortie est ajustée en courant capacitif ou inductif afin de contrôler des paramètres spécifiques du réseau électrique, typiquement la tension des nœuds. Les sous-ensembles du SVC sont :

- Inductance Contrôlée par Thyristors (Thyristor Controlled Reactor- TCR)
- Condensateur Commuté par Thyristors (Thyristor-SwitchedCapacitor- TSC)
- Inductance Commutée par Thyristors (Thyristor-Switched Reactor- TSR)

##### a.2) Compensateur Statique Synchrones (*Static Synchronous Compensator- STATCOM*)

Un générateur synchrone fonctionnant comme un compensateur parallèle de l'énergie réactive dont le courant capacitif ou inductif généré peut être contrôlé séparément de la tension du système à courant alternatif.



### **a.3) Générateur Statique Synchronique (Static Synchronous Generator- SSG)**

Un convertisseur de puissance statique à interrupteurs auto commutés, alimenté par une source d'énergie électrique appropriée, et exploité pour produire un ensemble ajustable de tensions de sortie multi phases, qui peut être couplé à un système de puissance alternatif dans le but d'échanger indépendamment la puissance contrôlable active et réactive.

Toutefois, deux dispositifs particuliers peuvent être mis en évidence.

- Système de Stockage par Batterie (Battery Energy Storage System- BESS)
- Système de Stockage d'Énergie par Aimant Supraconducteur (Super conducting Magnetic Energy Storage- SMES)

### **a.4) Système Statique de Puissance Réactive (Static Var System- SVS)**

Une combinaison de différents compensateurs de puissance réactive statiques et mécaniquement commutés dont les sorties sont coordonnées.

### **a.5) Résistance de Freinage Contrôlée par Thyristors (Thyristor Controlled Braking Resistor- TCBR)**

Une résistance commutée par thyristors et connectée en parallèle, qui est contrôlée pour aider le système de puissance à se stabiliser ou de minimiser l'accélération des puissances d'une unité génératrice lors d'une perturbation

## **b) Dispositifs série**

La compensation série peut être utilisée dans les systèmes énergétiques pour la commande du flux d'énergie en régime permanent. En cas de lignes de transport avec une capacité thermique suffisante, la compensation peut soulager des surcharges éventuelles sur d'autres lignes parallèles

### **b.1) Contrôleur de transit de puissance entre lignes (Interline Power Flow Controller- IPFC)**

Une combinaison de deux ou plusieurs compensateurs statiques série synchronique qui sont reliés entre eux via une liaison commune à courant continu pour faciliter l'écoulement bidirectionnel de la puissance active entre les bornes alternatives des SSSC, et sont contrôlés pour fournir une compensation réactive indépendante pour l'écoulement de puissance ajusté dans chaque ligne et maintenir la distribution de l'écoulement de puissance réactive désiré entre les lignes.

**b.2) Condensateur Série Contrôlé par Thyristors (Thyristor Controlled Series Capacitor-TCSC)**

Un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive.

**b.3) Condensateur Série Commuté par Thyristors (Thyristor Switched Series Capacitor-TSSC)**

Compensateur à réactance capacitive qui est constitué d'un banc de capacité série shunté par une inductance commutée par thyristor pour fournir un contrôle pas à pas de la réactance capacitive série.

**b.4) Inductance Série Commandée par Thyristors (Thyristor Controlled Series Reactor-TCSR)**

Compensateur à réactance inductive qui est constitué de l'inductance série shunté par une inductance commandée par thyristor afin de fournir une réactance inductive série légèrement variable.

**b.5) Inductance Série Commutée par Thyristors (Thyristor Switched Series Reactor-TSSR)**

Compensateur à réactance inductive qui est constitué d'une inductance série shuntée par une inductance commutée par thyristor afin de fournir un contrôle pas à pas de la réactance inductive série.

**b.6) Compensateur statique série synchrone SSSC (Static Synchronous Series Compensator- SSSC)**

Il est formé d'un convertisseur de tension inséré en série dans la ligne par l'intermédiaire d'un transformateur. Le SSSC agit sur le courant de ligne en insérant une tension en quadrature avec ce dernier, la tension pouvant être capacitive ou inductive. Un SSSC est capable d'augmenter ou de diminuer le flux de puissance dans une ligne, voire d'en inverser le sens. Le comportement d'un SSSC peut être assimilé à celui d'un condensateur ou d'une inductance série réglable. La différence principale réside dans le fait que la tension injectée n'est pas en relation avec le courant de ligne. De ce fait, le SSSC présente l'avantage de pouvoir maintenir la valeur de la tension insérée constante, indépendamment du courant.

**c) Dispositifs hybride (série-parallèle)**

**c.1) Contrôleur de Transit de Puissance Unifié (Unified Power Flow Controller- UPFC)**

Une combinaison entre un STATCOM et un SSSC couplés via une liaison à courant continu, pour permettre un écoulement bidirectionnel de la puissance active entre la sortie du SSSC et celle du STATCOM.

**c.2) Transformateur Déphaseur Commandé par Thyristor (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer- TCPST)**

Transformateur déphaseur ajusté par un thyristor afin de fournir un angle de phase rapidement variable. Ce dispositif est également appelé régulateur d'angle de phase commandé par thyristor (TCPAR -Thyristor Controlled Phase Angle Regulator).

**c.3) Régulateur de puissance interphases (Interphase Power Controller- IPC)**

Un contrôleur de la puissance active et réactive connecté en série et comprenant, dans chaque phase, des branches inductives et capacitives soumises à des tensions déphasées séparément. Les puissances active et réactive peuvent être réglé indépendamment en ajustant les décalages de phase et / ou les impédances de branche, à l'aide des commutateurs mécaniques ou électroniques. Dans le cas particulier où l'impédance inductive et capacitive forment une paire conjuguée, chaque terminal de l'IPFC est une source passive de courant dépendant de la tension à l'autre borne.

**d) autres dispositifs FACTS**

**d.1) Limiteur de Tension Commandé par Thyristor (Thyristor Controlled voltage Limiter- TCVL)**

Une varistance à oxyde métallique commutée par thyristor utilisée pour limiter la tension à ses bornes durant les conditions transitoires.

**d.2) Régulateur de Tension Commandé par Thyristor (Thyristor Controlled Voltage Regulator- TCVR)**

Un Transformateur commandé par thyristor qui peut fournir une tension variable dans une phase avec un control continu.

### **III.8. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la notion d'énergie réactive et son influence dans les réseaux et les principes de compensation puis on a classé les différents compensateurs de l'énergie réactive, nous avons montré ainsi comment choisir l'emplacement et le type de compensation.

Un point du réseau qui a un mauvais facteur de puissance présente des inconvénients mais cela peut être corrigé par l'apport de puissance réactive en ce point. Ainsi pour satisfaire à ce besoin de puissance réactive en évitant en même temps le transport de la puissance réactive on la compense.

## Chapitre IV. Planification d'énergie réactive

### IV.1. Introduction

La planification de la puissance réactive concerne l'installation des équipements de puissance réactive dans le réseau ou bien le contrôle des tensions des différents accès de manière à améliorer le fonctionnement du réseau, en termes du coût, des pertes et de comportement des niveaux de tension (stabilité et profil).

Le but dans un problème de compensation de l'énergie réactive pour un système, est d'allouer et de dimensionner les ressources de l'énergie réactive.

Les ressources réactives statiques, à savoir, les condensateurs et les réactances sont attribuées et dimensionnées pour des conditions d'exploitation normales. Les Compensateurs Réactifs Dynamiques sont correctement placés et dimensionnés de sorte que le fonctionnement et la sécurité du réseau de transport d'énergie électrique soient garantis à la suite de toute défaillance.

Pour allouer correctement et dimensionner les ressources statiques précitées, un problème d'optimisation multi objectif est proposé en tenant compte de diverses variables.

### IV.2. Variables du problème

#### IV.2.1. Profil de tension ( $V_{prof}$ )

Le terme caractérisant les amplitudes de la tension acceptables d'un accès du réseau est le profil de la tension. Une amplitude de tension de 1,0 pu . est considéré comme favorable.

Pour les accès charges PQ, dans des conditions pratiques, les tensions ne peuvent pas être strictement maintenues à cette valeur. Une marge de tension entre 0,95-1,05 pu peut être acceptable. Un accès générateur (accès PV), est considéré comme un accès à tension contrôlée et sa tension est définie par les opérateurs. La puissance réactive d'une unité de production est contrôlée en changeant son point de consigne de référence.

Un indice appelé indice de performance de la tension est calculé pour montrer une performance acceptable pour le profil de la tension par les somme des différences quadratiques des tensions aux accès  $V_i$  par rapport à la tension de référence  $V_i^{set}$ . [39]

$$V_{prof} = \sum_{i=1}^N (V_i - V_i^{set}) \quad (IV.1)$$

$V_i^{set} = 1.0$   $i \in$  PQ accès ; **ou**  $V^{set}$  Point  $i \in$  PV accès

Où :

$V_{prof}$  : est l'indice de performance de la tension.

$V_i$  : est la grandeur de tension de l'accès  $i$ .

$V^{set}$  : est la tension de référence de l'accès  $i$ .

$N$  : le nombre d'accès du réseau.

La somme peut être calculée pour tous les accès PV et PQ. En d'autres termes, si toutes les amplitudes des tensions des accès charges PQ sont de 1,0 pu et les tensions des accès générateurs PV sont maintenus à leurs points de consigne respectifs, l'indice serait de zéro. En outre, plus les amplitudes de la tension sont éloignées à partir de leurs points de consigne, plus l'indice serait élevé. En conséquence, un indice  $P_{prof}$  inférieur est considéré comme favorable.

Cet indice peut être facilement calculé par un programme de calcul d'écoulement de puissance

#### IV.2.2. Stabilité de la tension

Pour un réseau électrique typique, si on suppose que l'amplitude de la tension d'un accès spécifique est de 1,0 pu, pour une puissance apparente de l'accès de  $2,0 + j1,0$  pu. Si on suppose que la charge (à la fois P et Q) augmente de 20% à  $2,4 + j1,2$  pu, le calcul d'écoulement de puissance nous donne une tension de l'accès réduite à 0,95 pu. Si nous continuons à augmenter la charge, la tension continue à diminuer et suit une trajectoire simple comme le montre la figure IV.1 Après un certain point (point A), aucune solution ne peut être trouvée en exécutant le programme. Le système est considéré comme étant instable en tension pour toute charge supérieure à  $S_A$ . Cette courbe est communément appelée courbe S-V.

Des courbes  $S$  en fonction de P et Q courbes (Q-V ou P-V) peuvent être générées. La performance de la tension peut être établie en termes de Q ou P. De plus, au lieu d'augmenter la charge d'un accès spécifique, la charge totale de l'ensemble du système peut être augmentée.

Ces aspects sont normalement étudiés dans l'analyse de la stabilité statique de la tension (par opposition au type dynamique). Le terme statique est utilisé comme l'approche suivie de la courbes V de génération de la charge qui est basée sur l'équation algébrique de flux. Le type dynamique est basé sur des équations différentielles.

