

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: 977/2018



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Electrotechnique

Spécialité: Réseaux électriques

Par: OUDAIFIA Nawal et SAHRAOUI Siham

Thème

Qualité d'énergie électrique

Soutenu publiquement, le 25 Juin 2018, devant le jury composé de:

M. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M. KACHI Miloud	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. FERAGA Chams- Eddine	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. GOUAIDIA Said	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire: 2017/2018

REMERCIEMENTS

Il est de coutume d'avoir une page de remerciement dans tout mémoire que l'on écrit ... mais qui allons-nous donc pouvoir remercier ?

Après réflexion nous avons trouvés quelques personnes qu'il nous tenons à cœur de remercier plus particulièrement.

Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu qui nous a donné le pouvoir et la volonté pendant 18ans consécutifs jusqu'à ce jour de fin d'études, tout en lui demandant de nous apporter d'avantage pour en continuer.

Nous exprimons notre remerciements les plus sincères notre encadreur « Pr. BOUNAYA Kamel » qui par sa disponibilité, son expérience et ses conseil pertinents, nous a encadré tout au long de ce travail. Ainsi que par sa générosité nous a offert pas mal d'avantage indispensable à l'élaboration du thème que nous avons traité.

Sans oublier tout 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 aident de près ou de loin pour la réalisation de ce travail.

Dédicaces

J'aimerais bien dédier ce modeste travail qui concrétise tous mes efforts fournis ces dernières années :

A mes chers parents « Boudiaf et Fatiha » pour leur affection et leur soutien moral qui m'ont beaucoup aidé tout au long de ma vie, notamment dans mon parcours universitaire

A mes frères Hichem et Fares et ma sœur Karima qui ont toujours manifesté un grand intérêt pour mes études

A mes cousines : Lamia, Nassira, Hiba et Roumissa

A ma grande famille

A mon mari : BELKACEM

A mes très chers amies : Wafa, Siham, Zahra et Salima.

A tous mes camarades de la promotion 2017/2018 et particulièrement ceux du groupe réseaux électriques avec qui j'ai passé de merveilleuses années.

NAWAL

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

Ma famille et surtout : ma mère

Mes sœurs et frères et surtout : Samia

A tout mes amies

Siham

SOMMAIRE

Introduction	01
Chapitre 1. Généralités	
1.1. Définition d'un réseau électrique	02
1.2. Historique des réseaux électriques	03
1.3. Acheminement de l'énergie électrique	04
1.4. Niveaux de tension des réseaux électriques	05
1.4.1. Les réseaux de transport et d'interconnexion	06
1.4.2. Les réseaux de répartition	07
1.4.3. Les réseaux de distribution	07
1.5. Structure des réseaux électriques	08
1.6. Constitution des réseaux électriques	09
1.6.1. Les générateurs	09
1.6.2. Les postes électriques	09
1.6.3. Les transformateurs	10
1.6.4. Les lignes électriques	10
1.6.5. Les charges	12
1.7. Types de ligne	12
1.7.1. Lignes souterrains	13
1.7.2. Lignes aériennes	13
1.7.2.1. Composantes des lignes aériennes	13
1.8. Les phénomènes dans les réseaux électriques	18
Chapitre 2. Indices de qualité de tension	
2.1. Définition	20
2.2. Indices de la qualité d'énergie électrique	20
2.2.1. Qualité de tension	20
2.2.2. Qualité du courant	22
2.3. Classification des perturbations électriques	23
2.4. Les perturbations de la qualité d'énergie électrique	24
2.4.1. Creux de tension et coupure	25
2.4.2. Surtensions	27
2.4.3. Les fluctuations rapides de tension (Fluckers)	30
2.4.4. Les dissymétries de système de tension appelées déséquilibre	31
2.4.5. Variation de la fréquence	32
2.4.6. Les harmoniques	33
2.5. Solutions pour améliorer la qualité d'énergie électrique	37
2.5.1. Creux de tension et coupure	39
2.5.2. Surtensions	39
2.5.3. Fluctuation de tension	41
2.5.4. Non symétrie de la tension	42
2.5.5. Harmoniques	42

Chapitre 3. Calcul et procédure de compensation	
3.1. Exemple de calcul	47
3.1.1. Les données initiales	47
3.1.2. Le choix de la tension nominale	49
3.2. Réglage de la tension par la puissance réactive	51
3.3. Analyse des régimes de compensation	52
3.3.1. Compensation dans le nœud 2	52
3.3.2. Compensation dans le nœud 1	54
3.3.3. Compensation combinée entre les nœuds 1 et 2	57
3.4. Analyse des réseaux	60
3.5. Eléments et moyens de base de contrôle	62
3.5.1. Elément de contrôle de potentiel	62
3.6. Description des moyens de compensation	64
3.6.1. Compensateur synchrone	64
3.6.2. Compensateurs statiques	65
3.7. Choix de compensation	68
3.7.1. Choix de localisation	69
3.7.2. Choix de types	69
Conclusion	71
Bibliographie	72

Introduction

La qualité de l'énergie électrique concerne tous les acteurs du domaine énergétique, qu'ils soient gestionnaires de réseaux, fournisseurs, producteurs, ou consommateurs d'électricité. Elle est devenue incontournable aujourd'hui depuis les évolutions réglementaires qui ont eu lieu ces dernières années. Le domaine de la qualité de l'énergie électrique se caractérise par deux grands axes de recherche, le premier est la surveillance : mesure et analyse des perturbations électriques dans les réseaux. Le deuxième est la solution préventive et curative.

Dans ce mémoire, nous avons fait une description des indices de la qualité d'énergie électrique essentiellement de la tension. On a appliqué une procédure de compensation d'une ligne magistrale pour le maintien d'un plan de potentiel admissible. De même que nous avons présenté et décrit les moyens généralement utilisés pour réaliser les procédures de compensation. Le mémoire est organisé en trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré aux descriptions générales des réseaux électriques.

Dans le deuxième chapitre nous avons détaillé les différents indices de la qualité d'énergie électrique.

En fin dans le troisième chapitre nous avons analysé et calculé un réseau électrique magistral sous une procédure de compensation répartie. En y donne également, une description des moyens de compensation.

CHAPITRE 1

Généralités

1.1. Définition d'un réseau électrique :

Un réseau électrique est un ensemble d'infrastructures permettant d'acheminer l'énergie électrique des centres de production vers les consommateurs d'électricité.

Il est constitué de lignes électriques exploitées à différents niveaux de tension, connectées entre elles dans des postes électriques. Les postes électriques permettent de répartir l'électricité et de la faire passer d'une tension à l'autre grâce aux transformateurs, [1].

Un réseau électrique doit aussi assurer la gestion dynamique de l'ensemble production- transport-consommation, mettant en œuvre des réglages ayant pour but d'assurer la stabilité de l'ensemble, [2].

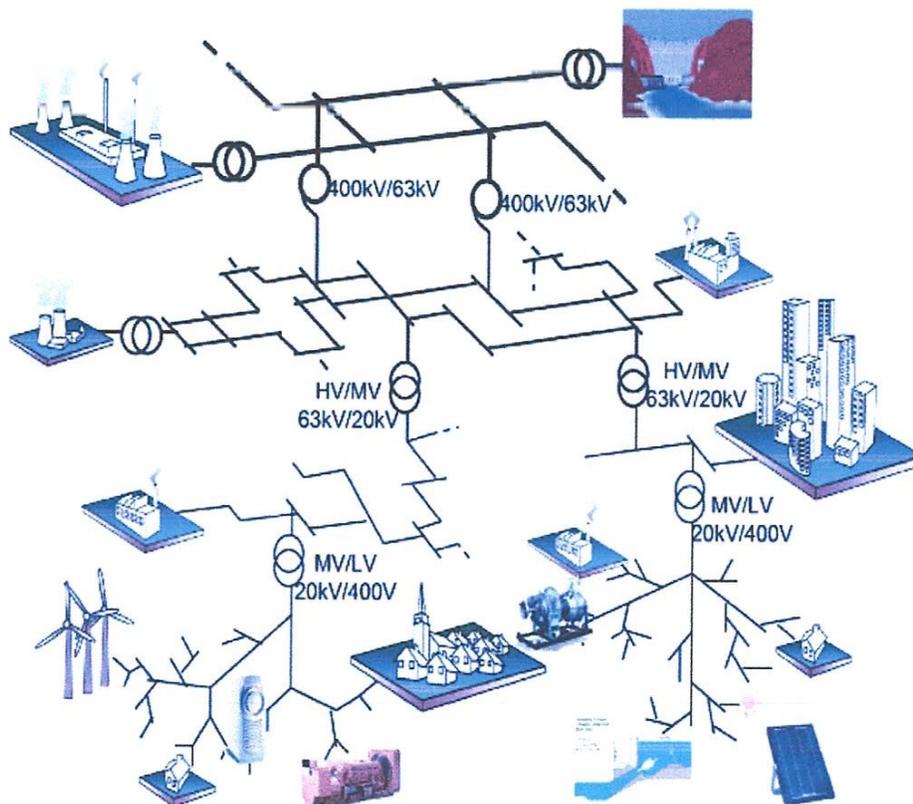


Fig. 1.1 : structure d'un réseau électrique.

1.2. Historique des réseaux électriques :

On peut dire que le concept de réseau électrique a été introduit en 1878 par Thomas Edison qui cherchait à générer de l'énergie électrique et à la distribuer par un réseau pour l'éclairage.

L'industrie de réseaux électriques a commencé réellement en 1882 où Thomas Edison inaugura sa centrale Pearl Street à New York. Cette première centrale fonctionne avec des machines à vapeur qui entraînent des génératrices à courant continu pour fournir une puissance électrique de 30 kW à une tension de 110 kV pour l'éclairage (avec des lampes incandescentes) de 59 maisons.

Le développement des réseaux électriques à leurs débuts est résumé dans le tableau suivant :

Tab. 1.1 : Le développement des réseaux électriques à leurs débuts.

1882	<ul style="list-style-type: none"> • Thomas Edison ouvre la centrale Pearl Street à New York. • Installation d'un générateur CC entraîné par roue hydraulique à Appleton, Wisconsin. • Installation de la première ligne de transport (2400 VCC, 59 km) à Allemagne.
1884	<ul style="list-style-type: none"> • Frank J. Sprague produit des moteurs CC pour utiliser dans les réseaux CC d'Edison. • Développement des systèmes CC à trois fils 220 V.
1885	<ul style="list-style-type: none"> • Développement par William Stanley d'un transformateur pratique permettant le transport à courant alternatif à des tensions plus élevées et à plus grandes distances.
1888	<ul style="list-style-type: none"> • Nikola Tesla présente un article sur les moteurs d'induction et synchrones biphasés mettant en évidence les avantages des systèmes polyphasés par rapport au monophasé.
1889	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de la première ligne monophasée aux E.U. à Oregon (4 kV, 21 km).
1891	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de la première ligne triphasée en Allemagne (12 kV, 179 km).

1893	<ul style="list-style-type: none"> • Installation de la première ligne triphasée aux E.U. en Californie (2 .3kv, 12 km).
------	---

Depuis 1882, l'industrie des réseaux électriques a fait des progrès importants pour atteindre un état qu'on peut qualifier presque mature aujourd'hui. Avec les années, les besoins d'énergie électrique augmentent et les réseaux électriques deviennent de plus en plus complexes. Les problèmes augmentent également. Des développements technologiques continus dans différents domaines tels que l'isolation, la protection, la commande, l'électronique de puissance, les ordinateurs, etc. permettent de résoudre plusieurs problèmes et d'améliorer constamment la performance des réseaux électriques, [3].

1.3. Acheminement de l'énergie électrique :

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

Les réseaux électrique ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermique... avec les centres de consommation (villes, usines...).

L'énergie électrique est transportée en haute tension, voire très haute tension pour limiter les pertes joules (les pertes étant proportionnelles au carré de l'intensité) puis progressivement abaissées au niveau de la tension de l'utilisateur final, [1].

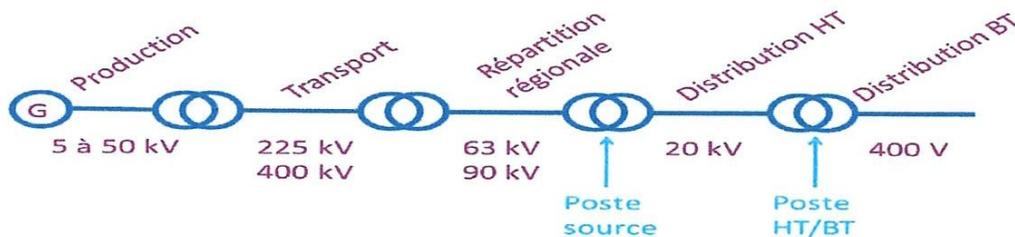


Fig. 1.2 : schéma d'un réseau électrique.

1.4. Niveaux de tension des réseaux électriques :

Les réseaux électriques sont hiérarchisés : d'une façon générale, la plupart des pays mettent en œuvre :

- Réseau de transport THT 220-800 KV
- Réseau de répartition HT 60-170 KV
- Réseau de distribution MT 5-36 KV
- Réseau de livraison de l'abonné BT 400-230 V

Cette hiérarchie c'est-à-dire, les niveaux de tension utilisés varient considérablement d'un pays à un autre en fonction des paramètres comme : ses ressources énergétique, sa surface et finalement des critères techno-économique, [2].

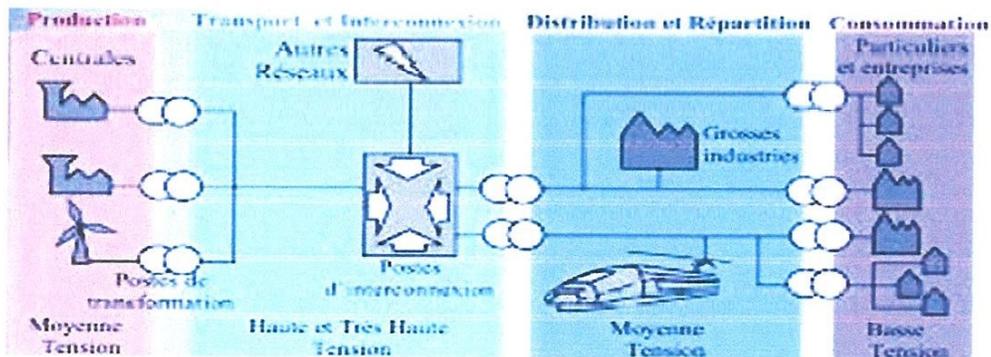


Fig. 1.3 : structure de base d'un réseau électrique. [1]

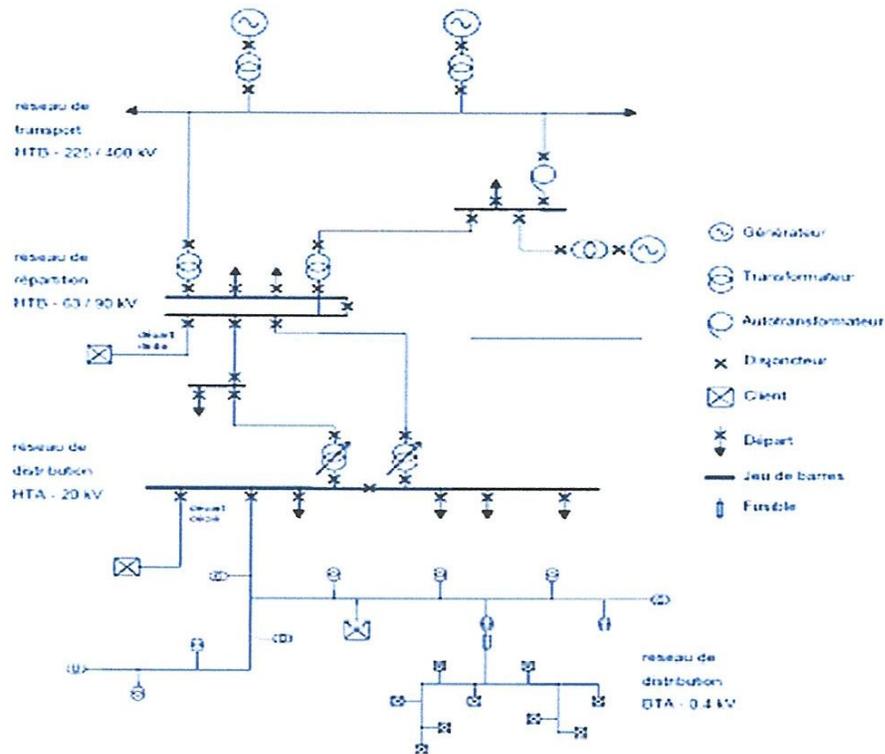


Fig. 1.4 : organisation des différents niveaux de tensions du système électrique. [4]

1.4.1. Les réseaux de transport et d'interconnexion :

Les réseaux de transport et d'interconnexion THT ont principalement pour fonction de collecter l'électricité produite par les centrales importantes ($> 300\text{MW}$) et de l'acheminer par grand flux vers les zones de consommation (fonction transport), 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 correspondant en général à la limite thermique 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 correctement sa mission et faire face aux événements imprévus le réseau de transport aura une structure fortement maillée qui permet d'assurer la redondance des transits possibles en cas d'incident mais aussi en fonctionnement normal d'assurer dans des

bonnes conditions le maintien de la tension lors des fortes variations de la puissance transitée, [5].

