

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2019



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques
Par : KHERAKHERIA ZAHRA

Thème

Qualité de l'énergie électrique en moyenne tension

Soutenu publiquement, le 02/07 /2019, devant le jury composé de :

Mr. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ.Guelma	Encadreur
Mr. BOUDEFEL Amar	MCA	Univ.Guelma	Examineur
Mr. GOUIDIA Said	MAA	Univ.Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2018/2019

Remerciements.

Au terme de ces études bienfaites, qui nous ont conduit à des niveaux de connaissance respectables et à cette issue de soutenance exhaustive de notre mémoire de fin de cycle, on ne peut qu'éprouver ce sentiment sincère de redevance à tous ceux qui nous ont accompagné dans nos efforts fournis et nous encouragé dans notre persévérance pour réaliser ce travail.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a doté de courage et de volonté et nous a accompagné tout le long de ces 18 ans consécutifs jusqu'à ce terme de fin d'étude, tout en lui demandant de nous soutenir d'avantage pour aller de l'avant dans cette noble mission.

Nous exprimons nos remerciements les plus sincères à notre encadreur « **Pr.Bounaya Kamel** » qui, par sa disponibilité, son expérience et ses conseils pertinents, nous a accompagné, sans réserve, tout au long de ce travail.

Sans oublier, en aucun cas, tout notre environnement universitaire immédiat ; le personnel enseignant et administratif du Département de Génie Electrotechnique et Automatique de l'université 08 Mai 1945 Guelma.

Enfin, nous remercions tous ceux qui nous ont aidé, de près ou de loin, à réaliser ce modeste travail.

Dédicaces

Je dédie, de toutes mes profondeurs, ce modeste travail qui a concrétisé tous mes efforts fournis toutes les années de ma formation:

A mon cœur Maman « Hadria » pour son affection et son soutien moral qui m'ont beaucoup aidé tout au long de ma vie, notamment dans mon parcours universitaire,

A mes frères Sofiane et Khaled et à ma sœur Habiba qui ont toujours manifesté un grand intérêt pour mes études,

A mes anges : Minou, Mouhamed et Mouetaz,

A mes cousines : Aya, Nour, Mounira et Soumia,

A mon mari : Billel,

A mes très chers amis : Khouloud, Wassila et Zoubida ,

A ma grande famille...

A tous mes camarades de la promotion 2018 / 2019 et particulièrement ceux du groupe réseaux électriques avec qui j'ai passé de merveilleuses années.

ZAHRA

Résumé.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire s'insère dans le domaine des systèmes d'énergie électrique. Dans tous les cas de leur traitement, on est inévitablement confronté à deux problématiques fondamentales ; l'une concerne les régimes de leur fonctionnement et l'autre – le support physique à ces derniers. En effet, dans leur modélisation on doit prendre en charge l'aspect descriptif de leur structure physique ; on parle ainsi de paramètres électriques du système, lesquels paramètres représentent, en fait et de façon équivalente, « les foyers » des processus interactifs électro énergétiques (d'où l'idée de support physique) et l'aspect descriptif de la dynamique électro énergétique ; c.-à.-d., les divers processus interactifs, quand ils sont mis en fonctionnement ; on parle ainsi de paramètres de régime. D'où, du premier aspect, la problématique de la conception et de l'élaboration des systèmes que chaque spécialiste concerné doit en saisir le principe et du deuxième aspect – celle de leur gestion et de leur contrôle, dont la maîtrise doit conduire à une qualité requise de l'énergie électrique.

Ce travail est orienté dans ce sens sous une présentation simple mais significative dans le cadre du Master. On y trouve des définitions, des descriptions et des caractérisations relatives aux réseaux électriques, à leurs régimes et à leurs divers impacts sur la qualité de la tension ; laquelle qualité est exigée conformément à des normes requises. Ainsi qu'une tentative d'orientation vers la maîtrise du concept d'élaboration des systèmes électriques et du traitement de leur régime.

On donne, enfin, l'exemple d'une procédure de compensation de la puissance réactive orientée pour atteindre un plan requis de tension, tout en signifiant l'impact de la distribution de sa dernière sur le contrôle des régimes dans des cas plus complexes, régis par d'autres contraintes.

SOMMAIRE

Introduction	01
Chapitre 1. Généralité sur les réseaux électriques	
1.1. Définition d'un réseau électrique	02
1.2. Structure des réseaux électriques	02
1.3. Constitution des réseaux électriques	04
1.4. Types de ligne	08
1.5. Structure des réseaux électriques	13
1.6. Niveaux nominaux de tension	15
1.7. Fonctionnement du réseau électrique	15
1.8. Dérégulation des marchés	17
1.9. Equipement de surveillance et de commande	18
1.10. Stabilité et réglage des réseaux électriques	19
Chapitre 2. Qualité de la tension	
2.1. Définitions et but	20
2.2. Indices de la qualité d'énergie électrique	21
2.2.1. Qualité de tension	21
2.2.2. Effets principaux de la surtension	25
2.2.3. La variation de la fréquence	26
2.2.4. La forme d'onde	27
2.2.5. La symétrie	28
2.3. Qualité du courant	29
2.4. Procédures habituelles d'amélioration	30
2.4.1. Creux de tension et coupure	31
2.4.2. Surtensions	31
2.4.3. Fluctuation de tension	33
2.4.4. Les solutions pour l'asymétrie de la tension	33
2.4.5. Les solutions pour les harmoniques	34
2.5. Moyen de traitement de QEE	35
Chapitre 3.Principe d'élaboration des réseaux électriques	
3.1. Principe et définition	37

3.2. Plan d'implantation des charges	39
3.3. Coordonnées du centre de charge	40
3.3.1. Moments électriques	40
3.3.2. Choix de la tension nominal	42
3.4. Choix et comparaison des modèles	42
3.4.1. Cas 1 : installation de poste local (PL)	43
3.4.2. Cas 2. Alimentation à partir de PI	49
3.4.3. Comparaison des deux cas	51
3.5. Répartition de la compensation	52
3.5.1. Analyse des régimes de compensation	54
3.5.2. Compensation dans le nœud 4	54
3.5.3. Compensation dans le nœud 4 après croissance de la charge	55
3.5.4. Compensation dans le nœud 3	56
3.5.5. Compensation combinée entre les nœuds 3 et 4	57
2.6. Analyse des résultats	58
Conclusion	61
Bibliographie	62

Introduction.

La qualité de l'énergie désigne plus concrètement, la qualité de la fourniture électrique. Celle-ci dépend de trois facteurs ; qui sont la continuité d'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

La continuité d'alimentation recouvre les coupures ou interruptions du réseau. On distingue les coupures très brèves (entre 1 seconde et 3 minutes) des coupures longues (supérieures à 3 minutes).

La qualité de l'onde de tension désigne les perturbations liées à la forme de l'onde de tension délivrée par le réseau, susceptibles d'altérer le fonctionnement des appareils électriques raccordés au réseau, voire de les endommager. Les types de perturbations identifiés sont, par exemple, les creux de tension, les surtensions impulsionnelles, les variations de fréquence, les papillotements, etc.

Enfin, la qualité de l'énergie dépend de la qualité de service qui caractérise la relation entre un utilisateur et son gestionnaire de réseau ou son fournisseur. Il s'agit par exemple des délais de remise en service, des délais d'intervention d'urgence, des délais de raccordement, des notifications de coupure programmée, etc.

Dans ce mémoire, nous avons présenté l'application, dans le principe, des procédures d'étude et d'analyse utilisées dans les projets d'élaborations des réseaux électriques. On y trouve le choix relationnel des éléments des réseaux électriques, par exemple relatifs à son élaboration ; tel que structure, paramètres du système, transformation, lieu d'installation du centre des charges ... ; ainsi que la procédure de traitement technico- économique pour choisir le modèle convenable. De même que nous avons appliqué une procédure de compensation d'une ligne pour le maintien d'un plan de potentiel admissible. Le mémoire est organisé comme suit :

La première partie donne les descriptions et les définitions générales des réseaux électriques.

Le deuxième chapitre traite de la description et de la caractérisation des indices de la qualité de l'énergie électrique ; ainsi que des moyens de leur contrôle.

Enfin, dans le troisième chapitre, nous avons tenté d'atteindre un contrôle du plan de tension d'une ligne magistrale alimentant deux centres de charges importants en procédant par distribution de la puissance réactive.

Chapitre 1 : Généralités sur les réseaux électriques.

1.1. Définitions.

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers ceux de consommation. Dans une vision générale d'ensemble, il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles, dans une structure maillée complexe, à travers divers postes de transformation, d'interconnexion, d'alimentation et de distribution. Ces derniers permettent de relier les réseaux de différents niveaux de tension, de réaliser des transferts énergétiques d'une région à une autre, de répartir l'énergie électrique sur les centres de consommation...

Un système électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble « production-transport-consommation », en mettant en œuvre des moyens de surveillance, de contrôle divers et de réglages à même d'assurer la stabilité de fonctionnement de l'ensemble [1].

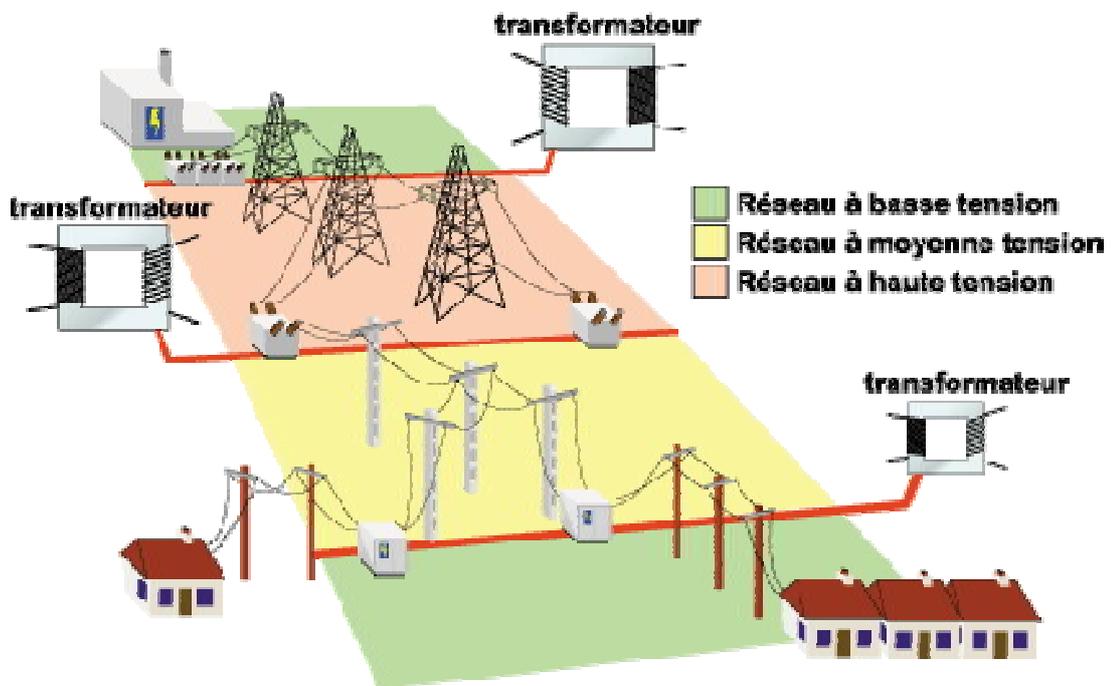


Figure.1.1.Schéma d'un réseau électrique

1.2. Structure des réseaux électriques.

Dans sa hiérarchie structurelle, un réseau d'énergie électrique est un support physique à des processus électromagnétiques complexes qui se résument en la chaîne « production-transport-répartition et distribution » de l'énergie électrique ; c.-à.-d, depuis sa production au niveau des centrales jusqu'à sa présentation aux consommateurs domestiques...

Le système est stratifié depuis la haute tension (110-750 kV et plus) conçue pour interconnecter les centrales de production et transmettre la puissance vers les points de charges les plus importantes. La répartition s'effectue à un niveau plus faible (BT 60-110 KV) reliant le niveau de transport et celui de distribution (MT de 1 à 60 KV), (BT inférieur à 1 KV). Le choix du niveau de tension dépend de nombreux facteurs ; tel que puissance à transmettre, distance, indices économiques, pertes, stabilité...etc.

Le nombre de niveau de tension relève d'un calcul délicat qui doit tenir compte de l'évolution de la densité de charge au Km², par exemple.

Les réseaux de transport et de répartition (tous les niveaux de tension sauf la distribution au niveau des quartiers) sont maillés pour les raisons essentielles de fiabilité de service et de disponibilité de réserve en énergie. Mais cette structure maillée avantageuse installe, en contre partie, le risque de collection de plus de courants de court-circuit ; ce qui implique des surcharges et des pertes énormes dans le réseau d'ensemble. En règle générale, pour éviter ce dernier cas de figure, tout en préservant l'avantage fondamental, on fait fonctionner les réseaux en boucles ouvertes.

Les réseaux de distribution sont organisés en trois types de structure ;

- Systèmes purement radiaux (réseaux ruraux),
- Fortement maillés mais utilisés en fonctionnement de manière radiale (boucles ouvertes).
- Modérément maillés (par exemple un simple boucle).

Les avantages d'un réseau radial par rapport à celui maillé se traduisent par :

- Le cout (de l'équipement), les protections sont plus complexes en maillé,
- La réduction des courants de court-circuit.
- La réduction des périodes de chute de tension en cas de défaut.

Le choix de telle ou telle structure dépend de considérations technico-économiques, de la fiabilité requise... Si les chutes de tension et la durée totale des interruptions sont jugées capitales, il vaut mieux investir dans un réseau radial performant.

Si des interruptions momentanées ou très longues sont jugées capitales, il vaut mieux d'opter pour un réseau maillé [2].

1.3. Constitution des réseaux électriques.

Générateurs. Les générateurs fournissent la puissance active et la puissance réactive dans des limites déterminées par les courants induits (stator) et les courants d'excitation (rotor). Les groupes importants tentent de maintenir à leurs bornes un niveau de tension donné, [3].

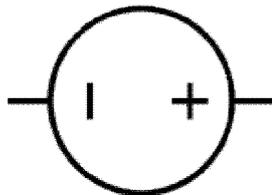


Fig.1.2. Symbole du générateur de tension.

Postes électriques. Par définition, un poste (une sous station) est une installation d'organes de liaison et d'organes de manœuvre où parvient l'énergie des centrales et d'où cette énergie est orientée vers les centres de consommation sous leur appel, [2]. On distingue trois types de postes électriques, suivant les fonctions qu'ils assurent ;

- **Postes d'interconnexion.** Permettent de relier entre eux plusieurs réseaux régionaux, territoriaux ou de différentes zones par des lignes d'interconnexion. Ils comprennent, à cet effet, un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateurs, etc.) de même tension peuvent être aiguillés. Leur fonction essentielle est de permettre un transfert réversible d'énergie entre différents réseaux régionaux ou territoriaux.
- **Postes de transformation.** Dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes, liés par un ou plusieurs transformateurs.

- **Postes mixtes.** Les plus fréquents ; ils assurent une fonction d'interconnexion et comportent en outre un ou plusieurs niveaux de transformation, [4].

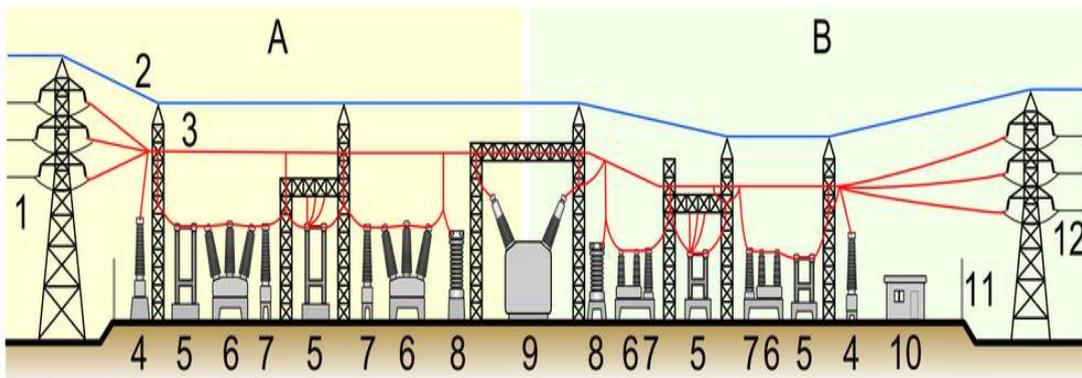


Fig.1.3. Poste électrique.

A.- Coté primaire, B.- Coté secondaire, 1.- Ligne électrique primaire, 2.- Cable de garde, 3.- Ligne électrique, 4.- Transformateur, 5.- Sélecteur ; 6.- Disjoncteur, 7.- Transformateur de courant, 8.- Parafoudre, 9.- Transformateur de puissance, 10.- Bâtiment secondaire, 11.- Clôture, 12.- Ligne électrique secondaire.