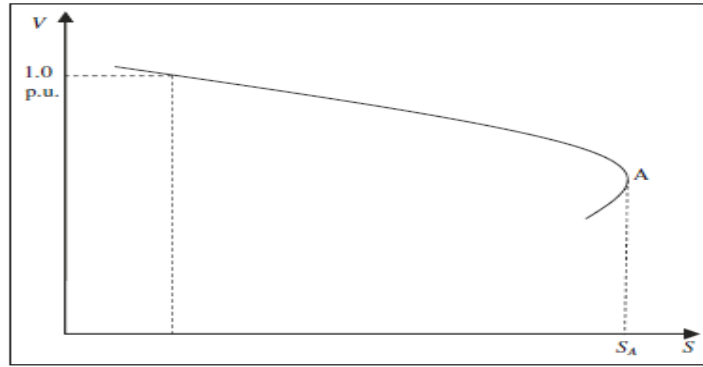


Figure IV.1. Courbe P-V

On considère maintenant deux cas typiques de la courbe Q-V figure IV.2. La tension du point de fonctionnement dans les deux cas est de 1,0 pu, les profils des tensions sont considérés comme identiques et acceptables. Cependant, dans le cas I, la distance au point d'instabilité est alors plus faible, la performance de la stabilité de la tension du cas II est meilleure. Cette distance peut être considérée comme le mérite relatif de la performance de la stabilité de la tension, noté  $Pstab$ . Pour trouver  $Pstab$  pour l'ensemble du réseau, on augmente les charges de la puissance réactive de tous les accès proportionnellement jusqu'à ce que le point d'instabilité soit atteint pour l'accès le plus faible. La puissance réactive totale est considérée comme  $Pstab$ . [39]

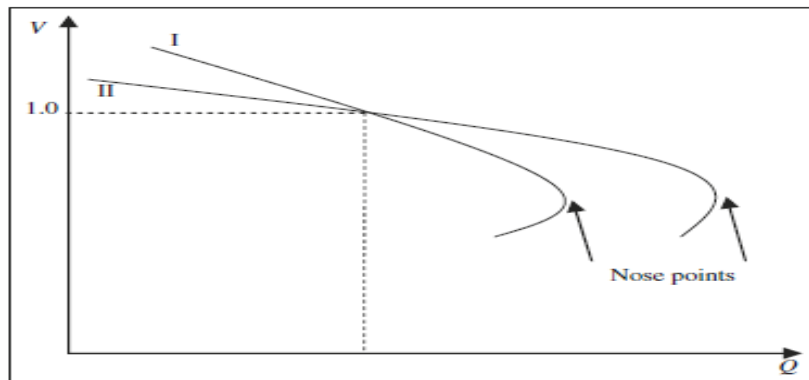


Figure IV.2. Courbe Q-V

#### IV.2.3. Pertes du système

La minimisation des pertes actives peut être considérée comme une autre fonction objective.

Cet indice est décrit comme suit : [39]

$$P_{loss} = \sum_{m=1}^{Nb} g_m [(V_m^s)^2 + (V_m^r)^2 - 2 * V_m^s * V_m^r * \cos \varphi_m] \quad (IV.2)$$

$P_{loss}$  : Les pertes du système.

$V_m^r, V_m^s$  : Les grandeurs de tension d'émission et de réception de la ligne m.

$\varphi_m$  : La différence d'angle de phase de la ligne m.

$g_m$  : La conductance.

Nb : Le nombre de lignes.

#### IV.2.4. Coût des ressources d'énergie réactive

Le coût engendré par l'installation des ressources énergétiques réactives devrait être minimisé.

Cet indice peut être décrit comme suit : [39]

$$P_{cost} = \sum_{i=1}^{Nc} (Cfi + CviQi) \quad (IV.3)$$

$P_{cost}$  : Le coût engendré par l'installation des ressources énergétiques réactives

$Cfi$  : Le coût d'installation fixe de la ressource de puissance réactive de l'accès i.

$Cvi$  : Le coût variable (par kVAr) de la ressource de la puissance réactive de l'accès i (le coût d'investissement).

$Qi$  : La capacité de la ressource de la puissance réactive de l'accès i.

$Nc$  : Le nombre total de points d'allocation de ces ressources.

### IV.3. Fonction objectif

Les grandeurs à optimiser peuvent être par exemple une consommation, un rendement, le coût, les pertes un facteur de transmission, ...etc. Un algorithme d'optimisation nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles à partir des grandeurs à optimiser. Cette fonction est nommée fonction objectif. L'algorithme convergera vers un optimum de cette fonction, quelle que soit sa définition. Une fois cette fonction est définie, il s'agit de choisir une méthode adaptée au problème posé.

Le problème d'optimisation dans nos cas (planification d'énergie réactive) consiste à optimiser une fonction d'évaluation globale qui s'établit à base des variables citées dans la section précédent on la donne comme suit :

$$Fe = -\alpha1 \frac{P_{prof,e}}{P_{prof}} + \alpha2 \frac{P_{stab,e}}{P_{stab}} - \alpha3 \frac{P_{loss,e}}{P_{stab}} - \alpha4 \frac{P_{cost,e}}{P_{cost}} \quad (IV.4)$$



Où :

$\underline{P}_{prof}$  : L'indice de performance de la tension minimale.

$\bar{P}_{stab}$  : L'indice de stabilité de la tension maximale.

$\underline{P}_{loss}$  : Les pertes du système.

$\bar{P}_{cost}$  : Les Coût des ressources d'énergie réactive maximale.

L'objectif de cette optimisation c'est de :

- Minimiser  $P_{prof}$
- Maximiser  $P_{stab}$
- Minimiser  $P_{loss}$
- Minimiser  $P_{cost}$

#### IV.4. Ecoulement de puissances

Le calcul d'écoulement de puissance est une étude en régime permanent du réseau électrique qui consiste à déterminer, en premier lieu, à chaque jeu de barres, l'amplitude et la phase de la tension ainsi que les puissances active et réactive injectées. Connaissant les tensions (amplitude et phase) aux jeux de barres ainsi que les puissances injectées (active et réactive), nous pouvons calculer, en deuxième lieu, les courants et les puissances dans les lignes et ceux fournis par les sources

##### IV.4.1. Objectif de calcul d'écoulement de puissance

Le calcul de l'écoulement de puissance est réalisé dans le but de : définir l'état du réseau ( $P$ ,  $Q$ ,  $V$ ,  $\delta$ , ...), Calcul des flux de courant, Calcul des pertes en ligne, Etablir une stratégie d'adaptation et de contrôle et l'Optimisation de la capacité de transit de puissance. Vérifier qu'aucune ligne n'est surchargée. La surcharge peut signifier que la ligne est proche de la stabilité thermique.

##### IV.4.2. Classification des variables de l'écoulement de puissance

La distinction entre les différentes variables qui participent à déterminer l'état électrique de réseau est dû à leur nature. Ils sont classés comme suite :

- **Les variables de perturbation ou non contrôlables**

Les variables de la demande (charge)  $P_D$  et  $Q_D$  qu'elles ne sont pas contrôlables car elles dépendent seulement des abonnés de la puissance

- **Les variables contrôlables**

Les variables contrôlables peuvent d'être regrouper en deux catégories : les variables de contrôle et les variables d'état.

- **Variables d'état**

Ce sont l'amplitude  $|V_i|$  et l'angle  $\delta_i$  de la tension au niveau de jeux de barres elles sont qualifiés d'état suite à leur valeur, elles déterminent l'état de réseau.

- **Variables de contrôle**

Les puissances générées à savoir PG ou QG (actives ou réactives) sont des variables de contrôles

## IV.5. Méthodes de calcul d'écoulement de puissances

Pour résoudre le problème de l'écoulement de puissance ; on a recours à plusieurs méthodes :

- Méthode de Gauss-Seidel.
- Méthode de Newton-Raphson.
- Méthode découplée de Newton.
- Méthode découplée rapide de Newton.

Dans notre travail, on s'est intéressé à la méthode de Newton-Raphson.

### IV.5.1. Méthode de Newton-Raphson

L'équation permettant de calculer la puissance apparente

$$\bar{S}_i = \bar{V}_i \cdot \left( \sum_{j=1}^n \bar{Y}_{ij} \bar{V}_j \right)^* \quad (\text{IV.5})$$

La méthode de Newton Raphson à plusieurs variantes selon que l'on exprime les éléments de la matrice admittance nodale et tensions aux accès en coordonnées cartésiennes, polaires ou hybrides. Nous nous intéresserons dans notre travail à la forme hybride. On a

$$\bar{V}_i = |V_i| e^{j\theta_i}$$

ET :

$$\bar{Y}_{ij} = |Y_{ij}| e^{j\varphi_{ij}} = G_{ij} + jB_{ij}$$

En séparant la partie réelle de la partie imaginaire on aura :

$$\begin{cases} P_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [-G_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j) + B_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j)] \\ Q_i = |V_i| \sum_{j=1}^n |V_j| [G_{ij} \sin(\theta_i - \theta_j) - B_{ij} \cos(\theta_i - \theta_j)] \end{cases} \quad (\text{IV.6})$$

Ou bien

$$\begin{cases} P_i = F(\theta, |\bar{V}|) \\ Q_i = G(\theta, |\bar{V}|) \end{cases} \text{ Pour } i=1, n \quad (\text{IV.7})$$

#### IV.5.2. Formulation des équations de la méthode de Newton Raphson

Le système d'équations (IV.7) est formé donc de deux équations permettant de calculer

$P$  et  $Q$  avec deux inconnus  $\theta$  et  $|\bar{V}|$ . [40]

En différenciant les équations (IV.7) on aura :

$$\begin{cases} \Delta P_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} \Delta |\bar{V}_j| \\ \Delta Q_i = \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial \theta_j} \Delta \theta_j + \sum_{j=1}^n \frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} \Delta |\bar{V}_j| \end{cases} \quad (\text{IV.8})$$

Physiquement, les  $\Delta P_i$  et  $\Delta Q_i$  représentent la différence entre les valeurs spécifiées et celles calculées des puissances actives  $P_{\text{spéc}}$  et réactives  $Q_{\text{spéc}}$  qui peuvent être calculées comme suit :

$$\begin{Bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_n \\ \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_n \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_1}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_1}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{Bmatrix} * \begin{Bmatrix} \Delta \theta_1 \\ \vdots \\ \Delta \theta_n \\ \Delta |\bar{V}_1| \\ \vdots \\ \Delta |\bar{V}_n| \end{Bmatrix} \quad (\text{IV.9})$$

Avec les éléments de la matrice jacobéenne sont donné comme suivant :

$$[j1] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.10})$$

$$[j2] = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.11})$$

$$[j3] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial \theta_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_1} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial \theta_n} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.12})$$

$$[j4] = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial Q_1}{\partial |\bar{V}_n|} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_1|} & \dots & \frac{\partial Q_n}{\partial |\bar{V}_n|} \end{bmatrix} \quad (\text{IV.13})$$

➤ **Nœud de charge (PQ)**

C'est un nœud connecté directement avec la charge, il ne possède aucune source d'énergie. Les puissances active et réactive sont considérées connues.

➤ **Nœud générateur (PV)**

C'est un nœud connecté directement avec un générateur ou une source d'énergie réactive. La puissance active et la tension sont considérées connues. La production de l'énergie réactive est limitée par des valeurs inférieures et supérieures,  $Q_{gmin}$  et  $Q_{gmax}$  respectivement. Si l'une des deux limites est atteinte, la valeur se fixe à cette limite et la tension se libère, le nœud devient alors un nœud (PQ).

➤ **Accès bilan (Slack bus)**

C'est un nœud connecté avec un générateur relativement puissant ; il est considéré dans le calcul d'écoulement de puissance afin de compenser les pertes actives et assurer l'égalité entre la demande et la génération de la puissance active. Dans un nœud bilan, l'amplitude et l'angle de la tension sont supposés connus. [41]

## IV.6. Méthodes d'optimisation de la puissance réactive [3]

### IV.6.1. Méthodes d'optimisation déterministes

Ces méthodes conduisent, pour une solution initiale donnée toujours au même résultat final. Pour trouver l'optimum, elles s'appuient sur une direction de recherche qui peut être fournie par les dérivées de la fonction objectif. Elles ont la réputation d'être efficaces lorsque la solution initiale est proche de l'optimum recherché. Cette particularité constitue un inconvénient majeur dans le cas d'une fonction objectif possédant plusieurs optimums, elles peuvent en effet, convergées vers un optimum local. On peut distinguer deux sous-classes dans ces approches :

**A) Méthodes directes ou sans gradient** : ces méthodes n'utilisent que les valeurs de la fonction objectif et des contraintes. Elles sont peu précises et convergent très lentement vers l'optimum local.

