

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:/2020



MEMOIRE

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

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : - Limane Ahmed dhya eddine

- Kadri Haitem

Thème

Indices de performance de transfert par grande distance

Soutenu publiquement, le : 03/10/2020 devant le jury composé de :

M. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BOUNAYA Kamel	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M. LADJIMI Abdelaziz	MCA	Univ. Guelma	Examineur
M. BOUCHEKHA Abdelhafid	MAA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

Remerciements.

Je remercie en premier temps « Allah » le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaire pour réaliser ce présent travail.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à m'encadreur **Pr. Bounaya Kamel**, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, pour sa patience, son soutien et ses conseils.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les membres du jury.

Un remerciement tout particulier à mon équipe de travail et surtout Haithem et Youcef et à toute ma famille et mes amis.

Enfin, je remercie aussi toute personne de près ou de loin ayant participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Toutes les personnes qui m'ont encouragé de près ou de loin à réaliser ce mémoire. À ma très chère mère et mon cher père qui m'ont toujours encouragé.

À mon frère Ilyes. À toute ma famille

À tous mes amis : Abedsalem, Haithem, Ilyes, Housseem, ... ect

À tous mes collègues de la promotion de M2. Réseaux électrique 2020.

Remerciements.

Je remercie en premier temps « Allah » le tout puissant de m'avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaire pour réaliser ce présent travail.

Ainsi, je tiens également à exprimer mes vifs remerciements à m'encadreur **Pr. Bounaya Kamel**, qui s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, pour sa patience, son soutien et ses conseils.

Mes remerciements vont aussi à tous les enseignants qui ont contribué à ma formation et à tous les membres du jury.

Un remerciement tout particulier à mon équipe de travail et surtout Mostafa et Oussama et à toute ma famille et mes amis.

Enfin, je remercie aussi toute personne de près ou de loin ayant participé pour rendre ce travail réalisable et présentable.

Dédicace

Je dédie ce travail à :

Toutes les personnes qui m'ont encouragé de près ou de loin à réaliser ce mémoire. À ma très chère mère et mon cher père qui m'ont toujours encouragé.

À mon frère Djallel et ma sœur Ibtessem et sa petite fille

Mira djana. À toute ma famille surtout Maman Nadjat et

Amel et Dounia

À tous mes amis : Mostafa, Oussama, Seif, Syefeddine, Taki, Zinou, Dinou...ect

À tous mes collègues de la promotion de M2. Réseaux électrique 2020.

Résumé.

La problématique de la qualité de l'énergie électrique est posée, principalement, sur deux plans de la hiérarchie des systèmes électriques. Sur le plan des réseaux électriques de transport de l'énergie, on recherche, en règle générale, à réaliser et installer une balance énergétique convenable, particulièrement de la puissance réactive. Sur le plan des réseaux de distribution, on recherche plutôt à réaliser des régimes admissibles vis-à-vis des exigences immédiates des consommateurs concernant la qualité de la tension... Dans ce sens, il s'avère que le contrôle des flux de la puissance réactive a un impact déterminant sur la puissance réactive.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire a trait au transport de l'énergie électrique sur de grandes portées électriques ; dont lequel transport, la problématique posée est particulièrement importante. Ce dernier est caractérisé par des grands flux d'énergie active et réactive et des niveaux de tension nominale très élevés. Dans le sens général, ce travail est orienté sur la caractérisation des régimes de fonctionnement des lignes de grandes portées électriques, prise sous différents modèles ; tels que structure, configuration des phases, niveau de tension. Cette orientation s'est fixée sur le traitement du plan de tension par les moyens de compensation de la puissance réactive.

Summary.

The issue of the quality of electrical energy is posed, mainly, on two levels of the hierarchy of electrical systems. In terms of electrical energy transmission networks, we generally seek to achieve and install a suitable energy balance, particularly reactive power. In terms of distribution networks, the aim is rather to achieve acceptable regimes with regard to the immediate demands of consumers concerning the quality of the voltage ... In this sense, it turns out that the control of the flow of reactive power has a decisive impact on reactive power.

The work carried out within the framework of this dissertation relates to the transport of electrical energy over large electrical ranges; including which transport, the issue raised is particularly important. The latter is characterized by large flows of active and reactive energy and very high nominal voltage levels. In the general sense, this work is oriented on the characterization of the operating regimes of the lines of large electric ranges, taken under different models; such as structure, phase configuration, voltage level. This orientation is fixed on the treatment of the voltage plane by the reactive power compensation means.

ملخص.

تطرح مسألة جودة الطاقة الكهربائية، بشكل أساسي، على مستويين من التسلسل الهرمي للأنظمة الكهربائية. فيما يتعلق بشبكات نقل الطاقة الكهربائية، نسعى عمومًا إلى تحقيق وثبيت توازن طاقة مناسب، وخاصة القدرة التفاعلية. فيما يتعلق بشبكات التوزيع، فإن الهدف هو بالأحرى تحقيق أنظمة مقبولة فيما يتعلق بالمطالب الفورية للمستهلكين فيما يتعلق بجودة الجهد ... وبهذا المعنى، يتبين أن التحكم في تدفق الطاقة التفاعلية له تأثير حاسم على القوة التفاعلية.

يتعلق العمل المنفذ لهذه الرسالة بنقل الطاقة الكهربائية عبر نطاقات كهربائية كبيرة؛ بما في ذلك النقل، فإن القضية التي أثرت لها أهمية خاصة. يتميز الأخير بتدفقات كبيرة من الطاقة النشطة والمتفاعلة ومستويات جهد اسمية عالية جدًا. بالمعنى العام، فإن هذا العمل موجه إلى توصيف أنظمة التشغيل لخطوط النطاقات الكهربائية الكبيرة، المأخوذة وفقًا لنماذج مختلفة؛ مثل الهيكل وتكوين الطور ومستوى الجهد. يتم تثبيت هذا الاتجاه في معالجة مستوى الجهد بوسائل تعويض القدرة التفاعلية.

Sommaire

Introduction générale.....	1
1.1. Introduction.....	3
1.2. Caractéristiques essentielles	3
1.2.1. Amplitude.....	4
1.2.2. Fréquence.....	4
1.2.3. Forme d'onde	5
1.2.4. Symétrie	5
1.3. Dégradation de la qualité de la tension	5
1.3.1. Variation ou fluctuation de la fréquence	5
1.3.2. Variation lente de la tension	6
1.3.3. Fluctuation ou Variation rapides de Tension (flicker)	6
1.3.4. Creux de tension et coupure brève.....	7
1.4. Indices de la qualité de la tension	8
1.4.1. Déséquilibre de tension	8
1.4.2. Les harmoniques	8
1.4.3. Les surtensions	8
1.5. Caractérisation de la qualité de l'énergie électrique	9
1.5.1. Fréquence.....	9
1.5.2. Tension	10
1.6. Ligne de grande longueur.....	13
1.6.1. Équations fondamentales des lignes.....	14
1.7. Instabilité de la tension.....	16
1.7.1. Causes de l'instabilité de la tension	16
1.7.2. Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension	16
2.1. Introduction.....	18
2.2. Méthodes et moyens de réglage de la tension	19
2.2.1. Réglage directe.....	19
2.2.2. Réglage indirecte.....	19
2.2.2.1. Réglage shunt	20
2.2.2.2. Réglage série	21
2.3. Réglage de la tension par compensation de puissance réactive.....	21
2.3. Moyens de compensation de la puissance réactive.....	23

2.3.1.	Compensateurs synchrones	23
2.3.2.	Condensateurs.....	23
2.3.3.	Inductances	24
2.3.4.	Compensateurs FACTS.....	24
2.4.	Caractéristiques des systèmes de compensation	24
2.4.1.	Dispositif de compensation dynamique shunt.....	24
2.4.1.1.	Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (SVC).....	25
2.4.1.2.	Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (STATCOM).....	26
2.4.2.	Dispositifs de compensation série.....	27
2.4.2.1.	Compensateurs séries à base de thyristors (TCSC)	27
2.4.2.2.	TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor).....	28
2.4.2.3.	TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor).....	28
2.4.2.4.	SSSC (Static Synchronous Series Compensator).....	29
2.5.	Choix du lieu d'installation	29
2.5.1.	Compensation centrale	29
2.5.2.	Compensation partielle ou par secteurs	30
2.5.3.	Compensation Individuelle.....	30
3.1.	Problématique.....	33
3.2.	Description du modèle en faisceau	34
3.3.	Caractérisation des paramètres du système.....	35
3.4.	Description du modèle étudié.....	38
3.5.	Etude Comparative.....	39
Figure.3.9.	Compensation shunt aux bornes de l charge.....	42
3.6.	Résultats comparatifs	46
Conclusion		47

Conclusion

Liste des figures

Figure 1.1 Exemple de fluctuation de la fréquence.	6
Figure 1.2 Exemple de Fluctuation de tension.	6
Figure 1.3 Creux et coupure de tension.	7
Figure 1.4 Exemple de l'asymétrie des amplitudes et des phases.	8
Figure 1.5 Définition des indices de la QEE.	10
Figure 1.6 Exemple d'oscillations. Cinq oscillations sur un intervalle T de 12 s.	12
Figure 1.7 Déduction des modèles mathématiques de la ligne. a- Schéma de principe, b- Schéma équivalent de l'élément « dx » de la longueur.	14
Figure 2.1 Modèle d'une ligne à charge résistive.	18
Figure 2.2 Réglage indirecte de la tension par compensation en utilisant des condensateurs ou des inductances	20
Figure 2.3 Réglage de la tension par compensateur	21
Figure 2.4 Compensation shunt	25
Figure 2.5 Schéma du SVC.	26
Figure 2.6 Présentation d'un compensateur STATCOM.	27
Figure 2.7 Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules identiques	28
Figure 2.8 Compensation centrale	29
Figure 2.9 Compensation par secteur	30
Figure 2.10 Compensation individuelle.	30
Figure 3.1 Modèle de la ligne : a.- Principe, b.- Disposition des phases, c.- Configuration du faisceau (phase).	33
Figure 3.2 Effet sur la réactance linéique pour $F=300 \text{ mm}^2$, a.- $x_0(d)$; b.- $x_0(n)$	36
Figure 3.3 Effet sur la susceptance linéique pour $F=300 \text{ mm}^2$, a.- $x_0(d)$; b.- $x_0(n)$	36
Figure 3.4 Ecart Δx_0 et Δb_0 impliqués par n et d.	36
Figure 3.5 Effet sur l'impédance d'onde ; $Z_C=f(n, d)$	36
Figure 3.6 Modèle de principe	38
Figure 3.7 Épure du potentiel en l'absence de compensation.	39
Figure 3.8 Épure du potentiel après compensation.	41
Figure 3.9 Compensation shunt aux bornes de la charge	41
Figure 3.10 Épure du potentiel.	43
Figure 3.11 Épure du potentiel.	45

Liste des tableaux

Tableau 3.1	36
Tableau 3.2	38
Tableau 3.3	40
Tableau 3.4	42
Tableau 3.5	43
Tableau 3.6	45
Tableau 3.7	Error! Bookmark not defined.



Introduction générale

Introduction générale

L'énergie électrique, principalement produite et distribuée sous forme de tensions triphasées sinusoïdales, constitue un enjeu vital dans tous les domaines socioéconomiques des peuples. En effet, on ne peut, désormais, concevoir une quelconque activité dans un quelconque domaine qui ne soit pas tributaire de l'énergie électrique. Dans le cas idéal, cette énergie est fournie sous la forme d'un ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé équilibré, qui possède quatre caractéristiques principales : Amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie, [1].

Aujourd'hui, l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence des lignes d'interconnexion de grande longueur, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations de pays à forte croissance de consommation accroissent encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité. Pour éviter ce phénomène, des études de qualité de tension sont proposées dans divers travaux. Ces études se présentent comme un outil très important pour déterminer la possibilité de transfert de puissance dans le contexte des contraintes dues à la croissance de la consommation. Dans ce contexte, il est intéressant pour le gestionnaire du réseau de disposer des moyens permettant de contrôler la tension et les puissances transmises de ligne afin d'atteindre un niveau d'exploitation et de gestion plus efficace et plus sûr, [1].

Le sujet de ce mémoire concerne, en particulier, le contrôle de la tension dans les réseaux électriques de grande distance par le moyen de compensation de la puissance réactive.

Le mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre du mémoire recense quelques aspects concernant la tension dans les réseaux d'énergie électrique ; comme la qualité de tension et sa dégradation et expose leurs causes et leurs conséquences. On y présente le modèle mathématique des lignes électriques de grande longueur en donnant leur système d'équations hyperboliques.

Le deuxième chapitre traite du réglage de la tension dans les réseaux électriques ; moyens et méthodes et de sa relation avec la puissance réactive; ainsi que du principe de la compensation et de certaines techniques du choix du types et de la localisation des systèmes de compensation.

Le troisième chapitre est orienté vers une analyse comparative paramétrique entre divers modèles de liaison pour en déduire le plus adéquat et ceci conformément à un plan de tension requis. Pour se faire, on fait recours au concept de compensation de la puissance réactive par une procédure de répartition de long de la liaison.

Chapitre 1

Profil de tension dans les réseaux électriques

1.1. Introduction

Aujourd'hui, l'exploitation des grands réseaux électriques est de plus en plus complexe du fait de l'augmentation de leur taille, de la présence de lignes d'interconnexion très longues, de l'adoption de nouvelles techniques, de contraintes économiques, politiques et écologiques. Ces facteurs obligent les opérateurs à exploiter ces réseaux près de la limite de stabilité et de sécurité. Les situations des pays à forte consommation augmente encore les risques d'apparition du phénomène d'instabilité.[2]

La stabilité est l'une des conditions de base à satisfaire pour prétendre à une meilleure qualité de l'énergie électrique. On recherche, par la stabilité, à installer, en fait, l'équilibre énergétique, sur le plan amont des systèmes électriques (réseau haute tension), dans ses deux aspects actif et réactif. Ce problème est particulièrement sensible quand il s'agit de traiter les transferts de l'énergie électrique sur des grandes portées. Par la gestion adéquate de ces équilibres, la qualité de l'énergie électrique est ainsi traitée en son amont. La stabilité du plan de tension plus en aval est tributaire de la stabilité de celui plus en amont. Dans ce travail, on présente l'étude d'une liaison très haute tension, pour laquelle on cherche à évaluer certaines caractéristiques descriptives de sa performance.