1.4.2. Les réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition ou réseaux Haute Tension ont pour rôle de répartir, au niveau régional, l'énergie issue de réseau de transport.

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

Leur 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.

1.4.3. Les réseaux 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, [6].

1.5. Structure des réseaux électriques :

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures:

- **structure maillée :**

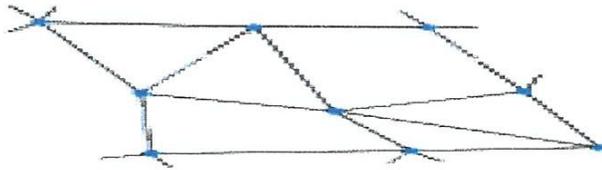


Fig. 1.5 : structure maillée : les postes électriques sont reliés entre eux par de nombreuses lignes électriques, apportant une grande sécurité d'alimentation.

- **Structure arborescente :**

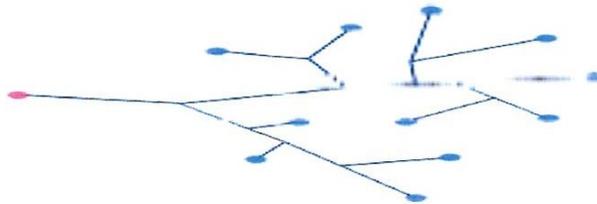


Fig. 1.6 : structure arborescente (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation est faible puisqu'un défaut sur la ligne ou sur le poste rouge coupe l'ensemble des clients en aval.

- **Structure radiale :**

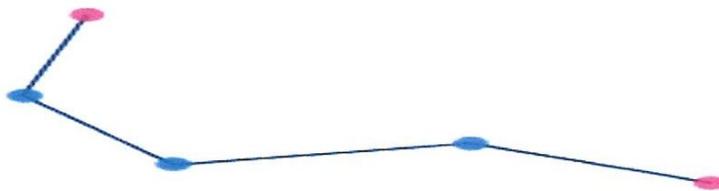


Fig. 1.7 : structure radiale ou bouclée (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.

1.6. Constitution des réseaux électriques :

1.6.1. Les générateurs :

Les générateurs peuvent être fournir une puissance active et fournir ou absorber une puissance réactive dans certaines limites. Les groupes importants tentent de maintenir à leurs bornes un niveau de tension donné, [7].

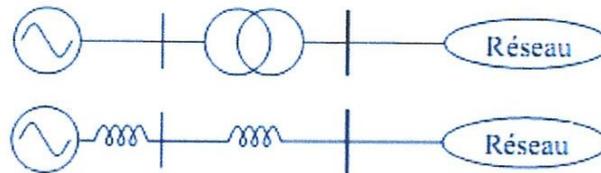


Fig. 1.8 : modèle du générateur.

1.6.2. Les 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, [8].

On distingue trois types de postes électriques, suivant les fonctions qu'ils assurent:

- Postes d'interconnexion : permettent de relier entre eux plusieurs sections du réseau, leur but est d'interconnexion plusieurs lignes électriques. Ils comprennent à cet effet un ou plusieurs points communs triphasés appelés jeu de barres, sur lesquels différents départs (lignes, transformateur, etc.) de même tension peuvent être aiguillés.
- Postes de transformation : dans lesquels il existe au moins deux jeux de barres à des tensions différentes liés par un ou plusieurs transformateurs.
- Les postes mixtes : les plus fréquents, qui assurent une fonction dans le réseau d'interconnexion et qui comportent en outre un ou plusieurs étages de transformation, [5].

1.6.3. Les transformateurs :

Les transformateurs étant des matériels particulièrement coûteux, leur protection est assurée par différents mécanisme redondants.

- Les transformateurs électriques : permettent de convertir les valeurs de tension et de courants délivrés par le réseau en un système de tensions et de courants de valeurs différentes.
- Les transformateurs de courant : permettent de mesure la valeur du courant traversant le réseau.
- Les transformateurs de tension : permettent de mesurer la valeur de la tension du réseau.
- Les autotransformateurs : ont la même fonction que les transformateurs électrique standards.
- Les transformateurs déphaseurs : leur objectif est 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, [5].

1.6.4. Les lignes électriques :

Une ligne électrique est un ensemble de conducteurs, d'isolant et d'éléments accessoires destinés au transport de l'énergie électrique, [5]. Les lignes électriques sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituées d'un faisceau de plusieurs conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différents des pertes joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terna, [9]. Les conducteurs sont en général en aluminium, en cuivre... etc, [5].

Un pylône électrique peut supporter plusieurs ternes : en France jamais plus de 4, rarement plus de 2, mais d'autre pays comme l'Allemagne ou le Japon font supporter à leur pylône jusqu'à 8 ternes.

Les pylônes sont soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Ils supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend

directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie, [9].

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

- Puissance active à transporter.
- Distance de transport.
- Cout.
- Esthétique, l'encombrement et la facilité d'installation.

Nous distinguons 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 les moteurs, cuisinières, lampes ... etc.
- **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.
- **Lignes de transport à haut tension (HT)** : ce sont les lignes qui relient les postes de transformation principaux aux centrales de génération.
- **Lignes de transport à très haute tension (THT)**: ce sont les lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation. Ces lignes peuvent atteindre des longueurs de 1000 km et elles fonctionnent à des tensions allant jusqu'à 765 KV, [6].



Fig. 1.9 : ligne de transport à très haute tension (THT).

1.6.5. Les charges :

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

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

La puissance active fournie à la charge s'exprime en kilowatts ou en mégawatts. L'amplitude de la puissance totale fournie, varie durant une journée et doit être à chaque instant, adaptée à la demande du consommateur, [2].

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 comme les hôpitaux et les zones militaires.
- 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, [5].

1.7. 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 câbles pour des raisons de sécurité et d'esthétique, [10].

1.7.1. 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 prohibitifs. Elles représentent environ 30% de la totalité du réseau de distribution.

1.7.2. Lignes aériennes :

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

- Mécanique, relatif à la construction de la ligne.
- Electrodynamique, relatif aux interactions entre parties conductrices de la ligne.
- Elcctrique (électromagnétique), relatif aux processus de la transmission de l'énergie pour lequel le conducteur (phase) est l'élément essentiel.
- D'échange mutuel, relatif aux interactions avec l'environnement..., [11].

Les lignes aériennes constituant la majeure partie (70%) des réseaux de distribution.

L'avantage de la ligne aérienne est tout d'abord économique (coûts d'investissement moindres). Elle est en outre plus accessible, ce qui, en cas de panne, limite le temps de répartition (brèves interruptions de service), [10].

1.7.2.1. 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 le transport, l'alimentation et la distribution de l'énergie électrique ; ainsi que 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 10) :

- 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 de flexion du conducteur...

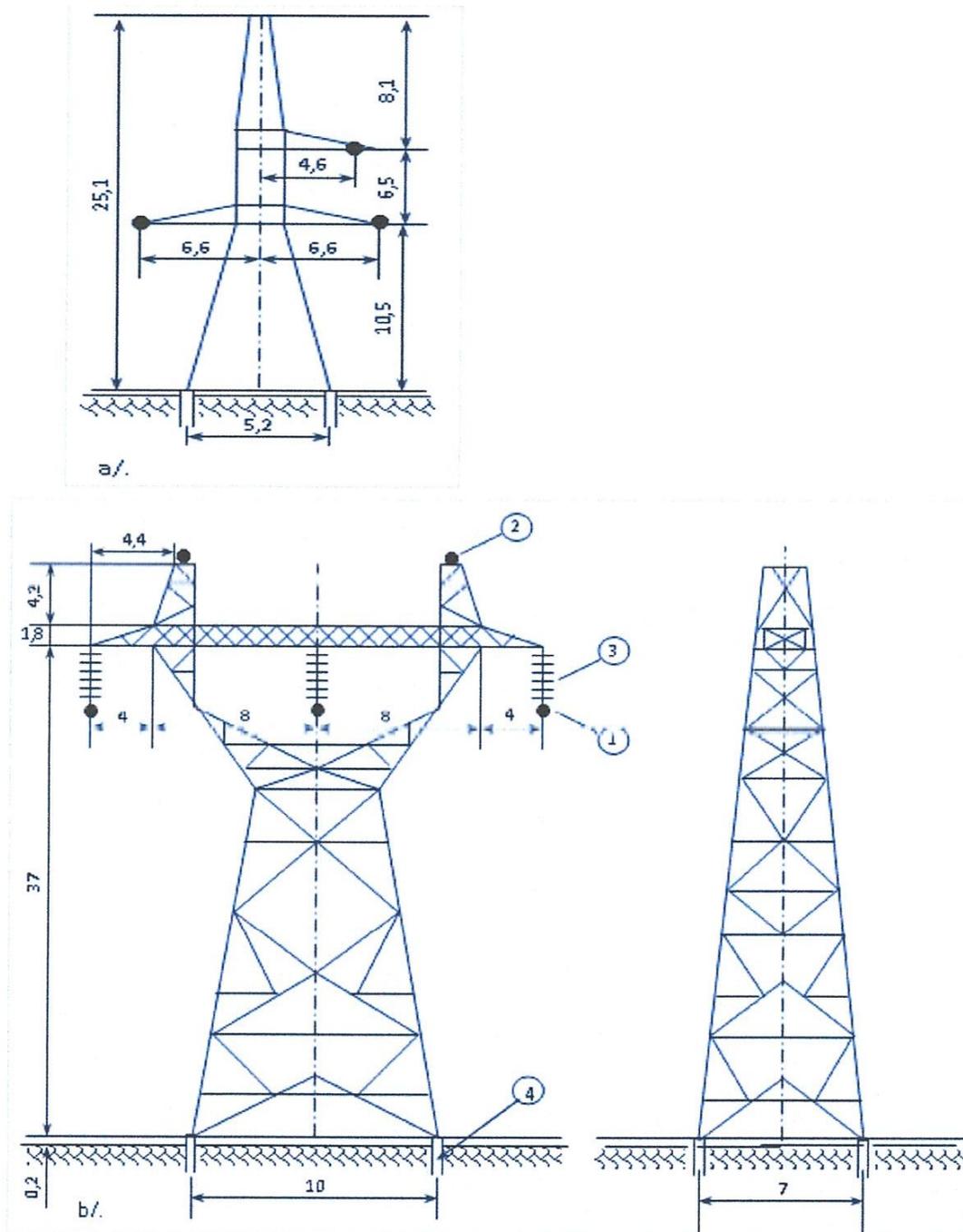


Fig. 1.10. Modèles de pylône de dimensions (m) réelles ;

- 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).

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 repercute 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.

a/. 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.

b/. 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.

c/. 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 par 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 120 kg/mm², assurée par l'acier).

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

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

Les conducteurs à un fil sont généralement utilisés dans les réseaux de basse tension ($U \leq 1$ 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 citées, 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 fondamentales du champ électromagnétique ; en 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, [11].

1.8. Les phénomènes dans les réseaux électriques :

Un réseau électrique est un système composé de différents éléments constituant un support physique d'interaction mutuelle et de transmission de l'énergie électrique. Le fonctionnement de système dans le temps et dans l'espace est le résultat de toutes les interactions, conformément aux lois de l'électricité.

Celles-ci sont décrites par des équations qui mettent en relations des paramètres fondamentaux descriptifs et quantitatifs des processus énergétiques ; en fait les paramètres du système primaires et secondaire et les paramètres du régime.

Le fonctionnement d'un système d'énergie électrique est caractérisé par différentes perturbations « ou phénomènes » qui peuvent être classées, par différents paramètres. En fonction de l'aspect temporelle des réactions du système, On distingue plusieurs comportements :

- La discontinuité : une suspension momentanée de l'alimentation.
- Dynamique rapide : des variations brusques et importantes des régimes au niveau des centrales et consommateurs et au niveau de la structure de réseau (perturbation fort).
- Dynamique lente : des variations lentes des régimes, suite aux variations des graphiques de charge (perturbation faible).
- Stationnaire : régime stable, permanent.

- L'électromagnétique conduit à influence de la propagation des ondes électromagnétique le long de la ligne.
 - L'électromagnétique rayonné : une manifestation du rayonnement.

Les effets de ces événements (perturbations) se représentent de manière diverses aussi bien sur le réseau que sur les processus :

- Interruption et coupure de la fourniture d'énergie électrique.
- Creux et variation de tension.
- Courants transitoires.
- Harmoniques.
- Courts-circuits.
- Oscillations électromagnétiques.
- Surtension de manœuvre, de commutation, d'une et de rétablissement.
- Surtension de foudre.
- Couplage entre courant fort et courant faible.

Ces effets listés se manifestent quantitativement en fonction de la nature des réseaux des exigences d'exploitation.

Pour une même puissance électrique transmise par la ligne et a résistance égale, les pertes par effet Joule diminuent comme le carré de la tension : elles sont divisées par quatre quand la tension double. Ainsi, une ligne d'une centaine de Km avec une résistance de 10Ω sur laquelle circule 400 MW entrainerait environ 4 MW de pertes Joules si elle était exploitée à 200KV, mais seulement 1 MW si elle était exploitée à 400 KV.

L'enjeu de ces pertes peut se mesurer aux coûts d'énergie perdue.

Les coûts d'installation d'une ligne à 400 KV, 20 KV ou 230 V sont cependant très différents. Il faut donc trouver un optimum technico-économique entres les différents niveaux de tension, au vu du gain espéré (relatif à la diminution des pertes par effets Joules).

On arrive ainsi à une structure multicouche des réseaux électriques , avec les réseaux transport de grandes quantités d'énergie exploités à des tensions de plusieurs centaines de Kilovolts, et à tension diminuant au fur et à mesure que les puissances transportées décroissent, [9].

CHAPITRE 2

Indices de qualité de tension

2.1. Définition

La « qualité de l'électricité » est une notion définie les notions spécialisées en énergétique à partir de trois grands critères : la continuité de l'alimentation, la qualité de l'onde de tension et la qualité de service.

La continuité de l'alimentation est jugée au regard de la fréquence des coupures d'électricité « longues » (plus de 3 minutes) et « brèves » (moins de 3 minutes) perçue par les clients ainsi que de la durée des coupures longues cumulées. Toutes coupures confondues, la durée moyenne de ces dernières varie d'un réseau territorial à un autre en fonction de leur performance et des moyens de leur surveillance et de leur contrôle.

La qualité de la tension s'apprécie au regard de l'amplitude et de la fréquence des écarts par rapport à la valeur nominale de l'onde de tension délivrée par le réseau qui perturbent le fonctionnement des appareils électriques raccordés. De tels écarts sont dits, alors, non admissibles. Dans un sens idéal, l'onde de la tension doit avoir une forme sinusoïdale d'amplitude et de fréquence constantes.