Transformateurs. En fonction de leur destination, on distingue ;

- Les transformateurs de puissance, insérés dans le circuit de puissance (de force) du réseau, ils convertissent la valeur de la tension appliquée à leur « entrée » (primaire) en une tension de valeur différente, plus ou moins élevée, récupérée à leur « sortie » (secondaire) ; le courant de force, correspondant à la puissance de transit, étant ainsi converti dans le sens inverse,
- Les transformateurs de courant permettent de mesurer la valeur du courant de force de la phase (de charge) ; ils se présentent comme source de courant,
- Les transformateurs de tension permettent de mesurer la valeur de la tension de ligne (simple ou composée) ; ils se présentent comme source de tension,
- Les autotransformateurs ont la même fonction que les transformateurs de puissance standards à la différence près d'une connexion électrique de l'une de leurs bornes,
- Les transformateurs déphaseurs ont pour objectif de déphaser plus ou moins fortement la tension secondaire par rapport à la tension primaire, afin d'ajuster les transits de puissance active dans les branches du réseau.



Fig.1.4.Un transformateur électrique.

Lignes électriques. Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolants et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique. Les lignes électriques sont constituées de trois phases et chaque phase peut être constituées d'un faisceau de plusieurs conducteurs ($n=1, 2, 3\dots$) espacés d'une distance déterminée afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en ligne. L'ensemble de ces trois phases électriques constitue un terne. Les conducteurs sont on général en aluminium, en cuivre..., combinés à l'acier. [4].

Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes. Les pylônes sont systématiquement mis à la terre par un réseau de terre efficace pour assurer la canalisation vers la terre, par les fils de garde, d'une éventuelle décharge par foudre Ils supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. La longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs, constitués de deux points métalliques se faisant face pour court-circuiter les potentiels excessifs. Leur distance est objectivement déterminée pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie, (5).

Le genre ou le type de ligne utilisée est imposé par les facteurs suivants :

- Puissance active à transporter,
- Distance de transport,
- Cout,

- Esthétique, encombrement et facilité d'installation.

On distingue quatre types de ligne :

- Lignes de distribution basse tension (BT) : ce sont les lignes installées à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter divers récepteurs ; tel que, moteurs, installations d'éclairage et électroménagères...
- Lignes de distribution à moyenne tension (MT) : ce sont les lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité.
- Les lignes de transport à haut tension (HT) : ce sont les lignes qui relient les postes de transformation principaux aux centrales de génération.
- Les lignes de transport à très haute tension (THT) : ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux sous stations régionales. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 Km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 750 kV et plus.

Charges. Les charges sont à caractère industriel, commercial et résidentiel, rurales. Si de très grandes charges industrielles peuvent être directement alimentées par le réseau de transport, les petites charges le sont par le réseau primaire de distribution. Les charges industrielles sont des charges composées où la charge asynchrone (moteurs asynchrones) recèlent la plus grande pondération. Ces charges composées sont fonction de la fréquence et de la tension et constituent la majeure partie de la charge totale d'un réseau électrique. Les charges à caractère commercial et résidentiel sont celles liées essentiellement à l'éclairage, le chauffage et la climatisation. Elles n'ont pas d'effets importants sur la tension et la fréquence comparativement à celles industrielles et absorbent très peu d'énergie réactive.

Selon la nature des récepteurs on peut classer les charges en trois grandes catégories ;

- La première catégorie : dans cette classe les récepteurs ne permettent que moins de deux secondes d'arrêt d'alimentation aux risques de « dégâts » humains; comme les hôpitaux, les zones militaires, certains milieux industriels...
- La deuxième catégorie : pour cette classe, les récepteurs acceptent un arrêt de moins de deux heures ; comme les usines.

- La troisième catégorie : dans cette dernière catégorie, l'arrêt peut être de plus 24 heures ; comme l'éclairage public et les habitations.

1.4. Types de ligne.

Les deux types principaux de lignes sont les lignes aériennes et les câbles souterrains. Dans les zones rurales et pour le transport à haute et très haute tension, on utilise normalement des lignes aériennes. Les réseaux urbains (à moyenne et basse tension) sont faits de câbles pour des raisons de sécurité et d'esthétique,[1].

Lignes souterraines. Les lignes souterraines sont utilisées dans quelques cas particuliers : transport sous-marin, franchissement de sites protégés, alimentation de grandes villes, de métropoles ou autres zones à forte densité de population. Les lignes souterraines sont plus répandues en basse et moyenne tension, moins en haute tension du fait des coûts élevés. Elles représentent environ 30% de la totalité du réseau de distribution.

Lignes aériennes. La notion de ligne, comme prédéfini, renferme en soit un ensemble d'aspects relatifs aux éléments constitutifs, aux grandeurs descriptives et aux processus interactifs impliqués. En effet, on distingue les aspects :

- Mécanique, relatifs à la construction de la ligne.
- Electrodynamiques, relatifs aux interactions entre parties conductrices de la ligne.
- Electrique (électromagnétique), relatifs aux processus de la transmission de l'énergie pour lequel le conducteur (phase) est l'élément essentiel.
- D'échanges mutuels, relatifs aux interactions avec l'environnement...., [9].

Les lignes aériennes constituent la majeure composante (70%) des réseaux de distribution.

Composants des lignes aériennes. Une ligne aérienne est un élément du réseau électrique destiné à transporter l'énergie électrique entre deux ou plusieurs de ses nœuds. La notion de ligne est générale, aussi bien dans son utilisation que dans sa construction. Elle est utilisée pour l'interconnexion des réseaux régionaux et inter territoriaux. Par ligne aérienne (ou en câble) on sous-entend une installation qui intègre dans sa construction un ensemble de composants.

En effet, une ligne aérienne est composée essentiellement par les éléments suivants :

- Le conducteur,
- L'isolateur (sous forme de guirlande),
- Fil de garde (protection contre la foudre),
- Les pylônes et leur fondation,
- Autres éléments comme poteaux intermédiaires, moyens de fixation et de suspension, installation de protection contre la foudre...

Le fonctionnement de la ligne est conditionné par des interactions électromagnétiques diverses, qui se trouvent à l'origine de tous les changements de son comportement et de ses paramètres. De ce fait, l'impact de ces interactions détermine, de manière fondamentale, aussi bien les caractéristiques du régime que ceux de construction. La détermination des paramètres de construction doit obéir à des considérations non seulement d'ordre technique et économique, mais aussi à des considérations de sécurité préventive ; ayant trait à l'être humain et à l'environnement en général. Le niveau nominal de la tension utilisée est un facteur important dans le choix du dimensionnement de la ligne.

Les paramètres essentiels de dimensionnement sont (fig.1.5.) ;

- La hauteur « H » du pylône,
- Les distances « D » et d entre l'axe du pylône et le conducteur et entre conducteurs,
- La longueur de la guirlande d'isolation,
- La portée « P » entre l'axe du pylône et celui de la guirlande d'isolation,
- La hauteur « h » entre le point le plus bas du conducteur et la terre,
- Distances « L » et « l » entre pylônes et entre poteaux intermédiaires,
- La flèche « f » de flexion du conducteur.....

Les lignes aériennes, dont la somme des longueurs pour un réseau donné se compte par centaines et milliers de kilomètres, subissent des efforts énormes de forces diverses ; auxquelles elles doivent nécessairement résister. Les poids énormes, qui se comptent également par centaines et milliers de tonnes, suspendus et soutenus par les pylônes et les poteaux, posent un vrai problème pour l'analyse des comportements mécaniques des lignes.

En effet, on distingue les efforts suivants :

- Le poids de la matière suspendue engendre le long du tracé de la ligne des effets de flexion, de flambage, de cisaillement, d'étirage, de fatigue.....,

- Le gèle et la neige ajoutent un poids supplémentaire et amplifient les effets sus cités,
- Les vibrations engendrées par la présence du vent soumettent les conducteurs à des effets de fatigue qui peuvent se cautionner par des ruptures,
- La variation de la température engendre des contraintes internes dont l'effet se répercute aussi bien sur les paramètres du régime que sur ceux de construction.....

Ces aspects sont d'une importance capitale et leur prise en charge, pendant les projets, doit conduire à la fiabilité mécanique requise de fonctionnement de la ligne (du réseau).

La variation de la température, la composition de l'atmosphère ainsi que la pollution environnante (humidité, sel, agent chimique, électrochimique.....) introduisent, pendant les études, d'autres contraintes ; quant au choix des conducteurs. Ainsi, à partir de ces considérations et pour une fiabilité requise, le conducteur à utiliser doit répondre aux quatre propriétés essentielles suivantes :

- Une bonne conductibilité électrique,
- Une grande résistance mécanique,
- Une grande résistance aux effets chimiques et électrochimiques,
- Une disponibilité suffisante de la matière première.

Le conducteur est un élément principal de la ligne. Il est destiné à canaliser le champ électromagnétique, donc l'énergie électrique, suivant un tracé déterminé. Il découle qu'une plus grande capacité de transmettre de l'énergie électrique nécessite une plus grande conductibilité. Cette propriété est d'autant plus importante que les distances de transport sont plus grandes. Conformément à ces exigences, les matériaux généralement utilisés pour la réalisation des conducteurs aériens sont ;

- L'aluminium et ses alliages,
- Le cuivre et ses alliages,
- L'acier,

Les questions relatives à la technologie de traitement et de fabrication des conducteurs sortent des limites de ce travail, mais on peut dire que les fils conducteurs sont obtenus par étirage à froid et doivent présenter une résistance mécanique suffisante.

L'aluminium. On sait que l'aluminium a une bonne conductibilité électrique, mais présente une faible résistance mécanique à la fatigue, ce qui le rend, particulièrement, non convenable dans le cas d'apparition des vibrations dues au vent.

Cuivre. Il a une conductibilité et une résistance mécanique relativement meilleures ; il est moins fragile et observe une bonne résistance à la corrosion. Sa résistance mécanique reste encore insuffisante comparativement aux efforts actifs appliqués aux lignes aériennes. En plus, le cuivre est un matériau relativement plus rare ; ce qui rend son utilisation limitée.

Acier. Il présente, en même temps, l'avantage capital d'être un matériau de grande résistance mécanique (60 à 70 kg/mm²) et l'inconvénient d'être un mauvais conducteur. Il est d'une disponibilité suffisante et est moins cher rapport aux autres matériaux. En raison de sa grande résistance mécanique, il trouve une large application dans la conception et la réalisation des conducteurs des lignes aériennes. En effet, il est utilisé en mélange avec l'aluminium ou le cuivre pour former un conducteur, en même temps, de conductibilité élevée (assurée par la présence de l'un de ces derniers) et de grande résistance mécanique (de l'ordre de 120kg/mm², assurée par l'acier).

Du point de vue construction, on distingue différents types de conducteurs :

- A un fils,
- A plusieurs fils (fibre),
- A fibre avec combinaison de deux matériaux,
- Tubulaires.....

Les conducteurs à un fils sont généralement utilisés dans les réseaux de basse tension (inférieure ou égale 1 KV). Ceux à fibres présentent de grands avantages, tels que fiabilité, souplesse et flexibilité, d'où une meilleure interaction avec différentes perturbations mécaniques pendant l'exploitation des lignes. La combinaison de l'acier avec l'aluminium ou le cuivre permet d'atteindre les propriétés sus citée, exigées d'un conducteur pour une meilleure fiabilité dans le sens général. L'acier est installé justement dans la partie centrale du conducteur pour une raison déduite et dictée par les propriétés fondamentale du champ électromagnétique ; on fait, pour les réseaux à courant alternatif, la partie centrale du conducteur n'est pas vraiment conductrice et le matériau y inséré, non chargé alors par la conductibilité, doit assurer la résistance mécanique requise [9].

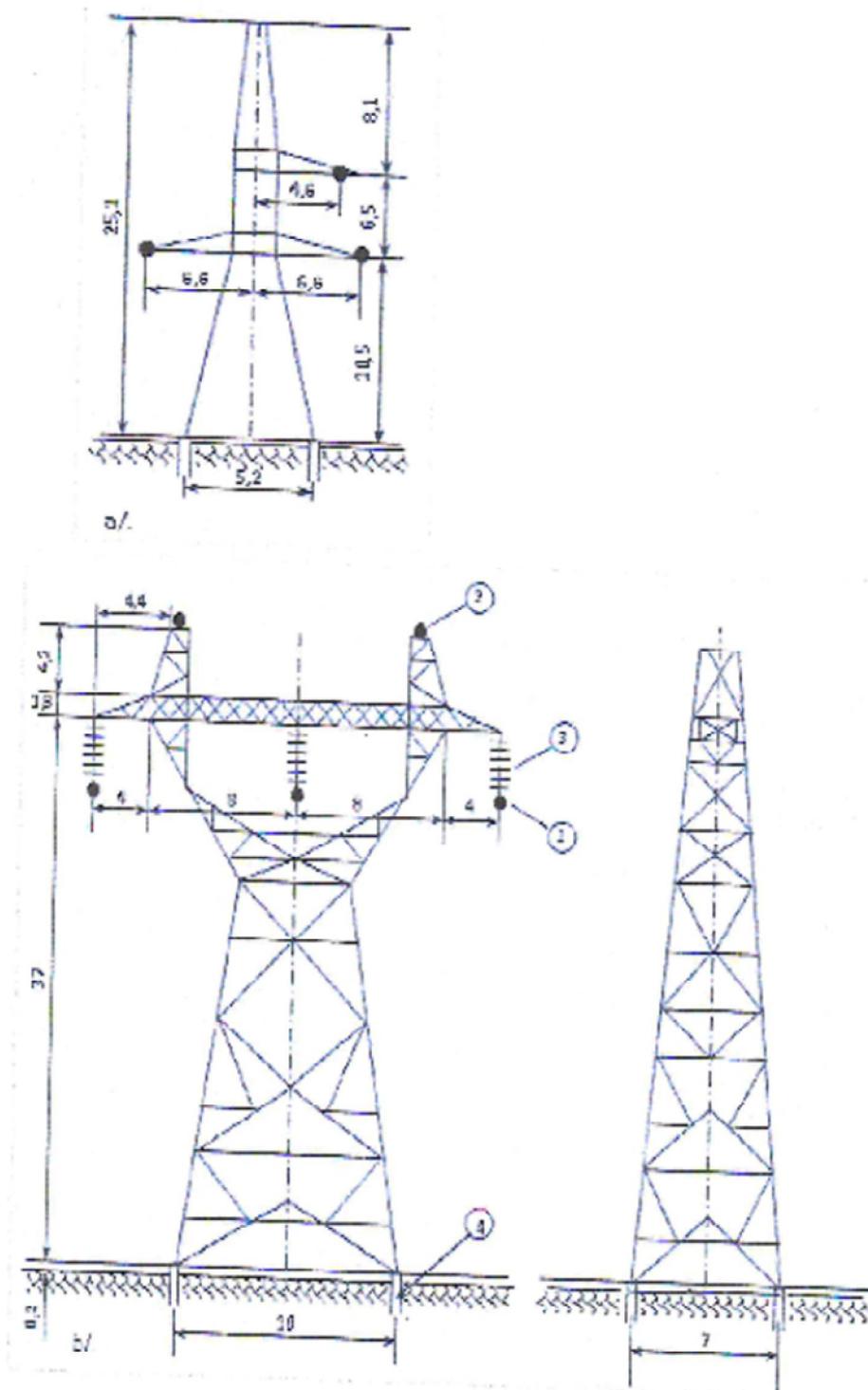


Fig.1.5. Modèle de pylône de dimensions (m) réelles. a.- $U_N=220$ kV, b.- $U_N= 500$ kV ;
 1 : conducteur (phase) ; 2 : fil de garde ; 3 : isolateur ; 4 : fondations (mise à la terre).

1.5. Structure des réseaux électriques.

Structure maillée. les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.

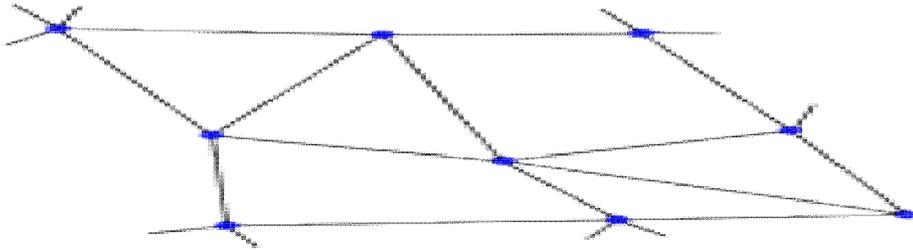


Fig.1.6. Structure maillée.

Structure radiale ou bouclée. La sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.

