

M/621.735

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DE GUELMA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE ET AUTOMATIQUE



Mémoire de fin d'études
pour l'obtention du Diplôme de Master Académique
Domaine : Sciences et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Réseaux électriques

CARACTERISTIQUES DES LIGNES COMPENSEES

Présenté par :

- REGAIGUIA Raouf
- OMEIRI Chawki

Sous la Direction de :

Mr. BOUNAYA Kamel

Promotion 2012

Remerciements



Nous tenons d'abord à remercier Dieu Tout puissant qui nous a donné la force et la compétence pour arriver à ce résultat.

Nous tenons ensuite à remercier Monsieur BOUNAYA Kamel notre Enseignant et Encadreur, pour ses précieux conseils, recommandations et critiques qui nous a permis d'élaborer ce mémoire.

Nous tenons aussi à remercier l'ensemble de nos enseignants qui nous ont donné la base scientifique qui a contribué à finaliser ce projet.

Nous tenons enfin à exprimer notre profonde considération et gratitude aux membres du jury pour avoir bien voulu examiner et juger ce modeste travail.

Sommaire

	<i>Page</i>
PREMIER CHAPITRE :	
Introduction sur les réseaux électriques	
	3
1.1. Généralités sur les réseaux électriques	5
1.1.1. Utilité de la Haute Tension	6
1.1.2. Structure des réseaux électriques	7
1.1.3. Les réseaux de transport	8
1.1.4. Les réseaux de répartition	10
1.1.5. Les réseaux de distribution	11
1.1.6. Matériels utilisés dans les réseaux électriques :	12
1.1.7. Ecoulement de puissance.	14
1.1.8. Phénomènes dynamiques et transitoires	15
1.1.9. Stabilité des systèmes électriques de puissance.	19
1.2. Puissance réactive et tension dans les réseaux électriques	21
1.2.1. La tension	21
1.2.2. La puissance réactive	26
1.3. Compensation des réseaux électriques	28
1.3.1. Moyens de compensation de la puissance réactive	28
1.3.2. Les dispositifs conventionnels	29
1.3.3. Principe de la compensation	32
1.3.4. Moyens de compensation	32
1.3.5. Dispositif de Compensation	34
1.3.6. Localisations de la compensation	35
1.3.7. La nécessité de la compensation de la puissance réactive pour une ligne de haute tension	35
DEUXIEME CHAPITRE :	
ANALYSE COMPARATIVE DE DEUX	
MODELES DE LIGNE	
(sans compensation)	
	37
2.1. Ligne 400 kv	38
2.1.1. Régime maximal et régime minimal	38
2.1.2. Epure de la tension	45
2.1.3. Régime à vide	47
2.2. Ligne 750 kv	48
2.2.1. Régime maximal et régime minimal	48
2.2.2. Epure de la tension	54
2.2.3. Régime à vide	55

	<i>Page</i>
TROISIEME CHAPITRE : CONTROLE DE LA TENSION PAR L'ENERGIE REACTIVE	
	57
3.1. Ligne 400 KV	57
3.1.1. Régime maximal et régime minimal	57
3.1.2. Epure de la tension	76
3.1.3. Régime à vide	79
3.2. Ligne 750 KV	84
3.2.1. Régime maximal et régime minimal	84
3.2.2. Epure de la tension	103
3.2.3. Régime à vide	106
CONCLUSION	
	112
BIBLIOGRAPHIE	
	114

PREMIER CHAPITRE :

Introduction sur les réseaux électriques

Depuis la première pile électrique de Volta à la fin du 18^{ème} siècle, les utilisations de l'énergie électrique se sont diversifiées et intensifiées, aussi bien dans l'industrie que chez les particuliers. Cette augmentation de l'usage de l'énergie électrique est parvenue à un point tel que, bien souvent, la consommation d'énergie électrique d'un pays sert à mesurer son développement économique.

Cette place prépondérante qu'a prise l'énergie électrique dans notre société tient non seulement à sa facilité de transformation, depuis ou vers les autres formes d'énergie, mais aussi à la simplicité de son transport.

Ce transport de l'énergie électrique est réalisé par l'intermédiaire des réseaux dont la taille et la complexité ont augmenté avec l'accroissement des besoins des utilisateurs. [1]

L'augmentation de la demande a poussé aux interconnexions de plusieurs réseaux d'énergie, ce qui a engendré certains avantages, comme l'utilisation optimale des moyens de production, l'assistance mutuelle des réseaux, un bon plan de fréquence, mais aussi des inconvénients. Les réseaux deviennent plus grands et plus complexes, ce qui implique que leur étude et leur analyse deviennent plus difficiles, particulièrement les études de stabilité transitoire. [2]

En principe la planification des systèmes d'énergie électrique est régie par des bases scientifiques et techniques rigoureuses. Néanmoins, l'évolution réelle est toujours dictée par des facteurs d'ordre social, politique, géographique et environnemental compliquant la morphologie des réseaux. Les difficultés d'ordre pratique, rencontrées par exemple, dans l'implantation de nouvelles lignes de transport, contribuent énormément dans la complexité des systèmes d'énergie électrique. [3]

Actuellement, le traitement des modèles complexes des grands systèmes d'énergie électrique et l'évaluation rapide de leur comportement face à diverses éventualités pour un contrôle en temps réel de la sécurité sont des problèmes qui préoccupent les compagnies et les chercheurs dans le domaine. De plus, la réduction des ressources d'énergie conventionnelles (charbon, pétrole) a fait que l'utilisation optimale des ressources d'énergie est devenue très importante.

Un autre souci qui préoccupe les conducteurs des systèmes d'énergie est celui de produire, transporter, et distribuer l'énergie électrique de la façon la plus économique, tout en poussant les systèmes à fonctionner aux limites de stabilité. [4]

Face à toutes ces difficultés, les grands objectifs de tout réseau d'énergie électrique se

résumé ainsi :

- ✓ Fournir une énergie de qualité (i.e. maintenir la tension et la fréquence dans une plage bien définie pour le consommateur et sans harmoniques, distorsions).
- ✓ Maintenir la continuité de la fourniture d'énergie (sans coupures ou avec un minimum d'interruption). Ceci reste lié à la sécurité du système.
- ✓ Annuler la différence entre l'énergie fournie et la charge demandée (bilan énergétique).
- ✓ Gestion des échanges aux interconnexions selon les contrats arrêtés.
- ✓ Utilisation optimale des ressources d'énergie disponible (charbon, pétrole, gaz, hydraulique, nucléaire ...).
- ✓ Conduire efficacement et économiquement le système.

Pour réaliser ces objectifs, parfois contradictoires, l'étude de la stabilité des réseaux d'énergie électrique a toujours été considérée comme un facteur principal, que ce soit pour les planificateurs ou les exploitants. Plusieurs techniques analytiques et numériques ont été développées pour résoudre ce problème.

Ce travail s'intéressera donc à l'étude de la stabilité d'un réseau électrique qui, suite à un défaut particulier, déstabilise le système et entraîne principalement les générateurs à un fonctionnement anormal. L'étude de la stabilité transitoire consistera à analyser l'évolution de paramètres particuliers, comme la fréquence de rotation des machines, leur tension ou phase de tension, les tensions aux nœuds du réseau électrique, les puissances mécaniques et électriques, les couples et d'autres paramètres.

Dans ce travail on prend comme étude la ligne de grande portée c'est-à-dire la haute tension ou bien le transport d'énergie électrique à des grandes distances. Aussi le contrôle des puissances réactives et des tensions dans un réseau de transport d'énergie électrique.

Plan de travail :

Dans la **première partie**, on présentera des généralités sur les réseaux d'énergie électrique, ainsi que les notions de base de la stabilité d'un système d'énergie. Une synthèse de différentes méthodes utilisées dans l'évaluation de la stabilité transitoire seront présentées dans cette partie.

Une **deuxième partie** sera consacrée à l'étude de la puissance réactive et la qualité de tension dans les réseaux électriques. Ainsi que les différentes techniques de contrôle des tensions/puissances réactives et une description des moyens de compensation

La **troisième partie**, est une présentation générale de la compensation des réseaux électriques et ses principes et aussi les moyens de la compensation.

1.1. Généralités sur les réseaux d'énergie électrique :

Un réseau d'énergie électrique sert à transporter l'énergie des centres de production aux centres de consommation, contrairement au début de l'électrification où chaque centre de consommation était alimenté par son propre producteur.

Les réseaux actuels sont de plus en plus interconnectés, et représentent des systèmes complexes en dynamique permanente de recherche de point de fonctionnement stable face à des variations continues de la charge. Celle-ci, en plus de sa variation normale durant les heures de la journée peut également subir des variations brusques et aléatoires, ce qui implique des ajustements nécessaires de production. Notons aussi que des défauts peuvent se produire, éventuellement accompagnés de mise hors circuit de machines ou d'ouvrages, conduisant ainsi en cas d'échec à des procédures de ré enclenchement et à des modifications de la topologie du réseau.

Il en résulte, soit des phénomènes qui varient lentement et que l'on peut classer dans la catégorie de problèmes de régime établi, par conséquent analysés en étudiant la stabilité statique, soit des phénomènes électromécaniques transitoires qui nécessitent une étude plus poussée et détaillée de la stabilité transitoire. [3]

On appelle réseau électrique l'ensemble des infrastructures et ouvrages, permettant d'acheminer l'énergie électrique des centrales électriques (centres de production), vers les consommateurs d'électricité (charge).

Le réseau de transport électrique est divisé en lignes très haute, haute, moyenne et basse tension (distribution). La structure des réseaux varie d'un pays à un autre, mais on peut le représenter de la façon générale suivante :

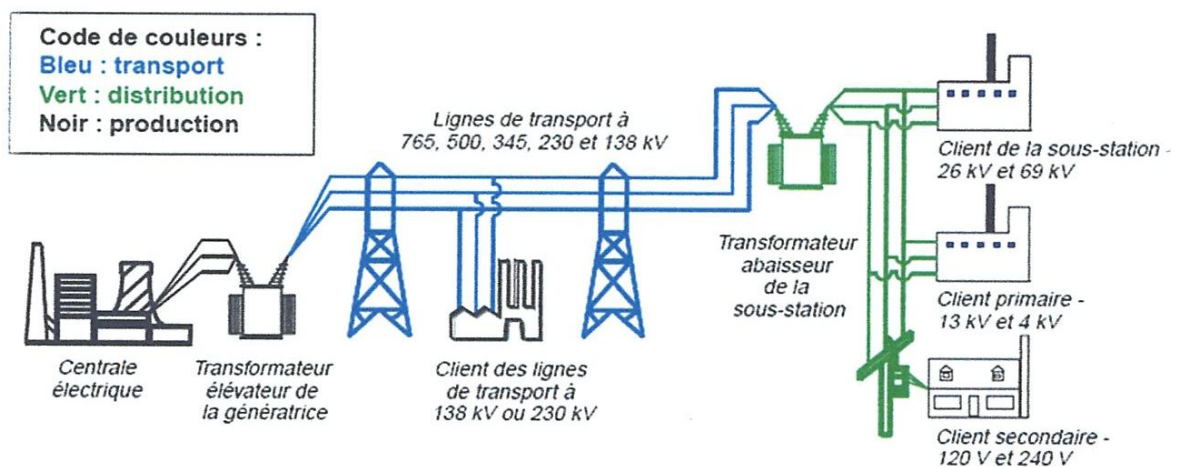


Figure 1.1- Structure de base d'un réseau d'énergie électrique.

Remarque. Tout calcul sur un réseau d'énergie électrique se démarre à partir d'un point stable, et ceci est assuré par le calcul d'écoulement de puissance.

Sous cette dimension le calcul d'écoulement de puissance a son importance dans toute étude sur un réseau électrique.

Les lignes à haute tension sont les lignes principales des réseaux de transport d'électricité. Elles peuvent être aériennes, souterraines ou sous-marines, quoique les professionnels réservent plutôt le terme aux liaisons aériennes. Elles servent au transport sur les longues distances de l'électricité produite par les diverses centrales électriques, ainsi qu'à l'interconnexion des réseaux électriques. Les lignes à haute tension aériennes sont composées de câbles conducteurs, généralement en alliage d'aluminium, suspendus à des supports, pylônes ou poteaux.

Ces supports peuvent être faits de bois, d'acier, de béton, d'aluminium ou parfois en matière plastique renforcée.

Aujourd'hui, certaines lignes sont régulièrement exploitées à des tensions supérieures à 750 KV.

1.1.1. Utilité de la Haute Tension :

Question : Pourquoi utilise-t-on la haute tension pour le transport de l'énergie électrique ?

L'énergie électrique sort des centrales avec une tension de quelques kV (5 à 10 kV), le transport se fait avec une haute tension (220 kV et plus) pour minimiser les pertes Joule dans la ligne et de pouvoir transiter de grandes puissances.

Transformateur idéal :

$$P_{\text{entrée}} = P_{\text{sortie}} \Rightarrow U_1 I_1 = U_2 I_2 \Rightarrow I_2 = I_1 \frac{U_1}{U_2}$$

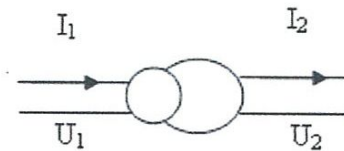


Figure 1 : Transformateur élévateur

D'après l'expression ci-dessus, l'élévation de la tension ($U_2 > U_1$) permet de limiter les pertes en diminuant le courant et permet également de faire transiter de plus grandes puissances.

Par exemple, pour évacuer l'énergie d'un groupe de 100 MVA, le courant sera de 260 A sous 220 kV mais de 4 000 A sous 15 kV. Le transport de 4 000 A sous 15 kV entraînerait des coûts d'équipement et surtout de pertes par effet Joule inadmissibles. Les courants de court-circuit et leurs effets seraient aussi considérablement augmentés. Or, il existe maintenant des groupes de 1 300 MVA ! Donc on est conduit à augmenter la tension des réseaux de transport. Evidemment, il y a une limite supérieure principalement constituée par le coût des isolements.

Les Réseaux Haute Tension :

- ✓ Les réseaux de transport sont triphasés, sans conducteur de neutre.
- ✓ Le domaine de ce qu'on appelle Très Haute Tension va de 60 à 800 kV (entre phases).

- ✓ Il existe des projets jusqu'à 1 200 kV.
- ✓ Leurs fréquences sont 50 ou 60 Hz (quelques cas à 16 2/3 Hz).
- ✓ Les courants transportés vont de 400 à 3 000 A.

Utilisation des Réseaux HVDC :

HVDC: High Voltage Direct Current

L'utilisation de la Haute Tension continue dans les réseaux peut être possible dans les cas suivants :

- ✓ Lignes longues (> 1000 km) des réseaux UHT, où l'on gagne sur les distances
- ✓ D'isolement entre les valeurs crête et efficace .
- ✓ Longs câbles souterrains (dans les mers ou dans les villes), pour s'affranchir du
- ✓ Problème de transit de l'énergie réactive.

Utilisation de convertisseurs statiques pour transformer l'énergie alternative en continu et vice-versa, vu que la majorité des appareillages utilisent la tension alternative.

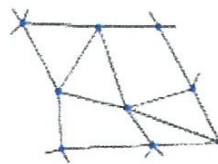
Réseaux HT dans le monde :

- ❖ USA : tension maximale de transport est 765 kV;
- ❖ CANADA : elle est de 735 kV;
- ❖ EUROPE DE L'OUEST : elle est de 400 kV;
- ❖ JAPON: une ligne de 1000 kV a été construite ;
- ❖ Dans la plupart des pays la tension varie entre 220 et 500 kV.

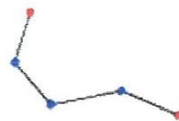
I.1.2. Structure des réseaux électriques :

Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures exposées ci-dessous :

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

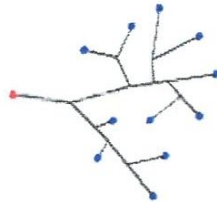


Structure radiale ou bouclée : (les postes rouges représentent les apports d'énergie) : la sécurité d'alimentation, bien qu'inférieure à celle de la structure maillée, reste élevée.



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.

Chaque type de structure possède des spécificités et des modes d'exploitation très différents. Les grands réseaux d'énergie utilisent tous ces types de structure. Dans les niveaux de tension les plus élevés, on utilise la structure maillée : c'est le réseau de transport. Dans les niveaux de tension inférieurs, la structure bouclée est utilisée en parallèle de la structure maillée : c'est le réseau de répartition. Enfin, pour les plus bas niveaux de tension, la structure arborescente est quasiment exclusivement utilisée : c'est le réseau de distribution.



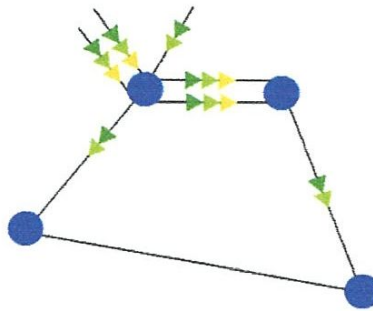
1.1.3. Les réseaux de transport :

Les réseaux de transport sont à haute tension (HTB) (de 50 kV à 400 kV) et ont pour but de transporter l'énergie des grands centres de production vers les régions consommatrices d'électricité. Les grandes puissances transitées imposent des lignes électriques de forte capacité de transit, ainsi qu'une structure maillée (ou interconnectée). Les réseaux maillés garantissent une très bonne sécurité d'alimentation, car la perte de n'importe quel élément (ligne électrique, transformateur ou groupe de production) n'entraîne aucune coupure d'électricité si l'exploitant du réseau de transport respecte la règle dite du "N-1" (possibilité de perdre n'importe quel élément du réseau sans conséquences inacceptables pour les consommateurs).

A) Dans le réseau ci contre, l'électricité se répartit sur les lignes électriques en fonction de la localisation de la production, de la consommation et des impédances des ouvrages (lignes et transformateurs) selon les lois de Kirchhoff. Les lignes sont plus ou moins chargées selon le nombre de triangles :

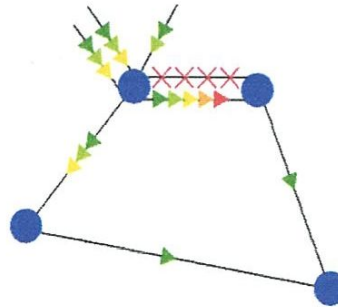
- de vert à orange : intensité supportable par la ligne en régime permanent ;
- rouge : l'intensité n'est pas supportable en régime continu, il faut réduire rapidement l'intensité sinon la ligne se mettra hors service sous l'effet des dispositifs de protection.

Dans cet exemple, les lignes sont normalement chargées (couleur verte à jaune).



A) État normal

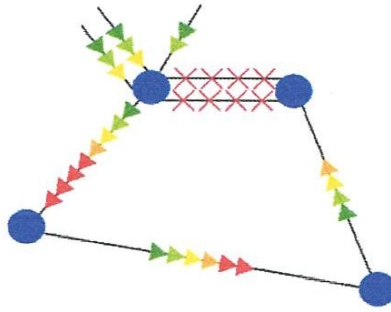
B) Un incident s'est produit sur le réseau : une ligne a déclenché ; elle est donc hors service. Du fait de la structure maillée, l'énergie s'est répartie sur les lignes restantes en fonction de leur impédance, tout en assurant la continuité de l'alimentation électrique. Par contre une ligne est en surcharge : il faut donc agir rapidement pour ramener son intensité à une valeur acceptable.



B) Coupure d'une ligne : l'énergie se répartit différemment

C1) Si aucune action n'est menée dans les délais suffisants, la ligne en surcharge va déclencher à son tour : l'énergie va alors se répartir à nouveau pour alimenter la consommation appelée. Avec de moins en moins de lignes électriques pour acheminer la même puissance, les surcharges sur les lignes restantes deviennent très importantes et les délais de réaction vont être réduits d'autant. Dans cette situation une ligne est en très forte surcharge et va déclencher très rapidement, mettant ainsi les 3 postes qu'elle alimentait hors tension.

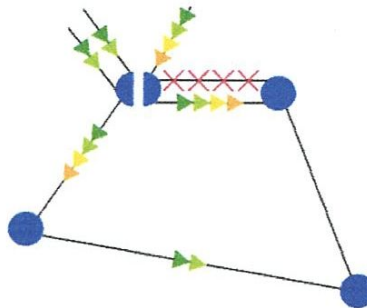
Un enchaînement de ce type est appelé une cascade de surcharge et est quasiment toujours impliqué dans les grands blackouts rencontrés au niveau mondial. Ceci illustre qu'à partir d'une situation de réseau a priori "normale", un événement bénin (par exemple un coup de foudre sur une ligne) peut rapidement avoir des conséquences non maîtrisables et de grande ampleur.



C1) Sans correction : l'incident s'aggrave, la zone va finir hors tension

C2) Suite au déclenchement de la première ligne électrique, plusieurs moyens sont à disposition des dispatchers pour "lever" cette surcharge. Ici, le dispatcher a changé la topologie d'un poste pour y passer à 2 nœuds électriques : cela permet de répartir de manière différente l'énergie, et donc de mieux équilibrer l'intensité sur les lignes. On revient donc à une situation pérenne. D'autres solutions, plus contraignantes, auraient pu être adoptées pour lever la surcharge :

- augmentation rapide de production dans la zone problématique afin de diminuer les apports d'énergie par les lignes ;
- coupure volontaire ciblée de consommation (on parle alors de délestage) afin de conserver l'alimentation d'un maximum de clients.



