

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Mémoire de Magister



Présenté à l'Université de Badji Mokhtar de Annaba



Faculté des Sciences et de l'ingénieur

Département Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par : AMIAR ADEL

Intitulé

EVALUATION COMPARATIVE ENTRE EFFETS DES COMPENSATIONS PARALLELE ET SERIE

Sous la direction de M^r : BOUNAYA KAMEL

- **Président : M^r LABAR HOCINE**
- **Examineur : M^r ADJEBI MOHAMED**
- **Examineur : M^r TOUAHRI SALAH**

-- Année 2007 --

Je remercie vivement Mr K .Bounaya pour ces valeureux conseils et pour son suivi continu durant la période de réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier Mr H .Labar pour avoir présidé mon jury.

J'exprime toute ma reconnaissance à Mr M .Adjabi pour avoir accepté d'être examinateur de ce mémoire.

J'exprime également mes sincères remerciements à Mr S .Touahri pour avoir accepté d'examiner ce mémoire.

Je remercie chaleureusement Mr A .Omeïri pour son soutien et son hospitalité.

A tous ceux de part leur soutien trouve ici l'expression de mon plus grand respect.

Je dédie ce travail à mes parents, ma femme, ma fille, mes frères et sœurs, mes beaux parents, mes beaux frères, mes amis et mes collègues de travail.....

Résumé

Les lignes haute tension de transport d'énergie électrique sur de grandes distances sont caractérisés par des flux de transfert énergétiques considérables ; lesquels impliquent des quantités énormes de puissance réactive et, par conséquent, des variations de la tension pouvant affecter sérieusement le régime des équipements divers de la ligne. Le caractère variable des graphiques de charge rend encore plus complexe le traitement de ce type de lignes ; puisque dans ce cas on doit veiller au contrôle de la tension pour la maintenir, tout le long de la ligne, dans les écarts connus admissibles. Ce qui peut se faire par compensation du réactif. On en distingue la distribution série et la distribution parallèle des compensateurs. Mais, les quantités considérables de la puissance réactive mises en jeu exigent des puissances installées de compensation, également importantes. Ainsi, le choix porté, dans ce travail, sur la compensation série découle d'un objectif de comparaison, voulue complète, c-à-d technique et économique, avec autres moyens de contrôle et particulièrement avec cette parallèle. Ce choix est également motivé par le fait que la compensation série renseigne, de manière plus déterminante, sur le rapport avec la capacité de transport de la ligne. Enfin, le sujet trouve justificatif – dans l'évolution vers la haute tension et le transfert de l'énergie sur des grandes distances ; et actualité – dans la tendance vers l'interconnexion interterritoriale des grands systèmes d'énergie électrique.

Summary

The electrical high voltage and long transmission lines are characterizing by consistent energetic transfer flux. This lines induce a most quantities of reactive power, in consequences, voltage variation which affect seriously equipments' functions. The variable aspects of loads graphics makes more complex the treatment of this wires; in this case, we must control the voltage and take it in the right of line at admissible limits. We can realize this by reactive compensation. There are two mains of distribution, serial and shunt compensators. But an important quantity of reactive power includes an important installed power compensation. So ever, the choice brined at the all of this work about serial compensation traduced from comparative objective which do a complete technical and economic work. With other means of control and specially with shunt compensation. This choice is so important to port real idea about serial compensation. All this, really affects the line's transmission capacity. Finally, the subject finds reasons – from high voltage and long energetic transfer evolution – and in store interterritorial intercommunion of greats electrical energetic systems in the future.

Conclusion
générale

Sommaire

| | |
|--|-----------|
| Introduction générale..... | 16 |
| Chapitre I : Evaluation bibliographique des différents aspects de la qualité de l'énergie électrique..... | 18 |
| Introduction | 19 |
| I-1-/ Classification et origine des perturbations | 20 |
| I-1-1-/ Phénomènes aléatoires..... | 20 |
| I-1-1-1-/ Les creux de tension et coupures brèves..... | 20 |
| I-1-1-2-/ Les coupures de longues durées..... | 20 |
| I-1-1-3-/ Les surtensions transitoires..... | 21 |
| I-1-2-/ Phénomène permanents ou semi permanents | 21 |
| I-1-2-1-/ Variations lentes de la tension..... | 21 |
| I-1-2-2-/ A coups de la tension..... | 21 |
| I-1-2-3-/ Fluctuations rapides de la tension..... | 21 |
| I-1-2-4-/ Les harmoniques..... | 21 |
| I-1-2-5-/ Déséquilibres de la tension..... | 21 |
| I-2-/ Effet des perturbations..... | 22 |
| I-3-/ Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique..... | 22 |
| I-3-1-/ Dépollution des tensions perturbatrices..... | 23 |
| I-3-1-1-/ Filtres actifs..... | 23 |
| I-3-1-2-/ Filtres passifs | 23 |
| Conclusion..... | 24 |
| Chapitre II : description des moyens de compensation de puissance réactive...25 | |
| Introduction..... | 26 |
| II-1-/ Compensateurs parallèles..... | 27 |
| II-1-1-/ Compensateurs parallèles à base de thyristors..... | 27 |
| II-1-1-1-/ Condensateur commandé par thyristors (CCT)..... | 27 |
| II-1-1-2-/ Inductance commandée par thyristors (LCT)..... | 28 |
| II-1-1-3-/ Compensateur statique SVC (Ctatic Var Compensator)..... | 29 |
| II-1-1-4-/ Le TCBR (thyristor control breaking resistor) | 29 |
| II-1-2-/ Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors..... | 30 |
| II-2-/ Compensateurs séries..... | 33 |
| II-2-1-/ Compensateurs séries contrôlés par thyristors..... | 33 |
| II-2-1-1-/ Le TCSC (thyristor control series capacitor)..... | 33 |
| II-2-1-2-/ Le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor)..... | 34 |
| II-2.1.3-/ Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor)..... | 35 |
| II-2.1.4-/ Le TSSR (Thyristor Switched Series Reactor)..... | 35 |
| II-2.2-/ Compensateur série à base de GTO Thyristors | 35 |
| II-2.2.1-/ Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) | 35 |
| II-3-/ Compensateurs hybrides série – parallèle | 37 |
| II-3.1-/ Compensateurs commandés par thyristors | 37 |
| II-3.1.1-/ Transformateur déphaseur à thyristor | 37 |

| | |
|---|------------|
| II-3.2-/ Compensateurs hybrides à base de GTO Thyristors | 39 |
| II-3-2-1-/ IPFC (Interline Power Flow Controller) | 39 |
| II-3.2.2-/ L'UPFC (Unified Power Flow Controller) | 39 |
| Conclusion..... | 42 |
| Chapitre III-/ Traitement analytique du comportement de la ligne en absence de la compensation | 43 |
| III-1-/ Description du réseau | 44 |
| III-2-/ Détermination des paramètres secondaires | 46 |
| III-2-1/ Puissance caractéristique (Naturelle) | 46 |
| III-3-/ Expression en unités relatives des différentes grandeurs..... | 46 |
| III-3-1-/La tension | 46 |
| III-3-2-/ Puissances | 47 |
| III-4-/ Traitement analytique du comportement de la ligne | 48 |
| III-4-1-/ Etude et analyse des régimes de la ligne | 49 |
| III-4-1-1-/ Pertes de tension | 49 |
| III-4-1-2-/ Régime de puissance réactive coté charge | 55 |
| III-4-1-3-/ Analyse de la distribution de la puissance | 69 |
| III-4-1-4-/ Régime de puissance limite maximale | 85 |
| Conclusion..... | 91 |
| Chapitre IV-/ Traitement analytique du comportement de la ligne en présence de la compensation..... | 92 |
| Introduction..... | 93 |
| IV-1-/ Description du réseau en tenant compte de la compensation série..... | 93 |
| IV-2-/ Modélisation de la ligne..... | 94 |
| IV-3-/ Analyse et conclusion..... | 105 |
| Conclusion générale..... | 107 |
| Bibliographie..... | 109 |

Liste des symboles

- U : tension en unité réelle (kV)
- U^* : tension en unité relative
- U_N : tension nominale (kV)
- r_0 : résistance de la ligne par élément de longueur (Ω / km)
- x_0 : réactance de la ligne par élément longueur (Ω / km)
- g_0 : conductance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- b_0 : susceptance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- Z_0 : impédance de la ligne par élément de longueur (Ω / km)
- Z_c : impédance caractéristique de la ligne (Ω)
- Y_0 : admittance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- γ_0 : facteur de l'onde électromagnétique
- α_0 : facteur de phase de l'onde
- β_0 : facteur d'amortissement de l'onde
- n : nombre de conducteurs par phase
- F : section du conducteur
- P_c : puissance caractéristique en unité réelle (MW)
- P_c^* : puissance caractéristique en unité relative
- S_{ch} : puissance de charge en unité réelle (MVA)
- S_{ch}^* : puissance de charge en unité relative
- P_{2ch} : puissance active de charge en unité réelle (MW)
- P_{2ch}^* : puissance de active charge en unité relative
- Q_{2ch} : puissance réactive de charge en unité réelle (MVAR)
- Q_{2ch}^* : puissance de réactive charge en unité relative
- P_m : puissance active maximale transmise en unité réelle (MW)
- P_m^* : puissance de active maximale transmise en unité relative
- k_u : rapport de la tension à un point donnée par apport à la tension de l'extrémité
- δ : angle de déphasage entre les tensions des deux extrémités
- C_s^* : capacité du compensateur série en unité relative
- C_p^* : capacité du compensateur parallèle en unité relative

Q_p^* : puissance de réactive du compensateur parallèle en unité relative

Q_s^* : puissance de réactive du compensateur série en unité relative

x_c^* : réactance du compensateur série en unité relative

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig (2.1) : condensateur commandé par thyristors (a) et formes d'ondes de la tension et du courant dans le cas où $U_C = U_m$ (ou $U_{thy} = 0$) (b) | 28 |
| Fig (2.2) : (a) inductance commandée par thyristor ; (b) formes d'ondes associées..... | 28 |
| Fig (2.3) : caractéristique V-I d'un SVC..... | 29 |
| Fig (2.4) : schéma d'un SVC et TCBR..... | 30 |
| Fig (2.5) : schéma de base du « STATCOM »..... | 31 |
| Fig (2.6) : diagramme vectoriel du « STATCOM »..... | 32 |
| Fig (2.7) : caractéristique V-I (a) et V-Q (b) d'un « STATCOM »..... | 33 |
| Fig (2.8) : une phase d'une ligne triphasée avec compensation série TCSC..... | 34 |
| Fig (2.9) : structure du TSSC..... | 34 |
| Fig (2.10) : schéma de principe du TCSR..... | 35 |
| Fig (2.11) : schéma de principe du SSSC..... | 36 |
| Fig (2.12) : caractéristique statique du SSSC..... | 36 |
| Fig (2.13) : schéma du régulateur de phase à thyristors..... | 38 |
| Fig (2.14) : diagramme vectoriel du régulateur déphaseur..... | 38 |
| Fig (2.15) : principe d'utilisation de l'IPFC..... | 39 |
| Fig (2.16) : schéma général de l'UPFC..... | 40 |
| Fig (2.17) : diagramme vectoriel d'un UPFC..... | 41 |
| Fig (3.1) : ligne de transport étudiée (a) modèle de la ligne (b) courbe de charge annuelle (c)... | 44 |
| Fig (3.2) : organigramme de calcul de la tension à l'origine de la ligne et des pertes de tension le long de la même ligne..... | 50 |
| Fig (3.3) : régime de tension pour différents paliers de charge | 54 |

| | |
|---|-----|
| Fig (3.4) : organigramme de calcul de la puissance réactive à l'extrémité de la ligne pour différentes contraintes de tension..... | 55 |
| Fig (3.5)-(a): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime max de charge..... | 66 |
| Fig (3.5)-(b): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime min de charge..... | 67 |
| Fig (3.5)-(c): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime à vide..... | 68 |
| Fig (3.6) : régime de puissance réactive pour différents paliers de charge..... | 73 |
| Fig (3.7) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime maximum de charge..... | 82 |
| Fig (3.8) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime minimum de charge..... | 83 |
| Fig (3.9) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime à vide... | 84 |
| Fig (3.10) : puissance limite transmise par la ligne de transport..... | 85 |
| Fig (4.1) : description du réseau en tenant compte de la compensation série..... | 93 |
| Fig (4.2) : organigramme de calcul de la répartition de la tension le long de la ligne compensée... | 97 |
| Fig (4.3) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 102 |
| Fig (4.4) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 102 |
| Fig(4-5) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 103 |
| Fig(4-6) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 103 |
| Fig(4-7) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.4431$ (400 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 104 |

Fig(4-8) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.5539$ (500 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*104

Fig(4-9) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR), régime minimal de charge pour $x_c^* = 0.05$105

Liste des tableaux

| Référence | Titre | Page |
|------------|--|------|
| Tab (3.1) | paramètres caractérisant les variantes à étudier | 45 |
| Tab (3.2) | paramètres primaires pour chaque variante | 45 |
| Tab (3.3) | paramètres secondaires pour chaque variante | 48 |
| Tab (3.4) | puissance de charge en unité relative pour chaque variante | 48 |
| Tab (3.5) | puissance de charge en unité relative pour la ligne à 750 kV | 48 |
| Tab (3.6) | régime de tension pour la charge maximale | 51 |
| Tab (3.7) | régime de tension pour la charge minimale | 52 |
| Tab (3.8) | régime de tension à vide | 53 |
| Tab (3.9) | puissance réactive à l'extrémité de la ligne pour différentes contraintes de la tension | 56 |
| Tab (3.10) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 2 | 57 |
| Tab (3.11) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 3 ; F = 600 | 58 |
| Tab (3.12) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 3 ; F = 400 | 59 |
| Tab (3.13) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 2 | 60 |
| Tab (3.14) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 3 ; F = 600 | 61 |
| Tab (3.15) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 3 ; F = 400 | 62 |
| Tab (3.16) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 2 | 63 |
| Tab (3.17) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 3 ; F = 600 | 64 |
| Tab (3.18) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 3 ; F = 400 | 65 |
| Tab (3.19) | régime de puissance réactive charge maximale | 70 |

| | | |
|------------|--|-----|
| Tab (3.20) | régime de puissance réactive charge minimale | 71 |
| Tab (3.21) | régime de puissance réactive à vide | 72 |
| Tab (3.22) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = 2$ | 75 |
| Tab (3.23) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = , F=600$ | 76 |
| Tab (3.24) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = , F=400$ | 77 |
| Tab (3.25) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = 2$ | 78 |
| Tab (3.26) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = , F=600$ | 79 |
| Tab (3.27) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = , F=400$ | 80 |
| Tab (3.28) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension à vide | 81 |
| Tab (3.29) | puissance limite transmise par la ligne charge maximale | 87 |
| Tab (3.30) | puissance limite transmise par la ligne charge minimale | 88 |
| Tab (3.31) | puissance limite transmise par la ligne $U_n = 750 \text{ kV}, n = 4$ | 89 |
| Tab (3.32) | comparatif entre puissances limites transmises par les lignes en unité réelle pour différents régimes de charge | 90 |
| Tab (4.1) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$ en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 98 |
| Tab (4.2) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$ en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^* | 98 |
| Tab (4.3) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 99 |
| Tab (4.4) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^* | 99 |
| Tab (4.5) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.4431$ (400 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 100 |
| Tab (4.6) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.5539$ (500 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 100 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab (4.7) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR) en régime de charge minimal pour $x_c^* = 0.05$ | 101 |
|-----------|--|-----|

Liste des symboles

- U : tension en unité réelle (kV)
- U^* : tension en unité relative
- U_N : tension nominale (kV)
- r_0 : résistance de la ligne par élément de longueur (Ω / km)
- x_0 : réactance de la ligne par élément longueur (Ω / km)
- g_0 : conductance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- b_0 : susceptance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- Z_0 : impédance de la ligne par élément de longueur (Ω / km)
- Z_c : impédance caractéristique de la ligne (Ω)
- Y_0 : admittance de la ligne par élément de longueur (Ω^{-1} / km)
- γ_0 : facteur de l'onde électromagnétique
- α_0 : facteur de phase de l'onde
- β_0 : facteur d'amortissement de l'onde
- n : nombre de conducteurs par phase
- F : section du conducteur
- P_c : puissance caractéristique en unité réelle (MW)
- P_c^* : puissance caractéristique en unité relative
- S_{ch} : puissance de charge en unité réelle (MVA)
- S_{ch}^* : puissance de charge en unité relative
- P_{2ch} : puissance active de charge en unité réelle (MW)
- P_{2ch}^* : puissance de active charge en unité relative
- Q_{2ch} : puissance réactive de charge en unité réelle (MVAR)
- Q_{2ch}^* : puissance de réactive charge en unité relative
- P_m : puissance active maximale transmise en unité réelle (MW)
- P_m^* : puissance de active maximale transmise en unité relative
- k_u : rapport de la tension à un point donnée par apport à la tension de l'extrémité
- δ : angle de déphasage entre les tensions des deux extrémités
- C_s^* : capacité du compensateur série en unité relative
- C_p^* : capacité du compensateur parallèle en unité relative

Q_p^* : puissance de réactive du compensateur parallèle en unité relative

Q_s^* : puissance de réactive du compensateur série en unité relative

x_c^* : réactance du compensateur série en unité relative

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Fig (2.1) : condensateur commandé par thyristors (a) et formes d'ondes de la tension et du courant dans le cas où $U_C = U_m$ (ou $U_{thy} = 0$) (b) | 28 |
| Fig (2.2) : (a) inductance commandée par thyristor ; (b) formes d'ondes associées..... | 28 |
| Fig (2.3) : caractéristique V-I d'un SVC..... | 29 |
| Fig (2.4) : schéma d'un SVC et TCBR..... | 30 |
| Fig (2.5) : schéma de base du « STATCOM »..... | 31 |
| Fig (2.6) : diagramme vectoriel du « STATCOM »..... | 32 |
| Fig (2.7) : caractéristique V-I (a) et V-Q (b) d'un « STATCOM »..... | 33 |
| Fig (2.8) : une phase d'une ligne triphasée avec compensation série TCSC..... | 34 |
| Fig (2.9) : structure du TSSC..... | 34 |
| Fig (2.10) : schéma de principe du TCSR..... | 35 |
| Fig (2.11) : schéma de principe du SSSC..... | 36 |
| Fig (2.12) : caractéristique statique du SSSC..... | 36 |
| Fig (2.13) : schéma du régulateur de phase à thyristors..... | 38 |
| Fig (2.14) : diagramme vectoriel du régulateur déphaseur..... | 38 |
| Fig (2.15) : principe d'utilisation de l'IPFC..... | 39 |
| Fig (2.16) : schéma général de l'UPFC..... | 40 |
| Fig (2.17) : diagramme vectoriel d'un UPFC..... | 41 |
| Fig (3.1) : ligne de transport étudiée (a) modèle de la ligne (b) courbe de charge annuelle (c)... | 44 |
| Fig (3.2) : organigramme de calcul de la tension à l'origine de la ligne et des pertes de tension le long de la même ligne..... | 50 |
| Fig (3.3) : régime de tension pour différents paliers de charge | 54 |

| | |
|---|-----|
| Fig (3.4) : organigramme de calcul de la puissance réactive à l'extrémité de la ligne pour différentes contraintes de tension..... | 55 |
| Fig (3.5)-(a): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime max de charge..... | 66 |
| Fig (3.5)-(b): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime min de charge..... | 67 |
| Fig (3.5)-(c): régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime à vide..... | 68 |
| Fig (3.6) : régime de puissance réactive pour différents paliers de charge..... | 73 |
| Fig (3.7) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime maximum de charge..... | 82 |
| Fig (3.8) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime minimum de charge..... | 83 |
| Fig (3.9) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension régime à vide... | 84 |
| Fig (3.10) : puissance limite transmise par la ligne de transport..... | 85 |
| Fig (4.1) : description du réseau en tenant compte de la compensation série..... | 93 |
| Fig (4.2) : organigramme de calcul de la répartition de la tension le long de la ligne compensée... | 97 |
| Fig (4.3) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 102 |
| Fig (4.4) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 102 |
| Fig(4-5) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 103 |
| Fig(4-6) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 103 |
| Fig(4-7) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.4431$ (400 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^* | 104 |

Fig(4-8) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.5539$ (500 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*104

Fig(4-9) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR), régime minimal de charge pour $x_c^* = 0.05$105

Liste des tableaux

| Référence | Titre | Page |
|------------|--|------|
| Tab (3.1) | paramètres caractérisant les variantes à étudier | 45 |
| Tab (3.2) | paramètres primaires pour chaque variante | 45 |
| Tab (3.3) | paramètres secondaires pour chaque variante | 48 |
| Tab (3.4) | puissance de charge en unité relative pour chaque variante | 48 |
| Tab (3.5) | puissance de charge en unité relative pour la ligne à 750 kV | 48 |
| Tab (3.6) | régime de tension pour la charge maximale | 51 |
| Tab (3.7) | régime de tension pour la charge minimale | 52 |
| Tab (3.8) | régime de tension à vide | 53 |
| Tab (3.9) | puissance réactive à l'extrémité de la ligne pour différentes contraintes de la tension | 56 |
| Tab (3.10) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 2 | 57 |
| Tab (3.11) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 3 ; F = 600 | 58 |
| Tab (3.12) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge maximale n = 3 ; F = 400 | 59 |
| Tab (3.13) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 2 | 60 |
| Tab (3.14) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 3 ; F = 600 | 61 |
| Tab (3.15) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un Charge minimale n = 3 ; F = 400 | 62 |
| Tab (3.16) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 2 | 63 |
| Tab (3.17) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 3 ; F = 600 | 64 |
| Tab (3.18) | Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de Un à vide n = 3 ; F = 400 | 65 |
| Tab (3.19) | régime de puissance réactive charge maximale | 70 |

| | | |
|------------|---|-----|
| Tab (3.20) | régime de puissance réactive charge minimale | 71 |
| Tab (3.21) | régime de puissance réactive à vide | 72 |
| Tab (3.22) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = 2$ | 75 |
| Tab (3.23) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = , F=600$ | 76 |
| Tab (3.24) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge maximale $n = , F=400$ | 77 |
| Tab (3.25) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = 2$ | 78 |
| Tab (3.26) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = , F=600$ | 79 |
| Tab (3.27) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension charge minimale $n = , F=400$ | 80 |
| Tab (3.28) | régime de puissance réactive pour différentes contraintes de la tension à vide | 81 |
| Tab (3.29) | puissance limite transmise par la ligne charge maximale | 87 |
| Tab (3.30) | puissance limite transmise par la ligne charge minimale | 88 |
| Tab (3.31) | puissance limite transmise par la ligne $Un = 750 \text{ kV}, n = 4$ | 89 |
| Tab (3.32) | comparatif entre puissances limites transmises par les lignes en unité réelle pour différents régimes de charge | 90 |
| Tab (4.1) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0$ en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 98 |
| Tab (4.2) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0$ en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^* | 98 |
| Tab (4.3) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 99 |
| Tab (4.4) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^* | 99 |
| Tab (4.5) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0.4431$ (400 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 100 |
| Tab (4.6) | répartition de la tension de la ligne pour $Qp = 0.5539$ (500 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^* | 100 |

| | | |
|-----------|--|-----|
| Tab (4.7) | répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR) en régime de charge minimal pour $x_c^* = 0.05$ | 101 |
|-----------|--|-----|

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | U'^*_2 | U'^*_1 | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0884 | 1.1646 | 1.2278 | 1.2773 | 1.2504 | 1.2432 | 1.222 | 1.1872 | 1.1392 |
| 0.1 | | | | | | 1.2236 | 1.2165 | 1.1958 | 1.1617 | 1.1147 |
| 0.15 | | | | | | 1.1967 | 1.1898 | 1.1696 | 1.1363 | 1.0903 |
| 0.2 | | | | | | 1.1698 | 1.1631 | 1.1433 | 1.1108 | 1.0658 |
| 0.25 | | | | | | 1.143 | 1.1364 | 1.1171 | 1.0853 | 1.0413 |

Tab (4-1) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$ en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | L (km) | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|-------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | U'^*_2 | U'^*_1 | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0509 | 1.0901 | 1.117 | 1.1315 | 1.1046 | 1.0983 | 1.0796 | 1.0489 | 1.0064 |
| 0.1 | | | | | | 1.0778 | 1.0716 | 1.0534 | 1.0234 | 0.982 |
| 0.15 | | | | | | 1.0509 | 1.0449 | 1.0271 | 0.9979 | 0.9575 |
| 0.2 | | | | | | 1.024 | 1.0181 | 1.0009 | 0.9724 | 0.9331 |
| 0.25 | | | | | | 0.9972 | 0.9914 | 0.9746 | 0.9469 | 0.9086 |