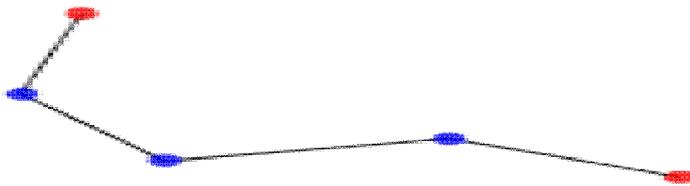


Fig.1.7. Structure radiale.

Structure arborescente. La sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste d'alimentation coupe l'ensemble des clients en aval.

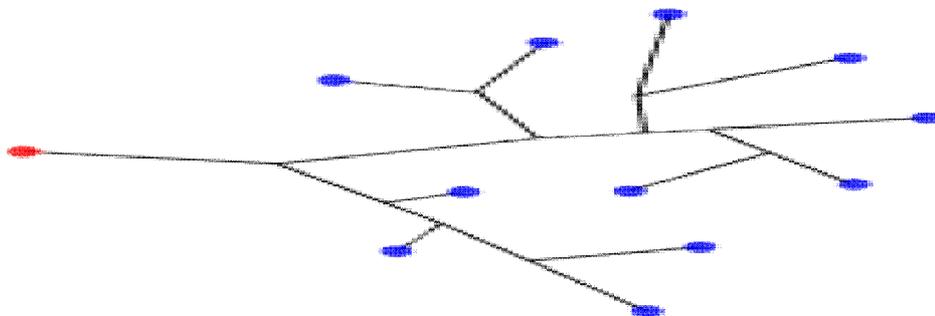


Fig.1.8. Structure arborescente.

Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport.

Dans les niveaux de tension moins élevés, la structure bouclée est utilisée en parallèle avec la structure maillée : c'est le réseau de répartition.

Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution [8].

- **Le réseau de transport et d'interconnexion.**

Les réseaux de transport et d'interconnexion THT ont principalement pour mission de collecter l'électricité produite par les centrales importantes (supérieure à 300 MW) et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport) et de permettre une exploitation économique et sûre des moyens de production en assurant une compensation des différents aléas (fonction interconnexion).

Ces réseaux sont pour la plupart aériens. Ils sont étudiés pour un transit donné conformément aux limites thermiques requises de la ligne. Une attention particulière doit être portée à l'effet couronne qui peut donner lieu, en THT, à des pertes très significatives suivant le climat et l'altitude. Pour remplir convenablement sa mission et amortir les événements imprévus, le réseau de transport est conçu dans une structure fortement maillée qui permet d'assurer la redondance des transits possibles en cas d'incident mais aussi en fonctionnement normal d'assurer le maintien de la tension admissible lors des fortes variations de la puissance de transit.

L'inconvénient d'une telle structure est de présenter en certains points du réseau une faible impédance (les circuits parallèles) de court-circuit et donc de favoriser, en cas de défaut, l'apparition de courants de court-circuit élevés. Il faudra donc dimensionner les protections en conséquence. Ces réseaux sont toutefois dimensionnés pour supporter la perte d'un ouvrage et assurer les reports de charge.

- **Le réseau de répartition :**

Les réseaux de répartition (en général HT et MT) ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue du réseau de transport.

Ces réseaux sont en grande partie, constitués de lignes aériennes, dont chacune peut faire transiter plus de 100 MVA sur des distances de quelques dizaines de kilomètres.

Leurs structure est soit en boucle fermée, soit, le plus souvent, en boucle ouverte ; mais peut aussi se terminer en antenne au niveau de certains postes de transformation. En zone

urbaine dense, ces réseaux peuvent être souterrains sur des longueurs n'excédant pas quelques kilomètres.

Ces réseaux alimentent d'une part les réseaux de distribution à travers des postes de transformation HT/MT et d'autre part les utilisateurs industriels dont la taille (supérieure à 100 MVA) nécessite un raccordement à cette tension.

- **Le réseau de distribution :**

Les utilisateurs peuvent être groupés d'une façon très dense, comme dans les villes, ou bien séparés les uns des autres par des distances plus ou moins grandes, comme dans les campagnes. Ils sont desservis par un réseau de distribution alimenté par un poste de répartition qui reçoit l'énergie, provenant de centrales éloignées par l'intermédiaire du réseau de transport.

Des lignes de distribution à moyenne tension (MT) partent des postes de répartition et alimentent des postes de transformation répartis en différents endroits de la zone à desservir. Ces postes de transformation abaissent la tension à une valeur convenable pour alimenter le réseau de distribution publique auquel les abonnés sont raccordés par des branchements. Les réseaux de distribution sont en général à structure radiale ou arborescente, c'est-à-dire qu'il n'y a qu'une seule ligne entre deux nœuds, [4].

1.6. Niveaux nominaux de tension.

Les réseaux électriques sont caractérisés par une architecture hiérarchisée. D'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Réseau de transport THT 220-750 kV et plus...
- Réseau d'alimentation régionale HT 60-110 kV,
- Réseau de distribution MT 5-30 kV
- Réseau de livraison de l'abonné BT 400-230 V

Cette hiérarchie ; c'est-à-dire, les niveaux de tension utilisés varie considérablement d'un pays à l'autre en fonction des paramètres comme ; ressources énergétique, superficie, considérations techno-économiques... [7].

1.7. Fonctionnement du réseau électrique.

Le stockage massif de l'énergie électrique sous une forme immédiatement disponible n'est actuellement pas possible dans des conditions économiques satisfaisantes. Le problème

majeur de l'exploitant est donc le maintenir, en permanence, l'équilibre entre l'offre disponible et la demande potentielle, étant entendue que l'équilibre instantané entre production et consommation est une condition nécessaire de fonctionnement du système production-consommation.

L'étude du fonctionnement du système production-transport-consommation est dominée par quatre préoccupations :

- Maintenir en permanence les conditions nécessaires d'un équilibre entre la production et la consommation ; (problème de conduite),
- Maintenir les caractéristiques de la tension et de la fréquence dans les plages contractuelles ; (problème de réglage),
- Tenir compte du fort couplage dynamique entre production et consommation via le réseau ; (problème de stabilité),
- Assurer l'intégrité des ouvrages ; (problème de protection),

Problème de conduite. Les réseaux de transport et d'interconnexion à très haute tension (THT) assurent la liaison entre les centres de production et les grandes zones de consommation. Ils permettent d'acheminer, là où elle est consommée, l'énergie utile. Par ailleurs, le maillage du réseau contribue à la sécurité d'alimentation et permet de faire face dans des conditions économiques satisfaisantes, aux aléas locaux ou conjoncturels qui peuvent affecter l'exploitation (indisponibilité d'ouvrage, aléas de consommation, incidents.....).

Les réseaux THT contribuent donc de façon déterminante au maintien de l'équilibre entre la demande et l'offre ainsi qu'à la sécurité d'alimentation et à l'économie de l'exploitation.

Problème de réglage. Par ailleurs, la qualité du service est également un souci majeur de l'exploitant. Sur le plan pratique ;

- On doit maintenir les caractéristiques du produit (tension, fréquence) dans les limites très précises des cahiers des charges.
- On doit limiter, autant que faire se peut, des interruptions de service. Les réseaux THT jouent aussi un rôle très important pour respecter ces contraintes car les références de tension qui vont conditionner l'ensemble du plan de tension dans le réseau sont fixées, pour l'essentiel, par les groupes de production raccordés aux réseaux THT.

- La fréquence est maintenue fixe par les groupes de production qui doivent rester synchrones en régime permanent.
- La sécurité d'alimentation des grands centres de consommation dépend très fortement de la structure des réseaux de transport.

Problème de stabilité. Les systèmes électriques sont le siège de phénomènes interactifs électromagnétiques et électrodynamiques très complexes. L'absence d'une vision objective et d'une maîtrise suffisante concernant ces processus mettent dans un grande difficulté le contrôle, la gestion et l'exploitation de ces systèmes. Les processus interactifs se traduisent, en fait, par des rapports de couples divers entre divers éléments du système. Or, les régimes permanents requis sont tributaires des équilibres conséquents de ces interactions. Soumis, en règle générale, à diverses perturbations (fortes, faibles...), les systèmes peuvent engendrer des états d'instabilité non souhaitables des régimes. D'où la nécessité d'une attention particulière concernant le problème de la stabilité des systèmes.

Problème de protection. Il est nécessaire de protéger les systèmes électriques qui peuvent être affectés par de nombreux types d'incidents. Il convient de distinguer la protection des ouvrages du réseau proprement dit (lignes...) et celle du système production-transport. La protection du système production-transport est essentielle, car certains incidents (pertes de lignes en cascade, pertes brutales de moyens de production importants...) peuvent induire des conséquences catastrophiques (effondrement du système électrique), [4].

1.8. Dérégulation des marchés.

Impact sur les réseaux électriques. Dans le cadre du processus de dérèglementation des systèmes électriques, la question du statut économique et juridique des réseaux se pose. La théorie économique reconnaît dans les réseaux électriques, une des formes du monopole naturel, c'est-à-dire une activité qu'il est moins coûteux de confier à un seul acteur économique. Cependant pour des raisons économiques et historiques, dans la quasi-totalité des pays, le développement, la maintenance et la conduite des réseaux de transport et, à un moindre degré, de distribution étaient intégrés avec les entreprises de production, dont les démarches de dérèglementation cherchaient précisément la mise en concurrence. Par ailleurs, la théorie économique reconnaît également aux réseaux électriques le statut d'infrastructure essentielle, c'est-à-dire permettant de faciliter ou entraver l'accès au marché, qu'il s'agissait de créer. Pour ces raisons, par exemple, les processus de dérèglementation en Europe ou aux

États-Unis, ont d'une façon générale imposé une séparation plus ou moins prononcée entre les activités de production réputées concurrentielles et les activités de transport, voire de distribution, réputées monopolistiques.

Il est important en revanche de noter que la déréglementation n'a pas modifié les fondements techniques de la gestion des réseaux électriques, en particulier elle n'a pas modifié significativement les flux physiques d'électricité dans les réseaux interconnectés, qui restent déterminés par la localisation géographique des moyens de production et des zones de consommation, et les Loi De Kirchhoff [10].

1.9. Equipement de surveillance et de commande.

Protection des réseaux électriques. Tout réseau électrique possède des systèmes de protection pour déconnecter le système de production en cas de défaut sur la ligne. L'objectif est de protéger les trois constituants d'un système électrique :

- Les organes de production (alternateur),
- Les composants des réseaux de transport et de distribution (lignes aériennes et souterraines, transformateur, jeu de barre),
- Les organes de consommation (clients finaux),

Conduite et surveillance. La conduite s'effectue depuis des centres de conduite régionaux (Dispatchings) ou nationaux. Ceux-ci disposent d'instruments de télé conduite (DES SCADA, notamment) comprenant des dispositifs permettant :

- De commander les organes de coupure (disjoncteurs, sectionneurs),
- De connaître la position de ces organes,
- De mesurer un certain nombre de grandeurs (tension, intensité, fréquence),
- De signaler des dysfonctionnements (alarme).

Le matériel de surveillance est destiné à l'analyse des incidents. Il comprend essentiellement des consigneurs d'état, chargés de relever la position des organes de coupure et des pétérographes qui, grâce à un système de mémoire, restituent l'évolution des tensions et des courants pendant le déroulement des incidents. Lorsque des clients sensibles se trouvent à proximité du poste, des équipements destinés à mesurer les coupures brèves, peuvent aussi être installés. Les données fournies par ces équipements sont consultées sur

place. Par commodité, elles peuvent être transmises à distance, mais la fiabilité demandée aux voies de transmission utilisées est moins importante.

1.10. Stabilité et réglage des réseaux électriques.

L'électricité est une des rares énergies non stockable à grande échelle (hormis viables batteries, ou les barrages considérés comme des réserves d'énergie électromécanique à faible inertie). En permanence, les opérateurs des réseaux doivent s'assurer de l'équilibre entre l'offre et la demande. En cas de déséquilibre, on observe principalement deux phénomènes :

- **Une consommation supérieure à la production.** Le risque de délestage fréquence métrique ou BLACKOUT n'est pas exclu (perte rapide du synchronisme sur les alternateurs) comme dans le cas de délestage massif de l'Italie en 2003.
- **Une production supérieure à la consommation.** Il peut y avoir dans ce cas une accélération des machines synchrones qui produisent l'électricité et un emballement pouvant conduire également à BLACKOUT par l'intermédiaire de protection fréquence métrique. Cette situation est connue des systèmes électriques insulaires où la surproduction notamment éolienne entraîne parfois des fréquences « hautes » sur les réseaux.

Les interconnexions entre pays et des dispositifs « d'effacement » temporaire de certains consommateurs permettent de diminuer le risque de BLACKOUT à l'échelle des pays qui sont solidaires dans la gestion de l'équilibre offre-demande ; on parle ici de réserve primaire mutualisée. L'apparition massive de la production décentralisée sur les réseaux terminaux (réseaux de distribution) conduit également à tenir compte de cette production non centralisée dans l'équilibre global des réseaux, notamment pour les problématiques de tenue à la tension. L'émergence des réseaux intelligents ou Smart grids doit notamment concourir à faire cohabiter l'équilibre global du réseau de transport (fréquence, tension) avec l'équilibre local des réseaux de distribution. Les opérateurs européens réfléchissent à des solutions techniques pertinentes compte de l'évolution progressive des modes de production aujourd'hui fortement centralisés (centrales nucléaire, hydraulique...) [8].

Chapitre 2 : Qualité de la tension.

2.1. Définitions et but.

Le distributeur d'énergie doit fournir à l'ensemble de ses clients une énergie de qualité sous la forme de trois tensions sinusoïdales parfaites constituant un réseau triphasé équilibré. Le traitement de la qualité de l'énergie électrique à deux orientations principales de recherche : la mesure et l'analyse des perturbations électriques d'une part, et les solutions préventives d'autre part.

La qualité de l'énergie électrique est un indice de santé des équipements électriques (bon fonctionnement, défaillance, durée de vie, ..., etc.) branchés sur le réseau.

La qualité de l'énergie électrique est fondamentalement liée aux paramètres « tension – fréquence »).

Dans une définition générale, on retient la formule,

Qualité de l'électricité = Qualité de la tension + Continuité + la qualité de service

qui se déchiffre comme :

- Qualité de l'onde de la tension : aptitude à alimenter de façon continue et satisfaisante les appareils qui utilisent l'électricité.
- Continuité : elle est affectée par les interruptions fortuites, longues ou brèves, et les interruptions programmées. Elle se mesure par le nombre de coupures d'alimentation en un point donné : coupure/unité de temps.
- Qualité de service : elle caractérise la relation entre le gestionnaire ou fournisseur (sonelgaz) et l'utilisateur des réseaux (abonnées).

Les étapes à réaliser et les objectifs essentiels à atteindre pour installer une bonne qualité sont :

- Identifier les phénomènes liés à la qualité de l'énergie,
- Comprendre les problèmes (effets) qu'ils engendrent,
- Proposition des solutions.
- Caractériser les perturbations pouvant dégrader la qualité de l'énergie au sein d'un réseau électrique.

- Appliquer les techniques de mesure et les normes relatives à la qualité de l'énergie électrique.
- Apporter des solutions dans le but d'améliorer la qualité de l'énergie au sein d'un réseau électrique [11].

2.2. Indices de la qualité d'énergie électrique.

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et la qualité de courant.

2.2.1. Qualité de tension.

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution consiste en le maintien d'une tension sinusoïdale, d'amplitude et de fréquence nominale,[1].

Dans la pratique, l'énergie électrique distribuée se présente sous la forme d'un ensemble de tension constituant un système alternatif triphasé, qui possède quatre caractéristiques principales : l'égalité de l'amplitude des trois tensions, la fréquence, la forme sinusoïdale de l'onde, et la symétrie du système triphasé [12]. L'amplitude de la tension est un facteur important 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 $\pm 5\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude, qui est constante. Cependant, plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions. En fonction de la variation de l'amplitude on distingue deux grandes familles de perturbations :

- **Les creux de tension.** Un creux de tension est défini comme une baisse soudaine de 10 % ou plus de la tension nominale, touchant une ou plusieurs phases, d'une durée allant de 10 ms à 1 minute. Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension. Un creux de tension est caractérisé par sa profondeur (ΔV) et sa durée (Δt). Il peut être monophasé, biphasé ou triphasé suivant le nombre de phase en service.