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits de puissance soient inférieurs aux capacités de transport du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, dont le niveau de tension: la tension électrique doit rester dans une plage autorisée en tout point du réseau, dans toutes les situations de production et de consommation prévisibles. En effet, la tension peut localement être dégradée, par exemple les jours de forte consommation, dans ce cas, les transits à travers les lignes du réseau sont importants, ce qui provoque une chute de tension dans ces lignes.[3]

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux consommateurs par l'intermédiaire des tensions qu'il maintient à leurs bornes. Il est évident que la qualité et la continuité de la tension est devenue un sujet stratégique pour plusieurs raisons concernent l'exploitation des réseaux électriques.[4]

1.2. Caractéristiques essentielles

La diversité des caractéristiques et des propriétés de fonctionnement des systèmes électriques (SE) ; par exemple, la variation aléatoire des graphiques de charge, les diverses natures des récepteurs, la présence des réactions inverses internes, les différents régimes...

font que les paramètres se trouvent dans un état de variation quasi continue ; ce qui engendre, en l'absence des moyens de contrôle et de correction, des dégradations non admissibles de la QEE. Il est incessamment important de constater également que le SE, qui est un support physique de transport de l'énergie, est constitué par une multitude d'éléments de différentes caractéristiques électromagnétiques. Ainsi, pendant le transport de l'EE, les flux de circulation évoluent à travers des « jonctions » entre milieux différents et posent, de ce fait, dans la hiérarchie structurelle et fonctionnelle du SE, un problème incontournable de compatibilité électromagnétique. Ces considérations permettent, ainsi, de saisir le sens et la signification du concept de la QEE et d'entrevoir les orientations de ses applications.

La tension possède quatre caractéristiques principales : fréquence, amplitude, forme d'onde et symétrie. Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre moyen de 5 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite, plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension : [3]

- Les creux de tension et coupures brèves.
- Les variations rapides de tension (flicker).
- Les surtensions temporaires ou transitoires.

Les deux premières catégories posent les problèmes les plus fréquents (plus grande difficulté de s'en protéger).[5]

1.2.1. Amplitude

L'amplitude est la valeur maximale du courant ou de la tension. Elle est représentée par l'un des deux pics de l'onde de base. Ce niveau de tension est également appelé tension de crête, et peut être positif ou négatif. Le positif et le négatif se réfèrent uniquement au sens de circulation du courant.

1.2.2. 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, par une perte de grandes charges, par diverses perturbations fortes dans le système, tel que les courts-circuits, par exemple.

1.2.3. Forme d'onde

Les réseaux électriques sont conçus pour fonctionner sous une de forme d'onde sinusoïdale. Mais la réalité de la construction des systèmes et, surtout, la présence des éléments à caractéristiques non linéaires dans les réseaux électriques, impliquent la pollution de l'onde par des harmoniques supérieurs. L'onde est ainsi déformée et nécessite un filtrage pour la conformer à la norme.

1.2.4. Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelée asymétrie.[6]

1.3. Dégradation de la qualité de la tension

Les perturbations dégradant la qualité de la tension peuvent résulter de :

- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients : court-circuit dans un poste, dans une ligne aérienne, dans un câble souterrain, etc., ces défauts peuvent résulter de causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...), matérielles (vieillessement d'isolants...) ou humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...);[7]
- Installations perturbatrices : fours à arc, soudeuses, variateurs de vitesse et toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....
- Les principaux phénomènes affectant la qualité de la tension sont brièvement décrits ci-après.

1.3.1. Variation ou fluctuation de la fréquence

Les fluctuations de fréquence sont observées le plus souvent sur des réseaux non interconnectés ou des réseaux sur groupe électrogène. Dans des conditions normales d'exploitation, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale doit être comprise dans l'intervalle $50 \text{ Hz} \pm 0,2\%$. [8]

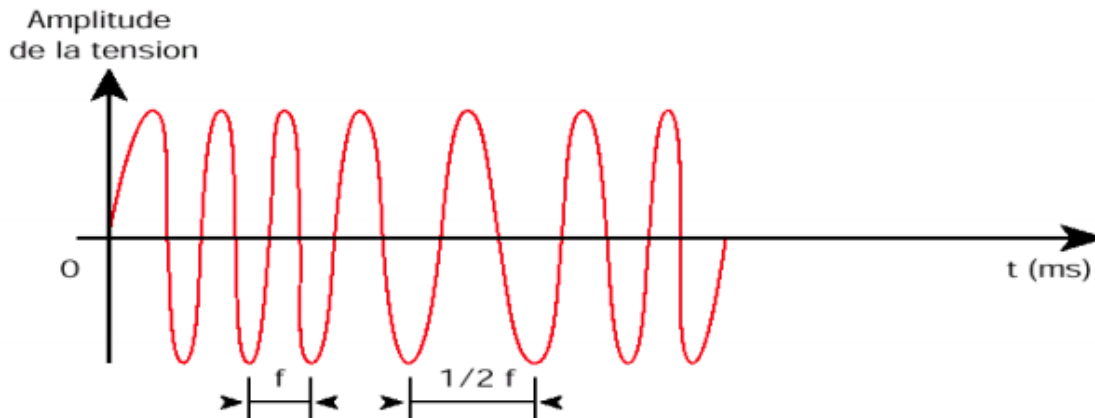


Figure 1.1 Exemple de fluctuation de la fréquence.

1.3.2. Variation lente de la tension

La valeur efficace de la tension varie continuellement en raison de la variation du graphique des charges. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière que l'enveloppe des variations reste dans l'intervalle des limites contractuelles. On parle de "variations lentes" bien qu'il s'agisse en réalité d'une succession de variations rapides dont les amplitudes sont très petites. Les appareils usuels peuvent supporter, sans inconvénient des variations lentes de la tension dans une plage de $\pm 10\%$ de la tension nominale.[9]

1.3.3. Fluctuation ou Variation rapides de Tension (flicker)

Dans les installations où il y a des variations rapides de puissance absorbée ou produite ou des générateurs d'air conditionné, ..., on observe des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires.[10]

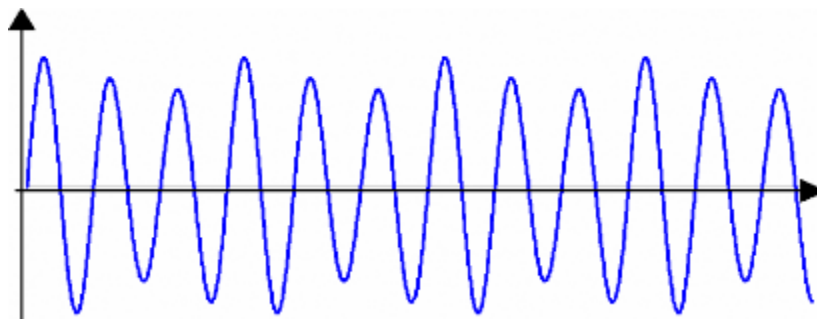


Figure 1.2 Exemple de Fluctuation de tension.

Conséquence : Ces fluctuations de tension peuvent provoquer un papillotement (flicker), gênant pour la clientèle, même si les variations individuelles ne dépassent pas des dixièmes de

pour-cent. Les autres applications de l'électricité ne sont normalement pas affectées par ces phénomènes, tant que l'amplitude des variations reste inférieure à quelque 10% .[11]

1.3.4. Creux de tension et coupure brève

Par définition, un creux de tension est une chute de tension de 10% à 90% de la valeur nominale pour une durée de 10 ms jusqu'à 1 minute. Une coupure brève représente une chute de tension supérieure à 90% de la valeur nominale et d'une durée de 10 ms à 1 minute.[12]

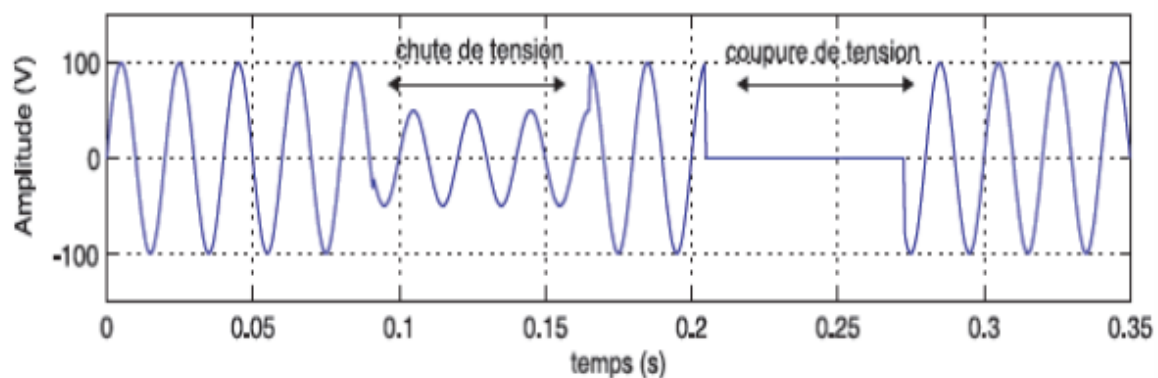


Figure 1.3 Creux et coupure de tension.

Origines : Il y a deux types de phénomène à l'origine des creux de tension ;

- Ceux provenant du fonctionnement d'appareils à charge fluctuante ou de la mise en service d'appareils appelant un courant élevé au démarrage (moteurs, transformateurs....etc.),
- Ceux liés aux phénomènes aléatoires, comme la foudre ou tous les courts-circuits sur les réseaux de distribution, ou les réseaux internes des clients (défaut d'isolation, blessure de câble, projection de branches sur les lignes aériennes). Les creux de tension sont caractérisés par leur profondeur et par leur durée. Ils sont monophasés, biphasés ou triphasés suivant le nombre de phases concernées.

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.[13]

1.4. Indices de la qualité de la tension

1.4.1. Déséquilibre de tension

Un récepteur électrique triphasé, qui n'est pas équilibré et que l'on alimente par un réseau triphasé équilibré conduit à des déséquilibres de tension dus à la circulation de courants non équilibrés dans les impédances du réseau (figure I.). Ceci est fréquent pour les récepteurs monophasés basses tensions. Mais cela peut également être engendré, à des tensions plus élevées, par des machines à souder, des fours à arc ou par la traction ferroviaire. Un système triphasé est déséquilibré lorsque les trois tensions ne sont pas égales en amplitude et/ou ne sont pas déphasées les unes des autres de 120° . [14]

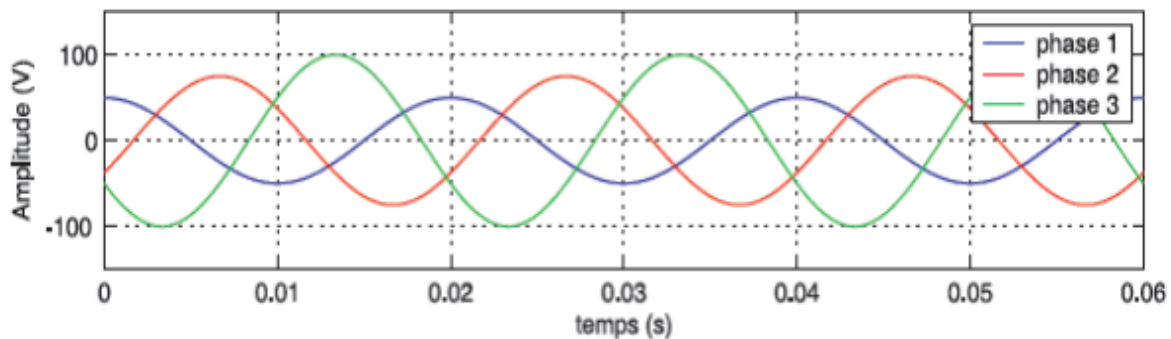


Figure 1.4 Exemple de l'asymétrie des amplitudes et des phases.

1.4.2. Les harmoniques

Dans un système d'alimentation électrique, un harmonique est une tension ou un courant à un multiple de la fréquence fondamentale du système, produit par l'action de charges non linéaires telles que des redresseurs, des éclairages à décharge ou des dispositifs magnétiques saturés. Les fréquences harmoniques dans le réseau électrique sont une cause fréquente de problèmes de qualité de l'énergie. Les harmoniques dans les réseaux électriques entraînent un échauffement accru des équipements et des conducteurs, des ratés d'allumage dans les variateurs de vitesse et des pulsations de couple dans les moteurs.

1.4.3. Les surtensions

Les surtensions les plus fortes, mais heureusement peu fréquentes, sont dues généralement aux conditions atmosphériques (Foudre). Leur amplitude peut atteindre plusieurs KV dans les réseaux aériens BT. Elles peuvent se propager même dans les réseaux

BT souterrains. Les surtensions transitoires se produisent aussi dans les installations des utilisateurs (clients) lors du déclenchement d'appareils BT. Leur contenu énergétique est moindre que pour les surtensions de foudre, mais leur amplitude peut dépasser 1 KV en BT, [14]ce qui présente un danger pour les circuits électroniques.

Conséquences : Les surtensions transitoires peuvent provoquer des dégâts importants, dysfonctionnement des appareils sensibles, cette sensibilité a augmenté avec le développement de l'électronique de contrôle, commande et de puissance. La norme fixe les niveaux requis de surtensions selon le schéma de liaison à la terre de l'installation :

- réseaux à neutre à la terre (raccordé directement ou avec une impédance) : la surtension ne devra pas dépasser $1,7 U_n$;
- réseaux à neutre isolé ou résonant : la surtension ne devra pas dépasser $2 U_n$.

1.5. Caractérisation de la qualité de l'énergie électrique

L'évaluation de la QEE (qualité d'énergie électrique) est fondée sur les paramètres « fréquence et tension »

1.5.1. Fréquence

On distingue :

- **Ecart.** Par cet indice, on évalue les envergures de la variation lente de la fréquence par rapport à sa valeur nominale (*Figure.1.5.a*). Cet écart ne doit pas dépasser une valeur admissible déterminée ;

$$\Delta f \leq \Delta f_{ad} = \pm 0,2 \%$$

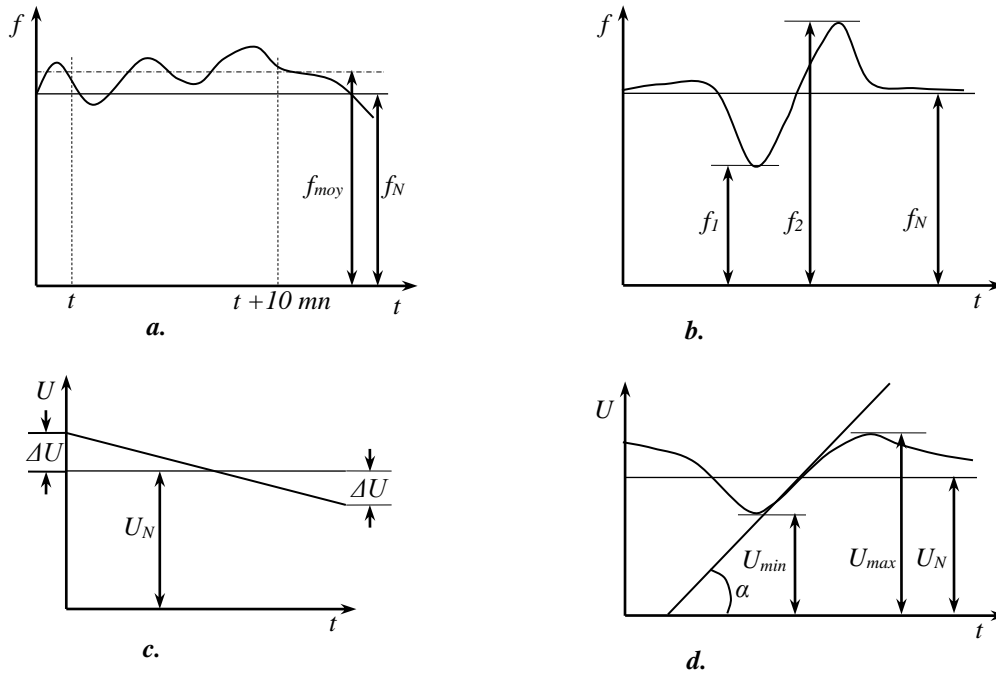


Figure 1.5. Définition des indices de la QEE.