La qualité de service juge enfin la relation entre les gestionnaires de réseaux et leurs utilisateurs ; par exemple ; le délai d'un raccordement ou d'une intervention d'urgence.

Dans divers pays, on installe, généralement, des mécanismes incitatifs pour améliorer la qualité de l'électricité, principalement sous la forme de pénalités dans le paiement du tarif d'utilisation des réseaux publics d'électricité perçu par les gestionnaires de réseaux.

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 de la qualité du courant ($S = I * V$), [12].

2.2.1. Qualité de tension :

La qualité de l'énergie électrique, au niveau de la distribution, se réfère largement à maintenir une tension sinusoïdale, d'une amplitude et fréquence nominales, [13]. De ce fait la notion « qualité de l'énergie » est devenue très importante, en raison de

l'utilisation à grande échelle de systèmes à base d'électronique de puissance à la fois par les utilisateurs et les fournisseurs, [14]. L'énergie électrique doit être délivrée sous forme d'un système de tensions sinusoïdales triphasées et équilibrées. Ce système de tensions est caractérisé par :

✓ **L'égalité de l'amplitude des trois tensions :**

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue en général le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 5\%$ [15] autour de la valeur nominale. Les trois tensions ont la même amplitude, qui doit rester constante dans le cas idéal. Plusieurs phénomènes perturbateurs peuvent affecter l'amplitude des tensions.

✓ **La fréquence :**

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, [16] ou suite à un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge, [17]. Cependant, pour le maintien adéquat de la balance production- consommation ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques. D'une manière générale, les écarts admissibles de la fréquence sont fixés par des normes déterminées. La fréquence fondamentale mesurée sur 10s doit se trouver dans l'intervalle $50\text{Hz} \pm 1\%$ pendant 99,5% de l'année, [16] et dans l'intervalle $6\% \div 4\%$ durant 100% du temps, [18]. Il faut également remarquer que les variations de fréquence peuvent être bien plus importantes pour les réseaux autonomes, [16].

✓ **La forme sinusoïdale d'onde :**

Le réseau électrique algérien étant en courant alternatif, l'onde de tension délivrée par le système électrique doit avoir idéalement la forme d'une sinusoïde de fréquence (50 Hz) et d'amplitude constantes. Mais, dans les faits, l'onde de tension n'est jamais parfaitement sinusoïdale, la fréquence et l'amplitude de cette onde varient en permanence, et peuvent parfois s'écarter significativement de leurs valeurs de référence. Si les « imperfections » de l'onde de tension sont trop marquées, le fonctionnement de

certaines appareils électriques raccordés au réseau - installations de production, appareils domestiques, machines industrielles,... etc; peut s'en trouver perturbé. Dans les cas les plus extrêmes, cela peut aller jusqu'à l'impossibilité de fonctionner pendant la durée de la perturbation, à des dommages matériels de long terme, voire, plus rarement, à dégâts matériels instantanés.

✓ **La symétrie du système triphasé.**

Le système est alors caractérisé par l'égalité des modules des trois tensions et leurs déphasages relatifs, [19]. La dissymétrie engendre une gêne quant au fonctionnement du réseau et de divers équipement. Elle est généralement limitée à quelques dixièmes de pourcent, [16].

2.2.2. 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 fréquence constantes, déphasés de $\frac{2\pi}{3}$ entre eux, et de forme sinusoïdale.

Le terme "qualité du courant" ne représente pas un indices fondamental, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et à la nature des charges. Pour cette raison, "la qualité de l'énergie électrique" est fondamentalement réduite à "la qualité de la tension". C'est l'hypothèse adaptée dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'identifie principalement dans celui de « qualité de la tension », [16].

Donc la qualité de l'énergie électrique délivrée aux utilisateurs peut atteinte par le contrôle, principalement de quatre indices (caractéristiques) du paramètre tension, [20].

2.3. Classification des perturbations électriques :

En se basant sur les caractéristiques descriptives de la tension, on peut distinguer, essentiellement, quatre types de perturbations:

- Variations de l'amplitude (creux de tensions, écart, oscillations, surtensions, flicker...).
- Fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale.
- Pollution harmoniques.
- Assymétrie du système des tensions.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être distingué en se basant sur leur durée, [21] :

- Les perturbations transitoires.
- Les perturbations de courte durée.
- les perturbations permanentes.

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi-période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre, [22].

Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude, et sont à l'origine d'échauffement, de pertes supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande.

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories:

- Les défauts au sein des réseaux électriques.
- La présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent eux aussi subdivisés en deux groupes :

- Les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...).
- Les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).

2.4. Les perturbations de la qualité d'énergie électrique :

Les perturbations électromagnétiques susceptibles de perturber le bon fonctionnement des équipements et des procédés industriels sont rangées, en général, en plusieurs classes appartenant aux perturbations conduites et rayonnées ;

- basse fréquence (< 9 kHz).
- haute fréquence (>9 kHz).
- de décharges électrostatiques.

La mesure de la qualité d'énergie électrique consiste habituellement à caractériser les perturbations électromagnétiques conduites basse fréquence (gamme élargie pour les surtensions transitoires et la transmission de signaux sur réseau) : creux de tension et coupures, harmoniques et inter-harmoniques, surtensions temporaires, surtensions transitoires, fluctuations de tension, déséquilibres de tension, variations de la fréquence d'alimentation, tension continue dans les réseaux alternatifs et tensions de signalisation.

En général, il n'est pas nécessaire de mesurer l'ensemble de ces perturbations. Elles peuvent être groupées en quatre catégories selon qu'elles affectent l'amplitude, la forme d'onde, la fréquence et la symétrie de la tension. Plusieurs de ces caractéristiques sont souvent modifiées simultanément par une même perturbation. Elles peuvent aussi être classées selon leur caractère aléatoire (foudre, court-circuit, manœuvre...) permanent ou semi permanent.

2.4.1. Creux de tension et coupures :

A. Définition:

Un creux de tension (sag ou dip en anglais), [23] est une baisse brutale de la tension en un point du réseau électrique à une valeur comprise (par convention) entre 90% et 10% par rapport à la tension de référence ($U_{\text{réf}}$), suivie d'un rétablissement de cette tension après un court laps de temps, compris entre la demi-période fondamentale du réseau (8 ms à 16ms) et une minute. La tension de référence est généralement la tension nominale pour les réseaux BT et la tension déclarée ou avant perturbation pour les réseaux MT et HT, [24].

Les coupures brèves sont un cas particulier des creux de tension de profondeur supérieure à 90 et de durée allant jusqu'à une minute.

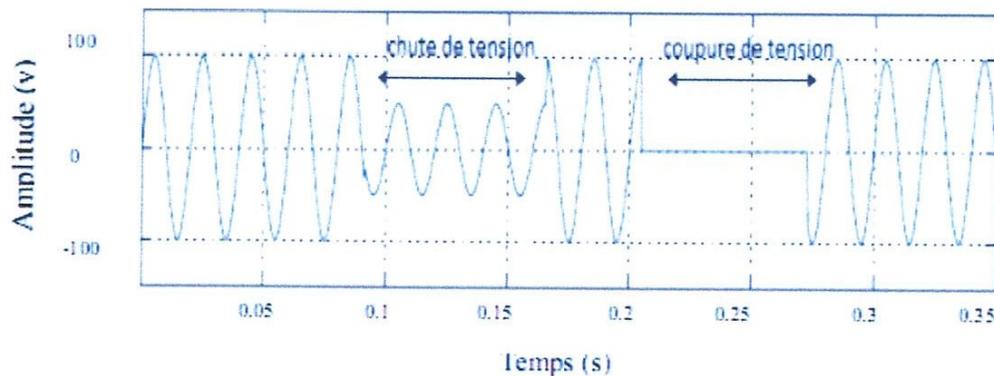


Fig. 2.1 : creux et coupure brève. [24]

B. Origine :

Les creux de tension ont pour principale origine les courts-circuits affectant le réseau électrique ou les installations raccordées et le démarrage des moteurs de forte puissance. Toutefois, 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 et, pour cette raison, les creux de tension correspondants se caractérisent par une forme rectangulaire en fonction de temps (Fig. 2. 2a). Les courts-circuits peuvent affecter une, deux ou trois des phases et peuvent engendrer des déphasages supplémentaires entre elles.

Les moteurs de forte puissance (asynchrones essentiellement) peuvent également être à l'origine des creux de tension. En général, 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. 2.2b). 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.

Enfin, les creux de tension peuvent également être engendrés par la saturation des transformateurs ou des modifications dans la structure du réseau. Cependant, ces perturbations provoquent rarement des chutes de tension importantes.

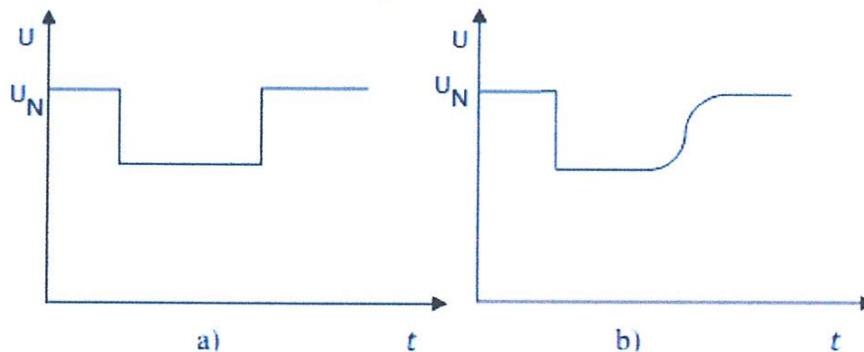


Fig. 2.2 : amplitude d'un creux de tension provoqué par :

- a) un court circuit
- b) le démarrage d'un moteur de forte puissance [24]

Les creux de tension sont caractérisés par leur amplitude et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées, [15].

Les creux de tension sont les perturbations électriques les plus pénalisantes du fait de leur fréquence et de la sensibilité de nombre d'appareillages présents dans les réseaux industriels. Il faut néanmoins souligner que les coupures brèves peuvent avoir des conséquences plus graves (à la reprise), mais sont bien moins fréquentes, [18].

C. Conséquences :

Les creux de tension sont susceptibles de perturber le fonctionnement de certaines installations industrielles et tertiaires. En effet, ce type de perturbation peut causer des dégradations de fonctionnement des équipements électriques qui peuvent aller jusqu'à la

destruction totale de ces équipements. Le Tab. 2.1 résume les conséquences néfastes causées par les creux de tension sur quelques matériels industriels et tertiaires sensibles.

Tab. 2.1 : conséquences des creux de tension sur quelques équipements électriques sensibles. [15]

Type d'appareils	Conséquences néfastes
Eclairage	Moins de luminosité, extinction et ré-allumage (lampes à arc)
Système à base d'électronique de puissance	Arrêt du dispositif
Dispositifs de protection	Ouverture des contacteurs
Moteurs asynchrones	Ralentissements, décrochage, surintensité au retour de la tension
Moteurs synchrones	Perte de synchronisme, décrochage et arrêt du moteur
Variateurs de vitesse pour un moteur à courant continu	<ul style="list-style-type: none"> • en mode onduleur : destruction des protections • en mode redresseur : ralentissement de la machine
Variateurs de vitesse pour un moteur asynchrone	Ralentissement, décrochage, surintensité au retour de la tension, destruction éventuelle de matériel au niveau du convertisseur

2.4.2. Surtensions :

A. définition :

Toute tension appliquée à un équipement dont la valeur de crête sort des limites d'un gabarit défini par une norme ou une spécification est une surtension, [25]. Les surtensions sont de trois natures:

- Temporaires (à fréquence industrielle).
- De manœuvre.
- D'origine atmosphérique (foudre).

Elles peuvent apparaître:

- En mode différentiel (entre conducteurs actifs ph/ph – ph/neutre).
- En mode commun (entre conducteurs actifs et la masse ou la terre). [12]

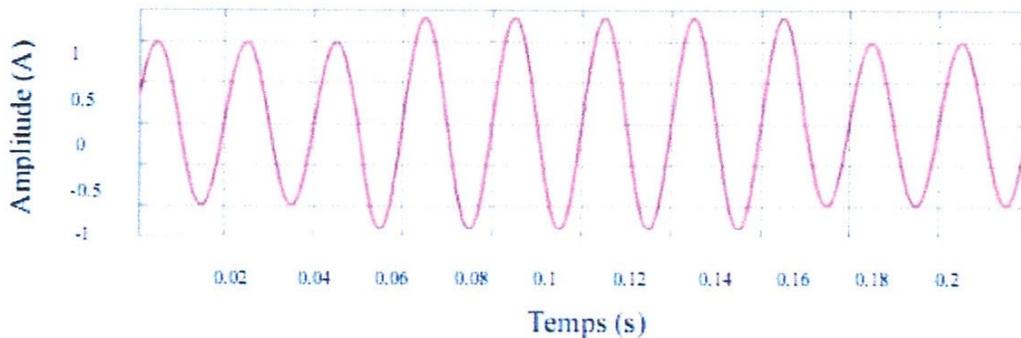


Fig. 2.3 : exemple de surtension. [12]

✓ Les surtensions temporaires :

Par définition elles sont à la même fréquence que celle du réseau (50 Hz ou 60 Hz).

Elles ont plusieurs origines :

- Un défaut d'isolement :

Lors d'un défaut d'isolement entre une phase et la terre dans un réseau à neutre isolé, la tension des phases saines par rapport à la terre peut atteindre la tension composée. Des surtensions sur les installations BT peuvent provenir des installations HT par l'intermédiaire de la prise de terre du poste HT/BT, [25].

- La ferrorésonance :

Il s'agit d'un phénomène oscillatoire non linéaire rare, souvent dangereux pour le matériel, se produisant dans un circuit comportant un condensateur et une inductance saturable. Des dysfonctionnements ou des destructions de matériel mal élucidés lui sont volontiers attribués, [12].

- La rupture du conducteur de neutre :

Les appareils alimentés par la phase la moins chargée voient leur tension augmenter (parfois jusqu'à la tension composée).

- Les défauts du régulateur d'un alternateur ou d'un régleur en charge de transformateur.
- La surcompensation de l'énergie réactive :

Les condensateurs shunt produisent une augmentation de la tension depuis la source jusqu'au point où ils se trouvent. Cette tension est particulièrement élevée en période de faibles charges, [25].

✓ **Les surtensions de manœuvre :**

Elles sont provoquées par des modifications rapides de la structure du réseau (ouverture d'appareils de protection...), [25]. On distingue particulièrement trois types:

- Surtensions de commutation en charge normale.
- Surtensions provoquées par l'établissement et l'interruption de petits courants inductifs.
- Surtensions provoquées par la manœuvre de circuits capacitifs (lignes ou câbles à vide, gradins de condensateurs), [12].

✓ **Les surtensions atmosphériques :**

La foudre est un phénomène naturel apparaissant en cas d'orage. On distingue les coups de foudre directs (sur une ligne ou sur une structure) et les effets indirects d'un coup de foudre (surtensions induites et montée en potentiel de la terre), [25].

B. Conséquences des Surtensions :

Leurs conséquences sont très diverses selon le temps d'application, la répétitivité, l'amplitude, le mode (commun ou différentiel), la raideur du front de montée et la fréquence:

- Claquage diélectrique, cause de destruction de matériel sensible (composants électroniques...).
- Dégradation de matériel par vieillissement (surtensions non destructives mais répétées), [12].
- 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, [26].

- 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, [25].

2.4.3. Les fluctuations rapides de tension (flickers) :

A. Définition :

Une fluctuation de tension est décrite comme une variation de l'enveloppe de la tension. L'amplitude de celle-ci doit se situer dans une bande de 10% de sa valeur nominale, [25]. Les fluctuations de tension sont une suite de variations de tension ou des variations cycliques ou aléatoires de l'enveloppe d'une tension dont les caractéristiques sont la fréquence de la variation et l'amplitude, [26]. Comme illustré sur la figure suivante.