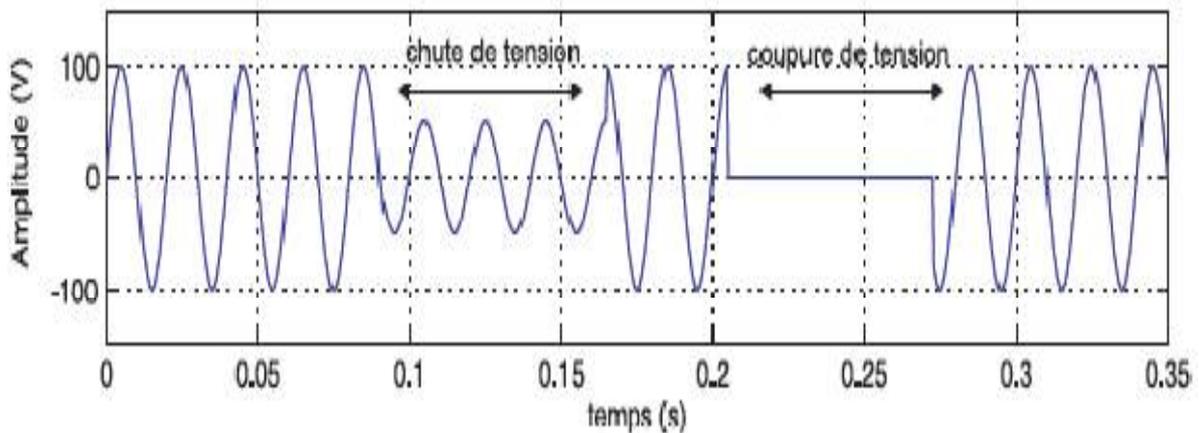


Fig.2.1. creux de tension et coupure.

Les origines des creux de tension sont essentiellement ;

- **Défaut sur l'installation** : la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage, tels que ; les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement). En générale, le courant des moteurs atteint au moment de leur démarrage 5 à 6 fois le courant nominal et diminue progressivement lorsque la machine se rapproche de sa vitesse nominale. Cette surintensité produit une chute de tension qui décroît avec la diminution du courant (Fig.2.2.b). Les creux de tensions engendrés par le démarrage des moteurs de forte puissance durent entre quelques secondes et quelques dizaines de seconde et se caractérisent par des chutes de tension sur les trois phases.
- **Défaut sur le réseau** : les défauts d'isolement du matériel, les blessures des câbles souterrains provoquent des court-circuits qui génèrent de chutes de tension importantes. Les courts-circuits restent la principale cause de creux de tension et de coupures brèves. Ils engendrent des variations brusques de l'amplitude de la tension. La plupart des creux de tension ont une durée de moins d' 1 sec et une profondeur inférieure à 60 %, et sont considères, en règle générale, de forme rectangulaire. (Fig.2.2.a.).

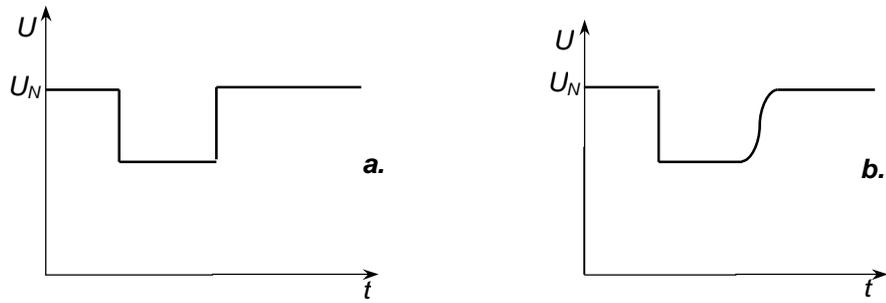


Fig.2.2. Exemple de creux de tension ; a.-Court-circuit, b.- Démarrage de moteur.

Les creux de tension sont des perturbations brèves mais peu fréquentes qui touchent tous les réseaux électriques et qui ne peuvent être évitées totalement. Les conséquences des creux de tension sur le fonctionnement du réseau électrique sont diverses. On cite dans le tableau suivant quelques exemples.

Tab.2.1. Conséquences des creux de tension, [11].

Types d'appareils	Conséquences
<i>Eclairage</i>	Moins de luminosité, extinction et pré-allumage (lampes à arc)
Systèmes à basse d'électronique de puissance	Arrêt de dispositif
Dispositifs de protection	Fusion fusible BT et ouverture des contacteurs
Moteurs synchrones	Perte de synchronisation, décrochage et arrêt de moteur
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité
Conducteur	Echauffement

- **La variation de tension.** Ces perturbations se caractérisent par des variations de l'amplitude de la tension inférieure à 10% de sa valeur nominale [12]. Elles sont généralement des variations lentes et des variations rapides (oscillations). La variation lente de la tension est une augmentation ou une diminution de tension provoquée par la variation de la charge totale du réseau de distribution ou partielle de ce réseau (HTA ou BT).

En régime normale les graphiques de charge sont plus stables. De ce fait, l'effet de leur variation sur la tension n'est pas très grand et les variations impliquées sur ces derniers restent acceptables pour ces équipements. Les variations rapides de tension sont provoquées par le fonctionnement d'appareils dont la puissance absorbée fluctue de manière rapide, tels que les fours à arc, les machines à souder [13], ces derniers produisent des variations oscillatoires permanentes de tension [1]. Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoire de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, (Fig. 2.3).

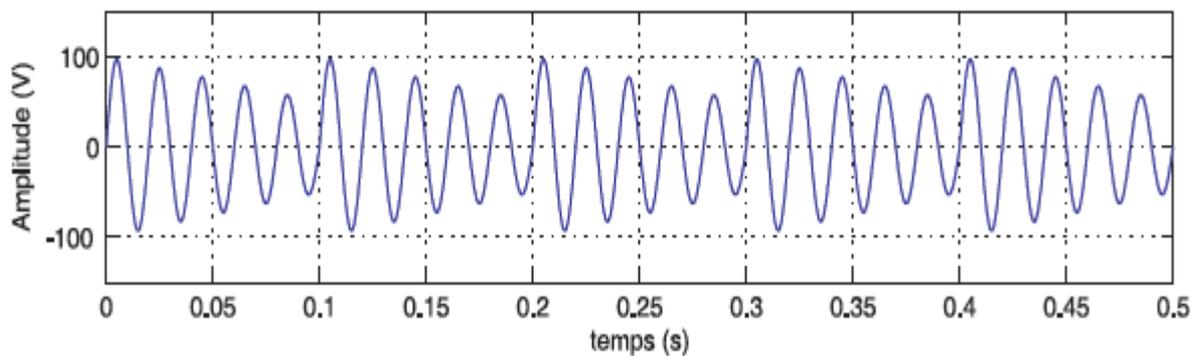


Fig.2.3. fluctuation de tension

Ces fluctuations sont essentiellement causées par :

- Dysfonctionnement du système d'éclairage,
- Machines à charges fluctuantes,
- Les machines à souder.

Leurs conséquences peuvent être résumées comme suit :

- Une variation de tension de 0,5 %, 6 à 8 fois par seconde, engendre un flicker visible. Le flicker ne perturbe que rarement les machines, car les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 5\%$.
- Fluctuation de luminosité des lampes (papillotement), c'est le principale effet des fluctuations ;
- La gêne physiologique (fatigue visuelle et nerveuse), dépend de l'amplitude des fluctuations, de la cadence de répétition des variations, de la composition spectrale et de la durée de la perturbation, [11].
- **Surtension.** Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête dépasse les limites d'une plage ($U_n + 10\%$) défini par une norme est une surtension.

Les surtensions sont de natures et d'origines diverses :

➤ Les surtensions temporaires à fréquence industrielle.

C'est une augmentation brutale de la valeur efficace de la tension sur une ou plusieurs phases (plus de 110 % de la tension nominale) pour une durée de 3 sec à 1 min, elles sont à la même fréquence que celle du réseau, [11]. Un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre isolé, conduit la tension des phases saines par rapport à la terre à une valeur composée $\sqrt{3} U_{ph}$. En cas de rupture du conducteur de neutre, les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée). De même un excès de puissance réactive capacitive en ligne en gendre une surtension.

➤ Les surtensions de manœuvre :

Les surtensions de manœuvre découlent essentiellement de la modification de la structure du réseau électrique, liée à diverses commutations ; par exemple, commutation en charge normale, commutation des batteries de condensateurs.....

➤ Les surtensions atmosphériques :

Les réseaux de distribution aériens HTA et BT sont les plus affectés par les surtensions et surintensités d'origine atmosphérique (foudre). Les effets des coups de foudre peuvent être directs (sur la ligne ou sur une structure) ou indirects (par effet inductif). Les coups de foudre engendrent un certain nombre d'effets nocifs ; tels que : Claquage diélectrique, longue coupure entraînée par la destruction de matériel, Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication, Arrêt ou démarrage des ME.

2.2.2. Effets principaux de la surtension.

Les effets impliqués sont très divers selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence.....

On cite par exemple :

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées).

- Coupure longue entraînée par la destruction de matériel (perte de facturation pour les distributeurs, pertes de production pour les industriels).
- Perturbations des circuits de contrôle commande et de communication à courant faible.
- Contraintes électrodynamiques et thermiques (incendie) causées par :
 - La foudre essentiellement : les réseaux aériens sont les plus affectés par la foudre, mais les installations alimentées par des réseaux souterrains peuvent subir des contraintes de tension élevées en cas de foudroiement à proximité du site.
 - Les surtensions de manœuvre qui sont répétitives et dont la probabilité d'apparition est nettement supérieure à celle de la foudre et de durée plus longue. Elles peuvent conduire à des dégradations aussi importantes que la foudre [14].

2.2.3. La variation de la fréquence.

La fréquence d'un réseau alternatif de distribution publique est directement liée à la vitesse de rotation des alternateurs (centrale).

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 déséquilibres entre « production et consommation (charge) ». Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques,[12]. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1 \%$. (1). Cette dernière est mesurée sur un intervalle de 10 s.

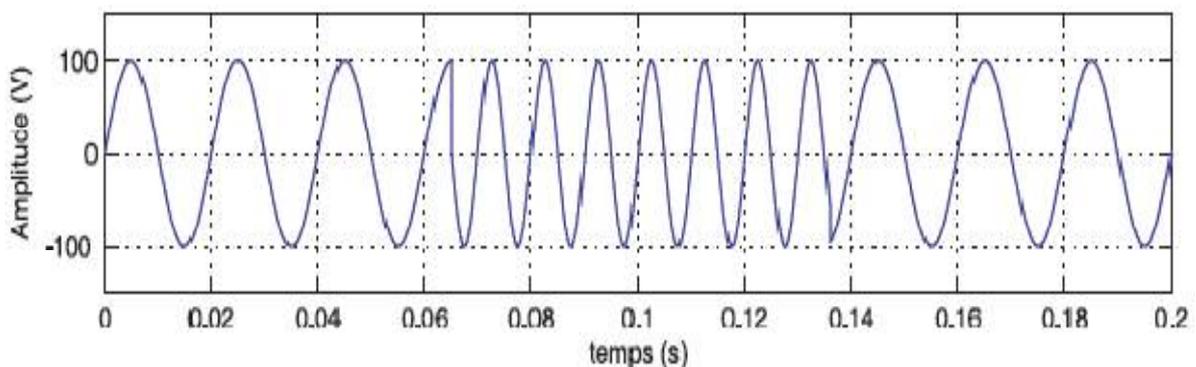


Fig.2.4. variation de fréquence.

2.2.4. 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 50 Hz associée à des ondes de fréquences supérieures à 50Hz appelées également harmoniques ; dont les sources sont essentiellement les convertisseurs statiques, les fours à arc, inductance saturée.....

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges incidentes des courants harmoniques dont les fréquences sont des multiples entiers de la fréquence fondamentale, ou parfois à des fréquences quelconques. La circulation de ces courants harmoniques dans les impédances du réseau électrique peut entraîner des tensions harmoniques aux nœuds de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau[1].

Les harmoniques se distinguent par leur rang de type pair ou impair. Les harmoniques de rang pair (2, 4, 6, 8 ...), très souvent négligeables en milieu industriel, s'annulent en raison de la symétrie du signal. Par contre, les harmoniques de rang impair (1, 3, 5, 7) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. Les harmoniques de rang supérieur à 25 sont négligeables [15].

La circulation des harmoniques, supérieur des systèmes électriques engendre beaucoup d'effets nocifs sur les divers équipements et implique des effets très gênantes dans les régimes de leurs fonctionnement. On en cite par exemple, les effets sur le facteur de puissance des nœuds, sur le couple des moteurs sur l'échauffement des transformateurs, sur les systèmes de protection... La circulation des harmoniques dans les éléments du réseau engendre de pertes en ligne supplémentaire, lesquelles peuvent entrainer des échauffements non admissibles...

Les pertes actives (joule) dans une ligne sont proportionnelles au carré du courant de circulation. On pollution harmonique ce dernier s'exprime :

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 \dots} \quad (2.1)$$

Ensuite les pertes actives dans la résistance R de la ligne

$$\Delta P = R \sum I_N^2 \quad (2.2)$$

Les implications essentielles des harmoniques dans les différentes installations sont récapitulées à titre d'exemple dans le tableau suivant :

Tab.2.2. Conséquences des harmoniques, (16).

Matériels	Gêne liée à la pollution harmonique	Seuils admissibles de distorsion
Alternateurs	Pertes supplémentaires dans les enroulements statoriques et principalement dans les amortisseurs liées à la circulation des courants harmoniques.	dU=10% dI=5%
Lignes	Pertes ohmiques supplémentaires.	dU= 3% dI= 1.7%
Câbles	-Pertes ohmiques supplémentaires, surtout dans les câbles de retour du neutre où circulent les courants harmoniques d'ordres 3 ou homopolaires. -Pertes diélectriques liées à la distorsion de tension pouvant entraîner des détériorations. -Corrosion des câbles en aluminium sous l'effet de la circulation des courants harmoniques pairs associés à une composante continue.	dU=10% U _k %=7%
Transformateurs	-Pertes supplémentaires dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. -Pertes supplémentaires dans le fer (par courants de Foucault) -Risque de saturation en présence des composantes continues.	Distorsion de dU=10% dI=5%
Moteurs	-Pertes supplémentaires dans les enroulements, principalement liées à la distorsion de tension, proportionnelle à $\frac{U_h^2}{h^2}$ -Limitation des performances en puissance.	dU=15% dI= 10%

2.2.5. La symétrie.

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs ; c'est-à-dire, les trois grandeurs de même nature et de même pulsation forment un système triphasé équilibré lorsqu'elles ont la même

amplitude et lorsqu'elles sont déphasées de $\pm 120^\circ$. Lorsque ces grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé asymétrique.

Les déséquilibres sont généralement dus à des charges monophasées car dans ce cas les courants absorbés sur les trois phases sont d'amplitude et/ou de phase différente, d'où un déséquilibre des trois tensions. Le déséquilibre des tensions peut également être dû à des charges triphasées, lorsque celles-ci ne sont pas symétriques. On parle d'un déséquilibre d'amplitude lorsque les trois tensions n'ont pas la même valeur efficace, et d'un déséquilibre de phase lorsque le déphasage entre les trois phases successives n'est pas de 120° . Le niveau de déséquilibre est lié à la fois à la puissance et la localisation des charges perturbatrices, et à la puissance de court-circuit du réseau amont. Le bouclage des réseaux, favorable à l'obtention d'une puissance de court-circuit élevée, permet de diminuer le degré de déséquilibre. Les déséquilibres de tension engendrent des composantes inverses de courant, qui provoquent des couples de freinage parasites et des échauffements dans les moteurs à courant alternatif. Ils peuvent également perturber le fonctionnement des dispositifs à thyristors [17].

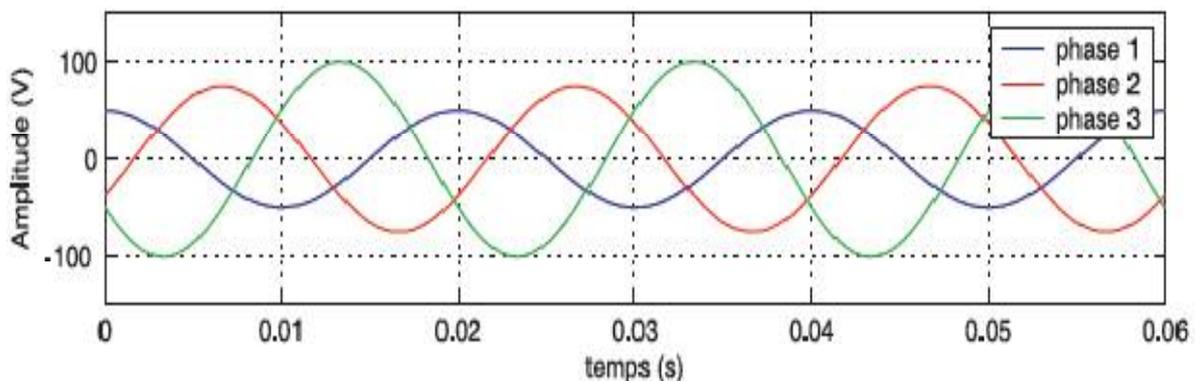


Fig.2.5. Déséquilibre du système de tension.