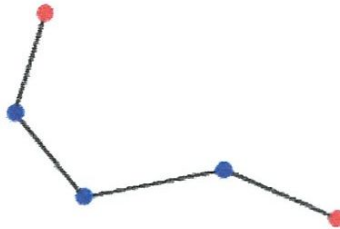
C2) Correction : optimisation de la répartition de l'énergie entre les lignes par modification de la topologie du réseau

1.1.4. Les réseaux de répartition :

Les réseaux de répartition sont à haute tension (de l'ordre de 30 à 150 kV) et ont pour but d'assurer à l'échelle régionale la fourniture d'électricité. L'énergie y est injectée essentiellement par le réseau de transport via des transformateurs, mais également par des centrales électriques de moyennes puissances (inférieures à environ 100 MW). Les réseaux de répartition sont distribués de manière assez homogène sur le territoire d'une région.

Ils ont une structure à la fois maillée et bouclée suivant les régions considérées.

Contrairement aux réseaux de transport qui sont toujours bouclés (afin de pouvoir assurer un secours immédiat en N-1), les réseaux de répartition peuvent être exploités bouclés ou débouclés selon les transits sur le réseau (débouclé signifie qu'un disjoncteur est ouvert sur l'artère, limitant ainsi les capacités de secours en N-1). Les problèmes de report de charge se posent également pour le réseau de répartition, sa conduite est donc assurée en coordination avec celle du réseau de transport et nécessite également des moyens de simulation en temps réel.



Entre les 2 postes rouges, la structure est bouclée. Les réseaux de répartition ont souvent cette structure dans les régions faiblement consommatrices.

1.1.5. Les réseaux de distribution :

Les réseaux de distribution ont pour but d'alimenter l'ensemble des consommateurs. Il existe deux sous niveaux de tension :

- les réseaux à moyenne tension (de 3 à 33 kV) ;
- les réseaux à basse tension (de 110 à 600 V), sur lesquels sont raccordés les utilisateurs domestiques.

Contrairement aux réseaux de transport et répartition, les réseaux de distribution présentent une grande diversité de solutions techniques à la fois selon les pays concernés, ainsi que selon la densité de population.

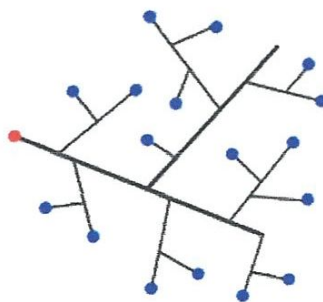
Les réseaux à moyenne tension (MT) ont de façon très majoritaire une structure arborescente, qui autorise des protections simples et peu coûteuses : à partir d'un poste source (lui-même alimenté par le réseau de répartition), l'électricité parcourt une artère (ou ossature) sur laquelle sont reliées directement des branches de dérivation au bout desquelles se trouvent les postes MT/BT de distribution publique, qui alimentent les réseaux basse tension (BT) sur lesquels sont raccordés les plus petits consommateurs. La structure arborescente de ces réseaux implique qu'un défaut sur une ligne électrique MT entraînera forcément la coupure des clients alimentés par cette ligne, même si des possibilités de secours plus ou moins rapides existent.

Les ossatures des réseaux à moyenne tension (MT) européens ne sont constituées que des 3 phases, alors qu'en Amérique du Nord le fil de neutre est également distribué (3 phases + 1 neutre). Les dérivations MT quant à elles peuvent être constituées de 1 fil (cas de l'Australie où

le retour de courant s'effectue par la terre) à 4 fils (cas des États-Unis), ou encore systématiquement 3 fils (les 3 phases) comme le réseau français.

Les réseaux MT aériens sont majoritaires en zone rurale, où la structure arborescente prédomine largement. Par contre en zone urbaine les contraintes d'encombrement, d'esthétique et de sécurité conduisent à une utilisation massive des câbles souterrains. Les réseaux souterrains étant soumis potentiellement à de longues indisponibilités en cas d'avarie (plusieurs dizaines d'heures), il est fait appel à des structures en double dérivation ou à des structures radiales débouclées munies d'appareils automatiques de réalimentation, permettant une meilleure sécurité d'alimentation.

Les réseaux BT résultent de la structure des réseaux MT : en Amérique du Nord les réseaux monophasés sont courants (1 neutre + 1 phase), tandis qu'en Europe la distribution triphasée avec fil de neutre est très majoritaire (1 neutre + 3 phases). La structure arborescente est là aussi de loin la plus répandue, car elle est à la fois simple, bon marché, et permet une exploitation facile.



Les réseaux de distribution sont généralement basés sur une structure arborescente de réseau : à partir d'un poste source (en rouge), l'énergie parcourt l'artère ainsi que ses dérivations avant d'arriver aux postes de transformation MT/BT

1.1.6. Matériels utilisés dans les réseaux électriques :

Le réseau électrique est constitué non seulement de matériel haute tension (dit matériel de puissance), mais également de nombreuses fonctions périphériques telles que la télé conduite ou le système de protection.

Matériels de puissance :

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

Les lignes électriques :

Les lignes électriques assurent la fonction « transport de l'énergie » sur les longues distances. Elles sont constituées de 3 phases, et chaque phase peut être constituée d'un faisceau de plusieurs

conducteurs (de 1 à 4) espacés de quelques centimètres afin de limiter l'effet couronne qui entraîne des pertes en lignes, différentes des pertes Joule. L'ensemble de ces 3 phases électriques constitue un terne.

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 tous soigneusement reliés à la terre par un réseau de terre efficace. Les pylônes supportent les conducteurs par des isolateurs en verre ou en porcelaine qui résistent aux tensions élevées des lignes électriques. Généralement la longueur d'un isolateur dépend directement de la tension de la ligne électrique qu'il supporte. Les isolateurs sont toujours munis d'éclateurs qui sont constitués de deux pointes métalliques se faisant face. Leur distance est suffisante pour qu'en régime normal la tenue de tension puisse être garantie. Leur utilité apparaît lorsque la foudre frappe la ligne électrique : un arc électrique va alors s'établir au niveau de l'éclateur qui contournera l'isolateur. S'il n'y avait pas d'éclateur, la surtension entre le pylône et la ligne électrique foudroyée détruirait systématiquement l'isolateur.

Un câble de garde, constitué d'un seul conducteur, surplombe parfois les lignes électriques. Il est attaché directement au pylône, et ne transporte aucune énergie : il est relié au réseau de terre et son but est d'attirer la foudre afin qu'elle ne frappe pas les 3 phases de la ligne, évitant ainsi les "creux de tension" perturbant les clients. Au centre du câble de garde on place parfois un câble fibre optique qui sert à la communication de l'exploitant. Si on décide d'installer la fibre optique sur un câble de garde déjà existant, on utilise alors un robot qui viendra enrouler en spirale la fibre optique autour du câble de garde.

Les transformateurs de puissance :

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

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

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

Les postes électriques :

Les postes électriques sont les nœuds du réseau électrique. Ce sont les points de connexion des lignes électriques. Les postes des réseaux électriques peuvent avoir 2 finalités :

- l'interconnexion entre les lignes de même niveau de tension : cela permet de répartir l'énergie sur les différentes lignes issues du poste ;
- la transformation de l'énergie : les transformateurs permettent de passer d'un niveau de tension à un autre.

De plus, les postes électriques assurent des fonctions stratégiques :

- assurer la protection du réseau : un système complexe de protection permet qu'un défaut sur un seul ouvrage n'entraîne pas la mise hors tension de nombreux ouvrages, ce qui risquerait de mettre une vaste zone hors tension. Cette protection est assurée par des capteurs qui fournissent une image de la tension et du courant à des relais de protection, lesquels élaborent des ordres de déclenchement à destination des disjoncteurs .
- permettre l'exploitation normale du réseau : présence de plusieurs jeux de barre et de couplage afin de pouvoir prendre différents schéma électriques ;
- assurer la surveillance du réseau : la tension du réseau et l'intensité dans les lignes sont surveillées dans les postes électriques, via des transformateurs de mesure de tension et de courant.

1.1.7. Ecoulement de puissance :

Définition :

L'étude de l'écoulement de puissance consiste à rechercher un point de fonctionnement stable à un moment donné à travers une information complète du courant et de la puissance. En fait, il s'agit principalement de calculer les quatre paramètres suivants au niveau de chaque nœud de réseau : P , Q , $\angle V$ et ϕ . [3]

En d'autres termes, l'étude de l'écoulement de puissance (Load Flow) permet d'avoir la solution des grandeurs d'un réseau électrique en fonctionnement normal équilibré en régime permanent. Ces grandeurs sont les tensions aux nœuds, les puissances injectées aux nœuds et celles qui transitent dans les lignes. Les pertes et les courants s'en déduisent. Les études de l'écoulement de puissance permettent de planifier la construction et l'extension des réseaux électriques ainsi que la conduite et le contrôle de ces réseaux. [6]

On suppose préalablement que notre système, à chaque nœud fonctionne sous les conditions suivantes [3] :

- On peut conserver l'équilibre total entre l'énergie active produite et demandée en

ajoutant les pertes actives ($\text{Production} = \text{Charge} + (\text{Pertes} \approx 5\%)$);

➤ A l'aide du réglage du courant d'excitation de l'alternateur et par conséquent la force électromotrice dans l'induit, on peut fixer la tension à une valeur déterminée à l'avance.

Techniques de calcul d'écoulement de puissance :

Il existe plusieurs méthodes de calcul d'écoulement de puissance, mais nous ne citerons que les trois les plus importantes :

- ✓ Méthode de Gauss-Seidel (G-S);
- ✓ Méthode de Newton-Raphson (N-R);
- ✓ Méthode Découplée Rapide (FDLF);

1.1.8. Phénomènes dynamiques et transitoires :

Il existe une vaste gamme de phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques, qui doivent être pris en compte pour assurer son fonctionnement correct. L'illustration suivante montre une classification fondée sur la nature des phénomènes ainsi que sur les plages temporelles dans lesquelles ils se manifestent.

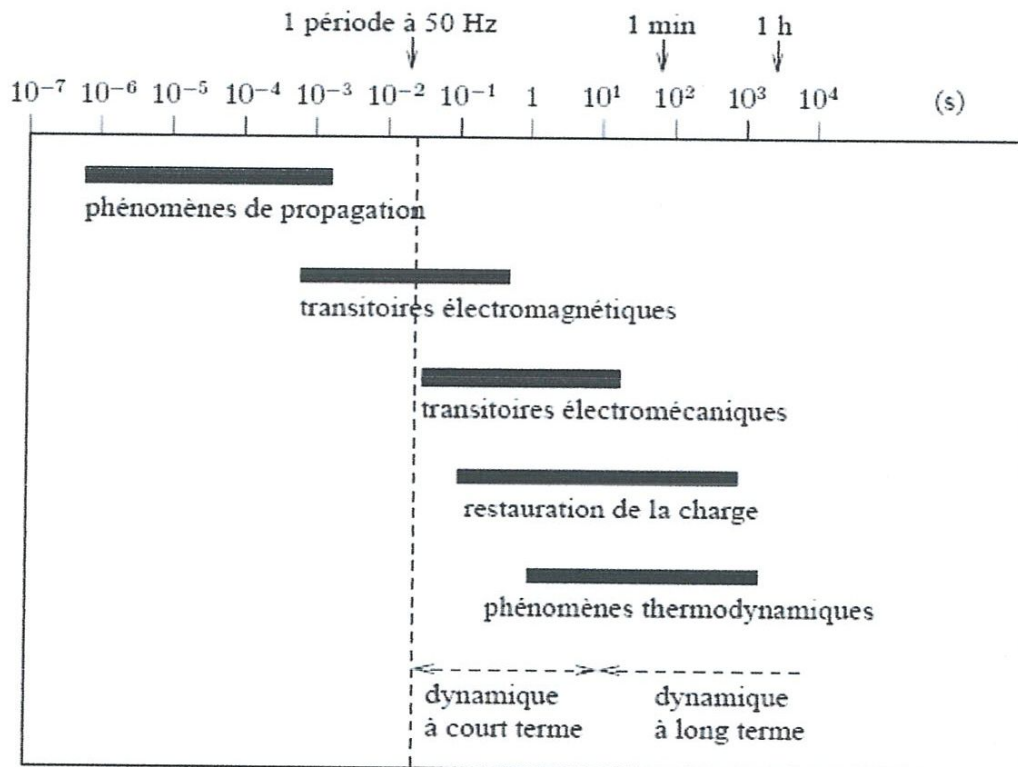


Figure 1.2 Classification des phénomènes dynamiques dans les réseaux électriques.

Les phénomènes les plus rapides sont ceux de *propagation*. Ils se produisent principalement sur les lignes de transport et correspondent à la propagation des ondes électromagnétiques suite à des coups de foudre ou des opérations de coupure (disjoncteurs).

La gamme de temps de ces phénomènes s'étend de la microseconde à la milliseconde. [16]

Les *transitoires électromagnétiques* prennent place dans les enroulements des générateurs et des moteurs et dans les dispositifs électroniques de puissance. Ils résultent de perturbations (par exemple court-circuit), d'opérations de coupure ou de commutations (thyristors, etc.). Ils s'étendent typiquement de quelques millisecondes à quelques dixièmes de seconde,

Dans un intervalle de temps de cet ordre, il est légitime de considérer que les vitesses de rotation des machines n'ont pas le temps de changer. [7]

Les *transitoires électromécaniques* sont précisément dues aux mouvements des masses tournantes des générateurs et moteurs, ainsi qu'à la réponse des régulateurs de tension et de vitesse, suite à une perturbation et au fonctionnement des protections. La gamme de temps de ces phénomènes s'étend typiquement de quelques centièmes de seconde à une dizaine de secondes.

Les phénomènes de *restauration de la charge* s'étendent de quelques dixièmes de seconde à quelques dizaines de minutes. Ils correspondent à la tendance des charges à recouvrer la puissance qu'elles consommaient avant perturbation. Il s'agit soit d'un comportement intrinsèque de la charge, soit de l'effet d'une régulation.

La dynamique la plus lente est celle des *phénomènes thermodynamiques* qui se développent dans les chaudières des centrales thermiques, suite à une perturbation de l'équilibre production consommation de puissance. Ils peuvent aller de quelques dizaines de secondes à quelques dizaines de minutes.

On parle également:

- de *dynamique à court terme* pour désigner les phénomènes qui se manifestent sur une période allant du dixième à la dizaine de secondes, incluant les transitoires électromécaniques et les phénomènes de restauration de la charge les plus rapides;
- de *dynamique à long terme* pour désigner les phénomènes de restauration de la charge au-delà de la dizaine de secondes ainsi que les phénomènes thermodynamiques. [3,8]

Définition des transitoires :

Tout changement à la configuration d'un circuit exige absolument une condition transitoire. Même si les circuits de distribution d'énergie électrique sont en régime permanent la plupart du temps, les quelques millisecondes transitoires lors de manœuvres ou de coups de foudre introduisent des effets qu'il faut prévoir et contrer par des techniques de protection ou d'atténuation. [24]

Fondamentalement, les transitoires sont des changements momentanés de tension ou de courant qui se produisent sur une très courte période, habituellement évaluée approximativement autour de 1 millisecondes.

Sources des transitoires :

Durant leur fonctionnement, des défauts de commutation se produisent fréquemment dans des systèmes de puissance. Différents types de commutation et de défauts peuvent ainsi causer des transitoires.

Ces causes sont ce qu'on appelle sources de transitoires et peuvent être classées en deux catégories :

Sources extérieures :

La foudre est la plus connue des transitoires extérieurement produites

Les grands champs électriques produits pendant une décharge peuvent s'ajouter dans le système de puissance en créant des transitoires induites. Une décharge de nuage à nuage peut produire un champ électrique de 70 volts par mètre. Sur une ligne de transmission d'une longueur de 1/2-mile, la décharge est égale à une transitoire de 56.000 volts.

D'autres transitoires extérieurement produites peuvent également être imposées aux lignes électriques par des opérations de service normales. La commutation des charges, ouverture et fermeture des appareillages de coupure sur les lignes activées, commutation de bancs de condensateur, les opérations de re-fermeture et réglage de rapport de transformation sur des transformateurs peuvent causer des transitoires.

Les mauvais raccordements dans un système de distribution peuvent également produire des transitoires. Elles peuvent être provoquées par les vents intenses qui créent des interactions entre les lignes électriques en causant des arcs électriques. [25]

Transitoires dues aux Foudres :

La foudre est une manifestation de l'électricité d'origine atmosphérique, comportant une décharge électrique accompagnée d'une lumière vive (éclair) et d'une violente détonation (tonnerre). L'éclair est l'ensemble des manifestations lumineuses provoquées par les décharges d'origine atmosphérique.

Le tonnerre est le bruit induit par la décharge électrique, entre deux nuages où entre la base d'un nuage et le sol, ou à l'intérieur d'un même nuage, dont l'éclair est la manifestation lumineuse.

Les aspérités du sol ou des structures créent un " effet de pointe " qui amplifie de façon très importante le champ électrique local. Cette augmentation du champ électrique se traduit par un effet " Corona " - ionisation locale de l'air, un canal d'air ionisé reliant le nuage au sol permet l'écoulement du coup de foudre. On distingue quatre types caractéristiques de coups de foudre : négatif, positif, descendant et ascendant. En France, 90% des coups de foudre sont

négatifs descendants. L'amplitude du courant peut être très forte, variant de 2000 à 200000 ampères.

Transitoires dues au court-circuit :

Le défaut le plus fréquent est le court-circuit phase-terre (SLG) qui constitue la majeure partie de tous les défauts dans les lignes de transmission, particulièrement sur les lignes à haute tension. Il peut causer l'augmentation significative de la tension des autres phases dues à l'asymétrie existante d'un système si son neutre n'est pas solidement fondu. Des défauts sont détectés et par conséquent des lignes contrôlées sont coupées lorsqu'un équipement du système est soumis à un incident grave. Quand un défaut permanent se produit, le personnel d'entretien de l'entreprise doit réparer la ligne avant de la remettre en service.

L'endroit de défaut est également important pour les défauts transitoires. Il permet la facilité d'intervention au personnel d'entretien pour accomplir leurs tâches.

Transitoires dues aux commutations des capacités [10] :

Les problèmes de qualité de puissance sont devenus une question de souci pour les clients dans le système de puissance, des exemples typiques comprenant des fléchissements de tension et des coupures de commutation de condensateurs. Des condensateurs sont utilisés intensivement dans des systèmes de puissance pour le réglage de la tension et l'amélioration du facteur de puissance. Malheureusement, quand la commutation de condensateur se produit, les transitoires graves peuvent surgir et devenir ainsi une cause principale de perturbation des tensions et des courants.

Transitoires de manœuvres dues à l'enclenchement et au réenclenchement des lignes :

Ce type de surtensions apparaît lors de la mise sous tension d'une ligne ou lors de la remise sous tension de la ligne à la suite d'une ouverture sur défaut.

Dans le premier cas, les surtensions de manœuvre sont essentiellement dues au phénomène de réflexion d'onde.

Dans le deuxième cas, des phénomènes dus aux charges résiduelles de la ligne peuvent amplifier ces phénomènes de réflexion. [13]

Sources internes :

La grande majorité de coupures sont produites dans les installations. Les principales causes sont les commutations de dispositifs, les décharges statiques et arcs.

Chaque fois qu'un dispositif inductif est mis en marche, arrêté, chargé, ou déchargé, il se produit des transitoires.

Un arc peut produire des transitoires d'un certain nombre de sources. Les contacts défectueux dans les disjoncteurs, les commutateurs, et les contacteurs peuvent produire un arc.

Effets de l'activité transitoire [13,4] :

Les perturbations transitoires dans les systèmes de puissance peuvent endommager l'équipement principal, potentiellement ayant un grand impact sur la fiabilité du système. Ces transitoires peuvent être présentées pendant des opérations normales de commutation, l'interruption des courts-circuits, les coups de foudres, ou en raison de l'endommagement de l'équipement.

Dans l'existence des transitoires dans un réseau électrique Les appareils électroniques associés ne sont pas idéals et peuvent fonctionner de façon désordonnée. Des dommages ne sont pas aisément vus et peuvent avoir comme conséquence, la défuillance précoce des dispositifs affectés. Exceptionnellement la fréquence des défauts dans les alimentations électroniques est le symptôme le plus commun.

Les circuits intégrés(parfoisappelés « les puces électroniques ») peuvent être endommagés immédiatement ou prématurément. Le plus souvent, le défaut est attribué à " L'âge de l'équipement ".