**B) Méthodes de type gradient** : elles utilisent la valeur du gradient des fonctions objectives et des contraintes comme une direction dans l'espace de recherche. Donc la vitesse de convergence est rapide. Ces méthodes sont puissantes pour résoudre les problèmes purement analytiques, mais elles dépendent forcément de la qualité de calcul du gradient. En plus, un inconvénient

important de méthodes indirectes est qu'elles peuvent être facilement piégées par un optimum global.

Dans la littérature, nous trouvons de nombreuses méthodes d'optimisation déterministes.

Il est possible de classer ces méthodes en deux grandes catégories : programmation linéaire et programmation non-linéaire.

Le premier groupe traite de la résolution de problèmes parfaitement représentés par un système d'équations linéaires tandis que la programmation non-linéaire traite les problèmes non-linéaires. Les méthodes déterministes sont basées sur le calcul de la dérivée du problème, ou sur des approximations de cette dernière. Elles nécessitent donc quelques informations sur le vecteur gradient.

Beaucoup de techniques d'optimisation classiques telles la programmation linéaire et non linéaire, la méthode de gradient, la méthode de Newton, la programmation quadratique, et la méthode du point intérieur ont été appliquées pour résoudre le problème d'optimisation lié à la planification et le contrôle des réseaux électriques, en particulier l'optimisation de la puissance réactive. Ces méthodes ayant la propriété de converger vers la solution mathématique exacte « réelle » tout en respectant certaines conditions liées au bon fonctionnement du processus envisagé, ces dernières sont appelées contraintes d'égalités et d'inégalités.

#### *IV.6.1.1. Méthode du gradient*

Historiquement, les méthodes de gradient sont les plus anciennes. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte sur la connaissance de la dérivée de la fonction objectif en chacun des points de l'espace.

Cette méthode peut être classée en deux catégories de premier ordre et de deuxième ordre, le premier ordre basé sur une approximation linéaire en séries de Taylor avec initialisation de gradient, et le deuxième ordre basé sur l'approximation quadratique en séries de Taylor avec initialisation de gradient en utilisant l'Hessien  $H$ .

#### *IV.6.1.2. Méthode de Newton*

La méthode de Newton est une méthode très puissante à cause de sa convergence rapide, en particulier si l'estimation initiale de la solution  $x(0)$  est suffisamment proche de la solution optimale  $x^*$ . L'idée de cette méthode est de minimiser, à chaque itération  $k$ ,

une approximation quadratique de la fonction objectif originale  $f(x)$  au voisinage de l'estimation actuelle de la solution  $x(k)$ .

#### *IV.6.1.3. Programmation dynamique*

La programmation dynamique est une technique classique de conception d'algorithmes pour résoudre des problèmes en temps polynomial. L'idée générale est de résoudre un problème en utilisant des solutions à des sous-problèmes précédemment résolus. Pour ce faire, la programmation dynamique applique une approche dite « du bas vers le haut », c'est-à-dire qu'on commence par résoudre les sous-problèmes les plus petits, et donc les plus faciles, pour ensuite résoudre des problèmes de plus en plus grands, jusqu'à finalement déterminer une solution du problème initial. Bien souvent, comme la programmation dynamique nécessite déstocker les solutions de tous les sous-problèmes résolus, il est également nécessaire de disposer d'un espace exponentiel.

#### *IV.6.1.4. La méthode du point intérieur*

Méthode du point intérieur (IPM), comme l'une des méthodes les plus efficaces, a été étendue à résoudre différents types de problèmes d'optimisation dans le domaine des réseaux électriques. À l'origine, les méthodes de type « Point Intérieur » ont été conçues pour résoudre les problèmes de programmation non linéaire. Une caractéristique intéressante des méthodes du point intérieur est leur faculté à traiter les inégalités non linéaires sans recourir à une identification de l'ensemble des contraintes actives, comme dans les méthodes de Newton. Des recherches plus approfondies sur ces méthodes ont montré qu'elles donnaient d'être bonnes performances en termes de vitesse de convergence pour les problèmes de grande échelle.

#### *IV.6.1.5. La technique de programmation quadratique*

La programmation quadratique est une classe spéciale de la programmation non linéaire où la fonction objectif est une approximation quadratique avec des contraintes linéaires ou linéarisées. Ces techniques utilisent les dérivées du deuxième ordre pour améliorer la vitesse de convergence ainsi que la procédure quasi-Newtonienne, ou une approximation du Hessien est faite. Cependant, dans les méthodes quasi-Newtoniennes la matrice Hessienne réduite construite itérativement est une matrice pleine, ce qui peut rendre ces méthodes trop lentes si le nombre de variables est important.

#### *IV.6.1.6. Méthodes de Programmation quadratique séquentielles*

Cette technique est également connue sous le nom de séquentielles, ou récursives, la programmation quadratique, utilisent la méthode de Newton (ou les méthodes quasi newtoniennes) pour résoudre directement les conditions de Karush-Kuhn-Tucker pour un problème donné, elle est développée par Schittkowski en 1983, est une méthode de programmation non-linéaire. Elle a été reconnue comme étant une des méthodes les plus efficaces pour résoudre des problèmes d'optimisation avec contraintes de taille petite et moyenne. Comme son nom le suggère, la méthode PQS trouve la solution optimale par une séquence de problèmes de programmation quadratique. À chaque itération, une approximation quadratique de la fonction objective et des approximations linéaires des contraintes sont utilisées.

#### **IV.6.2. Méthodes d'optimisations stochastiques**

Ces algorithmes, nécessitent ni point de départ, ni la connaissance de gradient de la fonction objectif, pour atteindre la solution optimale. Elles explorent l'espace de recherche grâce, en partie, à des mécanismes de transition aléatoires. Avec le même point initial, deux optimisations successives peuvent produire un résultat différent : ces algorithmes n'ont donc pas un fonctionnement déterministe. Cependant elles demandent un nombre important d'évaluations de la fonction objectif en comparaison avec les méthodes déterministes exploitant la dérivée de la fonction objective.

L'arrivée d'une nouvelle classe de méthodes d'optimisation stochastiques, nommées

Méta-heuristiques, marque une grande révolution dans le domaine de l'optimisation. En effet, celles-ci s'appliquent à toutes sortes de problèmes combinatoires, et elles peuvent également s'adapter aux problèmes continus.

Ces méthodes permettent de trouver une solution de bonne qualité en un temps de calculent général raisonnable, sans garantir l'optimalité de la solution obtenue. Ces méthodes sont avantageusement utilisées pour la résolution des problèmes de grande taille. Les méthodes heuristiques peuvent être divisées en deux classes. Il y a, d'une part, les algorithmes spécifiques à un problème donné qui utilisent des connaissances du domaine, et d'autre part les algorithmes généraux qui peuvent être utilisés pour une grande variété de problèmes.

##### *IV.6.2.1. Algorithmes Génétiques*

Les algorithmes génétiques (GA) sont une méthode d'optimisations stochastiques basées sur les mécanismes de la sélection naturelle. La solution optimale est cherchée à partir d'une population

de solutions en utilisant des processus aléatoires. La recherche de la meilleure solution est effectuée en créant une nouvelle génération de solutions par application successive, à la population courante, de trois opérateurs : la sélection, le croisement, et la mutation. Ces opérations sont répétées jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit atteint.

#### *IV.6.2.2. Essaims de Particules*

L'optimisation par essaim de particules PSO (Particle Swarm Optimization) est une technique d'optimisation parallèle développée par Kennedy et Eberhart. Elle est inspirée du comportement social des individus qui ont tendance à imiter les comportements réussis qu'ils observent dans leur entourage, tout en y apportant leurs variations personnelles. A la différence des algorithmes génétiques, qui miment les mécanismes génétiques de l'évolution,

PSO s'inspire plutôt de la formation d'une culture.

#### *IV.6.2.3. Recuit Simulé*

Le recuit simulé est une version améliorée de la méthode d'amélioration itérative. Il a été proposé en 1983 par « Kirkpatrick » pour la résolution des problèmes d'optimisation.

Elle est inspirée du processus de recuit utilisé en métallurgie pour améliorer la qualité d'un solide en cherchant un état d'énergie minimum. Le métal est tout d'abord chauffé à une température élevée à laquelle il devient liquide, puis refroidi de manière progressive pour retrouver sa forme solide. Chaque température est maintenue jusqu'à ce que la matière atteigne un équilibre thermo hydraulique. La méthode du recuit simulé, appliquée aux problèmes d'optimisation, considère une solution initiale et recherche dans son voisinage une autre solution de façon aléatoire. Au début de l'algorithme un paramètre  $T$  apparenté à la température, est déterminé et décroît tout au long de l'algorithme pour tendre vers 0. De l'avaleur de ce paramètre va pondre la probabilité d'acceptation des solutions détériorées.

#### *IV.6.2.4. Recherche Taboue*

La Recherche Tabou est une technique heuristique dont les principes ont été proposés pour la première fois par « Fred Glover en 1986 », et elle est devenue très classique en optimisation. Elle n'a aucun caractère stochastique et utilise la notion de mémoire pour éviter de tomber dans un optimum local, le principe de l'algorithme est le suivant ; à chaque itération, le voisinage de la solution est sélectionné, en appliquant le principe, la méthode autorise de remonter vers des solutions qui semblent moins intéressants mais qui ont peut-être un meilleur voisinage. Pour éviter les phénomènes de cyclane entre deux solutions, la méthode à l'interdiction de visiter une



solution récemment visitée, pour cela une liste tabou contenant les attributs des dernières solutions considérées est tenue à jour. Chaque nouvelle solution considérée enlève de cette liste la solution la plus anciennement visitée. Ainsi, la recherche de la solution suivante se fait dans le voisinage de la solution actuelle sans considérer les solutions appartenant à la liste taboue.

#### *IV.6.2.5. Stratégies d'Évolution*

Développées par Rechenberg et Schwefel en 1965, elles utilisent une mutation avec une distribution normale pour modifier les individus présentés comme des vecteurs de valeurs réelles. La mutation et le croisement sont les deux opérateurs de recherche dans l'espace des solutions potentielles et l'espace des paramètres de stratégies. La sélection peut être déterministe ou stochastique.

#### *IV.6.2.6. Programmation Évolutionnaire*

Développée par J. Fogel en 1962 qui a utilisé la mutation comme seul opérateur de recherche. Appliquée aux problèmes d'optimisation continue, la programmation évolutionnaire (Evolutionary Programming) est similaire aux Stratégies d'Évolution, tous deux représentant les individus avec des vecteurs de valeurs réelles incluant les paramètres de stratégie. Elle utilise une mutation de distribution normale et une sélection déterministe ou stochastique.

#### *IV.6.2.7. La méthode de colonie de fourmis*

La méthode de colonie de fourmis s'inspire du comportement des colonies de fourmis réelles. La méthode se caractérise par la combinaison d'une approche de construction et des mécanismes d'apprentissage fondés sur la mémorisation. Le principe de cette méthode est le suivant : Malgré la vision très limitée de chaque fourmi, une colonie de fourmis parvient à minimiser la longueur du chemin conduisant à une source de nourriture, grâce aux traces chimiques (phéromones) laissées par chacune des fourmis.

Un principe analogue a été utilisé pour traiter des problèmes d'optimisation. La méthode consiste à répéter un algorithme de construction (assimilé à l'action d'une fourmi) dans lequel chacun des choix est déterminé en tenant compte à la fois de la nature aléatoire du mouvement d'une fourmi et des traces laissées par les fourmis précédentes. Ainsi, une fourmi qui a emprunté une arête incite les fourmis suivantes à emprunter cette même arête à leur tour.

## **IV.7. Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté la fonction d'optimisation multi-objective et ces variables pour une planification de l'énergie réactive. On a présenté aussi les différentes méthodes d'optimisation des puissances réactives dans les réseaux électriques, ensuite on a introduit la notion d'écoulement de puissance et une illustration de la méthode de Newton Raphson vu son rôle essentiel dans le traitement du problème de planification.