2.3. Qualité du courant.

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale et se caractérise, de la même manière que pour les tensions, par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie. Dans le cas idéal, les trois courants sont d'amplitude et de fréquence constante, déphasé de $2\pi/3$ entre eux, et de forme sinusoïdale. Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la

tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ».

2.4. Procédures habituelles d'amélioration.

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des produits qui en dépendent en impliquant ainsi des dégâts économiques sérieux et des conséquences possibles sur la sécurité des personnes.

Ceci suppose trois éléments :

- Un ou plusieurs générateurs de perturbations.
- Un ou plusieurs récepteurs sensibles à ces perturbations.
- Entre les deux un chemin de propagation de ces perturbations.

Les solutions consistent à agir sur tout ou sur une partie de ces trois éléments ; soit de façon globale (installation), soit de façon locale (un ou plusieurs récepteurs). Ces solutions peuvent être mises en œuvre pour corriger un dysfonctionnement dans une installation, de façon préventive en vue du raccordement de charges polluantes, de mettre en conformité l'installation par rapport à une norme ou à des recommandations du distributeur d'énergie et de réduire la facture énergétique (réduction de l'abonnement en (KVA), réduction de la consommation). Les récepteurs n'étant pas sensibles aux mêmes perturbations et avec des niveaux de sensibilité différents, la solution adoptée en plus d'être la plus performante d'un point de vue technico-économique, doit garantir un niveau de qualité de l'énergie électrique sur mesure et adaptée au besoin réel.

L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent être effectués par des spécialistes.

L'utilité même de choisir une solution et de la mettre en œuvre dépend :

- Du niveau de performance souhaité : Un dysfonctionnement peut être inadmissible s'il met en jeu la sécurité des personnes (hôpitaux, balisage des aéroports, éclairage et systèmes de sécurité des locaux recevant du public, auxiliaires de centrale.....) ;
- Des conséquences financières du dysfonctionnement : Tout arrêt non programmé, même très court, de certains procédés (fabrication de semi-conducteurs, sidérurgie, pétrochimie.....) conduit à une perte ou à une production de mauvaise qualité.

- Du temps de retour sur investissement souhaité : C'est le rapport entre les pertes financières (matière premières, pertes de production,...) provoquées par la non qualité de l'énergie électrique et le coût (étude, mise en œuvre, fonctionnement, maintenance) de la solution [18].

2.4.1. Creux de tension et coupures.

Les tensions perturbatrices dans un réseau électrique basse tension sont principalement les creux de tension qui sont généralement causées par la circulation des courants harmoniques et/ou déséquilibrés. Pour dépolluer les réseaux électriques de ces perturbations, on peut limiter la circulation des courants perturbateurs en utilisant les solutions traditionnelles. La solution la plus fréquente dans les milieux sensibles (hôpitaux, sites industriels..... etc.) est d'utiliser des groupes électrogènes qui se substituent au réseau électrique. Mais la limitation de la puissance de ces groupes ainsi que la qualité médiocre de l'énergie électrique fournie restent un problème.

La solution moderne pour la compensation des creux de tension se base sur l'utilisation de dispositifs de compensation à réserve d'énergie comme les ASI (Alimentation Sans Interruption). Ces dispositifs sont intercalés en série entre le réseau polluant et l'installation à désensibiliser pour assurer une fourniture de l'énergie électrique même pendant les creux de tension ou les coupures brèves. Le problème est la limitation en puissance de ces dispositifs et leur autonomie qui n'est pas toujours adaptée à la durée des creux de tension ou aux coupures brèves [18].

2.4.2. Surtensions.

Obtenir une bonne coordination d'isolement c'est réaliser la protection des personnes et des matériels contre les surtensions avec le meilleur compromis technico-économique. Elle nécessite de :

- Connaître le niveau et l'énergie des surtensions pouvant exister sur le réseau.
- Choisir le niveau de tenue aux surtensions des composants du réseau permettant de satisfaire aux contraintes.
- Utiliser des protections quand cela est nécessaire.

Solutions pour les surtensions à fréquence industrielle.

- Mettre hors service tout ou une partie des condensateurs en période de faible charge.

- Eviter de se trouver dans une configuration à risque de Ferro résonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

Solutions pour les surtensions de manœuvre.

- Limiter les transitoires provoqués par la manœuvre de condensateurs par l'installation de self de choc, résistances de pré insertion. Les compensateurs automatiques statiques qui permettent de maîtriser l'instant d'enclenchement sont particulièrement adaptés aux applications BT n'acceptant pas les surtensions transitoires (automates industriels, informatique).
- Placer des inductances de ligne en amont des convertisseurs de fréquence pour imiter les effets des surtensions transitoires.
- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiel et sélectif (type « S ») en BT et des disjoncteurs. Leur emploi évite les déclenchements intempestifs dus à des courants de fuite transitoires : surtensions atmosphériques, de manœuvre, mise sous tension de circuits fortement capacitifs à la terre (filtre capacitifs reliés à la terre, réseaux de câbles étendus.....) qui s'écoulent dans le réseau en aval du DDR (Dispositif à courant Différentiel Résiduel) par les capacités à la terre du réseau.

Solution pour les surtensions atmosphériques.

- Protection primaire : Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câble de garde).
- Protection secondaire : Elle protège les équipements contre les surtensions atmosphériques consécutives au coup de foudre. Des parafoudres (de moins en moins des éclateurs) sont installés sur les points des réseaux HT et en MT particulièrement exposés à l'entrée des postes MT/BT. Les surtensions peuvent se propager jusqu'à l'appareil par d'autres voies que l'alimentation électrique : les lignes téléphoniques (téléphone, fax), les câbles coaxiaux (liaisons informatiques, antennes de télévision) [14].

2.4.3. Fluctuation de tension.

Les fluctuations produites par les charges industrielles peuvent affecter un grand nombre de consommateurs alimentés par la même source. L'amplitude de la fluctuation dépend du rapport entre l'impédance de l'appareil perturbateur et celle du réseau d'alimentation.

Les solutions consistent à ;

- Changer de mode d'éclairage : Les lampes fluorescentes ont une sensibilité plus faible que les lampes à incandescence.
- Installer une alimentation sans interruption : Elle peut être économique lorsque les utilisateurs perturbés sont identifiés et regroupés.
- Modifier le perturbateur : Le changement du mode de démarrage de moteurs à démarrages fréquents permet par exemple de réduire les surintensités [14].
- Modifier le réseau : Augmenter la puissance de court-circuit en raccordant les circuits d'éclairage au plus près du point d'alimentation. Eloigner « électriquement » la charge perturbatrice des circuits d'éclairage en alimentant la charge perturbatrice par un transformateur indépendant.
- Utiliser un compensateur automatique Cet équipement réalise une compensation en temps réel par de la puissance réactive. Le Flicker peut être réduit de 25% à 50%.
- Placer une réactance série : En réduisant le courant appelé, une réactance en aval du point de raccordement d'un four à arc peut réduire de 30% le taux de Flicker. [18].

2.4.4. Les solutions pour l'asymétrie de la tension.

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées mal réparties, les solutions consistent à :

- Equilibrer les charges monophasées sur les trois phases.
- Diminuer l'impédance du réseau en amont des générateurs de déséquilibre en augmentant les puissances des transformateurs et la section des câbles.
- Prévoir une protection adaptée des machines.
- Utiliser des charges L, C judicieusement raccordées [14],
- Augmentation de la puissance de court-circuit.
- Dispositif de rééquilibrage.

- Modification de l'architecture de réseau.
- Compensation de la puissance réactive [18].

2.4.5. Les solutions pour les harmoniques.

Trois orientations sont possibles pour les supprimer ou au moins réduire leur influence ;

- Réduction des courants harmoniques générés : Une inductance triphasée est placée en série avec l'alimentation (ou intégrée dans le bus continu pour les convertisseurs de fréquence). Elle réduit les harmoniques de courant de ligne (en particulier ceux de rang élevés) donc la valeur efficace du courant absorbé ainsi que la distorsion au point de raccordement du convertisseur. Il est possible de l'installer sans intervenir sur le générateur d'harmoniques et d'utiliser des inductances communes à plusieurs variateurs.
- Utilisation de redresseurs dodécaphasés : Cette solution permet, par combinaison des courants, d'éliminer au primaire les harmoniques de rang les plus bas tels que 5 et 7 (souvent les plus gênants car de plus fortes amplitudes). Elle nécessite un transformateur à deux secondaires, l'un en étoile, l'autre en triangle, et permet de ne générer que les harmoniques de rang $12k \pm 1$.
- Appareils à prélèvement sinusoïdal : Cette méthode consiste à utiliser des convertisseurs statiques dont l'étage redresseur exploite la technique de commutation MLI qui permet d'absorber un courant sinusoïdal.
- Modification de l'installation,
 - Immuniser les charges sensibles à l'aide de filtres,
 - Augmenter la puissance de court-circuit de l'installation,
 - Déclasser des équipements,
 - Confiner les charges polluantes :

En premier, il faut raccorder les équipements sensibles aussi près que possible de leur source d'alimentation. Ensuite, il faut identifier puis séparer les charges polluantes des charges sensibles, par exemple en les alimentant par des sources séparées ou par des transformateurs dédiés. Tout cela en sachant que les solutions qui consistent à agir sur la structure de l'installation sont, en général, lourdes et coûteuses.

- Filtrage.

- Le filtrage passif : Il consiste à réaliser une impédance faible aux fréquences à atténuer grâce à l'agencement de composants passifs (inductance, condensateur, résistance). Cet ensemble est placé en dérivation sur le réseau. Plusieurs filtres passifs en parallèle peuvent être nécessaires pour filtrer plusieurs composantes. Le dimensionnement des filtres harmoniques doit être étudié : un filtre passif mal conçu peut conduire à des résonances dont l'effet est d'amplifier des fréquences qui n'étaient pas gênantes avant son installation.
- Le filtrage actif : Il consiste à neutraliser les harmoniques émis par la charge en analysant les harmoniques consommés par la charge et en restituant ensuite le même courant harmonique avec la phase convenable. Il est possible de mettre en parallèle plusieurs filtres actifs.
- Le filtrage hybride : Il est composé d'un filtre actif et d'un filtre passif accordé sur le rang de l'harmonique prépondérant et qui fournit l'énergie réactive nécessaire.
 - Cas particulier : les disjoncteurs :

Les harmoniques peuvent provoquer des déclenchements intempestifs des dispositifs de protection, pour les éviter il convient de bien choisir ces appareils. Les disjoncteurs peuvent être équipés de deux types de déclencheurs, magnétothermiques ou électroniques, [14].

2.5. Moyens de traitement de QEE.

La dégradation de la qualité de l'énergie électrique, dont la tension et la fréquence sont les indices fondamentaux implique des effets qui peuvent être très nocifs quant au fonctionnement et à la performance du système électrique d'ensemble et à ceux de ses éléments et leurs équipements.

A titre d'exemple, on peut citer les implications suivantes :

- Un déséquilibre entre les puissances produites et celles consommées par rapport à la balance requise entraîne les générateurs des centrales dans des régimes transitoires qui, en l'absence des moyens de contrôle et de régulation, mettent les machines dans un grand risque d'instabilité..... L'indice de qualité dans ce cas est la fréquence.

- La dégradation du plan de tension et sa sortie des normes requises, se répercute immédiatement sur les forces motrices des diverses installations dans le système en entraînant leur ralentissement, voire leur arrêt et par suite la perte de leur utilité.
- La sortie des normes de la valeur de la tension (par exemple en augmentation) implique au vieillissement prématuré des équipements qui se traduit en besoin permanent de leur renouvellement en appelant des investissements complémentaires d'où l'élévation du coût des systèmes électriques...La diminution de la tension réduit des flux lumineux en entraînant ainsi un mauvais éclairage donc une mauvaise visibilité ; ce qui se répercute sur la qualité du produit...
- L'instabilité de la tension dans les réseaux électriques installe les risques de dysfonctionnement des systèmes de contrôle et de protection des systèmes électriques et de leur performance...

Toutes ces implications rendent ainsi, incontournable, la nécessité de surveillance, de contrôle et de régulation des systèmes d'énergie électrique et de leur régime.

Le choix des moyens de contrôle, dans leur nature et dans leurs caractéristiques, est suggéré par le type même et ses caractéristiques et de la dégradation à traiter.

On en cite par exemple :

- Contrôle par les générateurs,
- Contrôle par les transformateurs,
- Compensation de la puissance réactive,
- Filtrage des harmoniques,
- Correction des asymétries,
- Recours au changement de structure (production, délestage...)

Dans ce qui suit, on se propose d'appliquer une procédure de maintenir la tension d'un réseau à étudier dans une vision d'élaboration, dans des limites admissibles.

Il s'agit, en fait, de procéder à l'étude, dans une simulation d'élaboration, d'un réseau régional destiné à alimenter un certain nombre de centres de charge.

Chapitre 3 : Principe d'élaboration des réseaux électriques.

3.1. Principe et définition.

Le besoin croissant en énergie électrique, lié à l'apparition de nouveaux centres socio-économiques ou au développement de ceux existants, implique, respectivement, la conception et l'élaboration de nouveaux systèmes électriques ou l'entretien et le renouveau de ceux en fonctionnement. Mais dans tous les cas, l'apport et l'introduction de nouvelle quantité d'énergie dans la balance énergétique du SEE doivent être soumis à des considérations et à des études technico-économiques. En effet, dans cette balance toujours croissante on doit incessamment disposer de réserve d'énergie électrique pour répondre à d'éventuels déficits et préserver les équilibres requis. Pour assurer cet état d'équilibre, dans le cas global, le processus de croissance de la production doit être en avance par rapport à celui de la consommation. Le rapport défini par les puissances installées correspondantes peut être plus ou moins grand en fonction de la performance des RE, de la maîtrise de leur gestion et de la stratégie de développement des SEE. Dans ce sens, le RE à élaborer doit être conçu en tenant compte nécessairement de son interconnexion avec le SEE d'ensemble.

La conception et l'élaboration d'un RE consistent en une série d'étude, de calculs et de choix de ses différents éléments. Pour cela, on doit disposer de données initiales comme celles :

- Plan d'implantation des charges (consommateurs) et des sources disponibles d'énergie électrique,
- Graphique de charge (charge de calcul),
- Catégorie et type des consommateurs.....

Pendant le traitement des données, on peut avoir besoin d'autres données ; telles que spécifiques à l'environnement : température, humidité, agressivité électrochimique.....

En partant de ces données on doit déterminer essentiellement :

- La configuration la plus avantageuse,
- Le niveau nominal de la tension à utiliser,
- Les paramètres des conducteurs (section),
- Les caractéristiques des transformateurs des sous stations et des postes,

- Les sources de puissance réactive de compensation et leur distribution optimale,
- Les moyens de réglage de la tension.....

Prise en charge uniquement dans ces questions, l'étude du réseau à élaborer ne fera ressortir que les solutions liées, essentiellement, au régime. Or, un réseau électrique est défini non seulement par ses régimes de fonctionnement, mais également par :

- Sa construction et son dimensionnement,
- Les réseaux parallèles de contrôle et protection,

La première composante renferme les éléments de construction des lignes aériennes, des câbles souterrains et des différents postes, lesquels exigent des tracés de cheminement des charges, un dimensionnement optimal, une fiabilité mécanique requise.....prise en charge dans ces aspects, l'étude des RE implique, donc, un traitement incontournable relatif à la construction des éléments du RE pendant lequel on doit recourir aux notions de la résistance des matériaux dans leurs propriétés aussi bien statiques que dynamiques. Il est nécessaire de remarquer que, par leurs relations déterminantes avec les niveaux nominaux de la tension et les régimes, ces questions sont traitées de manière particulière, mais toujours dans la discipline des SEE. On doit également préciser que le dimensionnement des éléments de construction a un impact déterminant sur les résolutions et les choix technico-économiques optimaux des caractéristiques des lignes et, par conséquent sur les paramètres de fonctionnement du réseau en général. De ce fait, ces résolutions doivent être prises en charge en tenant compte, dès le stade de l'étude et de la conception, des contraintes impliquées naturellement par le développement du réseau ; telles que croissance de la consommation, nécessité éventuelle de relever le niveau de tension, extension.....

La deuxième composante sus indiquée a trait au maintien des états de fonctionnement requis et conformes à des conditions limites normalisées, lesquelles sont également définies et établies suite à des recherches de solutions optimales.

Comme signifié ci-haut, la diversité des éléments en interaction électromagnétique et celle de leurs propriétés posent de sérieux problèmes à la recherche des états de régime optimaux sur plusieurs plans ; stabilité, plan des tensions, économie d'énergie, continuité de service, protection, contrôle, régulation.....On est, ainsi, près de définir le champ d'action des systèmes de contrôle et de protection, en même temps que d'entrevoir leur importance : impact d'autant plus déterminant que les états de régime sont variables (aléatoires) et complexes.