I.1.9. Stabilité des systèmes électriques de puissance [3, 4, 16] :

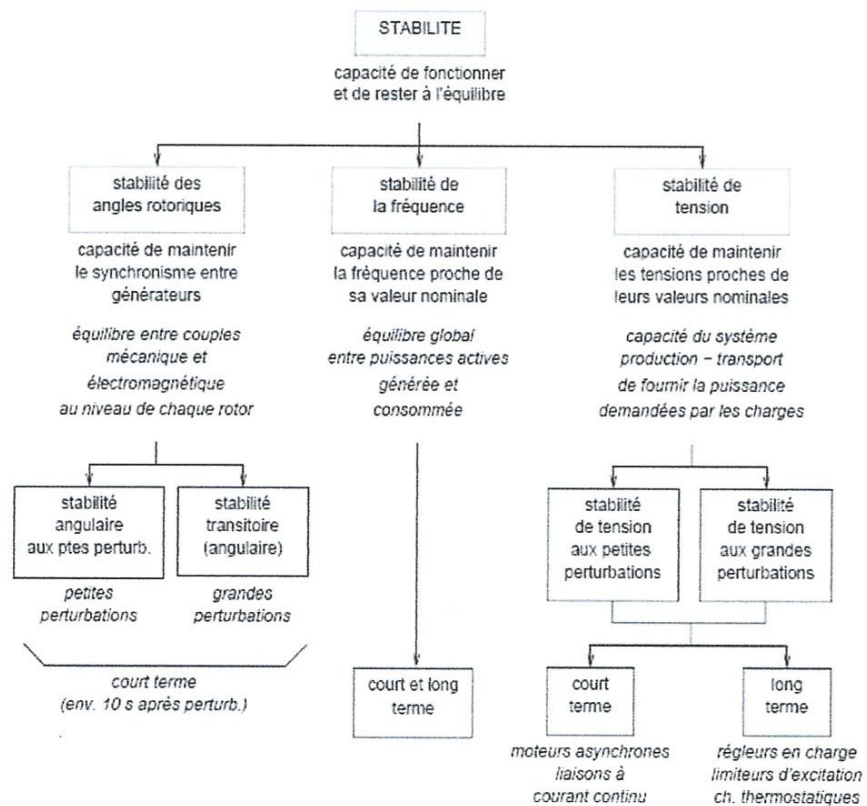


Figure 1.3 *Vue d'ensemble de la stabilité des réseaux de puissance.*

Définitions :

La stabilité d'un système de puissance est la propriété qui lui permet de rester dans un état d'équilibre, pour des conditions de fonctionnement normales, et de retrouver un état d'équilibre acceptable, suite à une perturbation.

Pour comprendre les mécanismes d'instabilité et mettre au point les remèdes adéquats, il est essentiel d'avoir à l'esprit une classification des différents types d'instabilité.

La figure I.3 propose une telle classification, mettant en évidence la nature physique de l'instabilité, la plage de temps des phénomènes et l'amplitude des perturbations. Cette classification va nous servir de fil conducteur tout au long de cette section.

Conclusion :

En conclusion, Un réseau d'énergie électrique est un système complexe à travers la modélisation de tous ses composants linéaires et non linéaires, à travers ses différents niveaux de tension et à travers les contraintes auxquelles il est soumis pour satisfaire l'équation d'équilibre production-consommation en tout temps et avec le maximum de fiabilité et de sécurité.

Un réseau électrique est ainsi soumis continuellement à une pléiade de problèmes et de situations qu'il faut savoir affronter et gérer, ce qui est généralement le problème de conduite et d'exploitation, mais aussi à des situations critiques de pannes et de défauts qu'il faut tout aussi contourner et solutionner sans délais.

Cependant, toute étude et solution à un de ces problèmes ne peut se faire que si l'on se réfère à la dernière situation généralement définie par un point de fonctionnement stable déterminé par un calcul d'écoulement de puissance. En ce qui concerne notre travail, nous nous sommes intéressés au problème de stabilité transitoire qu'il faut d'abord définir, comprendre avant de voir comment le solutionner.

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs méthodes de calcul mathématique pour l'intégration numérique qui nous permettent d'évaluer l'ensemble des équations différentielles du modèle complet d'un réseau électrique quelque soit son taille et sa complexité, ainsi qu'un exemple d'application par la méthode de Runge-Kutta 2^{ème} ordre afin de bien éclairer son fonctionnement.

1.2. Puissance réactive et tension dans les réseaux électriques :

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 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 [1].

La gestion du réseau électrique ne consiste pas seulement à faire en sorte que les transits soient inférieurs aux capacités de transport de chaque ouvrage du réseau. Il faut également surveiller plusieurs paramètres techniques, *dont la puissance réactive et 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.

Comme tout générateur d'énergie électrique, un réseau de puissance fournit de l'énergie aux appareils utilisateurs 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 concernant l'exploitation des réseaux électriques [2].

1.2.1. La tension :

La qualité de la tension:

La qualité d'énergie ou de la tension est le concept d'efficacité de classer les équipements sensibles d'une manière qui convient à l'opération de l'équipement.

Pour rappel, la tension possède quatre caractéristiques principales :

- Fréquence.
- amplitude.
- forme d'onde.
- symétrie. [2]

Pour le réseau synchrone algérien, la valeur moyenne de la fréquence fondamentale, mesurée, doit se trouver dans l'intervalle de 50 Hz $\pm 1\%$.

Le maintien de ce niveau de qualité est la responsabilité commune de tous les gestionnaires de réseaux concernés (zones de réglage), qui doivent participer aux réglages primaire et secondaire de la fréquence.

Le gestionnaire de réseau doit maintenir l'amplitude de la tension dans un intervalle de l'ordre 10 % autour de sa valeur nominale. Cependant, même avec une régulation parfaite,

plusieurs types de perturbations peuvent dégrader la qualité de la tension :

- 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) [2, 3].

Dégradation de la qualité de la tension [2,3] :

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, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc.
 - causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...).
 - matérielles (vieillissement d'isolants...).
 - humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...).
- Défauts dans le réseau électrique ou dans les installations des clients :
 - court-circuit dans un poste, une ligne aérienne, un câble souterrain, etc ;
 - causes atmosphériques (foudre, givre, tempête...) ;
 - matérielles (vieillissement d'isolants...) ;
 - humaines (fausses manœuvres, travaux de tiers...) ;
 - Installations perturbatrices : fours à arc.
 - Soudeuses.
 - variateurs de vitesse.
 - toutes applications de l'électronique de puissance, téléviseurs, éclairage fluorescent, démarrage ou commutation d'appareils, etc....

Les principaux phénomènes pouvant affecter la qualité de la tension - lorsque celle-ci est présente - sont brièvement décrits ci-après.

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 $50 \text{ Hz} \pm 1\%$ comme illustré sur la figure (1.4).

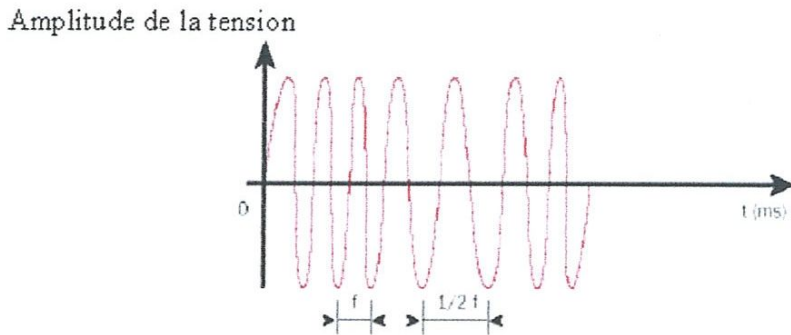


Figure 1.4: Exemple de fluctuation de la fréquence

Composante lente des variations de tension :

La valeur efficace de la tension varie continuellement, en raison de modifications des charges alimentées par le réseau. Les gestionnaires de réseau conçoivent et exploitent le système de manière telle que l'enveloppe des variations reste confinée dans les 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 tension dans une plage d'au moins 10 % de la tension nominale.

Fluctuation de tension (flicker) [2,5] :

Des variations rapides de tension, répétitives ou aléatoires (figure 1.5), sont provoquées par des variations rapides de puissance absorbée ou produite par des installations telles que les soudeuses, fours à arc, éoliennes, etc.

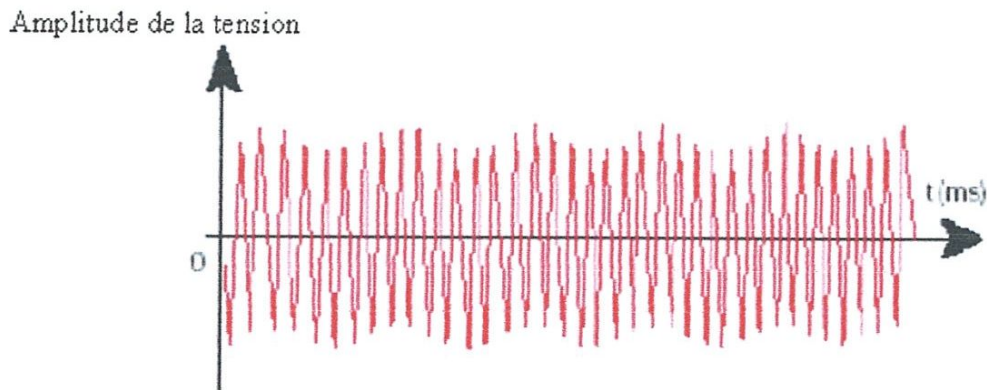


Figure 1.5 : Exemple de variations rapide de la tension

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

inférieure à quelque 10 %.

Creux de tension :

Les creux de tension sont produits par des courts-circuits survenant dans le réseau général ou dans les installations de la clientèle (figure 1.6). Seules les chutes de tension supérieures à 10 % sont considérées ici (les amplitudes inférieures rentrent dans la catégorie des "fluctuations de tension"). Leur durée peut aller de 10 ms à plusieurs secondes, en fonction de la localisation du court-circuit et du fonctionnement des organes de protection (les défauts sont normalement éliminés en 0.1 - 0.2 s en HT, 0.2 s à quelques secondes en MT) [5].

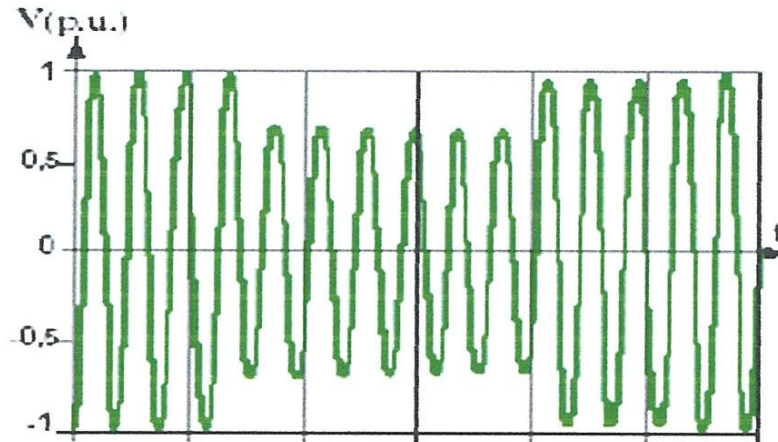


Figure 1.6: Creux de tension

Ils sont caractérisés par leurs: amplitude et durée et peuvent être monophasés ou triphasés selon le nombre de phases concerné.

Les creux de tension peuvent provoquer le déclenchement d'équipements, lorsque leur profondeur et leur durée excèdent certaines limites (dépendant de la sensibilité particulière des charges). Les conséquences peuvent être extrêmement coûteuses (temps de redémarrage se chiffrant en heures, voire en jours ; pertes de données informatiques ; dégâts aux produits, voire aux équipements de production...).

Interruption courte ou coupure brève :

L'interruption courte est la perte complète ou la disparition de la tension d'alimentation pendant une période de temps de 1/2 cycle jusqu'à 3 s. Elle se produit quand la tension d'alimentation ou le courant de charge diminue à moins de 0.1 p.u [3].

Le dégagement du défaut de tension et les coupures brèves sont principalement produits par les courts-circuits imputables aux incidents naturels du réseau et aux manœuvres d'organes de protection éliminant ces défauts. Ils sont également la conséquence d'appel de puissances importantes lors de la mise en service de certaines charges du réseau.

Bosses de tension :

La bosse de tension est une augmentation de la tension au dessus de la tension nominale 1.1 p.u pour une durée de 0.5 cycle à 60 s. Elle est caractérisée par son amplitude et sa durée.

Elle peut causer l'échauffement et la destruction des composants.

Chutes de tension :

Lorsque le transit dans une ligne électrique est assez important, la circulation du courant dans la ligne provoque une chute de la tension La tension est alors plus basse en bout de ligne qu'en son origine, et plus la ligne est chargée en transit de puissance, plus la chute de tension sera importante.

Un réseau dans lequel la consommation est éloignée de la production, présentera un profil de tension différent de celui d'un réseau dans lequel production et consommation sont uniformément réparties. Chaque centrale impose la tension à sa sortie, et la tension évolue dans le réseau en fonction de la consommation alimentée.

C'est pourquoi dans les réseaux maillés THT, la tension est différente suivant l'endroit où l'on se trouve. A la pointe de consommation, la tension est forte aux nœuds du réseau où les centrales débitent, et relativement basse aux points de consommation éloignés des centrales.

Tension et/ou courant transitoire :

Les surtensions transitoires illustrées sur la figure (1.7) sont des phénomènes brefs, dans leur durée et aléatoires dans leur apparition. Elles sont considérées comme étant des dépassements d'amplitude du niveau normal de la tension fondamentale à la fréquence 50Hz ou 60Hz pendant une durée inférieure à une seconde [2]. Quelques équipements tels que les dispositifs électroniques sont sensibles aux courants/tensions transitoires.

Amplitude de la

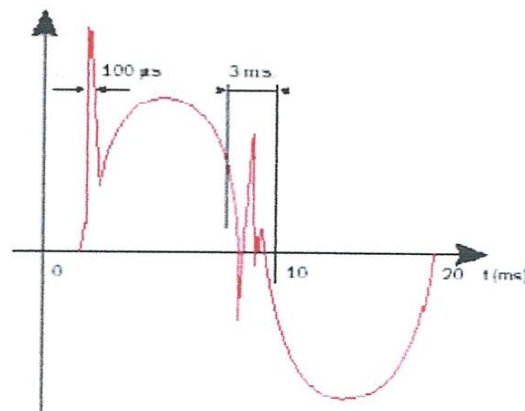


Figure 1.7 : Exemple de cas de surtensions transitoires

incidents de tension. On doit tenir en compte que les problèmes de tension doivent être corrigés localement, étant donné, que la majorité des moyens qu'on peut prendre pour résoudre ces problèmes ont une étendue fondamentalement locale.

La complexité du contrôle des tensions et de la puissance réactive en temps réel, oblige la décomposition géographique et temporaire du problème, en définissant une structure hiérarchique du contrôle *tension/puissance réactive*. La décomposition géographique peut être ajustée localement du problème réactif et la propre topologie du système électrique. D'autre part la décomposition temporaire, est imposée par les temps caractéristiques associés par rapport aux contrôles rencontrés dans chaque niveau hiérarchique.

1.3. Compensation des réseaux électriques :

L'énergie électrique est essentiellement distribuée aux utilisateurs sous forme de courant alternatif par des réseaux en haute, moyenne et basse tension. L'énergie consommée est composée d'une partie « active », transformée en chaleur ou mouvement, et d'une partie « réactive » transformée par les actionnaires électriques pour créer leurs propres champs électromagnétiques. L'utilisateur ne bénéficie que de l'apport énergétique de la partie « active », la partie « réactive » ne peut être éliminée, mais doit être compensée par des dispositifs appropriés. L'énergie totale soutirée au réseau de distribution sera ainsi globalement réduite.

Les économies d'énergie réalisées se chiffrent par dizaines de pour cent de la consommation globale, situant les procédés de compensation d'énergie réactive en première ligne du combat pour la réduction de l'impact des activités humaines sur l'écosystème de notre planète.

1.3.1. Moyens de compensation de la puissance réactive :

Le bilan global de la puissance réactive produite et consommée dans l'ensemble du système électrique doit être équilibré. Toutefois, l'équilibre local n'est pas naturel. Il en résulte des transits de la puissance réactive. Or, ces transits provoquent des chutes de tension et des pertes. Il faut, donc, éviter ces transits par la production de la puissance réactive, autant que possible, à l'endroit où elle est consommée.

Les variations de tension du réseau sont étroitement liées aux fluctuations de la puissance réactive dans le système de production et de transport. Ceci tient au fait que la puissance réactive intervient de manière importante dans l'expression de la chute de tension.

L'analyse des variations de la demande de la puissance réactive montre que le problème de l'adaptation offre-demande présente deux aspects qui nécessitent l'emploi de dispositifs aux caractéristiques très différentes :

- le premier consiste à suivre les fluctuations périodiques. Celles-ci sont connues, tout au moins pour les charges dans une large mesure prévisible. Une grande part de l'ajustement peut donc être réalisée à l'aide de moyen dont l'action est discontinue et le temps de réponse relativement long. Cette catégorie comprend les batteries de condensateurs et les inductances installées sur les réseaux [20].

- le second consiste à faire face aux variations brusques et aléatoires. Ceci nécessite la mise en œuvre de moyens dont le temps de réponse est très court. Cette catégorie comprend les groupes de production ainsi que les compensateurs synchrones et les compensateurs statiques [20].

1.3.2. Les dispositifs conventionnels :

Le réseau en lui-même est une source non négligeable de puissance réactive. Ainsi, en dehors de la production de l'énergie réactive par les générateurs, le réseau doit faire appel à d'autres sources ou plutôt d'autres moyens de compensation, qui finalement sont au moins aussi souvent consommateurs que fournisseurs d'énergie réactive.

Les groupes de production (générateurs) :

Les groupes de production sont bien situés pour satisfaire les besoins en énergie réactive. D'autant plus, leurs performances dynamiques leur permettent de faire face aux fluctuations brusques de la demande. En revanche, ils ne peuvent compenser que partiellement les charges réactives, en raison des chutes de tension importantes que créent les transits d'énergie réactive sur les réseaux.

Les condensateurs :

Ils ont pour rôle de fournir une partie de l'énergie réactive consommée par les charges dans le réseau. On distingue deux types :

1. Des batteries de condensateurs HT, raccordées aux jeux de barres HT des postes THT/HT.

Elles sont essentiellement destinées à compenser les pertes réactives sur les réseaux HT et THT.

2. Des batteries de condensateurs MT, raccordées aux jeux de barres MT des postes HT/MT ou THT/MT. Ces batteries servent à compenser l'appel global de l'énergie réactive des réseaux de distribution aux réseaux de transport. Elles sont localisées et dimensionnées individuellement en fonction du réglage de tension.

Les inductances :

Elles sont utilisées pour compenser l'énergie réactive fournie en heures creuses par les lignes à très haute tension ou par les câbles. Elles sont soit directement raccordées au réseau, soit branchées sur les tertiaires des transformateurs. Par conséquent permettent une limitation des surtensions dans le réseau.

Les compensateurs synchrones :

Les compensateurs synchrones sont des machines tournantes qui ne fournissent aucune puissance active, mais qui peuvent suivant qu'elles soient sous ou surexcitées, fournir ou absorber de la puissance réactive.

Les compensateurs statiques :

Ils sont constitués par l'ensemble de condensateurs et d'inductances commandées par thyristors, montés en tête-bêche dans chaque phase. Chacun d'entre eux étant ainsi conducteur pendant une demi-période. La puissance réactive absorbée par l'inductance varie en contrôlant la valeur efficace du courant qui la traverse par action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

Les contrôles dans le problème tension / puissance réactive :

Dans les réseaux électriques, la tension et la fréquence sont les principaux indicateurs de la bonne exploitation technique et économique du système de production et de transport. Techniquement, on situe les contrôles, *fréquence/puissance active et tension/puissance réactive*. Si la fréquence a une grande dépendance avec les variations de la puissance active générée, transportée et consommée, les modules de la tension seront affectés principalement par les variations de la puissance réactive.

Le problème du contrôle de la fréquence est très limité. Actuellement les systèmes de puissance sont équipés d'une large gamme de dispositifs dont leur action affecte principalement la puissance réactive. La sélection du type de contrôle automatique ou manuel du problème *tension/puissance réactive* est généralement conditionnée par le niveau des tensions du sous-système à contrôler. Dans le tableau 1.9, on peut regrouper les différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème *tension/puissance réactive*, et leurs principales caractéristiques.

Contrôles par génération de la puissance réactive

	Ajustable en continu	Capacitive	Inductive	Réponse rapide	Contrôle local
Générateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui, Dépend du système d'excitation.	Oui
Condensateurs synchrones	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui
Batteries de condensateurs	Non, plusieurs gradins (discret)	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Oui
Réactances	Non, (discret) Généralement une ou deux unités par ligne.	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	-
Ouverture des lignes	-	-	-	-	Décision de l'opérateur
Délestage de charge	Uniquement dans l'état d'urgence fonctionnement à petit pas.	Non	Oui	Dépend de l'automatisation	Dépend de l'automatisation
Réduction de tensions	Oui	Oui	Non	Dépend de l'automatisation	Dépend de l'automatisation

Contrôles qui modifient la circulation de la puissance réactive

Transformateurs avec prises dans le réseau de transport	Discret	-	-	Non Une prise par action.	Non
Transformateurs avec prises de transport/distribution	Discret	-	-	-	Oui

Tableau 1.9 : Différents dispositifs de contrôle utilisés dans le problème tension/puissance.
Réactive

1.3.3. Principe de la compensation :

L'objectif d'un gestionnaire de réseau de transport est d'optimiser l'exploitation de ses ouvrages et donc de maximiser la puissance active transmissible sur les lignes existantes ou à construire.