L'écart de la fréquence est défini comme suit,

$$\Delta f = \frac{1}{10} \int_t^{t+10} (f(t) - f_N) dt = f_{moy} - f_N \ll \pm 0,1 \text{ Hz} = \Delta f_{ad}.$$

- **Oscillation.** Cet indice permet d'évaluer l'envergure de la variation de la fréquence par rapport à sa valeur nominale en cas de perturbations fortes qui se traduisent par des variations rapides de f (**Fig.1.5.b**). La valeur de cet indice ne doit pas dépasser celle normalisée ;

$$\Delta f_{osc.} = f_2 - f_1 \ll \Delta f_{ad} = \pm 0,2 \text{ Hz}; (\pm 0,4 \%).$$

La présence de la variation rapide est indiquée par,

$$\frac{df}{dt} \geq 0,2 \frac{\text{Hz}}{\text{s}}.$$

1.5.2.Tension

- **Ecart.** Indice qui mesure l'écart de la tension efficace à un instant donné par rapport à sa valeur nominale suite à des perturbations faibles (**Figure.1.5.c**) ;

$$\Delta U = \frac{U_i - U_N}{U_N} 100\%.$$

La variation de la tension peut entraîner des dégradations importantes de la QEE.
Par exemple ;

- $\Delta U = -5\%$ implique une diminution du flux d'éclairage de $\Delta \Phi = -18\%$,
- $\Delta U = -10\%$ entraîne $\Delta \Phi = -30\%$,
- $\Delta U = +10\%$ entraîne $\Delta \Phi = +30\%$, en même temps que la diminution considérablement de la durabilité du récepteur,
- Si U diminue, elle entraîne la diminution du couple moteur ($C \equiv U^2$) ; ce qui provoque un freinage, un non démarrage...
- L'augmentation de U réduit la durabilité des équipements, augmente l'aimantation donc de Q , augmente le risque de claquage de l'isolation...

Pour atteindre et maintenir une QEE admissible, on doit faire fonctionner les équipements électriques conformément à des normes déterminées.

On en cite [15] ;

- Eclairage $\Delta U_{ad} = (-2,5 \div 5)\%$,
 - Moteur asynchrone $\Delta U_{ad} = (-5 \div 10)\%$,
 - Autres consommateurs $\Delta U_{ad} = (-5 \div 5)\%$,
 - Disjoncteurs, sectionnaires, barres... $\Delta U_{ad} = 20\%$ à $U_N = 20 \text{ kV}$,
 $\Delta U_{ad} = 15\%$, à $U_N = (35 \div 220) \text{ kV}$,
 $\Delta U_{ad} = 10\%$, à $U_N = 330 \text{ kV}$,
 $\Delta U_{ad} = 5\%$, à $U_N > 330 \text{ kV}$.
- **Oscillation.** Cet indice mesure la variation de la tension efficace dans le cas des perturbations rapides (**Figure.1.5.d**) ;

$$\frac{dU}{dt} = \text{tg} \alpha > 1 \frac{\%}{\text{s}} = V_{t.ad}.$$

L'indice oscillation est défini comme,

$$V_t = \frac{U_{min} - U_{max}}{U_N} 100\%.$$

et doit être maintenu tel que $V_t \leq V_{t.ad}$.

L'oscillation est caractérisée par l'envergure V_t de variation de la tension efficace, de la fréquence (F_{osc}) de leur apparition et de l'intervalle de temps entre deux oscillations successives Δt_{kj} .

Les oscillations de la tension efficace sont évaluées sur un intervalle de temps T déterminé ; si « m » représente le nombre de leur apparition sur T , leur fréquence moyenne est alors calculée comme,

$$F_{osc} = \frac{m}{T}$$

Il est convenu, en même temps, que durant un intervalle de temps représentant 40 ms on ne comptabilise qu'une seule oscillation quelque soit leur nombre. La présence d'une oscillation est indiquée par la vitesse de variation ($\text{tg}\alpha$). On donne, sur la **figure 1.6**, un aperçu graphique sur une apparition successive d'oscillations. Le calcul de l'envergure de la tension efficace et de la fréquence de son apparition permet de déduire, à partir d'abaques standardisées, la valeur admissible requise.

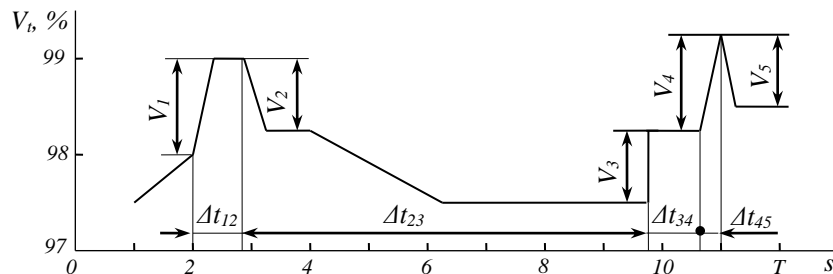


Figure 1.6. Exemple d'oscillations :Cinq oscillations sur un intervalle T de 12 s.

- **Asymétrie.** Dans les systèmes électriques, l'asymétrie admissible est définie par son coefficient comme suit,

$$k_{asy} = \frac{U_2}{U_{N(S)}} 100\% = \frac{100}{\sqrt{3}U_N} (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) \leq k_{asy.ad} = 5 \%$$

où,

$$U_2 = \frac{1}{3} (\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C)$$

représente la composante symétrique inverse de la tension. Cette grandeur est déterminée à partir de l'analyse des régimes asymétriques des systèmes électriques.

- **Pollution harmonique.** L'apparition des harmoniques supérieurs est due à la présence dans les réseaux électriques d'éléments non linéaires tel que, essentiellement, les convertisseurs statiques, les fours électriques à arc et autres éléments à caractéristiques Voltampères non linéaires. L'analyse des régimes non sinusoïdaux permet de définir les taux de défiguration des courbes instantanées de la tension et du courant, lesquels permettront ensuite de les soumettre, par voie corrective (filtrage), aux conditions d'admissibilité requises. On définit le taux de pollution comme,

$$k_{N.S} = \frac{\sqrt{\sum_3^{\infty} U_n^2}}{U_1} 100\% = \leq k_{N.S.ad} = 5 \%$$

où, U_1 – Composante fondamentale de la tension ; n – Ordre de l'harmonique.

1.6. Ligne de grande longueur.

La ligne est un élément à paramètres réparties le long de sa longueur. A la différence des autres éléments, l'impact de la répartition des paramètres, impliqué pendant le processus de transport, peut-être plus ou moins important selon que la ligne est plus ou moins longue. En règle générale, on distingue les lignes de petite longueur ($L < 250 \div 300$ km), et les lignes de grande longueur ($L \geq 250 \div 300$ km). Dans les lignes courtes, les effets dus à la répartition des paramètres sont négligeables. Au-delà de ces longueurs, ces effets deviennent progressivement plus importants, [17].

Les lignes de grandes longueurs sont caractérisées par ;

- La présence de pertes active et réactive considérables,
- Le problème d'isolation et pertes par effet couronne,
- La limite de la capacité de transport,
- Une compensation pour le contrôle de la tension qui nécessite de grandes quantités de la puissance réactive.

Les lignes de grandes longueurs sont utilisées pour les interconnexions entre systèmes électriques. Elles permettent ;

- une bonne conduite de service,
- une bonne distribution de charge,
- une bonne réserve de stabilité de réseaux.

Le transport d'énergie électrique s'effectue par la propagation des ondes électromagnétiques qui se rapportent aux ondes spatio-temporelles de la tension et du courant. En fait, l'énergie électrique véhiculée est la superposition d'onde incidente et d'onde réfléchi. Le processus d'incidence et de réflexion est déterminé par le rapport entre les impédances, respectivement de la charge et de celle caractéristique d'onde de la ligne.

1.6.1. Équations fondamentales des lignes

Le modèle mathématique d'une ligne peut être défini à partir de la mise en équation d'un élément différentiel de sa longueur soumis à un régime donné (Figure.1.7) [16],

Pour l'élément différentiel dx considéré, on écrit

$$\begin{aligned}\dot{U} - (\dot{U} + d\dot{I}) &= \dot{I}Z_0 dx \\ \dot{I} - (\dot{I} + d\dot{I}) &= (\dot{U} + dU) \cdot \dot{Y}_0 dx = U \cdot Y_0 dx + Y_0 du \cdot dx\end{aligned}$$

Pour des raisons objectives de simplicité des traitements analytiques des régimes, le produit $du \cdot dx$ est généralement négligé pour raison d'insignifiance.

On peut donc réécrire

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{U}(x)}{dx} &= -\dot{I}(x) \cdot Z_0 \\ \frac{d\dot{I}(x)}{dx} &= -\dot{U}(x) \cdot Y_0\end{aligned}\quad (1.1)$$

Où, Z_0, Y_0 - Respectivement impédance et admittance linéiques ; $x = 0 \div L$ - Coordonnée de l'élément dx comptée à partir du nœud 1 (entrée de la ligne) ; $\dot{U}(x), \dot{I}(x)$ - Respectivement, tension et courant à la distance « x », sous forme complexe.

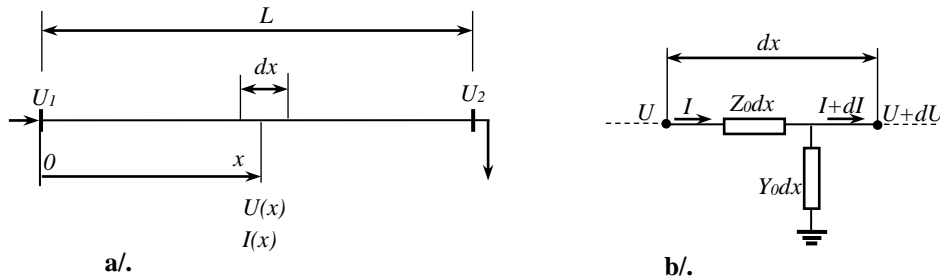


Figure 1.7 Déduction des modèles mathématiques de la ligne. a- Schéma de principe, b- Schéma équivalent de l'élément « dx » de la longueur.

Ces expressions peuvent être mises sous forme,

$$\begin{aligned}\frac{d\dot{U}^2}{dx^2} &= Z_0 \cdot Y_0 \\ \dot{I} &= \frac{1}{Z_0} \cdot \frac{d\dot{U}}{dx}\end{aligned}\quad (1.2)$$

Les systèmes d'équations (1.1) et (1.2), ainsi que la solution de leurs équations, sont très connus et largement consommés dans divers traitements. On ne reporte, ici, que les formes finales utiles par l'analyse.

Les solutions donnent donc,

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_1 ch\gamma_0 x - \sqrt{3} \dot{I}_1 Z_c sh\gamma_0 x \\ \dot{I}(x) &= -\frac{\dot{U}_1}{\sqrt{3} Z_c} Sh\gamma_0 x + \dot{I}_1 ch\gamma_0 x \end{aligned} \quad (1.3)$$

où, γ_0 - Facteur d'onde de la tension $U(x)$ et du courant $I(x)$; β_0 , α_0 - Facteurs, respectivement, d'amortissement et de phase de l'onde; Z_c - Impédance caractéristique de l'onde.

Les expressions sont écrites pour les grandeurs composées et pour des conditions initiales concernant le nœud '1' d'entrée de la ligne, conformément à la figure.1.7.a; avec,

$$\begin{aligned} \gamma_0 &= \sqrt{Y_0 \cdot Z_0} = \beta_0 + j\alpha_0 \\ Z_c &= \sqrt{\frac{Z_0}{Y_0}} = r_c + jx_c \end{aligned} \quad (1.4)$$

et

$$\begin{aligned} Z_0 &= r_0 + jx_0 \\ Y_0 &= g_0 + jb_0 \end{aligned} \quad (1.5)$$

Les équations (1.3) peuvent également être écrites conformément aux conditions initiales imposées au nœud "2" de sortie de la ligne moyennant un changement de variable, (Figure.1.8)

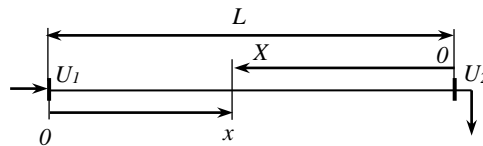


Figure 1.8. Conditions initiales exigées par le consommateur

$$X = L - x$$

On obtient donc sous forme générale,

$$\begin{aligned} \dot{U}(x) &= \dot{U}_2 ch\gamma_0 x + \sqrt{3} \dot{I}_2 Z_c sh\gamma_0 x \\ \dot{I}(x) &= \frac{\dot{U}_2}{\sqrt{3} Z_c} Sh\gamma_0 x + \dot{I}_2 ch\gamma_0 x \end{aligned} \quad (1.6)$$

où, X - coordonnée à partir du nœud "2" de sortie.

Les expressions (1.3) et (1.6) représentent le modèle mathématique de base d'une ligne et porte un caractère général.

1.7. Instabilité de la tension

On définit la stabilité de la tension comme la capacité de maintenir une tension de barre constamment acceptable à chaque nœud du réseau, dans des conditions normales de fonctionnement, après avoir subi une perturbation [18] [19]. L'état du réseau est dit instable en tension lorsqu'une perturbation, un accroissement de la charge ou une modification de la condition du réseau entraîne une chute de tension progressive et incontrôlable de la tension, aboutissant en un effondrement généralisé de la tension.

1.7.1. Causes de l'instabilité de la tension

Le phénomène de l'instabilité de la tension est attribuable à l'exploitation du réseau à sa limite de puissance transmissible maximale, à l'insuffisance de dispositifs de compensation de la puissance réactive. Les principaux facteurs qui contribuent à un effondrement de la tension sont la limite de puissance réactive des génératrices, les limites de réglage de la tension, les caractéristiques de la charge ainsi que les caractéristiques et les actions des dispositifs de compensation de la puissance réactive. [18] [19] [20]

1.7.2. Facteurs d'influence reliés à la stabilité de la tension

L'instabilité de la tension d'un grand réseau est un problème de nature complexe. Plusieurs éléments d'un réseau contribuent à la création d'un scénario propice à une instabilité de tension. Les éléments suivants ont un impact important sur la stabilité de la tension du réseau [18] :

- Les génératrices et le comportement de leurs dispositifs de réglages et de protection.
- Les dispositifs à compensation shunt réglable et fixe.
- Les caractéristiques de la charge.

Parmi ces éléments qui influent sur la stabilité de la tension, on retrouve les lignes de transport d'énergie [20]. Les lignes de transport affectent considérablement les niveaux de tension en fonction de la charge. Si la charge est importante, la tension sur le réseau a

tendance à être faible, par contre si la charge est faible, le niveau de tension peut en différents endroits sur le réseau, s'élever au-dessus de la tension nominale. Sur les lignes de transport non compensées, le taux de régulation de tension a donc tendance à être mauvais.