Les systèmes de contrôle et de protection représentent une composante naturelle et fondamentale des systèmes électriques et doivent être enseignés, naturellement, dans les disciplines des SEE, [9].

3.2. Plan d'implantation des charges.

Le modèle à étudier et à proposer doit alimenter quatre (4) centres de charge (consommateurs). L'interconnexion de ce réseau régional au système d'ensemble se fait au niveau d'un poste PI supposé donner et implanté au voisinage. En insérant le plan d'implantation des charges dans un système de coordonnées XOY, on peut représenter les lieux des charges par leurs coordonnées respectives, (Fig.3.1 ; Tb.3.1)

La figure 3.1 représente les charges (S_1, S_2, S_3, S_4) et le poste PI. Les données initiales sont représentées dans le tableau 3.1.

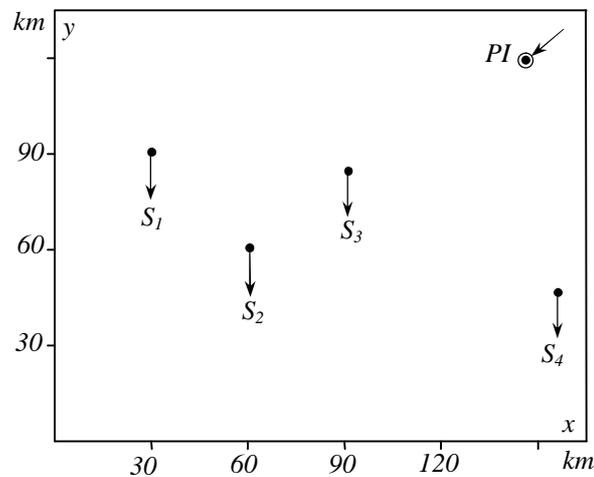


Fig.3.1. Implantation des charges et poste PI.

Tab.3.1.

	P_i MW	Q_i MVAR	X_i km	Y_i km
S₁	50	40	30	90
S₂	40	30	61,5	60
S₃	30	25	91,5	85,5
S₄	60	50	156	24
PI	180	145	147	120

3.3. Coordonnées du centre de charge.

3.3.1. Moments électriques.

Pour la détermination des coordonnées du poste régional, on utilise la notion des moments électriques qui permet de déterminer le centre de gravité des charges.

On utilisant donc les expressions comme suit,

$$X_B = \frac{\sum P_i X_i}{\sum P_i} = \frac{P_1 X_1 + P_2 X_2 + P_3 X_3 + P_4 X_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4} \quad (3.1)$$

$$Y_B = \frac{\sum P_i Y_i}{\sum P_i} = \frac{P_1 Y_1 + P_2 Y_2 + P_3 Y_3 + P_4 Y_4}{P_1 + P_2 + P_3 + P_4} \quad (3.2)$$

on peut obtenir pour le poste régional :

$$X_B = \frac{(50 \times 30) + (40 \times 61,5) + (30 \times 91,5) + (60 \times 156)}{50 + 40 + 30 + 60} = 81,361 \text{ km}$$

$$Y_B = \frac{(50 \times 90) + (40 \times 60) + (30 \times 85,5) + (60 \times 24)}{50 + 40 + 30 + 60} = 60,583 \text{ km}$$

Ainsi pour la charge S_B et conformément à l'échelle (1 cm pour 15 km), on reporte les coordonnées suivantes sur le plan ;

$$(X_B ; Y_B) = (5,42\text{cm} ; 4,03\text{ cm})$$

Distance entre charges (Tb.3.2) ;

$$L_{ij} = \sqrt{(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2} \quad (3.3)$$

Exemple de calcul :

$$L_{B1} = \sqrt{(30 - 81,361)^2 + (90 - 60,583)^2} = 59,188\text{ km}$$

Tab.3.2.

L _{ij}	L _{1B}	L _{2B}	L _{3B}	L _{4B}	L ₁₂	L ₂₃	L ₂₄
km	59,188	19,869	26,900	83,122	43,5	39,373	89,120

Plan de charge avec le poste régional. La figure.3.2 représente le plan des charges avec le poste régional PL.

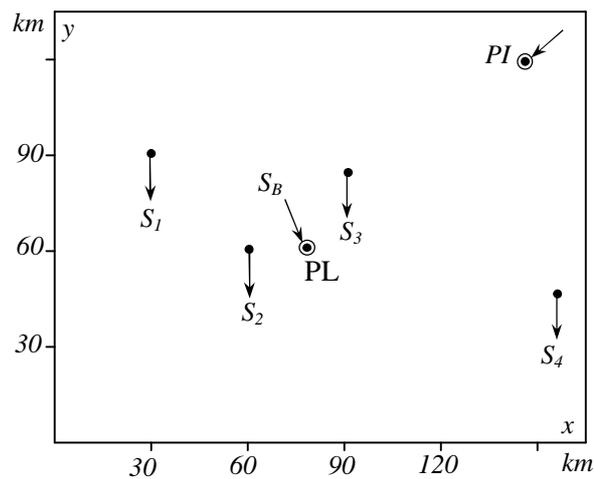


Fig.3.2. Implantation des charges avec le poste régional.

3.3.2. Choix de la tension nominale.

Pour choisir les paramètres électriques du réseau à élaborer, il est nécessaire de disposer de la tension à installer. Pour choisir cette dernière, on peut utiliser, en règle générale, les formules :

$$\text{Pour } L \leq 250 \text{ km ; } P \leq 60 \text{ Mw : } U_{(kv)} = 4,31\sqrt{L(km) + 0,016 P (kw)} \quad (3.4)$$

$$\text{Pour : } L \leq 1000 \text{ km ; } P \geq 60 \text{ Mw : } U_{(kv)} = \sqrt{P(kw) \left[0,1 + 0,151\sqrt{L(km)} \right]} \quad (3.5)$$

La tension nominale est fonction principale de la longueur et de la puissance de transit. Pour l'éloignement des deux charges S_1 et S_4 , on détermine

$$L_{B1} = 59,188 \text{ km} < 250 \text{ km} , \quad L_{B4} = 83,122 \text{ km} < 250 \text{ km}$$

et pour les puissances P_1 et P_4 on a :

$$P_1 = 50 \text{ (Mw)} < 60 \text{ (Mw)} \quad \text{et } P_4 = 60 \text{ (Mw)}$$

Dans le plan d'implantation donné, on constate que le centre de charge S_4 est le plus chargé et le plus éloigné ; aussi bien du poste « B » que du PI. On retient donc ces deux données pour le choix de la tension nominale.

Conformément à ces deux données, on retient la première formule.

$$U_{(kv)} = 4,34\sqrt{L(km) + 0,016 P (kw)}$$

$$\text{Pour } S_1 : \quad U_{(kv)} = 4,34\sqrt{59,188 + 0,016 (50000)} = 127,213 \text{ kV}$$

$$\text{Pour } S_4 : \quad U_{(kv)} = 4,34\sqrt{83,122 + 0,016 (60000)} = 140,17 \text{ kV}$$

Ce qui permet de choisir une tension nominale pour tout le réseau $U_N = 220 \text{ kv}$

3.4. Choix et comparaison des modèles.

Modèle d'alimentation. Pour le choix du schéma du modèle, on peut présenter deux (2) cas de la figure :

- Le réseau régional est alimenté à partir de PI, mais par l'intermédiaire d'un poste installé dans le centre des charges du réseau.
- Le réseau régional est alimenté directement du PI.

Configuration du réseau. Le choix de la configuration d'un réseau à élaborer nouvellement est basé sur deux critères essentiels :

- Dépenses réduites minimales (critères technico-économiques).
- Continuité de service des récepteurs en cas d'incidents au niveau du réseau.

Pour la détermination du modèle à retenir comme variante rationnelle, on peut procéder par comparaison de quelques variantes établies en respectant les critères cités. La procédure des variantes consiste à établir quelques modèles de configurations équivalents du point de vue continuité de service pour lesquelles on doit appliquer le critère des dépenses réduites pour une évaluation comparative.

Dans les modèles à composer, on doit tenir compte des paramètres suivants :

- Longueur totale des lignes de transport,
- Puissance transmise,
- Disposition géographique,
- Caractères des consommations.

Pour le modèle composé, on doit tenir compte également des points suivants :

- L'alimentation du point de consommation doit s'effectuer par la plus courte voie.
- On évite les lignes qui sont mal chargées.
- On ne projette pas plus de deux lignes.

A partir de la procédure prédéfinie et les aspects spécifiques du choix ; on peut proposer à la comparaison technico-économique des cas suivants :

3.4.1. Cas 1. Installation de poste local « PL ».

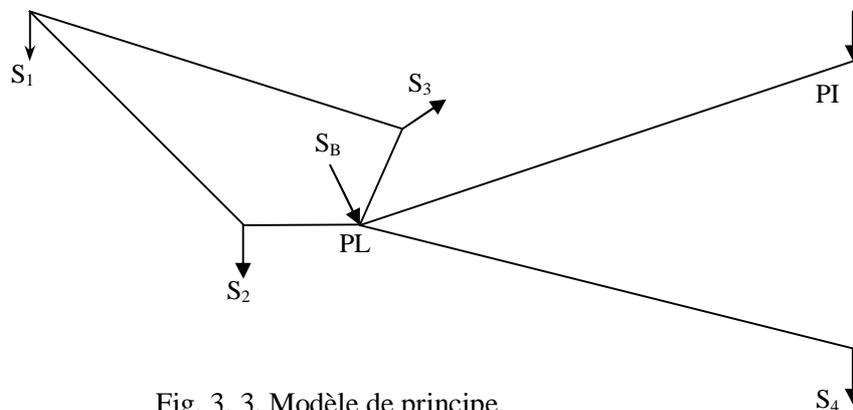


Fig. 3. 3. Modèle de principe.

Tab.3.3.

$L_{1B'}$ km	$L_{2B'}$	$L_{3B'}$	L_{1B}	L_{2B}	L_{3B}	$L_{BB'}$
97,5	142,5	37,5	61,5	16,5	121,5	159

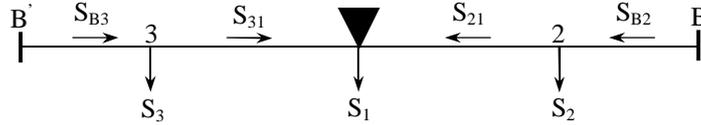


Fig. 3.4. Schéma de calcul.

La circulation des puissances de ligne de la boucle peut être déterminée par les moments électriques, comme suit :

$$S_{B2} = \frac{\sum S i \hat{Z}_{iB'}}{\hat{Z}_{BB'}} \quad (3.6)$$

$$S_{B'3} = \frac{\sum S i \hat{Z}_{iB}}{\hat{Z}_{BB'}} \quad (3.7)$$

En supposant dans un premier temps que : $r_0 + jx_0 = Cte$, alors

$$S_{B2} = \frac{S_2 L_{2B'} + S_1 L_{1B'} + S_3 L_{3B'}}{L_{BB'}}$$

$$S_{B'3} = \frac{S_1 L_{1B} + S_2 L_{2B} + S_3 L_{3B}}{L_{BB'}}$$

L'application de ces formules donnent ;

$$S_{B2} = 73,584 + j57,311 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{B3} = 46,415 + j37,688 \quad (\text{MVA})$$

Conformément à la loi des nœuds, on peut déterminer de manière simple les autres puissances de ligne comme :

$$S_{12} = S_{B2} - S_2 = (73,584 + j57,311) - (40 + j30) = 33,584 + j27,311 \quad (\text{MVA})$$

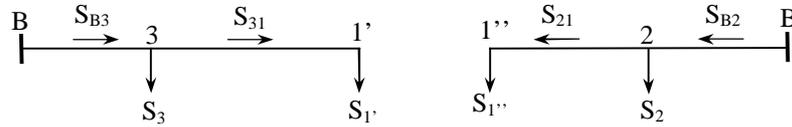
$$S_{31} = -S_{12} + S_1 = -(33,584 + j27,311) + (50 + j40) = 16,42 + j12,689 \quad (\text{MVA})$$

On obtient, ainsi, le schéma suivant dans lequel le nœud « 1 » est un nœud de section de puissances. Pour ce schéma, on peut exprimer :

$$S'_1 \approx S_{31}$$

$$S''_1 \approx S_{21}$$

Cette représentation permet de traiter la boucle comme deux réseaux simples indépendants.



Choix de la section. La section des conducteurs s'effectue à la base de la densité économique et conformément à une charge (courant de ligne) dite de calcul. En effet, comme le réseau étudié est régional, les centres de charge contiennent nécessairement des consommateurs industriels de catégorie 1; les graphiques de charge seront donc caractérisés par des temps d'utilisation de la charge maximale élevés; ce qui implique des pertes d'énergie également élevées. Le choix donc de la section doit obéir à une densité donnée économique pour tout le réseau.

On écrit, alors,

$$F = \frac{I_{max}}{J_{eco}} \quad (3.8)$$

F : Section du conducteur (mm²)

J_{eco} : Densité économique (A/mm²) ; soit $J_{eco}=1$ A/mm²

I_{max} : Courant de ligne correspondant au régime maximal de charge.

Calcul des courants de lignes et choix des sections. Les procédures de calcul appliquées aux cas proposés à la comparaison permettent de remplir le tableau 3.4. On y constate, les puissances de ligne, les courants correspondants, les sections calculées et les valeurs nominales des sections choisies pour les deux cas.

Exemple de calcul:

$$I_{B2} = \frac{S_{B2}}{\sqrt{3}U_N} = \frac{\sqrt{(73,584)^2 + (57,311)^2}}{\sqrt{3} \cdot 220} \times 10^3 = 244,768 \quad (A)$$

$$F_{B2} = I_{B2} = 224,768 \text{ mm}^2 \quad \text{avec : } J_{eco} = 1$$

Tab.3.4.

Ligne	S MVA	I A	F mm ²	Type
B-2	75,584+j57, 311	244,768	244,768	AC-300
B-4	60+j50	204,965	204,965	AC-240
B'-3	46,415+37,688	156,905	156,905	AC-240
1-2	33,584+j27, 311	113,599	113,599	AC-240
3-1	16,42+j12, 689	54, 458	54, 458	AC-240

Paramètres des conducteurs. Les résultats du tableau 3.4 permettent de choisir et de déterminer les valeurs des paramètres électriques primaires des conducteurs des lignes. Ces derniers sont donnés dans le tableau 3.5.

Tb.3.5

Ligne	F mm ²	r ₀ , Ω /km	x ₀ , Ω /km	b ₀ , 10 ⁻⁶ , Ω ⁻¹ /km	R Ω	X Ω	b 10 ⁻⁶ Ω ⁻¹	L km
B-2	300	0,105	0,374	3,04	2,086	7,431	60,401	19,869
B-4	240	0,131	0,463	2,44	10,888	38,485	202,817	83,122
B'-3	240	0,131	0,413	2,74	4,912	15,487	102,75	37,5
1-2	240	0,131	0,423	2,68	5,698	18,4	116,58	43,5
3-1	240	0,131	0,449	2,51	8,646	29,634	165,66	66

Comparaison des modèles. Pour la comparaison des variantes et pour arrêter un choix convenable, on se base généralement sur l'analyse technico-économique et le critère de dépenses réduites minimales $D_{r\ min}$. Ces concepts d'analyse technico-économique ou de dépenses réduites sont largement utilisés dans les projets d'étude, de conception et d'élaboration des systèmes électriques et autre.....

En raison de la complexité des réseaux électriques, aussi bien dans leur structure et leur construction que dans leur régime et leur contrôle et gestion, dans la fonction des dépenses réduites, on doit tenir compte de plusieurs aspects tels, essentiellement, techniques et économiques.

Conformément à ces conditions, la fonction des dépenses déduites dans sa forme la plus simple, s'exprime :

$$D_r = D_I + D_{e,p} \quad (3.9)$$

D_r : Dépenses rapportées annuelles (DA/an) ;

D_I : Dépenses sommaires d'investissements réduites à l'année (DA/an) ;

$D_{e,p}$: Dépenses dues à l'énergie perdue par an (DA/an).

Les D_I contiennent les dépenses d'investissements initiales (de départ) et celles relatives à l'entretien, la répartition, le renouvellement.....

On calcule les pertes de puissances actives et réactives pour chaque variante. Pour cela on utilise les expressions suivantes :

$$\Delta P = (S^2/U_N^2).r \quad (3.10)$$

$$\Delta Q = (S^2/U_N^2).x \quad (3.11)$$

Tab.3.6.