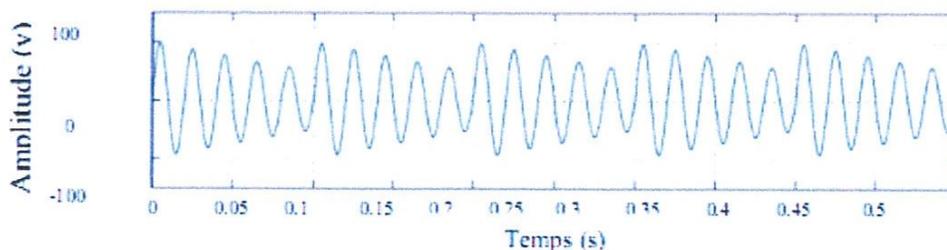


Fig. 2.4 : fluctuation de tension. [12]

Ce type de fluctuation est à distinguer des variations lentes de tension dues à la variation progressive de la consommation dans les réseaux. Les principales sources de fluctuations rapides sont les charges industrielles dont le fonctionnement aléatoire ou intempestif occasionne de brusques variations de puissances telles que les machines à souder et les fours à arc. Ces derniers produisent des variations erratiques permanentes de tension. Ces fluctuations sont responsables du phénomène de "flicker", [27].

Le flicker est le phénomène de papillotement des sources lumineuses, dû aux fluctuations de tension de l'alimentation électrique. Il peut gêner les personnes dans les ateliers, les bureaux, les locaux d'habitation en amenant une fatigue visuelle et nerveuse. Il peut concerner, simultanément, un grand nombre de personnes (perturbation du réseau de distribution publique HTA et HTB). Aujourd'hui, les limites des fluctuations de tension périodiques qui provoquent l'effet du flicker sont connues. Les générateurs du flicker sont nombreux et peuvent être très puissants (fours à arc en aciérie). Il est très important de les connaître, sachant que des variations de tension de moins de 1 % peuvent apporter une gêne. Leur identification est une nécessité car le flicker est souvent difficile à supprimer sur un réseau existant, [28].

B. Conséquences :

Comme les fluctuations ont une amplitude qui n'excède pas $\pm 5\%$, la plupart des appareils ne sont pas perturbés. Le principal effet des fluctuations de tension est la fluctuation de la luminosité des lampes (papillotement ou flicker). 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, [12].

2.4.4. Les dissymétries du système de tension appelées déséquilibre :

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 les grandeurs ne vérifient pas ces conditions de phase et d'amplitude, on parle d'un système triphasé asymétrique (non symétrie), [18].

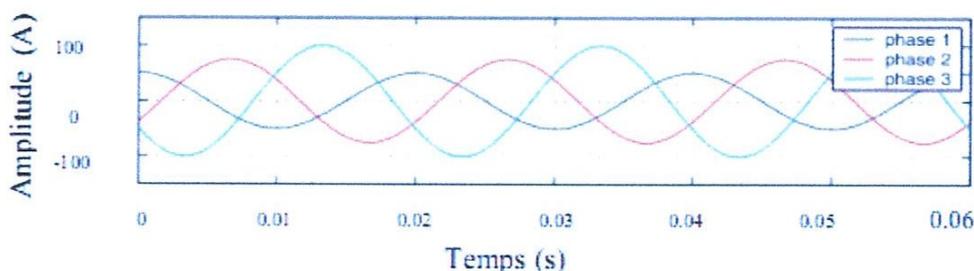


Fig. 2.5 : Déséquilibre du système de tension. [12]

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, [22].

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 à commande de phase, [12].

2.4.5. Variation de la fréquence :

Une variation sensible de la fréquence du réseau peut apparaître sur les réseaux des utilisateurs non interconnectés ou alimentés par une source thermique autonome. Au niveau des réseaux de distribution ou de transport, cette variation de la fréquence est très rare et n'est présente que lors de circonstances exceptionnelles, comme dans le cas de certains défauts graves sur le réseau. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 1\%$, [19].

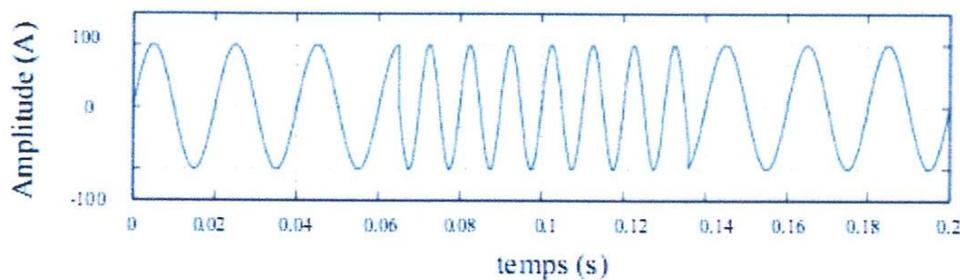


Fig. 2.6 : variation de fréquence. [12]

2.4.6. Les harmoniques :

Les principales sources d'harmoniques sont les dispositifs contenant des éléments qui commutent (les convertisseurs statiques), et les dispositifs à caractéristique tension- courant non linéaire (fours à arc inductances saturées, transformateurs, machines tournantes, etc.), [29].

Ces équipements électriques sont considérés comme des charges non linéaires émettant 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 points de raccordement et alors polluer les consommateurs alimentés par le même réseau, [26].

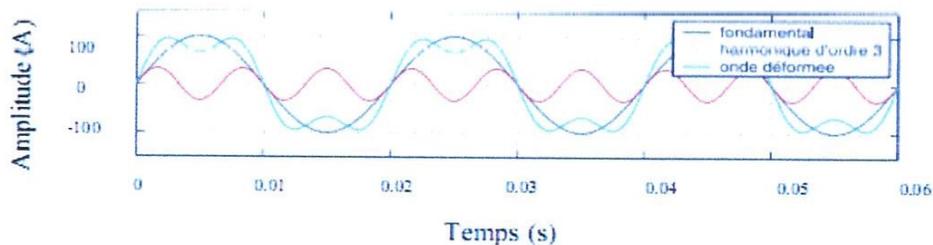


Fig. 2.7 : les harmoniques. [29]

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. Ils n'existent qu'en présence d'une composante continue. Par contre, les harmoniques de rang impair (3, 5, 7, 9...) sont fréquemment rencontrés sur le réseau électrique. Les harmoniques supérieurs au rang 25 sont dans une majorité des cas négligeables, [16].

A. Origine des harmoniques :

L'utilisation des convertisseurs statiques dans les installations de conversion d'énergie électrique est considérablement contribué à améliorer les performances et l'efficacité de ces systèmes, Par exemple, ces dispositifs sont fréquemment employés dans la

régulation de vitesse de moteurs à courant continu et alternatif, ainsi que dans les alimentations des ordinateurs.

Ils sont également utilisés dans les variateurs de lumière, les régulations de systèmes de chauffage électrique et les variateurs de vitesse des moteurs universels ... [30], [31]. En revanche, Les convertisseurs statiques (redresseurs, gradateurs ...) sont les sources d'harmoniques les plus gênantes du fait du nombre et de la puissance des dispositifs installés.

On peut citer :

- Les redresseurs monophasés et triphasés. Ils génèrent des harmoniques dont la fréquence il dépend sensiblement de la commande adoptée.
- Les cyclo-convertisseurs utilisés pour régler la vitesse des moteurs à courant alternatif. Ils génèrent des spectres complexes, généralement riches en fréquences et dépendant de leur structure et de leur commande.
- Les gradateurs utilisés dans les entraînements de faible puissance, les systèmes d'éclairage et de chauffage et les systèmes de conduite des réseaux. Les gradateurs génèrent des harmoniques dont l'amplitude et la phase dépendent de l'angle d'allumage des thyristors, [16].

B. Conséquences des harmoniques :

Les harmoniques rencontrés sur les réseaux électriques (en tension ou en courant) ont un grand nombre d'effets néfastes sur le fonctionnement du réseau. La présence des courants harmoniques, qui peuvent déformer la tension, dus aux charges non linéaires sont capables de perturber le fonctionnement des autres dispositifs connectés au réseau. Les principales conséquences des effets nocifs engendrés à court terme sont :

– Échauffement :

Les courants harmoniques génèrent des pertes supplémentaires et par conséquent des échauffements. Ces pertes Joule dans les équipements se décomposent en la somme des pertes issues du fondamental et de celles engendrées par les harmoniques :

$$P_{Joule} = RI^2 = RI_1^2 + \sum_{h=2}^{\infty} R_h I_h^2 \quad (2.1)$$

– Interférences avec les réseaux de télécommunication :

Le couplage électromagnétique entre les réseaux électriques et de communication peut provoquer des interférences. Le courant circulant dans le réseau électrique engendre un champ magnétique qui induit un courant dans les conducteurs des réseaux de communication. L'importance des interférences dépend de l'amplitude et de la fréquence des courants électriques ainsi que de l'importance du couplage électromagnétique entre les réseaux, [28].

– **Excitation des résonances :**

Des équipements constitués de capacités ou d'inductances peuvent avoir des fréquences de résonance proches de celles des harmoniques. Ainsi, les harmoniques sont amplifiés et ils peuvent apparaître des surtensions ou des surintensités qui détériorent les câbles et font disjoncter les fusibles. La présence des harmoniques réduits, également, le rendement des moteurs et des transformateurs en augmentant les pertes d'énergie par hystérésis et par les courants de Foucault. De plus, ces effets nocifs instantanés (échauffement, surtension, surintensité,...) provoquent un vieillissement accéléré des appareils électriques.

– **Mauvais fonctionnement pour les dispositifs électriques :**

En présence des harmoniques, les tensions (ou les courants) peuvent changer de signe plusieurs fois dans une demi-période du réseau. Par conséquent, tout appareil de mesure ou système de régulation numérique (les équipements de protection) dont le fonctionnement est basé sur le passage par zéro de grandeurs électriques peut être perturbé.

– **Autres effets :**

- Augmentation du niveau sonore et de la pulsation du couple dans les machines électriques.
- Accélération du vieillissement des équipements d'éclairage et des batteries de condensateurs.
- Influence sur les relais de protection.

On peut résumer les conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau dans le tableau suivant :

Tab.2.2 : Conséquences des harmoniques sur les éléments du réseau. [32]

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.	Distorsion de tension = 10 % (pour petites machines) Distorsion de courant = 5 % (machines de fortes puissances)
Lignes	Pertes ohmiques supplémentaires.	Distorsion de tension = 3 % Distorsion de courant = 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.	Distorsion de tension = 10 % Tension harmonique individuelle $\frac{U_h}{U_1} = 7\%$
	– Pertes supplémentaire dans les enroulements liées à la circulation des courants harmoniques. – Pertes supplémentaires dans	Distorsion de tension = 10 % Distorsion de courant = 7 %

Transformateurs	le fer (par courants de Foucault). - Risque de saturation en présence des composantes continues.	
Moteurs	- Pertes supplémentaires dans les enroulements, principalement, liées à la distorsion de tension, proportionnelle à $\frac{uh^2}{h^2}$ - Limitation des performances en puissance.	Distorsion de tension = 15 % Distorsion de courant = 10 %

2.5. Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique :

Une dégradation de qualité peut conduire à une modification du comportement, des performances ou même à la destruction des équipements et des procédés qui en dépendent avec des conséquences possibles sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

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, [12].

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, d'agir 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 adapté au besoin réel.

Un diagnostic préalable effectué par des spécialistes, de façon à déterminer la nature des perturbations contre lesquelles il faut se prémunir (par ex. les remèdes sont différents selon la durée d'une coupure), est indispensable. Il conditionne l'efficacité de la solution retenue.

L'étude, le choix, la mise en œuvre et la maintenance (qui assure l'efficacité dans le temps) de solutions doivent aussi 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, éclairages 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 (matières 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, [12].

D'autres critères, tels que les habitudes, la réglementation et les limites de perturbations imposées par le distributeur, sont aussi à prendre en compte.

2.5.1. 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 présentées précédemment dans le cas des perturbations de non symétrie de tension.

Quant à 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, [12].

2.5.2. 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.

En fait, les solutions à retenir dépendent du type de surtensions rencontrées, [25].

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 ferrorésonance ou introduire des pertes (résistances d'amortissement) qui amortissent le phénomène.

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 limiter les effets des surtensions transitoires.

- Utiliser des disjoncteurs de branchement différentiels 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 (filtres 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.

Surtensions atmosphériques :

- Protection primaire :

Elle protège le bâtiment et sa structure contre les impacts directs de la foudre (paratonnerres, cages maillées (Faraday), câbles de garde / fil tendu).

- 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 et à l'entrée des postes MT/BT.

En BT, ils sont installés à la fois le plus en amont possible de l'installation BT (afin de protéger le plus globalement possible) et le plus près possible des récepteurs électriques. La mise en cascade de parafoudres est parfois nécessaire : un, en tête d'installation, et un, au plus près des récepteurs. Un parafoudre BT est toujours associé à un dispositif de déconnexion. D'autre part, l'utilisation d'un disjoncteur de branchement différentiel sélectif en BT évite que l'écoulement du courant à la terre par le parafoudre ne provoque de déclenchement intempestif du disjoncteur de tête incompatible avec certains récepteurs (congélateur, programmeur...). A noter que 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). Il existe sur le marché des protections adaptées, [25].

2.5.3. Fluctuations 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, [25].

- 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 phase par phase 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, [12].

2.5.4. Non symétrie de la tension :

Puisque les courants déséquilibrés dans un réseau électrique basse tension résultent généralement des charges monophasées et biphasées 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, [25].
- Augmentation de la puissance de court-circuit.
- Dispositif de rééquilibrage.
- Modification de l'architecture du réseau.
- Compensation de la puissance réactive, [12].

2.5.5. Harmoniques :

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

- a) Réduction des courants harmoniques générés:
 - Inductance de ligne :

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, [25].

b) 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, [12].

- Protections et surdimensionnement des condensateurs.

c) 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 soigné : 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. Un filtre actif peut être, par exemple, associé à une ASI de façon à réduire les harmoniques réinjectés en amont.

– 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, [25].

d) 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.

e) Le déclassement :

Cette solution, applicable à certains équipements, est une réponse facile et souvent suffisante à la gêne occasionnée par les harmoniques, [25].

Le Tab.2.3 résume les principales perturbations, leurs origines ainsi que leurs conséquences. L'amplitude de la tension est également indiquée en pu (perunits) pour les perturbations importantes au niveau de l'amplitude et en % pour les variations faibles d'amplitude, [18].