Lorsqu'un réseau alternatif est fortement maillé et que les lignes de transport sont courtes, la contrainte qui limite le transit en puissance sur une ligne se confond généralement avec le dimensionnement en courant de l'ouvrage.

Toutefois lorsque la longueur des lignes de transport ou, d'une manière plus générale, la distance entre les centrales de production et les centre de consommation, devient supérieure à quelques centaines de kilomètres d'autres phénomènes électrotechniques peuvent réduire sensiblement la puissance maximale dans les lignes et à la nécessité de préserver la stabilité du réseau lors des perturbations les plus fréquentes comme par exemple les défauts d'isolement en ligne.

On regroupe sous le terme générique « moyens de compensation » l'ensemble des dispositifs qui ont pour objet de repousser les limites induites par les contraintes de tension et de stabilité angulaire afin de rapprocher la puissance maximale transmissible du dimensionnement de la ligne.

1.3.4. Moyens de compensation :

Les compensateurs de puissance réactive (CSPR) :

Cet appareil a pour fonction de fournir ou d'absorber de façon contrôlée de la puissance réactive afin de réguler la tension du réseau à son point de connexion. Au contraire d'une compensation-shunt par batterie de condensateurs, il est commandé par un contrôle-commande local et rapide, du fait de la présence d'électronique de puissance.

Il est ainsi possible, avec ce type de dispositif, de réduire les phénomènes de flicker, d'améliorer sensiblement la stabilité transitoire d'un réseau, ou de maintenir la tension à sa valeur de consigne au point de connexion.

Il existe plusieurs structures de CSPR, qui correspondent à différents besoins. Néanmoins, ses principaux éléments constitutifs sont toujours les mêmes :

- Réactances Contrôlées par Thyristors (RCT).
- Capacités fixes ou Capacités Commutées par Thyristors (CCT).
- Filtres.
- Transformateur.
- Raccordement au réseau THT.

Le transformateur abaisseur (THT/MT), permet d'optimiser le dimensionnement des valves à thyristor.

Des éléments de filtrage sont nécessaires afin de limiter les distorsions harmoniques que produit ce type d'appareil, notamment dans le cas d'une RCT pour laquelle les angles peuvent être réglés de manière continue. Ces filtres peuvent prendre une part non négligeable dans le dimensionnement global du CSPR.

Dans le cas de la compensation d'une ligne très longue, il n'est pas nécessaire d'avoir un fonctionnement dans la zone capacitive car la ligne sera rarement exploitée au delà de sa puissance caractéristique.

Les avantages des CSPR par rapport aux batteries est de constituer une réserve dynamique de puissance disponible instantanément (temps de réaction ± 100 ms) en cas d'incident ce qui permet d'éviter les blocages régulateurs en limitant les chutes de tension. Parmi ces inconvénients, notons toutefois qu'il a un niveau des pertes élevé (fonction du réactif fourni).

Les STATCOMs :

Le STATCOM est une technologie plus récente basée sur l'utilisation de thyristors de type GTO ou de transistors de type IGBT qui permettent un fonctionnement en source de tension (VSC : Voltage Source Converter). Ces composants d'électronique de puissance peuvent être commandés à l'ouverture et à la fermeture. Contrairement aux thyristors « classiques », qui fonctionnent avec une commande pleine onde, ils acceptent des signaux de commande de fréquence plus élevée (de l'ordre du KHz pour IGBT).

Parmi ses avantages vis-à-vis des CSPR on peut citer :

- Un dimensionnement en Mvar en bobines et en capacités très limité.
- Un fonctionnement sans filtres passifs de faible rang pour limiter les harmoniques.
- Un fonctionnement symétrique en absorption et en fourniture.
- Un encombrement inférieur d'environ 50% par rapport à un CSPR « classique ».

Néanmoins il présente un taux de pertes supérieur au CSPR du fait de sa fréquence de commutation supérieure et un coût supérieur à ce jour.

Les bobines série :

L'installation de bobines en série sur une ligne pour compenser l'impédance série peut affecter le bon fonctionnement des disjoncteurs de la ligne dans le cas d'un défaut apparaissant juste en aval de la réactance. En effet, une tension oscillant à la fréquence propre de la bobine apparaît sur la borne aval du disjoncteur. Dans le cas des bobines de type sec isolées dans l'air,

Cette fréquence peut atteindre 100 KHz, ce qui peut conduire à dépasser le gabarit T30 de tenue en tension transitoire de Rétablissement (TTR) défini dans la norme des disjoncteurs. Pour

diminuer la fréquence propre de la bobine, une solution consiste à disposer en parallèle de la bobine d'une capacité de quelques nF de type diviseur capacitif.

1.3.5. Dispositif de Compensation :

Les batteries de condensateurs sont, actuellement, le moyen le plus économique et le plus simple de production d'énergie réactive dans les installations industrielles aussi bien que dans les réseaux public. Les moteurs synchrones peuvent, également fournir de l'énergie réactive, mais leur fonction principale, la force motrice n'est pas toujours compatible avec la demande instantanée de puissance réactive. Les compensateurs synchrones sont aujourd'hui de laissés malgré leurs mérites, parce qu'il y a sont trop coûteux en investissement et en frais d'exploitation.

Les batteries présentent les avantages de tous les équipements statiques :

- L'absence d'usine mécanique et un entretien réduit.
- Des faibles pertes.
- Un faible volume et une installation facile.

Les batteries comportent aussi certaines limitations :

- La puissance réactive fournie n'est pas négligeable simplement.
- La puissance réactive fournie varie avec la tension d'alimentation.
- La mise sous tension provoque un violent appel de courant.
- Si la fréquence de résonance avec l'inductance de la source est proche de celle d'un harmonique existant cet harmonique est amplifié et peut devenir gênant ou dangereux.

On distingue deux types de batteries suivant leur raccordement :

- Le branchement en dérivation pour les batteries Shunt.
- Le branchement en série entre la source et la charge pour les batteries en série.

Batteries Shunt :

Une batterie de condensateurs Shunt est une installation en dérivation du réseau. Elle est raccordée entre phase, entre phase et neutre ou entre phase et terre.

Les batteries peuvent être installées en simple ou en double étoile, quand elles sont raccordées entre phase et neutre ou terre. Elles sont installées en triangle quand elles sont entre phases.

Batteries en série :

Les batteries en série sont peu utilisées sur les réseaux, surtout à moyenne et basse tension. Par contre, sur les lignes de transport à grande distance, sous des tensions supérieures à 220 KV, leur utilisation est fréquente et leur puissance réactive est toujours importante.

Ces batteries jouent, en plus de l'amélioration de la capacité de transport d'énergie du réseau, d'autres rôles :

- Maintien de la tension d'un réseau à facteur de puissance normale ou faible.
- Répartition des charges, dans le cas de lignes fonctionnant en parallèle.

Les différences les plus importantes par rapport aux condensateurs pour les batteries sont les suivants :

➤ Il convient de prévoir un fonctionnement en régime surcharge, car la charge des condensateurs est liée à celle de la ligne ; cette surcharge peut être importante lorsque, par exemple, deux lignes fonctionnant en parallèle, il est demandé à l'une d'elle de supporter la totalité de la charge en cas de défaillance de l'autre pendant une période limitée.

➤ Lors d'un court circuit, il faut protéger la batterie lorsque l'intensité du courant dépasse la valeur admissible. Un système de protection composé de varistances, d'une inductance et d'un éclateur, placé aux bornes de la batterie, s'amorce et les condensateurs se déchargent.

1.3.6. Localisations de la compensation :

Les condensateurs de compensation peuvent être placés dans la partie BT et MT de l'installation mais on constate que si la valeur de batterie est supérieure à 1000 Kvar, il peut être préférable de compenser au niveau MT voire HT.

La compensation peut se faire en différents endroits de l'installation :

➤ En tête d'installation : Dans ce cas on parle de compensation globale. Cette solution est économiquement intéressante lorsqu'elle est stable et continue.

➤ En plusieurs ateliers : Ayant des régimes de charge différente. On parle de compensation partielle la mieux adaptée au variation de charge.

➤ Aux bornes des charges : Lorsque la puissance de certains récepteurs est importante par rapport à la puissance totale. Il s'agit alors de compensation locale ou individuelle.

1.3.7. La nécessité de la compensation de la puissance réactive pour une ligne de haute tension :

Le transport de l'énergie électrique à haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils de compensation pour une tension constante et pour garantir la stabilité. Parmi ces appareils, citons les compensateurs synchrones, les compensateurs statiques, les réactances inductives shunt, et les réactances capacitatives shunt et série. Leur capacité se mesure toujours en méga vars et elle est généralement variable afin que la puissance réactive absorbée par les inductances, ou débitée par les capacitances, puisse suivre les exigences du réseau.

Comme la charge varie au cours d'une journée, on doit brancher et débrancher des inductances et des capacitances selon le besoin. On peut effectuer cette compensation par des inductances et des capacitances variables.

Un des appareils le mieux adapté à cette fonction demeure le compensateur synchrone. Celui-ci agit en effet comme condensateur ou comme inductance selon qu'il est surexcité ou sous excité. Cependant, les thyristors de grande puissance ont permis le développement des compensateurs statiques.

DEUXIEME CHAPITRE :

Analyse comparative de deux modèles de ligne

Données initiales

Réactance linéique:

$$X_0 = 0.144 \log(D_m / R_{eq}) + 0.016/n \quad (\Omega/\text{km})$$

Susceptance linéique :

$$b_0 = 7,58 \cdot 10^{-6} / \log(D_m / R_{eq}) \quad (\Omega^{-1}/\text{km})$$

D_m : Distance moyenne géométrique entre phase

R_{eq} : Rayon équivalent de la phase

$$R_{eq} = \sqrt[n]{r_c \cdot d^{n-1}} \quad n \leq 3$$

$$R_{eq} = \sqrt[n]{r_c \pi^n a_{11}} \quad n > 3$$

d : Distance moyenne géométrique entre les conducteurs de la phase

r_c : Rayon d'un conducteur de la phase

n : nombre de conducteurs dans une phase

a : distance entre conducteurs en faisceau de la phase

π : produit

$$P_2^* \leq \frac{K_u}{\sin \alpha_0 L} = P_m^*$$

p_m = la puissance maximale en unité relative, déterminé par le rapport des tension

K_u = le rapport entre les tensions U_1 et U_2

X_0 = facteur de phase d'onde

Pour calculer la valeur réelle de la puissance maximale. On doit avoir la puissance de base P_C (la puissance naturelle)

$$P_C = \frac{U_2^2}{Z_C}$$

$$Z_C = \sqrt{\frac{X_0}{b_0}}$$

Ou ; Z_C : l'impédance caractéristique d'onde; X_0 : réactance linéique de la ligne;

b_0 : la susceptance correspondante.

2.1. Ligne 400 KV :

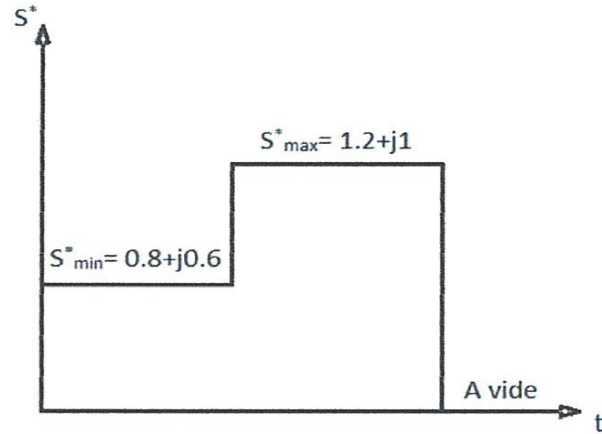
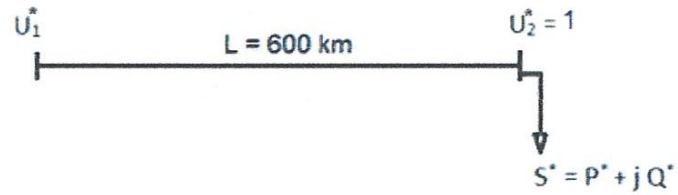
$L = 600 \text{ km}$

Sous tension de $U_N = 400 \text{ KV}$

Section $F = 600 \text{ mm}^2$

$2rc = 33.1 \text{ mm}$

$D_m = 9 \text{ m}$



le graphe de charge

2.1.1. Régime maximal et Régime minimal :

Configuration $n = 2$

$F = 600 \text{ mm}^2$

$D_m = 9 \text{ m}$

$$R_{eq} = \sqrt[n]{rc \cdot d^{n-1}} = \sqrt{1,655 \cdot 40}$$

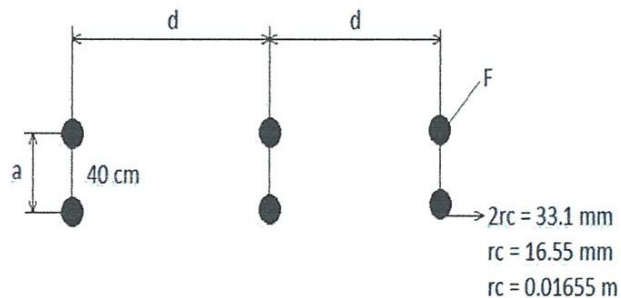
$R_{eq} = 8,1 \text{ cm}$

$$X_0 = 0.144 \log \frac{9 \cdot 10^2}{8,1} + \frac{0.016}{2}$$

$X_0 = 0.3025 \text{ } \Omega/\text{km}$

$$b_0 = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{9 \cdot 10^2}{8,1}}$$

$b_0 = 3.706 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega^{-1}/\text{km}$



$$Z_c = \sqrt{\frac{0.3025}{3.706 \cdot 10^{-6}}} \rightarrow Z_c = 285.6 \text{ } \Omega$$

ligne		n=2 $x_0=0,3025 \Omega/\text{km}$ $b_0=3,706 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{km}$ $P_c=560,224 \text{ MW}$
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
100	6	1,06
200	12	1,1
300	18	1,16
400	24	1,20
500	30	1,23
600	36	1,30

Configuration n= 3 :

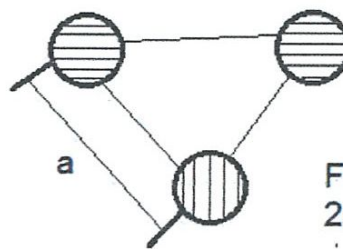
$$D_m = 9\text{m}$$

$$R_{eq} = \sqrt[3]{1,655 \cdot (40)^2}$$

$$R_{eq} = 13,83 \text{ cm}$$

$$\text{Donc : } X_0 = 0,144 \log \frac{9 \cdot 10^2}{13,83} + \frac{0,016}{3}$$

$$X_0 = 0,2663 \Omega/\text{km}$$



$$F = 600 \text{ mm}^2$$

$$2rc = 33,1 \text{ mm}$$

$$rc = 1,655 \text{ cm}$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\log \frac{9 \cdot 10^2}{13,83}}$$

$$b_0 = 4,1786 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{km}$$

$$\alpha_0 = \sqrt{X_0 \cdot b_0} \text{ rad/km} = \sqrt{X_0 \cdot b_0} \cdot 180^{\circ} / \pi \text{ (}^{\circ}/\text{km)}$$

$$\alpha_0 \cong 0.06 \text{ }^{\circ}/\text{km}$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{X_0}{b_0}} \quad \rightarrow \quad Z_c = 252,4 \Omega$$

$$P_c = \frac{(400)^2}{252,4} \quad \rightarrow \quad P_c = 633,91 \text{ MW}$$

Régime maximal :

$$P_2 = 672,268 \text{ MW}$$

$$Q_2 = 560,224 \text{ MVA}$$

$$\text{Pour } n=3 : Z_c = 252,4 \Omega ; P_c = 633,91 \text{ MW}$$

$$P_2^* = \frac{672,268}{633,91} = 1,06$$

$$Q_2^* = \frac{560,224}{633,91} = 0,883$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,883 \sin(6^\circ) + j 1,06 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,086 + j0,110$$

$$\ddot{U}_{(100)} = 1,09$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,883 \sin(12^\circ) + j 1,06 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,161 + j0,220$$

$$\ddot{U}_{(200)} = 1,18$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,883 \sin(18^\circ) + j 1,06 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,223 + j0,327$$

$$\ddot{U}_{(300)} = 1,265$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,883 \sin(24^\circ) + j 1,06 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,272 + j0,431$$

$$\ddot{U}_{(400)} = 1,343$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,883 \sin(30^\circ) + j 1,06 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,307 + j0,53$$

$$\ddot{U}_{(500)} = 1,41$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,883 \sin(36^\circ) + j 1,06 \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,328 + j0,623$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,46$$

Régime minimal :

$$P_2 = P_2^* \cdot Pc = 0,8 \cdot 560,224 = 448,1792 \text{ MW}$$

$$Q_2 = Q_2^* \cdot Pc = 0,6 \cdot 560,224 = 336,1344 \text{ MVA}$$

$$\text{Pour } n=3 \quad Pc = 633,91 \text{ MW}$$

$$P_2^* = \frac{448,179}{633,91} = 0,70$$

$$Q_2^* = \frac{336,134}{633,91} = 0,53$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,530 \sin(6^\circ) + j 0,70 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,049 + j0,073$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,05$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,530 \sin(12^\circ) + j 0,70 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,088 + j0,145$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,09$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,530 \sin(18^\circ) + j 0,70 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,114 + j0,216$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,13$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,530 \sin(24^\circ) + j 0,70 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,129 + j0,284$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,16$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,530 \sin(30^\circ) + j 0,70 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,131 + j0,35$$

$$U_{(500)} = 1,18$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,530 \sin(36^\circ) + j 0,70 \sin(36^\circ)$$

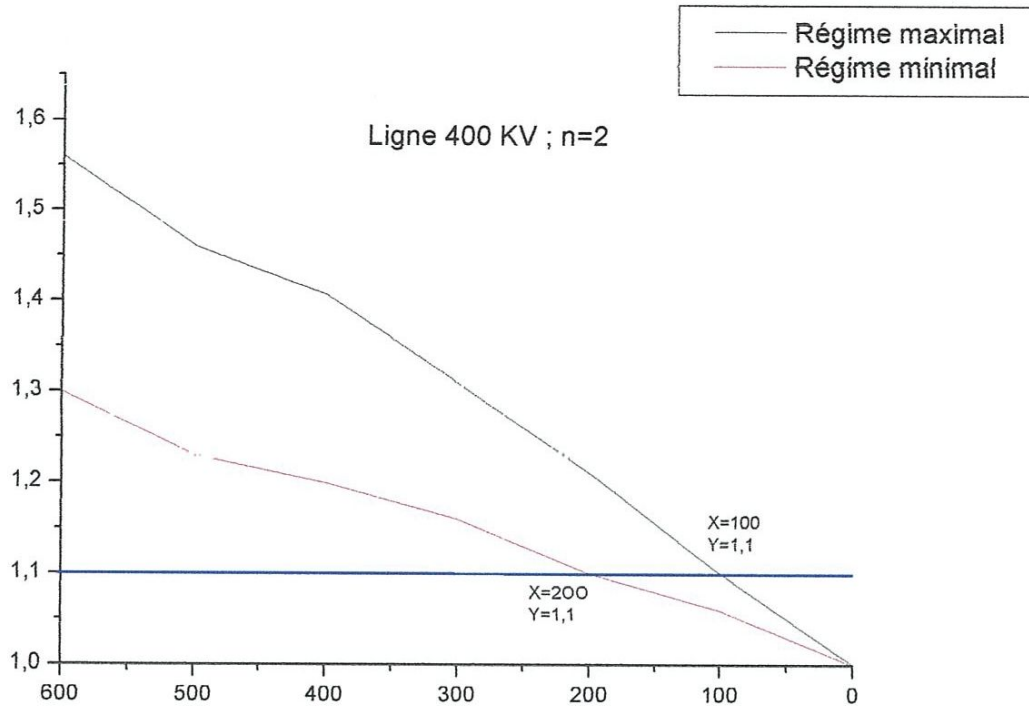
$$\dot{U}_{(600)} = 1,120 + j0,411$$

$$U_{(600)} = 1,193$$

n=3	$x_0=0,2663 \Omega/\text{km}$	$b_0=4,1786 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{km}$
$P_c=633,91 \text{ MW}$		

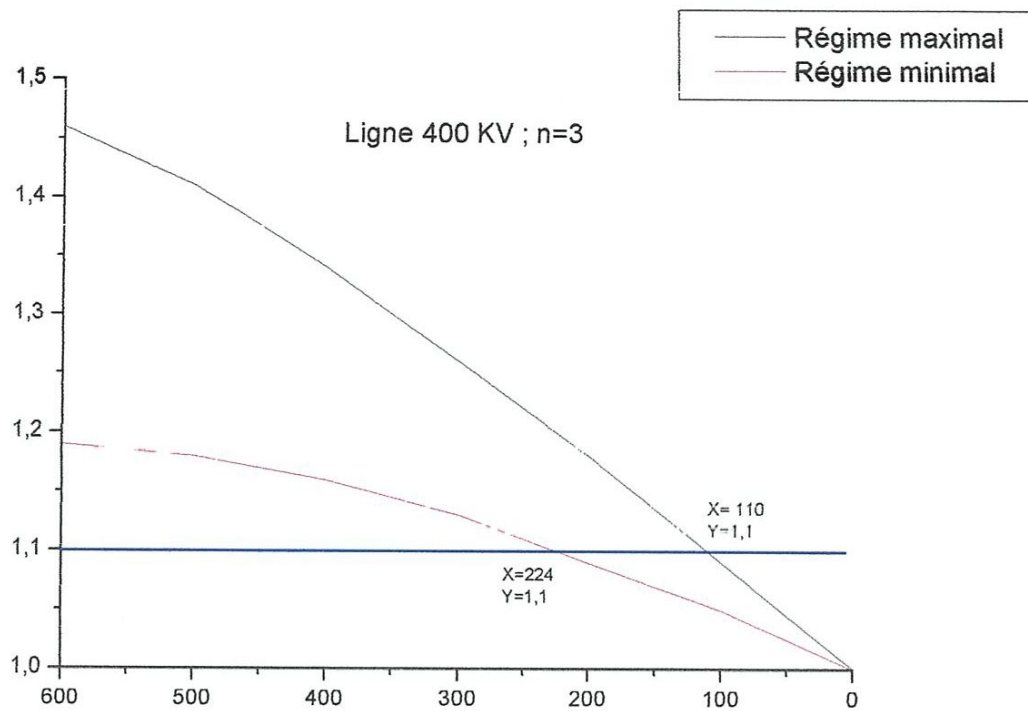
Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^\circ)$	$ \dot{U}_{(x)}^* $	$ \dot{U}_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,09	1,05
12	200	1,18	1,09
18	300	1,26	1,13
24	400	1,34	1,16
30	500	1,41	1,18
36	600	1,46	1,19

2.1.2. Epure de la tension :



Si on pose comme écart admissible de la tension $\Delta U_{ad} = 0,1 U_N = 0,1 U_2$:

- En régime maximal la tension de la ligne ne rentre dans les limites admissibles qu'au-delà de 500 Km (à partir de la source); avant cette distance, la tension reste excessivement grande jusqu'à atteindre un écart de 56% ;
- En régime minimal, la tension reste dans les limites admissible jusqu'à 200 Km à partir de la fin de la charge.