Tab (4-2) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$ en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | $U^*_{'2}$ | $U^*_{'1}$ | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0533 | 1.0948 | 1.1241 | 1.1408 | 1.1139 | 1.1075 | 1.0887 | 1.0577 | 1.149 |
| 0.1 | | | | | | 1.087 | 1.0808 | 1.0624 | 1.0322 | 0.9904 |
| 0.15 | | | | | | 1.0602 | 1.0541 | 1.0362 | 1.0067 | 0.966 |
| 0.2 | | | | | | 1.0333 | 1.0274 | 1.0099 | 0.9812 | 0.9415 |
| 0.25 | | | | | | 1.0065 | 1.0007 | 0.9837 | 0.9957 | 0.9171 |

Tab (4-3) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------|-----------|--------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | $U^*_{'2}$ | $U^*_{'1}$ | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0158 | 1.0203 | 1.0135 | 0.995 | 0.9682 | 0.9654 | 0.9573 | 0.9443 | 0.9266 |
| 0.1 | | | | | | 0.9413 | 0.9386 | 0.9308 | 0.9181 | 0.9009 |
| 0.15 | | | | | | 0.9144 | 0.9118 | 0.9042 | 0.8919 | 0.8752 |
| 0.2 | | | | | | 0.8876 | 0.8850 | 0.8777 | 0.8657 | 0.8495 |
| 0.25 | | | | | | 0.8607 | 0.8582 | 0.8511 | 0.8395 | 0.8238 |

Tab (4-4) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR) en régime de charge minimal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | U'^*_2 | U'^*_1 | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0416 | 1.0716 | 1.0895 | 1.0953 | 1.0684 | 1.0623 | 1.0443 | 1.0146 | 0.9735 |
| 0.1 | | | | | | 1.0416 | 1.0356 | 1.018 | 0.9891 | 0.949 |
| 0.15 | | | | | | 1.0147 | 1.0089 | 0.9918 | 0.9636 | 0.9246 |
| 0.2 | | | | | | 0.9879 | 0.9822 | 0.9655 | 0.9381 | 0.9001 |
| 0.25 | | | | | | 0.9610 | 0.9555 | 0.9393 | 0.9126 | 0.8757 |

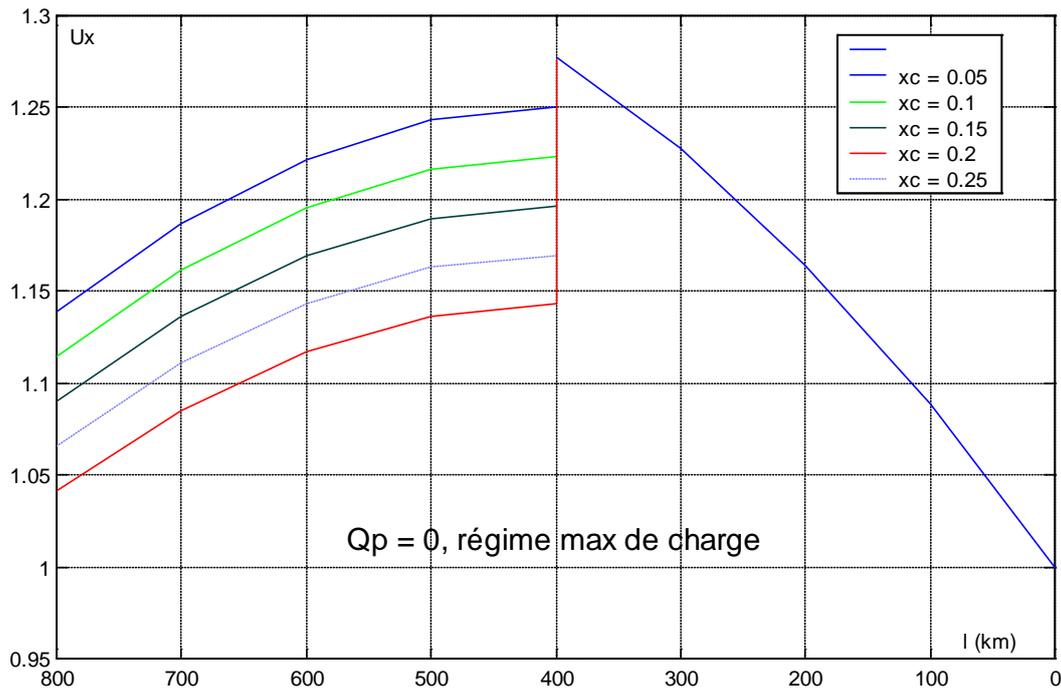
Tab (4-5) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.4431$ (400 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------------|-----------------------------|--------|--------|--------|----------|----------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | U'^*_2 | U'^*_1 | | | | |
| 0.05 | $IU^*(l)$ | 1.0299 | 1.0483 | 1.0549 | 1.0498 | 1.0229 | 1.0171 | 0.9998 | 0.9714 | 0.9321 |
| 0.1 | | | | | | 0.9961 | 0.9904 | 0.9736 | 0.9459 | 0.9076 |
| 0.15 | | | | | | 0.9692 | 0.9637 | 0.9473 | 0.9204 | 0.8832 |

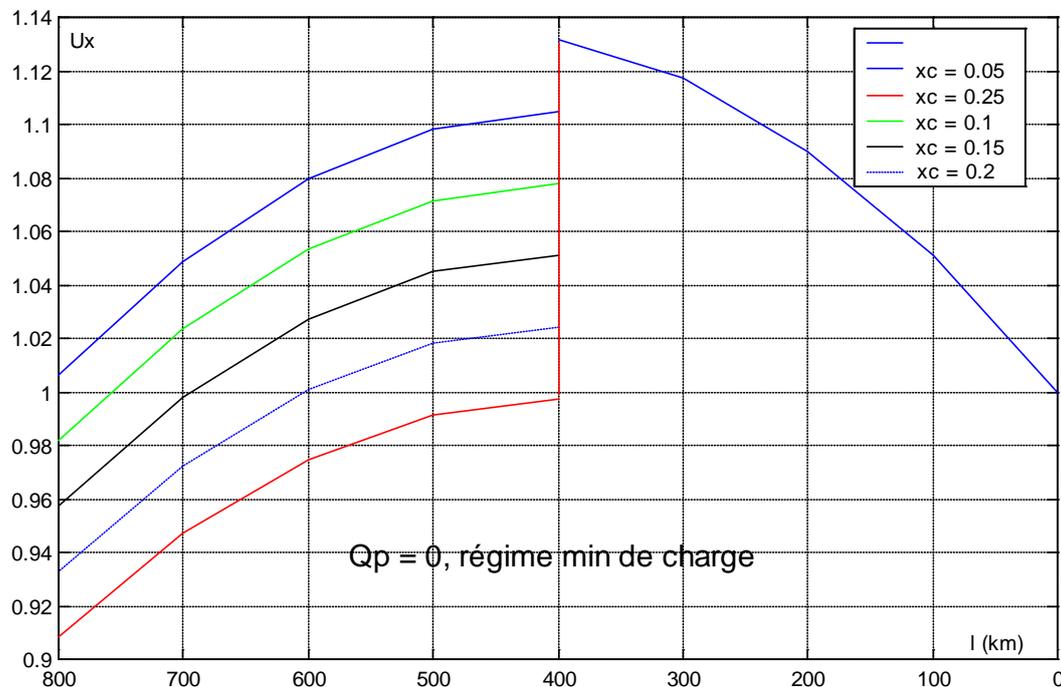
Tab (4-6) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.5539$ (500 MVAR) en régime de charge maximal pour différentes valeurs de x_c^*

| | | l (km) | | | | | | | | |
|-------------|------------------------------|--------|--------|--------|------------|------------|--------|--------|--------|--------|
| | | 100 | 200 | 300 | 400 | | 500 | 600 | 700 | 800 |
| x_c | | | | | $U^*_{'2}$ | $U^*_{'1}$ | | | | |
| 0.05 | $U^*(l)$ | 1.0275 | 1.0435 | 1.0479 | 1.0405 | 1.0136 | 1.0107 | 1.0023 | 0.9886 | 0.9701 |

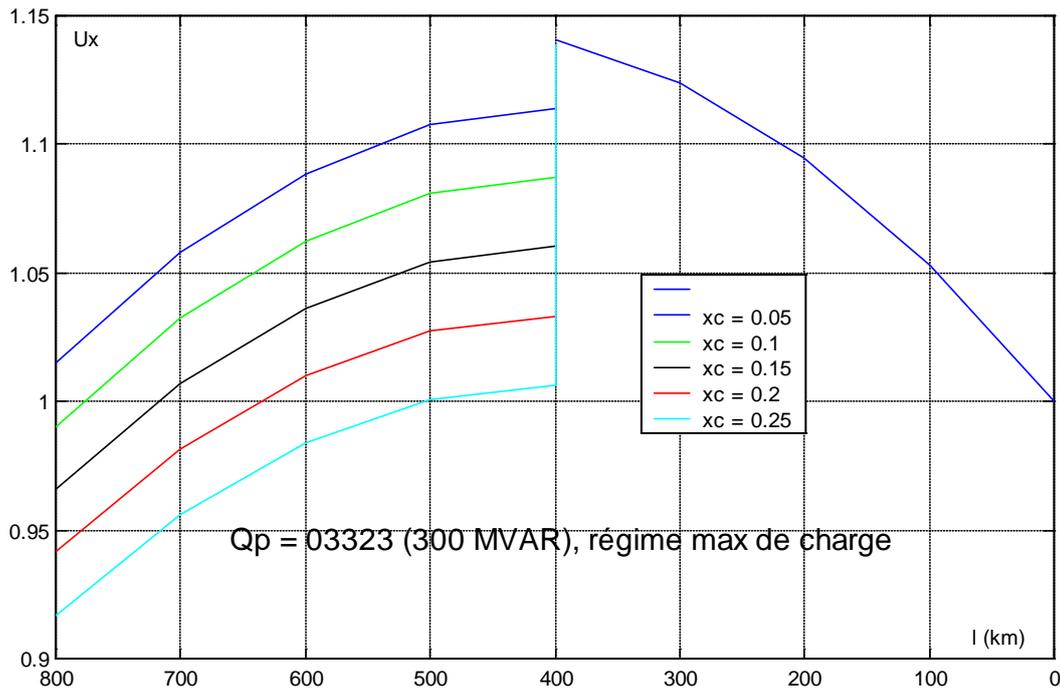
Tab (4-7) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR) en régime de charge minimal pour $x_c^* = 0.05$



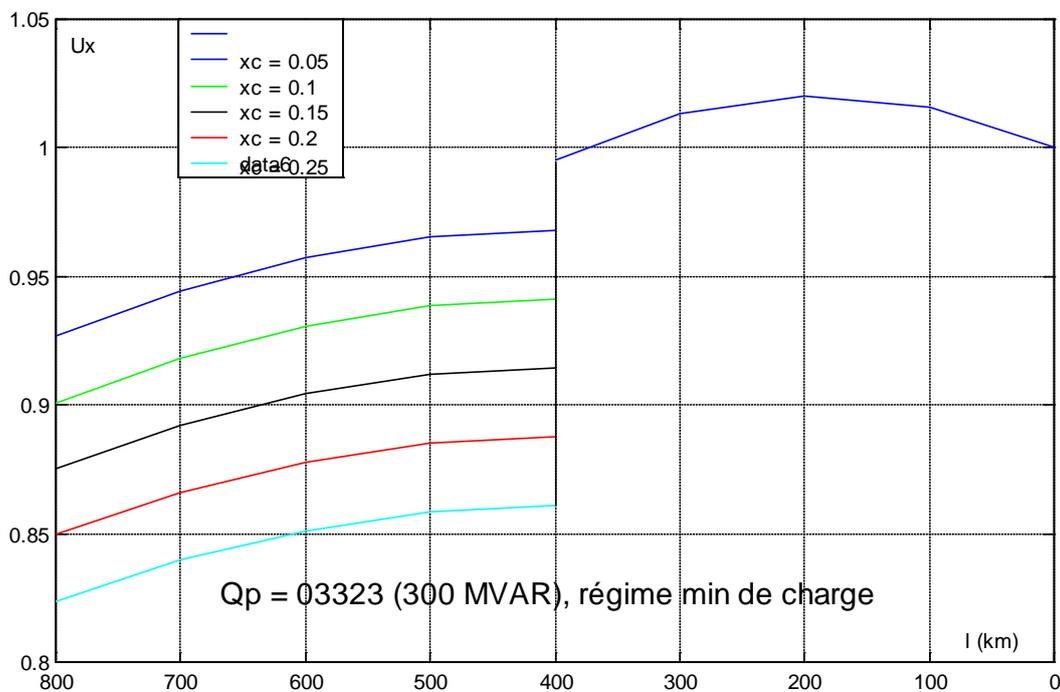
Fig(4-3) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



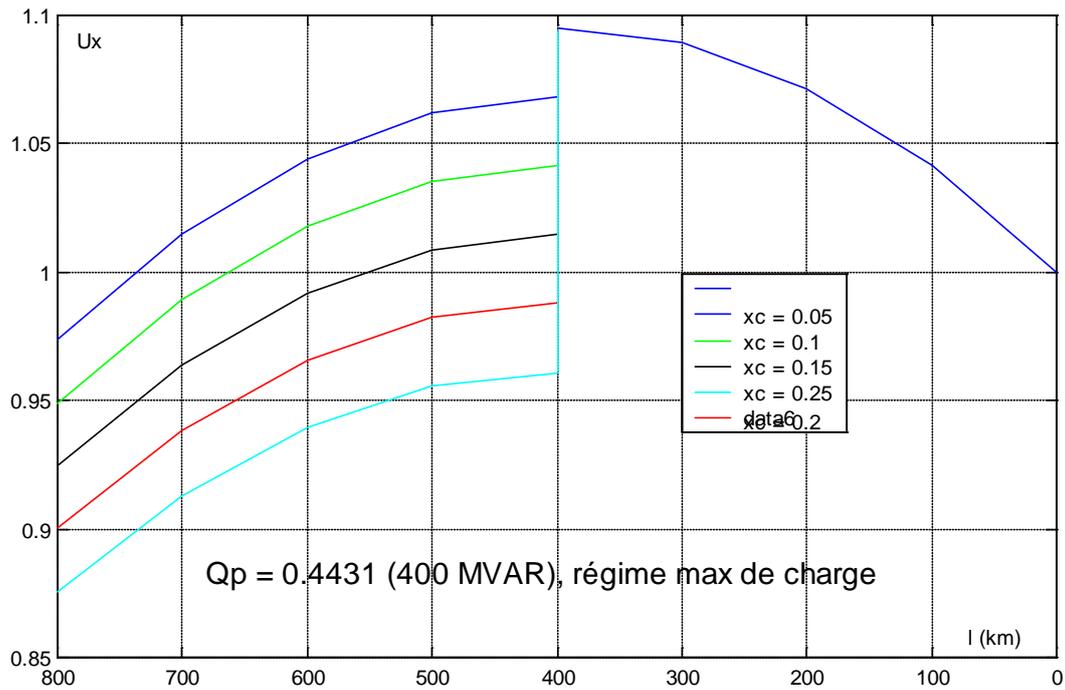
Fig(4-4) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0$, régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



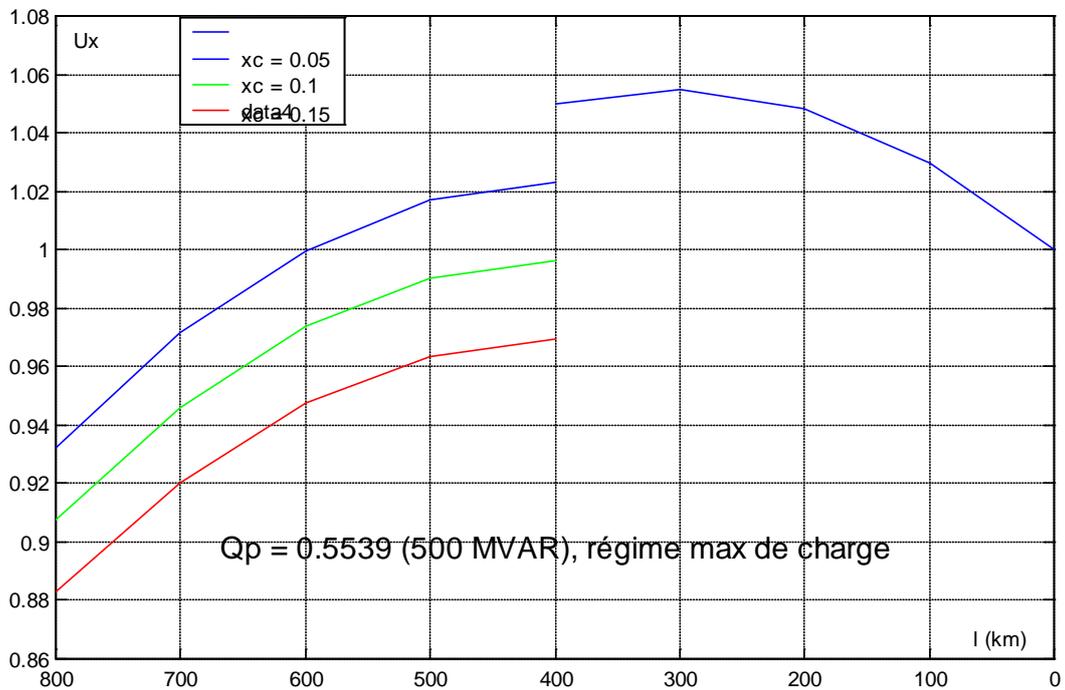
Fig(4-5) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



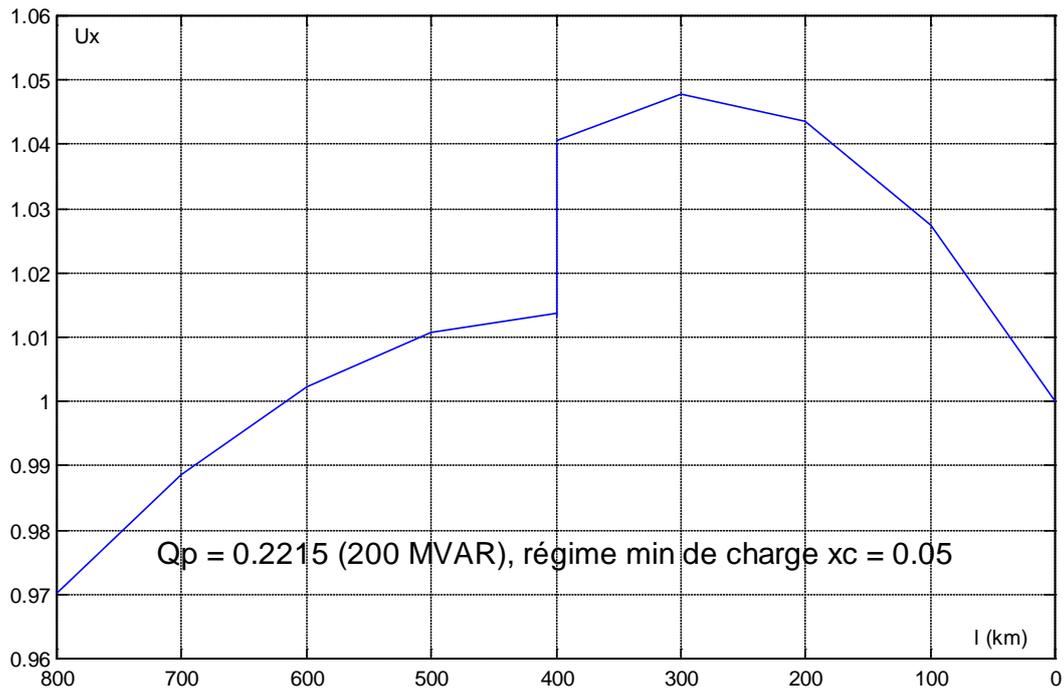
Fig(4-6) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.3323$ (300 MVAR), régime minimal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



Fig(4-7) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.4431$ (400 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



Fig(4-8) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.5539$ (500 MVAR), régime maximal de charge pour différentes valeurs de x_c^*



Fig(4-9) : répartition de la tension de la ligne pour $Q_p = 0.2215$ (200 MVAR), régime minimal de charge pour $x_c^* = 0.05$

IV-3-/ Analyse et conclusion :

Etant donné que la compensation locale à l'extrémité de la ligne est fixée à $Q_p^* = 0.3$ soit 300 MVAR en unité réelle valeur qui est insuffisante surtout en régime de charge maximale, on voit très bien que la tension sort des limites admissibles et atteint 1.14.

La valeur de l'impédance x_c^* est très importante pour déterminer la chute de tension aux bornes du compensateur série. On remarque que les valeurs $x_c^* = 0.05, 0.10$ et 0.15 donnent généralement des chutes de tension de valeurs acceptables (ne dépassant pas les 10%), on peut admettre une valeur de $x_c^* = 0.2$ dans certains cas (régime de charge minimale). Mais au-delà de 0.2 ($x_c^* = 0.25$ par exemple), les chutes de tension deviennent considérables.

La variation de la tension le long de la ligne dépend du régime de charge : elle varie rapidement au régime maximal de charge et lentement au régime minimal.

La compensation série employée seule ne peut assurer un réglage de la tension surtout dans le premier tronçon de la ligne, ce que peut faire la compensation locale (parallèle). Ce qui est bien appréciable en l'absence de cette dernière.

La valeur de la puissance réactive à injecter à l'extrémité de la ligne en régime de charge maximal prend des valeurs importantes (allant jusqu'à 500 MVAR) pour assurer une tension dans les limites admissibles ce qui n'est pas le cas pour le régime de charge minimal (200 MVAR suffisent) ce qui nous donne l'effet de la charge sur le dimensionnement des compensateurs.

Le développement industriel entraîne une forte croissance de la demande de l'énergie électrique, et la grande superficie d'un territoire nécessite le transport à grandes distances.

Depuis lors, cette faculté extraordinaire, presque magique, transmettre de l'énergie à distance, de façon instantanée est mise en œuvre dans pratiquement tous les domaines d'application de l'électricité.

L'électricité, pendant ce dernier siècle, s'est développée et est devenue l'une des formes énergétiques les plus employées par l'être humain.

Pour répondre à la consommation toujours croissante, et pour permettre de traiter des puissances plus grandes sans augmenter de façon aberrante les chutes de tension relatives, les sections des conducteurs, leur nombre et les quantités de puissance réactive, pour cela, des réseaux ont été créés avec des tensions de plus en plus élevées.

Il est évident qu'à partir d'un certain niveau, le transit de puissance réactive joue un rôle primordial, pour cela il faut choisir les compensateurs, en fonction de plusieurs paramètres pour diminuer les chutes de tension, les pertes de puissance, le long d'une ligne et augmenter la capacité de transport de cette dernière.

Dans ce travail, on va traiter le cas de la compensation série qui découle d'un objectif de comparaison avec autres moyens de contrôle, et particulièrement, la compensation parallèle.

La comparaison, voulue complète c'est-à-dire technique et économique trouve justificatif - dans l'évolution vers la haute tension et le transfert de l'énergie sur de grandes distances ; et actualité – dans la tendance vers l'interconnexion interterritoriale des grands systèmes d'énergie électrique.

Introduction :

L'énergie électrique est délivrée sous forme de tension constituant un système sinusoïdal triphasé. Les paramètres caractérisant ce système sont : la fréquence, l'amplitude des trois tensions, la forme d'onde qui doit être la plus proche d'une sinusoïde et la symétrie du système triphasé caractérisée par l'égalité des modules des trois tensions et de leurs déphasages relatifs.

Dans ces conditions, la qualité de l'énergie fournie aux utilisateurs dépend de celle de la tension au point de livraison. Or, la qualité de la tension peut être affectée soit du fait de certains incidents inhérents à la nature physique et aux suggestions d'exploitation du réseau, ou bien du fait du fonctionnement de certains récepteurs particuliers.

Ces défauts de la qualité de la tension se manifestent sous forme de différentes perturbations relatifs aux quatre paramètres précédemment définis.

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux alternatifs est devenue très préoccupante. La nécessité de réaliser la qualité de l'énergie électrique dans les installations industrielles, commerciales...etc se trouve confrontée aux problèmes posés par l'introduction ou l'avènement progressif des nouvelles charges à caractéristiques Volts - Ampères complexes. En effet, outre les perturbations telles que les coupures, les creux et les pointes provoqués par la commutation, , il existe aussi des causes extrinsèques telles les phénomènes atmosphériques et internes spécifiques à chaque site, dues à une utilisation conjuguée de charges linéaires et non linéaires.

Un déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des surcharges harmoniques, des niveaux élevés de distorsion des tensions et des courants, l'augmentation de la température dans les conducteurs et les générateurs sont autant de facteurs contribuant à détériorer la qualité et la fiabilité d'un réseau électrique.