## Chapitre V. Application et résultats

### V.1. Topologie des réseaux

Le réseau étudié représenté par la figure V.1 est composé de 8 jdb, de 10 lignes d'un accès bilan, de 2 accès générateurs et de 5 accès charges et se présente comme suivants :

8 accès notés (1,2,3,4,5,6,7et8).

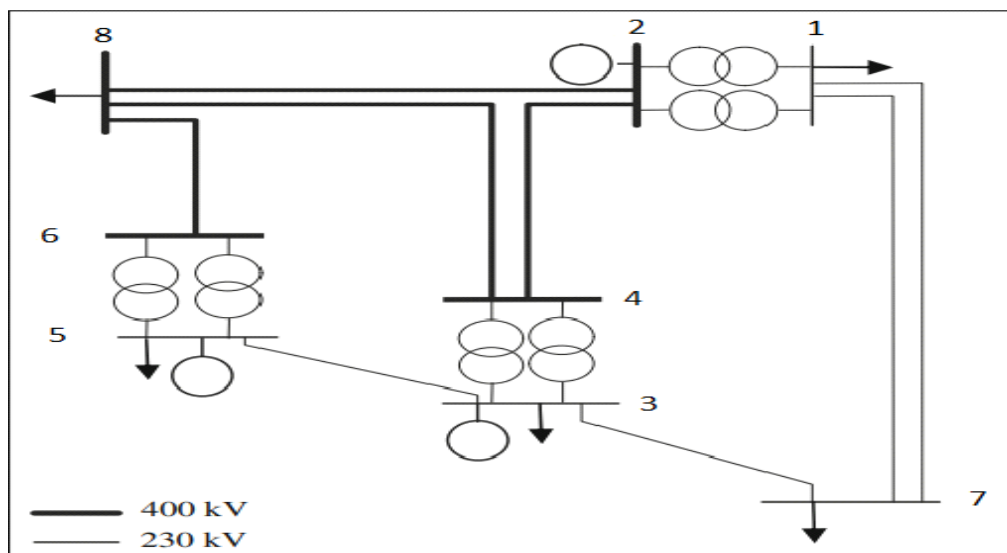
L'accès : 2 représente l'accès bilan.

Les accès : 1,4,6,7 et 8 sont des accès charges.

Les accès : 3 et 5 sont des accès générateurs.

10 lignes. (Différents niveaux de tensions ; voire 400kv ;230kv)

3 générateurs.



*Figure V.1.* Structure du réseau étudié

Les caractéristiques des lignes du réseau à savoir la résistance linéique  $R$ , la réactance linéique  $X$  et sa longueur  $L$  sont représentés dans les tableaux (V.1).

Dans le tableau (V.2) sont représentées les caractéristiques des jeux de barres, à savoir : l'amplitude et argument spécifiées de la tension ( $|V_i|$  et  $\theta_i$ ) de l'accès bilan ; l'amplitude spécifiée de la tension  $|V_i|$ , l'angle de phase initiale  $\theta_i$ , la puissance active injectée  $P_{gi}$  et les charges ( $P_{li}$ ,  $Q_{li}$ ), les valeurs limites ( $Q_{imin}$  et  $Q_{imax}$ ) des accès générateurs ; les amplitude et l'angle de phase initiaux ( $|V_i|$  et  $\theta_i$ ) de la tension, les charges ( $P_{li}$ ,  $Q_{li}$ ) ainsi que la puissance réactive injectée ( $Q_{inj}$ ) des accès charge.

**Tableau V.1.** Données des lignes

| Nl | Nr | R(pu/km) | X(pu/km) | L(km) |
|----|----|----------|----------|-------|
| 1  | 7  | 0.000125 | 0.00050  | 600   |
| 2  | 8  | 0.000150 | 0.00025  | 200   |
| 2  | 1  | 0.013000 | 0.25700  | 0     |
| 2  | 4  | 0.000015 | 0.00025  | 400   |
| 3  | 5  | 0.000250 | 0.00100  | 200   |
| 3  | 7  | 0.000250 | 0.00100  | 400   |
| 3  | 4  | 0.013000 | 0.25700  | 0     |
| 4  | 8  | 0.000015 | 0.00025  | 310   |
| 5  | 6  | 0.013000 | 0.25700  | 0     |
| 6  | 8  | 0.000015 | 0.00025  | 200   |

Où :

**Nl** : C'est l'accès départ.

**Nr** : C'est l'accès final.

**R** : C'est la résistance de la ligne.

**X** : C'est la réactance de la ligne.

**L** : C'est la longueur de la ligne.

**Tableau V.2.** Données des accès

| Na | Ta | V (pu) | Angle<br>(rad) | Pli<br>(MW) | Qli<br>(MVar) | Pgi<br>(MW) | Qgi<br>(MVar) | Qmin<br>(MVar) | Qmax<br>(MVar) | Qinj<br>(MVar) |
|----|----|--------|----------------|-------------|---------------|-------------|---------------|----------------|----------------|----------------|
| 2  | 1  | 1.000  | 0.00           | 0.000       | 0.00          | 0.00        | 0.00          | -500.0         | 500            | 0.00           |
| 1  | 3  | 1.000  | 0.00           | 52.00       | 25.20         | 0.00        | 0.00          | 0.00           | 0.00           | 35.00          |
| 3  | 2  | 1.000  | 0.00           | 156.00      | 75.050        | 50.00       | 18.70         | -40.00         | 40.00          | 40.00          |
| 4  | 3  | 1.000  | 0.00           | 0.00        | 0.00          | 0.00        | 0.00          | 0.00           | 0.00           | 70.00          |
| 5  | 2  | 1.000  | 0.00           | 26.00       | 12.60         | 65.00       | 39.3          | -45.00         | 45.00          | 0.00           |
| 6  | 3  | 1.000  | 0.00           | 0.00        | 0.00          | 0.00        | 0.00          | 0.00           | 0.00           | 0.00           |
| 7  | 3  | 1.000  | 0.00           | 104.00      | 50.30         | 0.00        | 0.00          | 0.00           | 0.00           | 60.00          |
| 8  | 3  | 1.000  | 0.00           | 156.00      | 75.50         | 0.00        | 0.00          | 0.00           | 0.00           | 110.0          |

Où :

**Na** : Numéro de l'accès.

**Ta** : Type de l'accès.

1 : Accès bilan.

2 : Accès générateur.

3 : Accès charge.

**|V|** : Amplitude de la tension des accès.

**Angle** : Le déphasage de la tension.

**Pli** : La puissance active de la charge à l'accès i.

**Qli** : La puissance réactive de la charge à l'accès i.

**Pgi** : La puissance active des générateurs à l'accès i

**Qgi** : La puissance réactive des générateurs à l'accès i.

**Qimin** : La puissance réactive minimale à l'accès i.

**Qmax** : La puissance réactive maximale à l'accès i.

**Qinj** : La puissance réactive injecté à l'accès i.

## V.2. Description du problème

Le réseau représenté par la figure V.1 sera étudié avec le programme réalisé sous Matlab d'abord dans des conditions normales et aussi avec contingence condition (N-1) dans les cas suivants

Etude du réseau sans compensation

Etude du réseau avec une compensation statique

Etude du réseau avec une compensation dynamique

Dans chaque cas, le calcul d'écoulement de puissance continu permet d'établir le bilan de puissance, de déterminer l'état des tensions du réseau, l'indice de performance de la tension  $V_{Prof}$  et l'indice de stabilité  $P_{Stab}$  du réseau ainsi que les courbes de charges des différents jdb. Le programme ACLF est exécuté en augmentant progressivement la charge d'abord par un pas de

0.05pu, puis de 0.005pu jusqu'à la divergence du programme d'écoulement de puissance Acpf, la puissance qui précède celle aboutissant à la divergence représente l'indice de stabilité  $P_{Stab}$ . Le système est considéré instable en tension pour tout charge supérieur à  $S(A)$  voir figure IV.1.

Pour le cas de la compensation statique et dynamique (2ième et 3ième cas) sans contingence, la puissance réactive est insérée dans le jdb ayant le profil de tension le plus bas trouvée dans le 1<sup>ier</sup> cas. Dans le cas de contingence (N-1), la puissance réactive est insérée d'abord dans le jdb ayant le profil de tension le plus bas trouvée sans contingence. La puissance réactive est insérée ensuite dans le jdb de la ligne provoquant la divergence. Une fois le système converge pour toutes les contingences (N-1), le coût de la compensation statique est calculé en utilisant la formule (IV.3) avec  $C_{fi} = 5C_{vi}$  et  $C_{vi} = 0.1R$ .

Pour le 3<sup>ième</sup> cas (compensation dynamique), la taille en (pu) de l'énergie réactive injectée est prise avec un pas de 0.1pu, cette dernière est insérée à chaque fois dans le jdb provoquant la divergence jusqu'à ce que le réseau soit stable quel que soit la contingence avec un coût optimale en minimisant la fonction objectif donnée par la formule (IV. 4).

Le système est considéré comme sécurisé si le flux de charge converge, en plus de satisfaire les limites de des tensions (0,95-1,05 pu).

### V.3. Programme de simulation

Le travail se fait avec un programme réalisé sous MATLAB, il fait le bilan de puissance et détermine les tensions aux accès, il fait aussi l'écoulement de puissance continu et donne les courbes de charge de chaque jdb et détermine l'indice de performance de la tension  $V_{Prof}$  donnée par l'équation (IV. 1) et l'indice de stabilité  $P_{Stab}$  du réseau dans les conditions normales et dans les conditions de contingence (N-1).

Enfin il calcul le coût de la compensation  $P_{cost}$  et les pertes du système  $P_{Loss}$

Ce programme se compose d'un programme principal(ACLF) et de quatre (04) autres sous-programmes ; Acpf pour le calcul d'écoulement de puissances, Ybus pour le calcul de la matrice admittance, Print\_Rpp pour l'affichage des résultats et un scripte de données et enfin Courbe\_de\_charge pour tracer les courbes de charge.

Le système est considéré comme sécurisé si le flux de charge converge et en plus de satisfaire les limites de débit de la puissance, toutes les tensions sont, disons, de 0,95-1,05 pu. (Marge admissible toléré).

### V.3.1. Organigramme de simulation

On résume le programme de simulation par un organigramme comme le montre la figure V.2

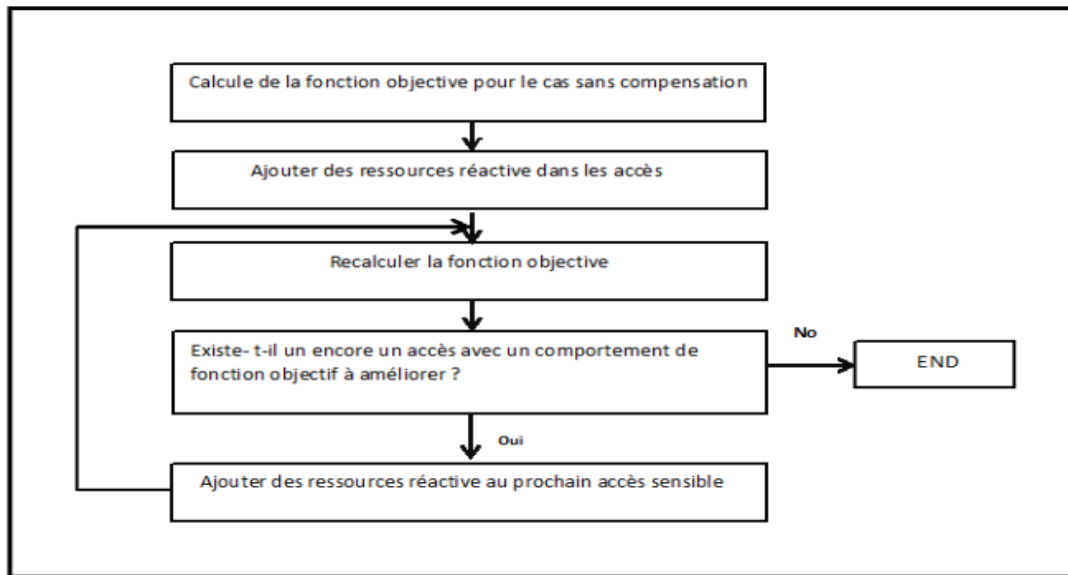


Figure V.2. Organigramme de simulation

### V.4. Eventualité et scénarios

Différents scénarios peuvent se présenter, en réponse à une éventualité unique, les conditions suivantes peuvent survenir :

- a) Le flux de charge converge et le système montre une condition acceptable en termes de profil de la tension. Aucune autre action n'est nécessaire.
- b) Le flux de charge ne converge pas, mais pas en raison d'une condition d'îlotage. Plus loin une action est nécessaire pour résoudre le problème.
- c) Le flux de charge converge mais certaines des tensions sont hors de portée  $0.95 \leq V_i \leq 1.05pu$ . D'autres actions sont requises.