La stabilité en régime permanent est aussi influencée par la longueur des lignes de transport: plus la ligne est longue plus la limite de stabilité en régime permanent est faible. Ces deux effets néfastes des longues lignes de transport, sur le taux de régulation de la tension et sur la stabilité du réseau, peuvent être diminués ou même théoriquement éliminés en utilisant des techniques de réglage de la tension incluant des mesures comme la commutation par compensation shunt et le réglage de la tension des génératrices.

Chapitre2

*Réglage de la tension et contrôle
de la puissance réactive*

2.1. Introduction

Actuellement les limites des réseaux de transport de l'électricité peuvent être repoussées par l'ajout de nouvelle capacité de transport. Cependant les exploitants des réseaux cherchent des moyens pour utiliser plus efficacement les lignes de transport existantes.

On doit atteindre;

- L'amélioration des régimes permanents des lignes de grandes longueurs pour autoriser des flux d'énergie plus importants, augmentant ainsi leur capacité de transport,
- L'amélioration, dans les réseaux fortement maillés, des flux d'énergie appelés par les charges par des distributions plus adéquates,
- Le contrôle d'un plan de tension requis pour maintenir les régimes dans leur état optimal.

En installant, dans les réseaux maillés, des possibilités de contrôle de l'impédance de ligne, on peut atteindre des flux d'énergie requis très améliorants [16].

Pour le modèle de ligne représenté ci-dessous et alimentant une charge résistive (Figure. 2.1).

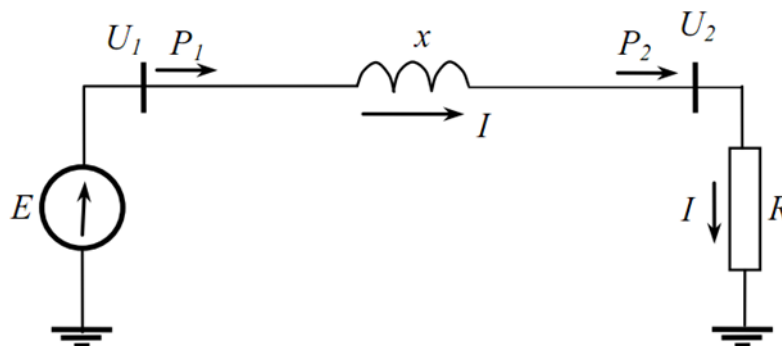


Figure 2.1. Modèle d'une ligne à charge résistive.

On peut écrire

$$P_2 = U_2 I = P_1 \quad (2.1)$$

$$I = \frac{U_1}{x} \sin \delta \quad (2.2)$$

$$P_1 = P_2 = \frac{U_1 U_2}{x} \sin \delta \quad (2.3)$$

où, U_1 – Tension à l'entrée de la ligne ; U_2 – Tension à la sortie de la ligne ; x – Réactance de liaison ; δ – Déphasage entre les deux tensions.

- Le réglage du plan de tension est assuré par des compensateurs de puissance réactive placés en différents points du réseau. Ce sont des compensateurs parallèles.
- Le contrôle de l'angle de transport se fait par des transformateurs déphaseurs qui maintiennent l'angle de transport dans la plage de stabilité.
- Le contrôle de l'impédance de ligne est effectué par des compensateur série.

2.2. Méthodes et moyens de réglage de la tension

Le réglage de la tension consiste à maintenir un niveau de tension acceptable aux niveaux de tous les jeux de barres du réseau. Le niveau de tension à un jeu de barres donné dépend de la tension de source qui l'alimente, de la réactance de ligne qui le sépare de cette source et des puissances active et réactive à son niveau. Ainsi, si la tension au jeu de barres en question n'est pas dans une limite acceptable, des modifications sur un ou plusieurs de ces paramètres sont alors nécessaires [22].

2.2.1. Réglage directe

Il consiste à agir directement sur la tension elle-même. Dans cette catégorie, le réglage de la tension de charge U est réalisé soit par la modification de la tension U elle-même, soit par la modification de la tension de source E . Parmi les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie, il y a :

- La correction du niveau de la tension U , qui fait appel à un autotransformateur aux niveaux des postes de distribution ;
- La correction du niveau de la tension E , soit par autotransformateur s'il s'agit d'une tension à la sortie d'un poste source, soit par modification de l'excitation s'il s'agit de la tension à la sortie d'un alternateur [22].

2.2.2. Réglage indirecte

Dans cette catégorie on trouve un ensemble de solutions pour modifier la chute de tension en modifiant les caractéristiques des charges ou du réseau. Principalement, ces

solutions consistent à utiliser des compensateurs pour modifier l'écoulement de puissance réactive. La puissance réactive est en grande partie responsable des chutes de tension. Ainsi, la compensation d'une partie de la puissance réactive demandée par la charge permet de réduire ces chutes de tensions. Les compensateurs de puissance réactive peuvent être statique comme les batteries de condensateurs, les FACTs (Flexible Alternating Current Transmission systems), et parfois même des inductances. Le moteur synchrone peut être utilisé comme compensateur dynamique de puissance réactive. En effet, ce type de moteur produit de la puissance réactive quand il est surexcité et en consomme lorsqu'il est sous-excité [22].

Les solutions qu'on peut trouver dans cette catégorie de réglage peuvent être ;

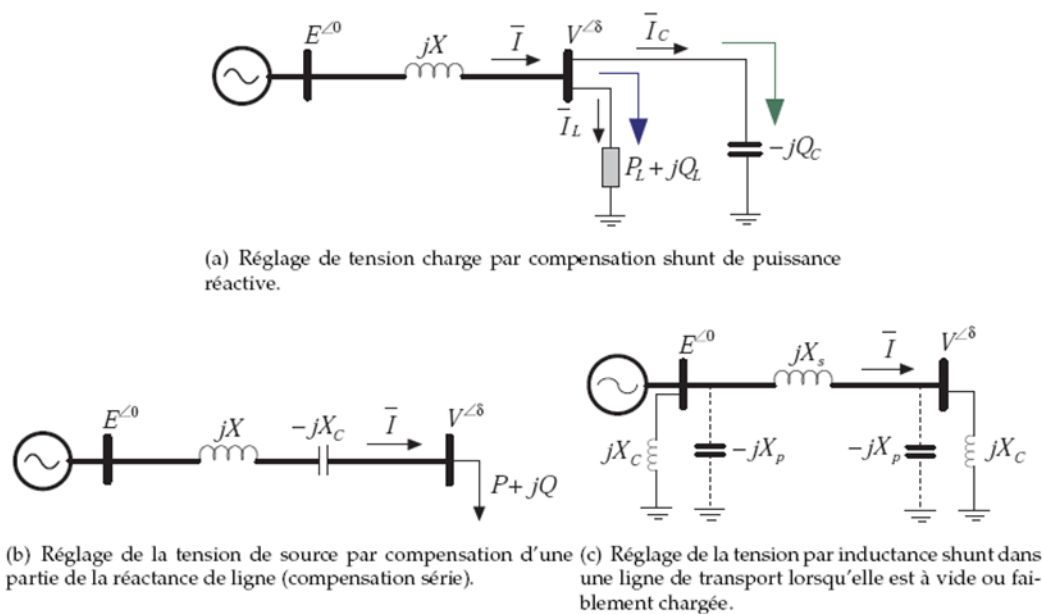


Figure.2.2. Réglage indirecte de la tension par compensation en utilisant des condensateurs ou des inductances.

2.2.2.1. Réglage shunt

Le réglage shunt consiste à installer en parallèle au jeu de barres de la charge un compensateur de puissance réactive (condensateur ou dispositif FACTs). La Figure. 2.2(a) montre le modèle de cette compensation. Par cette méthode, on améliore le plan de tension, et la capacité de transport, on diminue les pertes ...[22].

2.2.2.2. Réglage série

Le réglage série consiste à régler par modification de l'excitation du générateur, soit par la compensation d'une partie de la réactance de la ligne. La Figure. 2.2(b) montre le modèle correspondant. Les effets qu'on peut escompter sont :

- L'augmentation de la tension de source E fait augmenter les limites de transfert de puissances pratique et théorique. L'effet est semblable au cas de la compensation shunt mais, ici, les limites sont poussées d'avantage,
- L'augmentation de la tension de charge par un autotransformateur repousse la limite de transfert pratique de puissance mais pas la limite théorique ;
- La compensation d'une partie de la réactance de ligne repousse la limite de transfert théorique de puissance mais cette nouvelle limite reste inférieure à celle obtenue avec l'augmentation de la tension de source E [22].

2.3. Réglage de la tension par compensation de puissance réactive

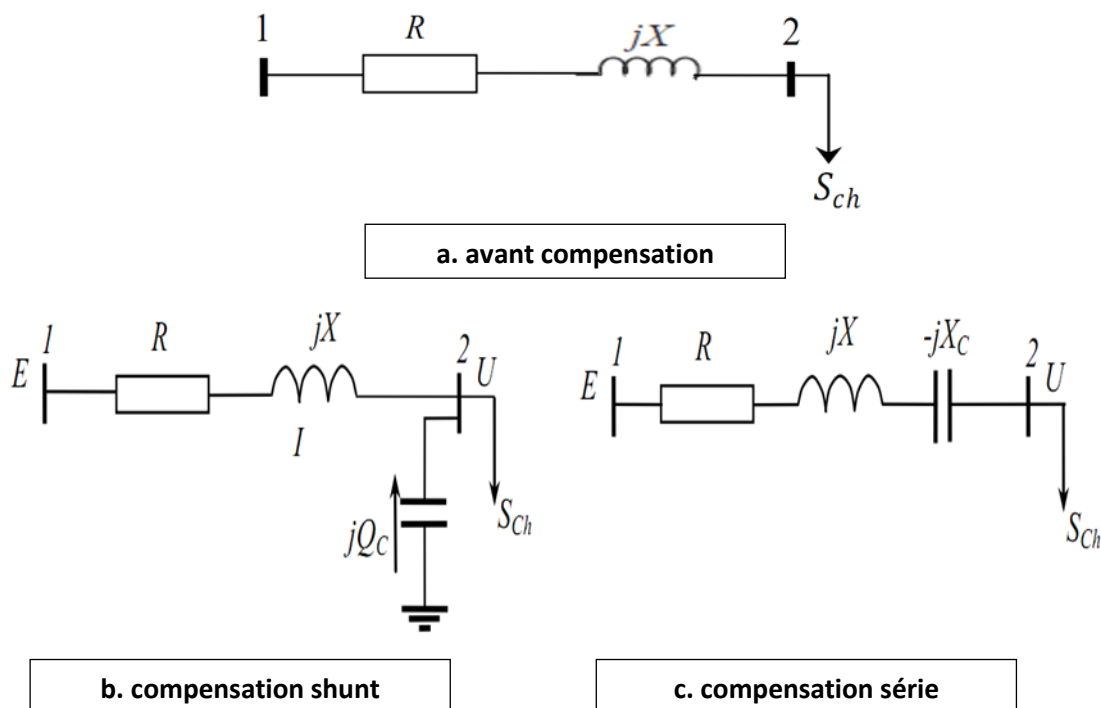


Figure.2.3. Réglage de la tension par compensateur.

La puissance de la charge (consommateur) est donnée par :

$$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} \quad (2.4)$$

Pour le contrôle de la tension du nœud de charge, on introduit le compensateur ; soit, en règle générale, de puissance ;

$$S_c = 0 \pm jQ_{C.L} \quad (2.5)$$

où, le signe (-) correspond à une éventuelle absorption et le signe (+) à une éventuelle injection selon le caractère du nœud de charge.

Pour la ligne donnée sous compensation ;

$$U = E - \Delta U = E - \frac{P_{chR} + (Q_{ch} \pm Q_C)X}{U} - j \frac{P_{chX} + (Q_{ch} \pm Q_C)R}{U} \quad (2.6)$$

Mais comme $R \approx 0$, on réécrit,

$$U = E - \frac{(Q_{ch} \pm Q_{C.L})X}{U} - j \frac{P_{chX}}{U}, \quad (2.7)$$

On écrit, ainsi, en module ;

$$U^2 = \left(E - \frac{(Q_{ch} \pm Q_{C.L})X}{U} \right)^2 + \left(\frac{P_{chX}}{U} \right)^2 \quad (2.8)$$

On obtient, ainsi, la relation,

$$U = f(E; Q_C; X);$$

Laquelle relation dévoile les paramètres de contrôle de la tension du nœud ; E, $Q_{C.L}$, X.

Le réglage de U s'effectue donc par celui de E à travers l'excitation (ou autotransformateur), ou par le contrôle de la chute de tension à travers celui de X (compensation série) et ou celui de $(Q_{ch} \pm Q_{C.L})$ par une compensation transversale (shunt $Q_{C.L}$).

2.3. Moyens de compensation de la puissance réactive

2.3.1. Compensateurs synchrones

Il s'agit d'un moteur synchrone tournant à vide, sans aucune charge utile. Il fournit ou consomme alors de la puissance réactive vis-à-vis du réseau ; il se comporte comme une charge capacitive (inductive), sans que les effets secondaires des bancs de condensateurs pour courant alternatif entrent en jeu.

En effet, il faut savoir que la plupart des moteurs dans une installation industrielle classique sont des moteurs asynchrones, eux-mêmes consommateurs de puissance réactive. Pour ne pas dégrader le facteur de puissance ($\cos \varphi$) de l'installation électrique, on place alors le compensateur synchrone, qui comme dit précédemment, n'est rien d'autre qu'un moteur synchrone (en régime à vide) qu'on surexcite (capacitif) ou qu'on sous excite (inductif).

L'avantage de ces compensateurs synchrones sur les bancs de condensateurs est que l'on peut faire varier la puissance réactive produite en jouant sur l'excitation du moteur. La régulation peut se faire sur une consigne de tension de l'installation ou de facteur de puissance.

Cette technologie est de moins en moins utilisée, actuellement, et est remplacée par celle des compensateurs statiques [22].

2.3.2. Condensateurs

Le condensateur est le moyen le plus conventionnel pour la compensation de la puissance réactive. La puissance réactive fournie par le condensateur est directement proportionnelle au carré de la tension à ces bornes. Ainsi, s'il est connecté en parallèle (shunt) comme le montre la Figure. 2.2(a), la tension à ces bornes augmente, ce qui permettra d'augmenter la puissance qu'il injecte au jeu de barres où il est connecté.

Par ailleurs, lorsqu'il est mis en série (Figure. 2.2(b)), il permet aussi de compenser une partie de la puissance réactive absorbée par la réactance de la ligne, c'est pourquoi, on parle plutôt de la compensation de la réactance de ligne. En pratique, on utilise des batteries de condensateurs pour pouvoir varier la puissance réactive en cas de besoin. Le condensateur est un moyen simple mais, il n'est pas bien adapté aux variations de charge [22].