On a donc quatre possibilités distinctes de perturbations et leurs combinaisons éventuelles :

Fluctuation de la fréquence à 50 Hz : elles sont rares et ne sont observées que lors de circonstances exceptionnelles, par exemple certains défauts graves du réseau, au niveau de la production ou du transport, le plus souvent lors du fonctionnement sur groupe de secours (découplé du réseau général) . [1]

Variations de l'amplitude : il ne s'agit pas des variations lentes de tension, mais des variations rapides ou de creux de tension, ces derniers se présentent sous forme d'à-coups brusques, soit isolés soit plus ou moins répétitifs de forme régulière (créneaux par exemple) ou non. [2]

Modification de la forme d'onde de la tension : cette onde n'est alors plus sinusoïdale, et peut être considérée comme représentable par une onde fondamentale à 50 Hz, associée soit à des harmoniques de fréquence (h.50 Hz), soit même parfois à des ondes de fréquence quelconque.

Dissymétrie du système triphasé :

On peut en plus mentionner un type particulier de perturbations difficile à classer puisqu'il concerne tout à la fois : l'amplitude et la forme d'onde, ceux-ci sont constitués par les variations transitoires d'amplitude dont la durée est inférieure à 10 ms. [1] [2]

I-1-/ Classification et origine des perturbations :

Les causes des perturbations peuvent être classées en deux groupes :

I-1.1-/ Les phénomènes aléatoires :

Les phénomènes aléatoires sont à caractère accidentel, on peut citer la foudre ou les défauts prenant naissance soit dans les éléments du réseau (lignes, câbles, transformateurs, etc...) soit dans l'installation des utilisateurs. Les perturbations engendrées sont :

I-1.1.1-/ Les creux de tension et les coupures brèves :

Résultant principalement de défauts fugitifs dans les réseaux qui provoquent le fonctionnement des protections et des automatismes de reprise de service (réenclencheurs automatiques).

I-1.1.2-/ Les coupures de longue durée (supérieurs à 1 minute) :

Résultant de défauts permanents dans les réseaux et nécessitant une intervention humaine.

I-1.1.3-/ Les surtensions transitoires :

Soit d'origine atmosphérique, soit plus fréquemment mais avec des amplitudes moins importantes dues à la commutation d'équipements électriques. [1] [2]

I-1.2-/ Les phénomènes permanents ou semi permanents :

Existant pendant des durées bien déterminées, ils sont engendrés par certains appareils installés principalement chez les utilisateurs de l'énergie électrique. Selon le cas, ces appareils prélèvent des courants dissymétriques sur les trois phases, ou absorbent des courants dont l'amplitude varie brusquement d'une manière bien importante ou bien dont la forme d'onde est très différente d'une sinusoïde. Les perturbations qui en résultent consistent en des :

I-1.2.1-/ Variations lentes de tension :

résultant de variation de la charge sur les réseaux ; elles sont corrigées par l'action des régleurs en charge équipant certains transformateurs.

I-1.2.2-/ A coups de tension :

Résultant de la commutation de charges importantes (ex : démarrage de gros moteurs).

I-1.2.3-/ Fluctuations rapides de tension :

Produites par des équipements à variation rapide de charge (fours à arc et machines à souder ...)et responsables du phénomène de Flicker (papillotement de l'éclairage).

I-1.2.4-/ Harmoniques :

Engendrées essentiellement par les convertisseurs statiques de puissance.

I-1.2.5-/ Déséquilibres de tension :

Résultant de l'élimination de charges déséquilibrées (ex : charges monophasées alimentées entre deux phases du réseau triphasé tels que certains fours à induction ou les sous stations pour la traction ferroviaire à fréquence industrielle).

I-2-/ Effet des perturbations :

Les effets instantanés se matérialisent sous des formes multiples, on peut citer :

Pour les creux de tension et les coupures brèves : manœuvres intempestives de contacteurs et de relais, défauts de commutation des onduleurs, défauts de fonctionnement de systèmes électriques analogiques ou numériques, erreurs d'exécution de calculs informatiques..... etc [1] [3].

Pour les surtensions : claquage des isolants, claquage des semi conducteurs utilisés dans les convertisseurs statiques. [3]

Pour les harmoniques : manœuvres intempestives de systèmes à base d'électronique pouvant être dues au décalage du passage par zéro ou de la crête de l'onde résultant de tension, claquage dues à des surtensions à la valeur de crête. [4]

Pour les déséquilibres : dégradation des performances des machines électriques, un vieillissement accéléré des isolants, la production de courants de ligne ayant des fréquences non caractéristiques. [3]

I-3-/ Solutions pour améliorer la qualité de l'énergie électrique :

Une dégradation de la qualité peut conduire à une modification du comportement et des performances ou même la destruction des équipements avec les conséquences envisageables sur la sécurité des personnes et des surcoûts économiques.

Pour remédier à tout cela, des solutions mises en œuvre pour :

- Corriger le fonctionnement des installations.
- Agir de façon préventive en vue de raccordement de charges polluantes.

- Mettre en conformité l'installation par rapport aux normes et aux recommandations du distributeur d'énergie. [3]

On peut citer comme solutions :

I-3.1.-/ Dépollution des tensions perturbatrices :

Les solutions les plus modernes consistent à fabriquer la charge la moins polluante comme le pont redresseur dodécaphasé de manière à réduire le taux d'émission d'harmoniques. [3]

I-3.1.1.-/ Filtres actifs :

Ils comprennent en plus des éléments (R,L,C) des convertisseurs de puissance. Ce sont des sources de courant ou de tension qui éliminent les perturbations harmoniques en injectant en série ou en parallèle sur le réseau des courants, des tensions ou les deux à la fois en opposition par rapport aux perturbations existantes.

Le filtre actif s'adapte automatiquement à l'évolution des charges et du réseau, peut compenser plusieurs rangs d'harmoniques dans la limite de sa bande passant, il est intéressant sur des charges ne nécessitant pas de compensation de puissance réactive. [4]

I-3.1.2.-/ Filtres passifs :

Le principe d'un filtre passif est de modifier localement l'impédance du réseau, de façon à dériver les courants harmoniques et à éliminer les tensions là où c'est nécessaire. On associe des éléments L,C de manière à obtenir une résonance série accordée à une fréquence choisie. [4]

En fonction de la dépollution à réaliser, différents types de filtres passifs sont utilisés :

- Inductance anti-harmoniques (ou filtre de barrage).
- Filtre résonnant.
- Filtre amortis.

Les filtres passifs sont utilisés pour des charges nécessitant une compensation de l'énergie réactive.[4]

Afin de réduire le dimensionnement et par conséquent le pris des filtres actifs, on peut envisager l'association de filtre actif de faible puissance à des filtres passifs. Dans ce cas, les filtres passifs ont pour rôle d'éliminer les harmoniques prépondérants laissant aux filtres actifs le soin de compenser le reste des perturbations. Plusieurs configurations ont été présentées dans la littérature, les plus étudiés sont :

- Le filtre actif série avec des filtres passifs parallèles.
- Le filtre actif parallèle avec des filtres passifs parallèles.
- Filtre actif série connecté en série avec des filtres passifs parallèles. [3]

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons vu les différents types de phénomènes affectant la qualité de l'énergie électrique.

En dehors des perturbations occasionnées par des agents externes, les charges non linéaires engendrent un bon nombre de perturbations soit à caractère permanent (harmoniques, déséquilibres...)ou à caractère transitoire (fluctuations rapides de tension).

Vu le progrès technologique surtout dans le domaine de l'électronique, la perspective de retour rapide aux conditions de charge linéaire est illusoire. De récentes études [5] ont démontré que la consommation de courants non linéaires va augmenter de façon très abrupte dans les prochaines années.

Introduction :

Aujourd'hui, la situation au niveau des réseaux alternatifs est devenue très préoccupante. La qualité de l'énergie électrique dans les installations industrielles, commerciales Se dégrade de plus en plus.

Outre les perturbations telles que les coupures, les creux et les pointes provoquées par la commutation et par les phénomènes atmosphériques, il existe aussi des causes extrinsèques et internes spécifiques à chaque site, dues à une utilisation conjuguée de charges linéaires et non linéaires.

Un déclenchement intempestif des dispositifs de protection, des surcharges harmoniques, des niveaux élevés de distorsion des tensions et des courants et l'augmentation de la température dans les conducteurs et les générateurs sont autant de facteurs contribuant à détériorer la qualité et la fiabilité d'un réseau électrique.

Plusieurs charges consomment en plus de l'énergie active une quantité de puissance réactive. Le réseau électrique lui-même consomme et produit de l'énergie réactive. La transmission et la distribution de l'énergie électrique engendrent des pertes réactives dues aux inductances séries des transformateurs, les lignes longues..... Lignes et câbles électriques génèrent une puissance réactive grâce à leur capacité shunt. Cette génération est une propriété des systèmes haute tension.

Dans un réseau électrique, la puissance active produite doit couvrir la consommation et les pertes sinon la fréquence change.

Il existe aussi une relation étroite entre la balance de la puissance réactive d'un système de puissance et la tension. En effet, un excès du réactif signifie une surtension, un déficit engendrerait une forte chute de tension. La balance du réactif a une grande influence sur les pertes actives d'un réseau, l'échauffement de ses composants et dans certains cas sa stabilité. [5]

Plusieurs moyens sont utilisés pour la compensation de la puissance réactive tels que les condensateurs shunt ou série, les inductances shunt et les compensateurs synchrones. Ces moyens sont coûteux, engendrent des phénomènes transitoires dues à la commutation des condensateurs au réseau en plus du temps de réponse conséquent.

Devant ces problèmes et ceux du transit de puissance, la compagnie américaine « EPRI » (Electric Power Research Institute) a lancé un projet d'étude des systèmes FACTS (Flexible AC

Transmission Systems) afin de mieux maîtriser le transit de puissance dans les lignes électriques. [7]

Le concept FACTS regroupe tous les dispositifs d'électronique de puissance qui permettent d'améliorer l'exploitation du réseau électrique. La technologie de ces systèmes (Thyristors ou GTO) leur assure une vitesse et une fiabilité supérieure à celle des systèmes électromécaniques classiques [9]. Ils agissent sur le réseau par le contrôle du réactif, l'échange d'énergie active ou réactive, le contrôle de l'impédance d'une ligne pour un but d'augmenter la capacité efficace de transport tout en maintenant voire en améliorant la stabilité des réseaux [9] [7].

Les systèmes FACTS peuvent être classés en trois catégories [7] :

- Les compensateurs parallèles.
- Les compensateurs séries.
- Les compensateurs hybrides (série - parallèle).

II-1-/ Compensateurs parallèles :

Les équipements utilisant l'électronique de puissance ont l'avantage d'éliminer les parties mécaniques et d'avoir un temps de réponse très court.

Les compensateurs parallèles injectent du courant au réseau via le point de raccordement. Quand une impédance variable est connectée en parallèle sur un réseau, elle consomme ou injecte un courant variable. Cette injection de courant modifie les puissances actives et réactives qui transitent dans la ligne [7]. Les compensateurs parallèles les plus utilisés sont :

II-1.1-/ Compensateurs parallèles à base de thyristors :

II-1.1.1-/ Condensateurs commandés par thyristors (CCT) :

Le circuit de puissance de base d'un CCT (TSC : Thyristor Switched Capacitor [7]) consiste en une batterie de condensateurs, une bobine limitant le courant et un commutateur à thyristors (Fig 2.1.a). les condensateurs sont commutés par fonctionnement des thyristors en interrupteurs. La plus part de ces valves à thyristors sont protégées par la tension d'amorçage d'un parafoudre à oxyde de zinc, raccordé en parallèle sur la valve à thyristors et en série avec la batterie de condensateurs [9]. Les thyristors fonctionnent en pleine conduction [7].

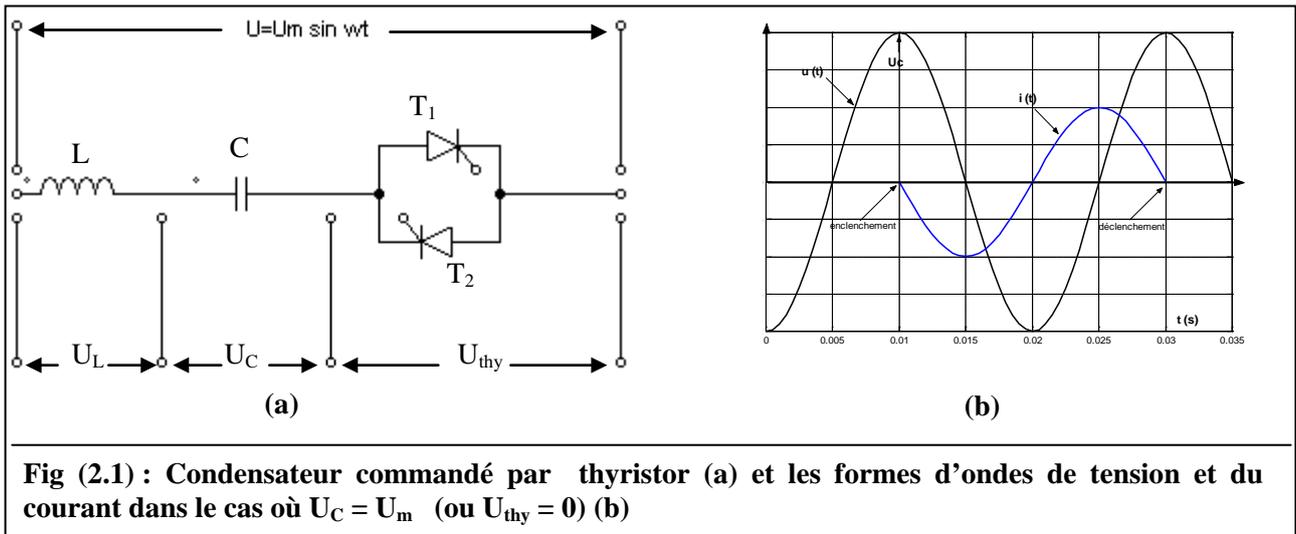


Fig (2.1) : Condensateur commandé par thyristor (a) et les formes d'ondes de tension et du courant dans le cas où $U_C = U_m$ (ou $U_{thy} = 0$) (b)

II-1.1.2- Inductance commandée par thyristor (LCT) :

Un LCT (TCR : Thyristor Controlled Reactor) est constitué d'un variateur de courant alimentant une charge inductive : une bobine permettant la variation de la puissance réactive absorbée (Fig 2.2) Le LCT se comporte comme une inductance variable car on peut varier de façon continue la valeur du courant dans l'inductance, de la conduction maximale jusqu'à la valeur nulle.

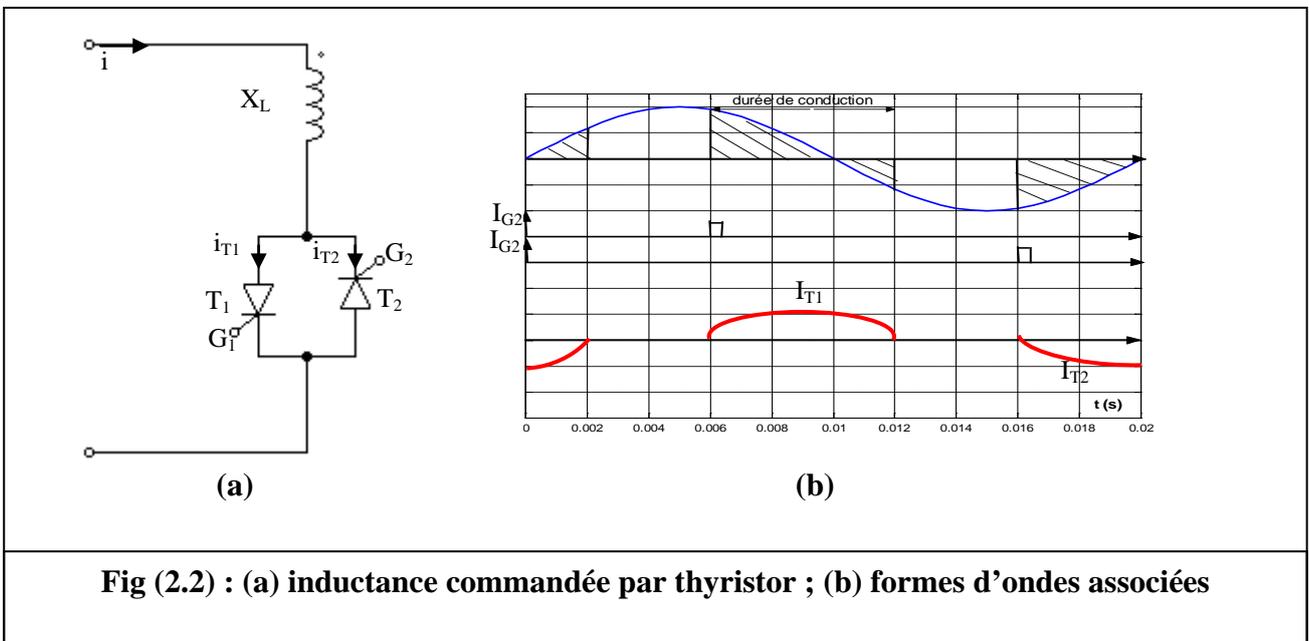


Fig (2.2) : (a) inductance commandée par thyristor ; (b) formes d'ondes associées

II-1.1.3- Compensateur statique SVC (Static Var Compensator) :

L'association des dispositifs CCT, LCT, bancs de capacités fixes et filtres d'harmoniques constituent un SVC (compensateur statique d'énergie réactive)[7]

En régime stationnaire, le domaine de fonctionnement d'un compensateur statique a trois zones [9]:

a-/ domaine des tensions basses (OA) :

Dans lequel la tension du réseau est si basse que le compensateur statique fonctionne au maximum en capacitif ($Y_c > Y_L$)

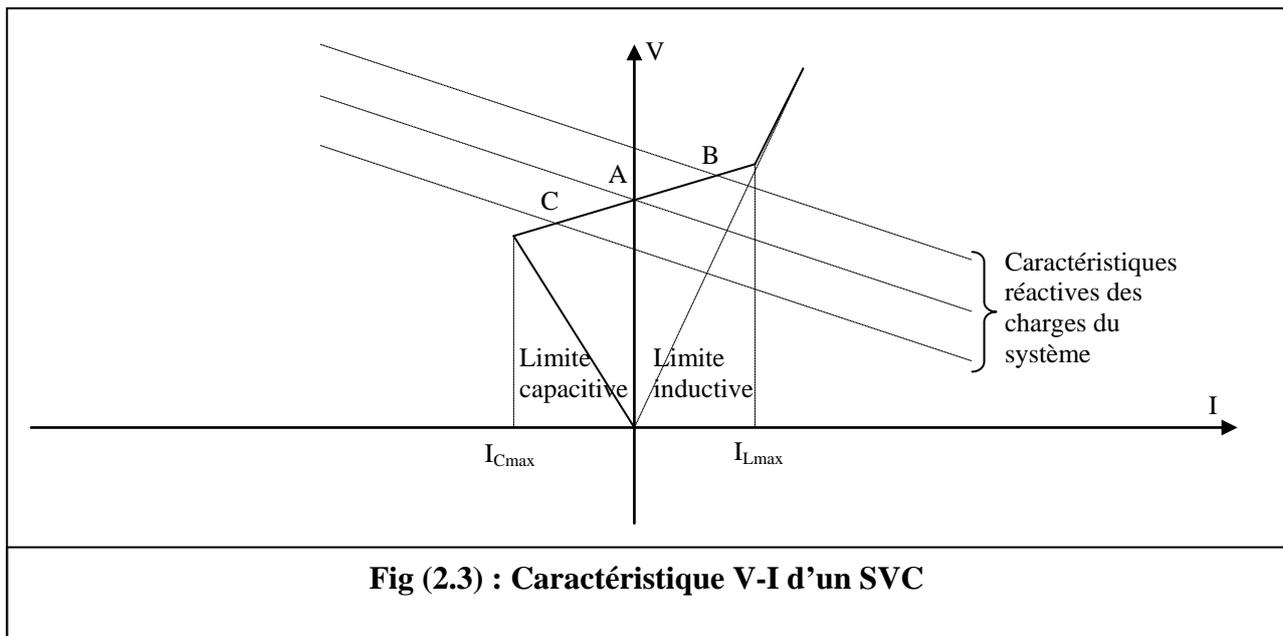
b-/ domaine de réglage linéaire :

Dans lequel la puissance doit être compensée à une valeur qui permet l'établissement du point de fonctionnement sur la caractéristique (AB).

c-/ domaine des surtensions (BC) :

Dans lequel le compensateur statique fonctionne au maximum inductif ($Y_L > Y_c$) [9] [11] [7].

La caractéristique statique est donnée sur la (Fig 2.3).



II-1.1.4- Le TCBR (Thyristor Control Breaking Resistor):

Ce type de compensateurs connecté en parallèle est utilisé pour améliorer la stabilité du réseau pendant la présence de perturbations [7]

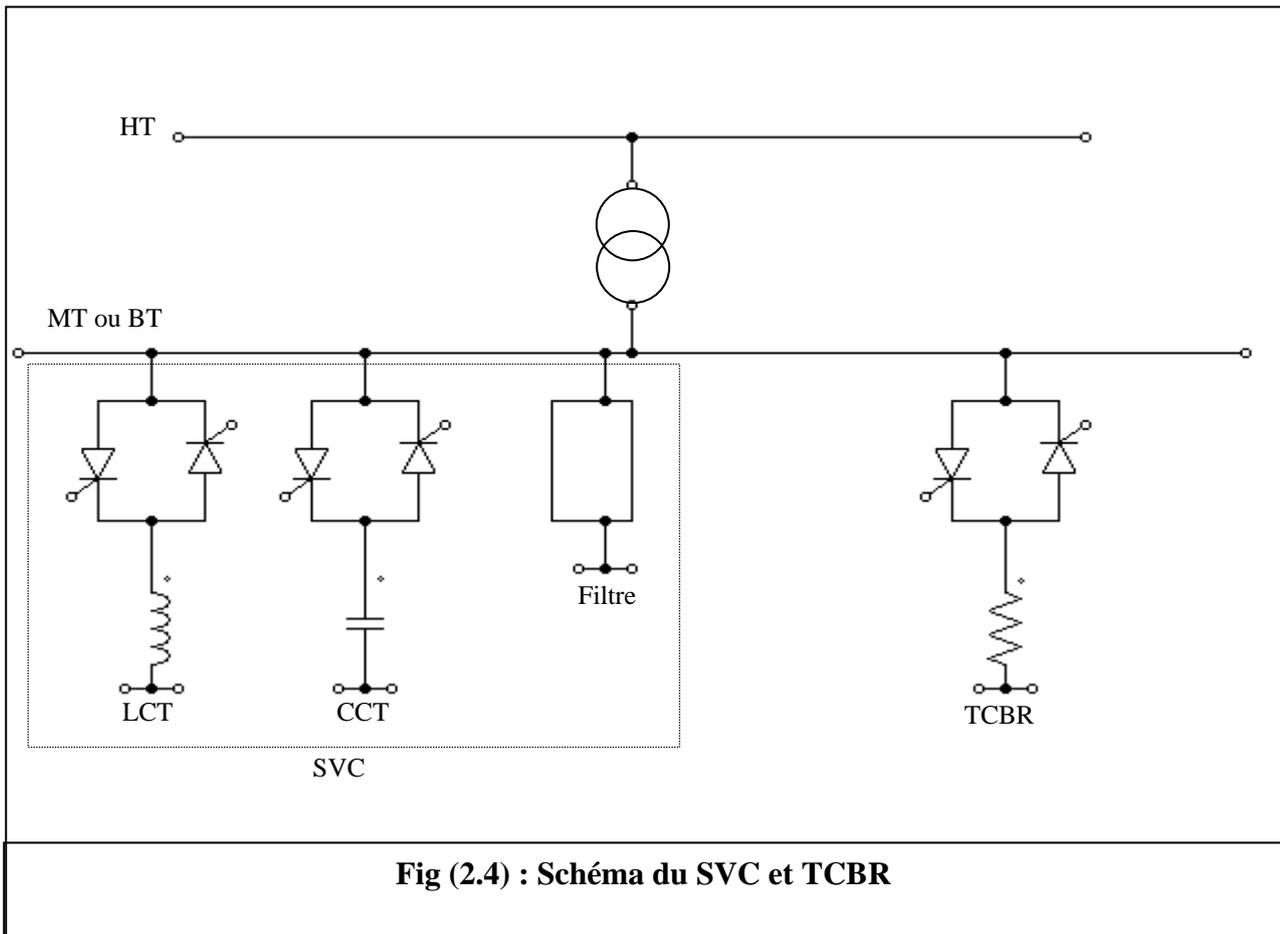


Fig (2.4) : Schéma du SVC et TCBR

II-1.2-/ Compensateurs parallèles à base de GTO thyristors :