### V.5. Résultats et interprétation

Le réseau à huit (8) accès et dix (10) lignes représenté par la figure V.1 est simulé avec le programme réalisé sous MATLAB (décrit dans la section V.3) dans des différents états comme suit :

- Etude du réseau sans compensation
- Etude du réseau avec une compensation statique
- Etude du réseau avec une compensation dynamique

### V.5.1. Etude du réseau sans compensation

On simule le réseau de la figure V.1 par le programme réalisé avec les données sans compensation d'abord dans les conditions normales ensuite dans les conditions de contingence (N-1)

#### a) Condition sans contingence

Le réseau ne présentant aucune éventualité de contingence est étudié avec le programme ACLF.

Le calcul d'écoulement des puissances continu permet de déterminer l'état des tensions du réseau tableau (V.3), d'établir le bilan de puissance tableau (V.4), l'indice de performance de la tension  $V_{Prof}$  et l'indice de stabilité  $P_{Stab}$  du réseau ainsi que les courbes de charge des différents jdb Fig. V.3.

$$V_{Prof} = 0.00302$$

$$P_{Stab} = 1.57$$

L'indice de performance de la tension  $V_{Prof} = 0.003$  montre que le profil est bon. Les charges du système peuvent être augmentées jusqu'à la charge limite représenté par  $P_{Stab}$ .

**Tableau V.3.** Les performances de la tension

| Numéro d'accès | V     | $\Phi$ |
|----------------|-------|--------|
| 2              | 1.00  | 0.00   |
| 1              | 0.998 | -0.005 |
| 3              | 1.016 | -0.098 |
| 4              | 1.022 | -0.096 |
| 5              | 1.00  | -0.034 |
| 6              | 1.00  | -0.034 |
| 7              | 0.945 | -0.236 |
| 8              | 1.014 | -0.082 |



**Tableau V.4.** Les puissances transitant dans les lignes

| Ligne | P (pu) | Q (pu) |
|-------|--------|--------|
| 2 - 1 | 1.261  | -0.016 |
| 2 - 4 | 0.965  | -0.233 |
| 2 - 8 | 1.647  | -0.316 |
| 1 - 7 | 0.737  | +0.074 |
| 3 - 4 | -1.130 | -1.007 |
| 3 - 5 | -0.287 | 0.164  |
| 3 - 7 | 0.358  | 0.114  |
| 4 - 8 | -1.176 | 0.116  |
| 5 - 6 | 0.097  | -0.27  |
| 6 - 8 | 0.097  | -0.027 |

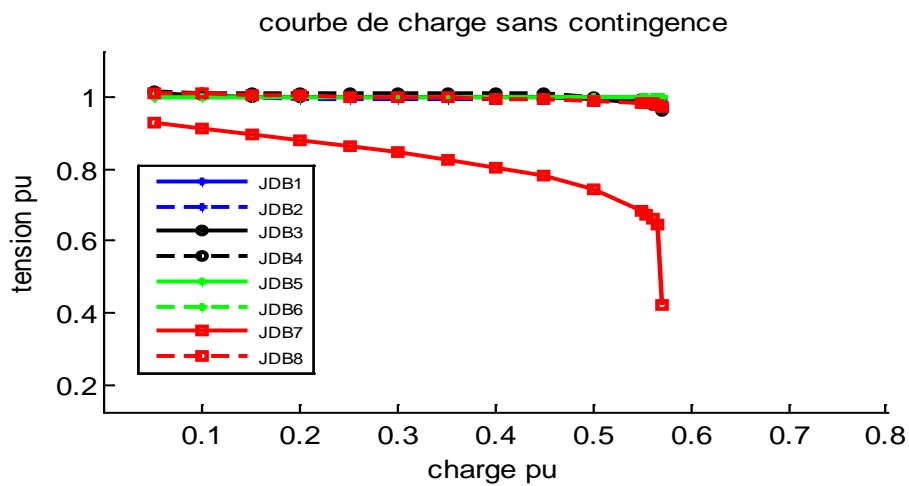


Figure V.3. Courbe de charge pour le cas sans contingence et son compensation

### b) Condition avec contingence (N-1)

Nous allons provoquer des éventualités de contingence (N-1) en éliminant à chaque fois une ligne. A l'aide du programme ACLF, on étudie le comportement du réseau pour chaque contingence (N-1) en calculant  $V_{\text{prof}}$  et  $P_{\text{stab}}$  représentés dans le tableau (V.5) ainsi et les courbes de charge sont montrés dans la figure V.4 comme suit :

Tableau V.5. Résultats dans le cas sans compensation avec la contingence (N-1)

| N° de ligne | Ligne | $V_{\text{prof}}$ | $P_{\text{stab}}$ |
|-------------|-------|-------------------|-------------------|
| 1           | 1 - 7 | Ne converge pas   | Ne converge pas   |
| 2           | 2 - 8 | 0.00425           | 1.335             |
| 3           | 3 - 5 | 0.00261           | 1.56              |
| 4           | 3 - 7 | Ne converge pas   | Ne converge pas   |
| 5           | 6 - 8 | 0.00308           | 1.57              |
| 6           | 2 - 1 | Ne converge pas   | Ne converge pas   |
| 7           | 5 - 6 | 0.00308           | 1.57              |
| 8           | 3 - 4 | Ne converge pas   | Ne converge pas   |
| 9           | 2 - 4 | 0.00273           | 1.495             |
| 10          | 4 - 8 | 0.00268           | 1.565             |

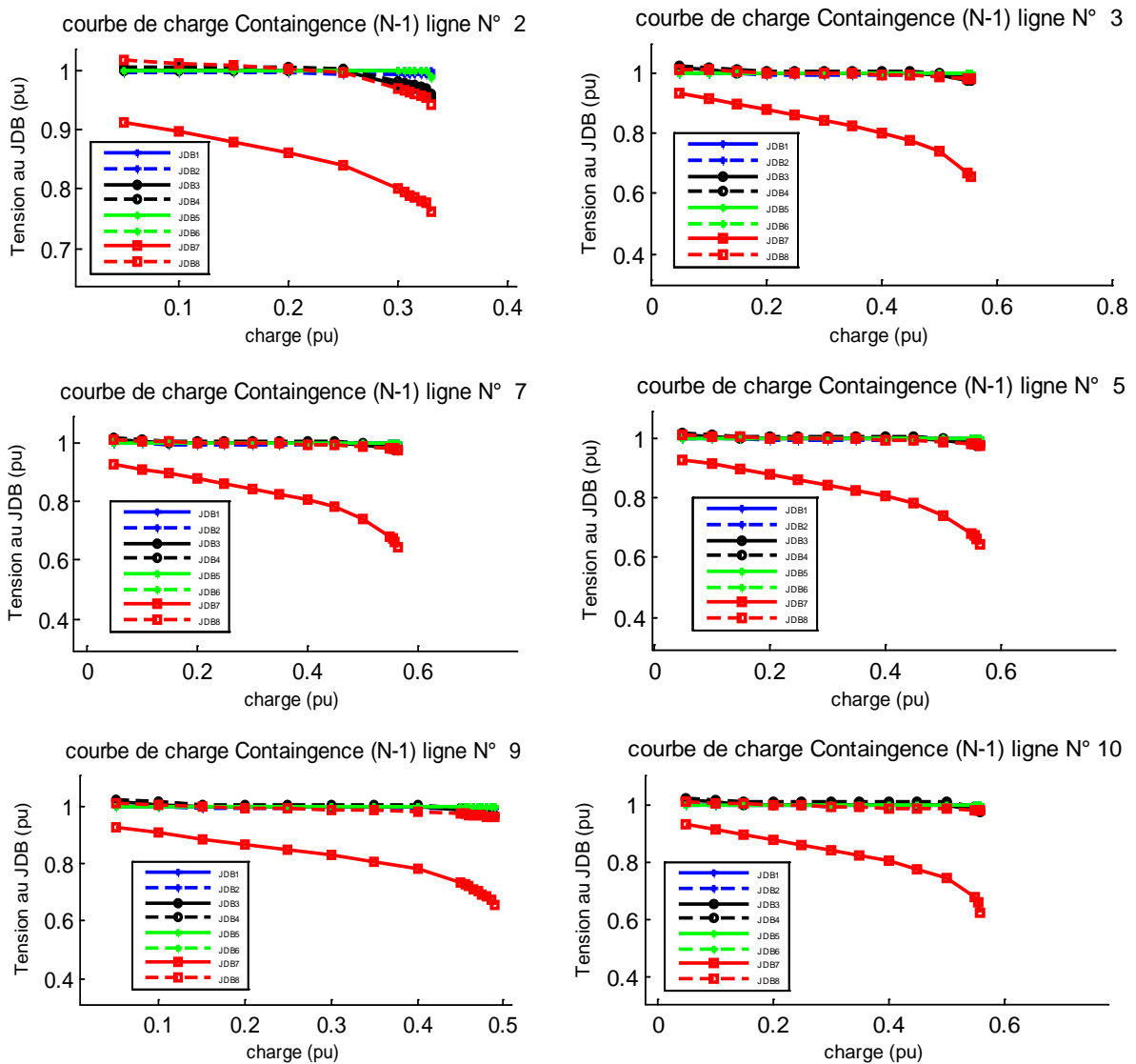


Figure V.4. Courbes de charge pour le cas sans compensation avec contingence

### c) Interprétation

Dans cette essai on a remarqué que les tensions des accès sont dans la plage admissible à part celle dans l'accès 7. On remarque aussi pour certaine éventualité de contingences (N-1) concernant les lignes (1, 4, 6, 8), le système ne converge pas. D'où la nécessité d'une compensation pour éliminer les non convergence du système et améliorer le comportement du réseau en terme de tension.

### V.5.2 Etude du réseau avec une compensation statique 0.5 (pu) dans l'accès 7

Afin de régler le problème du réseau en terme de tension ; et aussi les non convergences dans le cas d'éventualités de contingence (N-1), on simule le réseau avec le programme réalisé en ajoutant des ressources de puissance réactive aux accès ou le niveau de tension est faibles (ici c'est l'accès 7).