Ligne	S (MVA)	R (Ω)	X (Ω)	ΔP (MW)	ΔQ (MVAR)	ΔS (MVA)
B-2	75,584+j57, 311	2,086	7,431	0,387	1,381	0,387+j1, 381
B-4	60+j50	10,888	38,485	1,372	4,850	1,372+j4, 850
B'-3	46,415+j37, 688	4,912	15,487	0,362	1,143	0,362+j1, 143
1-2	33,584+j27, 311	5,698	18,4	0,220	0,712	0,220+j0, 712
3-1	16,42+j12, 689	8,646	29,634	0,0760	0,263	0,076+j0, 263
				Total :		
				2,417		

Dépenses d'investissements des conducteurs par an. Pour procéder au calcul des dépenses d'investissement (D_I) des conducteurs, supposons que le rapport des prix par km est égal au rapport direct des sections ; soit,

$$\frac{F_i}{F_b} = \frac{D_i}{D_b} \quad (3.12)$$

F_i : Section en question ;

F_b : Section de base choisie quelconque ;

D_i : Dépense par km de ligne (conducteurs) de section F_i ;

D_b : Dépense de base donnée par km de longueur correspondante à la section F_i .

Pour un conducteur de longueur L_i et de section F_i donnée, on peut déterminer les dépenses comme :

$$D_{Ii} = D_i L_i = \frac{F_i}{F_b} L_b D_b \quad (3.13)$$

En divisant et multipliant le deuxième membre par une longueur L_i de base choisie également quelconque, on obtient :

$$D_{li}^* = \frac{F_i}{F_b} D_b \frac{L_i}{L_b} L_b \quad (3.14)$$

ce qui permet d'exprimer,

$$D_{li}^* = \frac{D_{li}}{D_b L_b} = L_i^* F_i^* \quad (3.15)$$

On obtient ainsi une forme dans laquelle les dépenses sont exprimées par unité. Il suffit donc de choisir arbitrairement F_b et L_b pour rendre directement comparables les investissements, respectifs dans les deux cas ; soit,

$$F_b = 300 \text{ mm}^2$$

$$L_b = 60 \text{ km}$$

Tab.3.7.

Ligne	F (mm ²)	L (km)	L _b (km)	F _b (mm ²)	L*	F*	D _{li} *
B-2	300	19,869	60	300	0,331	1	0,33
B-4	240	83,122	60	300	1,385	0,8	1,108
B'-3	240	37,5	60	300	0,625	0,8	0,5
1-2	240	43,5	60	300	0,725	0,8	0,58
3-1	240	66	60	300	1,1	0,8	0,88

Dépenses dues à l'énergie perdue par an. Les dépenses dues aux pertes d'énergie annuelle, peuvent être calculées par la formule suivante :

$$D_{e.p} = \gamma_1 \Delta P_{Tmax} = \gamma_2 \Delta A_T [DA/an] \quad (3.16)$$

ΔP_{Tmax} : Pertes maximales totales de puissance active (KW) ;

ΔA_T : Pertes totales d'énergie annuelle (kwh) ;

γ_1 : Constante déterminée comme,

$$\gamma_1 = \delta (K_m \alpha + b\tau) \quad (3.17)$$

δ : tient compte de l'éloignement du réseau à élaborer ;

$$\delta = 1,03 \div 1,1 \quad \text{pour} \quad U_N \geq 110 \text{ kv}$$

$$\delta = 1.1 \div 1.2 \quad \text{pour} \quad U_N = 6 \div 30 \div 60 \text{ kv}$$

$$\delta = 1.2 \div 1.6 \quad \text{pour} \quad U_N \geq 1 \text{ kv}$$

où, K_m : Coefficient qui tient compte de la coïncidence des maximums des graphiques de charges, (entre réseau étudié et système) ; α : Coefficient spécifique qui exprime l'augmentation des dépenses au niveau de la production pour couvrir les pertes dans les réseaux (DA/kW) ; b: prix moyen de l'énergie (DA/kWh),. $b = 5 \div 8$ DA/kwh ; τ : Temps de pertes maximales (h).

Les résultats de calcul sont présentés dans le tableau 3.8.

Tab.3.8.

δ	K_m	α (DA/kw)	b (kWh)	τ (h)	ΔP_{Tmax} (kw)	D_{ii}^*	L (km)
1,05	0,7	A	6	7500	$2,417 \times 10^3$	3,398	249,991

3.4.2. Cas 2. Alimentation à partir de PI.

Distance entre les différentes charges.

Tab.3.9.

L_{ij}	L_{A3}	L_{31}	L_{12}	L_{23}	L_{34}
(km)	67,5	52,5	45	37,5	90

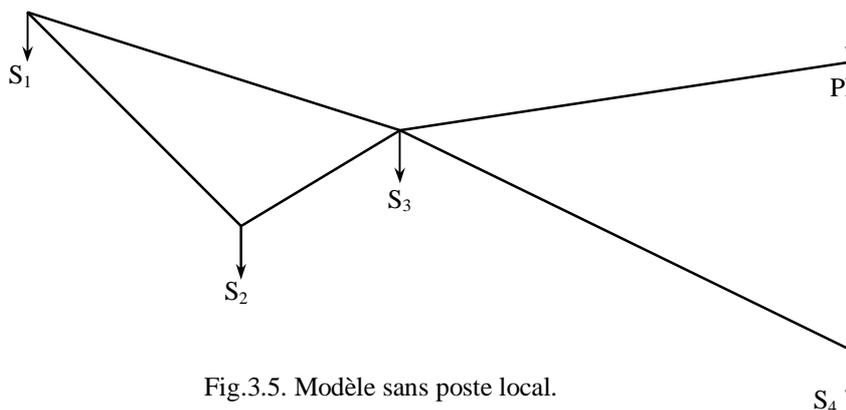


Fig.3.5. Modèle sans poste local.

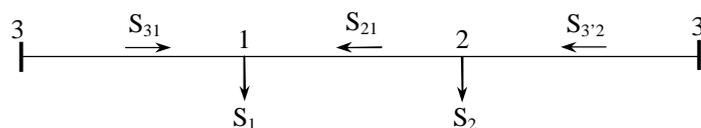


Fig.3.6.schéma de calcul.

On procède de la même manière que dans le premier cas. On détermine ainsi ;

$$S_{31} = 41,666 + j32,777 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{12} = S_1 - S_{31} = 8,334 + j7,223 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{3'2} = 30,555 + j23,888 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{A3} = \sum S_i + \sum \Delta S_{ij} = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \Delta S_{31} + \Delta S_{12} + \Delta S_{32} + \Delta S_{34}$$

avec :

$$\Delta S_{ij} = \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_N^2} R_{ij} + \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_N^2} X_{ij}$$

c.-à.-d. ;

$$\Delta S_{12} = 0,0148 + j0,0486 \quad (\text{MVA})$$

$$\Delta S_{13} = 0,399 + j1,310 \quad (\text{MVA})$$

$$\Delta S_{32} = 0,152 + j0,501 \quad (\text{MVA})$$

$$\Delta S_{34} = 1,485 + j4,877 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{A3} = 182,050 + j151,736 \quad (\text{MVA})$$

Courants de lignes et sections. Les valeurs sont présentées dans le tableau 3.9.

Tab.3.9.

Ligne	S (MVA)	I (A)	F (mm ²)	Type
3-1	41,666+j32,777	139,123	139,123	AC-240
1-2	8,334+j7,223	28,942	28,942	AC-240
3'-2	30,555+j23,888	101,783	101,783	AC-240
A-3	182,050+j151,736	621,947	621,947	AC-700
3-4	60 +j50	204,965	204,965	AC-240

Paramètres des conducteurs.

Tab.3.10.

Ligne	F (mm ²)	L (km)	r ₀ (Ω /km)	x ₀ (Ω /km)	b ₀ 10 ⁻⁶ (Ω ⁻¹ /km)	R (Ω)	X (Ω)	b ₀ 10 ⁻⁶ (Ω ⁻¹)
3-1	240	52,5	0,131	0,43	2,66	6,877	22,575	139,65
1-2	240	45	0,131	0,43	2,66	5,895	19,35	119,7
3'-2	240	37,5	0,131	0,43	2,66	4,912	16,125	99,75
A-3	700	67,5	0,045	0,301	3,6	3,037	20,317	126,9
3-4	240	90	0,131	0,43	2,66	11,79	38,7	239,4

Comparaison des modèles.

Tab.3.11.

Ligne	S (MVA)	R (Ω)	X (Ω)	ΔP (MW)	ΔQ (MVAR)	ΔS (MVA)
3-1	41,666+j32, 777	6,877	22,575	0,399	1,310	0,399+j1, 310
1-2	8,334+j7, 223	5,895	19,35	0,0148	0,0486	0,0148+j0, 0486
3'-2	30,555+j23, 888	4,912	16,125	0,152	0,501	0,152+j0, 501
A-3	182,05+j151, 736	3,037	20,317	3,447	23,576	3,447+j23, 576
3-4	60+j50	11,79	38,7	1,485	4,877	1,485+j4, 877
				Totale :		
				5,497		

Dépenses d'investissement des conducteurs par an.

Tab.3.12.

Ligne	F (mm ²)	L (km)	L_b (km)	F_b (mm ²)	F^*	L^*	D_{Ii}^*
3-1	240	52,5	60	300	0,8	0,875	0,7
1-2	240	45	60	300	0,8	0,75	0,6
3'-2	240	37,5	60	300	0,8	0,625	0,5
A-3	700	67,5	60	300	2,333	1,625	3,791
3-4	240	90	60	300	0,8	1,5	1,2

Dépenses dues à l'énergie perdue par an.

Tab.3.13.

δ	k_m	α (DA/kw)	b(DA/kWh)	τ (h)	ΔP_{Tmax} (kw)	D_{Ii}^*	L (km)
1,05	0,7	A	6	7500	$5,497 \times 10^3$	6,791	292,5

3.4.3. Comparaison des deux cas.

Tab.3.14.

	D_{Ii}^*	ΔP_{Tmax} (kw)	L (km)
Premier cas	3,398	$2,417 \times 10^3$	249,991
Deuxième cas	6,791	$5,497 \times 10^3$	292,5

En tenant compte des deux lignes PI- B on trouve les résultats suivant :

$$\begin{array}{lll}
L_{PI-B}=90 \text{ (km)} & I_{PI-B}=303,209 & \text{(A)} \\
F_{PI-B}= 400 \text{ (mm}^2\text{)} & U_N= 220 & \text{(kv)} \\
S_B= 180+j145 \text{ (MVA)} & S_{B/2}= 90+j72, 5 & \text{(MVA)}
\end{array}$$

Tab.3.15.

Ligne	F (mm ²)	L (km)	r_0 (Ω /km)	x_0 (Ω /km)	$b_0 \times 10^{-6}$ (Ω^{-1} /km)	R (Ω)	X (Ω)	b (Ω^{-1}) 10^{-6}
PI-B	400	90	0,08	0,180	2,73	7,2	16,2	245,7

Tab.3.16.

Ligne	F (mm ²)	L (km)	S(MVA)	R (Ω)	X (Ω)	ΔP (MW)	ΔQ (MVAR)	D_{ii}^*
PI-B	400	90	90+j72, 5	7,2	16,2	1,986	4,470	2

Les dépenses pour les deux lignes ;

Tab.3.17.

$D_{ii}^* \times 2$	ΔP (kw) $\times 2$	L (km) $\times 2$
4	$3,972 \times 10^3$	180

Donc les dépenses pour les deux cas seront :

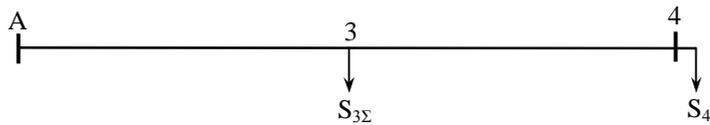
Tab.3.18.

	D_{ii}^*	ΔP (MW)	L (km)
Premier cas	7,398	6,39	429,991
Deuxième cas :	6,791	5,497	292,5

A partir des résultats obtenus, nous montrons que les dépenses rapportées et les pertes dans le deuxième (2^{ème}) cas sont inférieures à celles du premier cas (1^{er}). Donc, le modèle à retenir est déterminé par le deuxième (2^{ème}) cas.

3.5. Répartition de la compensation.

On se propose d'étudier le réseau magistral alimentant la charge « 4 » via le nœud « 3 », comme suit.



Pour la ligne magistrale donnée, on peut définir ;

$$S_{3\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 + \Delta S_{\Sigma}$$

$$\Delta S_{\Sigma} = \Delta S_{12} + \Delta S_{23} + \Delta S_{13} = 0,565 + j 1,859 \quad (\text{MVA})$$

$$S_{3\Sigma} = S_1 + S_2 + S_3 + \Delta S_{\Sigma} = 120,565 + j96,859 \quad (\text{MVA})$$

Les paramètres électriques du réseau sont donnés dans le tableau suivant :

Tab.3.19.

Ligne	L (km)	F (mm ²)	r_0 (Ω /km)	x_0 (Ω /km)	$b_0 \times 10^{-6}$ (Ω^{-1} /km)
A-3	67,5	700	0,045	0,301	3,6
3-4	90	240	0,131	0,43	2,66

Le réseau peut être représenté par ses schémas équivalents comme suit :

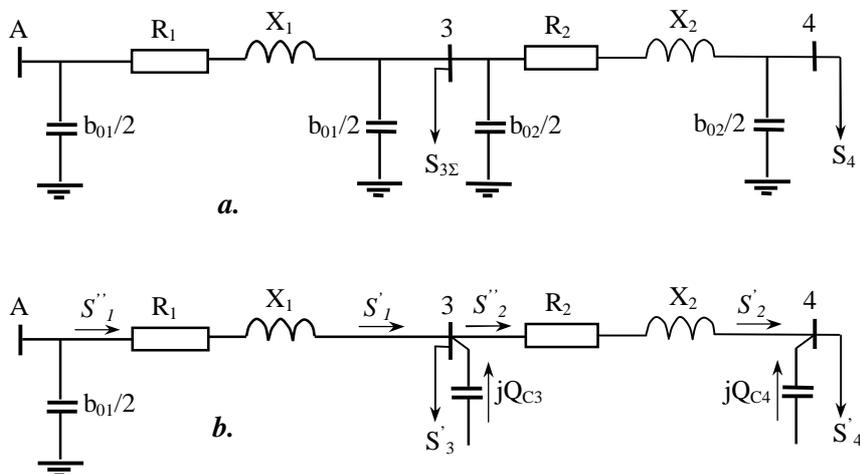


Fig.3.7. Schémas équivalents de calcul. a.- Schéma initial, b.- Schéma simplifié de calcul équipé de compensateurs.

Le schéma simplifié de calcul se décrit comme suit,

$$S'_3 = S_{3\Sigma} - j \frac{U_N^2}{2} (b_{01}L_{A3} + b_{02}L_{34})$$

$$S'_4 = S_4 - j \frac{U_N^2}{2} b_{02}L_{34}$$

3.5.1. Analyse des régimes de compensation.

Le but de la compensation à réaliser est de maintenir le plan de la tension dans un intervalle acceptable, c'est-à-dire dans une variation qui ne dépasse pas 10% ou maximum de sa valeur nominale en tout point du réseau.

La procédure de compensation est faite par distribution des compensateurs dans les nœuds.

1. Compensation dans un nœud.
2. Distribution sur deux nœuds.

3.5.2. compensation dans le nœud 4.

On installe le compensateur dans le nœud 4. En faisant varier la valeur de la puissance réactive telle que $Q_{c4} = (0 \div 1) Q_4$, on peut installer différentes distributions de la tension de long de la ligne. La procédure de calcul est réalisée de manière directe à partir du nœud « 4 » vers le nœud « A » ; puisque les données initiales sont imposées au nœud de la charge « 4 ». Durant cette procédure, les formules de calcul utilisées, dans ce sens hiérarchique, s'expriment, conformément au schéma de la figure 3.7 ;

$$S''_2 = S'_2 + \Delta S_2$$

$$\Delta S_2 = \frac{S'^2_2}{U_N^2} R_2 + j \frac{S'^2_2}{U_N^2} X_2$$

$$\dot{U}_3 = U_4 + \Delta \dot{U}_2$$

$$\Delta \dot{U}_2 = \frac{P'_2 R_2 + Q'_2 X_2}{U_4} + j \frac{P'_2 X_2 - Q'_2 R_2}{U_4} = \Delta U_2 + j \delta U_2$$

$$U_3 = \sqrt{(U_4 + \Delta U_2)^2 + (\delta U_2)^2}$$

$$S'_1 = S'_3 + S''_2 - j Q_{c3} \dots$$

et ainsi de suite jusqu'à la détermination de la tension U_A de la source.

Soit, $Q_{c4} = (0 ; 0,5) Q_4$; avec $U_4 = U_N = 220 \text{ kv}$. L'exemple de calcul donne les résultats saisis dans le tableau 3.20.

Tab.3.20.

Q_{C4}	0	$0,5Q'_4$
U_3 [KV]	231,134	227,296
U_3 [pu]	1,05	1,03
U_A [KV]	245,68	239,75
U_A [pu]	1,11	1,09

Les résultats obtenus permettent de tracer les caractéristique de variation de la tension dans les nœuds. Fig.3.8.