Tab. 2.3: Vue d'ensemble des principales perturbations électriques. [18]

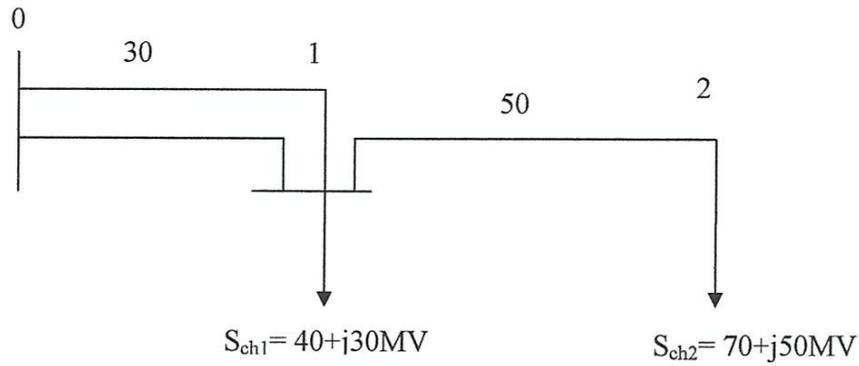
Type de perturbation	origine	conséquences	Solutions possibles
Coupure longue	Court-circuit, surcharge, déclenchement intempestif, (maintenance)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Alimentation de secours (réseau), alimentation sans interruption (ASI)
Creux de tension et coupure brève	Court-circuit, (enclenchement de gros moteur)	Arrêts d'équipements, pertes de production, dégâts	Conditionneur de réseau, conception de l'équipement sensible, alimentation sans interruption
Fluctuation rapide (flicker)	Installations fluctuantes (four à arc, soudeuse, moteur à démarrage fréquent, éolienne...)	Papillotement de l'éclairage	Compensateur synchrone, compensateur statique de puissance réactive, conditionneur actif, condensateur série
Harmonique	Installations non linéaires (électronique de puissance, arcs électriques...)	Effets thermiques (moteurs, condensateurs, conducteurs de neutre...), diélectriques (vieillessement d'isolant) ou quasi instantanés (automatismes)	Filtrage actif ou passif, self anti-harmonique, déclassement d'appareil
	Installations non	Papillotement de	Filtrage actif ou

Inter-harmonique	linéaires et fluctuantes (four à arc, soudeuse, éolienne), changeurs de fréquence, télécommande centralisée	l'éclairage fluorescent, dysfonctionnement d'automatismes, dégâts mécaniques sur machines tournantes	passif, amortissement de filtres anti-harmoniques, conception de l'équipement sensible
Déséquilibre	Installations déséquilibrées (traction ferroviaire...)	Echauffement de machines tournantes, vibrations, dysfonctionnement de protections	Dispositif d'équilibrage, conditionneur de réseau
Surtension	Court-circuit, commutations, foudre	Déclenchements, danger pour les personnes et pour les matériels	Séparation galvanique, Para-surtenseur, enclenchement "synchronisé", résistance de pré-insertion

CHAPITRE 3

Calcul et procédures de compensation

3.1. Exemple de calcul :



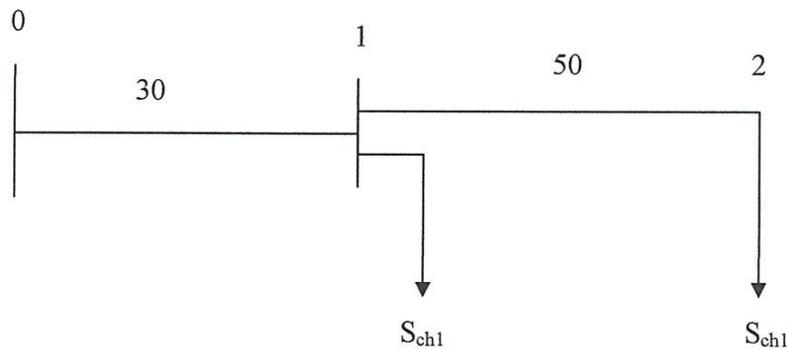
3.1.1. Les données initiales :

$L_{A-1}: 2 \times ACO - 300 \text{ mm}^2$

$L_{1-2}: 2 \times ACO - 300 \text{ mm}^2$

$r_0 + jx_0 = 0.108 + j0.392 \Omega/Km$; $g_0 + jb_0 = 0 + j2.9 \times 10^{-6} \Omega^{-1}/Km$

Après simplification notre réseau aura le modèle suivant :



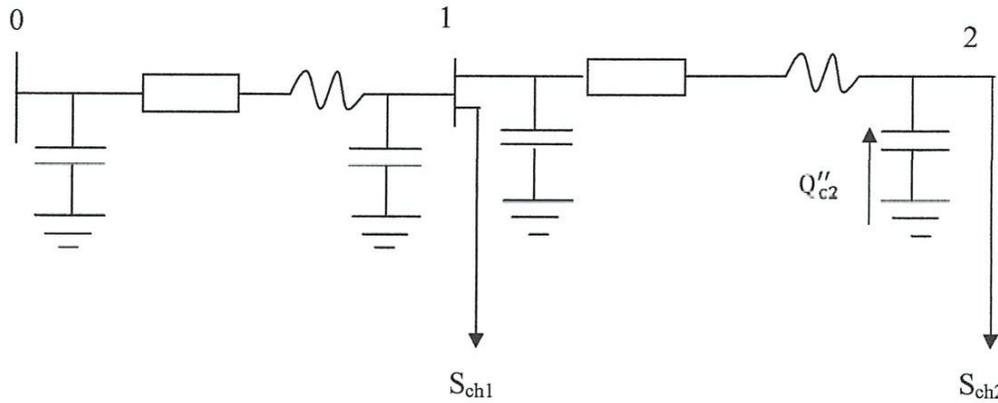
On aura:

$r_{0\acute{e}q} + jx_{0\acute{e}q} = \frac{r_0}{2} + j\frac{x_0}{2} = 0.05 + j0.196 \Omega/Km$; $b_{0\acute{e}q} = b_0 \times 2 = 5.8 \times 10^{-6} \Omega^{-1}/Km$

On peut résumer les paramètres du réseau dans le **Tab. 3.1** suivant :

Lignes	L [Km]	r_0 [Ω /Km]	x_0 [Ω /Km]	b_0 [Ω^{-1} /Km]
L ₁₋₂	50	5.4	19.6	1.45×10^{-4}
L ₀₋₁	30	1.5	5.88	1.74×10^{-4}

Donc ce réseau peut être modélisé comme suit :

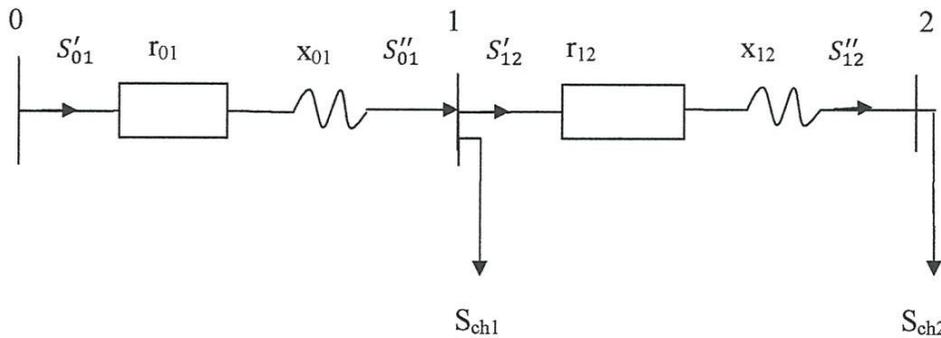


$$Q''_{C2} = U_2^2 \times \frac{b_{12}}{2} \tag{3.1}$$

$$Q''_{C2} = 110^2 \times \frac{1.44 \times 10^{-4}}{2} = 0.877 \text{ MVAR}$$

$$Q''_{C2} \ll Q_2 = 50 \text{ MVAR} \quad \rightarrow \quad Q''_{C2} = 0 \text{ MVAR}$$

Dans ce cas le modèle sera comme suit :



3.1.2. Le choix de la tension nominale :

Le niveau de tension à utiliser dépend de la puissance à transmettre et de la longueur de transmission déterminée. Pour une longueur et une puissance données, la tension ne doit pas être inférieure à une valeur déterminée.

Le choix de la tension nominale est effectué à partir d'une analyse technico-économique.

Le choix de la tension peut s'effectuer par l'expression suivante ; dans laquelle on tient compte de ce dernier critère ;

$$U = 4.34 \sqrt{L(KM) + 0.016P(KW)} \quad (3.2)$$

Pour $L < 250$ Km

$P < 60$ KW

$$U = 4.34 \sqrt{30 + 0.016(40000)}$$

$$U = 112.33 \text{ KV}$$

On prend une tension normalisée pour toute la boucle $U_n = 110$ KV

- **Calcul de la tension du nœud 0.**

On calcule les pertes de puissance et la chute de tension entre les nœuds 1 et 2 :

$$\Delta S_{12} = \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} r_{12} + j \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2} x_{12} \quad (3.3)$$

$$\Delta S_{12} = \frac{70^2 + 50^2}{110^2} 5.4 + j \frac{70^2 + 50^2}{110^2} 19.6 = 3.302 + j11.986 \text{ MVA}$$

$$\Delta U_{12} = \Delta U_{12} + j\delta U_{12} = \frac{P_{12}'' r_{12} + Q_{12}'' x_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}'' x_{12} - Q_{12}'' r_{12}}{U_2} \quad (3.4)$$

$$\Delta U_{12} = \frac{70 \times 5.4 + 50 \times 19.6}{110} + j \frac{70 \times 19.6 - 50 \times 5.4}{110} = 12.345 + j10.018 \text{ KV}$$

On trouve la tension du nœud 1 :

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_{12}) + j\delta U_{12} \quad (3.5)$$

$$U_1 = 110 + 12.345 + j10.018 = 122.345 + j10.018KV$$

$$|U_1| = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2} = 122.754KV \quad (3.6)$$

Pour calculer la tension du nœud 0, il faut d'abord calculer les pertes de puissance et la chute de tension entre les nœuds 1 et 0 :

$$U_0 = |U_1| + \Delta U_{01} + j\delta U_{01} \quad (3.7)$$

$$\Delta U_{01} = \frac{P''_{01}r_{01} + Q''_{01}x_{01}}{U_1} + j \frac{P''_{01}x_{01} - Q''_{01}r_{01}}{U_1} \quad (3.8)$$

$$S''_{01} = S_1 + S'_{12} - jQ_{C1} \quad (3.9)$$

$$S'_{12} = P''_{12} + jQ''_{12} \quad (3.10)$$

$$P''_{12} = P_2$$

$$Q''_{12} = Q_2 - Q_{C2}$$

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 70 + j50 + 3.302 + j11.986 = 73.302 + j61.986MVA$$

$$S''_{01} = 40 + j30 + 73.302 + j61.986 - j0 = 113.302 + j91.986MVA$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{01} &= \frac{113.302 \times 1.5 + 91.986 \times 5.88}{122.754} + j \frac{113.302 \times 5.88 - 91.986 \times 1.5}{122.754} \\ &= 5.79 + j4.303 KV \end{aligned}$$

$$U_0 = 122.754 + 5.79 + j4.303 = 128.544 + j4.303KV$$

$$|U_0| = 128.616KV$$

$$\Delta S_{01} = \frac{P''_{01}r_{01} + Q''_{01}x_{01}}{U_1^2} + j \frac{P''_{01}x_{01} - Q''_{01}r_{01}}{U_1^2} \quad (3.11)$$

$$\Delta S_{01} = \frac{113.302^2 + 91.986^2}{122.754^2} \times 1.5 + j \frac{113.302^2 + 91.986^2}{122.754^2} \times 5.88 = 2.12 + j8.311MVA$$

$$S'_{01} = S''_{01} + \Delta S_{01} \quad (3.12)$$

$$S'_{01} = 113.302 + j91.986 + 2.12 + j8.311 = 115.422 + j100.297MVA$$

3.2. Réglage de la tension par la puissance réactive :

Le réglage de la tension est réalisé par un ensemble de moyens : régulation primaire de tension des alternateurs, régulateur en charge des transformateurs, condensateurs, inductances, compensateurs de puissance réactive. Les actions de ces divers moyens doivent être coordonnées dans le temps et dans l'espace (réglage primaire, secondaire et tertiaire).

Les variations de la tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système production- transport ; ce ci mène au fait que la puissance réactive intervient de manière importante, sinon, prépondérante dans l'expression de la chute de tension et que cette caractéristique peut être mise à profit pour contrôler la tension.

Avant d'aborder le problème de réglage de la tension, il est donc nécessaire d'examiner celui de la compensation de la puissance réactive.

La compensation de la puissance réactive par l'installation des batteries de condensateurs générateurs d'énergie réactive est un moyen simple, souple vite amorti et donne un bon facteur de puissance.

La compensation permet de résoudre ces problèmes. Elle consiste à produire l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande et aux critères technico-économiques.

Le problème posé est de savoir comment et où compenser ainsi que de déterminer le niveau de compensation en énergie réactive, à quel niveau de tension et combien au totale pour réduire au minimum les pertes d'énergie active.

L'effet de la circulation de l'énergie réactive sur les écarts de la tension est déterminé par la formule :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{RP + QX}{U_2} + j \frac{PX - QR}{U_2}$$

Le contrôle de l'écart de la tension entre deux nœuds d'un réseau passe donc par celui des sommes :

$$RP + QX \text{ et } PX - QR$$

3.3. Analyse des régimes de compensation :

Le but de la compensation recherché dans ce travail est de maintenir 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.

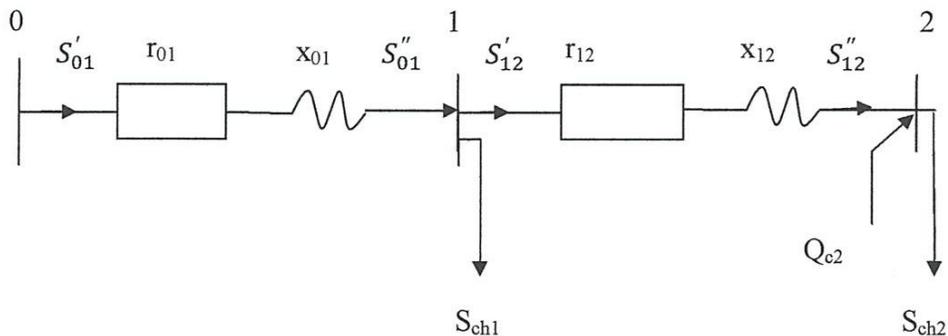
La procédure de compensation est faite par distribution des compensations dans les nœuds.

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

3.3.1. Compensation dans le nœud 2 :

On installe le compensateur dans le nœud 2. En faisant varier la valeur de la puissance réactive telle que $Q_{c2} = (0 \div 1) Q_2$, On peut trouver différentes distributions de la tension de long de la ligne. La procédure de calcul est la suivante :

Schéma équivalent :



On prend le cas de : $Q_{c1} = 0$; $Q_{c2} = 0.4Q_2$

$$\Delta S_{12} = \frac{P_{12}''^2 + Q_{12}''^2}{U_2^2} r_{12} + j \frac{P_{12}''^2 + Q_{12}''^2}{U_2^2} x_{12}$$

Tell que :

$$P_{12}'' = P_2 = 70 \text{ MW} .$$

$$Q''_{12} = Q_2 - Q_{C2} = Q_2(1 - 0.4) = 30 \text{ MVAR.}$$

$$\Delta S_{12} = \frac{70^2 + 30^2}{110^2} 5.4 + j \frac{70^2 + 30^2}{110^2} 19.6 = 2.588 + j9.395 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{12} &= \frac{P''_{12} r_{12} + Q''_{12} x_{12}}{U_2} + j \frac{P''_{12} x_{12} - Q''_{12} r_{12}}{U_2} \\ &= \frac{70 \times 5.4 + 30 \times 19.6}{110} + j \frac{70 \times 19.6 - 30 \times 5.4}{110} = 8.781 + j11 \text{ KV} \end{aligned}$$