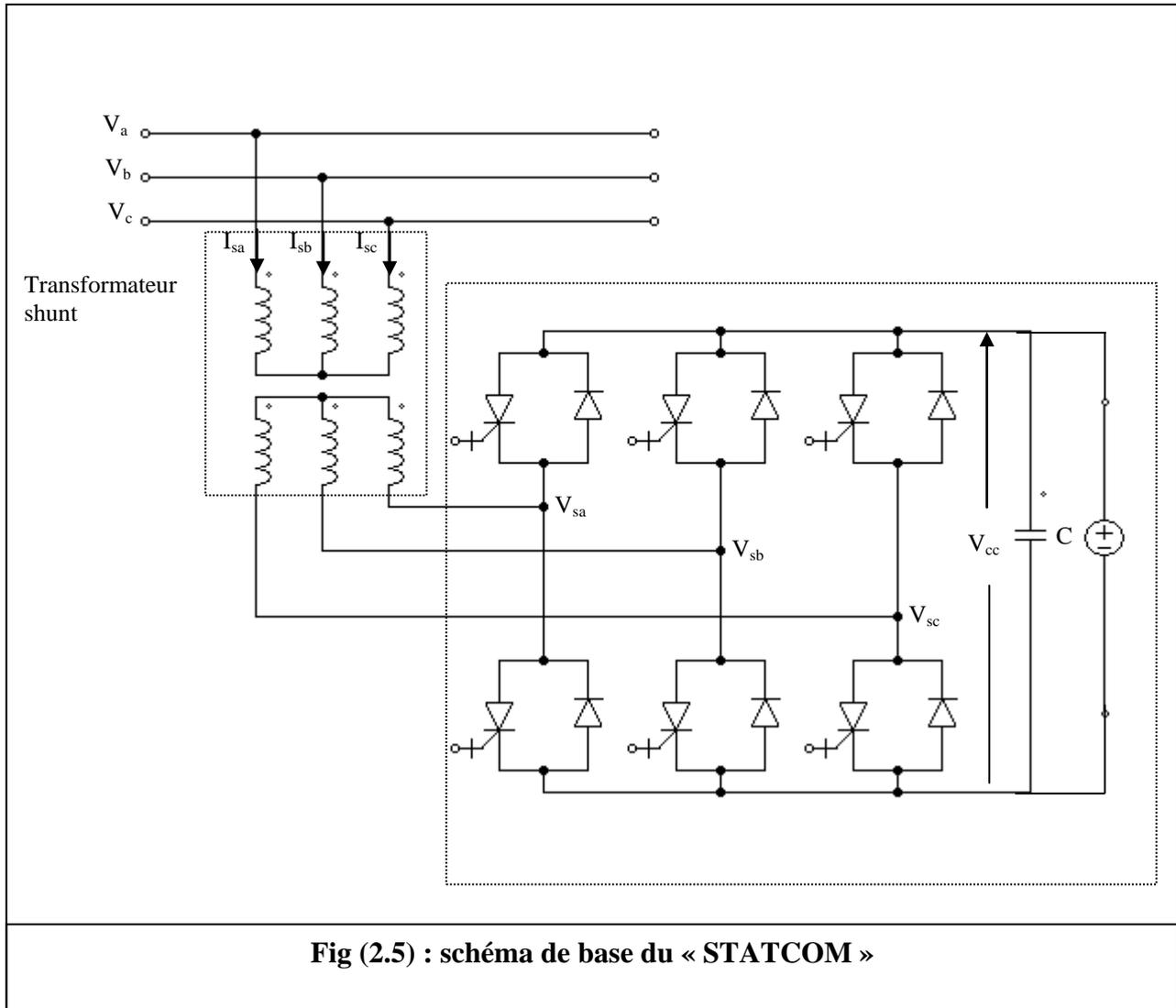
Il s'agit du compensateur statique synchrone (STATCOM : STATic COMPensator) désigné auparavant par compensateur statique de puissance réactive avancé (CSPRA). Ce dispositif est capable d'échanger de l'énergie réactive avec le réseau électrique en fourniture ou en absorption. Les termes « synchrone » et « compensateur » indiquent qu'il est équivalent à un compensateur synchrone tournant mais sans inertie mécanique puisqu'il n'a pas de partie tournante. [10] [9]

Le STATCOM possède plusieurs avantages sur les compensateurs conventionnels :

- Il réagit plus vite pouvant répondre en moins d'un cycle à des variations de la tension.
- Lorsque la tension est basse, il peut produire plus de puissance réactive donc il sert principalement à la compensation dynamique des réseaux afin de faciliter la tenue en tension, d'accroître la stabilité en régime transitoire et l'amortissement des oscillations. [9]

Cependant, le STATCOM de base engendre de nombreux harmoniques. Il faut donc utiliser pour résoudre ce problème, des compensateurs multi – niveaux à commande MLI ou encore utiliser des filtres. [10]

La figure (2.5) représente le schéma de base d'un STATCOM.



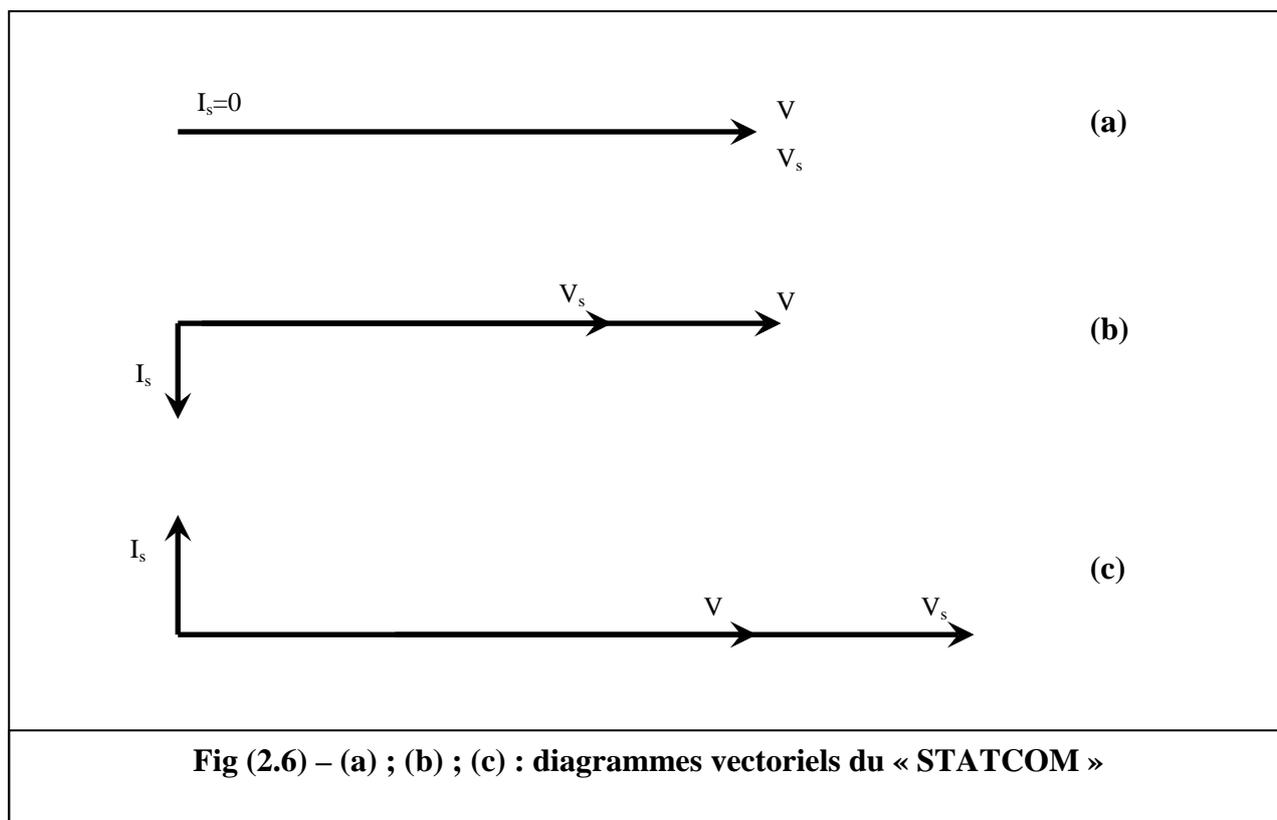
L'échange de l'énergie réactive se fait par le contrôle de la tension de sortie de l'onduleur V_s , laquelle est en phase avec la tension du réseau V . Le fonctionnement peut être décrit de la façon suivante :[10]

- 1-/ Si $V_s = V$ (Fig 2.6-a), le courant I_s est nul donc la compensation est nulle.
- 2-/ Si V_s est inférieure à V , un courant I_s circulant dans la réactance « x » (inductance de fuite du transformateur de couplage) est déphasée de $(-\pi/2)$ par rapport à V . Sa valeur est donnée par :[11]

$$I_s = (V - V_s) / x \quad (2.1)$$

Ce courant sera inductif (Fig 2.6-b) donc le compensateur se comporte comme une grosse inductance.

3-/ Si V_s est supérieure à V , le courant I_s sera $\pi/2$ en avance sur V (Fig 2.6-c) sa valeur est donnée par l'équation (2.1) sauf que I_s est négatif. Par conséquent, le convertisseur fournit de la puissance réactive à la ligne de transport. [11]



La grandeur de la tension V_s dépend du potentiel V_{cc} aux bornes du condensateur de stockage. [9]

L'avantage de ce dispositif est de pouvoir échanger de l'énergie de nature inductive ou capacitive uniquement à l'aide d'une inductance. Contrairement au SVC, il n'y a pas d'élément capacitif qui puisse provoquer des résonances avec des éléments inductifs du réseau. [10]

La (Fig 2.7) représente les caractéristiques (V-I) ; (V-Q) d'un STATCOM. [9]

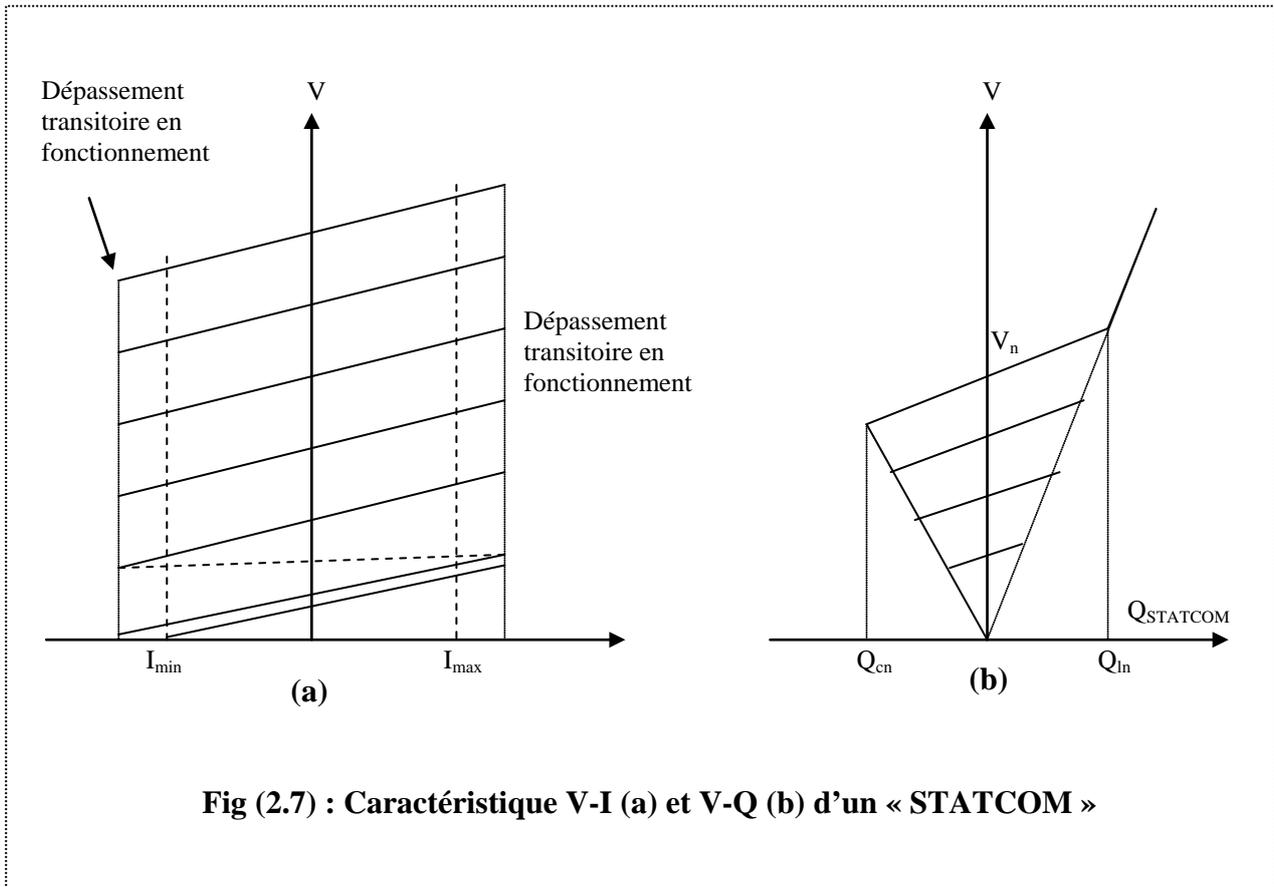


Fig (2.7) : Caractéristique V-I (a) et V-Q (b) d'un « STATCOM »

II-2- / Compensateurs série :

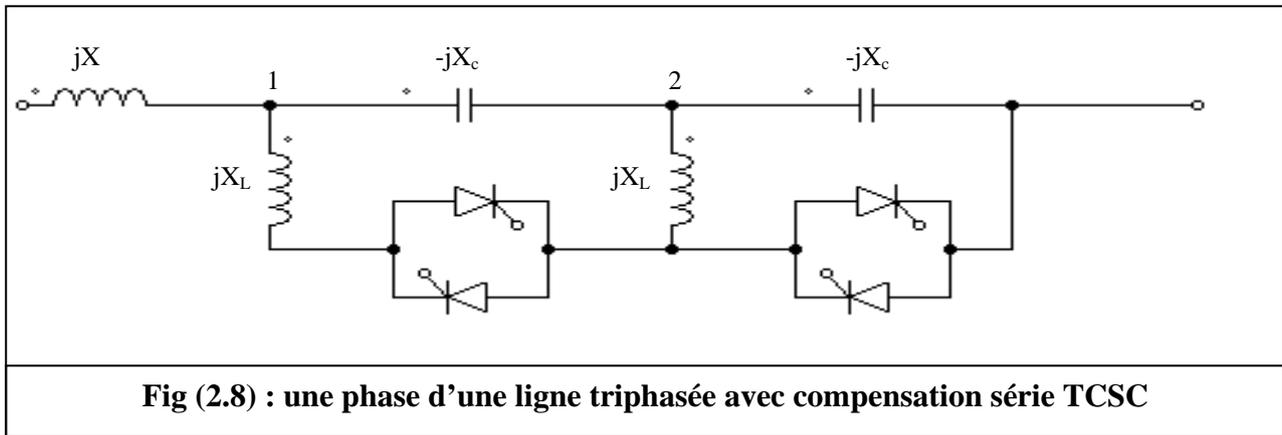
Ces compensateurs sont connectés en série avec le réseau et peuvent être utilisés comme une impédance variable (inductance ou capacité) ou une source de tension variable. En général, ces compensateurs modifient l'impédance des lignes de transport. [7]

Compensateurs série à base de thyristors :

II-2.1- / Compensateur série contrôlé par thyristor :

II-2.1.1- / Le TCSC (Thyristor Controlled Series Capacitor)

Il est composé d'une inductance en série avec un gradateur à thyristor, le tout en parallèle avec un condensateur [7] (Fig 2.8). Ces dispositifs auront pour effet de réduire la réactance inductive de la ligne donc augmenter la capacité de transport de cette dernière.

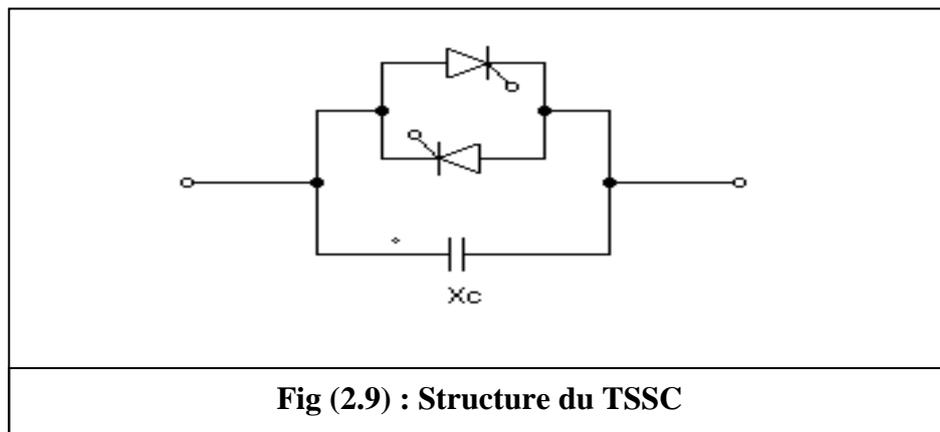


Si les thyristors sont bloqués, le TCSC a une impédance fixe qui est celle du condensateur. Si les thyristors sont commandés en interrupteurs électroniques et en pleine conduction, l'impédance du TCSC est encore fixe et vaut l'impédance équivalente du condensateur en parallèle avec l'inductance. L'expression de l'impédance est donnée par l'expression suivante où « α » représente l'angle de retard à l'amorçage des thyristors. [10]

$$X(\alpha) = jL\omega / [((2/\pi).(\pi - \alpha + \sin(\alpha))) - L\omega^2] \quad (2.2)$$

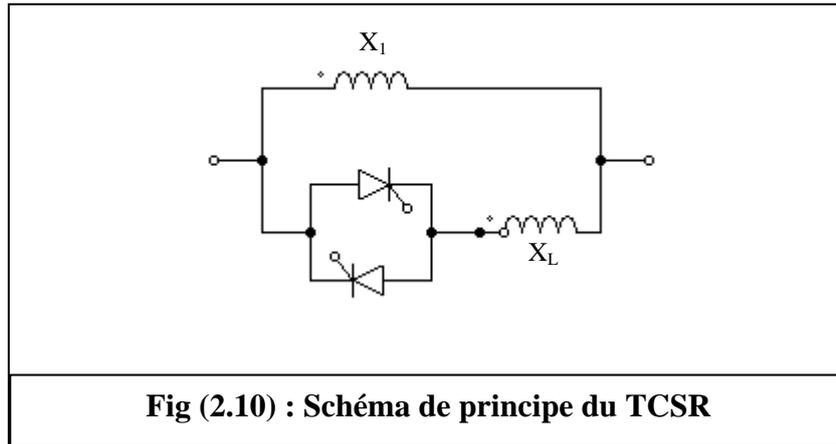
II-2.1.2- Le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor):

La différence entre ce système et le TCSC est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180° . [7] voir (Fig 2.9).



II-2.1.3- Le TCSR (Thyristor Controlled Series Reactor):

C'est un compensateur qui est commandé pour fournir une réactance inductive variable (Fig 2.10).



II-2.1.4- Le TSSR (Thyristor Switched Series Reactor):

La différence entre ce système et le TCSR est que l'angle d'amorçage est soit de 90° soit de 180°. [7]

II-2.2- Compensateur série à base de GTO Thyristors :

II-2.2.1- Le SSSC (Static Synchronous Series Compensator) :

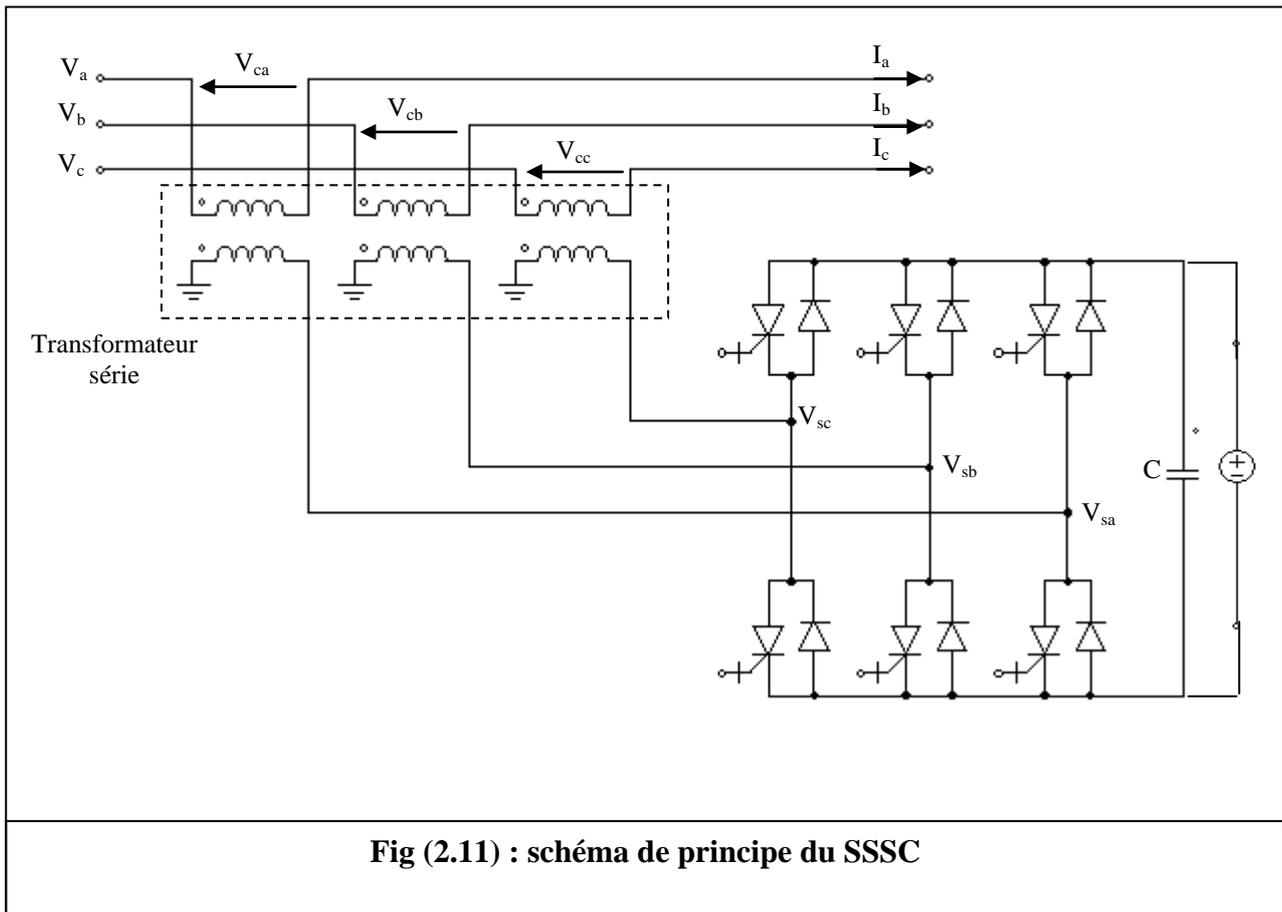
Ce type de compensateur série (Compensateur Synchrone Statique Série)est le plus important dispositif de cette famille. Il est constitué d'un onduleur triphasé couplé en série avec la ligne électrique à l'aide d'un transformateur [10] (Fig 2.11).

Son rôle est d'introduire une tension triphasée, à la fréquence du réseau, en série avec la ligne de transport. Cette tension est en quadrature avec le courant de la ligne.

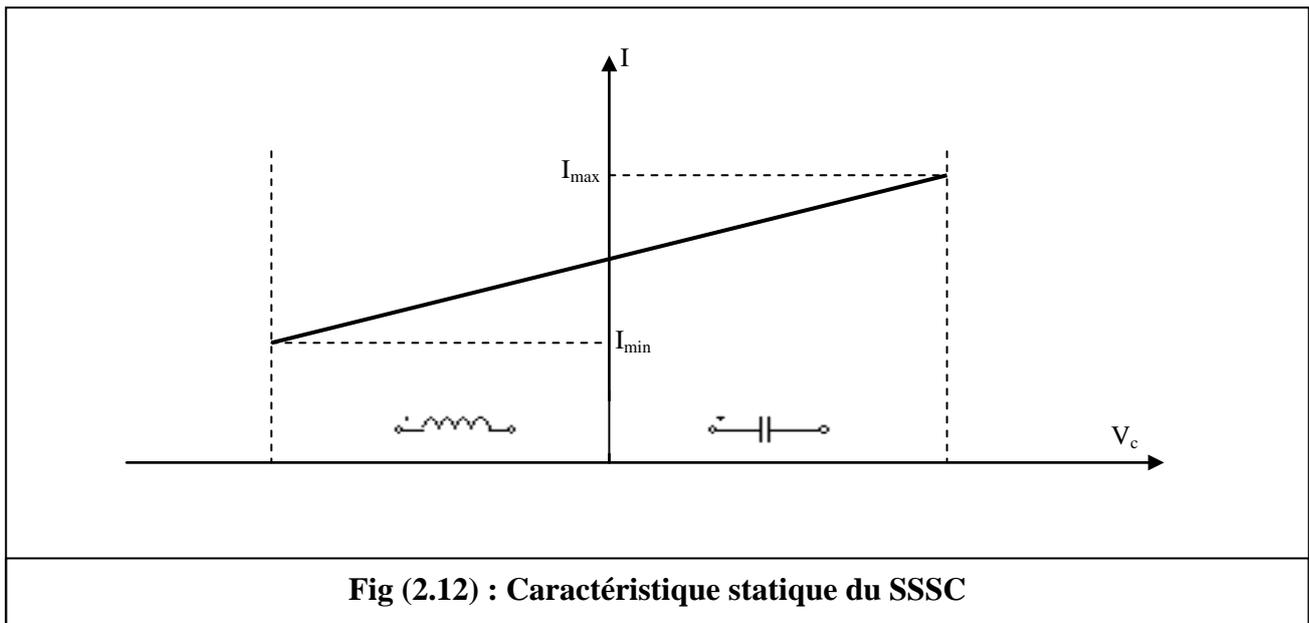
$$V_c = -j K.X.I \Rightarrow I = j V_c / KX \quad (2.3)$$

Nous pouvons régler continuellement la valeur apparente de la capacité ou de l'inductance ainsi introduite dans la ligne sans pour autant craindre l'apparition d'oscillations dues à des résonances avec les éléments du réseau.