#### a) Condition sans contingence

Nous simulons le réseau avec compensation sans contingence en ajoutant une puissance réactive de 0.5 (pu) à l'accès 7, le programme calcule  $V_{\text{prof}}$  et  $P_{\text{stab}}$  représentés dans le tableau (V.6), les niveaux de tension des accès et leurs angles de déphasages représentés dans le tableau (V.7) et les puissances actives et réactives transitant dans les lignes représentées dans le tableau (V.8) ainsi que les courbes de charge montrées dans la figure V.5

Tableau V.6. Profil et stabilité de tension dans le cas de compensation 0.5pu accès 7 sans contingence

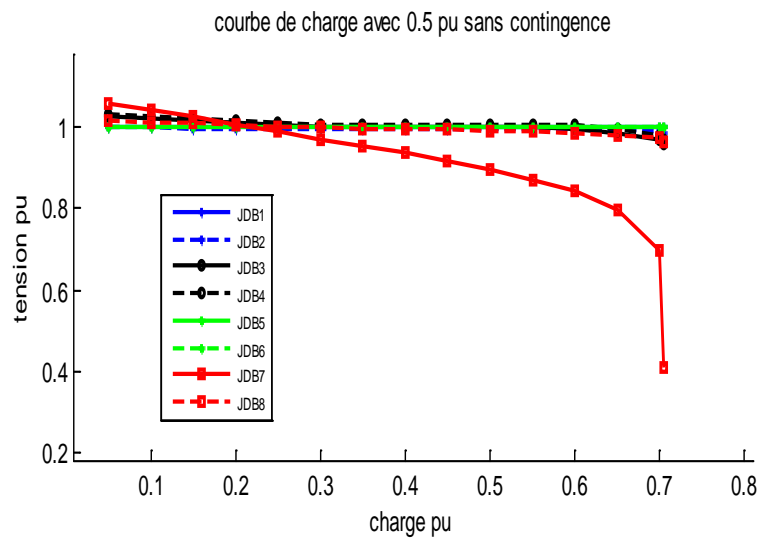
| $V_{\text{prof}}$ | $P_{\text{stab}}$ |
|-------------------|-------------------|
| 0.0053            | 1.705             |

**Tableau V.7.** Les performances de la tension avec 0.5 (pu) a l'accès 7 sans contingence

| Numéro d'accès | V     | $\phi$ |
|----------------|-------|--------|
| 2              | 1.00  | 0.00   |
| 1              | 0.999 | -0.006 |
| 3              | 1.031 | -0.098 |
| 4              | 1.036 | -0.096 |
| 5              | 1.00  | -0.032 |
| 6              | 1.00  | -0.032 |
| 7              | 1.073 | -0.242 |
| 8              | 1.02  | -0.082 |

**Tableau V.8.** Les puissances transitant dans les lignes avec 0.5 (pu) a l'accès 7 sans contingence

| Ligne | P (pu) | Q (pu) |
|-------|--------|--------|
| 2 - 1 | 1.275  | -0.424 |
| 2 - 4 | 0.967  | -0.373 |
| 2 - 8 | 1.642  | -0.427 |
| 1 - 7 | 0.752  | -0.334 |
| 3 - 4 | -1.131 | -0.784 |
| 3 - 5 | -0.283 | 0.242  |
| 3 - 7 | 0.354  | -0.168 |
| 4 - 8 | -0.174 | 0.231  |
| 5 - 6 | 0.101  | -0.038 |
| 6 - 8 | 0.101  | -0.038 |



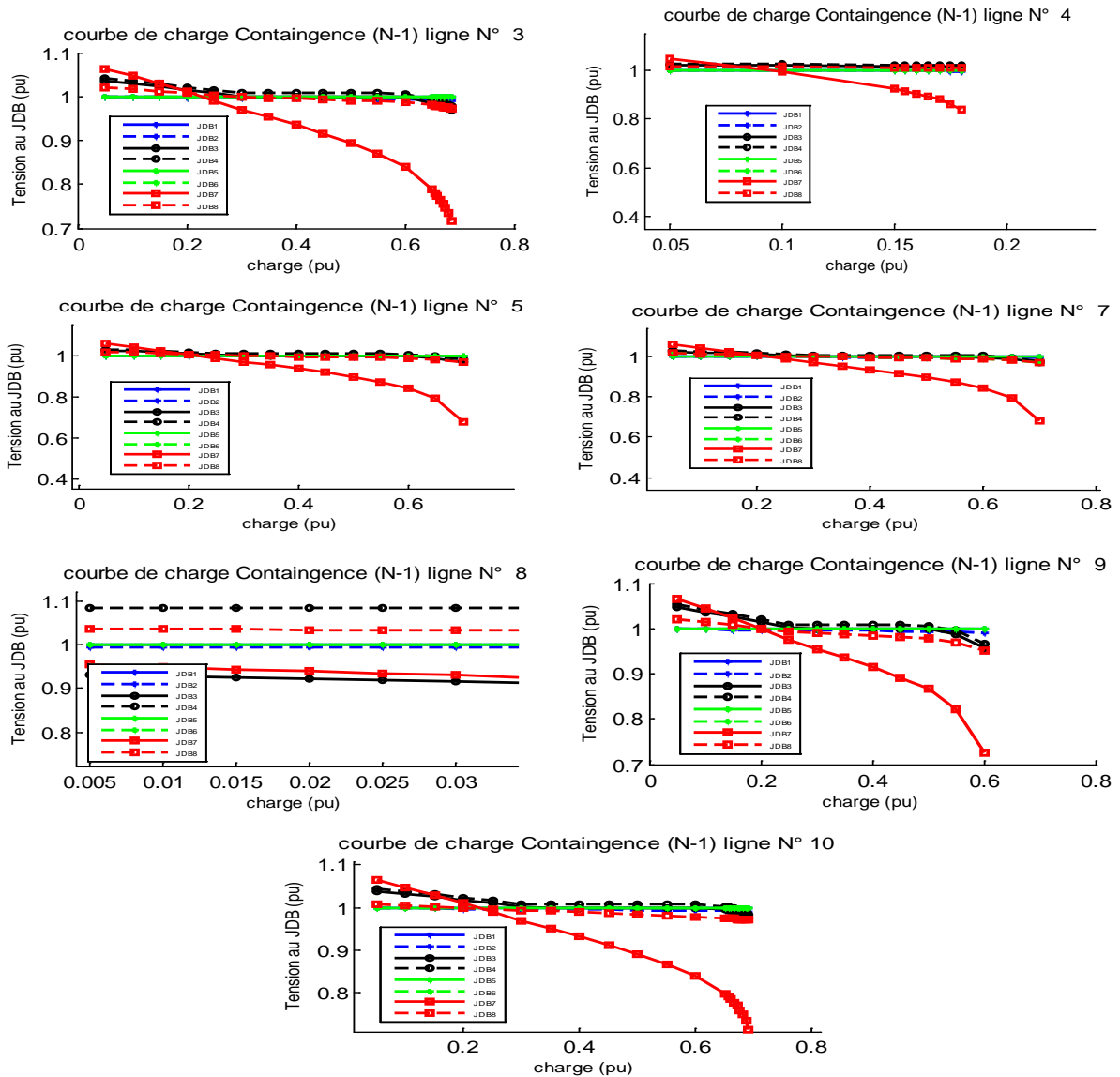
**Figure V.5.** Courbe de charge pour le cas de compensation avec 0.5(pu) dans l'accès 7 sanscontingence

*b) Condition avec contingence (N-1)*

Nous allons provoquer des éventualités de contingence (N-1) en éliminant à chaque fois une ligne dans le cas de compensation avec 0.5 (pu) dans l'accès 7 On va étudier par le programme le comportement du réseau pour chaque (N-1) éventualité en calculons  $V_{prof}$  et  $P_{stab}$ . Les résultats sont représentés dans le tableau (V.9) ainsi les courbes de charge de tous les jdb pour chaque contingence montrer dans la figure V.6.

**Tableau V.9.** Résultats dans la condition N-1(contingence) avec compensation 0.5pu

| N° de ligne | ligne | Vprof           | Pstab           |
|-------------|-------|-----------------|-----------------|
| 1           | 1 - 7 | 0.07439         | 1.065           |
| 2           | 2 - 8 | 0.008           | 1.395           |
| 3           | 3 - 5 | 0.00644         | 1.69            |
| 4           | 3 - 7 | 0.00723         | 1.185           |
| 5           | 6 - 8 | 0.00523         | 1.705           |
| 6           | 2 - 1 | Ne converge pas | Ne converge pas |
| 7           | 5 - 6 | 0.00523         | 1.705           |
| 8           | 3 - 4 | 0.01163         | 1.04            |
| 9           | 2 - 4 | 0.01427         | 1.605           |



**Figure V.6.** Courbes de charge pour le cas avec compensation de 0.5(pu) dans l'accès 7 avec contingence

**Remarque :** pour les ligne non cité (1.4.6.8) le système ne converge pas

### *c) Interprétation*

Pour ce cas (compensation avec 0.5 (pu)) on note que on a éliminé les non convergence due aux éventualités de contingences dans les lignes (1-7) (3-7) (3-4) et d'autre part celle due à la ligne (2-1) et toujours présente comme bien illustrer dans le tableau (V.9).

On note aussi qu'avec cette compensation on a amélioré les niveaux de tensions des accès ainsi les paramètres  $V_{\text{prof}}$  et  $P_{\text{stab}}$  et les puissances transitant dans les lignes ce qui est bien illustrer à travers les courbes de charge figure V.5 et la figure V.6.

On ajoute une ressource d'énergies réactive de 0.5 (pu) dans l'accès 1(plus faible).

### V.5.3. Etude du réseau avec une Compensation statique avec 0.5 (pu) dans l'accès 7 et 1

#### *a) Condition sans contingence*

Nous simulons le réseau avec compensation 0.5 (pu) dans l'accès 7 et 0.5 (pu) dans l'accès 1 sans contingence, le programme calcul  $V_{\text{prof}}$  et  $P_{\text{stab}}$  représenter dans le tableau (V.10) on obtient aussi les niveaux de tension des accès et leurs angles de déphasages représentés dans le tableau (V.11) et les puissances active et réactive transitassent dans les lignes dans le tableau (V.12) ainsi la courbe de charge des jdb montrer sur la figure V.7

**Tableau V.10.** Profil et stabilité de tension avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1

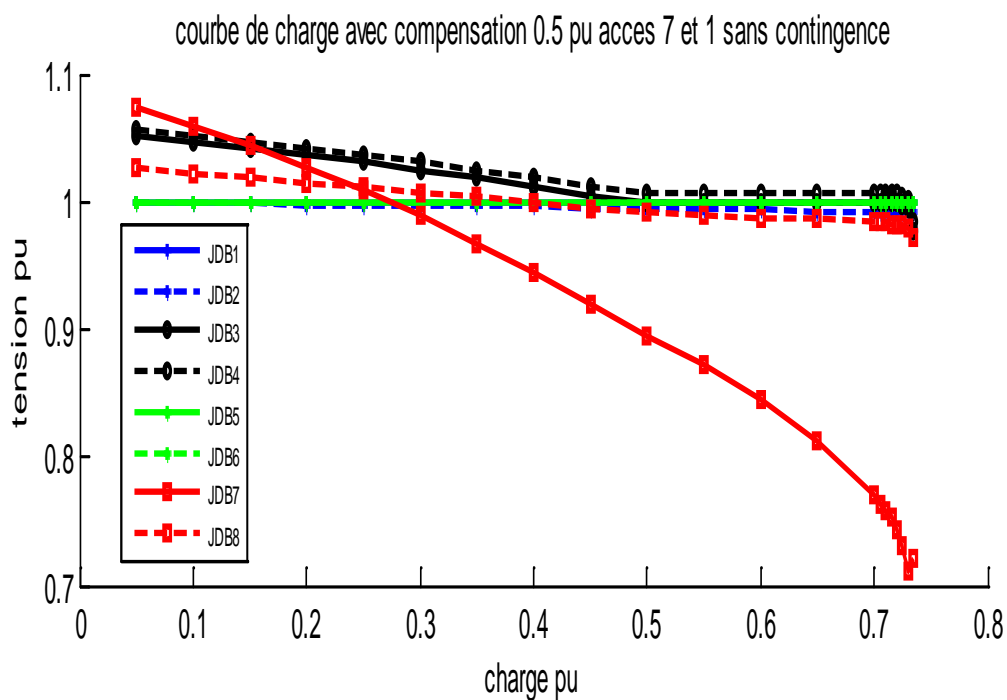
| $V_{\text{prof}}$ | $P_{\text{stab}}$ |
|-------------------|-------------------|
| 0.00556           | 1.71              |