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_{12}) + j \delta U_{12} = 110 + 8.781 + j11 = 118.781 + j11 \text{ KV}$$

$$|U_1| = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2} = 119.289 \text{ KV}$$

$$U_0 = |U_1| + \Delta U_{01} + j \delta U_{01}$$

$$\Delta U_{01} = \frac{P''_{01} r_{01} + Q''_{01} x_{01}}{U_1} + j \frac{P''_{01} x_{01} - Q''_{01} r_{01}}{U_1}$$

$$S''_{01} = S_1 + S'_{12} - jQ_{C1}$$

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 70 + j30 + 2.588 + j9.395 = 72.588 + j39.395 \text{ MVA}$$

$$S''_{01} = 40 + j30 + 72.588 + j39.395 - j0 = 112.588 + j69.395 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{01} &= \frac{112.588 \times 1.5 + 69.395 \times 5.88}{119.289} + j \frac{112.588 \times 5.88 - 69.395 \times 1.5}{119.289} \\ &= 4.836 + j4.677 \text{ KV} \end{aligned}$$

$$U_0 = 119.289 + 4.836 + j4.677 = 124.125 + j4.677 \text{ KV}$$

$$|U_0| = 124.21 \text{ KV}$$

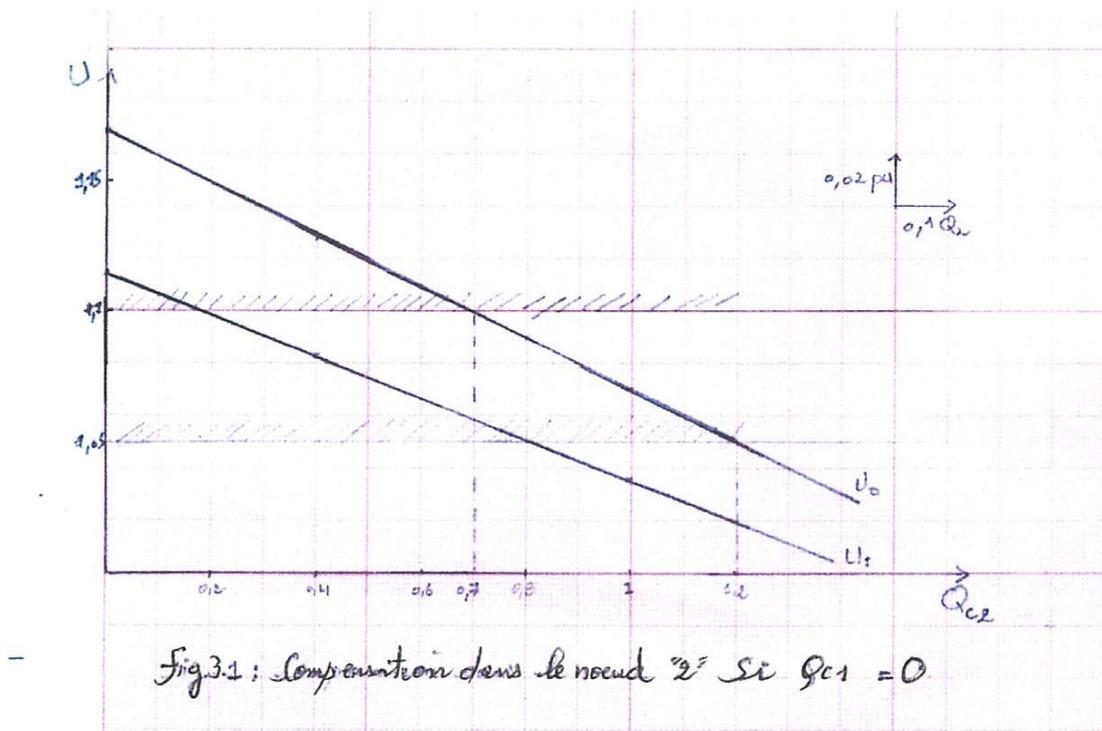
$$\begin{aligned} \Delta S_{01} &= \frac{P''_{01} + Q''_{01}}{U_1^2} r_{01} + j \frac{P''_{01} + Q''_{01}}{U_1^2} x_{01} \\ &= \frac{112.588^2 + 69.395^2}{119.289^2} \times 1.5 + j \frac{112.588^2 + 69.395^2}{119.289^2} \times 5.88 \\ &= 2.315 + j9.076 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$S'_{01} = S''_{01} + \Delta S_{01} = 112.588 + j69.395 + 2.315 + j9.076 = 114.903 + j78.471 \text{ MVA}$$

On fait les mêmes calculs pour les autres valeurs, **Tab. 3.2** :

Q_{c2}	0	$0.4Q_2$	$0.8Q_2$	Q_2
U_1 [KV]	122.754	119.289	115.839	114.114
U_0 [KV]	128.616	124.21	119.84	117.661

Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe caractéristique de variation de la tension dans les nœuds, **Fig. 3.1**.

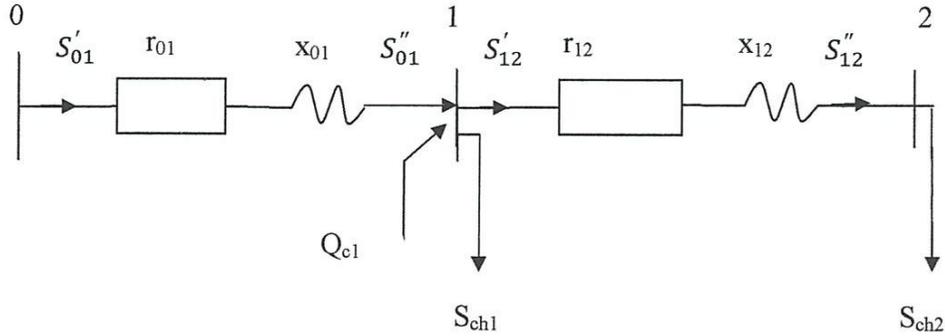


L'injection de la puissance réactive dans le nœud 2 permet d'améliorer les tensions dans les nœuds 0 et 1 si U_2 est maintenu constante.

3.3.2. Compensation dans le nœud 1 :

On donne $Q_{c1} = (0 \div 1) Q_1$

Schéma équivalent :



$$Q_{c1} = 0.4Q_1 \quad ; \quad Q_{c2} = 0$$

$$\Delta S_{12} = \frac{P_{12}''2 + Q_{12}''2}{U_2^2} r_{12} + j \frac{P_{12}''2 + Q_{12}''2}{U_2^2} x_{12}$$

Tell que :

$$P_{12}'' = P_3 = 70 \text{ MW.}$$

$$Q_{12}'' = Q_2 - Q_{c2} = 50 \text{ MVAR.}$$

$$\Delta S_{12} = \frac{70^2 + 50^2}{110^2} 5.4 + j \frac{70^2 + 50^2}{110^2} 19.6 = 3.302 + j11.986 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{12} = \Delta U_{12} + j\delta U_{12} &= \frac{P_{12}'' r_{12} + Q_{12}'' x_{12}}{U_2} + j \frac{P_{12}'' x_{12} - Q_{12}'' r_{12}}{U_2} \\ &= \frac{70 \times 5.4 + 50 \times 19.6}{110} + j \frac{70 \times 19.6 - 50 \times 5.4}{110} = 12.345 + j10.018 \text{ KV} \end{aligned}$$

$$U_1 = (U_2 + \Delta U_{12}) + j\delta U_{12} = 110 + 12.345 + j10.018 = 122.345 + j10.018 \text{ KV}$$

$$|U_1| = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{12})^2 + \delta U_{12}^2} = 122.754 \text{ KV}$$

$$U_0 = |U_1| + \Delta U_{01} + j\delta U_{01}$$

$$\Delta U_{01} = \frac{P_{01}'' r_{01} + Q_{01}'' x_{01}}{U_1} + j \frac{P_{01}'' x_{01} - Q_{01}'' r_{01}}{U_1}$$

$$S_{01}'' = S_1 + S_{12}' - jQ_{c1}$$

$$S'_{12} = S''_{12} + \Delta S_{12} = 70 + j50 + 3.302 + j11.986 = 73.302 + j61.986 \text{ MVA}$$

$$S''_{01} = 40 + j30 + 73.302 + j61.986 - j(0.4 \times 30) = 113.302 + j79.986 \text{ MVA}$$

$$\begin{aligned} \Delta U_{01} &= \frac{113.302 \times 1.5 + 79.986 \times 5.88}{122.754} + j \frac{113.302 \times 5.88 - 79.986 \times 1.5}{122.754} \\ &= 5.215 + j4.449 \text{ KV} \end{aligned}$$

$$U_0 = 122.754 + 5.215 + j4.449 = 127.969 + j4.449 \text{ KV}$$

$$|U_0| = 128.046 \text{ KV}$$

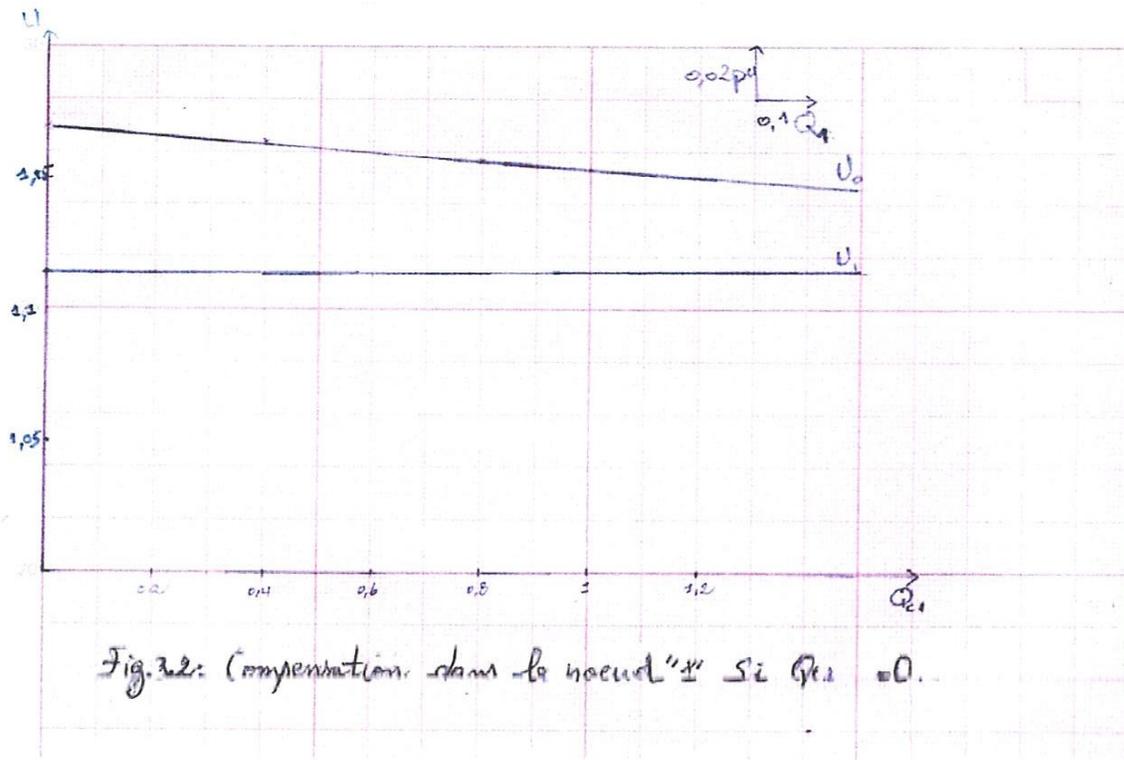
$$\begin{aligned} \Delta S_{01} &= \frac{P_{01}''^2 + Q_{01}''^2}{U_1^2} r_{01} + j \frac{P_{01}''^2 + Q_{01}''^2}{U_1^2} x_{01} \\ &= \frac{113.302^2 + 79.986^2}{122.754^2} \times 1.5 + j \frac{113.302^2 + 79.986^2}{122.754^2} \times 5.88 \\ &= 1.914 + j7.505 \text{ MVA} \end{aligned}$$

$$S'_{01} = S''_{01} + \Delta S_{01} = 113.302 + j79.986 + 1.914 + j7.505 = 115.216 + j87.491 \text{ MVA}$$

On fait les mêmes calculs pour les autres valeurs, **Tab. 3.3** :

Q_{c1}	0	$0.4Q_1$	$0.8Q_1$	Q_1
$U_1 [\text{KV}]$	122.754	122.754	122.754	122.754
$U_0 [\text{KV}]$	128.616	128.046	127.477	127.189

Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe caractéristique de variation de la tension dans les nœuds, **Fig. 3.2**.

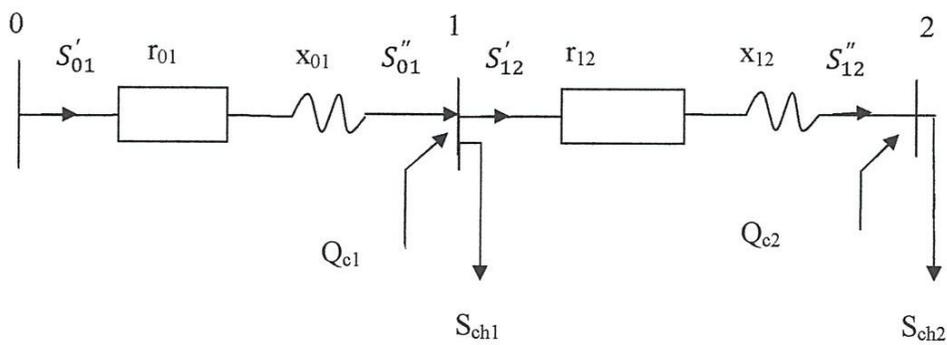


3.3.3. Compensation combinée entre les nœuds 1 et 2 :

On donne les variables :

$$Q_{c1} = (0 \div 1) Q_1$$

$$Q_{c2} = (0 \div 1) Q_2$$



Après calculs on donne tous les résultats dans le **Tab.3.4** :

Q_{c1}	Q_{c2}	0	$0.4Q_2$	$0.8Q_2$	Q_2
0	$U_1[KV]$	122.754	119.289	115.839	114.114
	$U_0[KV]$	128.616	124.21	119.84	117.661
$0.4Q_1$	$U_1[KV]$	122.754	119.289	115.839	114.114
	$U_0[KV]$	128.046	123.627	119.238	117.051
$0.8Q_1$	$U_1[KV]$	122.754	119.289	115.839	114.114
	$U_0[KV]$	127.477	123.042	118.637	116.44
Q_1	$U_1[KV]$	122.754	119.289	115.839	114.114
	$U_0[KV]$	127.189	122.75	118.335	116.135

Expressions p.u. **Tab. 3.5** :

Q_{c1}	Q_{c2}	0	$0.4Q_2$	$0.8Q_2$	Q_2
0	$U_0[KV]$	128.616	124.21	119.84	117.661
	U_0^*	1.169	1.129	1.089	1.069
$0.4Q_1$	$U_0[KV]$	128.046	123.627	119.238	117.051
	U_0^*	1.164	1.123	1.083	1.064
$0.8Q_1$	$U_0[KV]$	127.477	123.042	118.637	116.44
	U_0^*	1.158	1.118	1.078	1.058
Q_1	$U_0[KV]$	127.189	122.75	118.335	116.135
	U_0^*	1.156	1.115	1.075	1.055

Les résultats obtenus permettent de tracer les courbes caractéristiques de variation de la tension dans les nœuds, **Fig.3. 3, 4,5**.