2.3.3. Inductances

L'utilisation d'inductance pour le réglage de la tension trouve sa place dans les lignes de transport longues. Lorsque la ligne est ouverte ou faiblement chargée, sa tension augmente à cause des capacités naturelles de ligne qui génèrent trop de la puissance réactive. Ainsi, pour absorber cet excès de puissance réactive, on installe des inductances shunts à l'entrée et la sortie de la ligne [22].

2.3.4. Compensateurs FACTS

Les dispositifs FACTS sont des compensateurs modernes qui offrent la possibilité d'un réglage automatique de la tension. Parmi les compensateurs FACTS qui offrent cette possibilité, on trouve des compensateurs shunt comme le SVC, ou Static Var Compensator, le STATCOM, Static Compensator, et des compensateurs séries comme le TCSC (Thyristor controlled series compensator) ou le DVR, Dynamic Voltage Restorer. Néanmoins, la fonction de ce dernier est un peu différente, puisqu'il sert corriger les creux de tension et à rétablir la tension suite à une coupure brève [22].

2.4. Caractéristiques des systèmes de compensation

2.4.1. Dispositif de compensation dynamique shunt

Les condensateurs de puissance sont les plus souvent installés en dérivation sur le réseau. Pratiquement, ils sont connectés aux bornes du réseau suivant un couplage étoile ou triangle. Les condensateurs fournissent à la pulsation ω une puissance Q_C , la dimension du condensateur est déterminée par sa puissance.

Les condensateurs Shunt sont utilisés soit en basse tension ; souvent auprès des appareils d'utilisation les plus puissants, soit en moyenne tension où ils sont regroupés en batteries de quelques MVAR. En moyenne tension, les batteries sont installées par l'intermédiaire d'un disjoncteur sur les jeux de barres moyennes tensions des postes HT / MT. Ces batteries compensent les charges réactives locales et une partie des pertes réactives sur les réseaux en amont [22].

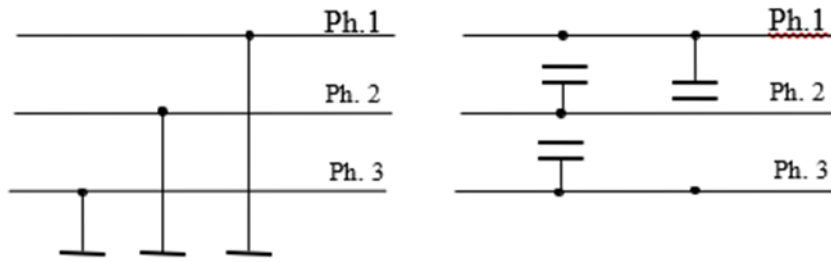


Figure.2.4. Compensation shunt

Les lignes électriques transportent des puissances actives et des puissances réactives. Afin d'éviter des pertes supplémentaires à cause de la transmission du courant réactif et pour augmenter la stabilité des réseaux interconnectés, il est nécessaire de compenser la puissance réactive au niveau des sous stations d'interconnexion. Ces dispositifs sont caractérisés par des temps de réponse très courts, contrairement aux installations à dynamique tournante.

En règle générale, ces installations sont une combinaison « d'inductance-capacité » gérées par des commutateurs électroniques, tels les thyristors... Selon le besoin et grâce aux moyens de commutation, ces installations peuvent aussi bien fournir qu'absorber l'énergie réactive. Leur structure et leur lieu d'installation dépendent des objectifs à atteindre et de la nature des régimes à traiter. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont cités dans ce qui suit.

2.4.1.1. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (SVC)

Compensateur Statique de Puissance Réactive (CSPR) (acronyme anglais de Static Var Compensator SVC) est un équipement de compensation parallèle à base d'électronique de puissance (Thyristor) capable de réagir en quelques cycles aux modifications du réseau. Il permet entre autres la connexion de charges éloignées des centres de production et la diminution des effets des défauts ou des fluctuations de charges.

Un SVC est généralement constitué d'un ou plusieurs bancs de condensateurs fixes (FC) commutables soit par disjoncteur, ou bien par thyristors (Thyristor Switched Capacitor TSC) et d'un banc de réactances contrôlable (Thyristor controlled Reactor TCR) et par des réactances commutables (Thyristor Switched Reactor TSR), et d'autre part on trouve des filtres d'harmoniques.

Le système de contrôle permet un ajustement du courant du SVC en 2-3 cycles et donc de répondre rapidement à des variations de charge.

Le SVC a un seul port avec une connexion parallèle au système de puissance. Les thyristors sont à commutation naturelle, ils commutent à la fréquence du réseau. Il existe deux types de SVC: SVCs industriels et les SVCs de transmission. Le SVC a un seul port avec une connexion parallèle au système de puissance. Les thyristors sont à commutation naturelle, ils commutent à la fréquence du réseau, Il existe deux types de SVC: SVCs industriels et les SVCs de transmission [24].

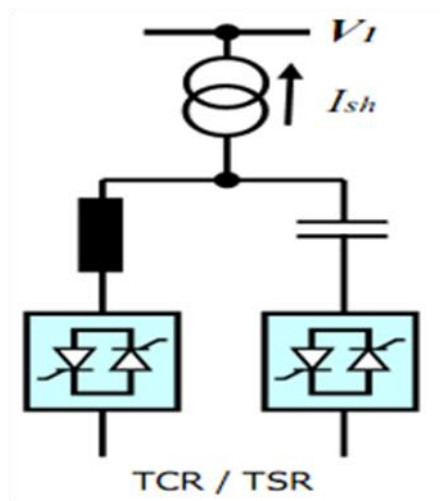


Figure. 2.5. Schéma du SVC.

2.4.1.2. Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors (STATCOM)

Le STATCOM (Static synchronous Compensator) fut le premier FACTS utilisant le VSC (onduleur à source de tension) à être introduit dans les réseaux électriques. Un STATCOM est un convertisseur statique à source de tension connecté en parallèle à un réseau alternatif en général par le biais d'un transformateur abaisseur.

La (Figure. 2.6) représente le schéma de base d'un STATCOM, où les cellules de commutation sont bidirectionnelles formées de GTO et de diodes en antiparallèle. Le rôle de STATCOM est d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau. Pour se faire, l'onduleur est couplé au réseau par l'intermédiaire d'une inductance, qui est en général l'inductance de fuite du transformateur de couplage [22].

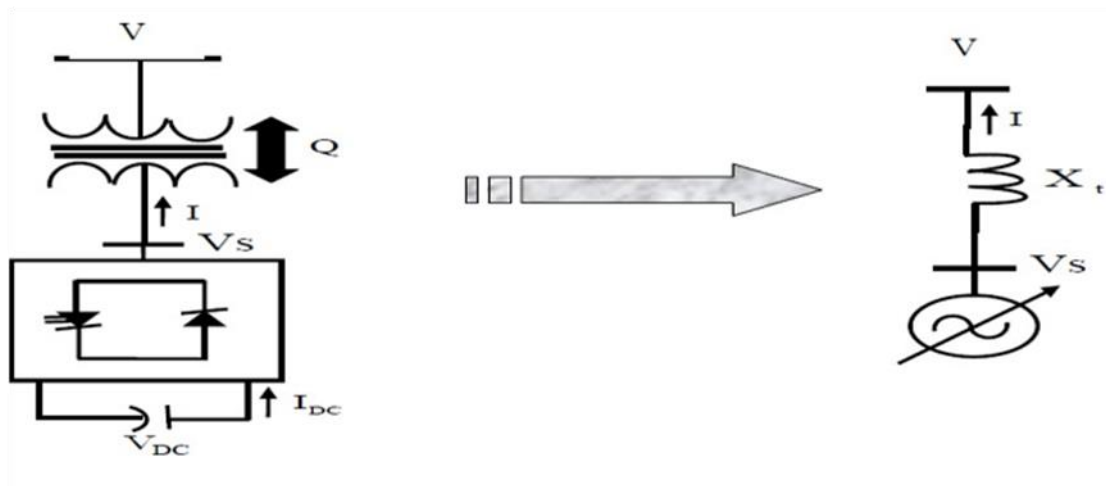


Figure.2.6. Présentation d'un compensateur STATCOM.

2.4.2. Dispositifs de compensation série

Le principe de ces compensateurs est basé sur l'insertion en série à la ligne d'une tension commandé en module et en phase. Ce qui peut influencer les chutes de tension, la stabilité de l'angle de rotation transitoire et la répartition et variation des transite d'énergie.

2.4.2.1. Compensateurs séries à base de thyristors (TCSC)

Un condensateur série commandée par thyristors TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor) est formé d'une inductance commandée par thyristors en parallèle avec un condensateur. Ce montage permet un réglage continu sur une large gamme de la réactance capacitive à la fréquence fondamentale.

Les montages peuvent varier selon les fabricants. La figure (2.7) illustre le schéma du TCSC composé de plusieurs modules identiques tous contrôlés de la même façon. En pratique, une varistance à oxyde métallique ou MOV (Metal Oxide Varistor) est insérée en parallèle afin de protéger le condensateur contre les surtensions [24].

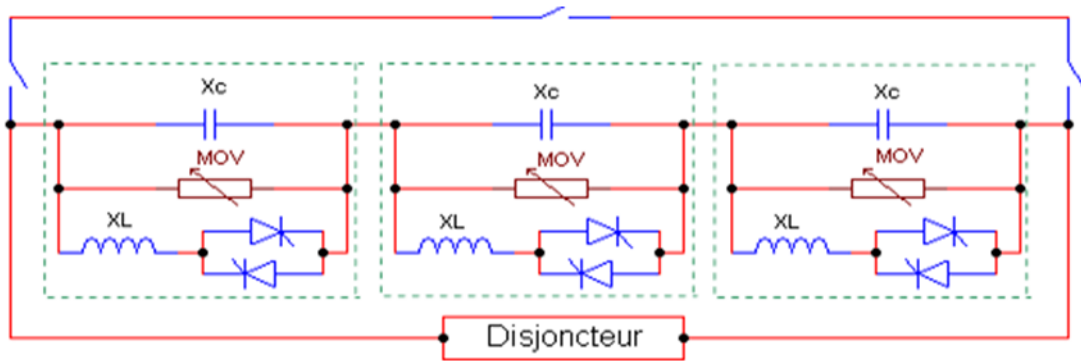


Figure 2.7. Schéma d'un TCSC composé de plusieurs modules identiques.

La valeur de l'impédance du TCSC est modifiée en contrôlant le courant circulant dans l'inductance au moyen de la valve à thyristors.

2.4.2.2. TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)

Le schéma de base d'un condensateur série commuté par thyristors TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacune étant shuntée par une valve à thyristors montée en dérivation.

Le degré de compensation est contrôlé par paliers. Une capacité série est insérée dans le circuit en bloquant les thyristors lui correspondant.

L'extinction a lieu de manière spontanée lors du passage par zéro du courant. Une fois la valve bloquée, la capacité se charge sur une demi-période puis se décharge le demi-cycle de la polarité opposée. Pour minimiser les transitoires, les thyristors sont enclenchés lorsque la tension aux bornes de la capacité est nulle [24].

2.4.2.3. TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)

Le TCSR est un compensateur inductif qui se compose d'une inductance en parallèle avec une autre inductance commandée par thyristors afin de fournir une réactance inductive série variable [23].

2.4.2.4. SSSC (Static Synchronous Series Compensator)

Ce dispositif à une fonction comparable à celle du TCSC mais contrairement, il n'a pas de zone morte à la résonance parallèle et son réglage est continue ; il est constitué d'un onduleur triphasé construit à base de GTO. Couplé au réseau à travers un transformateur triphasé, dont le secondaire est inséré en série à la ligne. Dans la distribution à de faible niveau de puissance, cette structure est utilisée pour atténuer les perturbations tel que les micros coupures, les baisses de tension et sursensions, les variations de fréquence, les déséquilibres... etc [23].

2.5. Choix du lieu d'installation

La compensation peut être centrale, par secteur ou individuelle. En principe, la compensation idéale est-elle qui permet de produire l'énergie réactive à l'endroit où elle est consommée et en quantité ajustée à la demande. Ce mode de compensation est très coûteux, on cherchera donc, dans la pratique, un optimum technico- économique [23].

2.5.1. Compensation centrale

La batterie est raccordée en tête d'installation et assure la compensation pour l'ensemble de l'installation. La batterie reste en service en permanence pendant le fonctionnement normal de l'installation [23].

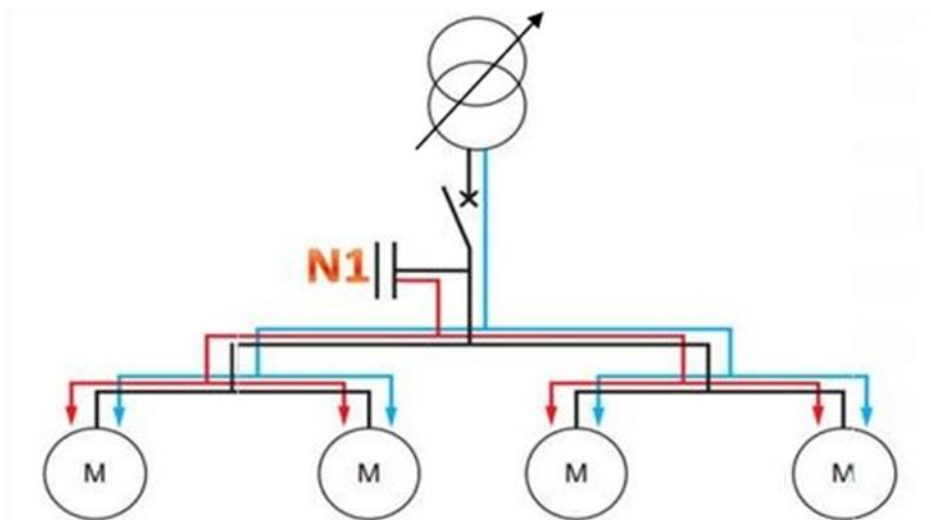


Figure.2.8. Compensation centrale.

2.5.2. Compensation partielle ou par secteurs

La batterie de condensateurs est connectée sur l'arrivée du tableau de distributions intermédiaires pour lequel la compensation doit être réalisée.

Une économie significative sur l'installation est réalisée grâce à cette disposition, notamment concernant le dimensionnement des câbles d'arrivée ou des tableaux intermédiaires pour lesquels la compensation est réalisée.

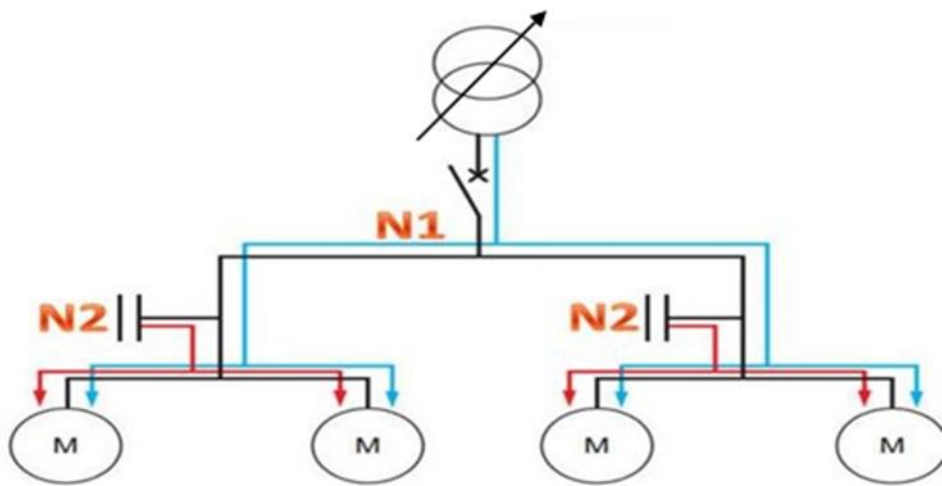


Figure.2.9. Compensation par secteur.