La caractéristique statique d'un compensateur synchrone statique série est donnée sur la (Fig 2.12)



Si l'on utilise un système de stockage d'énergie, le SSSC pourrait échanger la puissance active avec le réseau. Ceci peut contribuer à améliorer la stabilité du réseau. [7]



II-3-/ Compensateurs hybrides série – parallèle :

II-3.1-/ Compensateurs commandés par thyristors :

II-3.1.1-/ Transformateur déphaseur à thyristor :

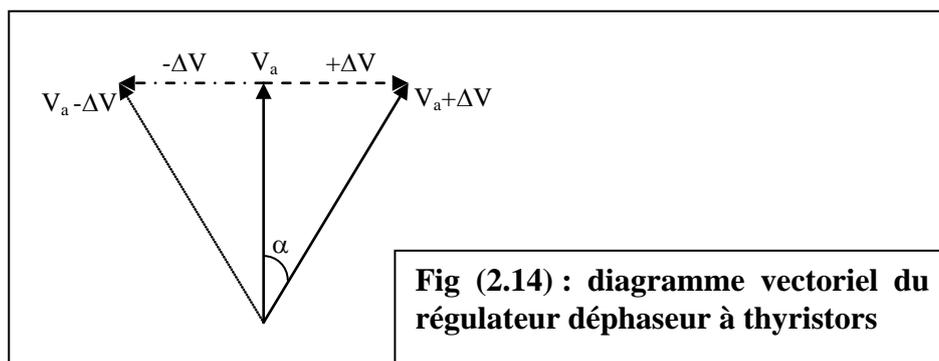
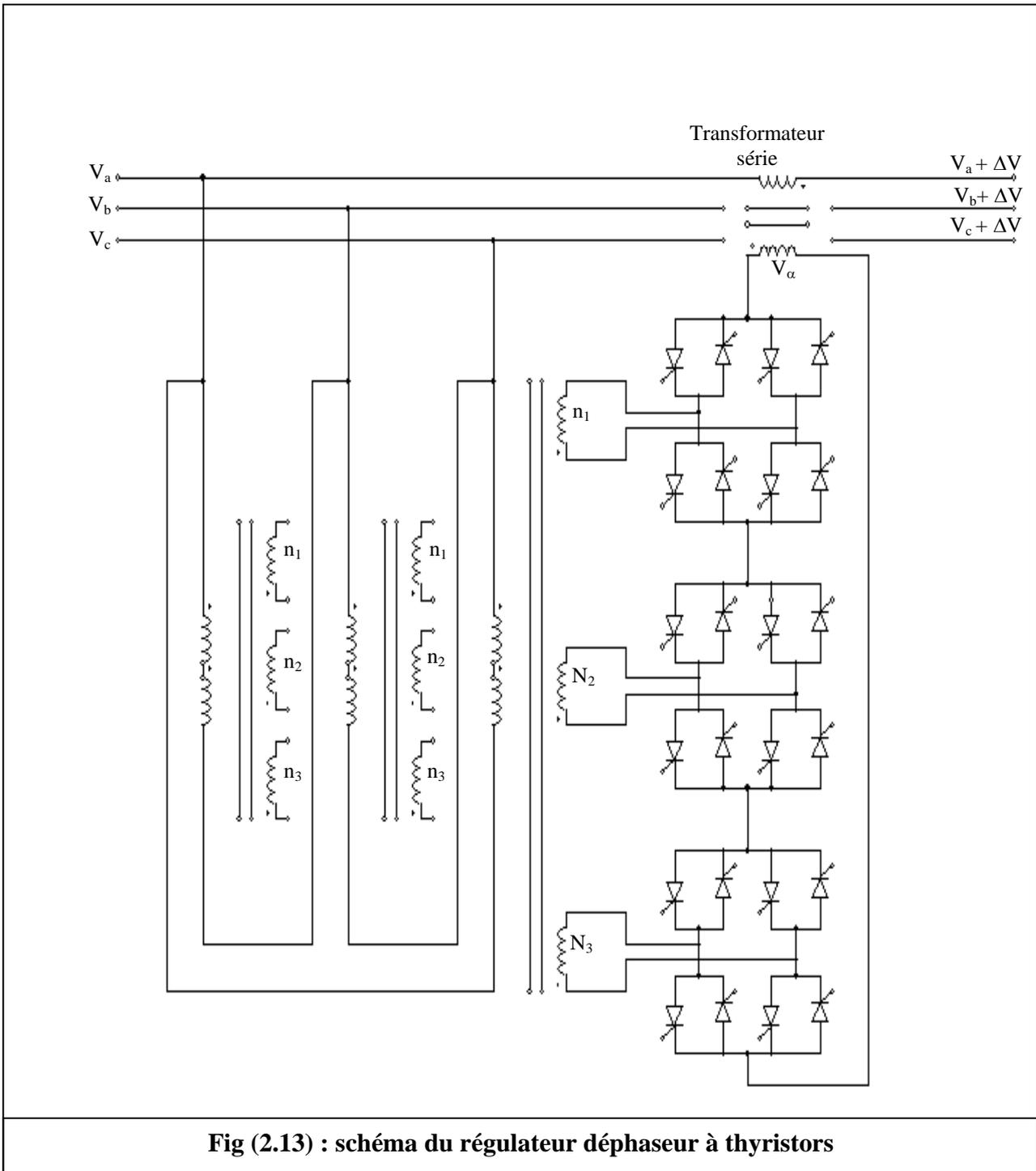
Ce type de compensateur [Figure (2.13)] a connu plusieurs appellations :

- TCPAR (Thyristor Controlled Phase Angle Regulator)
- TCPST (Thyristor Controlled Phase Shifting Transformer)

Ce dispositif a remplacé le régleur en charge mécanique classique (LTC : Load Tap Changer) par un commutateur de prises de réglage à thyristors [9]. Il est constitué de deux transformateurs, l'un est branché en série avec la ligne et l'autre en parallèle. Ce dernier possède différents rapports de transformations (n_1, n_2, n_3) [7]. Les deux transformateurs sont reliés par l'intermédiaire des thyristors.

Le transformateur branché en série dans la ligne injecte une tension ($V\alpha$) en quadrature, réglable par changement de prises [9]. L'amplitude de cette tension injectée est une combinaison des secondaires du transformateur parallèle disposant de trois bobinages ayant des tensions en proportions de 1 :3 :9. ainsi, on obtient une tension réglable en 27 pas (entre -13 et +13).

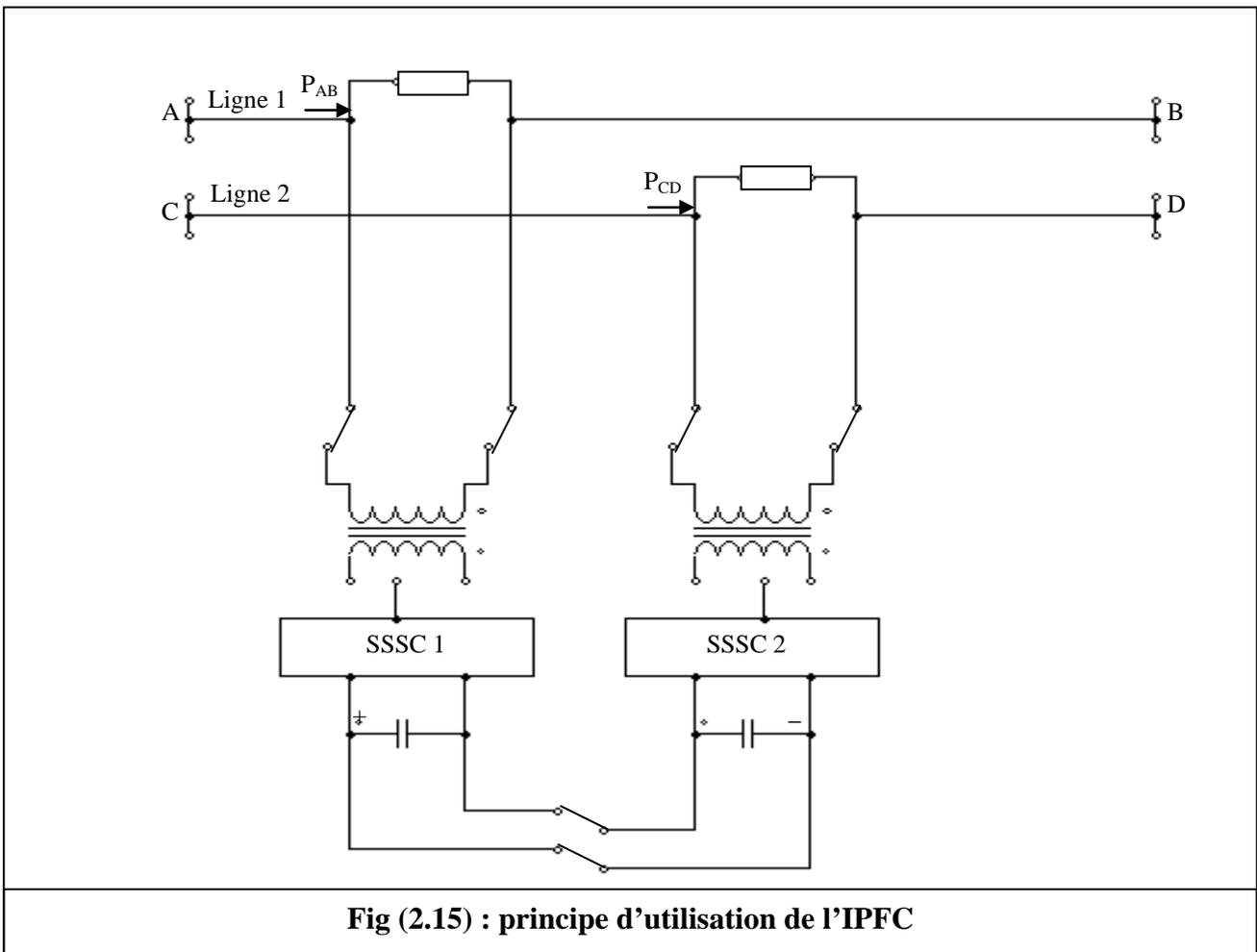
Un déphasage α est alors introduit et l'angle de transport total de la ligne devient ($\delta \pm \alpha$) [Figure (2.14)]. [9] [10]



II-3.2-/ Compensateurs hybrides à base de GTO Thyristors :

II-3.2.1-/ IPFC (Interline Power Flow Controller):

Appelé aussi contrôleur de transit de puissances entre lignes. Il contrôle les transits dans un système multi lignes, dans lequel au moins deux lignes possèdent une compensation série par SSSC. Il fournit la possibilité d'égaliser les transits de puissances actives et réactives sur les lignes ou de décharger une ligne en surcharge vers une autre moins chargée.



II-3.2.2-/ L'UPFC (Unified Power Flow Controller) :

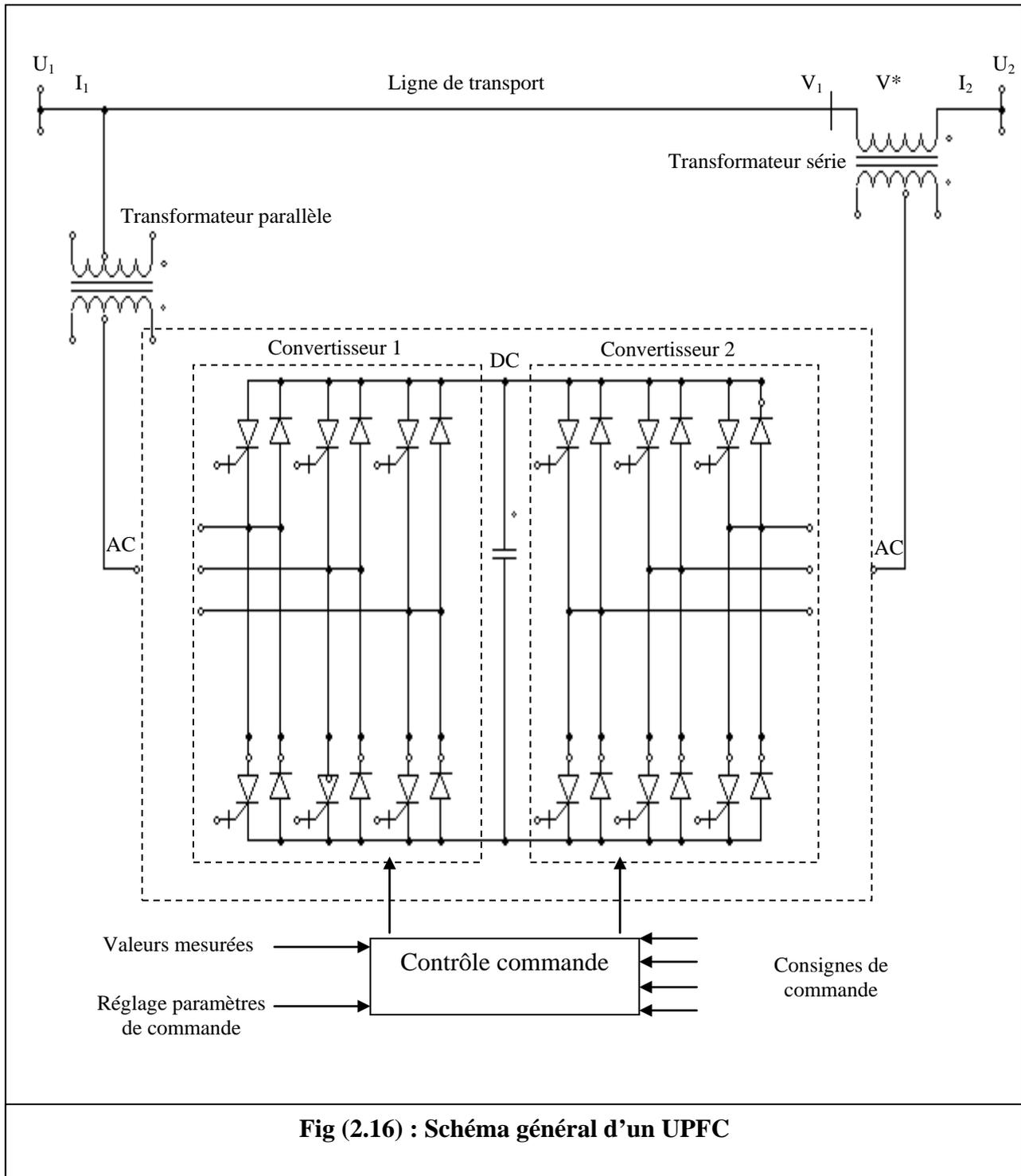
L'UPFC est l'un des systèmes les plus performants. Il est capable de contrôler les paramètres associés au transit de la puissance dans une ligne électrique : [7] [8]

- la tension
- le déphasage des tensions aux extrémités d'une ligne

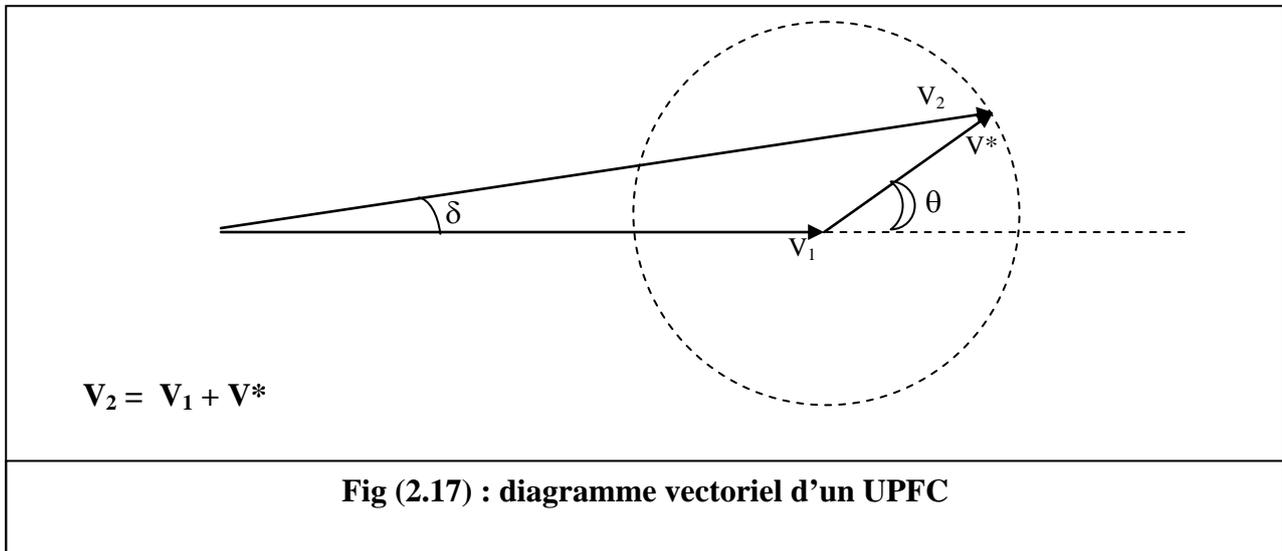
- l'impédance de la ligne

Il peut aussi fournir de la puissance réactive. [8]

Son mode opératoire s'appuie sur un transformateur parallèle, un transformateur en série, chacun des deux connecté à un onduleur, le tout relié par un condensateur coté DC (voir Fig (2.16)). [6]



Une partie de la puissance active est dérivée de la ligne à courant alternatif pour y être injectée avec une phase appropriée. Le convertisseur « 1 » prélève cette énergie et la délivre au convertisseur « 2 ». Ce dernier génère une tension complexe V^* qui est ajoutée vectoriellement à la tension CA. Le contrôle de tension peut changer l'amplitude et l'angle entre les tensions V_1 et V_2 . [9] (Fig 2.17)



A l'aide d'un tel montage, on peut obtenir une tension injectée V^* en série variable en amplitude et en phase.

La composante de la puissance réactive requise pour produire l'amplitude et la phase de V^* est fournie par le convertisseur « 2 ». Comme le convertisseur « 1 » peut aussi générer la puissance réactive, il peut faire fonction d'un STATCOM pour contrôler la tension V_1 . [8] [9]

Donc un UPFC peut jouer le rôle de :

- compensateur shunt
- compensateur série
- un déphaseur
- un contrôleur multi fonctions, permettant de gérer les puissances actives et réactives dans la liaison, soutenir la tension et amortir les oscillations de puissances. [7] [9]

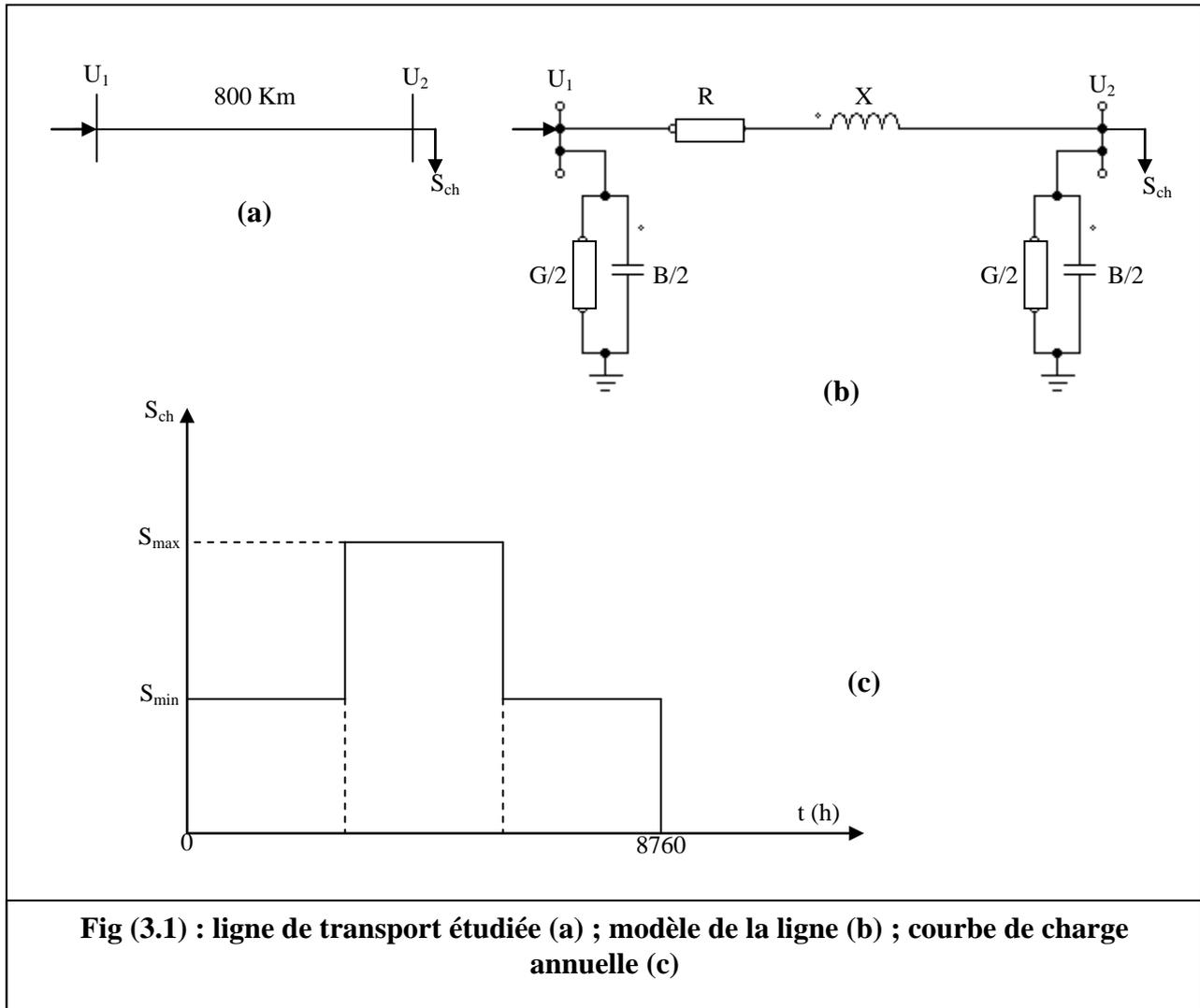
Conclusion :

Le problème de compensation de puissance réactive, peut devenir un facteur de limitation de puissance transitée dans les lignes de transport d'énergie. Les équipements à base d'électronique de puissance, y compris leurs commandes appropriées, offrent des solutions efficaces à ce problème. Grâce aux avancées récentes dans la technologie des IGBT / GTO, le temps de réaction des dispositifs FACTS est diminué à quelques millisecondes.

En effet les systèmes FACTS ont la capacité d'améliorer la stabilité des réseaux électriques. Ils peuvent également contrôler la puissance transmissible de la ligne en utilisant deux méthodes : la compensation série et la compensation parallèle.

III-1-/ Description du réseau :

Le modèle étudié est celui d'une ligne de longueur allant jusqu'à 800 km alimentant une charge qui varie entre un seuil minimal et un seuil maximal sous une tension de 500 kV.



En vue des problèmes rencontrés avec les réseaux de transport d'énergie électrique :

- fortes chutes de tension
- efforts mécaniques (ligne à un seul conducteur par phase)
- effet couronne
- capacité de transport
- grands flux d'énergie réactive dus au caractère inductif des lignes

Dans cette première partie du travail, on choisit trois variantes de lignes en faisceau pour conduire un traitement comparatif des données initiales du modèle à considérer. Ce qui est représenté dans le tableau (3.1).

| Paramètre \ Variante | 1 | 2 | 3 |
|--|-----|-----|-----|
| Nombre de conducteur / phase (n) | 2 | 3 | 3 |
| Section du conducteur F (mm ²) | 600 | 600 | 400 |

Tab (3.1) : paramètres caractérisant les variantes à étudier

L'étude sera à titre comparatif entre les différentes variantes c'est-à-dire observer l'influence du passage d'un nombre $n = 2$ à $n = 3$ pour une même section de 600 mm^2 , et en second lieux, on passe de la section $F = 600 \text{ mm}^2$ à 400 mm^2 pour un nombre $n = 3$.