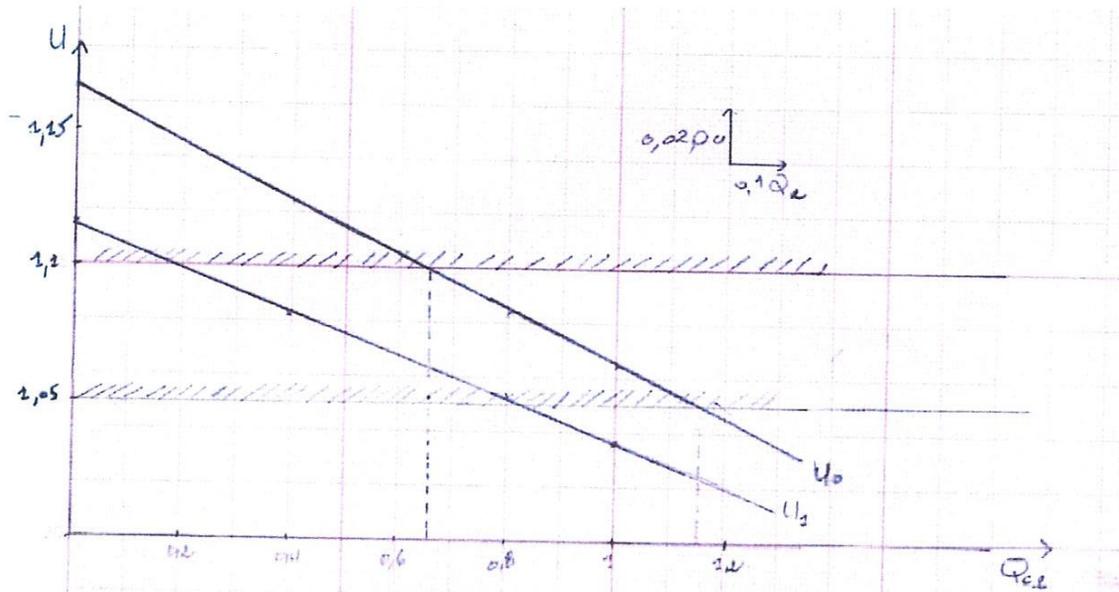


Fig. 3.3 : Compensation dans le nœud "2" si $Q_{c2} = 0.4 Q_1$

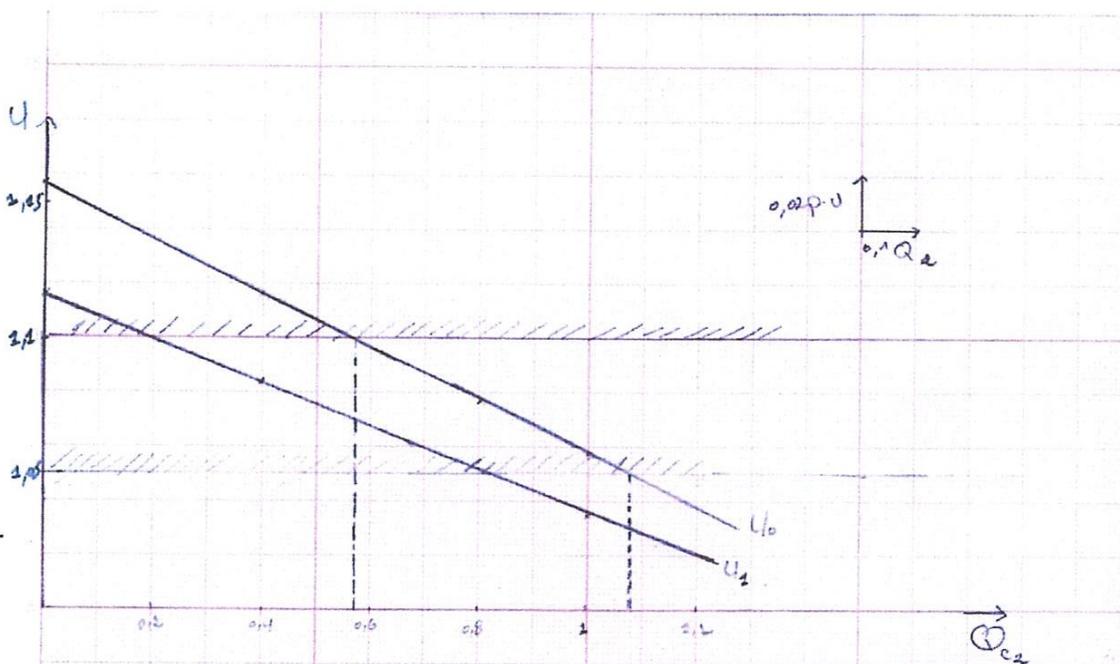
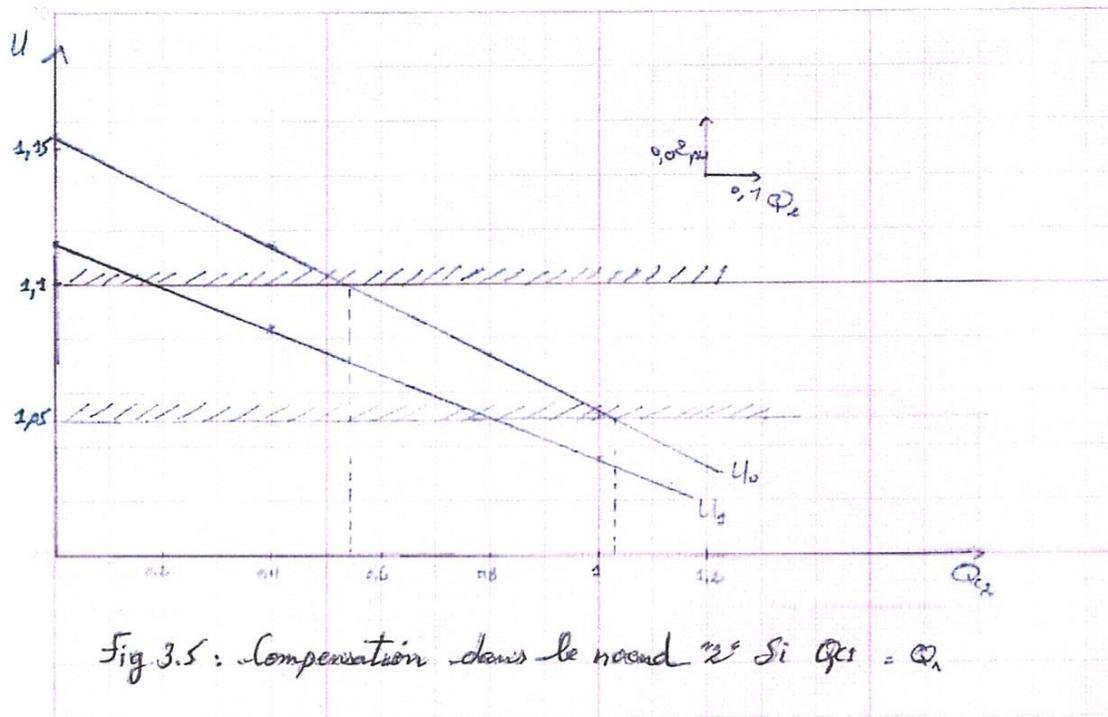


Fig. 3.4 : Compensation dans le nœud "2" si $Q_{c1} = 0.8 Q_1$



3.4. Analyse des réseaux :

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 de réseau s'insèrent de manière plus robuste dans les limites admissibles. Les graphes de la Fig.3. (2, 3, 4 et 5) montrent clairement l'effet de différentes compensations sur la tension dans le nœud de la source.

La distribution des compensateurs sur les nœuds 2 et 1 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 1 et 2 a un effet intéressant sur le plan de la tension du réseau.

Pour une meilleure analyse et un choix plus rationnel, il est utile de représenter la relation entre puissance réactive installées dans différent nœud, correspondante aux limites admissibles de tension.

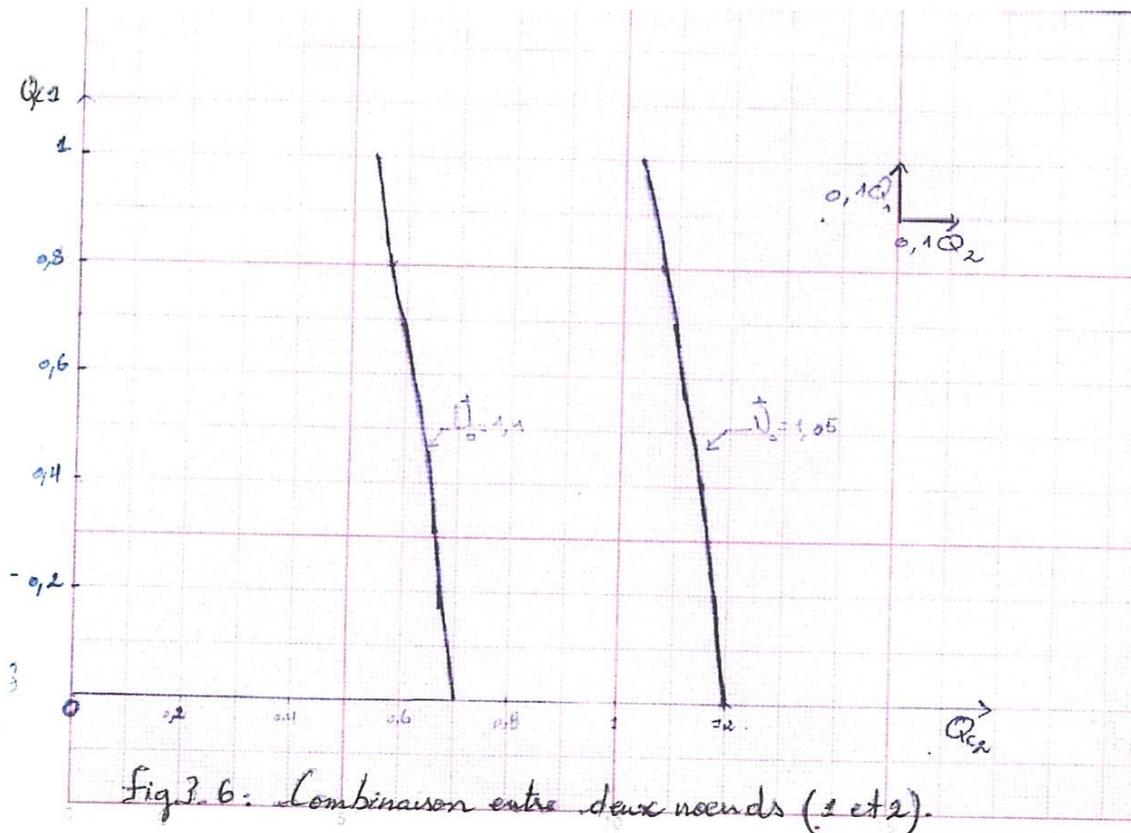
Tab. 3.6. Relevé des résultats : $U=1.1$

Q_{C2}	$0.7 Q_2$	$0.66 Q_2$	$0.57 Q_2$	$0.54 Q_2$
Q_{C1}	0	$0.4 Q_1$	$0.8 Q_1$	Q_1

Tab. 3.7. Relève les résultats : $U=1.05$

Q_{C2}	$1.2 Q_2$	$1.15 Q_2$	$1.08 Q_2$	$1.03 Q_2$
Q_{C1}	0	$0.4 Q_1$	$0.8 Q_1$	Q_1

Les résultats obtenus permettent de tracer la courbe caractéristique de variation de la tension dans les nœuds, Fig. 3.6.



3.5. Eléments et moyens de base de contrôle :

3.5.1. Eléments de contrôle du potentiel.

La nature des moyens de contrôle des systèmes électriques et de leurs régimes, ainsi que leurs diverses caractéristiques sont suggérées, en fait, par les propriétés spécifiques des systèmes électriques eux-mêmes. En effet, l'analyse des processus de transfert de l'énergie électrique sur des systèmes support très déployés dévoile certains aspects spécifiques ; tels les réactions inverses internes ou effets régulateurs, les propriétés de rigidité et de flexibilité des régimes ; traduites par les flux de puissance, respectivement, active et réactive, les effets inductifs et de déplacement (capacitifs)... Et c'est justement ces propriétés caractéristiques des systèmes électro énergétiques qui suggèrent les procédures et les stratégies à adopter pour atteindre les régimes performants requis.

Un des paramètres descriptifs et quantitatifs des performances est, fondamentalement, le potentiel.

En effet, le potentiel est très déterminant quant

- à la stabilité des systèmes
- à la capacité de transport
- à la qualité de l'énergie électrique
- aux pertes de l'énergie électrique.....

Le contrôle du potentiel est généralement réalisé par trois moyens de base essentiels ; lesquels peuvent être nettement signifiés à partir du modèle type d'un réseau (**Fig.3.7**).

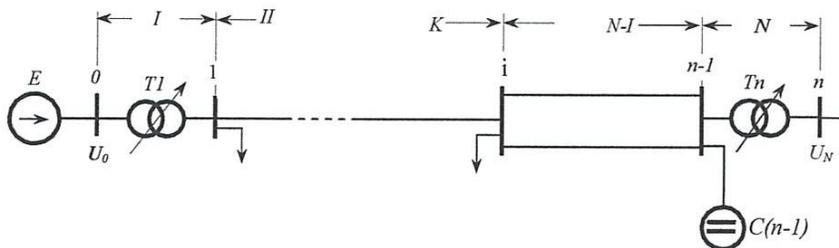


Fig. 3.7. Réseau type. $K=I, II, \dots, N$ - Branches du réseau ; $i=1, 2, \dots, n$ - Nœuds du réseau ; C -Compensateur ; U_0, U_N - Tension, respectivement, à l'origine et à l'extrémité du réseau ; $T_{1,n}$ - Représente les postes réglables de transformation.

Pour ce réseau, on écrit

$$\dot{U}_0 - \dot{U}_n = \sum_K^N \Delta \dot{U}_K - \sum_i^n E_i \quad (3.13)$$

Ou bien pour les écarts sur les deux extrémités du réseau,

$$\dot{V}_n = V_0 + \sum_K \Delta U_K - \sum_i E_i \quad (3.14)$$

Où, $\dot{V}_n = \dot{U}_N - \dot{U}_n$ - Ecart de la tension du nœud "n" ; $\dot{V}_0 = U_N - U_0$ - Ecart de la tension au niveau de la source ; $\sum E_i$ - Ecart sommaire de contrôle réalisé (\pm) au niveau des postes réglables de transformation ; $\sum \Delta U_K$ - Chute sommaire de tension dans le réseau ; U_N - Tension nominale.

Les chutes de tension dans les tronçons du réseau sont fonction de la puissance réactive de ligne correspondante,

$$\sum \Delta \dot{U}_K = f(Q_K) \quad (3.15)$$

De ce fait, le contrôle de la puissance réactive de ligne par voie de compensation permet de réduire considérablement les pertes de tension.

Ainsi, comme le montre le modèle type considéré et de l'expression déduite (3.14), le contrôle du potentiel s'effectue en agissant, essentiellement,

- Sur la valeur V_0 par un réglage au niveau de la source,
- Sur les spires des transformateurs du poste $\sum E_i$,
- Par injection (ou absorption) de la puissance réactive en utilisant les compensateurs (respectivement en diminuant ou en augmentant $\sum \Delta U_K$).

Dans les réseaux déployés sur des grands territoires, (lignes de grande longueur) où, en règle générale, sont mis en jeu de grand flux de puissance, les écarts du potentiel impliqués par divers changement d'états de régime, sont considérablement importants. L'apport en compensation de ces écarts, pouvant être réalisés par le réglage de la source synchrone et par celui des postes de transformation, ne peut, en règle générale, couvrir l'écart sommaire impliqué et, plus particulièrement, dans les cas où les systèmes sont confrontés à de grands flux de puissance réactive.

Cette situation suggère, d'une manière incontournable, le recours complémentaire aux compensateurs du réactif, lequel s'avère, ainsi, de plus en plus déterminant.

Notre intérêt pour les compensateurs, en général, et pour ceux statiques, en particulier, est introduit par cet intermédiaire.

Les compensateurs utilisés sont très divers ; aussi bien par leur nature et leur contribution que par leurs caractéristiques et les procédures de leur contrôle.

On distingue, respectivement, les compensateurs

- Capacitifs, inductifs
- Dynamiques, statistiques
- Réglables de manière, respectivement, discrète, continue, hybride...
- Réglables par changement de schéma de branchement....

L'intérêt porté aux compensateurs, dans ce travail, concerne plus leurs caractéristiques externes que celles relatives à leur construction et leurs propriétés. De ce fait, on se limite à revoir, uniquement, certains aspects relatifs à leur principe de fonctionnement et de réglage.

3.6. Description des moyens de compensation :

3.6.1. Compensateur synchrone :

Le compensateur synchrone est une machine synchrone fonctionnant sans charge utile (à vide). Il est modélisé par une force électromotrice (E_{CS}) débitant du réactif dans un nœud du système à travers une réactance (x_d), (**Fig.3.8**).

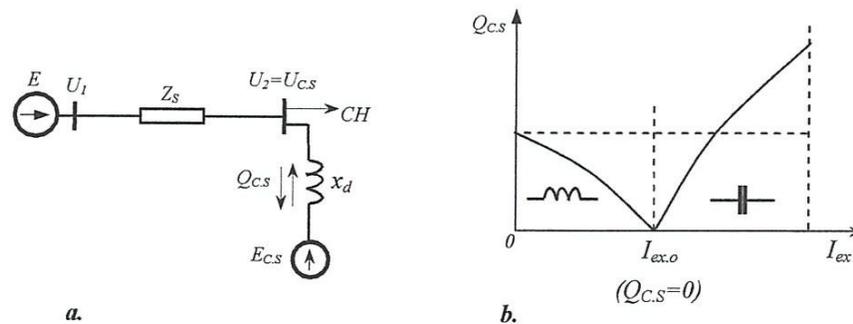


Fig.3.8. Caractéristique du compensateur synchrone.