2.5.3. Compensation Individuelle

La batterie est connectée directement aux bornes de la charge inductive (généralement un moteur).

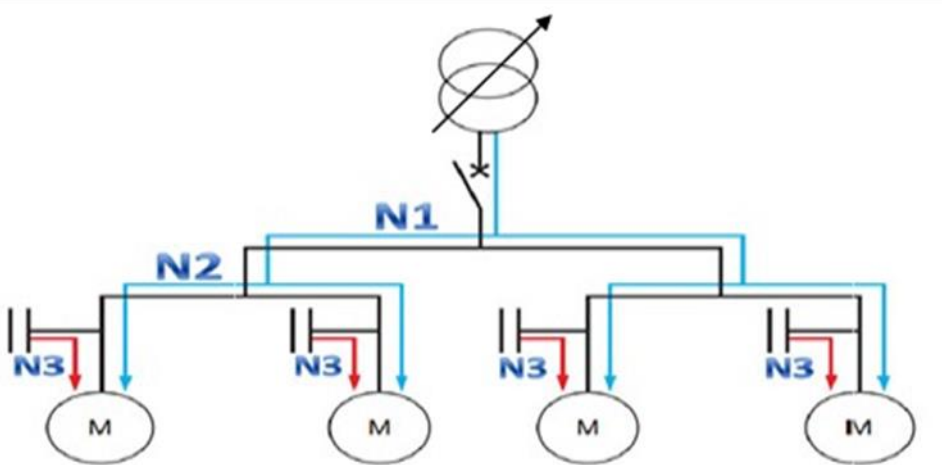


Figure.2.10. Compensation individuelle.

La compensation individuelle est à considérer quand la puissance du moteur est significative par rapport à la puissance souscrite de l'installation.

De ce chapitre, on peut retenir des points suivants :

La tension est fortement liée à la puissance réactive ; celle-ci n'est pas la seule mais la principale cause des variations de tension. Le réglage de la tension est réalisé par différents moyens, shunt et série de compensation de la puissance réactive. Chaque moyen de réglage a des avantages et des inconvénients.

La stabilité de la tension est fortement déterminée par la puissance réactive, et les moyens de son réglage.

Chapitre 3

Caractéristiques des lignes de grande portée

3.1. Problématique

Les paramètres électriques primaires de la ligne représentent l'expression physique de ses interactions électromagnétiques internes et externes. Les uns réagissent à l'écoulement de l'énergie (circulation du courant) et s'installent longitudinalement ; les autres réagissent à la distribution du potentiel le long de la ligne et s'installent transversalement. De ce fait, ces paramètres, en tant que support physique, dépendent du dimensionnement de la ligne ; mais en tant qu'impact, ils dépendent de l'action électromagnétique. En termes de régime de fonctionnement, ces deux aspects s'impliquent pour offrir possibilité de traiter avec la performance de la ligne. Il est, donc, très objectif d'en quantifier l'impact pour mesurer la possibilité d'atteindre un meilleur choix de sa configuration et accéder à un meilleur contrôle de son régime.

Les paramètres électriques primaires de la ligne se fixent, en fait, sur la réactance et la résistance active linéiques du circuit longitudinal et sur la susceptance et la conductance linéiques du circuit transversal ; lesquels paramètres déterminent, ensuite, ceux secondaires, tels ; l'impédance d'onde, le facteur complexe d'onde, la puissance caractéristique, la vitesse de propagation de l'onde...

En règle générale, les paramètres de dimensionnement des lignes sont déterminés sous condition pluridimensionnelle et fixés dans des gammes (marges) normalisées. En effet, on doit prendre en considération et en tenir compte, des aspects comme ; la stabilité, la capacité de transport, le rendement, la résistance mécanique, les effets électromagnétiques et électrodynamiques, le réserve, la continuité de service...

Ces aspects sont introduits, en règle générale, dans une relation fonctionnelle complexe qu'on doit optimiser ensuite en fonction de l'objectif à atteindre. Mais de manière essentielle, ces normes sont réduites au niveau potentiel propre de la ligne (tension nominale, U_N).

Parmi les paramètres de dimensionnement, on distingue, essentiellement, la distance moyenne géométrique entre phase, la section des conducteurs, le nombre de conducteurs par phase (faisceau), la distance moyenne géométrique entre conducteurs du faisceau ou rayon équivalent du faisceau.....

La relation d'impact sur le régime de la ligne, entre les paramètres de dimensionnement et ceux du régime est d'autant plus importante que l'envergure du système électrique, dans ses aspects respectifs ; croissance de charge, déploiement de sa structure, évaluation de la tension, est plus importante.

3.2. Description du modèle en faisceau

Le modèle de la ligne considérée est représenté sur la figure 3.1. Il s'agit d'interconnecter un grand centre de charge (de consommation, C.C) électrique à un centre très éloigné ($L > 500$ km) de production (C.P) de l'énergie électrique. L'appel des grandes puissances sur des grandes portées électriques, exige, en règle générale, des niveaux potentiels élevés. La relation fondamentale entre puissance « P_2 » à transférer, la longueur « L » de la liaison et potentiel « U_2 » du centre de charge, s'expriment, respectivement ;

Pour les lignes de petites longueurs (<300 km)

$$P_2 = k \frac{U_2^2}{L},$$

Pour les lignes de plus grandes portées (sans pertes),

$$P_2 = k_u \frac{U_2^2}{Z_C \sin \alpha_0 L}$$

où, $k = f(\eta, Q_2, F, \dots)$ - Tient compte des conditions technico économiques exigées ; η - Rendement ; Q_2 - puissance réactive de ligne ; F - Section du conducteur élémentaire ; k_u - Rapport entre tensions d'extrémités ; U_2 - Tension du centre de charge ; Z_C - Impédance caractéristique d'onde ; α_0 - Facteur de phase de l'onde.

Pour un appel de puissance donnée sur une distance déterminée, un niveau minimal limite du potentiel est requis. Ainsi la performance de l'interconnexion est tributaire des paramètres ; tels, le facteur technico économique et ceux électriques de la ligne (Z_C, α_0).

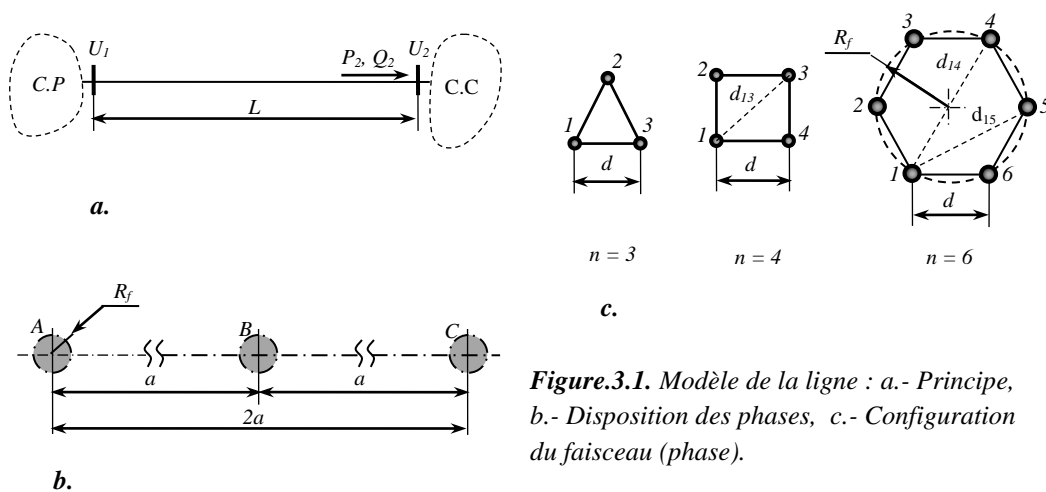


Figure.3.1. Modèle de la ligne : a.- Principe, b.- Disposition des phases, c.- Configuration du faisceau (phase).

Dans ce travail, on se propose d'étudier, d'analyser et d'évaluer la relation interactive entre le dimensionnement de la ligne très haute tension ($U_N = 400 \div 750 \text{ kV}$) et ces caractéristiques propres ; lesquelles caractéristiques se trouvent à la base de sa performance. Pour ce faire, on considère quelques configurations de phase ; en fait, les cas $d = (20 \div 50) \text{ cm}$ avec une variation $n = 2 \div 4$ pour deux valeurs de section élémentaire $F = 300, 500 \text{ mm}^2$.

3.3. Caractérisation des paramètres du système

Dans le cas des lignes THT, il est souvent admis de négliger la résistance active (r_0) et la conductance (g_0) de la phase. Ceci est d'autant plus justifié que la configuration en faisceau des phases implique, de fait, leur réduction.

Les grandeurs paramétriques impliquées dans l'analyse s'expriment donc [1],

$$x_0 = 0.144 \log \frac{D_m}{R_{eq}} + \frac{0.016}{n}$$

$$b_0 = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{D_m}{R_{eq}}}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{x_0}{b_0}} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$\alpha_0 = \sqrt{x_0 \cdot b_0}$$

Avec,

$$D_m = \sqrt[3]{2} \cdot a$$

$$R_{eq} = \sqrt[n]{n \cdot r_c R_f^{n-1}}$$

Les résultats de calcul réalisés par ces expressions, conformément aux données et aux intervalles de variation fixées, sont donnés dans le Tableau 3.1. Les calculs montrent que le facteur de phase α_0 reste pratiquement constant et représente $\alpha_0 \approx 0,06^\circ/\text{km}$.

Tableau 3.1

<i>d</i> , cm	<i>n</i>	<i>F</i> =300 mm ²			<i>F</i> =500 mm ²		
		<i>x</i> ₀ , Ω/km	<i>b</i> ₀ , 10 ⁻⁶ Ω/km	<i>Z</i> _C , Ω	<i>x</i> ₀ , Ω/km	<i>b</i> ₀ , 10 ⁻⁶ Ω/km	<i>Z</i> _C , Ω
20	1	0.46	2.453	433	0.4448	2.544	418
	2	0.3584	3.114	339	0.3505	3.186	331
	3	0.3243	3.4117	307	0.319	3.479	302
	4	0.3018	3.6645	286	0.2978	3.713	283
30	2	0.3457	3.231	327	0.3377	3.309	319
	3	0.3074	3.613	291	0.302	3.678	286
	4	0.2828	3.9143	268	0.2788	3.971	264
40	2	0.3367	3.319	318	0.3288	3.402	310
	3	0.2954	3.762	280	0.29	3.832	275
	4	0.2693	4.11	255	0.2653	4.176	252
50	2	0.3298	3.391	311	0.3218	3.478	304
	3	0.2861	3.886	271	0.2807	3.962	266
	4	0.2588	4.2825	245	0.2548	4.35	242

Ces résultats et leurs représentations graphiques montrent, dans une première lecture, les effets impliqués (Fig.3.2, 3). En effet, on peut constater que la réactance linéique diminue sensiblement avec l'augmentation du rayon R_{eq} (de « *d* ») équivalent de la phase en faisceau (Fig.3.2,a) et encore plus sensiblement avec le nombre (*n*) de conducteurs par phase, (Fig.3.2, b). En passant de la configuration $n=1$ à celle $n=4$ avec la même section élémentaire $F = 300\text{mm}^2$, la réactance se verra réduite de 43% environ pour $d = 50\text{ cm}$ et de 34% si $d = 20\text{ cm}$, (Fig.3.4). Un effet tout à fait inverse a lieu sur la valeur linéique de la susceptance. Les proportions correspondantes sont telles qu'elle varie, respectivement de 50% et de 74% (Fig.3.4). L'impact donc sur les deux paramètres est très important ; avec, cependant, une implication plus grande sur la susceptance. En d'autres termes, l'augmentation de la grandeur « *d* » (avec celle de *n*), en plus de son avantage de réduire la réactance de la ligne, donne lieu à la disponibilité d'une plus grande puissance réactive propre de la ligne ; particulièrement très utile pendant les régimes à charge maximale, pour réduire la nécessité de recourir à l'installation de sources complémentaires de compensation. Il est, en même temps, utile de remarquer qu'en régime à charge minimale, cette puissance réactive, peut impliquer un excédent qu'il serait nécessaire d'absorber par l'installation de consommateurs régulateurs (inductifs).

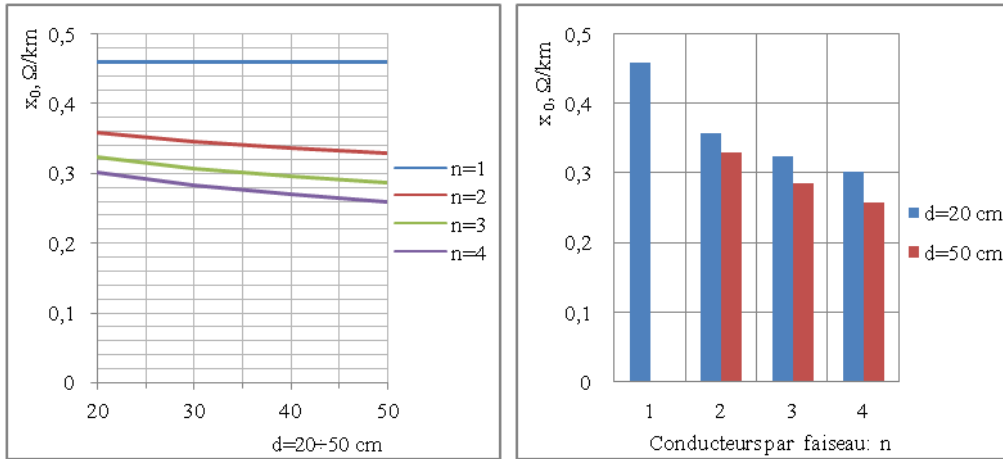


Figure. 3.2. Effet sur la réactance linéique pour $F=300 \text{ mm}^2$, a.- $x_0(d)$; b.- $x_0(n)$

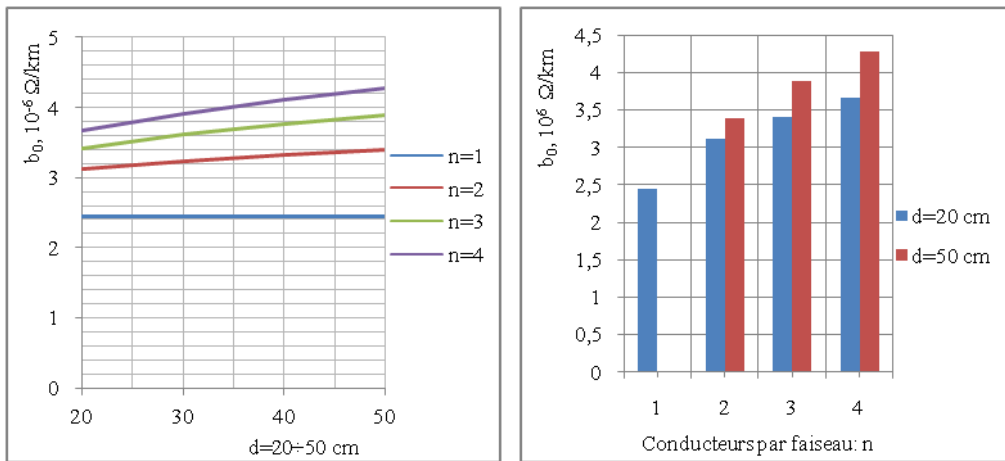


Figure. 3.3. Effet sur la susceptance linéique pour $F=300 \text{ mm}^2$, a.- $b_0(d)$; b.- $b_0(n)$.