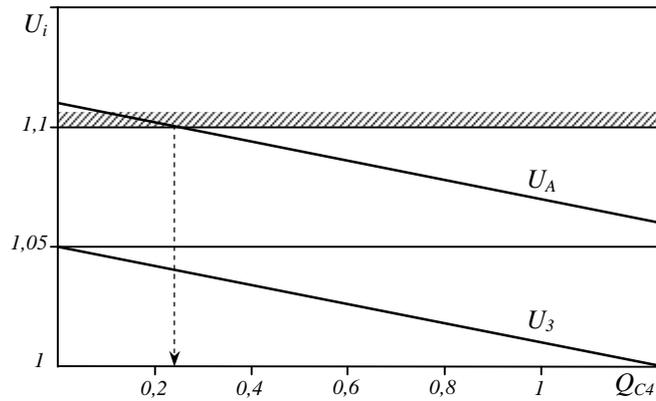


Fig.3.8. Compensation dans le nœud « 4 », $Q_{C3} = 0$.

3.5.3. Compensation dans le nœud 4 après croissance de la charge.

Le réseaux électriques sont soumis continuellement à l'évolution, suite à la croissance naturelle de la consommation. Il serait, dans ce cas, nécessaire de vérifier leur tenue de performance, par exemple leur plan de tension. On suppose donc l'analyse que la charge du centre « 4 » a plus que doublé par rapport à sa valeur initiale après un certain temps ; soit, $S''_4 = 2,5S'_4$

De la même manière que précédemment, on prend variable $Q_{C4} = (0\div 1)Q''_4$ et on détermine les tension des nœuds, (Tb.3.21).

Tab.3.21.

Q_{C4}	0	$0,5 Q''_4$	$1 Q''_4$
U_3 [KV]	247,479	238,910	229,559
U_3 [pu]	1,12	1,085	1,04
U_A [pu]	270,674	257,009	241,757
U_A [pu]	1,23	1,16	1,098

Les résultats obtenus permettent de tracer la caractéristique de variation de la tension des nœuds.(Fig.3.9).

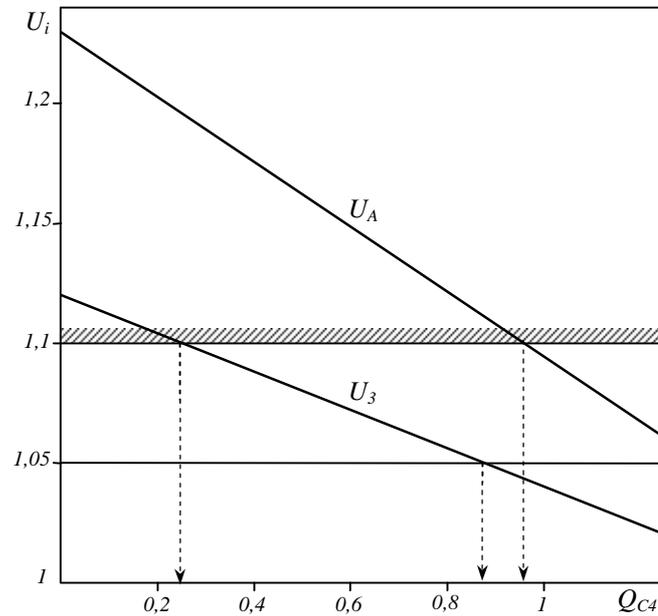


Fig.3.9. Compensation en « 4 » après croissance de la charge, $Q_{C3}=0$.

3.5.4. Compensation dans le nœud 3.

En posant $Q_{C4} = 0$ et conformément au schéma de calcul de la figure 3.7, on peut réaliser la même procédure de calcul, suite à une compensation au nœud « 3 ». Les calculs ainsi obtenus sont insérés dans le tableau 3.22 et représentés graphiquement par la figure 3.10.

Tab.3.22.

Q_{C3}	$0,5Q'_3$	Q'_3
U_3 [KV]	231,134	231,134
U_3 [pu]	1,05	1,05
U_A [KV]	241,981	238,28
U_A [pu]	1,099	1,08

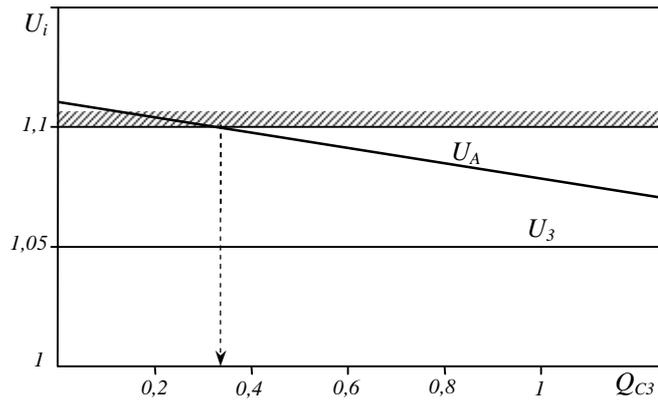


Fig.3.10. Compensation dans le nœud « 3 » ; $Q_{C4} = 0$.

3.5.5. Commutation combinée entre les nœuds « 3 » et « 4 ».

On donne les intervalles de variation ; $Q_{C3} = (0 \div 1)Q_3$; $Q_{C4} = (0 \div 1)Q''_4$.

Les calculs sont récapitulés dans le tableau 3.23, (Fig.3.10, 11).

Tab.3.23.

Q_{C3}	Q_{C4}	0	$0,5Q''_{C4}$	Q''_{C4}
0	U_3 [KV]	247,479	238,910	229,559
	U_3 [pu]	1,12	1,085	1,043
	U_A [KV]	270,674	257,009	241,757
	U_A [pu]	1,230	1,168	1,098
$0,5Q_{C3}$	U_3 [KV]	248,323	237,160	229,559
	U_3 [pu]	1,128	1,078	1,043
	U_A [KV]	267,329	251,9	239,740
	U_A [pu]	1,215	1,145	1,089
Q_{C3}	U_3 [KV]	248,323	236,510	229,559
	U_3 [pu]	1,128	1,075	1,043
	U_A [KV]	263,896	251,24	236,046
	U_A [pu]	1,199	1,142	1,072

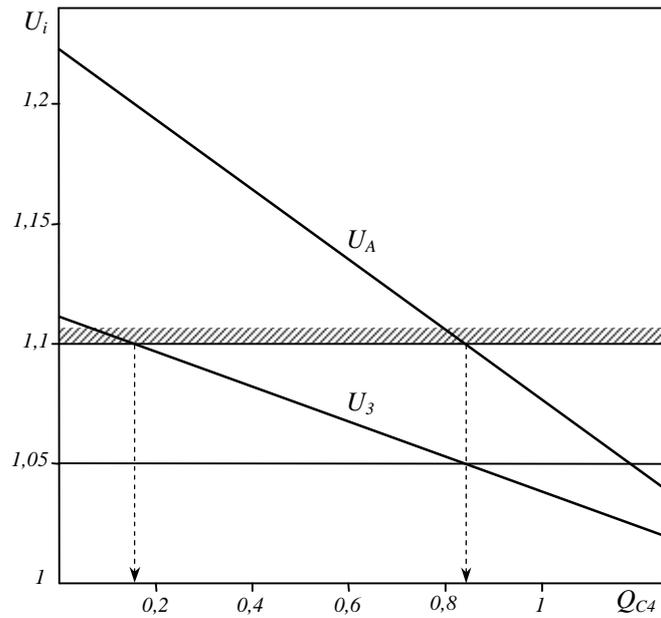


Fig.3.11. Commutation des batteries en « 3 » et en « 4 » ; $Q_{C3}=0,5Q'_3$.

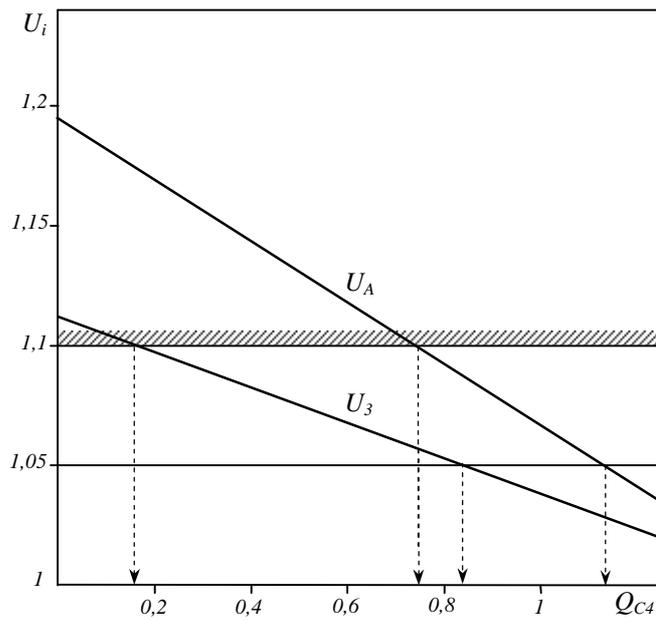


Fig.3.12. Commutation des batteries en « 3 » et en « 4 » ; $Q_{C3}=Q'_3$.

2.6. Analyse des résultats.

La première lecture des caractéristiques obtenues dans le cas de combinaison de compensation entre les deux nœuds, permet de faire remarquer que le lieu d'installation des compensateurs joue un rôle déterminant sur les chutes de tension et les pertes sommaires dans

le réseau électrique. On constate également que les tensions des nœuds du réseau s'insèrent de manière plus robuste dans les limites admissibles. Les graphes de la Fig.3.(7.8.9,10,11) montrent clairement l'effet de différentes compensations sur la tension dans le nœud de la source. La distribution des compensateurs sur les nœuds 4 et 3 donne relativement un meilleur résultat que le cas de la compensation dans un seul nœud. Donc l'injection de la puissance réactive dans les deux nœuds 4 et 3 a un effet intéressant sur le plan de la tension du réseau.

Pour une meilleure interprétation des résultats et un choix plus rationnel, il est utile de représenter la relation entre les puissances réactives installées dans les différents nœuds correspondantes aux limites admissibles de tension.

Tab.3.23.

$U = 1,1$	Q_{C3}	0	$0,5Q_{C3}$	Q_{C3}
	Q_{C4}	$0,93Q_{C4}$	$0,85Q_{C4}$	$0,77Q_{C4}$
$U = 1,05$	Q_{C3}	0	$0,5Q_{C3}$	Q_{C3}
	Q_{C4}	$1,28Q_{C4}$	$1,23Q_{C4}$	$1,18Q_{C4}$
$U = 1,1$	Q_{C3}	0	$0,5Q_{C3}$	Q_{C3}
	Q_{C4}	$1,66Q_{C4}$	$1,62Q_{C4}$	$1,58Q_{C4}$

Les résultats obtenus permettent de tracer la caractéristique de variation de la tension dans les nœuds, Fig.3.13.

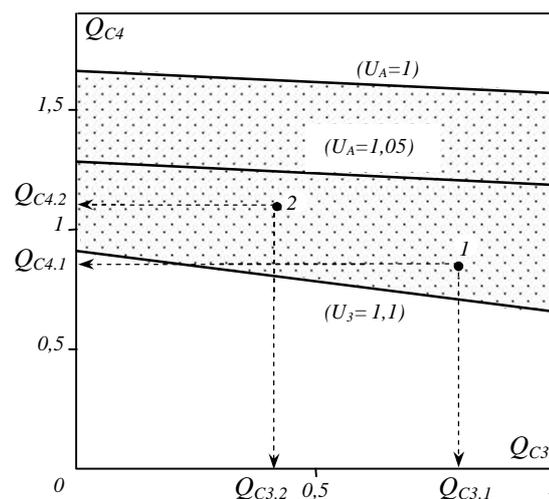


Fig.3.13. Relations requises entre puissances réactives commutées dans les nœuds 3 et 4.

En conclusion, on définit la superficie pointillée comme domaine de toutes les relations possibles entre les puissances réactives installées en « 3 » et en « 4 » assurant les limites admissibles de la tension dans ces derniers. Les coordonnées de tous les points de cette superficie définissent la valeur de la puissance installée sommaire $Q_{C\Sigma}$ à distribuer entre ces nœuds ;

$$Q_{C\Sigma} = Q_{C3.i} + Q_{C4.i}$$

Cette valeur sommaire peut être ajustée par optimisation à partir de considérations technico économiques exigées , éventuellement, en déterminant sa répartition en quantité et en lieu dans le réseau, dans un sens générale.

Conclusion.

Le travail de mémoire réalisé nous a permis d'appliquer nos connaissances académiques acquises pendant notre cursus de Master et, de ce fait, nous a engagé dans approfondissement et une maîtrise respectables de ces connaissances.

On a défini différents aspects des systèmes électriques d'ensemble, relatifs, essentiellement, à leur hiérarchie, leur construction, leur régimes (permanents et perturbés). De même, nous nous sommes élargis aux considérations ayant trait à la qualité de l'énergie électrique, notamment à travers les indices de qualité de la tension et de la fréquence ; considérations qui constituent initialement l'objet de notre mémoire. Nous nous sommes, en fait, intéressés au rôle et à l'impact de la distribution de la puissance réactive sur la qualité de la tension.

A l'issue de ce travail, on présente sous forme de résultats les possibilités offertes par la manipulation de la puissance réactive pour atteindre tel ou tel régime (plan de tension) conformément à des conditions requises.

Le travail réalisé est en relation avec un thème plus important, orienté vers le traitement des systèmes électriques dans leurs divers aspects et vers la recherche de leur performance, dont l'impact est très déterminant quant à leur exploitation et leur gestion.

Nous nous sommes familiarisés avec les procédures de compensation dans les réseaux électriques. La compensation de la puissance réactive permet d'améliorer considérablement le plan du potentiel dans les systèmes électriques. C'est un moyen performant pour tous les traitements technico économiques des régimes de fonctionnement.

Bibliographie.

- [1] Oudaifia, N. Sahraoui, S. "Qualité d'énergie électrique". Mémoire de master, université 8 Mai 1945- Guelma, 2018.
- [2] Lilien, J.L. "Transport et distribution de l'énergie électrique". Cours donné à l'institut d'électricité Montefiore université de Liège, 2006.
- [3] Lilien, J.L. "Transport et distribution de l'énergie électrique". Manuel de travaux pratiques, université de Liège, 2000.
- [4] Melouki, T., Douh, M. "étude comparative du réseau de distribution en moyenne tension ville de Guelma". Mémoire de fin d'étude, université 8 Mai 1945- Guelma, 2017.
- [5] Mavoungou Jean. Moise. Aimé. "Harmonique et qualité de l'énergie électrique". Mémoire de fin d'études, université 8 Mai 1945- Guelma, 2013. [6] Djoudi, M. Ferkous, B. et Kehlerras, A. "comparaison entre les différentes techniques de coupure d'un arc électrique". Mémoire de fin d'études, université 8 Mai 1945- Guelma, 2010.
- [7] Boudour, M. Hellel, A. "Réseaux électriques fondamentaux et conception de base". Les pages bleues internationales. Alger, 2010.
- [8] <https://fr.Wikipedia.org/Wiki/> réseau électrique. Grandeur électrique importantes.
- [9] Bounaya, K. "Les réseaux électriques première partie éléments de description et d'analyse de base". Direction de la publication universitaire de Guelma 2010.
- [10] Mme Marjorie Cosson. "Stabilité du réseau électrique de distribution. Analyse du point de vue automatique d'un système complexe". Thèse de doctorat, université Paris-Saclay, préparée à centrale Saupélec, 2016.
- [11] Zellagui, M. "Qualité d'énergie électrique (QEE)". Groupe Senelgaz (IFEG), programme d'intégration des nouveaux cadres, promotion 2, Ain M'lila, Novembre 2016.
- [12] Djahmi, A. Liman, I. et Liman, A. "Qualité de l'énergie électrique". Mémoire de fin d'études, université 8 Mai 1945- Guelma, 2008.
- [13] Laagimi, A. "impacts de l'intégration des ressources renouvelables sur le réseau de distribution". Cours
- [14] Ferracci, PH. "Cahier technique n=199 : la qualité de l'énergie électrique". Tec & Doc Lavoisier. Schneider Electric.2001.
- [15] Boumerdas, A. "l'étude de la qualité d'énergie à l'aide d'une carte arduino". Mémoire de Master, université de Constantine 1, 2014.

- [16] Collombet, C., Lupin, J. et Schnok, J. "Perturbation harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement". Cahier technique n=152. Schneider électrique, 1999.
- [17] Vanya, I. "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique". Thèse de Doctorat, université de Joseph Fourier, Octobre 2006.
- [18] Boulaares, G. "Méthodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité d'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension". Mémoire de Magisters. Université de Batna, 2012.
- [19] Lamaria, S. et Amirouche, I. "Eléments d'élaboration d'un réseau électrique". Mémoire de Master, université de Guelma, 2018.