Le niveau de tension choisi (500 kV) prend en considération la longueur choisie (800 km).

Pour les lignes haute tension, les sections des conducteurs utilisés sont relativement grandes, ce qui fera diminuer la résistance active. La diminution conséquente des pertes actives fait que dans le modèle de telles lignes, la résistance active est négligée. Cette approximation est encore plus justifiable, en utilisant les phases en faisceau, pour réduire essentiellement l'effet couronne. Il en résulte que la résistance et la conductance de la ligne sont très petites devant la réactance et la susceptance.

$$r_0 \approx g_0 \approx 0 \text{ ligne sans pertes actives}$$

Pour les différentes variantes, les valeurs des paramètres primaires sont directement prises des catalogues, et sont données dans le tableau (3.2) :

| F (mm ²) | n | 500 kV | | | 750 kV | | | 2r _c (mm) | Masse (Kg/mm) |
|----------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|-----------------------|-----------------------|---|----------------------|---------------|
| | | r ₀ (Ω/km) | x ₀ (Ω/km) | b ₀ (Ω ⁻¹ /km) 10 ⁻⁶ | r ₀ (Ω/km) | x ₀ (Ω/km) | b ₀ (Ω ⁻¹ /km) 10 ⁻⁶ | | |
| 500 | 4 | | | | 0.02 | 0.28 | 3.99 | 29.0 | 1840 |
| 400 | 3 | 0.026 | 0.298 | 3.76 | / | / | / | 27.2 | 1501 |
| 600 | 2 | 0.026 | 0.33 | 3.42 | / | / | / | 33.1 | 2206 |
| | 3 | 0.018 | 0.293 | 3.82 | / | / | / | | |
| Dm | | 14 m | | | > 14 m | | | | |

Tab (3.2) : paramètres primaires pour chaque variante

III-2-/ Détermination des paramètres secondaires :

On peut calculer les paramètres secondaires comme suit :

$$\gamma_0 = (\mathbf{Z}_0 \cdot \mathbf{Y}_0)^{1/2} = \beta_0 + \mathbf{j}\alpha_0 \quad (3.1)$$

Ou bien si $r_0 \approx g_0 \approx 0$ $\gamma_0 = \mathbf{j}\alpha_0 = (\mathbf{j}b_0 \cdot \mathbf{j}x_0)^{1/2} \quad (3.2)$

Où : γ_0 : facteur de l'onde électromagnétique.

α_0 : facteur de phase de l'onde.

β_0 : facteur d'amortissement de l'onde.

L'impédance caractéristique sera :

$$\mathbf{Z}_c = (\mathbf{Z}_0/\mathbf{Y}_0)^{1/2} = (\mathbf{x}_0 / \mathbf{b}_0)^{1/2} \quad (3.3)$$

III-2-1/ Puissance caractéristique (Naturelle) :

on sait que les lignes produisent une puissance réactive par leurs capacités naturelles, mais elles en absorbent aussi proportionnellement au carré de leurs charges par les réactances longitudinales.

Lorsque l'impédance caractéristique de la ligne est strictement égale à l'impédance de la charge (cas idéal), la puissance transitée par la ligne est purement active, et dite puissance caractéristique ou naturelle, elle est définie comme suit :

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{U}_2^2 / \mathbf{Z}_c \quad (3.4)$$

Dans notre étude \mathbf{U}_2 est fixée à \mathbf{U}_N , donc :

$$\mathbf{P}_c = \mathbf{U}_N^2 / \mathbf{Z}_c \quad (3.5)$$

III-3-/ Expression en unités relatives des différentes grandeurs :

III-3-1-/La tension :

On définit pour grandeur de base pour ce paramètre la tension nominale :

$$\mathbf{U}_b = \mathbf{U}_N = 500 \text{ kV}$$

Donc la tension à n'importe quel point de la ligne sera exprimée par sa valeur relative :

$$U^* = U / U_N \quad (3.6)$$

Où U^* : valeur de la tension en unité relative.

III-3-2- / Puissances :

On sait que pour une ligne sans pertes $P_m = (U_1 \cdot U_2) / (Z_c \cdot \sin\alpha_0 l)$.

En posant $U_1 = K_u U_N$, on obtient $P_m = (K_u \cdot U_2^2) / (Z_c \cdot \sin\alpha_0 l)$. (3.7)

Ce qui donne en unité relative par rapport à P_c , $P_m^* = K_u / (\sin\alpha_0 l)$. (3.8)

Si les tensions des deux extrémités doivent être minimales et égales ($U_1 = U_2 = 1$), la puissance maximale (amplitude) qui pourra, idéalement, être atteinte sera :

$$P_{max}^* = 1 / (\sin 48^\circ) \approx 1.35$$

Le modèle de charge est donné par ses puissances correspondantes aux régimes limites :

$$S_{2max}^* = P_{2max}^* + j Q_{2max}^* = 1.2 + j 1$$

$$S_{2min}^* = P_{2min}^* + j Q_{2min}^* = 0.8 + j 0.6$$

Où S_{2max}^* : puissance apparente en régime de charge maximal.

S_{2min}^* : puissance apparente en régime de charge minimal.

Pour les utilités des analyses comparatives, le cas $n = 2$ est considéré comme état initial de base.

Dans ce cas, les puissances par unité sont exprimées comme suit :

$$P_2^* = P_2 / P_{c2} = P_2 \cdot Z_{c2} / U_N^2 \quad (3.9)$$

Pour les autres variantes ($n=3$), les puissances seront ré exprimées par unité de la manière suivante :

$$P_{(3)}^* = P / P_{c(3)} = P_{c(2)}^* \cdot P_{c2} / P_{c(3)} = P_{(2)}^* \cdot (U_N^2 / Z_{c(2)}) \cdot (Z_{c(3)} / U_N^2) = P_{(2)}^* \cdot Z_{c(3)} / Z_{c(2)} \quad (3.10)$$

Ainsi les puissances exprimées en unités relatives dans les deux cas (ou autres) sont en rapport direct avec les impédances d'onde :

$$P_{(3)}^* = P_{(2)}^* \cdot Z_{c(3)} / Z_{c(2)} \quad (3.11)$$

On applique la même formule pour les puissances réactives :

$$Q_{(3)}^* = Q_{(2)}^* \cdot Z_{c(3)} / Z_{c(2)} \quad (3.12)$$

Les valeurs des différents paramètres sont rapportées aux deux tableaux (3.3) ; (3.4) ; (3.5) :

| variante grandeur | n = 2 F = 600 mm ² | n = 3 | | n = 4 F = 500 mm ² |
|----------------------|----------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------------|
| | | F = 400 mm ² | F = 600 mm ² | |
| α_0 (° / km) | 0.06 | 0.06 | 0.06 | 0.06 |
| Zc (Ω) | 310.63 | 281.52 | 276.95 | 264.9 |
| Pc (MW) | 804.816 | 888 | 902.7 | 2123.45 |

Tab (3.3) : paramètres secondaires pour chaque variante

| U _N = 500 kV | | | | | | | | | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|-------------------------|-----------------|
| S* _{max} | | | | | | S* _{min} | | | | | |
| n = 2 | | n = 3 | | | | n = 2 | | n = 3 | | | |
| F = 600 mm ² | | F = 600 mm ² | | F = 400 mm ² | | F = 600 mm ² | | F = 600 mm ² | | F = 400 mm ² | |
| P* ₂ | Q* ₂ | P* ₃ | Q* ₃ | P* ₃ | Q* ₃ | P* ₂ | Q* ₂ | P* ₃ | Q* ₃ | P* ₃ | Q* ₃ |
| 1.2 | 1 | 1.07 | 0.89 | 1.087 | 0.906 | 0.8 | 0.6 | 0.713 | 0.535 | 0.725 | 0.543 |

Tab (3.4) : puissances de charge en unité relative pour chaque variante

| U _N = 750 kV | | | |
|-------------------------|-----------------|-------------------|-----------------|
| S* _{max} | | S* _{min} | |
| n = 4 | | | |
| F = 500 mm ² | | | |
| P* ₂ | Q* ₂ | P* ₂ | Q* ₂ |
| 0.99585 | 0.82987 | 0.6639 | 0.4979 |

**Tab (3.5) :
Puissances de charge en unité relative pour la ligne à 750 kV**

III-4-/ Traitement analytique du comportement de la ligne :

Pour l'étude du modèle de ligne considéré, on peut adopter le schéma linéique en π ; lequel reproduit plus fidèlement l'effet de répartition des paramètres. La ligne est représentée dans ce cas par un schéma dans lequel tous les paramètres du modèle sont des fonctions hyperboliques qui tiennent compte du phénomène ondulatoire caractérisant le transport d'énergie.

Pour une ligne sans pertes, le modèle se simplifie et ne contiendra plus que les inductances et les capacitances.

III-4-1-/ Etude et analyse des régimes de la ligne :

Pour étudier les régimes pour les différentes variantes, élaborons un programme de calcul qui prend en compte les différentes données et nous permet d'aboutir à l'analyse des relations qui existent entre les différents paramètres et notamment la puissance réactive.

Fixons comme hypothèse de départ que la tension U_2 à l'extrémité de la ligne est maintenue fixe et égale à U_N .

On aura à traiter une ligne sans pertes actives dont la tension le long de sa longueur en partant de son extrémité s'exprime

$$U^*(l) = \cos(\alpha_0 l) + Q_2^* \sin(\alpha_0 l) + P_2^* \sin(\alpha_0 l) \quad (3.13)$$

$$\text{Avec } U^*(l) = U(l) / U_2 = k_u(l) = K_u(l) e^{i\delta}$$

III-4-1-1-/ Pertes de tension :

Du fait que $U_2^* = 1$, la perte de la tension entre les deux extrémités se définit :

$$k_u = U_1 / U_2 = (U_2 + \Delta U_p) / U_2 = 1 + \Delta U_p^*$$

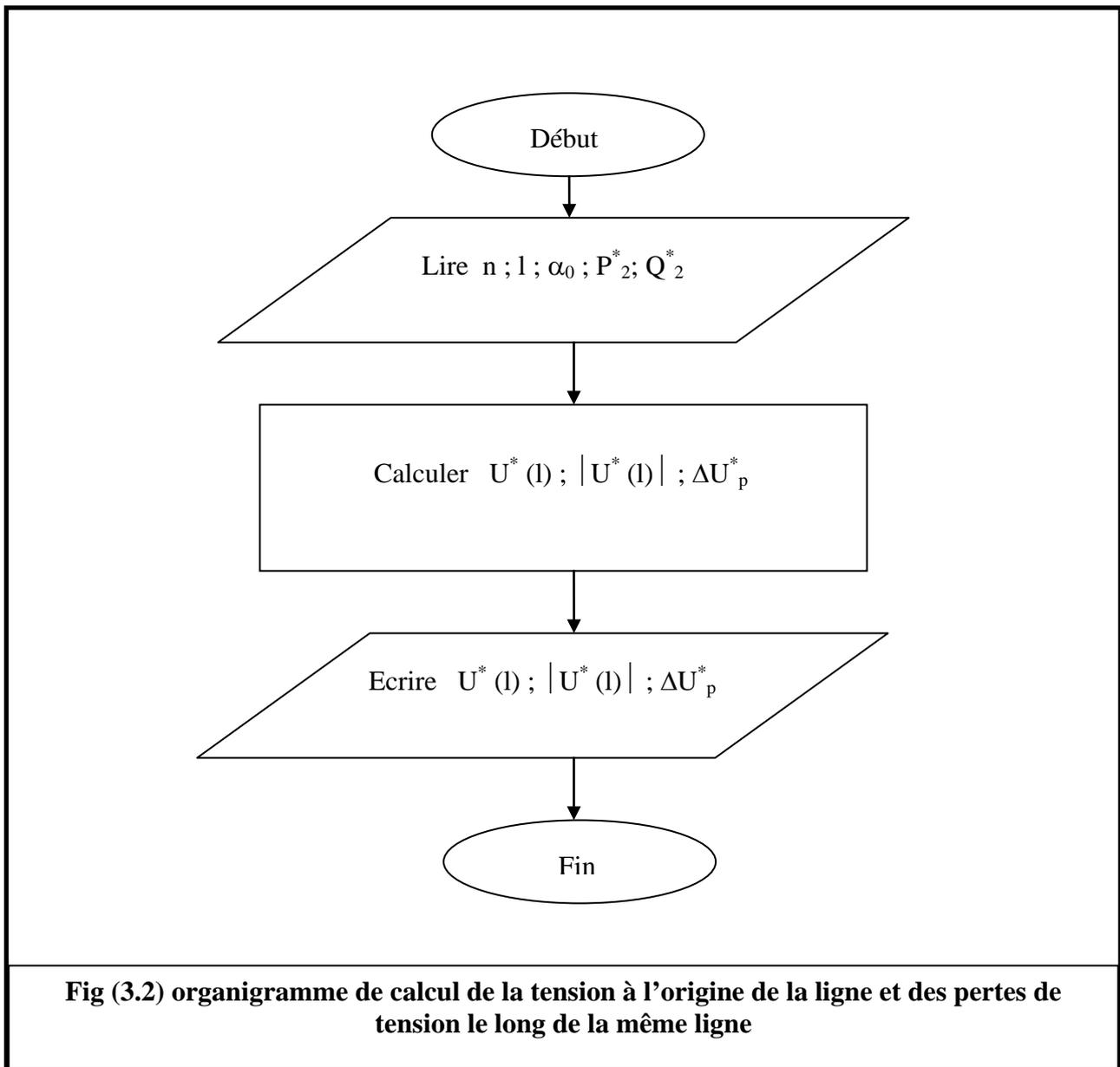
Ou bien

$$(3.14)$$

$$\Delta U_p^* = k_u - 1$$

Où ΔU_p^* : perte de tension.

Le calcul de la distribution de la tension, ainsi que les pertes correspondantes, le long de la ligne et pour les cas de variantes, et de puissances données, se fait suivant l'organigramme qui suit :



Les résultats sont inscrits aux tableaux (3.6), (3.7) et (3.8) puis projetés sur la figure [Fig (3.3)]

On remarque que la tension le long de la ligne varie dans de larges limites.

Les pertes de tension atteignent 67% pour le régime maximum de charge ($n=2$) ; 26% en régime minimum et (-34%) en régime à vide, ce qui rend le réseau inexploitable.

On remarque aussi que l'augmentation du nombre n à 3 diminue les pertes de tension. Ces dernières grappillent quelques marches si F passe à 400 mm^2 .

Les flux de puissance réactive restent énormes malgré la compensation locale.

On remarque que toutes les caractéristiques sont descendantes c'est-à-dire que la puissance réactive circule de l'origine de la ligne vers l'extrémité donc cette dernière est inductive. Les flux du réactif ont considérablement diminué par rapport au cas où la tension est sans contrainte.

Les valeurs élevées de la puissance réactive le long de la ligne nous amènent à dire qu'il faut employer une compensation ce qu'on va traiter dans le chapitre suivant.

III-4-1-4-/ Régime de puissance limite maximale :

Une ligne à grande distance idéale sous une tension nominale peut transmettre une puissance électrique maximale limite.

Cette puissance peut être déterminée de l'équation de la tension (3.13):

$$P_2 = [(U_1 \cdot U_2) / Z_c \sin \alpha_0 l] \cdot \sin \delta \tag{3.17}$$

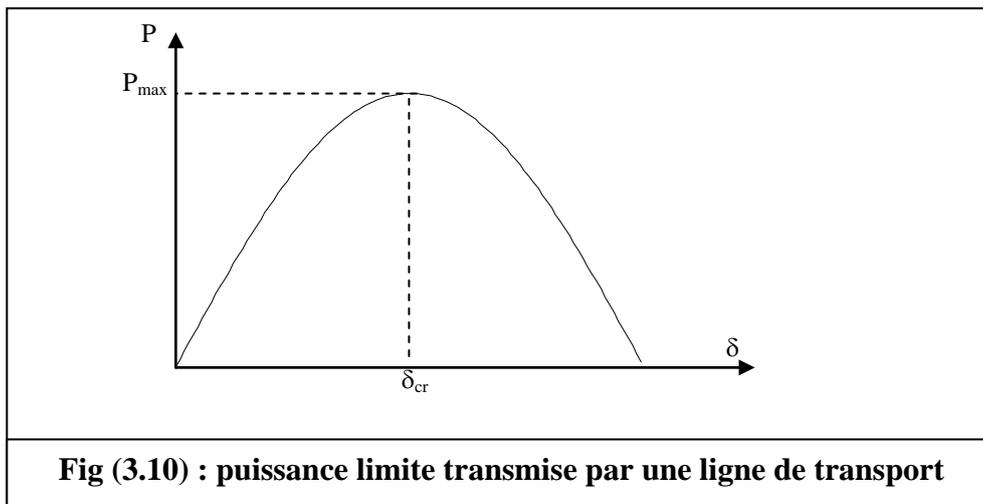
La puissance transmise par la ligne est une fonction sinusoïdale de l'angle de déphasage δ et de l'amplitude.

$$P_{\max} = [(U_1 \cdot U_2) / Z_c \sin \alpha_0 l] \tag{3.18}$$

En sachant que $K_u = (U_1 / U_2)$ et $P^*_m = P_m = P_c$ on aura :

$$P^*_m = K_u / Z_c \sin \alpha_0 l \tag{3.19}$$

Cette équation permet de déterminer $P^*_m = f(\alpha_0 l)$ pour différents cas de figure.



Les tableaux (3.29) et (3.30) montrent les valeurs de la puissance limite que peut transporter la ligne.

Les résultats obtenus confirment le bon ajustement de la puissance de charge au régime maximum, car la ligne travaille avec une bonne réserve.

La valeur la plus inférieure qu'on a obtenu est de 1.68 qui est nettement supérieure à 1.2.

La puissance limite transmise est inversement proportionnelle à la longueur de la ligne.

Pour avoir une idée sur l'influence de la tension sur la capacité de transport, on refait le même calcul précédent pour une ligne à $n = 4$ et $U_N = 750$ kV.

Le tableau (3.31) illustre les résultats obtenus. Le tableau (3.32) est un comparatif entre la variante à $n = 3$, $F = 600$ mm² et celle à $n = 4$.

En unité relative la différence entre les deux lignes ne se ressent pas mais si on revient aux unités réelles, on voit très bien que la capacité de transport de la ligne à $n = 4$ est de 2.2 à 2.5 fois de celle à $n = 3$.

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.4468 | 5.7618 | 4.2056 | 3.4269 | 2.9566 | 2.6390 | 2.4076 | 2.2292 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm²

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.4858 | 5.7813 | 4.2185 | 3.4366 | 2.9645 | 2.6457 | 2.4134 | 2.2345 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm²

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.4807 | 5.7787 | 4.2168 | 3.4353 | 2.9634 | 2.6448 | 2.4126 | 2.2338 |

Tableau 3.29 :
Puissance limite transmise par la ligne
Charge maximale

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.0096 | 5.2963 | 3.7178 | 2.9215 | 2.4372 | 2.1081 | 1.8672 | 1.6812 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm²

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.0488 | 5.3159 | 3.7310 | 2.9316 | 2.4453 | 2.1150 | 1.8733 | 1.6867 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm²

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.0437 | 5.3133 | 3.7293 | 2.9302 | 2.4442 | 2.1141 | 1.8725 | 1.6860 |

Tableau 3.30 :
Puissance limite transmise par la ligne
Charge minimale

$U_N = 750 \text{ kV}$ régime max $n = 4$, $F = 500\text{mm}^2$

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 10.3437 | 5.5992 | 4.0163 | 3.2209 | 2.7388 | 2.4122 | 2.1737 | 1.9897 |

$U_N = 750 \text{ kV}$ régime min $n = 4$, $F = 500\text{mm}^2$

| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| P_m^* | 9.9940 | 5.2292 | 3.6297 | 2.8204 | 2.3267 | 1.9903 | 1.7434 | 1.5522 |

Tableau 3.31 :
Puissance limite transmise par la ligne
 $U_n=750 \text{ kV}$, $n=4$

$U_N = 750 \text{ kV}$ régime max $n = 4$, $F = 500\text{mm}^2$

| | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| P_m (MW) | 22571 | 12218 | 8764 | 7028 | 5976 | 5264 | 4743 | 4342 |

$U_N = 750 \text{ kV}$ régime min $n = 4$, $F = 500\text{mm}^2$

| | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| P_m (MW) | 21808 | 11410 | 7920 | 6154 | 5077 | 4343 | 3804 | 3387 |

$U_N = 500 \text{ kV}$ régime max $n = 3$, $F = 600\text{mm}^2$

| | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| P_m (MW) | 9354 | 5099 | 3681 | 2970 | 2539 | 2248 | 2035 | 1871 |

$U_N = 500 \text{ kV}$ régime min $n = 3$, $F = 600\text{mm}^2$

| | | | | | | | | |
|---------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| L (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| P_m (MW) | 9071 | 4798 | 3367 | 2646 | 2207 | 1909 | 1691 | 1522 |

Tableau 3.32 :
Comparatif entre Puissances limites transmises par les lignes en unité réelle
Pour différents régimes de charge

Conclusion :

La variante à $n = 2$ occasionne des pertes de tension, des flux de puissance réactive énormes, une capacité de transport moindre par rapport à une ligne à $n = 3$.

La ligne à $n = 3$, $F = 400 \text{ mm}^2$ présente des performances techniques moins bonnes que celles de la ligne à $F = 600 \text{ mm}^2$. sur le plan économique la première est meilleure. Cependant pour ce qui va suivre on choisira la deuxième pour des considérations futures (évolution de la puissance de charge).

Les paramètres de la lignes qui sont la section du conducteur (F) et le nombre de conducteurs par faisceau (n) sont les plus importants du point de vue pertes d'énergie et capacité de transport.

Les deux paramètres influents sur la capacité de transport sont la longueur de la ligne inversement proportionnelle à la puissance max et le niveau de tension proportionnel à cette dernière.

La compensation locale de puissance réactive est insuffisante pour les lignes de grande distance c'est pour cela qu'on va opter pour une compensation série le long de la ligne ayant pour but de diminuer les pertes de tension et les flux de puissance réactive, aussi d'augmenter la capacité de transport.