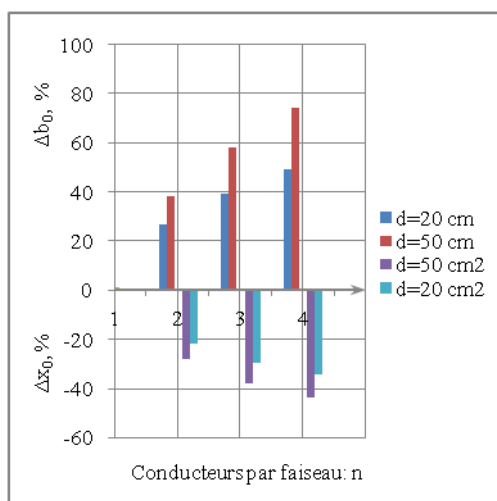


Figure.3. 4. Ecart Δx_0 et Δb_0 impliqués par n et d .

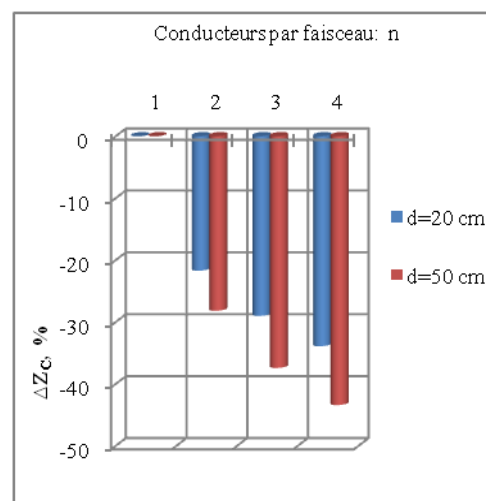


Figure.3. 5. Effet sur l'impédance d'onde ; $\Delta Z_c = f(n, d)$.

Tableau 3.2

		$F=300 \text{ mm}^2$			$F=500 \text{ mm}^2$		
d	n	$\Delta x_0 \text{ \%(-)}$	$\Delta b_0 \text{ \%(+)}$	$\Delta Z_C \text{ \%(-)}$	$\Delta x_0 \text{ \%(-)}$	$\Delta b_0 \text{ \%(+)}$	$\Delta Z_C \text{ \%(-)}$
20	2	22.08	26.95	21.7	19.85	25.23	19.37
	3	29.5	39.49	29	28.28	36.75	27.7
	4	34.39	49.38	33.9	23.04	45.95	32.3
30	2	24.84	31.71	24.48	24.07	30.07	23.68
	3	33.17	47.18	32.8	32.1	44.57	31.5
	4	38.52	59.57	38.1	37.32	56.09	36.8
40	2	26.8	35.3	26.55	26.07	33.72	25.8
	3	35.78	53.36	35.33	34.8	50.62	34.2
	4	41.45	67.14	41.1	40.35	64.15	39.7
50	2	28.3	38.23	28.17	27.65	36.71	27.7
	3	37.8	58.41	37.4	36.89	55.73	36.36
	4	43.73	74.18	43.4	42.71	70.9	42.1

3.4. Description du modèle étudié

Les territoires de grande superficie imposent le transport de l'énergie électrique par des lignes de grande longueur. Le transport de l'énergie électrique sur des grandes portées électriques implique diverses difficultés. En effet, le transport de grande quantité d'énergie sur des grandes distances implique des variations de tension très importantes, ainsi que des pertes de puissance active et réactive. Ces processus posent des problèmes de stabilité, de capacité de transport, d'investissement en moyens de contrôle et de gestion...

Pour cette raison, il est indispensable d'étudier ces processus de transport pour une meilleure maîtrise de leur exploitation, leur gestion et pour atteindre les meilleures performances.

Dans ce qui suit, on développe l'analyse d'un modèle de ligne de grande portée dans une étude comparative entre deux cas de configuration de phase d'une ligne sous THT.

Le modèle de la liaison à traiter est représenté sur la **figure 3.6** et est donné par les paramètres :

$$L = 800 \text{ km}; \quad U_N = 500 \text{ kv}; \quad F = 500 \text{ mm}^2; \quad n = 3$$

$$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} = 900 + j780 \text{ MVA}$$

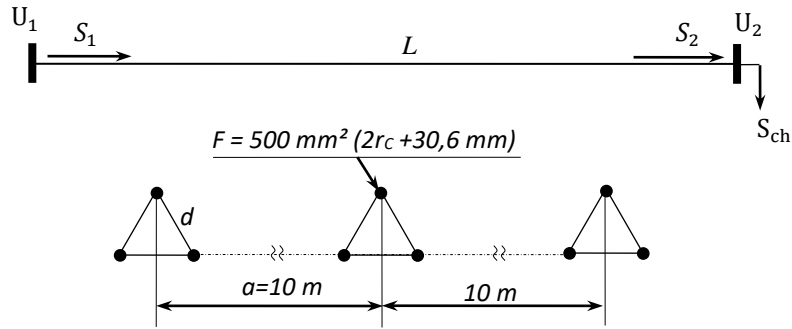


Figure.3.6. Modèle de principe.

Si la ligne est soumise au seul effet de la charge, alors on peut écrire,

$$S_2^* = S_{ch}^*$$

3.5. Etude Comparative

- Cas $d = 20 \text{ cm}$

Pour la commodité, dans le traitement qui suit, les grandeurs sont introduites par leur valeur relative (par unité **p.u.**).

Du tableau 3.1, on tire, pour $F = 500 \text{ mm}^2$, $Z_c = 302 \ \Omega$. Ce qui permet de calculer la puissance caractéristique de la liaison, choisie pour valeur de base des puissances ; soit,

$$P_c = \frac{U_N^2}{Z_c} = \frac{500^2}{302} = 827.8145 \text{ MW}.$$

Comme,

$$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} = 900 + j780 \text{ MVA}$$

Alors,

$$S_{ch}^* = \frac{S_{ch}}{P_c} = \frac{900}{827.8145} + j \frac{780}{827.8145} = 1.0872 + j0.9422$$

Le plan du potentiel le long de la ligne ($x = 0 \div 800 \text{ km}$) peut être décrit et déterminé par expression

$$\dot{U}^*(x) = \cos \alpha_0 x + Q_2^* \sin \alpha_0 x + jP_2^* \sin \alpha_0 x; \quad (3.1)$$

Le module de la tension en tous ses points jusqu'à son entrée étant déterminé comme,

$$k_u(x) = U^*(x) = \sqrt{(\cos \alpha_0 x + Q_2^* \sin \alpha_0 x)^2 + (P_2^* \sin \alpha_0 x)^2} \quad (3.2)$$

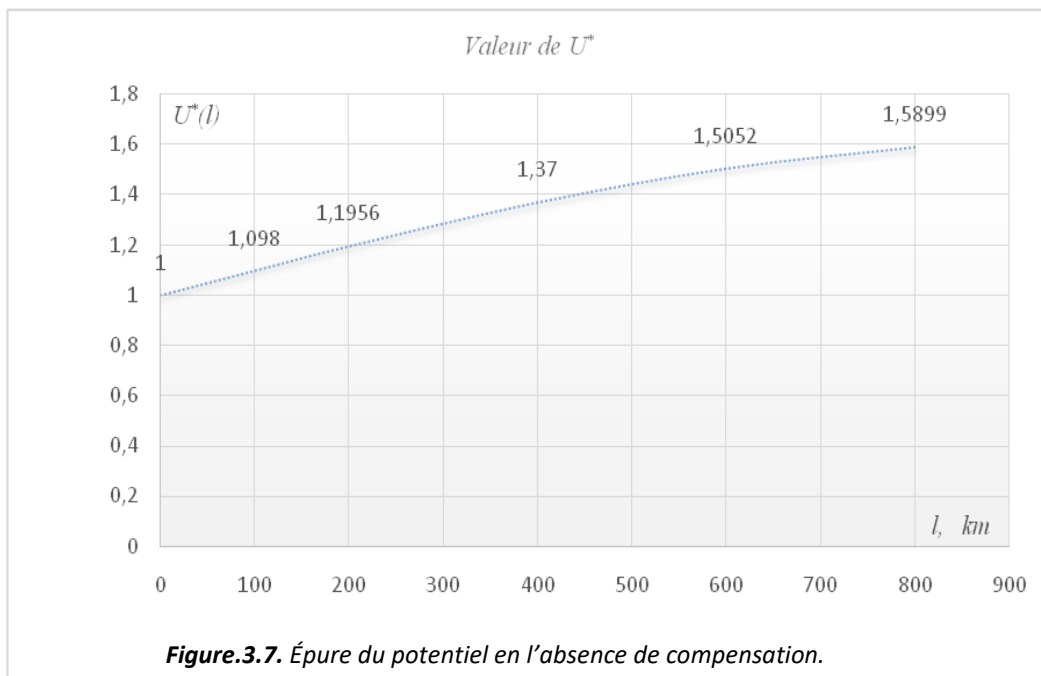
Pour la charge donnée, ré exprimée p.u, (3.1) se réécrit ;

$$\dot{U}^*(x) = \cos \alpha_0 x + 0,9422 \sin \alpha_0 x + j1,0872 \sin \alpha_0 x;$$

Cette expression permet de dresser le tableau 3.3 et de représenter graphiquement les résultats qui y sont saisis.

Tableau 3.3

L, km	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0 l^\circ$	0	6	12	24	36	48
$U^*(l)$	1	1,098	1,1956	1,37	1,5052	1,5899



Pour que la tension à l'extrémité de la liaison, sous l'effet de la charge donnée, soit égale à la tension nominale ($U_2^* = 1$), il est nécessaire que celle à son entrée soit égale à $U_1^* = 1,5899$ p.u. L'écart entre les deux tensions représente, ainsi, $\Delta U = 58,99\% \approx 60\%$; ce qui est inadmissible. Cette

observation suggère, en fait, la nécessité d'un contrôle ou d'un changement de configuration à rendre le plan de tension acceptable.

Le déphasage correspondant représente,

$$\delta = \frac{P_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + Q_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l} = \operatorname{arctg} \frac{1,0872 \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + 0,9422 \operatorname{tg} \alpha_0 l} = 30,54^\circ$$

Considérons, en qualité de contrôle, l'injection de la puissance réactive aux bornes de la charge (compensation shunt) pour réaliser $U_2^* = 1$ quand $U_1^* = 1$. La puissance réactive Q_2 de ligne nécessaire peut être calculée par la formule,

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} \alpha_0 l + \sqrt{\frac{k_u^2}{(\sin \alpha_0 l)^2} - P_2^{*2}} \quad (3.3)$$

qui donne, pour $k_u = 1$;

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} 48 + \sqrt{\frac{1^2}{(\sin 48)^2} - 1,0872^2} = -0,1074$$

La puissance réactive au bout de la ligne est négative ; elle circule du nœud de charge vers la ligne et entraîne une chute de tension dans ce sens. En effet, pour cette valeur de Q_2 , l'expression (3.1) se réécrit comme

$$\dot{U}^*(x) = \cos \alpha_0 x - 0,1074 \sin \alpha_0 x + j1,0872 \sin \alpha_0 x;$$

Un exemple de calcul par cette expression est saisi dans le tableau 3.4 et est représenté graphiquement sur la figure 3.8. Le plan du potentiel prend une autre forme et s'avère très amélioré par rapport aux cas précédant. Il présente un minimum au point médian de la liaison ; au point médian en raison de sa symétrie en rapport de tension et en position. La perte de tension représente $\Delta U_p = (1 - 0,9758)100\% = 2,42\%$; très amplement admissible.

On constate, également, que l'angle « δ » caractéristique de puissance augmente pour une même puissance de charge ; tout en maintenant une réserve angulaire de stabilité très suffisante ($\delta < 90^\circ$). Pour le rapport exigé entre les tensions d'extrémité, la puissance limite maximale est de

$$P_m^* = \frac{k_u}{\sin \alpha_0 l} = \frac{1}{\sin 48^\circ} = 1,354;$$

soit, par rapport à la charge active donnée de transit, une réserve de,

$$k_m = \frac{P_m^* - P_2^*}{P_2^*} 100\% = \frac{1,354 - 1,0872}{1,0872} 100\% = 24,54 \%$$

Tableau 3.4

l, km	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0, ^\circ$	0	6	12	24	36	48
$U^*(l)$	1	0,9898	0,9821	0,9758	0,9822	1
$\delta, ^\circ$	53,89					

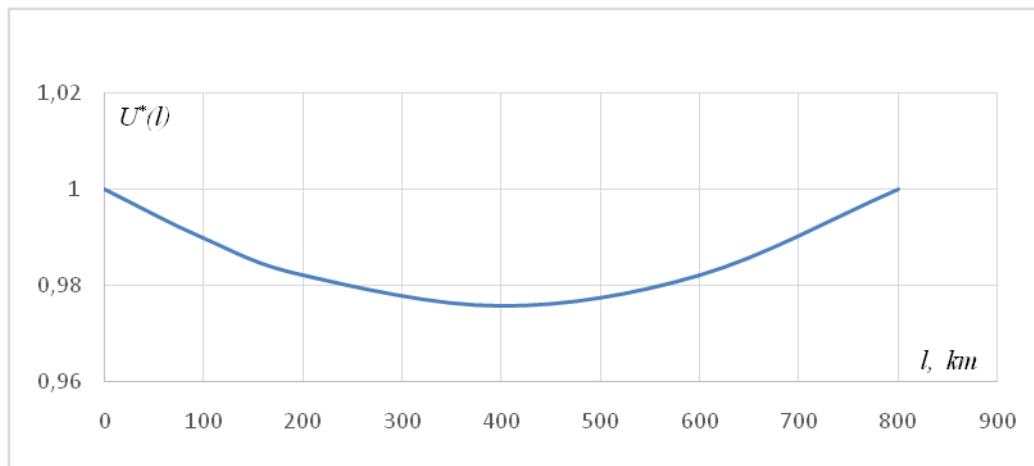


Figure. 3.8. Épure du potentiel après compensation.