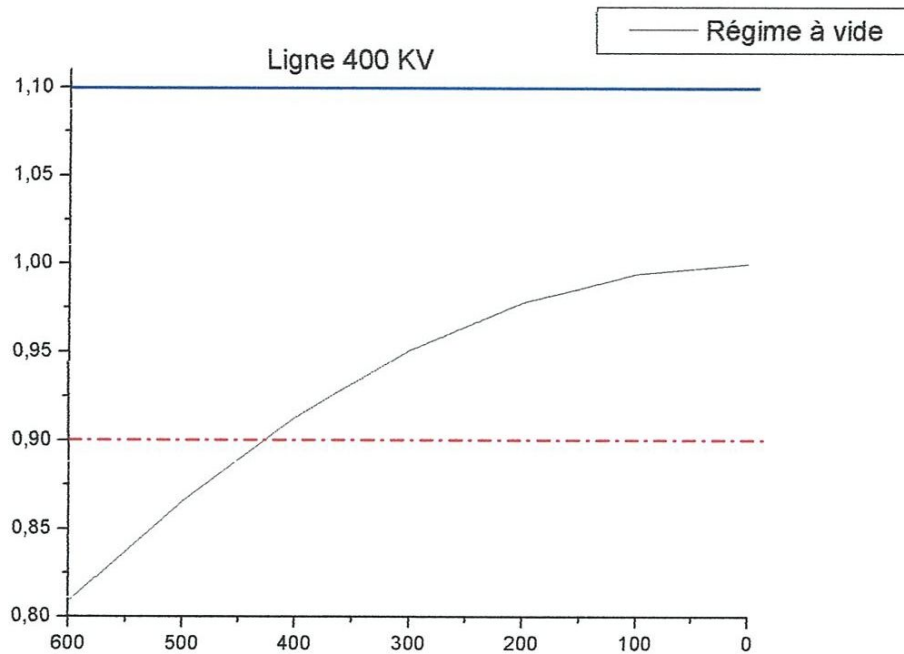
Si on pose comme écart admissible de la tension $\Delta U_{ad} = 0,1 U_N = 0,1 U_2$:

- En régime maximal la tension de la ligne ne rentre dans les limites admissibles qu'au-delà de 490 Km (à partir de la source); avant cette distance, la tension reste excessivement grande jusqu'à atteindre un écart de 46% ;
- En régime minimal, la tension reste dans les limites admissible jusqu'à 224 Km à partir de la fin de la charge.

2.1.3 .Régime à vide :

$$P_2^* = Q_2^* = 0$$

Ligne		$x_0 = 0,3025 \Omega/\text{km}$ $b_0 = 3,706 \cdot 10^{-6} \Omega^{-1}/\text{km}$ $P_c = 560,224 \text{ MW}$
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
100	6	0,994
200	12	0,978
300	18	0,951
400	24	0,913
500	30	0,866
600	36	0,809



En régime à vide, pour atteindre une tension nominale à la sortie de la ligne, il suffit d'appliquer à l'entrée une tension de valeur représentant 80 % de la tension nominale ; donc un écart de 20% mais cet écart est inadmissible.

2.2. Ligne 750 KV :

$$L = 600 \text{ km}$$

Sous tension de $U_N = 750 \text{ KV}$

$$\text{Section } F = 600 \text{ mm}^2$$

$$2rc = 33.1 \text{ mm}$$

$$Dm = 9 \text{ m}$$

2.2.1. Régime maximal et Régime minimal :

Configuration : n=2

$$X_0 = 0,3025 \text{ } \Omega/\text{km}$$

$$b_0 = 3,706 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega^{-1}/\text{km}$$

$$Z_c = 285,6 \text{ } \Omega$$

$$P_c = \frac{(750)^2}{285,6}$$

$$P_c = 1969,53 \text{ MW}$$

Régime maximal :

$$Z_c = 285,6 \text{ } \Omega \quad ; \quad P_c = 1969,53 \text{ MW}$$

$$P_2^* = \frac{672,268}{1969,53} = 0,341$$

$$Q_2^* = \frac{560,224}{1969,53} = 0,284$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,284 \sin(6^\circ) + j 0,341 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,024 + j0,035$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,024$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,284 \sin(12^\circ) + j 0,341 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,037 + j 0,070$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,039$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,284 \sin(18^\circ) + j 0,341 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,038 + j 0,105$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,043$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,284 \sin(24^\circ) + j 0,341 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,029 + j 0,138$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,038$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,284 \sin(30^\circ) + j 0,341 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,008 + j 0,170$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,022$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,284 \sin(36^\circ) + j 0,341 \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,975 + j 0,200$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,995$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{1969,53} = 0,227$$

$$Q_2^* = \frac{336,1344}{1969,53} = 0,170$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,170 \sin(6^\circ) + j 0,227 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,012 + j 0,023$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,012$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,170 \sin(12^\circ) + j 0,227 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,013 + j 0,047$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,014$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,170 \sin(18^\circ) + j 0,227 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,003 + j 0,070$$

$$U_{(300)} = 1,005$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,170 \sin(24^\circ) + j 0,227 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,982 + j 0,092$$

$$U_{(400)} = 0,986$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,170 \sin(30^\circ) + j 0,227 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,951 + j 0,113$$

$$U_{(500)} = 0,957$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,170 \sin(36^\circ) + j 0,227 \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,979 + j 0,133$$

$$U_{(600)} = 0,987$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0(x)^\circ$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,024	1,012
12	200	1,039	1,014
18	300	1,043	1,005
24	400	1,038	0,986
30	500	1,022	0,957
36	600	0,995	0,918

n=2	U _N = 750 kv
Z _c = 285,6 Ω	; P _c = 633,91 MW

Configuration : n=3

$$X_0 = 0,2663 \quad \Omega/\text{km}$$

$$b_0 = 4,1786 \cdot 10^{-6} \quad \Omega^{-1}/\text{km}$$

$$Z_c = 252,4 \quad \Omega$$

$$P_c = \frac{(V_{\text{BO}})^2}{252,4}$$

$$P_c = 2228,60 \text{ MW}$$

Régime maximal :

$$Z_c = 252,4 \quad \Omega \quad ; \quad P_c = 2228,60 \text{ MW}$$

$$P_2^* = \frac{672,268}{2228,60} = 0,301$$

$$Q_2^* = \frac{560,224}{2228,60} = 0,251$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,251 \sin(6^\circ) + j 0,301 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,020 + j 0,031$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,020$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,251 \sin(12^\circ) + j 0,301 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,030 + j 0,062$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,031$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,251 \sin(18^\circ) + j 0,301 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,028 + j 0,093$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,032$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,251 \sin(24^\circ) + j 0,301 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,015 + j 0,122$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,022$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,251 \sin(30^\circ) + j 0,301 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,991 + j 0,150$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,002$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,251 \sin(36^\circ) + j 0,301 \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,956 + j 0,176$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,972$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{2228,60} = 0,201$$

$$Q_2^* = \frac{336,1344}{2228,60} = 0,150$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0,150 \sin(6^\circ) + j 0,201 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,010 + j 0,021$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,010$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0,150 \sin(12^\circ) + j 0,201 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,009 + j 0,041$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,009$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0,150 \sin(18^\circ) + j 0,201 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,997 + j 0,062$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,998$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0,150 \sin(24^\circ) + j 0,201 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,974 + j 0,081$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,977$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0,150 \sin(30^\circ) + j 0,201 \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,941 + j 0,100$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,946$$

Pour $X = 600 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0,150 \sin(36^\circ) + j 0,201 \sin(36^\circ)$$

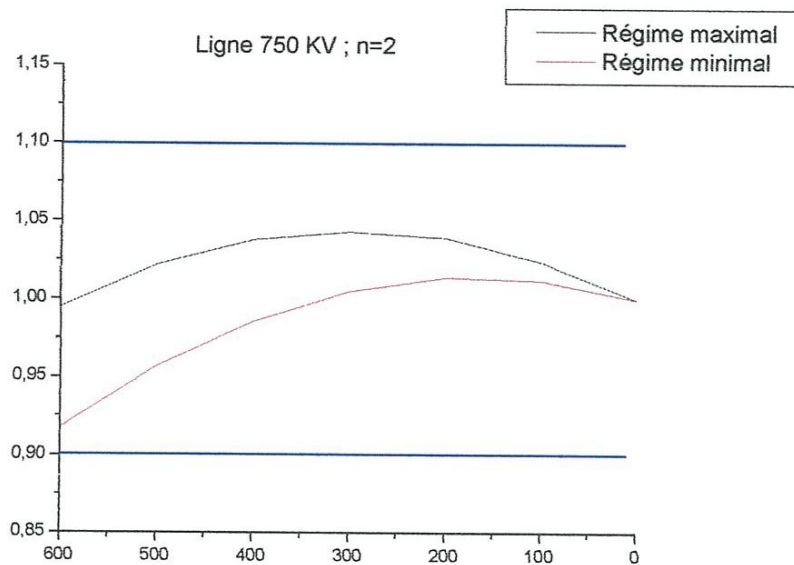
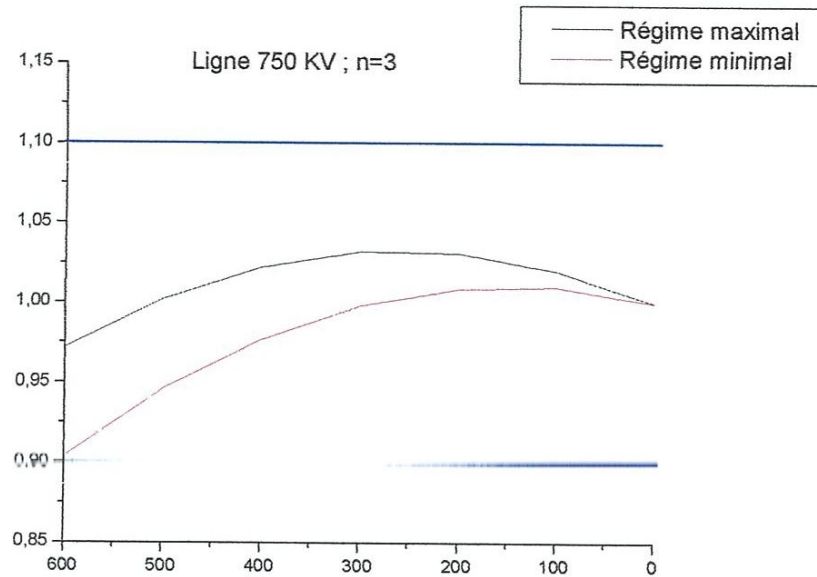
$$\dot{U}_{(600)} = 0,897 + j 0,118$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,904$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^\circ)$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,020	1,010
12	200	1,031	1,009
18	300	1,032	0,998
24	400	1,022	0,977
30	500	1,002	0,946
36	600	0,972	0,904

n=3	$U_N = 750 \text{ kv}$
$Z_c = 252,4 \Omega$	$P_c = 2228,60 \text{ MW}$

2.2.2. Epure de la tension :



On constate donc que l'utilisation de la tension $U_N=750$ permet d'insérer la tension le long de la ligne dans les limites admissibles. Ce qui signifie que le passage vers les niveaux plus élevés de la tension permet d'améliorer considérablement la performance de la ligne ; laquelle performance s'exprime dans l'amélioration du plan de tension, la stabilité de la liaison, la diminution des pertes et dans la disponibilité de la réserve...

On peut relever également que le faisceau a un impact positif sur ces caractéristiques.

2.2.3. Régime à vide :

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + 0 \sin(6^\circ) + j 0 \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,994$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + 0 \sin(12^\circ) + j 0 \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,978$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + 0 \sin(18^\circ) + j 0 \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,951$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + 0 \sin(24^\circ) + j 0 \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,913$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + 0 \sin(30^\circ) + j 0 \sin(30^\circ)$$

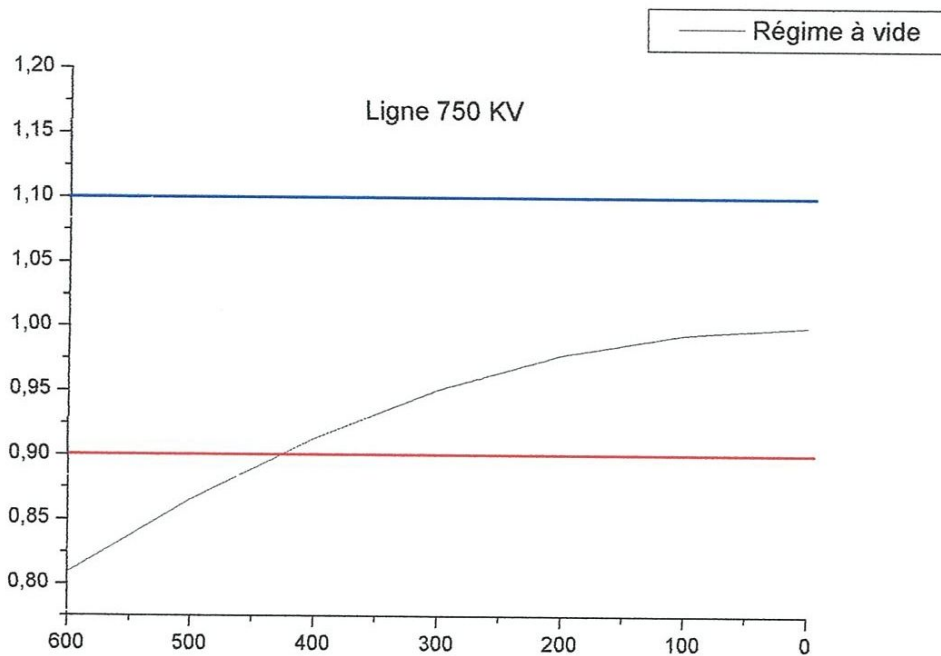
$$\dot{U}_{(500)} = 0,866$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + 0 \sin(36^\circ) + j 0 \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,809$$

Ligne		Régime a vide	
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	
0	0	1	
6	100	0,994	
12	200	0,978	
18	300	0,951	
24	400	0,913	
30	500	0,866	
36	600	0,809	



Il est clair donc qu'en régime à vide que l'écart de la variation peut-être considérable, à cause des capacités de ligne ; puisque non compensés par les courant de conduction inductifs.

Dans ce cas il est indispensable d'installer des consommateurs régulateurs de caractère inductif pour absorber les courants de fuite.

TROISIEME CHAPITRE :

Contrôle de la tension par l'énergie réactive

3.1. Ligne 400 KV :

L= 600 km

Sous tension de $U_N=400$ KV

Section $F=600$ mm²

$2rc = 33.1$ mm

$Dm= 9$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

3.1.1. Régime maximal et régime minimal :

Configuration n= 2

Pour : $Ku = 0,8$

Régime maximal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (1,2)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 0,68$$

$$Q_2^* = -0,7337$$

$$S_2 = 1,2 - 0,7337$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,7337) \sin(6^\circ) + j (1,2) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9178 + j0,1254$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9263$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,7337) \sin(12^\circ) + j(1,2) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,8256 + j0,2494$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,8624$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,7337) \sin(18^\circ) + j(1,2) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,8136$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,7337) \sin(24^\circ) + j(1,2) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,6151 + j0,488$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,7851$$

Pour X = 500 km

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,7337) \sin(30^\circ) + j(1,2) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,4991 + j0,6$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,7804$$

Pour X = 600 km

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,7337) \sin(36^\circ) + j(1,2) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,3777 + j0,7053$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Régime minimal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } 36 + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (0,8)^2}$$

$$Q_2^* = -0,275$$

$$S_2 = 0,8 - j0,275$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,275) \sin(6^\circ) + j (0,8) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9657 + j0,0836$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9693$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,275) \sin(12^\circ) + j (0,8) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9209 + j0,1663$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9357$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,275) \sin(18^\circ) + j (0,8) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,866 + j0,2472$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9005$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,275) \sin(24^\circ) + j (0,8) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8016 + j0,3253$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8649$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,275) \sin(30^\circ) + j (0,8) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,7285 + j0,4$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8310$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,275) \sin(36^\circ) + j (0,8) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,6473 + j0,4702$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

		$n=2$	$x_0=0,3025 \text{ } \Omega/\text{km}$	$b_0=3,706 \cdot 10^{-6} \text{ } \Omega^{-1}/\text{km}$
			$P_c=560,224 \text{ MW}$	$S_{ch}=0,8+j0,6$ $ku = 0,8$
Ligne		Régime maximal		Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $		$ U_{(x)}^* $
0	0	1		1
6	100	0,9263		0,9693
12	200	0,8624		0,9357
18	300	0,8136		0,9005
24	400	0,7851		0,8649
30	500	0,7804		0,8310
36	600	0,8		0,8

Pour : $Ku = 1$

Régime maximal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 36}\right)^2 - (1,2)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,20$$

$$Q_2^* = -0,17$$

$$S_2 = 1,2 - j0,18$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (-0,17) \sin(6^{\circ}) + j(1,2) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9767 + j0,1254$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9847$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,17) \sin(12^\circ) + j(1,2) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9428 + j0,2494$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9752$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,17) \sin(18^\circ) + j(1,2) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,8985 + j0,3708$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,972$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,17) \sin(24^\circ) + j(1,2) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8444 + j0,488$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9752$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,17) \sin(30^\circ) + j(1,2) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,781 + j0,6$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9848$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,17) \sin(36^\circ) + j(1,2) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,709 + j0,7053$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Régime minimal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} 36 + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 36}\right)^2 - (0,8)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,50$$

$$Q_2^* = 0,1253$$

$$S_2 = 0,8 - j0,1253$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,1253) \sin(6^\circ) + j (0,8) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0076 + j0,0836$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,011$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,1253) \sin(12^\circ) + j (0,8) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0041 + j0,1663$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0177$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,1253) \sin(18^\circ) + j (0,8) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9897 + j0,2472$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0201$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,1253) \sin(24^\circ) + j (0,8) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9645 + j0,3253$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0178$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,1253) \sin(30^\circ) + j (0,8) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9286 + j0,4$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,011$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,1253) \sin(36^\circ) + j (0,8) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8826 + j0,4702$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	0,9847	1,011
12	200	0,9752	1,0177
18	300	0,972	1,0201
24	400	0,9752	1,0178
30	500	0,9848	1,011
36	600	1	1