Le sens du courant, donc de l'écoulement de puissance réactive $Q_{C.S}$ dans la branche du compensateur synchrone est déterminé par le rapport de force entre la tension du nœud de branchement et la force électromotrice $E_{C.S}$ de ce dernier,

$$Q_{C.S} = \frac{(U_{C.S} - E_{C.S})}{x_d} U_{C.S} \quad (3.16)$$

En fonction de l'intensité de l'excitation, on peut atteindre un état, respectivement, d'absorption, quand $I_{ex} < I_{ex0}$ ou d'injection, quand $I_{ex} > I_{ex0}$, de la puissance réactive conformément à (3.16). D'où l'avantage des compensateurs synchrones. Ces derniers sont, généralement, utilisés en moyenne et en haute tension. Ils ont l'inconvénient de receler des pertes actives, d'être tournant et posent un problème de dimensionnement.

3.6.2. Compensateurs statiques.

Ils sont d'une grande diversité ; par leur construction, leur nature, les procédures de leur contrôle.....

Les schémas de principe de base sont donnés par les Fig.3. 9, 10.

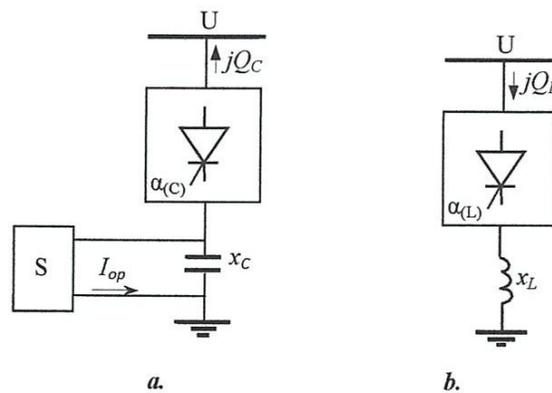
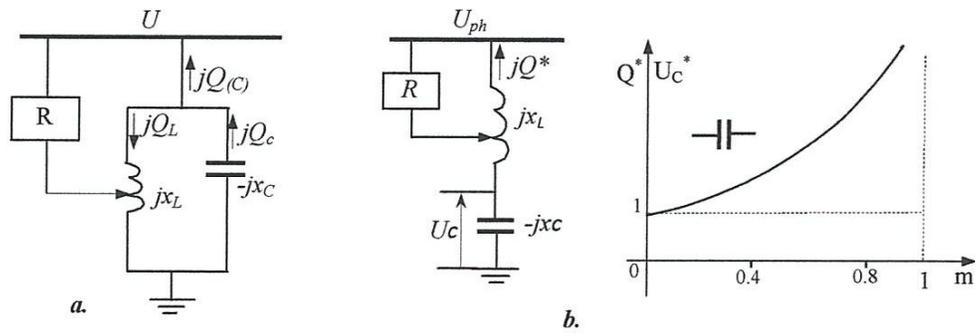


Fig.3.9. Le principe statique, respectivement, capacitif (a) et inductif (b) des compensateurs.



$$Q = \pm(Q_L - Q_C)$$

$$Q_L = \frac{U^2}{x_L} = \text{var}$$

$$Q_C = \frac{U^2}{x_C} = \text{const}$$

R- Régulateur

$$Q^* = \frac{Q}{Q_C} = \frac{1}{1-m} = U_C^*$$

où, $Q_C = \frac{U_{ph}^2}{x_C}; U_C^* = \frac{U_C}{U_{ph}}$

$$m = \frac{x_L}{x_C}$$

Fig.3.10. Principe combines: parallèle (a), série (b).

Par ces principes, la puissance réactive à injecter ou à absorber s'obtient par voie discrète, en variant le paramètre du compensateur (x_C, x_L) ou par voie continue, en variant le paramètre de son régime (i_C, i_L). Le principe statique peut être représenté par un modèle un peu plus général (Fig.3.11).

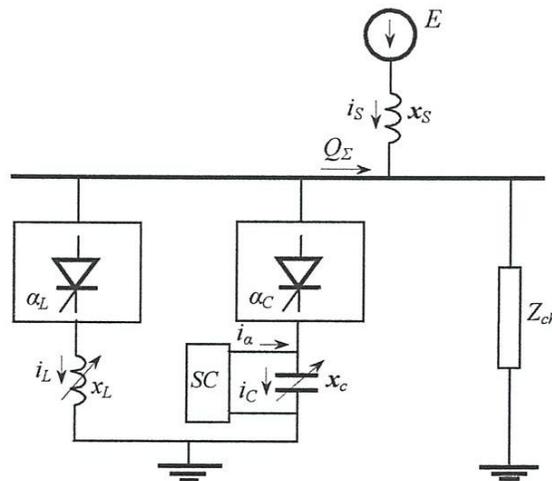


Fig.3.11. Modèle d'un compensateur statique complexe.

Par variation des angles d'amorçage des thyristors (α_L, α_C), on peut atteindre tel ou tel rapport des puissances réactives des branches du compensateur. Pour le branchement, en tête bêche des thyristors, le courant dans les branches peut être déterminé, respectivement, par les formules,

Pour les grandeurs fondamentales

$$\dot{I}_{C1} = I_{C0} f_{1C}(\alpha) \quad (3.17)$$

$$\dot{I}_{L1} = I_{L0} f_{1L}(\alpha) \quad (3.18)$$

Pour les harmoniques supérieurs,

$$\dot{I}_{Cn} = \dot{I}_{C0} f_{nC}(\alpha) \quad (3.19)$$

$$\dot{I}_{Ln} = \dot{I}_{L0} f_{nL}(\alpha) \quad (3.20)$$

où,

$$f_{1C}(\alpha) = 1 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \quad (3.21)$$

$$f_{1L}(\alpha) = 1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \quad (3.22)$$

$$f_{nC}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} - \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (3.23)$$

$$f_{nL}(\alpha) = \frac{2}{\pi} \left[\frac{\sin(1+n)\alpha}{1+n} + \frac{\sin(1-n)\alpha}{1-n} \right] \quad (3.24)$$

Les caractéristiques des puissances du compensateur sont données sur la Fig.3.12. Elles sont données pour des puissances installées des branches, telles que ;

$$Q_{C,0} > Q_{L,0}$$

Et pour des angles de contrôle synchronisés $\alpha_L = \alpha_C$. En faisant varier les rapports entre les puissances installées des branches, on peut atteindre différentes caractéristiques de la puissance réactive Q_Σ du compensateur (Fig.3.12). L'utilisation de ces types de compensateurs exige, en règle générale, l'installation des filtres pour absorber les harmoniques gênants.

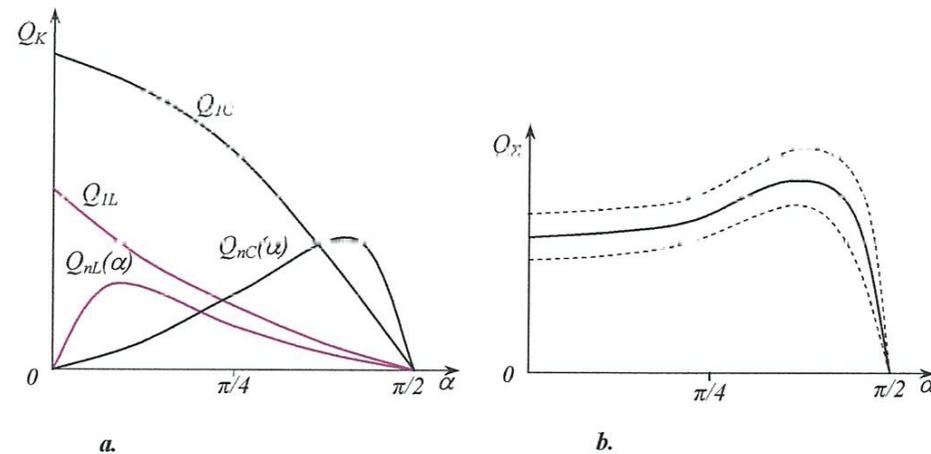


Fig.3.12. Caractéristiques qualitatives, respectivement, des branches (a) et résultante (b) du compensateur statique.

3.7. Choix de compensation :

L'intérêt économique de la compensation est mesuré en comparant le coût d'installation des batteries de condensateurs aux économies qu'elle procure.

Le coût des batteries de condensateurs dépend de plusieurs paramètres dont :

- la puissance installée.

- le niveau de tension.
- le fractionnement en gradins.
- le mode de commande.
- le niveau de qualité de la protection.

3.7.1. Choix de localisation :

- Compensation globale :

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble des charges. Elle convient lorsqu'on cherche essentiellement à supprimer les pénalités et soulager le poste de transformation.

- Compensation locale ou par secteurs :

La batterie est installée en tête du secteur d'installation à compenser. Elle convient lorsque l'installation est étendue et comporte des ateliers dont les régimes de charge sont différents.

- Compensation individuelle :

La batterie est raccordée directement aux bornes de chaque récepteur inductif (moteur en particulier). Elle est à envisager lorsque la puissance du moteur est importante par rapport à la puissance souscrite. Cette compensation est techniquement idéale puisqu'elle produit l'énergie réactive à l'endroit même où elle est consommée, et en quantité ajustée à la demande.

3.7.2. Choix de types :

- Compensation fixe :

On met en service un ensemble de la batterie, dans un fonctionnement "tout ou rien». La mise en service peut être manuelle (par disjoncteur ou interrupteur), semi-automatique (par contacteur), asservie aux bornes des moteurs. Ce type de compensation est utilisé lorsque la

puissance réactive est faible (<15 % de la puissance du transformateur) et la charge relativement stable.

- Compensation automatique ou en "gradins" :

La batterie de condensateurs est fractionnée en gradins, avec possibilité de mettre en service plus ou moins de gradins, en général de façon automatique. Ce type de batterie est installé en tête de la distribution BT ou d'un secteur important. Elle permet une régulation pas à pas de l'énergie réactive. L'enclenchement et le déclenchement des gradins sont piloté par un relais var métrique, [33].

Conclusion

Le travail de mémoire portant sur la qualité d'énergie électrique a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine d'électrotechnique et plus précisément dans celui des systèmes électriques et a permis de nous familiariser avec les procédures de compensation dans les réseaux électriques .

En effet, la compensation de la puissance réactive permet d'améliorer considérablement le plan du potentiel dans les systèmes électriques. C'est un moyen fondamental pour tous les traitements technico-économiques des régimes de fonctionnement.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Regaia, B., Barkia, A. ''Analyse des éléments de base d'un réseau HT à élaborer''. Mémoire de fin d'études, université 8Mai 1945- Guelma, 2012.
- [2] Boudour, M., Hellal, A. '' Réseaux électriques : fondamentaux et concepts de base''. Les pages bleues internationales. Alger. 2010.
- [3] Hoang Le-Huy ''Réseaux électriques''. Université Laval.2009.
- [4] Labed, D. ''Production décentralisée et couplage au réseau''. Thèse doctorat d'état, université Mentouri Constantine. 2008.
- [5] Mclouki, T., Douh, M. '' Etude comparative du réseau de distribution moyenne tension ville de Guelma''. Mémoire de fin d'étude, université 8 Mai 1945 Guelma, 2017.
- [6] Djoudi, M., Ferkous, B., Kahalerras, A. ''Comparaison entre les différentes techniques de coupure d'un arc électrique''. Mémoire de fin d'études, université 8Mai 1945- Guelma, 2010.
- [7] Lilien, J.L. '' Transport et distribution de l'énergie électrique''. Manuel de travaux pratiques. Université de Liège. 2000.
- [8] Lilien, J.L. '' Transport et distribution de l'énergie électrique''. Cours donné à l'Institut d'Electricité Montefiore Université de Liège. 2006.
- [9] Mavoungou Jean. Moise. Aimé. ''Harmonique et qualité de l'énergie électrique''. Mémoire de fin d'études, université 8Mai 1945- Guelma, 2013.
- [10] Valentin, C. ''Les réseaux d'énergie électrique I''. Lavoisier. Paris .2006.
- [11] Bounaya, K. '' Les réseaux électriques première partie éléments de description et d'analyse de base''. Direction de la publication universitaire de Guelma. 2010.
- [12] Boulaares, G. '' Methodes d'analyse des perturbations électriques dans la qualité de l'énergie électrique en utilisant des nouvelles techniques pour l'application aux creux de tension ''. Mémoire de magister. Université Batna. 2012.
- [13] Benysek, G. ''Improvement in the Quality of Delivery Electrical Energy Using Power Electronics Systems''. Springer-Verlag. London Limited. 2007.
- [14] Driesen, J. '' Development of a measurement system for power quantities in electrical energy distribution systems '', Instrumentation and Measurement Technology Conference, IMTC/2002. Proceedings of the 19th IEEE, Vol. 2, 2002.

- [15] Alali, M. A. E. " *Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension* ". Thèse doctorat. Université Louis Pasteur – Strasbourg I. 2002.
- [16] Boumerdas, A. " *L'étude de la qualité d'énergie à l'aide d'une carte arduino* ". Mémoire de master. Université de Constantine I. 2014.
- [17] Bornard, P., Pavard, M. " *Réseaux d'interconnexion et de transport: réglage et fonctionnement* ". Techniques de l'ingénieur, mars 1993.
- [18] Ignatova, V. " *Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique* ". Thèse doctorat. Université Joseph Fourier. 2006.
- [19] Ould Abdeslam, D. " *Techniques neuromimétiques pour la commande dans les systèmes électriques: application au filtrage actif parallèle dans les réseaux électriques basse tension* ". Thèse doctorat. Université de Haute Alsace. 2005.
- [20] El Baaklini, I. " *Outil de simulation de propagation des creux de tension dans les réseaux industriels* ", Thèse doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble 2001.
- [21] Heydt, B. " *Electric Power Quality: A Tutorial Introduction, IEEE Computer Applications in Power* ", vol.11, no.1, January 1998.
- [22] Hadda, S. " *Gestion de la qualité d'énergie électrique dans un réseau de transmission* ". Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2010.
- [23] Normes IEEE Standard 519-1992; " *IEEE recommended practices and requirements for Harmony Control in Electrical Power Systems* ", pp. 15 – 99, 12 April 1993.
- [24] Gattal, B., Chikhi, K., Fetha, C. " *Amélioration de la qualité de l'énergie électrique identification des creux de tension* ". Revue des énergies renouvelables Vol. 17 N°4 (2014) 651 – 661. Université Hadj Lakhdar. 2014.
- [25] Ferracci, Ph. " *Cahier technique n° 199 : La qualité de l'énergie électrique* ". Tec & Doc Lavoisier. Schneider Electric. 2001.
- [26] Fetha, C. " *Analyse des indices de la qualité d'énergie électrique et les phénomènes transitoires dans les réseaux électrique* ". Thèse doctorat. Université de Batna. 2006.

- [27] Lebziz, M. “ *Etude de la pollution harmonique dans les réseaux industriels* ”
Séminaire GL1K. Zone Industrielle. Skikda. 2005.
- [28] Chelli, Z. “ *Amélioration de la qualité de l'énergie électrique par un filtre actif d'harmonique* ”. Thèse doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2015.
- [29] Nakkar, D. “ *Contribution l'étude des Stratégies de Commande des Filtres Actifs Triphasés* ”. Mémoire de magister. Université de Souk Ahras. 2014.
- [30] Séguier, G. “ *Les convertisseurs de l'électronique de puissance : La conversion alternatif-continu* ”. Volume 1. Tec & Doc Lavoisier, 2^{ème} édition .Paris. 1992.
- [31] Rombaut (C.), Séguier (G.) Et Bausiere R. “ *Les convertisseurs de l'électronique de puissance : la conversion alternatif* ”. Volume 2. Tec & Doc Lavoisier. 3^{ème} édition. Paris. 2007.
- [32] Collombet, C., Lupin, J. M., et Schonek, J. “ *Perturbations harmoniques dans les réseaux pollués, et leur traitement* ”. Cahier technique n 152. Schneider Electric. 1999.
- [33] Schneider Electric Industries SA “ *Guide de la compensation d'énergie réactive et du filtrage des harmoniques* ”. : Schneider Electric. France.