Mais pour atteindre cette performance, il est nécessaire d’installer une compensation shunt aux bornes de la charge, dont la valeur est évaluée comme (Figure.3.9),

$$Q_{C2}^* = Q_{ch}^* - Q_2^*,$$

c.-à.d.,

$$Q_{C2}^* = 0,9422 - (-0,1074) = 1,0496$$

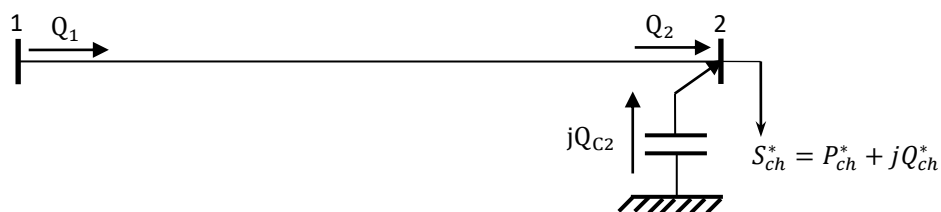


Figure.3.9. Compensation shunt aux bornes de l charge.

- Cas $d = 50$ cm

Du tableau 3.1, on tire, pour $F = 500$ mm², $Z_c = 266$ Ω. Ce qui permet de calculer la puissance caractéristique de la liaison, choisie pour valeur de base des puissances ; soit,

$$P_c = \frac{U_N^2}{Z_c} = \frac{500^2}{266} = 939,8496 \text{ MW}$$

Comme,

$$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} = 900 + j780 \text{ MVA}$$

alors,

$$S_{ch}^* = \frac{S_{ch}}{P_c} = \frac{900}{939,8496} + j \frac{780}{939,8496} = 0,9576 + j0,8299$$

Le plan du potentiel le long de la ligne ($x = 0 \div 800$ km) peut être décrit et déterminé, également, par l'expression (3.1) et le module, par (3.2).

C.-à.-d., pour la charge donnée, ré exprimée p.u, (3.1) se ré écrit ;

$$\dot{U}^*(x) = \cos \alpha_0 x + 0,8299 \sin \alpha_0 x + j 0,9576 \sin \alpha_0 x;$$

Et, respectivement, le module de la tension en tous ses points jusqu'à son entrée ;

$$k_u(x) = U^*(x) = \sqrt{(\cos \alpha_0 x + 0,8299 \sin \alpha_0 x)^2 + (0,9576 \sin \alpha_0 x)^2}$$

Ce qui permet de dresser le tableau 3.5 et de représenter graphiquement les résultats qui y sont saisis (Fig.3.10).

Tableau 3.5

$l, \text{ km}$	0	100	200	400	600	800
$\alpha_0, ^\circ$	0	6	12	24	36	48
$U^*(l)$	1	1,0858	1,1677	1,31	1,4137	1,4696
$\delta, ^\circ$	28,96					

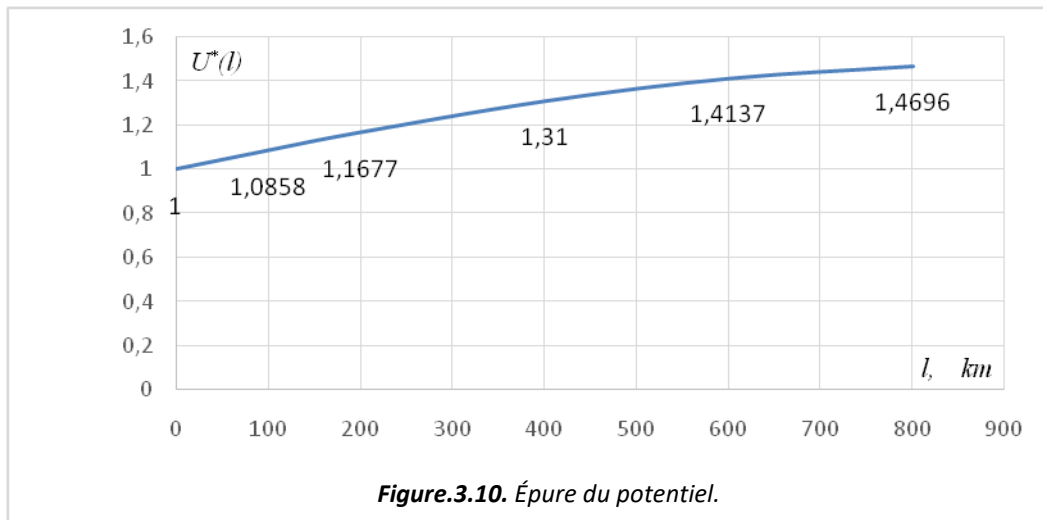


Figure.3.10. Épure du potentiel.

De la même manière que précédemment, pour que la tension à l'extrémité de la liaison soit égale à la tension nominale, il est nécessaire que celle à son entrée soit égale à $U^*_1 = 1,4696$ p.u. L'écart entre les deux tensions représente, ainsi, $\Delta U = 46,96 \% \approx 47\%$; ce qui est inadmissible. Cette observation suggère, également, le recours à un contrôle du plan de tension. Mais, on peut remarquer, immédiatement que dans ce deuxième cas, le rapport entre les tensions d'extrémités est bien inférieur comparativement à celui du premier cas, $\Delta U(d=50 \text{ cm}) = 46,96 \% < \Delta U(d=20 \text{ cm}) = 58,99 \%$; soit de 12,03 %. Ce qui n'est pas négligeable.

Le déphasage correspondant représente,

$$\delta = \frac{P_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + Q_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l} = \operatorname{arctg} \frac{0,9576 \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + 0,8299 \operatorname{tg} \alpha_0 l} = 28,96^\circ$$

Pour l'intérêt de l'analyse comparative, considérons, également, une compensation shunt aux bornes de la charge pour atteindre le régime $U^*_2 = 1$; $U^*_1 = 1$.

On détermine la puissance réactive Q_2^* de ligne nécessaire pour réaliser ce régime,

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} 48 + \sqrt{\frac{1^2}{\sin^2 48} - 0,9576^2} = 0,0449$$

Ce qui permet de réécrire pour le plan du potentiel, pour son module et pour l'angle caractéristique, respectivement,

$$\dot{U}^*(x) = \cos \alpha_0 x + 0,0449 \sin \alpha_0 x + j 0,9576 \sin \alpha_0 x;$$

$$k_u(x) = U^*(x) = \sqrt{(\cos \alpha_0 x + 0,0449 \sin \alpha_0 x)^2 + (0,9576 \sin \alpha_0 x)^2}$$

$$\delta = \frac{P_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + Q_2^* \operatorname{tg} \alpha_0 l} = \operatorname{arctg} \frac{0,9576 \operatorname{tg} \alpha_0 l}{1 + 0,0449 \operatorname{tg} \alpha_0 l} = 45,37^\circ$$

Les résultats de l'exemple de calcul sont saisis dans le tableau 3.6. Une première remarque peut être faite à propos de l'angle caractéristique. En effet, $\delta(d=50) < \delta(d=20)$; ce qui améliore la réserve de stabilité en angle pour une même charge utile. On constate, également, que l'angle « δ » caractéristique de puissance augmente pour une même puissance de charge ; tout en maintenant une réserve angulaire de stabilité très suffisante, plus grande que dans le premier cas. Pour le rapport exigé entre les tensions d'extrémité, la puissance limite maximale, en unités relatives, est la même que précédemment.

Mais pour la réserve en puissance, on a

$$k_m = \frac{P_m^* - P_2^*}{P_2^*} 100\% = \frac{1,354 - 0,9576}{0,9576} 100\% = 41,4 \%$$

Tableau 3.6

$l, \text{ km}$	0	200	400	600	800
$\alpha_0, ^\circ$	0	12	24	36	48
$U^*(l)$	1	1,007	1,009	1,007	1
$\delta, ^\circ$	45,35				

On peut voir, à partir du graphique, que le plan de tension est plus amélioré quand $d = 50 \text{ cm}$. En effet, l'écart maximal de la tension le long de la liaison représente moins de 1% (0,9%) en son milieu. Cet écart peut être avantageux ; puisqu'il installe une certaine réserve en potentiel.

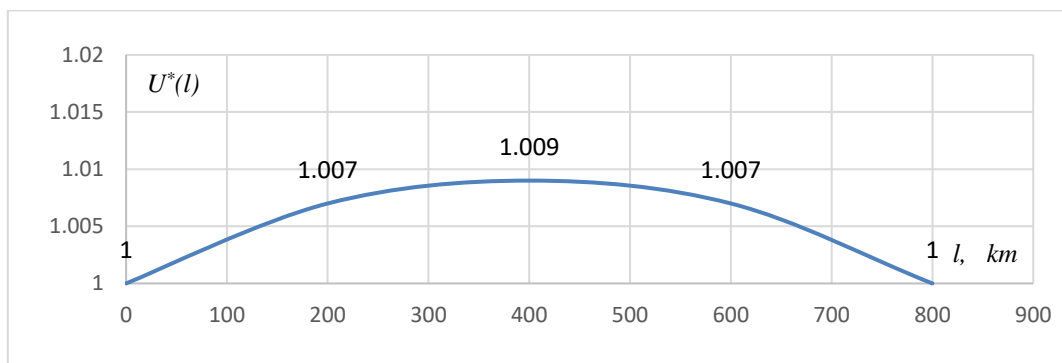


Figure.3.11. Épure du potentiel.

Comme précédemment, on déduit la puissance de compensation,

$$Q_{C2}^* = 0,8299 - 0,0449 = 0,785$$

3.6. Résultats comparatifs

Pour rendre, par leur l'impact, des deux cas de configuration directement comparables, il est nécessaire de ré exprimer toutes les grandeurs en leurs unités naturelles. Ces dernières sont déterminées comme suit

$$\Pi = \Pi^* \cdot \Pi_b$$

où, Π , Π^* et Π_b – Paramètre, respectivement, en unités naturelles, en unités relatives et de base. On obtient, ainsi, pour les deux configurations,

Les cases colorées résumant la comparaison entre les deux cas de configuration considérée.

Tableau 3.7.

		$S_{ch} = P_{ch} + jQ_{ch} = 900 + j780 \text{ MVA}$							
Paramètres		Z_C Ω	P_C MVA	k_u $\Delta U, \%$	Q_2 MVA	Q_C MVA	$\delta,$ $^\circ$	P_m MW	k_m %
Avant Compensation	d = 20 cm	302	827,8	1,59 59%	780	0	30,54		
	d = 50 cm	266	939,85	1,47 47%	780	0	28,96		
Après Compensation	d = 20 cm	302	827,8	1 +3,2%	-88,9	868,85	53,89	1113,4	23,7
	d = 50 cm	266	939,85	1 -0,9%	42,2	737,78	45,35	1264,1	40,45

Conclusion

A l'issue de ce travail, on peut retenir comme conclusion que l'augmentation de la distance moyenne géométrique entre les conducteurs de la phase de la liaison étudiée,

- Améliore la marge angulaire de la stabilité de la liaison, $\delta(50) < \delta(20)$,
- Améliore la marge en puissance de la stabilité, $k_m(50) < k_m(20)$,
- Améliore la capacité de transport de la liaison, $P_m(50) = 1,135P_m(20)$;
soit, $\Delta P_m = 13,5 \%$,
- Améliore le plan de tension, $\Delta U(20) = +3,2\%$ (la tension chute) ; $\Delta U(50) = -0,9\%$
(la tension augmente),
- L'augmentation de « d » installe la possibilité d'améliorer la relation entre la capacité de transport et la marge de stabilité de la liaison.

Reference Bibliographique

- [1] BEAUVOIS Véronique : « Qualité de la tension-Qualité de l'électricité », ATT 00254 Université de Liège
- [2] J.M.Kauffman : « Commande et régulation des réseaux électriques », Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [3] boutaba samia : « Amélioration de la stabilité d'un réseau électrique par l'utilisation d'un ASVC », mémoire de magister, Université Hassiba Ben Bouali Chlef, juin 2009.
- [4] Michel Crappe : « Commande et régulation des réseaux électriques » Chap.2 Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [5] Hanene Kouara : « Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension » mémoire de magister, université de Batna 28/02/2006
- [6] Vanya, I. 'Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique'. Thèse de Doctorat, université de Joseph Fourier, Octobre 2006.
- [7] De Vre R, Jacquet B : « Perturbations dans les installations électriques et électroniques Problèmes et solutions» Note d'information.
- [8] BEAUVOIS Véronique, « Qualité de la tension-Qualité de l'électricité », ATT 00254, Université de Liège 2008.
- [9] Dr. Mohamed Zellagui « Conférence, Qualité d'Énergie Électrique présenté par , 2018 ». <https://www.researchgate.net/publication/323228398>.
- [10] ATT 00254 « Qualité de la tension, Qualité de l'électricité», ATT 00254, UNIVERSITE DE LIEGE Novembre 2008.
- [11] MAMMERI Oussama, « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans une nœud a charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie», Mémoire de magister, Option : Réseaux électriques, Université de Batna, 2011/2012.
- [12] Dr. Mohamed Zellagui « Conférence, Qualité d'Énergie Électrique présenté par , 2018 ». <https://www.researchgate.net/publication/323228398>.
- [13] HADDAD Salim, « Compensation d'énergie réactive par convertisseur statique», Mémoire de magister département d'électromécanique, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2006.
- [14] H.Akagi, Y.Kanazawa and A.Nabae: « Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components », IEEE transaction on Industry Application, vol.Ia-20, N°3, May/Jaune 1984

- [15] M.A.E ALALI, 'Contribution à l'étude des compensateurs actifs des réseaux électriques basse tension', Thèse de doctorat de l'université de LOUIS PASTEUR (STRASBOURG), 12 Septembre 2002.
- [16] Bounaya K. « Cours : réseaux électriques industriels, Réseaux électriques de transport et de distribution, Ligne de portée électrique... », Département de Génie Electrotechnique et Automatique, Université 08 mai 1945 Guelma.
- [17] Bounaya, K. « Les réseaux électriques : Eléments de description et d'analyse de base ».
- [18] R.Grunbaum : « FACTS- les systèmes performants pour le transport flexible de l'énergie électrique », Revue ABB 5 / 1999.pp.202-203.
- [19] G.W.Moon : « Predictive current control of distribution static compensator for reactive power compensation », IEEE proceeding on generation transmission and distribution, Vol.146, N°5. pp.515-520.
- [20] A.Sonnenmoser and P.W Lehn: « Line current balancing with a unified. power flow controller », IEEE trans. On power delivery. Vol.14. N° 3.pp.1151-1157, july 1999.
- [21] J.P.Barret, P.Bornard and B.Meyer : « Simulation des réseaux électriques » EYROLLES, 1997.
- [22] Hamoudi F « Cours : réseaux de transport et de distribution électrique, Cours VEF 13 intitulé...», Département génie électrique, Université A/Mira Bejaia.
- [23] Gattal.S « mémoire : Contrôle de la tension dans le transfert sur des grandes portées électrique », Département génie électrique, Université 08 mai 1945 Guelma.
- [24] Mme Aitouaret Née Chekkal Samira « Cours : Compensation d'énergie Réactive, Les systèmes flexibles de transport et de distribution électrique F.A.C.T.S... », Département génie électrique, Université A/Mira Bejaia.