**Tableau V.11.** Les performances de la tension avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1

| Numéro d'accès | V     | $\varphi$ |
|----------------|-------|-----------|
| 2              | 1.00  | 0.00      |
| 1              | 1.001 | -0.007    |
| 3              | 1.031 | -0.098    |
| 4              | 1.036 | -0.096    |
| 5              | 1.00  | -0.032    |
| 6              | 1.00  | -0.032    |
| 7              | 1.075 | -0.242    |
| 8              | 1.02  | -0.082    |

**Tableau V.12.** Les puissances transitant dans les lignes avec 0.5 (pu) accès 7 et 0.5 (pu) accès 1

| ligne | P (pu) | Q (pu) |
|-------|--------|--------|
| 2 - 1 | 1.277  | -0.924 |
| 2 - 4 | 0.967  | -0.373 |
| 2 - 8 | 1.642  | -0.427 |
| 1 - 7 | 0.752  | -0.334 |
| 3 - 4 | -1.131 | -0.784 |
| 3 - 5 | -0.283 | 0.242  |
| 3 - 7 | 0.354  | -0.172 |
| 4 - 8 | -0.174 | 0.231  |
| 5 - 6 | 0.101  | -0.038 |
| 6 - 8 | 0.101  | -0.038 |



**Figure V.7.** Courbe de charge pour le cas de compensation avec 0.5(pu) dans l'accès 7 et 1 sans contingence

*b) Conditions avec contingence*

Nous allons provoquer des éventualités de contingence (N-1) en éliminant à chaque fois une ligne dans le cas de compensation avec 0.5 (pu) dans l'accès 7 et 0.5 (pu) dans l'accès 1. On va étudier par le programme le comportement du réseau pour chaque (N-1) éventualité en calculons  $V_{\text{prof}}$  et  $P_{\text{stab}}$ . Les résultats sont représentés dans le tableau (V.13) ainsi les courbes de charge de tous les jdb pour chaque contingence (N-1) montrer dans la figure V.8 comme suit :

**Tableau V.13.** Résultats dans la condition N-1(contingence) avec compensation 0.5 pu accès7 et 0.5 (pu) accès 1

| N° de ligne | ligne | $V_{\text{prof}}$ | $P_{\text{stab}}$ |
|-------------|-------|-------------------|-------------------|
| 1           | 1 - 7 | 0.07439           | 1.065             |
| 2           | 2 - 8 | 0.00825           | 1.40              |
| 3           | 3 - 5 | 0.00672           | 1.695             |
| 4           | 3 - 7 | 0.00814           | 1.19              |
| 5           | 6 - 8 | 0.00548           | 1.705             |
| 6           | 2 - 1 | 0.04811           | 1.27              |
| 7           | 5 - 6 | 0.00548           | 1.705             |
| 8           | 3 - 4 | 0.01150           | 1.04              |
| 9           | 2 - 4 | 0.01457           | 1.61              |
| 10          | 4 - 8 | 0.00946           | 1.7               |



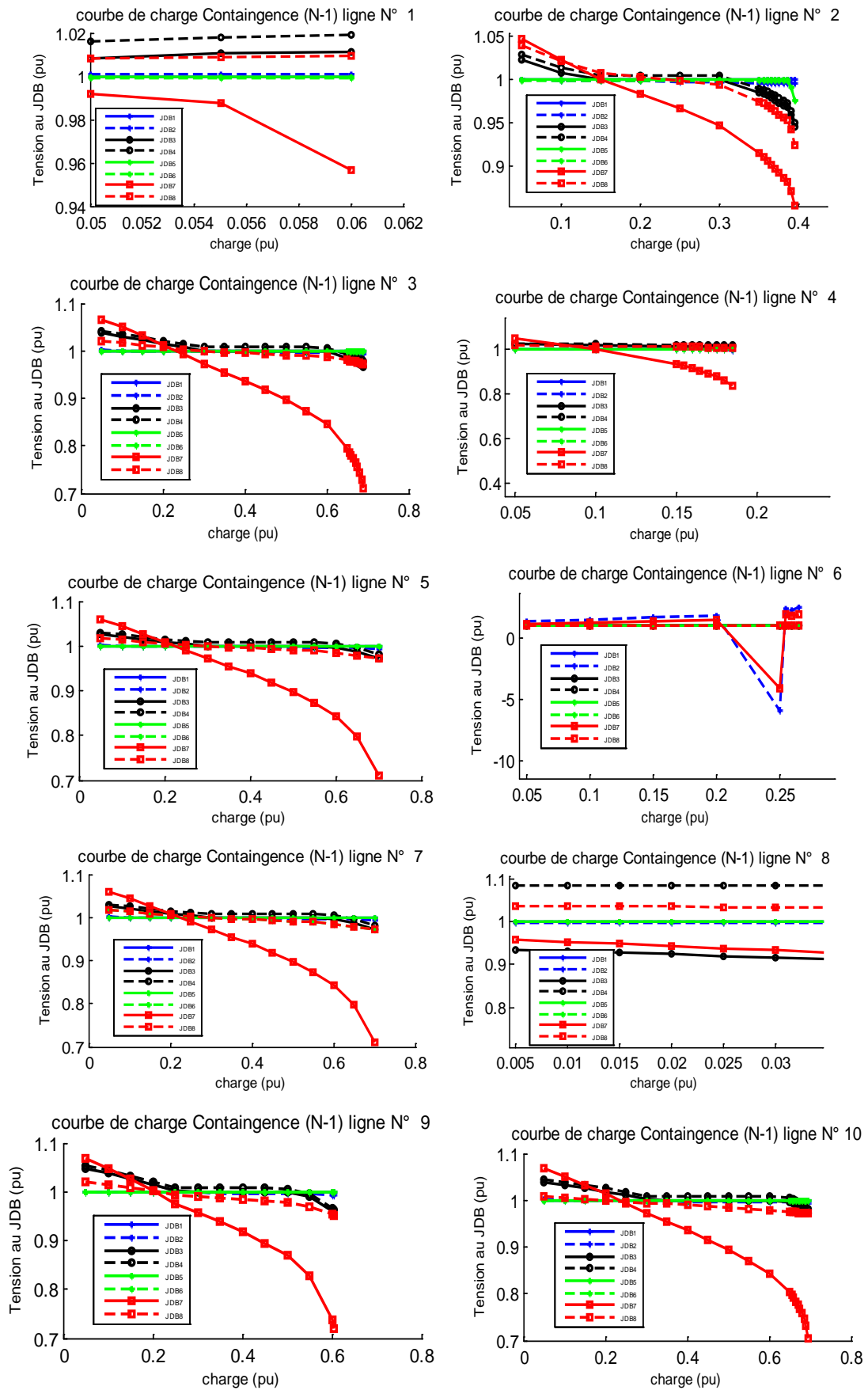


Figure V.8. Courbes de charge pour le cas avec contingence et avec compensation de 0.5pu dans l'accès 7 et 1

Après la compensation avec 0.5(pu) dans l'accès 7 et 1, on a abouti au bon fonctionnements du réseau qui s'exprime par la convergence du système pour toute les contingences, et un bon comportement de réseau en terme de tension et stabilité. Le programme calcul le coût des ressources d'énergie réactive et les pertes total du système représenter dans le tableau (V.14)

**Tableau V.14.** Coût et pertes des systèmes dans le cas de compensation avec 0.5 et 0.5 (pu)

| $P_{\text{cost}}$ (coût) | $P_{\text{loss}}$ (pertes) |
|--------------------------|----------------------------|
| 110.00 (R)               | 0.09573                    |

### *c) Interprétation*

Dans ce cas en compensant avec 0.5 (pu) dans l'accès 7 et 0.5 (pu) dans l'accès 1 ; tous les non convergence due aux éventualités de contingence sont réglé et tout le système converge on note aussi une légère amélioration des niveaux de tensions des accès et l'indice de stabilité de système. Par contre le coût et les pertes du système se trouve élevé due à l'augmentation de la dimension de compensation.

#### V.5.4. Etude du réseau avec une Compensation dynamique de 0.5 (pu) dans l'accès 1 et 0.4 (pu) dans l'accès 7

Maintenant on va agir sur la taille des ressources réactive en utilisant la compensation dynamique d'une façon a minimise les couts et les pertes du système tout en gardant le bon fonctionnement du système ce qui fait l'objectif d'une planification, le coût et les pertes pour une compensation de 0.5(pu) dans l'accès 7 et 0.4(pu) dans l sont représenter dans le tableau (V.15)

**Tableau V.15.** Coût et pertes des system dans le cas de compensation avec 0.5 et 0.4 (pu)

| $P_{\text{cost}}$ (coût) | $P_{\text{loss}}$ (pertes) |
|--------------------------|----------------------------|
| 100.00 (R)               | 0.089 (pu)                 |

On remarque que les couts et les pertes ont diminué (*0.089 et 95 au lieu de 0.09573 et 105*) ce qui est plus favorable, tout en gardant les tensions dans la plage admissible et le système converge pour tous les contingences

### V.5.5. Etude du réseau avec une Compensation dynamique de 0.3 (pu) dans l'accès 1 et 0.4 (pu) dans l'accès 7

Le cout et les pertes pour une compensation de 0.5(pu) dans l'accès 7 et 0.4(pu) dans l sont représenter dans le tableau (V.15) et les tensions des accès dans le tableau (V.16)

**Tableau V.16.** Coût et pertes des system dans le cas de compensation avec 0.3 et 0.4 (pu)

| $P_{\text{cost}}$ (coût) | $P_{\text{loss}}$ (pertes) |
|--------------------------|----------------------------|
| 80.00 (R)                | 0.088 (pu)                 |

**Tableau V.17.** Les performances de la tension avec une compensation dynamique de 0.4 (pu) accès 7 et 0.3 (pu) accès 1

| Numéro d'accès | V     | $\phi$ |
|----------------|-------|--------|
| 2              | 1.00  | 0.00   |
| 1              | 1.00  | -0.006 |
| 3              | 1.028 | -0.098 |
| 4              | 1.033 | -0.096 |
| 5              | 1.00  | -0.032 |
| 6              | 1.00  | -0.033 |
| 7              | 1.046 | -0.240 |
| 8              | 1.019 | -0.082 |

### Interprétation

Le système garde toujours son bon fonctionnement ; les coûts et les pertes ont encore diminué (0.088 et 80 au lieu de 0.089 et 100).

Pour tout valeur de compensation en dessous de 0.3pu dans l'accès 1 et 0.4 pu dans l'accès 7 le système rencontre des difficultés en terme de tension et stabilité En tient alors que pour notre système le dimensionnement et l'allocation optimal de la compensation est :

0.3 (pu) dans l'accès 1 et 0.4 (pu) dans l'accès 7

## **V.6. Conclusion**

Dans ce chapitre, on a fait l'étude sur le réseau présenté d'une part dans le cas de conditions normales sans contingences et d'autre part avec contingences (condition N-1) d'abord sans compensation ensuite avec différentes compensations. L'étude est faite par le programme de calcul d'écoulement de puissances par la méthode de Newton-Raphson. Cette étude a comme objectif de montrer le comportement et l'influence de la compensation des déferents cas en terme de performance et stabilité de tension et puissances et d'autres part en terme économique (les coûts).

D'après les résultats, on déduit l'importance d'une compensation de l'énergie réactive dans un réseau et surtout celle d'un bon plan de planification afin de satisfaire le cahier de charge le plus proche possible de l'idéal.

## Conclusion générale

La demande d'énergie électrique ne cesse de croître et les structures existantes parviennent à peine à la combler. La construction de nouvelles centrales de production, de nouvelles lignes de transport s'impose. Mais, ceci nécessite de grands investissements et une politique à long terme qui demande beaucoup de moyens pour y faire face ; ce qui motive les gestionnaires de la production et du transport de l'énergie électrique à mieux exploiter les réseaux existants et aller au de-là de leurs capacités tout en gardant le bon fonctionnement et la continuité de service.