Pour : $Ku = 1,05$

Régime maximal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (1,2)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,32$$

$$Q_2^* = -0,0527$$

$$S_2 = 1,2 - j0,0527$$

Pour $X = 100 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (-0,0527) \sin(6^{\circ}) + j(1,2) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,989 + j0,1254$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9969$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0527) \sin(12^\circ) + j(1,2) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9671 + j0,2494$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9987$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0527) \sin(18^\circ) + j(1,2) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9347 + j0,3708$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0055$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0527) \sin(24^\circ) + j(1,2) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8921 + j0,488$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0168$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0527) \sin(30^\circ) + j(1,2) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8396 + j0,6$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0319$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0527) \sin(36^\circ) + j(1,2) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,778 + j0,7053$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Régime minimal :

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} 36 + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (0,8)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,59$$

$$Q_2^* = 0,2211$$

$$S_2 = 0,8 - j0,218$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,2211) \sin(6^\circ) + j (0,8) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0176 + j0,0836$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,021$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,2211) \sin(12^\circ) + j (0,8) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0241 + j0,1663$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0375$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,2211) \sin(18^\circ) + j (0,8) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0193 + j0,2472$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0488$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,2211) \sin(24^\circ) + j (0,8) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0034 + j0,3253$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0548$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,2211) \sin(30^\circ) + j (0,8) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9765 + j0,4$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0552$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,2211) \sin(36^\circ) + j (0,8) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9389 + j0,4702$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	0,9969	1,021
12	200	0,9987	1,0375
18	300	1,0055	1,0488
24	400	1,0168	1,0548
30	500	1,0319	1,0552
36	600	1,05	1,05

Configuration n= 3 :

Pour : Ku = 0 ,8

Régime maximal :

On a : $P_2 = P_2^* \cdot P_c = 1,2 \cdot 560,224 = 672,268$ MW

$Q_2 = Q_2^* \cdot P_c = 1 \cdot 560,224 = 560,224$ MVAR

$$P_2^* = \frac{672,268}{633,91} = \mathbf{1,0605}$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 35}\right)^2 - (1,06)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 0,855$$

$$Q_2^* = -0,5229$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,5229) \sin(6^\circ) + j (1,0605) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9398 + j0,1108$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9463$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,5229) \sin(12^\circ) + j (1,0605) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,8694 + j0,2204$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,8969$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,5229) \sin(18^\circ) + j (1,0605) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,7894 + j0,3277$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,8547$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,5229) \sin(24^\circ) + j (1,0605) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,7008 + j0,4313$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8228$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,5229) \sin(30^\circ) + j (1,0605) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,6045 + j0,5302$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,804$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,5229) \sin(36^\circ) + j (1,0605) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,5016 + j0,6233$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Régime minimal :

$$\text{On a : } P_2 = P_2^* \cdot P_c = 0,8 \cdot 560,224 = 448,1792 \text{ MW}$$

$$Q_2 = Q_2^* \cdot P_c = 0,6 \cdot 560,224 = 336,1344 \text{ MVAR}$$

$$P_2^* = \frac{448,1792}{633,91} = 0,7070$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,16$$

$$Q_2^* = -0,2131$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,2131) \sin(6^\circ) + j (0,7070) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9722 + j0,0739$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,975$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,2131) \sin(12^\circ) + j (0,7070) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9338 + j0,1469$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9452$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,2131) \sin(18^\circ) + j (0,7070) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,8852 + j0,2184$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9117$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,2131) \sin(24^\circ) + j (0,7070) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8268 + j0,2875$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8753$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,2131) \sin(30^\circ) + j (0,7070) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,7594 + j0,3535$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8376$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,2131) \sin(36^\circ) + j (0,7070) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,6837 + j0,4155$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

n=3 ; U_N = 400 kv ; ku = 0,8 ; Pc=633,91 MW

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	α ₀ x(°)	U* _(x)	U* _(x)
0	0	1	1
6	100	0,9463	0,975
12	200	0,8969	0,9452
18	300	0,8547	0,9117
24	400	0,8228	0,8753
30	500	0,804	0,8376
36	600	0,8	0,8

Pour : Ku = 1

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{633,91} = 1,0605$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 35}\right)^2 - (1,06)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,3322$$

$$Q_2^* = -0,0453$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,0453) \sin(6^\circ) + j(1,0605) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9897 + j0,1108$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9917$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0453) \sin(12^\circ) + j (1,0605) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9687 + j0,2204$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9934$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0453) \sin(18^\circ) + j (1,0605) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,937 + j0,3277$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9926$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0453) \sin(24^\circ) + j (1,0605) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8951 + j0,4313$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9935$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0453) \sin(30^\circ) + j (1,0605) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8433 + j0,5302$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9961$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0453) \sin(36^\circ) + j (1,0605) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,7823 + j0,6233$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{633,91} = 0,7070$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 25}\right)^2 - (1,06)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,55$$

$$Q_2^* = 0,1713$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,1713) \sin(6^\circ) + j (0,7070) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0124 + j0,0739$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,015$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,1713) \sin(12^\circ) + j (0,7070) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0137 + j0,1469$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0242$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,1713) \sin(18^\circ) + j (0,7070) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0039 + j0,2184$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0273$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,1713) \sin(24^\circ) + j (0,7070) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9832 + j0,2875$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0243$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,1713) \sin(30^\circ) + j (0,7070) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9516 + j0,3535$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0151$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,1713) \sin(36^\circ) + j (0,7070) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9097 + j0,4155$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	0,9917	1,015
12	200	0,9934	1,0242
18	300	0,9926	1,0273
24	400	0,9935	1,0243
30	500	0,9961	1,0151
36	600	1	1

Pour : $Ku = 1,05$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{633,91} = 1,0605$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 35}\right)^2 - (1,06)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,43$$

$$Q_2^* = 0,0614$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (0,0614) \sin(6^{\circ}) + j(1,0605) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0009 + j0,1108$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,007$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,0614) \sin(12^\circ) + j (1,0605) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9909 + j0,2204$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0151$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,0614) \sin(18^\circ) + j (1,0605) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9700 + j0,3277$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0238$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,0614) \sin(24^\circ) + j (1,0605) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9385 + j0,4313$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0328$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,0614) \sin(30^\circ) + j (1,0605) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8967 + j0,5302$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0417$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,0614) \sin(36^\circ) + j (1,0605) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8451 + j0,6233$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{633,91} = 0,7070$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{r_{11}}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 35}\right)^2 - (0,70)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,64$$

$$Q_2^* = 0,2643$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,2643) \sin(6^\circ) + j (0,7070) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0221 + j0,0739$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0247$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,2643) \sin(12^\circ) + j (0,7070) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,033 + j0,1469$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0433$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,2643) \sin(18^\circ) + j (0,7070) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0327 + j0,2184$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0555$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,2643) \sin(24^\circ) + j (0,7070) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,021 + j0,2875$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0607$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,2643) \sin(30^\circ) + j (0,7070) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,9981 + j0,3535$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0588$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,2643) \sin(36^\circ) + j (0,7070) \sin(36^\circ)$$

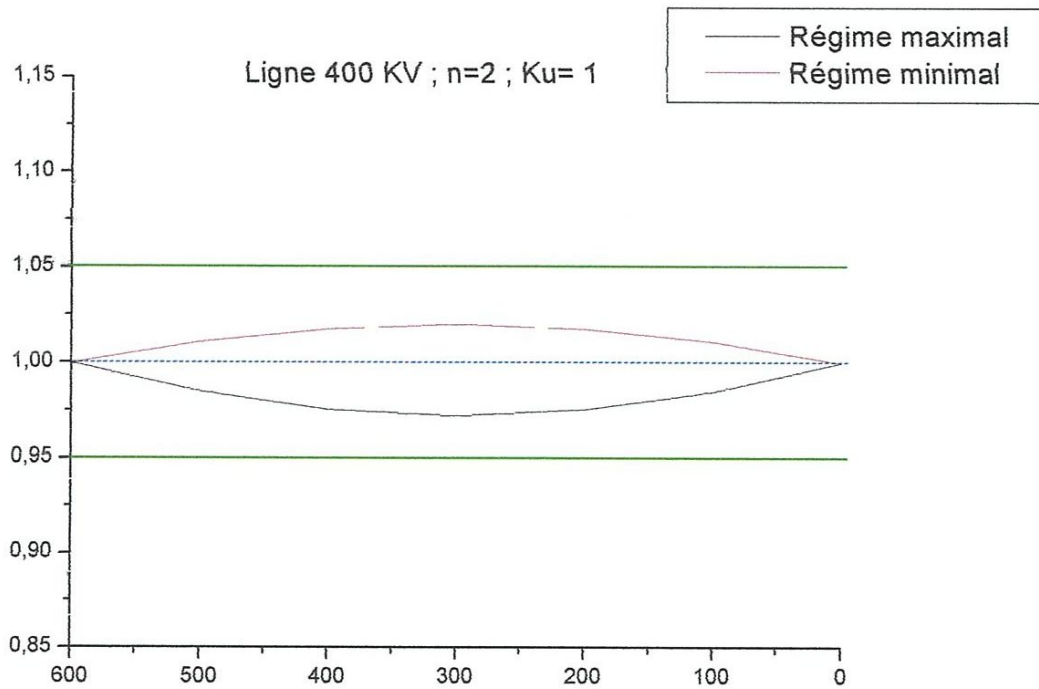
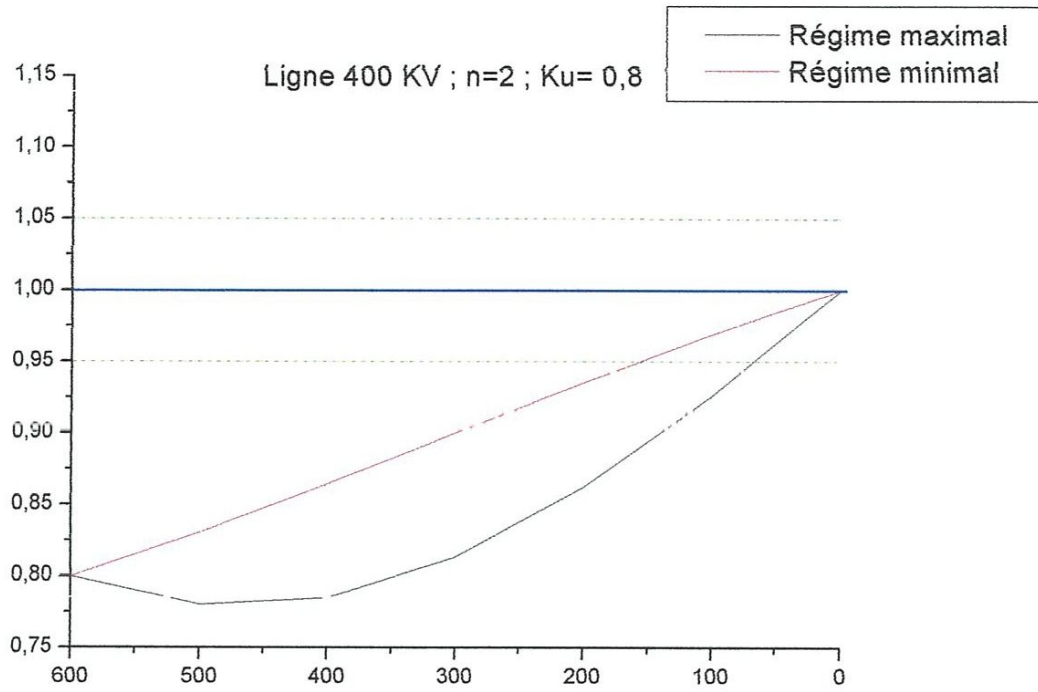
$$\dot{U}_{(600)} = 0,9643 + j0,4155$$

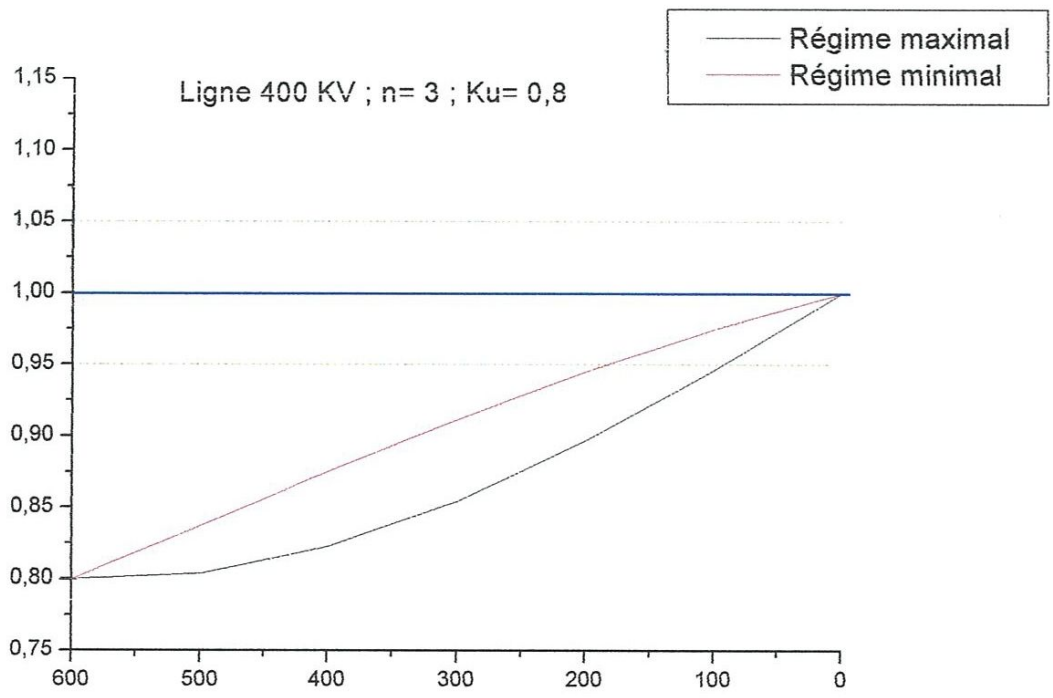
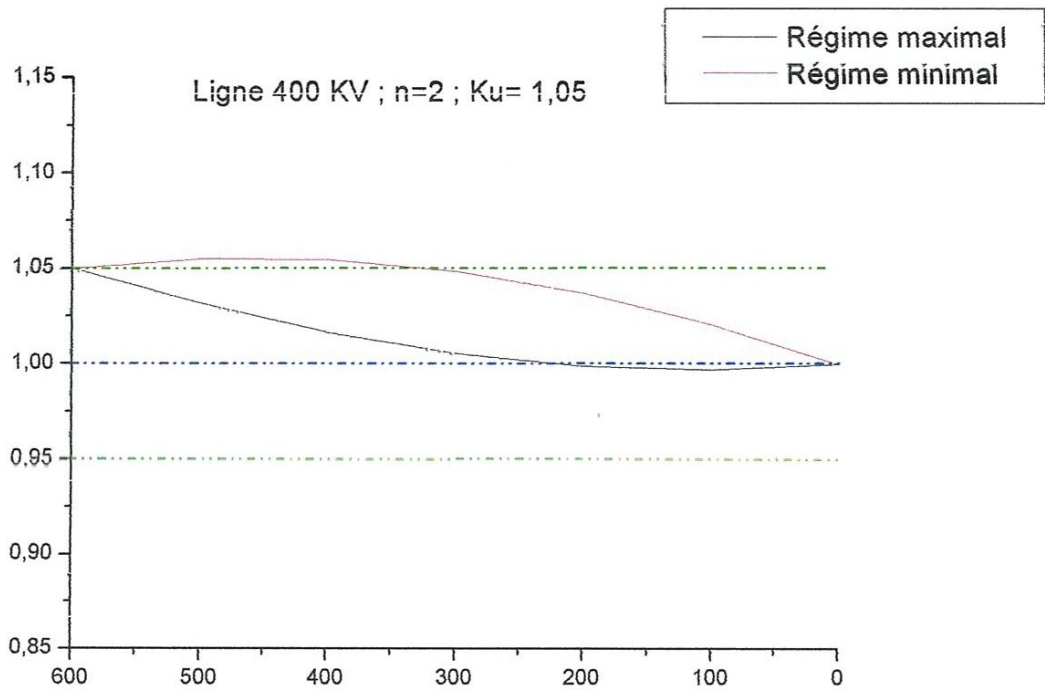
$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

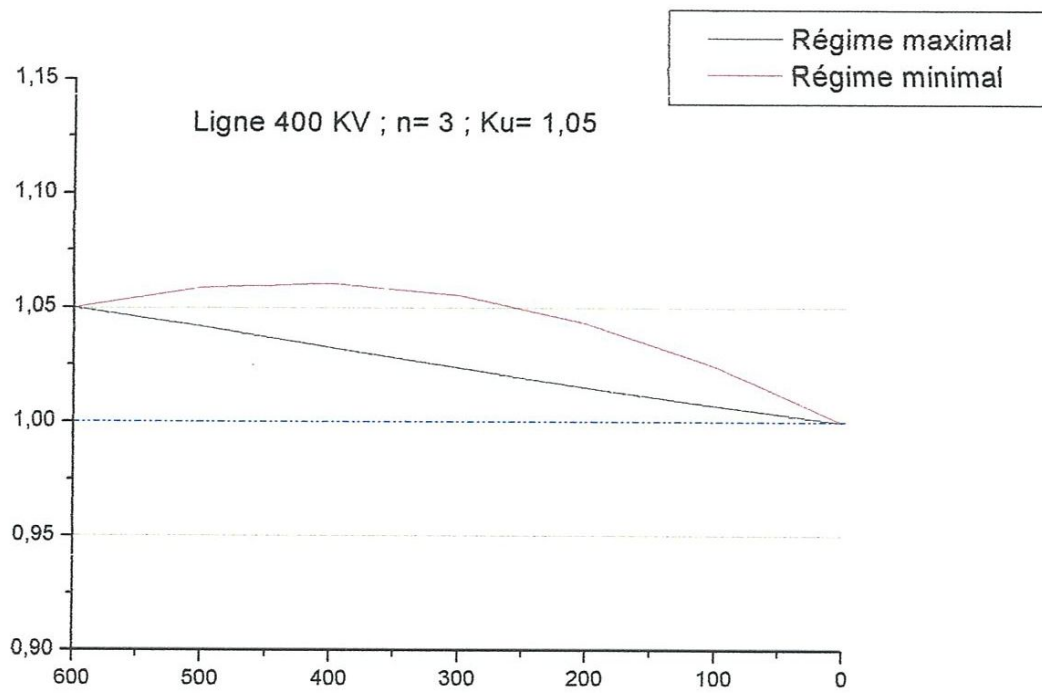
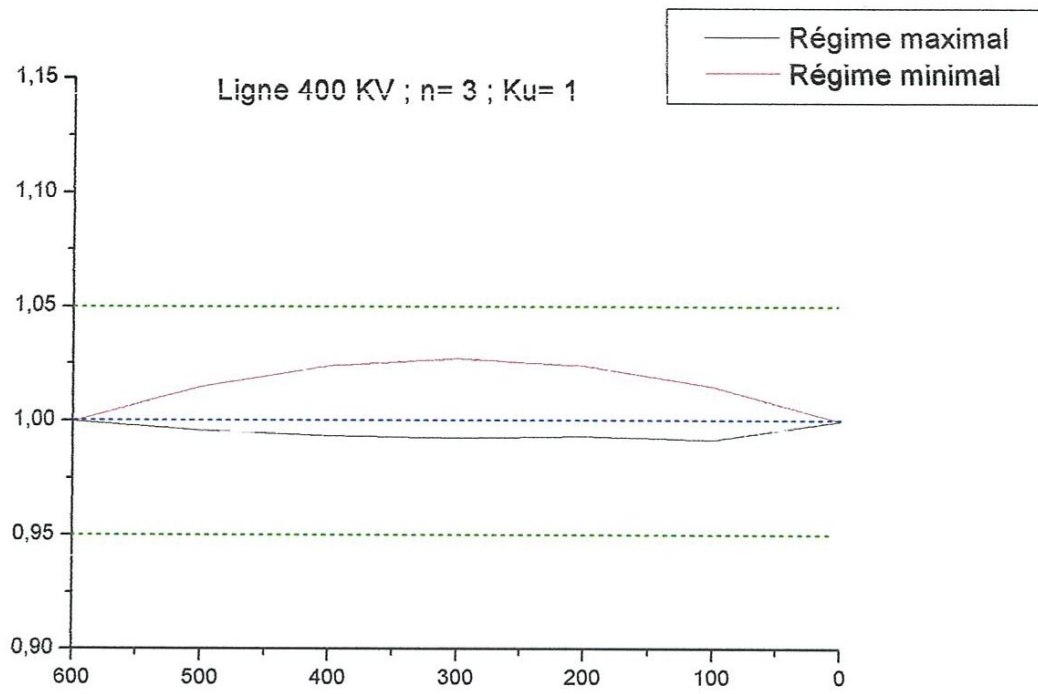
$n=3$; $U_N = 400 \text{ kv}$; $k_u = 1,05$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,007	1,0247
12	200	1,0151	1,0433
18	300	1,0238	1,0555
24	400	1,0328	1,0607
30	500	1,0417	1,0588
36	600	1,05	1,05

3.1.2. Epure de la tension :







3.1.3. Régime à vide :

Pour : $K_u=0,8$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } 36 + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (0)^2}$$

$$Q_2^* = -0,0151$$

Pour $X = 100 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,0151) \sin(6^\circ) + j(0) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9929$$