$U_N = 500$ kV régime max

| I (km) variante | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|--------------------|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | n=2 F=600 | U_1^* | 1.1004 + 0.1272i | 1.1884 + 0.2531i | 1.2630 + 0.3760i | 1.3233 + 0.4947i | 1.3688 + 0.6079i | 1.3988 + 0.7141i |
| IU_1^* | 1.1077 | | 1.2150 | 1.3178 | 1.4128 | 1.4977 | 1.5705 | 1.6299 | 1.6746 |
| ΔU_p^* | 10.7731 | | 21.5032 | 31.7763 | 41.2782 | 49.7664 | 57.0516 | 62.9867 | 67.4604 |
| n=3 F=600 | U_1^* | 1.0885 + 0.1130i | 1.1648 + 0.2247i | 1.2281 + 0.3339i | .2777 + 0.4394i | 1.3130 + 0.5400i | 1.3336 + 0.6345i | 1.3392 + 0.7219i | 1.3300 + 0.8013i |
| | IU_1^* | 1.0943 | 1.1863 | 1.2727 | 1.3511 | 1.4197 | 1.4768 | 1.5214 | 1.5527 |
| | ΔU_p^* | 9.4345 | 18.6299 | 27.2710 | 35.1135 | 41.9667 | 47.6816 | 52.1440 | 55.2696 |
| n=3 F=400 | U_1^* | 1.0901 + 0.1148i | 1.1680 + 0.2284i | 1.2329 + 0.3394i | 1.2839 + 0.4466i | 1.3206 + 0.5488i | 1.3425 + 0.6449i | 1.3494 + 0.7337i | 1.3411 + 0.8144i |
| | IU_1^* | 1.0962 | 1.1902 | 1.2788 | 1.3594 | 1.4301 | 1.4894 | 1.5360 | 1.5690 |
| | ΔU_p^* | 9.6159 | 19.0172 | 27.8764 | 35.9404 | 43.0117 | 48.9363 | 53.5953 | 56.9010 |

Tableau 3.6 :
Régime de tension pour la charge maximale

$U_N = 500$ kV régime min

| variante \ l (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------------------|------------------|----------------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | n=2 F=600 | U_1^* | 1.0580 + 0.0848i | 1.1040 + 0.1687i | 1.1376 + 0.2507i | 1.1584 + 0.3298i | 1.1661 + 0.4052i | 1.1607 + 0.4761i |
| | IU_1^*I | 1.0614 | 1.1169 | 1.1649 | 1.2045 | 1.2345 | 1.2546 | 1.2641 | 1.2629 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 6.1379 | 11.6853 | 16.4934 | 20.4459 | 23.4546 | 25.4556 | 26.4085 | 26.2940 |
| n=3 F=600 | U_1^* | 1.0509 + 0.0753i | 1.0900 + 0.1498i | 1.1170 + 0.2226i | 1.1315 + 0.2929i | 1.1333 + 0.3599i | 1.1224 + 0.4229i | 1.0990 + 0.4812i | 1.0633 + 0.5341i |
| | IU_1^*I | 1.0536 | 1.1003 | 1.1389 | 1.1687 | 1.1890 | 1.1994 | 1.1997 | 1.1899 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 5.3588 | 10.0278 | 13.8948 | 16.8744 | 18.9042 | 19.9435 | 19.9719 | 18.9889 |
| n=3 F=400 | U_1^* | 1.0518 + 0.0766i | 1.0919 + 0.1523i | 1.1198 + 0.2264i | 1.1351 + 0.2979i | 1.1377 + 0.3661i | 1.1276 + 0.4301i | 1.1048 + 0.4894i | 1.0697 + 0.5432i |
| | IU_1^*I | 1.0546 | 1.1025 | 1.1424 | 1.1735 | 1.1951 | 1.2068 | 1.2083 | 1.1997 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 5.4633 | 10.2496 | 14.2424 | 17.3520 | 19.5130 | 20.6816 | 20.8348 | 19.9695 |

Tableau 3.7 :
Régime de tension pour la charge minimale

$U_N = 500$ kV régime à vide

| variante \ l (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------------------|------------------------------------|---------|---------|---------|---------|----------|----------|----------|----------|
| | | | | | | | | | |
| n=2 F=600 | U_1^* | 0.9944 | 0.9775 | 0.9496 | 0.9111 | 0.8622 | 0.8036 | 0.7360 | 0.6601 |
| | ΔU^* (%) | -0.5638 | -2.2487 | -5.0359 | -8.8937 | -13.7789 | -19.6362 | -26.3997 | -33.9930 |
| n=3 F=600 | U_1^* | 0.9944 | 0.9777 | 0.9501 | 0.9118 | 0.8633 | 0.8052 | 0.7381 | 0.6627 |
| | ΔU^* (%) | -0.5591 | -2.2302 | -4.9945 | -8.8212 | -13.6675 | -19.4792 | -26.1913 | -33.7287 |
| n=3 F=400 | U_1^* | 0.9944 | 0.9777 | 0.9500 | 0.9117 | 0.8632 | 0.8050 | 0.7378 | 0.6624 |
| | ΔU^* (%) | -0.5597 | -2.2326 | -4.9999 | -8.8307 | -13.6821 | -19.4997 | -26.2185 | -33.7632 |

Tableau 3.8 :
Régime de tension à vide

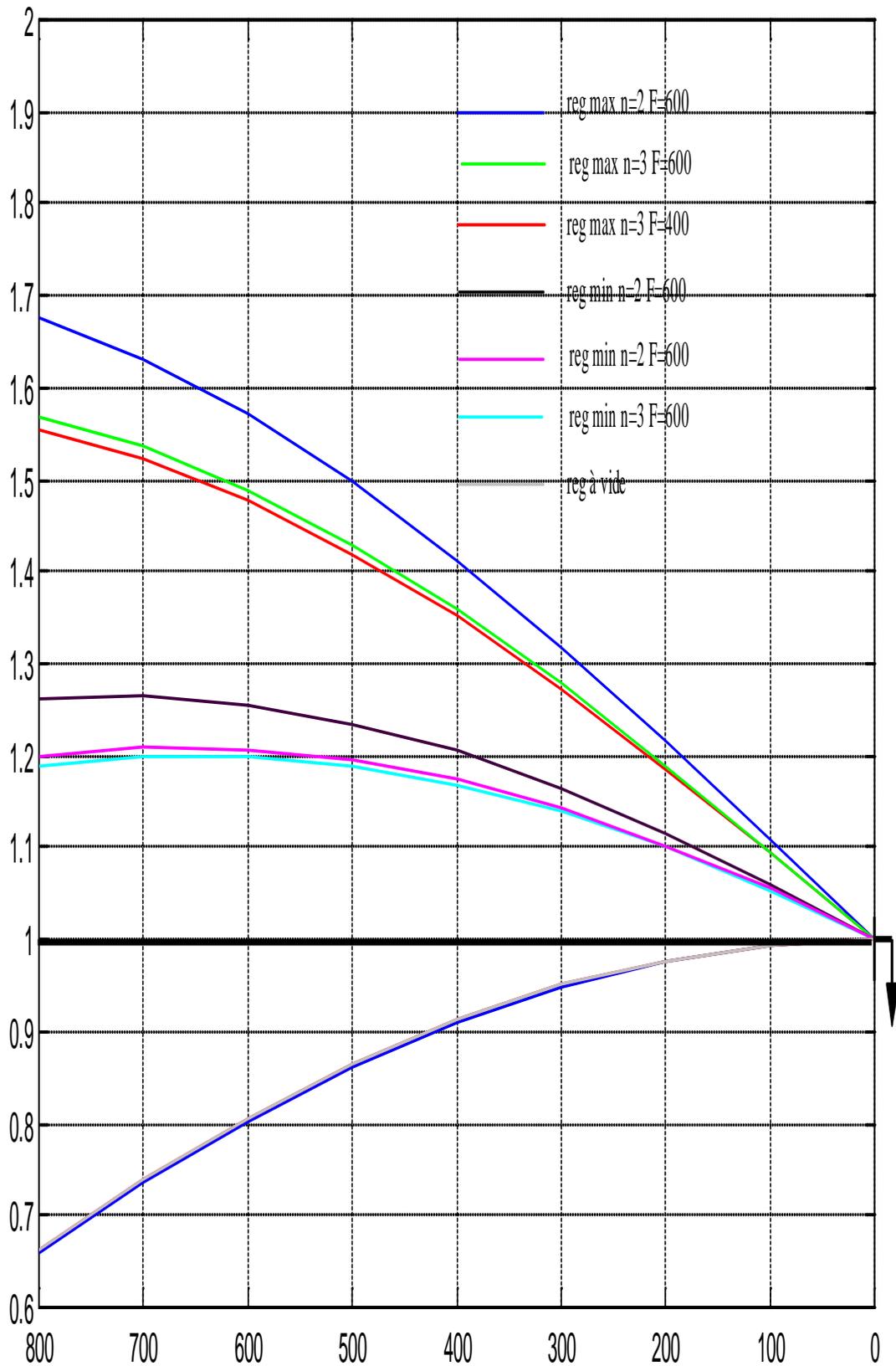


Fig (3.3) : régimes de tension pour différents paliers de charge sans contrainte de la tension

Dans le cas du régime à vide, la perte de tension devient négative. Ceci est du au caractère capacitif de la ligne.

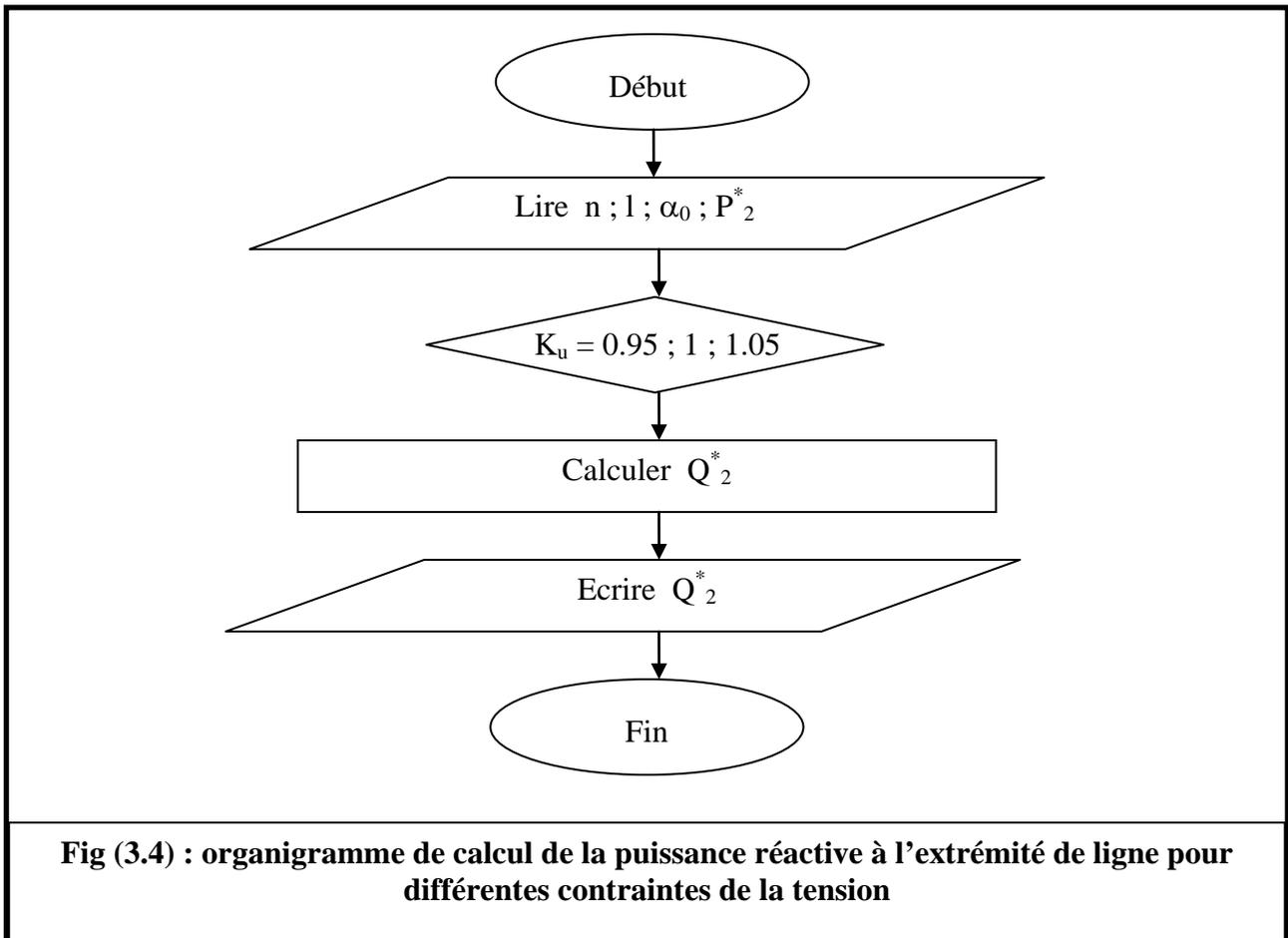
III-4-1-2-/ Régime de puissance réactive coté charge

Les fortes valeurs de pertes de tension font appel à une compensation. Pour cela, on calcule Q_2^* puissance réactive à l'extrémité qui doit assurer le rapport K_u donné des tensions d'extrémités de la ligne.

$$Q_2^* = [(K_u^2 / \sin^2(\alpha_0 l)) - (P_2^*)^2]^{1/2} - \text{Ctg}(\alpha_0 l) \quad (3.15)$$

Pour l'analyse comparative, on considérera trois valeurs de K_u (0.95 ; 1 ; 1.05).

Le calcul de Q_2^* se fait selon l'organigramme Figure (3.4) :



Les résultats sont représentés sur le tableau (3.9) :

| régime | variante | $K_u = 0.95$ | $K_u = 1$ | $K_u = 1.05$ |
|--|---------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Maximal | n = 2 | - 0.4796 | - 0.3024 | - 0.1619 |
| | n=3, F=600mm² | - 0.2035 | - 0.0861 | 0.0211 |
| | n=3, F=400mm² | - 0.2311 | - 0.1095 | 0.0006 |
| Minimal | n = 2 | 0.1008 | 0.1853 | 0.2675 |
| | n=3, F=600mm² | 0.1642 | 0.2440 | 0.3222 |
| | n=3, F=400mm² | 0.1562 | 0.2366 | 0.3153 |
| A vide | n = 2 | 0.3839 | 0.4507 | 0.5174 |
| | n=3, F=600mm² | 0.3836 | 0.4504 | 0.5172 |
| | n=3, F=400mm² | 0.3839 | 0.4507 | 0.5174 |
| Tab(3.9) : puissance réactive à l'extrémité de ligne pour différentes contraintes de la tension | | | | |

Au régime maximum de charge, pour $n = 2$, la valeur négative de Q_2^* signifie que la compensation doit être à caractère capacitif pour réduire l'effet fortement inductif de la ligne chargée.

En régime minimal de charge et en régime à vide, la valeur positive de Q_2^* montre que la ligne chargée porte un caractère capacitif avant la compensation ; ce qui est également montré par les épures correspondantes des tensions.

Les valeurs de Q_2^* calculées ; on est sur que les valeurs de la tension aux deux extrémités peuvent être fixées, toute fois, il faut déterminer la distribution de la tension le long de la ligne pour vérifier ses limites.

On utilise pour cela l'organigramme de calcul de U_1^* (Fig (3.2)) en remplaçant Q_2^* par les valeurs du tableau (3.9), On obtiendra les tableaux (3.10) jusqu'à (3.18), puis représentés sur la Fig (3.5)

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$

| Q_2 \ l (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| -0.4796 | U_1^* | 0.9435 + 0.1272i | 0.8764 + 0.2531i | 0.7994 + 0.3760i | 0.7133 + 0.4947i | 0.6193 + 0.6079i | 0.5182 + 0.7141i | 0.4113 + 0.8124i | 0.2998 + 0.9014i |
| | IU_1^* | 0.9520 | 0.9122 | 0.8834 | 0.8681 | 0.8677 | 0.8824 | 0.9106 | 0.9500 |
| | ΔU^* (%) | -4.7951 | -8.7821 | -11.6618 | -13.1898 | -13.2251 | -11.7645 | -8.9429 | -5.0011 |
| -0.3024 | U_1^* | 0.9623 + 0.1272i | 0.9137 + 0.2531i | 0.8549 + 0.3760i | 0.7864 + 0.4947i | 0.7090 + 0.6079i | 0.6237 + 0.7141i | 0.5313 + 0.8124i | 0.4329 + 0.9014i |
| | IU_1^* | 0.9707 | 0.9481 | 0.9339 | 0.9291 | 0.9339 | 0.9481 | 0.9707 | 1.0000 |
| | ΔU^* (%) | -2.9327 | -5.1864 | -6.6076 | -7.0934 | -6.6074 | -5.1860 | -2.9322 | 0.0005 |
| -0.1619 | U_1^* | 0.9772 + 0.1272i | 0.9434 + 0.2531i | 0.8989 + 0.3760i | 0.8443 + 0.4947i | 0.7802 + 0.6079i | 0.7073 + 0.7141i | 0.6264 + 0.8124i | 0.5384 + 0.9014i |
| | IU_1^* | 0.9854 | 0.9767 | 0.9744 | 0.9786 | 0.9890 | 1.0051 | 1.0258 | 1.0500 |
| | ΔU^* (%) | -1.4555 | -2.3278 | -2.5616 | -2.1420 | -1.0957 | 0.5115 | 2.5831 | 5.0015 |

Tableau 3.10 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
Charge maximale $n = 2$

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm²

| Q_2 \ I (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| -0.2035 | U_1^* | 0.9729 + 0.1130i | 0.9350 + 0.2247i | 0.8865 + 0.3339i | 0.8282 + 0.4394i | 0.7606 + 0.5400i | 0.6845 + 0.6345i | 0.6008 + 0.7219i | 0.5103 + 0.8013i |
| | IU_1^* | 0.9795 | 0.9616 | 0.9474 | 0.9376 | 0.9328 | 0.9334 | 0.9392 | 0.9500 |
| | ΔU^* (%) | -2.0541 | -3.8414 | -5.2650 | -6.2437 | -6.7193 | -6.6630 | -6.0781 | -5.0002 |
| -0.0861 | U_1^* | 0.9853 + 0.1130i | 0.9596 + 0.2247i | 0.9232 + 0.3339i | 0.8764 + 0.4394i | 0.8199 + 0.5400i | 0.7542 + 0.6345i | 0.6800 + 0.7219i | 0.5982 + 0.8013i |
| | IU_1^* | 0.9918 | 0.9481 | 0.9339 | 0.9291 | 0.9339 | 0.9481 | 0.9707 | 1.0000 |
| | ΔU^* (%) | -0.8226 | -1.4424 | -1.8278 | -1.9588 | -1.8284 | -1.4436 | -0.8242 | -0.0021 |
| 0.0211 | U_1^* | 0.9966 + 0.1130i | 0.9821 + 0.2247i | 0.9566 + 0.3339i | 0.9205 + 0.4394i | 0.8740 + 0.5400i | 0.8177 + 0.6345i | 0.7523 + 0.7219i | 0.6785 + 0.8013i |
| | IU_1^* | 1.0030 | 1.0075 | 1.0132 | 1.0200 | 1.0273 | 1.0350 | 1.0427 | 1.0500 |
| | ΔU^* (%) | 0.3021 | 0.7510 | 1.3246 | 1.9957 | 2.7327 | 3.5016 | 4.2679 | 4.9978 |

Tableau 3.11 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
Charge maximale $n = 3$; $F = 600$ mm²

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm²

| Q_2 \ l (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| -0.2311 | U_1^* | 0.9700 + 0.1148i | 0.9291 + 0.2284i | 0.8778 + 0.3394i | 0.8167 + 0.4466i | 0.7465 + 0.5488i | 0.6679 + 0.6449i | 0.5818 + 0.7337i | 0.4892 + 0.8144i |
| | IU_1^* | 0.9768 | 0.9568 | 0.9412 | 0.9309 | 0.9265 | 0.9284 | 0.9364 | 0.9500 |
| | ΔU^* (%) | -2.3239 | -4.3223 | -5.8828 | -6.9123 | -7.3466 | -7.1579 | -6.3585 | -4.9986 |
| -0.1095 | U_1^* | 0.9828 + 0.1148i | 0.9547 + 0.2284i | 0.9158 + 0.3394i | 0.8667 + 0.4466i | 0.8079 + 0.5488i | 0.7400 + 0.6449i | 0.6639 + 0.7337i | 0.5803 + 0.8144i |
| | IU_1^* | 0.9895 | 0.9816 | 0.9767 | 0.9750 | 0.9767 | 0.9816 | 0.9895 | 1.0000 |
| | ΔU^* (%) | -1.0479 | -1.8391 | -2.3318 | -2.4992 | -2.3323 | -1.8401 | -1.0493 | -0.0018 |
| 0.0006 | U_1^* | 0.9945 + 0.1148i | 0.9778 + 0.2284i | 0.9502 + 0.3394i | 0.9119 + 0.4466i | 0.8635 + 0.5488i | 0.8054 + 0.6449i | 0.7382 + 0.7337i | 0.6628 + 0.8144i |
| | IU_1^* | 1.0011 | 1.0041 | 1.0090 | 1.0154 | 1.0231 | 1.0317 | 1.0408 | 1.0500 |
| | ΔU^* (%) | 0.1076 | 0.4123 | 0.8989 | 1.5432 | 2.3137 | 3.1736 | 4.0829 | 5.0002 |

Tableau 3.12 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_N
Charge maximale $n = 3$; $F = 400$ mm²

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$

| Q_2 \ l (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0.1008 | U_1^* | 1.0051 + 0.0848i | 0.9988 + 0.1687i | 0.9812 + 0.2507i | 0.9526 + 0.3298i | 0.9133 + 0.4052i | 0.8636 + 0.4761i | 0.8042 + 0.5416i | 0.7358 + 0.6010i |
| | $ U_1^* $ | 1.0086 | 1.0129 | 1.0127 | 1.0081 | 0.9991 | 0.9862 | 0.9696 | 0.9500 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 0.8624 | 1.2916 | 1.2739 | 0.8098 | -0.0859 | -1.3838 | -3.0403 | -4.9976 |
| 0.1853 | U_1^* | 1.0140 + 0.0848i | 1.0166 + 0.1687i | 1.0077 + 0.2507i | 0.9875 + 0.3298i | 0.9561 + 0.4052i | 0.9139 + 0.4761i | 0.8614 + 0.5416i | 0.7993 + 0.6010i |
| | $ U_1^* $ | 1.0176 | 1.0305 | 1.0384 | 1.0411 | 1.0384 | 1.0305 | 1.0175 | 1.0000 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 1.7553 | 3.0491 | 3.8413 | 4.1080 | 3.8411 | 3.0487 | 1.7547 | -0.0007 |
| 0.2675 | U_1^* | 1.0227 + 0.0848i | 1.0339 + 0.1687i | 1.0335 + 0.2507i | 1.0213 + 0.3298i | 0.9977 + 0.4052i | 0.9628 + 0.4761i | 0.9171 + 0.5416i | 0.8610 + 0.6010i |
| | $ U_1^* $ | 1.0262 | 1.0476 | 1.0634 | 1.0733 | 1.0769 | 1.0741 | 1.0651 | 1.0500 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 2.6239 | 4.7595 | 6.3426 | 7.3276 | 7.6871 | 7.4110 | 6.5070 | 5.0003 |

Tableau 3.13 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
Charge minimale $n = 2$

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 600$ mm²

| Q_2 \ I (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| 0.1642 | U_1^* | 1.0117 + 0.0753i | 1.0122 + 0.1498i | 1.0013 + 0.2226i | 0.9792 + 0.2929i | 0.9462 + 0.3599i | 0.9026 + 0.4229i | 0.8489 + 0.4812i | 0.7857 + 0.5341i |
| | IU_1^* | 1.0145 | 1.0232 | 1.0257 | 1.0221 | 1.0123 | 0.9967 | 0.9758 | 0.9500 |
| | ΔU^* (%) | 1.4547 | 2.3205 | 2.5739 | 2.2081 | 1.2329 | -0.3251 | -2.4223 | -4.9974 |
| 0.2440 | U_1^* | 1.0202 + 0.0753i | 1.0289 + 0.1498i | 1.0262 + 0.2226i | 1.0120 + 0.2929i | 0.9865 + 0.3599i | 0.9499 + 0.4229i | 0.9027 + 0.4812i | 0.9027 + 0.4812i |
| | IU_1^* | 1.0230 | 1.0398 | 1.0501 | 1.0535 | 1.0501 | 1.0398 | 1.0230 | 1.0000 |
| | ΔU^* (%) | 2.2951 | 3.9787 | 5.0064 | 5.3519 | 5.0067 | 3.9793 | 2.2960 | 0.0012 |
| 0.3222 | U_1^* | 1.0284 + 0.0753i | 1.0454 + 0.1498i | 1.0506 + 0.2226i | 1.0441 + 0.2929i | 1.0259 + 0.3599i | 0.9963 + 0.4229i | 0.9555 + 0.4812i | 0.9040 + 0.5341i |
| | IU_1^* | 1.0312 | 1.0560 | 1.0739 | 1.0844 | 1.0872 | 1.0823 | 1.0698 | 1.0500 |
| | ΔU^* (%) | 3.1186 | 5.6041 | 7.3926 | 8.4404 | 8.7224 | 8.2320 | 6.9808 | 4.9988 |

Tableau 3.14 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
Charge minimale $n = 3$; $F = 600$ mm²

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 400$ mm²

| Q_2 | | l (km) | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|--------|------------------|----------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| | | | | | | | | | | |
| 0.1562 | U_1^* | | 1.0109 + 0.0766i | 1.0105 + 0.1523i | 0.9988 + 0.2264i | 0.9759 + 0.2979i | 0.9420 + 0.3661i | 0.8977 + 0.4301i | 0.8433 + 0.4894i | 0.7794 + 0.5432i |
| | IU_1^* | | 1.0138 | 1.0219 | 1.0241 | 1.0203 | 1.0107 | 0.9954 | 0.9750 | 0.9500 |
| | ΔU^* (%) | | 1.3804 | 2.1915 | 2.4108 | 2.0323 | 1.0663 | -0.4601 | -2.5033 | -5.0019 |
| 0.2366 | U_1^* | | 1.0194 + 0.0766i | 1.0274 + 0.1523i | 1.0239 + 0.2264i | 1.0089 + 0.2979i | 0.9826 + 0.3661i | 0.9454 + 0.4301i | 0.8975 + 0.4894i | 0.8396 + 0.5432i |
| | IU_1^* | | 1.0223 | 1.0386 | 1.0486 | 1.0520 | 1.0486 | 1.0386 | 1.0223 | 1.0000 |
| | ΔU^* (%) | | 2.2275 | 3.8624 | 4.8606 | 5.1962 | 4.8604 | 3.8619 | 2.2269 | -0.0008 |
| 0.3153 | U_1^* | | 1.0277 + 0.0766i | 1.0439 + 0.1523i | 1.0485 + 0.2264i | 1.0412 + 0.2979i | 1.0224 + 0.3661i | 0.9921 + 0.4301i | 0.9506 + 0.4894i | 0.8986 + 0.5432i |
| | IU_1^* | | 1.0306 | 1.0550 | 1.0726 | 1.0830 | 1.0859 | 1.0813 | 1.0692 | 1.0500 |
| | ΔU^* (%) | | 3.0567 | 5.4984 | 7.2614 | 8.3013 | 8.5928 | 8.1291 | 6.9211 | 4.9986 |