La planification de la compensation et le contrôle de la puissance réactive et des tensions est une solution valide qui satisfait les préoccupations des gestionnaires de la production et transport d'énergie électrique, en minimisent les pertes actives des systèmes électriques et améliorant le comportement des réseaux en terme de tension et du coût de l'énergie électrique.

Le but principal de la planification de l'énergie réactive est la détermination de la taille et l'emplacement optimal des ressources d'énergie réactive à installer pour assurer un fonctionnement sûr et surtout économique des réseaux de transport et de distribution.

Notre travail est porté sur l'étude de la performance et la stabilité de la tension et les coûts des ressources d'énergie réactive et les pertes du système avec le programme réalisé sur Matlab en augmentons les charges des accès tout en prenant en compte les contraintes techniques pour un fonctionnement sain et une exploitation optimale et économique du réseau.

A travers la simulation du réseau dans le cas sans compensation avec le programme réalisé, on a déterminé les accès qui présentent des chutes de tension importantes et les contingences dans les lignes qui rencontrent des difficultés.

En utilisant une compensation statique dans les accès qui présente des chutes de tension importantes trouvées précédemment, on a ramené le réseau à ces conditions de bon fonctionnement exprimées par l'amélioration de l'indice de stabilité, du profil de la tension (les tensions des accès sont toutes dans la plage admissible) et de la capacité de transit en puissance active dans les lignes.

En utilisant une compensation dynamique, on diminue le coût des ressources d'énergie réactive et les pertes total du système, en agissant sur la taille de la compensation tout en gardant le bon fonctionnement du réseau, ce qui est l'objectif d'une planification d'énergie réactive.

En perspective, on propose :

- Application sur des réseaux avec un nombre importants d'accès,
- Utilisation des méthodes d'optimisation stochastiques telles que les algorithmes génétiques, les réseaux de neurones etc ...
- Elargir le programme de simulation pour prendre en considération la stabilité de fréquence.

## Références bibliographiques

- [1] Semmaoui Hamou, "compensation de l'énergie réactive d'une installation industrielle MT/BT (HTA/BTB)", Mémoire fin d'étude, université M'sila, 2016.
- [2] F.Laib,F.Amraoui, "Elaboration d'outils de planification en vue de l'optimisation investissements dans les réseaux électrique en Algérie", Mémoire Master2, Université de Bejaia,2017
- [3] AMRANE Youcef "Optimisation de la compensation de l'énergie réactive dans les réseaux de transport et de distribution" Thèse doctorat en Electrotechnique, université de Tizi Ouzou, soutenue le 2014
- [4] H. TOULA, M.A RAHMOUNI, "Prévision de la consommation d'énergie électrique en vue de la conduite et de la planification des réseaux électrique en Algérie", Mémoire Master, Université de Bejaia, 2016.
- [5] M. Erimia, J. Treca et A. Germond, "Réseaux électrique, aspect actuel ", Edition Tehnica, Bucarest, Roumanie, 2000.
- [6] Kherfi Amour, Mimouni Imad ; "les defaults dans les câbles électriques souterraines". Mémoire fin d'étude soutenue 2019.
- [7] site d'internet : [http://www.ere.fr/resaux/resaux-publicques-d-electricite/qualite-de l'électricité section 2\\_1](http://www.ere.fr/resaux/resaux-publicques-d-electricite/qualite-de-l-electricite-section-2_1).
- [8] Farid Hamoudi, "Architectures des réseaux électriques, Power system", cours UEF, 10 novembre 2015.
- [9] Planète Energie (<http://www.planete-energie.com>), publier en 2016
- [10] David Wilgenbus, "Les centrales thermique" ([www.fondation.lamap.org](http://www.fondation.lamap.org)), publier 2001
- [11] Gleick P.H, "Water in crisisguid to the of word's freshwater resources" New York, USA, Oxford, UK, university press for pacific institute 473 pp.ed.1993.
- [12] Elie Gauzien, " TPE" ([www.Fechier-PDF.fr](http://www.Fechier-PDF.fr)) publier 2017.
- [13] LABED Imane, " Dispatching économique dans un système de puissance électrique par l'intelligence artificielle " Mémoire magister, université Constantine 2013.
- [14] Alain Damien, "La biomasse énergie. Définition, sources et mode de transformation" , 2<sup>eme</sup> Edition, publier le 04/09/2013.
- [15] B.Toufik, A.ouassim, "Etude des perspectives de production d'énergie électrique en Algérie", Mémoire Master, Université de Bejaia, 2015.

- [16] G.Rami, "contrôle de tension auto adaptatif pour des production décentralisé d'énergie au réseau électrique de distribution" Thèse de doctorat d'état, Institut polytechnique de Grenoble, 2006.
- [17] VANYA Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité électrique, Application aux creux de tension et la pollution harmonique" Thèse de doctorat, université JOSEPH FOURIER, 2006.
- [18] Michel crappe, "Commande et régulation des réseaux électriques" Chapitre2 traité EGEM série génie électrique, LA VOISIERE, 2003.
- [19] Jacque.c,guilliane de presille,Jean-Louis senhet"fluctuation de tension et flicker-Evaluation et atténuation" Technique de l'ingénieur, article de référence D4315, publié 10/11/2001.
- [20] HADDAD Salim, "compensation d'énergie réactive par convertisseur statique", Mémoire de magister département d'électromécanique, université Badji Mokhtar-Annaba, 2006.
- [21] H. Kouara, "Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", Mémoire de Magister, université de Batna, 2006.
- [22] Philippe Sarrand et Jean Varseille, "Compensation de l'énergie réactive et tenue de tension dans les réseaux publics", Technique de l'ingénieur, D 4305, pp-1-10, 1986.
- [23] KESSAL Abdelhalim, "correction de facteur de puissance à l'entrée de convertisseur AC/DC", Thèse de doctorat, option : commande électrique, Université Ferhat Abbas, Setif, 2012.
- [24] Imane Ihsane, "prévision court terme et gestion des consommations d'énergie électrique dans l'habitat", Thèse de doctorat, institut de recherche en énergie électrique de Nantes Atlantique, soutenue le 2020.
- [25] Reda Mohamed Nezzar, "Approches multi-modèle pour la prévision de la charge électrique à moyen long terme. ", Thèse de doctorat, université de Annaba, 2016
- [26] H. Meriem, K.Fatima, "Prévision de la production d'électricité de type énergie renouvelables cas : éolien et photovoltaïque" , Mémoire fin d'étude , Université Boumerdas, soutenue en 2016.
- [27] Dr.badar-islam "Comparison of Conventional and Modern Load Forecasting Techniques Based on Artificial Intelligence and Expert Systems"international journal of computer science Issues, Vol. 8, Issue 5, No 3, September 2011. ( [www.IJCSI.org](http://www.IJCSI.org) )
- [28] Dennis Anderson, "Models for determining last cost investment in electricity supply " The bell journal of economics and managements science, vol 3, No 1, Printemps 1972.



- [29] V. GOUIN, " Evaluation de l'impact du smart grid sur les pratique de la planification en cas d'insertion de production décentraliser et de charge flexible", Thèse de doctorat en génie électrique, Université de Grenoble Alpes, 2015.
- [30] M. Cecile, A. Heral, "Planification des réseaux électriques ", International Book Market Service Limited, 2011.
- [31] Mammeri Oussama, "Défèrent méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud à charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie", Mémoire Magister, option : réseaux électrique, Université Batna, 2012.
- [32] IDRI SAID, KHALDI FAOUZI "Amélioration des performances de la tension et la stabilité d'un réseau électrique par la compensation de la puissance réactive", mémoire de Master, université Bejaia, 2018.
- [33] Solution pour la compensation d'énergie réactive en moyenne tension @2013 CIRCUTOR [SA-circutor-es-reactive@circutor.com](mailto:SA-circutor-es-reactive@circutor.com)
- [34] S. Hamdi, I. Atmani, "Etude comparatif de deux procédés de compensation de l'énergie réactive", Mémoire d'ingénieur, Université de Bejaia, 2004.
- [35] Naima Lardjani, " Etude de la compensation de la puissance réactive lors d'une charge non linéaire ", Mémoire fin d'étude, Université de Tizi-Ouzou, 2017.
- [36] Alain Innocent, "Amélioration du transit de puissance par les FACTS et simulation sur MATLAB/Simulink d'un réseau électrique", Diplôme professeur, 2008.
- [37] Hamadou Zakaria. M, "Optimisation des paramètres d'un FACTS shunt pour l'amélioration de la stabilité transitoire d'un système électrique", Mémoire Magister, Université Setif-1, 2012.
- [38] Oudaya M. Bachir, Drissi M. Elhadi, "Amélioration de la stabilité de tension par l'emplacements optimal des dispositifs FACTS" Mémoire fin d'étude, université Saïda, 2017.
- [39] Hossein Seifi . Mohammad SadeghSepasian, " Electric Power System Planning " Springer- Verlag Berlin Heidelberg 2011.
- [40] A. Bouzidi, "Modélisation et simulation des réseaux électriques", Cours de master I, Université de Bejaia, 2016.
- [41] N. MANCER "Contribution à l'optimisation de la puissance réactive en présence de dispositifs de compensation dynamique FACTS", Mémoire de magister, Université Mohamed Khider, Biskra, 2012.

## **Résumé**

L'accroissement de la demande en énergie électrique et le libre marché de l'électricité, ont poussé les acteurs du domaine électrique à prêter une grande attention à la qualité et au coût de cette dernière, particulièrement dans les réseaux de transport. Afin de réduire les pertes dues au transit de forts courants réactifs des lignes de transport et améliorer le profil de la tension aux JdB, on propose la planification de l'énergie réactive. Il s'agit de trouver les puissances et les emplacements optimaux de ces dispositifs de compensation de sorte à maintenir une bonne qualité de tension tout en assurant la continuité de service d'une part et de réduire le coût et les pertes actives dans les réseaux de transports d'autre part.

Le travail réalisé avec un programme Matlab est porté sur l'étude et l'amélioration de la performance et la stabilité de la tension tout en minimisant les coûts des ressources d'énergie réactive et les pertes du système. Le réseau type de 8 accès, comportant 10 lignes, sera étudié au départ sans compensation dans les conditions normales et dans les conditions de contingence (N-1) en relevant à chaque fois l'indice de performance de la tension et l'indice de stabilité. Il sera après étudié avec une compensation statique par la suite dynamique dans les conditions normales et les conditions de contingence (N-1) en relevant les mêmes indices. Un modèle d'optimisation multi-objectif a permis la minimisation des coûts de la compensation et des pertes tout en maintenant un meilleur comportement en terme de la stabilité et du profil de la tension.

## **Abstract**

The increase in demand for electrical energy and the free market for electricity have prompted actors in the electrical field to pay great attention to the quality and cost of the latter, particularly in transmission networks. In order to reduce losses due to the transit of strong reactive currents of transmission lines and improve the voltage profile at the busbars, reactive energy planning is proposed. It is about finding the powers and the optimal locations of these compensation devices so as to maintain a good quality of tension while ensuring the continuity of service on the one hand and to reduce the cost and the active losses in the transport networks on the other hand.

The work carried out with a Matlab program is focused on studying and improving the performance and voltage stability while minimizing the costs of reactive energy resources and system losses. The typical network of 8 bus, containing 10 lines, will be studied at the outset without compensation under normal conditions and under contingency conditions (N-1) by recording each time the voltage performance index and the voltage index stability. It will then be studied with static compensation and subsequently dynamic under normal conditions and contingency conditions (N-1) by recording the same indices. A multi-objective optimization model allowed the minimization of compensation costs and losses while maintaining better behavior in terms of stability and voltage profile.