Pour $X = 200 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0151) \sin(12^\circ) + j(0) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,975$$

Pour $X = 300 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0151) \sin(18^\circ) + j(0) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9463$$

Pour $X = 400 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0151) \sin(24^\circ) + j(0) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9074$$

Pour $X = 500 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0151) \sin(30^\circ) + j(0) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8584$$

Pour $X = 600 \text{ km}$:

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0151) \sin(36^\circ) + j(0) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Ligne		n=2 ; n=3 $P_2^* = 0$; $Q_2^* = -0,02$; $ku = 0,8$
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
100	6	0,9929
200	12	0,975
300	18	0,9463
400	24	0,9074
500	30	0,8584
600	36	0,8

Pour : $Ku=1$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } 36 + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 36}\right)^2 - (0)^2}$$

$$Q_2^* = -0,3251$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (0,3251) \sin(6^{\circ}) + j (0) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0285$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^{\circ}) + (0,3251) \sin(12^{\circ}) + j (0) \sin(12^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0457$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^{\circ}) + (0,3251) \sin(18^{\circ}) + j (0) \sin(18^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0515$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^{\circ}) + (0,3251) \sin(24^{\circ}) + j (0) \sin(24^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0457$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3251) \sin(30^\circ) + j (0) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0285$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3251) \sin(36^\circ) + j (0) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Ligne		Régime à vide
X(km)	$\alpha_0 X(^\circ)$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
6	100	1,0285
12	200	1,0457
18	300	1,0515
24	400	1,0457
30	500	1,0285
36	600	1

n=2 ; n=3 ; $U_N = 400 \text{ kv}$; $ku = 1$

Pour : Ku=1,05

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } 36 + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (0)^2}$$

$$Q_2^* = -0,4092$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,4092) \sin(6^\circ) + j (0) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0372$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,4092) \sin(6^\circ) + j (0) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0632$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,4092) \sin(18^\circ) + j (0) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0775$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,4092) \sin(24^\circ) + j (0) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0799$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,4092) \sin(30^\circ) + j (0) \sin(30^\circ)$$

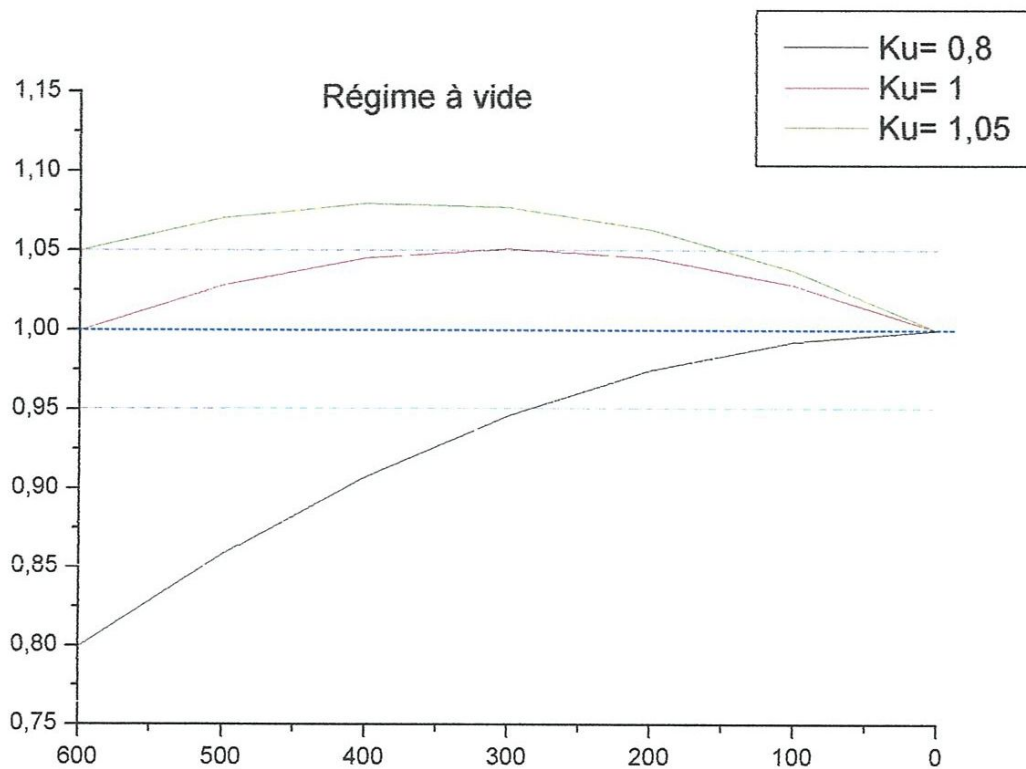
$$\dot{U}_{(500)} = 1,0706$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,4092) \sin(36^\circ) + j (0) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Ligne		Régime à vide
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U^*_{(x)} $
0	0	1
6	100	1,0372
12	200	1,0632
18	300	1,0775
24	400	1,0799
30	500	1,0706
36	600	1,05



3.2. Ligne 750 KV :

L= 600 km

Sous tension de $U_N=750$ KV

Section $F=600$ mm²

$2rc = 33.1$ mm

Dm= 9

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

3.2.1. Régime maximal et régime minimal :

Configuration n=2

Pour : $Ku = 0,8$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{1969,53} = 0,3413$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (0,3413)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,32$$

$$Q_2^* = -0,0586$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,0586) \sin(6^\circ) + j (0,3413) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9883 + j0,0356$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9889$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0586) \sin(12^\circ) + j (0,3413) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9659 + j0,0709$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9684$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0586) \sin(18^\circ) + j (0,3413) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9329 + j0,1054$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9388$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0586) \sin(24^\circ) + j (0,3413) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8897 + j0,1388$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9004$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0586) \sin(30^\circ) + j (0,3413) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8367 + j0,1706$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8539$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0586) \sin(36^\circ) + j (0,3413) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,7745 + j0,2006$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{1969,53} = 0,2275$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (0,2275)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,34$$

$$Q_2^* = -0,0343$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,0343) \sin(6^\circ) + j (0,2275) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9909 + j0,0237$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9911$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0343) \sin(12^\circ) + j (0,2275) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9710 + j0,0472$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9721$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0343) \sin(18^\circ) + j (0,2275) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9404 + j0,0703$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9430$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0343) \sin(24^\circ) + j (0,2275) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8995 + j0,0925$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9042$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0343) \sin(30^\circ) + j (0,2275) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8488 + j0,1137$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8563$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0343) \sin(36^\circ) + j (0,2275) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,7888 + j0,1337$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	0,9889	0,9911
12	200	0,9684	0,9721
18	300	0,9388	0,9430
24	400	0,9004	0,9042
30	500	0,8539	0,8563
36	600	0,8	0,8

Pour : $Ku = 1$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{1969,53} = 0,3413$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 26}\right)^2 - (0,3413)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,6661$$

$$Q_2^* = 0,2905$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (0,2905) \sin(6^{\circ}) + j (0,3413) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0248 + j0,0356$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0254$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,2905) \sin(12^\circ) + j (0,3413) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0385 + j0,0709$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0409$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,2905) \sin(18^\circ) + j (0,3413) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0408 + j0,1054$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0461$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,2905) \sin(24^\circ) + j (0,3413) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0317 + j0,1388$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0409$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,2905) \sin(30^\circ) + j (0,3413) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0112 + j0,1706$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0254$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,2905) \sin(36^\circ) + j (0,3413) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9797 + j0,2006$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{1969,53} = 0,2275$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{kU}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\operatorname{ctg} (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 36}\right)^2 - (0,2275)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,68$$

$$Q_2^* = 0,3098$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,3098) \sin(6^\circ) + j (0,2275) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0269 + j0,0237$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0271$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3098) \sin(12^\circ) + j (0,2275) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0425 + j0,0472$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0435$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3098) \sin(18^\circ) + j (0,2275) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0467 + j0,0703$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0490$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3098) \sin(24^\circ) + j (0,2275) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0395 + j0,0925$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0436$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3098) \sin(30^\circ) + j (0,2275) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0209 + j0,1137$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0272$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3098) \sin(36^\circ) + j (0,2275) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9911 + j0,1337$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,0254	1,0271
12	200	1,0409	1,0435
18	300	1,0461	1,0490
24	400	1,0409	1,0436
30	500	1,0254	1,0272
36	600	1	1

Pour : $K_u = 1,05$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{1969,53} = 0,3413$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (0,3413)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,75$$

$$Q_2^* = 0,3773$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,3773) \sin(6^\circ) + j (0,3413) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0339 + j0,0356$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0345$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3773) \sin(12^\circ) + j (0,3413) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0565 + j0,0709$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0588$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3773) \sin(18^\circ) + j (0,3413) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0339 + j0,1054$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0676$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3773) \sin(24^\circ) + j (0,3413) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0670 + j0,1388$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0759$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3773) \sin(30^\circ) + j (0,3413) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0546 + j0,1706$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0683$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3773) \sin(36^\circ) + j (0,3413) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,0307 + j0,2006$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{1969,53} = 0,2275$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg}(0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (0,2275)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,77$$

$$Q_2^* = 0,3956$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,3956) \sin(6^\circ) + j(0,2275) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0358 + j0,0237$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0360$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3956) \sin(12^\circ) + j(0,2275) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0603 + j0,0472$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0613$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3956) \sin(18^\circ) + j(0,2275) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0733 + j0,0703$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0755$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3956) \sin(24^\circ) + j(0,2275) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0744 + j0,0925$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0783$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3956) \sin(30^\circ) + j(0,2275) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0638 + j0,1137$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0698$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3956) \sin(36^\circ) + j(0,2275) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,0415 + j0,1337$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,0345	1,0360
12	200	1,0588	1,0613
18	300	1,0727	1,0755
24	400	1,0759	1,0783
30	500	1,0683	1,0698
36	600	1,05	1,05

Configuration n=3

Pour : Ku = 0,8

Régime maximal :

$$P_C = 2228,60$$

$$P_2^* = \frac{672,268}{2228,60} = 0,301$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg}(0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 36}\right)^2 - (0,301)^2}$$

$$Q_2^* = -1,38 + 1,327$$

$$Q_2^* = -0,0488$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,0488) \sin(6^\circ) + j (0,301) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9894 + j0,0314$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9898$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,0488) \sin(12^\circ) + j (0,301) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9680 + j0,0625$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9700$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,0488) \sin(18^\circ) + j (0,301) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9359 + j0,0930$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9405$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,0488) \sin(24^\circ) + j (0,301) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,8936 + j0,1224$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9019$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,0488) \sin(30^\circ) + j (0,301) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8416 + j0,1505$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8549$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,0488) \sin(36^\circ) + j (0,301) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,7803 + j0,1769$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,8$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{2228} = 0,201$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg}(0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{0,8}{\sin 26}\right)^2 - (0,201)^2}$$

$$Q_2^* = -0,03$$

Pour X = 100 km :

$$\ddot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (-0,03) \sin(6^\circ) + j(0,201) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 0,9913 + j0,0210$$

$$\ddot{U}_{(100)} = 0,9915$$

Pour X = 200 km :

$$\ddot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (-0,03) \sin(12^\circ) + j(0,201) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 0,9719 + j0,0417$$

$$\ddot{U}_{(200)} = 0,9727$$

Pour X = 300 km :

$$\ddot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (-0,03) \sin(18^\circ) + j(0,201) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 0,9417 + j0,0621$$

$$\ddot{U}_{(300)} = 0,9437$$

Pour X = 400 km :

$$\ddot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (-0,03) \sin(24^\circ) + j(0,201) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 0,9013 + j0,0817$$

$$\ddot{U}_{(400)} = 0,9049$$

Pour X = 500 km :

$$\ddot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (-0,03) \sin(30^\circ) + j(0,201) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 0,8510 + j0,1005$$

$$\ddot{U}_{(500)} = 0,8569$$

Pour X = 600 km :

$$\ddot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (-0,03) \sin(36^\circ) + j(0,201) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,7913 + j0,1181$$

$$\ddot{U}_{(600)} = 0,8$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	0,9898	0,9915
12	200	0,9700	0,9727
18	300	0,9405	0,9437
24	400	0,9019	0,9049
30	500	0,8549	0,8569
36	600	0,8	0,8

Pour : $Ku = 1$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{2228,60} = 0,301$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg}(0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 0,06}\right)^2 - (0,301)^2}$$

$$Q_2^* = 0,2983$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (0,2983) \sin(6^{\circ}) + j(0,301) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0257 + j0,0314$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0261$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,2983) \sin(12^\circ) + j (0,301) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0401 + j0,0625$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0419$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,2983) \sin(18^\circ) + j (0,301) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0432 + j0,0930$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0473$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,2983) \sin(24^\circ) + j (0,301) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0348 + j0,1224$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0420$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,2983) \sin(30^\circ) + j (0,301) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0151 + j0,1505$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0261$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,2983) \sin(36^\circ) + j (0,301) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9843 + j0,1769$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{2228} = 0,201$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1}{\sin 6}\right)^2 - (0,201)^2}$$

$$Q_2^* = 0,3132$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,3132) \sin(6^\circ) + j (0,201) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0272 + j0,0210$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0273$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3132) \sin(12^\circ) + j (0,201) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0432 + j0,0417$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0440$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3132) \sin(18^\circ) + j (0,201) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0478 + j0,0621$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0496$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3132) \sin(24^\circ) + j (0,201) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0409 + j0,0817$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0441$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3132) \sin(30^\circ) + j (0,201) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0226 + j0,1005$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0275$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3132) \sin(36^\circ) + j (0,201) \sin(36^\circ)$$

$$\dot{U}_{(600)} = 0,9931 + j0,1181$$

$$\dot{U}_{(600)} = 1$$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,0261	1,0273
12	200	1,0419	1,0440
18	300	1,0473	1,0496
24	400	1,0420	1,0441
30	500	1,0261	1,0275
36	600	1	1

Pour : $Ku = 1,05$

Régime maximal :

$$P_2^* = \frac{672,268}{2228,60} = \mathbf{0,301}$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 6}\right)^2 - (0,301)^2}$$

$$Q_2^* = 0,3846$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^{\circ}) + (0,3846) \sin(6^{\circ}) + j (0,301) \sin(6^{\circ})$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0347 + j0,0314$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0351$$

Pour X = 200 km :

$$\hat{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3846) \sin(12^\circ) + j (0,301) \sin(12^\circ)$$

$$\hat{U}_{(200)} = 1,0581 + j0,0625$$

$$\hat{U}_{(200)} = 1,0599$$

Pour X = 300 km :

$$\hat{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3846) \sin(18^\circ) + j (0,301) \sin(18^\circ)$$

$$\hat{U}_{(300)} = 1,0699 + j0,0930$$

$$\hat{U}_{(300)} = 1,0739$$

Pour X = 400 km :

$$\hat{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3846) \sin(24^\circ) + j (0,301) \sin(24^\circ)$$

$$\hat{U}_{(400)} = 1,0699 + j0,1224$$

$$\hat{U}_{(400)} = 1,0768$$

Pour X = 500 km :

$$\hat{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3846) \sin(30^\circ) + j (0,301) \sin(30^\circ)$$

$$\hat{U}_{(500)} = 1,0583 + j0,1505$$

$$\hat{U}_{(500)} = 1,0689$$

Pour X = 600 km :

$$\hat{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3846) \sin(36^\circ) + j (0,301) \sin(36^\circ)$$

$$\hat{U}_{(600)} = 1,0350 + j0,1769$$

$$\hat{U}_{(600)} = 1,05$$

Régime minimal :

$$P_2^* = \frac{448,1792}{2228} = \mathbf{0,201}$$

$$Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{\kappa u}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } (0,06)(600) + \sqrt{\left(\frac{1,05}{\sin 36}\right)^2 - (0,201)^2}$$

$$Q_2^* = 0,3988$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = \cos(6^\circ) + (0,3988) \sin(6^\circ) + j (0,201) \sin(6^\circ)$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0362 + j0,0210$$

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0364$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = \cos(12^\circ) + (0,3988) \sin(12^\circ) + j (0,201) \sin(12^\circ)$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0610 + j0,0417$$

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0618$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = \cos(18^\circ) + (0,3988) \sin(18^\circ) + j (0,201) \sin(18^\circ)$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0742 + j0,0624$$

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0759$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = \cos(24^\circ) + (0,3988) \sin(24^\circ) + j (0,201) \sin(24^\circ)$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0757 + j0,0817$$

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0787$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)} = \cos(30^\circ) + (0,3988) \sin(30^\circ) + j (0,201) \sin(30^\circ)$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0654 + j0,1005$$

$$\dot{U}_{(500)} = 1,0701$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)} = \cos(36^\circ) + (0,3988) \sin(36^\circ) + j (0,201) \sin(36^\circ)$$

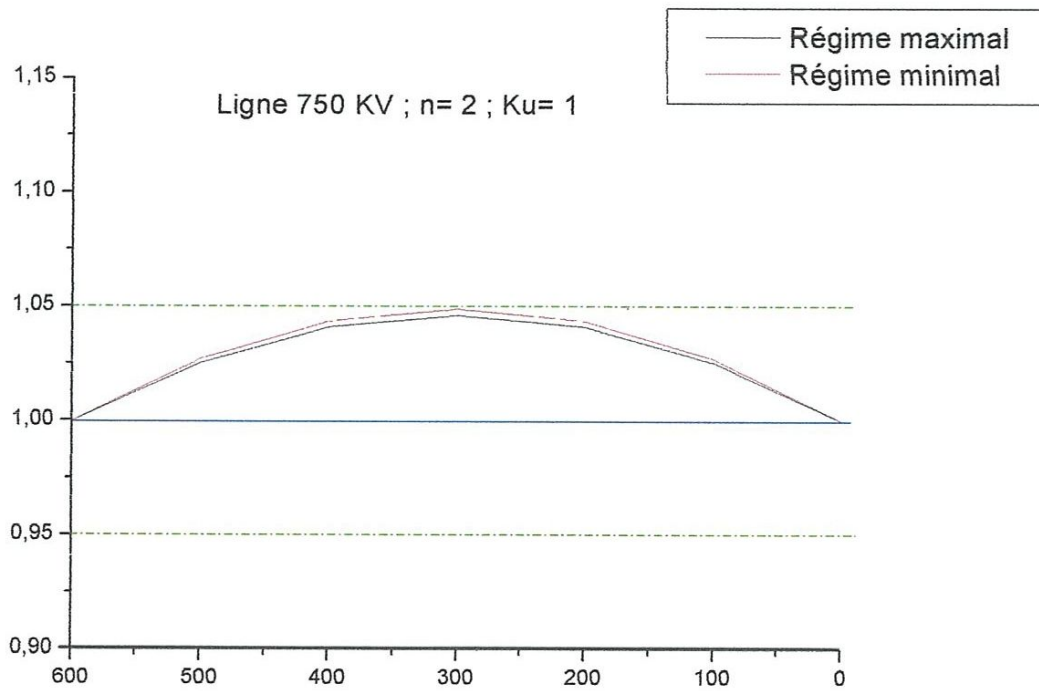
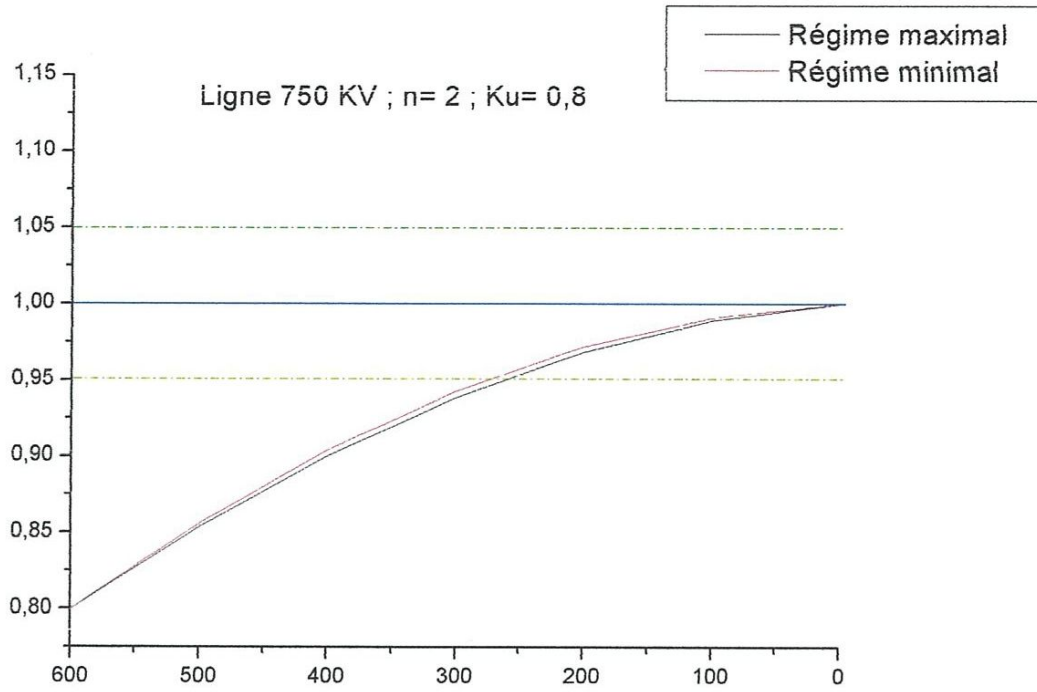
$$\dot{U}_{(600)} = 1,0434 + j0,1181$$

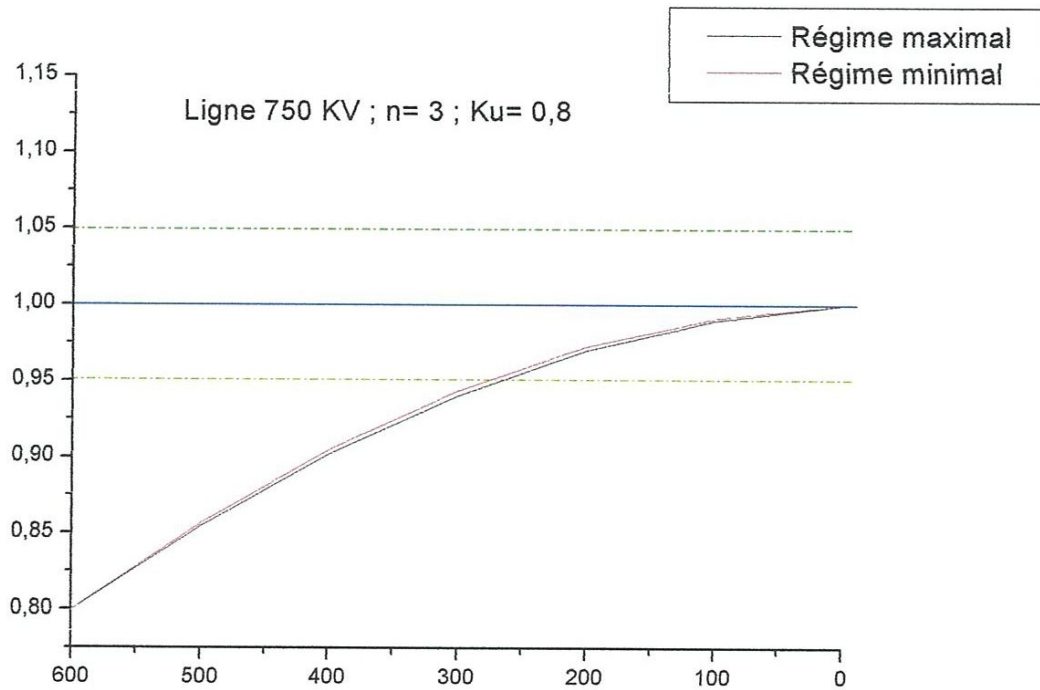
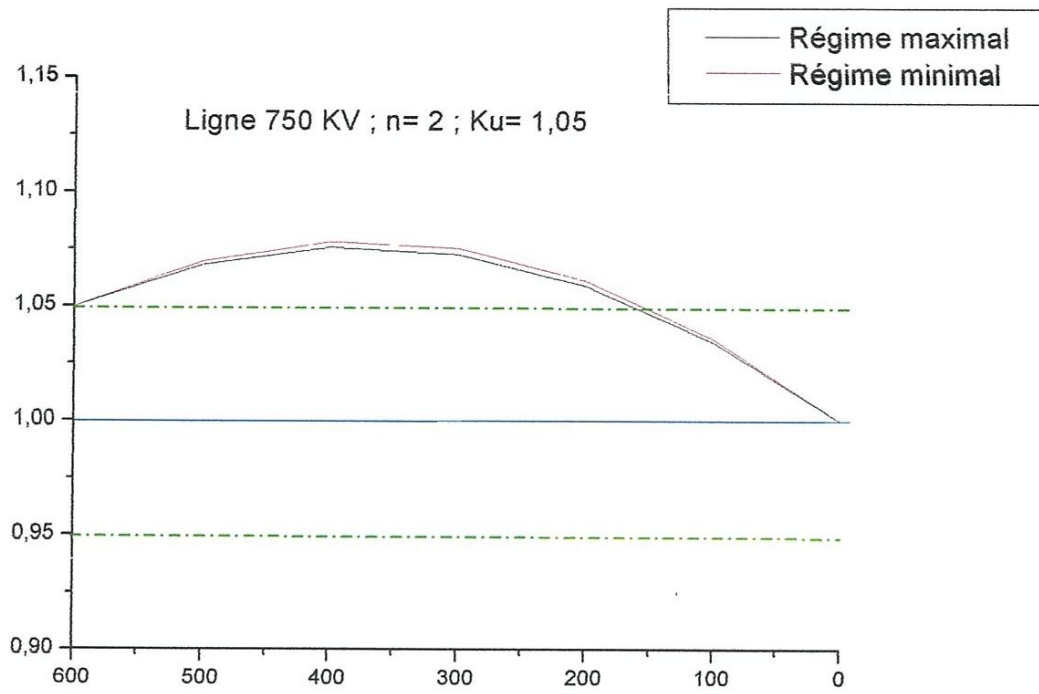
$$\dot{U}_{(600)} = 1,05$$

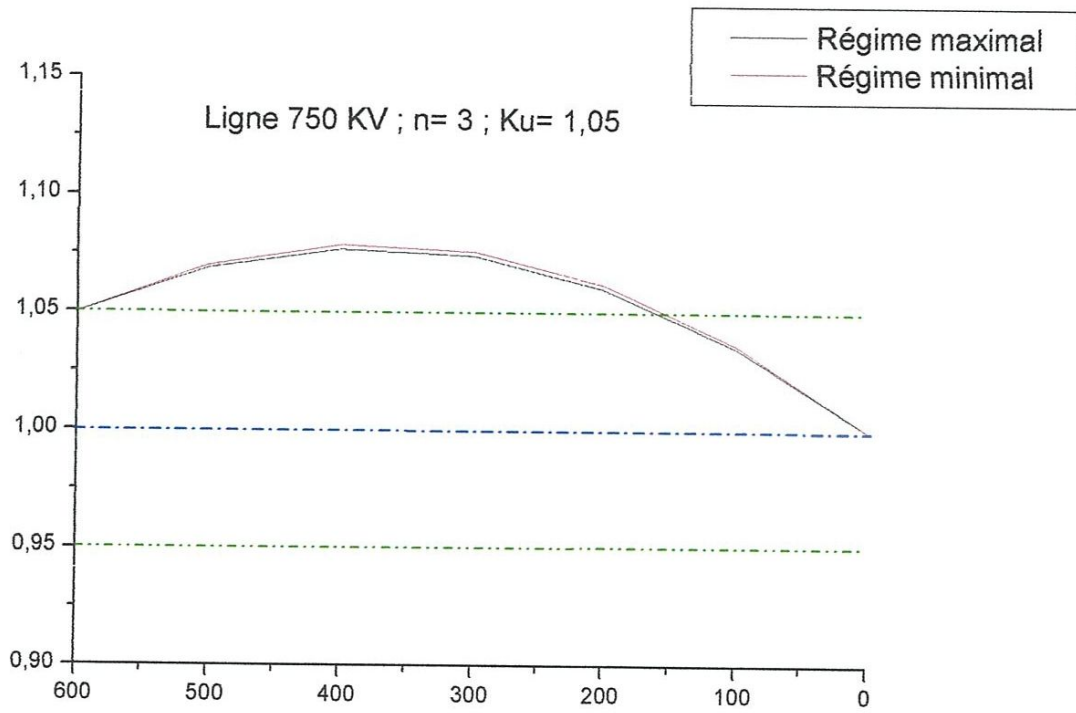
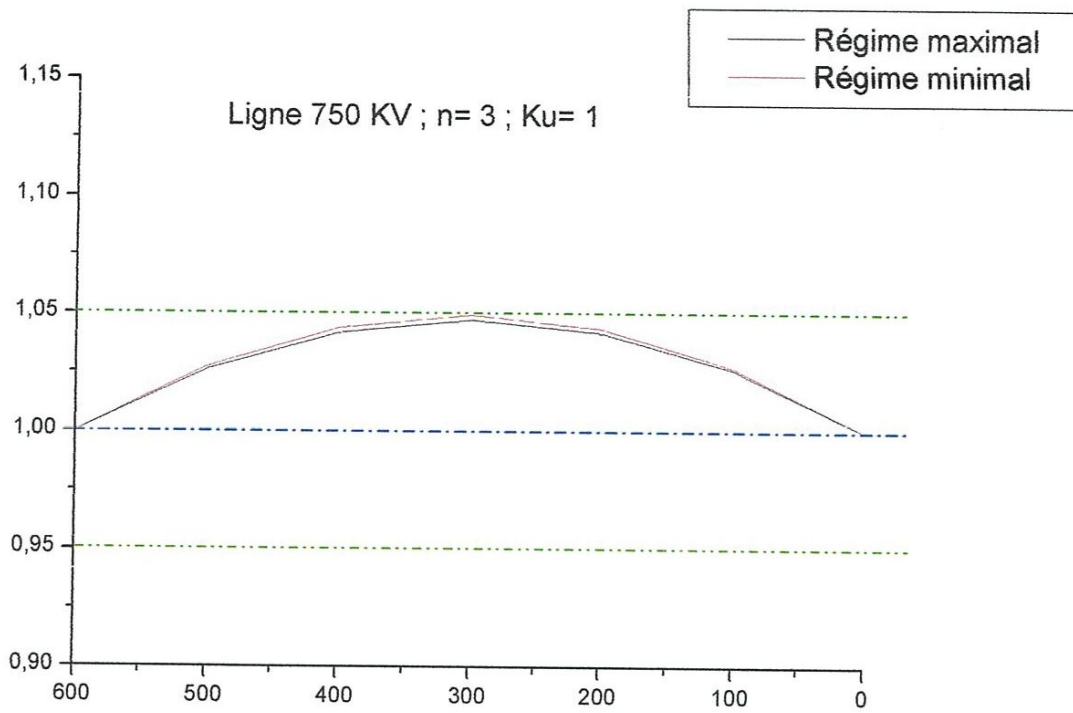
$n=3$; $U_N = 750$ kv ; $k_u = 1,05$

Ligne		Régime maximal	Régime minimal
X(km)	$\alpha_0 X(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $	$ U_{(x)}^* $
0	0	1	1
6	100	1,0351	1,0364
12	200	1,0599	1,0618
18	300	1,0739	1,0759
24	400	1,0768	1,0787
30	500	1,0689	1,0701
36	600	1,05	1,05

3.2.2. Epure de la tension :







Ligne		Régime à vide
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
6	100	0,9929
12	200	0,9750
18	300	0,9463
24	400	0,9074
30	500	0,8584
36	600	0,8

$$n=2 ; n=3 \quad ; U_N = 750 \text{ kv} \quad ; ku = 0,8$$

Pour : Ku=1

$$P_2^* = 0 \quad ; Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

Pour ku=1

$$Q_2^* = 0,3251$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)} = 1,0285$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)} = 1,0457$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)} = 1,0515$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)} = 1,0457$$

Pour X = 500 km :

$$\dot{U}_{(500)}=1,0285$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)}=1$$

Ligne		Régime à vide
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
6	100	1,0285
12	200	1,0457
18	300	1,0515
24	400	1,0457
30	500	1,0285
36	600	1

n=2 ; n=3 ; $U_N = 750 \text{ kv}$; $ku = 1$

Pour : $Ku=1,05$

$$P_2^* = 0 ; Q_2^* = ?$$

$$Q_2^* = -\text{ctg } \alpha_0 L + \sqrt{\left(\frac{ku}{\sin \alpha_0 L}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

Pour $ku=1,05$

$$Q_2^* = 0,4102$$

Pour X = 100 km :

$$\dot{U}_{(100)}=1,0373$$

Pour X = 200 km :

$$\dot{U}_{(200)}=1,0634$$

Pour X = 300 km :

$$\dot{U}_{(300)}=1,0778$$

Pour X = 400 km :

$$\dot{U}_{(400)}=1,0803$$

Pour X = 500 km :

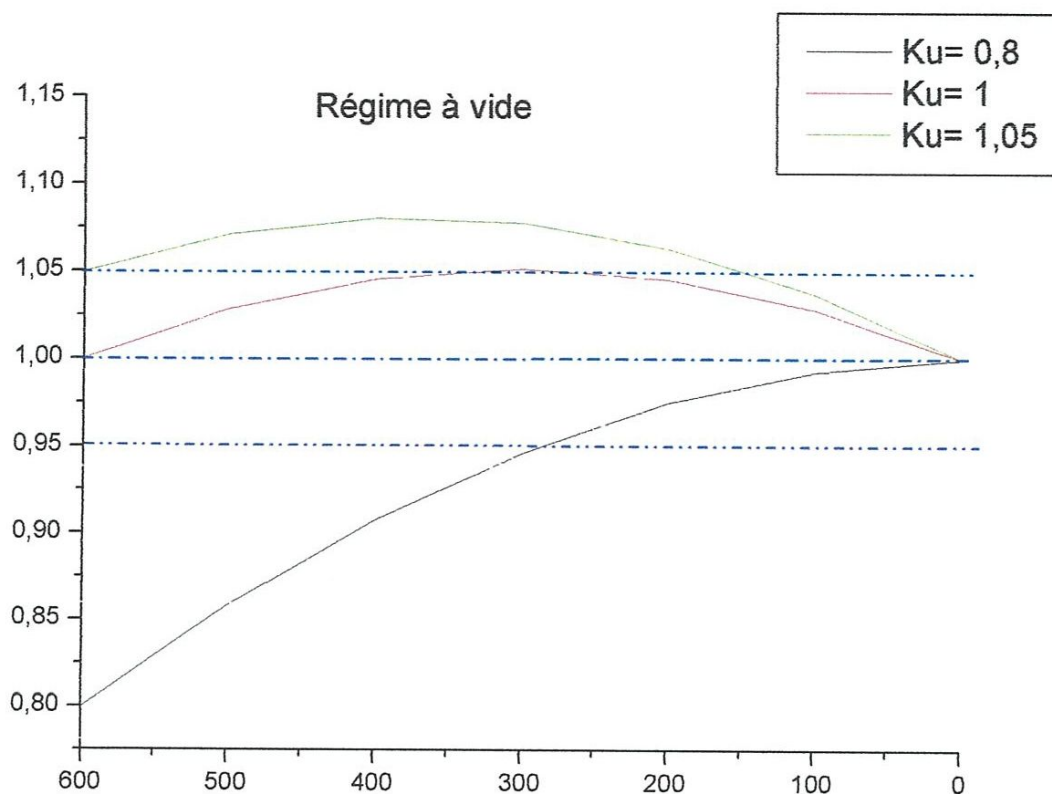
$$\dot{U}_{(500)}=1,0711$$

Pour X = 600 km :

$$\dot{U}_{(600)}=1,05$$

Ligne		Régime à vide
X(km)	$\alpha_0 x(^{\circ})$	$ U_{(x)}^* $
0	0	1
6	100	1,0373
12	200	1,0634
18	300	1,0778
24	400	1,0803
30	500	1,0711
36	600	1,05

n=2 ; n=3 ; $U_N = 750 \text{ kv}$; $k_u = 1,05$



Les calculs et les courbes obtenus permettent de faire les observations suivantes :

- L'introduction de la compensation de la puissance réactive implique, quant au plan du potentiel (distribution), un changement d'état considérable par rapport à son absence.
- Les effets impliqués dépendent des contraintes imposées (K_u). En effet, on peut contrôler le rapport des tensions d'extrémités moyennant une compensation au bout de la ligne. Cette dernière implique à son tour une redistribution du réactif le long de la ligne ; ce qui nécessite une autre installation du réactif au niveau du nœud d'entrée puisqu'en règle générale, la puissance réactive fournie par la source est limitée.
- L'effet de compensation est encore d'autant plus amélioré que le nombre de conducteurs par phase augmente.
- Les divers effets d'amélioration de la tension peuvent s'avérer encore plus intéressant si on procède, conformément à des critères adéquats, à une décentralisation du lieu de compensation. On optimisera alors par le lieu et la quantité.

CONCLUSION

- ✓ Chaque ligne, est construite pour fonctionner normalement au voisinage de la puissance naturelle. En d'autres termes, pour que la puissance réactive consommée par les inductances longitudinales de la ligne compense exactement la puissance réactive fournie par ses capacités transversales, il suffit de la faire fonctionner à sa puissance naturelle.
- ✓ La tension et la puissance réactive au début d'une ligne simple sont supérieures à celles en faisceau pour une même tension fixé à sa sortie ($U_2=1$).
- ✓ Les lignes en faisceau sont plus avantageuses que celles simples.
- ✓ Il est montré dans ce mémoire l'intérêt de la compensation de l'énergie réactive en générale.
- ✓ Pour améliorer la tension, c'est-à-dire diminuer sa chute ainsi que la circulation de la puissance réactive le long de la ligne, il faut mettre un système de compensation (compensateur synchrone, batterie de condensateurs, etc ...) afin d'injecter une puissance réactive supplémentaire suffisante pour maintenir la tension dans l'intervalle de variation admissible ($\Delta U\%_{\max} \pm 10\%$).
- ✓ L'augmentation du niveau de tension ou bien du nombre de conducteurs par phase engendre une diminution importante de la chute de tension en améliorant d'autres caractéristiques.
- ✓ La variation de la tension et la puissance réactive le long de la ligne est due aux effets inductifs (charge) et capacitif (ligne).

- ✓ Pour une ligne de transport à grande distance, il est justifié d'utiliser un niveau plus haut de tension et un nombre plus grand de conducteurs en faisceau.

 - ✓ Le transport de l'énergie électrique à haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils de compensation pour maintenir une tension admissible et pour garantir la stabilité.
-

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **B Buggiani**, " Parallélisation des calculs de stabilité transitoire des réseaux électrique ", Thèse de doctorat, département d'électricité EPFL, France, 1995.
- [2] **B Boussahoua**, " Evaluation de la Stabilité Transitoire des Réseaux d'Energie Electrique par les Méthodes Energétiques", Thèse de magister, ENP, Alger, Algérie, juin 2004
- [3] **A Hellal**, "Cours de modélisation et optimisation des réseaux électriques ", Département de Génie Electrique, UAT Laghouat, Algérie 2006.
- [4] **E F Mogos**, "Production Décentralisée Dans Les Réseaux De Distribution. Etude Pluridisciplinaire De La Modélisation Pour Le Contrôle Des Sources", Thèse de Doctorat Es Science, école national supérieure d'arts et métiers centre de Lille, France 2005.
- [5] **I. Baghli**, " Réalisation d'un Environnement Graphique avec Base de Données pour l'Analyse et la Simulation de Réseaux Electriques ", PFE, ENP Alger, Algérie 1994.
- [6] **D Bruno**, "Simulation En Temps Réel D'un Convertisseur HTCC ", Diplôme De Maîtrise Es Sciences Appliquées, Février 1998.
- [7] **C Hadjadje, I. Hadjadje**, " Etude de la stabilité transitoire d'un réseau multimachines ", PFE, département génie électrique UAT, Laghouat, Algérie 1999.
- [8] **P J Lagacé**, "Simulation des réseaux électriques", Activités du GRÉPCI Université du Québec École de technologie supérieure, canada, www.etsmtl.ca.
- [9] **Henri Persoz**, Gérard Santucci, Jean-Claude Lemoine, Paul Sapet « *La planification des réseaux électriques* » Editions EYROLLES 1984.
- [10] **H Kouara**, " Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension", Thèse de Magistère, université de Batna, Algérie, février 2006.

- [11] **Michel Crappe** « *Commande et régulation des réseaux électriques* » Traité EGEM série génie électrique, LAVOISIER 2003.
- [12] **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.
- [13] **www.tvss.net**, "Causes and Effects of Transient Voltages",
- [14] **V Legat** " Mathématique et méthodes numériques...ou les aspects facétieux du calcul sur un ordinateur " Notes pour la partie méthodes numériques du cours, Faculté des Sciences Appliquées, Université catholique de Louvain, 2001.
- [15] **Jacques .C, Guillaume de Preville, Jean-Louis Sanhet** « *Fluctuations de tension et flicker - Évaluation et atténuation (partie I et II)* » Techniques de l'ingénieur D 4 315.
- [16] **E G Shahraki**, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité Transitoire des réseaux électriques", Thèse Doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2003.
- [20] **Khiat Mounir** « *Répartition optimale des puissances réactives dans un réseau d'énergie électrique sous certaines contraintes de sécurité* » Thèse de doctorat d'état Oran 2003.
- [24] **H Le-Huy**, "Introduction à MATLAB", Notes de cours, Département de Génie Electrique et de Génie Informatique, Université Laval de Québec, CANADA, Septembre 1998.
- [25] **F I. Alvarado**, "Electromagnetic Transients Program (EMTP) Workbook", volume 2, Final Report, Electric Power Institute, California, USA, June 1989.
- Livre « Réseaux Electriques » de **M.BOUDOUR & A.HELIJAI**.
 - Mémoire de Magister université d'Oran. Présenté par **Haimour Rachida** « Contrôle des puissance réactive et des tension ».
 - Mémoire de Magister université de Laghouat Présenté par **Slimane Ramdane**.