Tableau 3.15 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
Charge minimale $n = 3$; $F = 400$ mm²

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 2$

| Q_2^* \ I (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|------------------|------------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 0.3839 | U_1^* | 1.0351 | 1.0585 | 1.0699 | 1.0693 | 1.0567 | 1.0321 |
| ΔU^* (%) | 3.5069 | | 5.8468 | 6.9932 | 6.9332 | 5.6675 | 3.2104 | -0.4105 | -5.1543 |
| 0.4507 | U_1^* | 1.0422 | 1.0726 | 1.0909 | 1.0969 | 1.0905 | 1.0719 | 1.0411 | 0.9986 |
| | ΔU^* (%) | 4.2153 | 7.2555 | 9.0863 | 9.6872 | 9.0513 | 7.1858 | 4.1117 | -0.1362 |
| 0.5174 | U_1^* | 1.0492 | 1.0866 | 1.1118 | 1.1244 | 1.1243 | 1.1116 | 1.0863 | 1.0487 |
| | ΔU^* (%) | 4.9225 | 8.6620 | 11.1763 | 12.4370 | 12.4300 | 11.1552 | 8.6272 | 4.8743 |

Tableau 3.16 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
A vide $n = 2$

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 3$, $F = 600$ mm²

| Q_2^* \ I (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 | |
|------------------|------------------|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| | | U_1^* | 1.0349 | 1.0583 | 1.0698 | 1.0693 | 1.0569 | 1.0327 | 0.9969 | 0.9500 |
| 0.3836 | ΔU^* (%) | 3.4916 | 5.8260 | 6.9770 | 6.9318 | 5.6908 | 3.2680 | -0.3096 | -5.0019 | |
| | | | | | | | | | | |
| 0.4504 | | U_1^* | 1.0420 | 1.0723 | 1.0906 | 1.0967 | 1.0906 | 1.0723 | 1.0420 | 1.0000 |
| | | ΔU^* (%) | 4.1970 | 7.2289 | 9.0617 | 9.6750 | 9.0619 | 7.2292 | 4.1974 | 0.0006 |
| | | | | | | | | | | |
| 0.5172 | | U_1^* | 1.0490 | 1.0863 | 1.1115 | 1.1242 | 1.1243 | 1.1119 | 1.0870 | 1.0500 |
| | | ΔU^* (%) | 4.9024 | 8.6318 | 11.1464 | 12.4182 | 12.4329 | 11.1904 | 8.7045 | 5.0030 |

Tableau 3.17 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_n
A vide $n = 3$; $F = 600$ mm²

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 3$, $F = 400$ mm²

| I (km) | | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
|----------|------------------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Q_2^* | U_1^* | 1.0350 | 1.0583 | 1.0699 | 1.0694 | 1.05670 | 1.0328 | 0.9969 | 0.9500 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 3.4964 | 5.8342 | 6.9873 | 6.9427 | 5.7009 | 3.2759 | -0.3051 | -5.0023 |
| 0.3839 | U_1^* | 1.0420 | 1.0724 | 1.0907 | 1.0969 | 1.0907 | 1.0724 | 1.0420 | 1.0000 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 4.2022 | 7.2378 | 9.0731 | 9.6873 | 9.0737 | 7.2390 | 4.2039 | 0.0023 |
| 0.4507 | U_1^* | 1.0491 | 1.0864 | 1.1116 | 1.1243 | 1.1244 | 1.1120 | 1.0871 | 1.0500 |
| | $\Delta U^*(\%)$ | 4.9069 | 8.6394 | 11.1558 | 12.4278 | 12.4413 | 11.1961 | 8.7061 | 4.9993 |
| 0.5174 | U_1^* | | | | | | | | |
| | $\Delta U^*(\%)$ | | | | | | | | |

Tableau 3.18 :
Régime de tension avec contrainte de (0.95 , 1 , 1.05) de U_N
A vide $n = 3$; $F = 400$ mm²

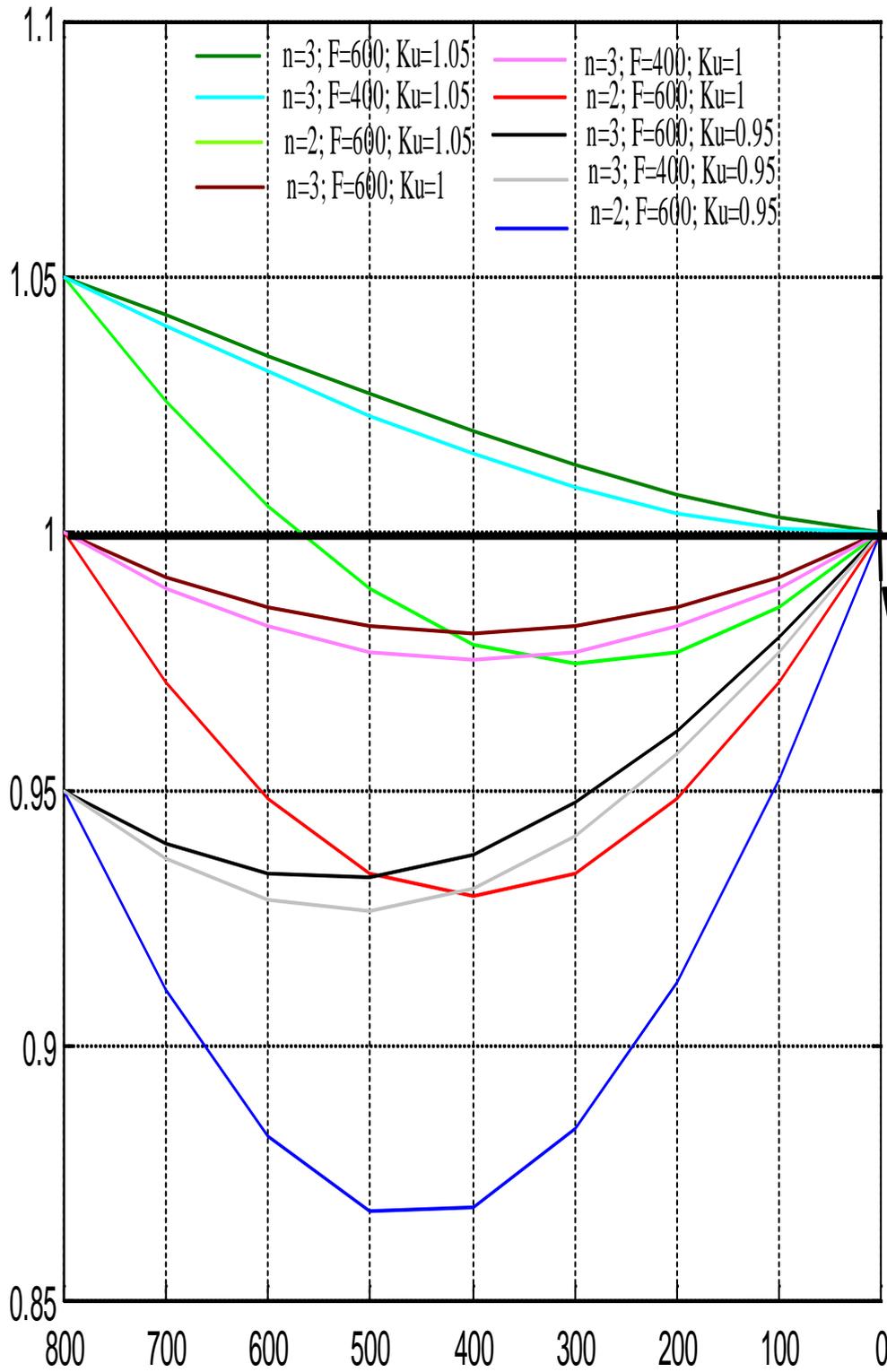


Fig (3.5) – (a) : régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime max de charge

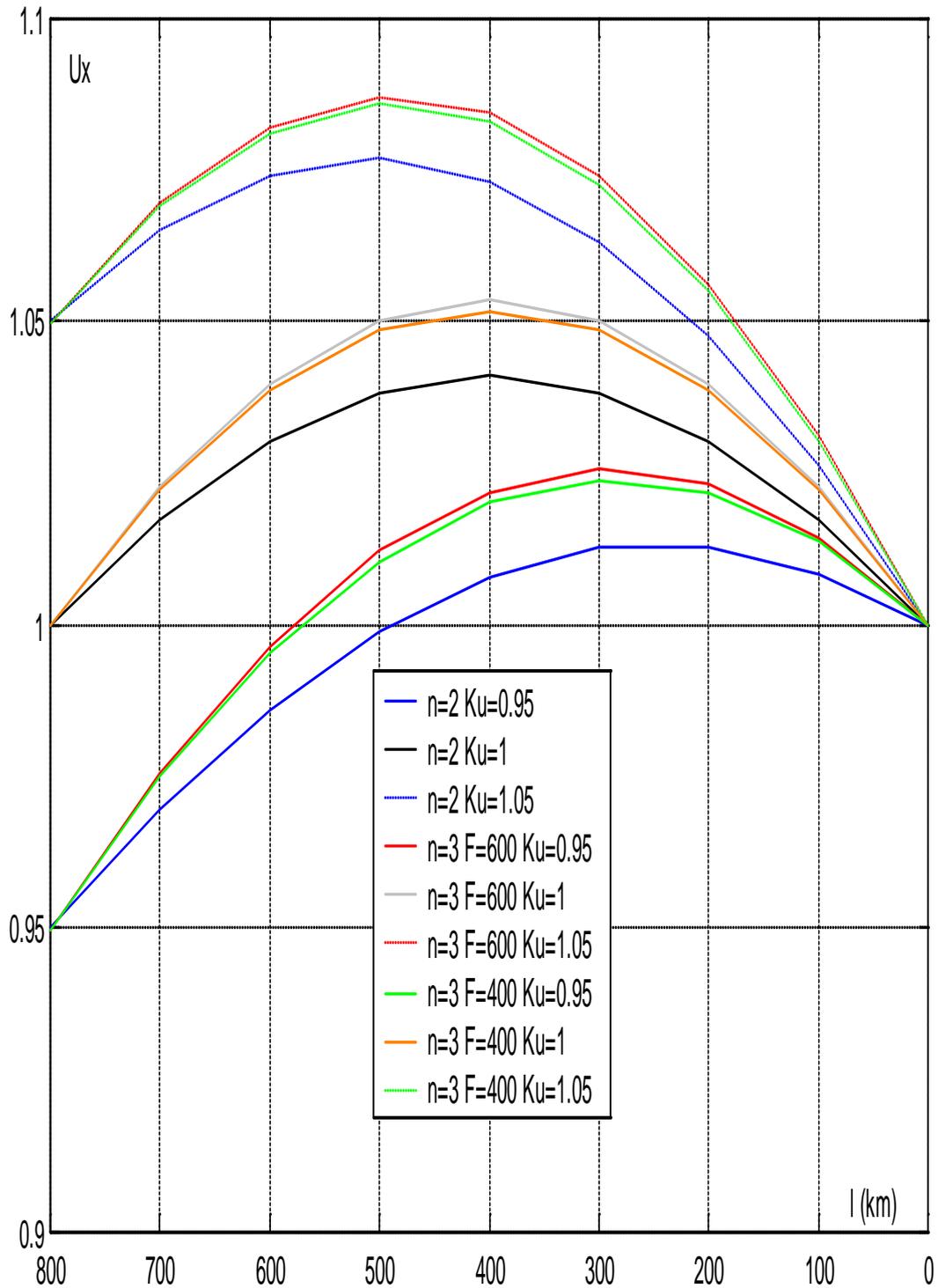


Fig (3.5) – (b) : Régime de tension pour différentes valeurs de K_u Régime min de charge

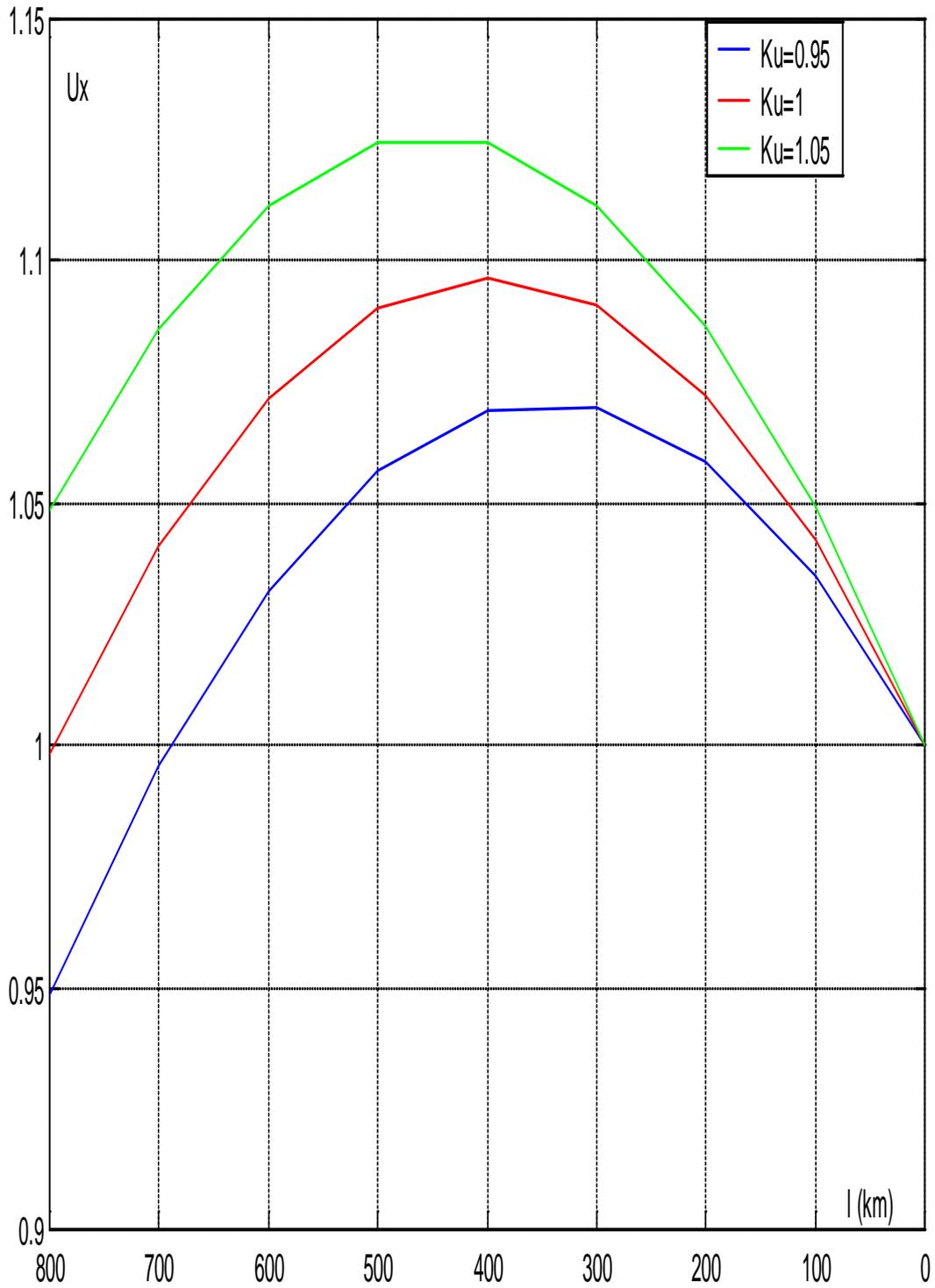


Fig (3.5) – (c) : régime de tension pour différentes valeurs de K_u ; régime à vide

Les résultats obtenus nous montrent que pour certaines valeurs de K_u (Ex $K_u = 0.95$, $n = 2$, régime max), la tension sort des limites admissibles, elle reste à des valeurs acceptables pour $K_u = 1.05$. La situation est plus confortable pour $n = 3$ du point de vue pertes de tension qui ne dépassent pas les 10 %.

En fin, en régime à vide, les pertes de tension ont des valeurs appréciables.

Ces derniers résultats impliquent la nécessité de rechercher une compensation de la puissance réactive à des points différents de la ligne. Mais avant de déterminer la puissance de compensation et choisir les compensateurs, il est nécessaire de calculer la répartition le long de la ligne de la puissance réactive correspondante à celle des tensions sous les rapports K_u donnés.

III-4-1-3-/ Analyse de la distribution de la puissance :

Répartition sous l'effet de la charge :

La valeur de la puissance réactive à une distance x à partir du nœud 2 de la ligne peut être calculée par la formule (3.16) :

$$Q_{(x)}^* = (K_{u(x)}^2 - 1) \cdot \text{Ctg}(\alpha_0 x) - Q_2^* \quad (3.16)$$

Q_2^* est déterminée par l'expression (3.15). pour avoir la valeur de Q_1^* à l'entrée de la ligne, il suffit de remplacer $x = 1$ dans l'expression (3.16)

Le rapport est calculé pour chaque valeur $U_{(x)}$. Les seront représentés sur les tableaux (3.19) jusqu'à (3.21) et projetés sur la Fig (3.6).

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 1.0000 | 0.8264 | 0.6159 | 0.3778 | 0.1230 | -0.1374 | -0.3917 | -0.6284 | -0.8371 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.8910 | 0.7293 | 0.5350 | 0.3169 | 0.0846 | -0.1514 | -0.3807 | -0.5930 | -0.7789 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.906 | 0.7428 | 0.5464 | 0.3257 | 0.0904 | -0.1489 | -0.3816 | -0.5973 | -0.7863 |

**Tableau 3.19 :
Régime de puissance réactive
Charge maximale**

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.6000 | 0.4515 | 0.2828 | 0.1013 | -0.0847 | -0.2670 | -0.4372 | -0.5877 | -0.7119 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 600$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.5349 | 0.3946 | 0.2367 | 0.0682 | -0.1033 | -0.2702 | -0.4250 | -0.5609 | -0.6718 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 400$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.5437 | 0.4023 | 0.2430 | 0.0728 | -0.1006 | -0.2696 | -0.4265 | -0.5643 | -0.6770 |

Tableau 3.20 :
Régime de puissance réactive
Charge minimale

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 2$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 1.0000 | 0.9777 | 0.9117 | 0.8050 | 0.6624 | 0.4902 | 0.2961 | 0.0887 | -0.1225 |

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 3$, $F = 600$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.8910 | 0.8495 | 0.7701 | 0.6563 | 0.5133 | 0.3474 | 0.1660 | -0.0229 | -0.2107 |

$U_N = 500$ kV régime à vide $n = 3$, $F = 400$ mm²

| | | | | | | | | | |
|---------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.906 | 0.8669 | 0.7892 | 0.6762 | 0.5330 | 0.3660 | 0.1827 | -0.0088 | -0.1999 |

Tableau 3.21 :
Régime de puissance réactive
Régime à vide

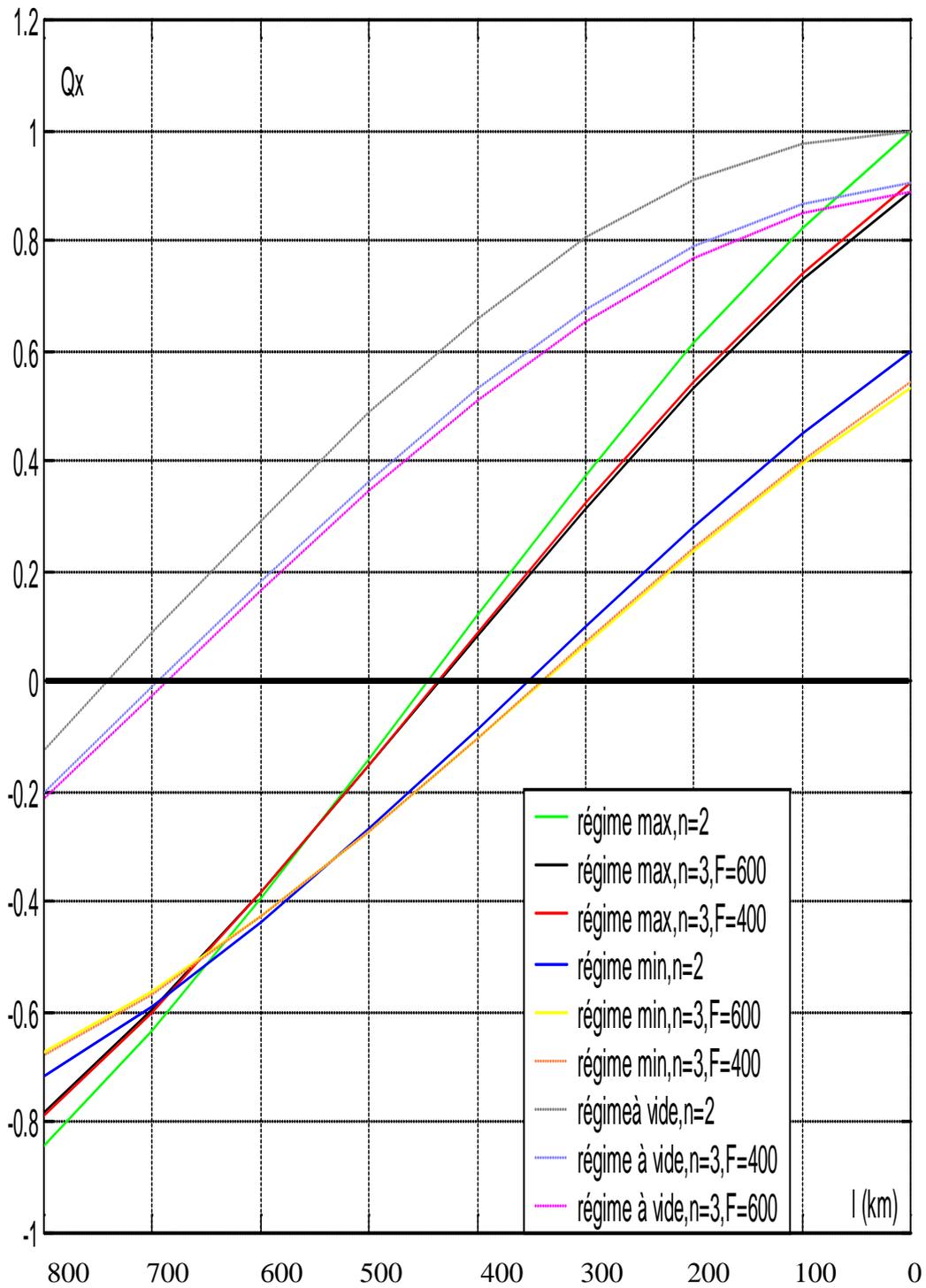


Fig (3.6) : régime de puissance réactive pour différents cas de figure

On remarque que les flux de puissance réactive le long de la ligne sont énormes pour les différents cas.

Cela nécessite l'établissement du régime de puissance réactive le long de la ligne sous contrainte de la tension. On va considérer les cas précédents c'est-à-dire pour $K_u = 0.95 ; 1 ; 1.05$.

On utilisera pour cela le même procédé de calcul en substituant Q_2 par les valeurs du Tableau (3.9).

Les résultats sont représentés dans les tableaux (3.22) jusqu'à (3.28); puis projetés sur les figures (3.7) ; (3.8) ; (3.9).

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$, $Ku = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.4796 | -0.7011 | -0.8913 | -1.0416 | -1.1455 | -1.1982 | -1.1974 | -1.1432 | -1.0379 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$, $Ku = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.3024 | -0.5424 | -0.7582 | -0.9401 | -1.0800 | -1.1718 | -1.2112 | -1.1965 | -1.1284 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 2$, $Ku = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.1619 | -0.4119 | -0.6435 | -0.8463 | -1.0114 | -1.1313 | -1.2007 | -1.2165 | -1.178 |

Tableau 3.22 :
Régime de puissance réactive avec contraintes de tension
Charge maximale $n=2$

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.2035 | -0.4198 | -0.6175 | -0.7875 | -0.9225 | -1.0163 | -1.0648 | -1.0657 | -1.0192 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.0861 | -0.3086 | -0.5174 | -0.7031 | -0.8574 | -0.9735 | -1.0462 | -1.0722 | -1.0503 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.0211 | -0.2046 | -0.4211 | -0.6188 | -0.7890 | -0.9239 | -1.0177 | -1.0660 | -1.0668 |

Tableau 3.23 :
Régime de puissance réactive avec contrainte de tension
Charge maximale $n=3$, $F = 600$ mm²

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm², $Ku = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.2311 | -0.4495 | -0.6479 | -0.8173 | -0.9503 | -1.0408 | -1.0848 | -1.0804 | -1.0277 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm², $Ku = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | -0.1095 | -0.3350 | -0.5455 | -0.7317 | -0.8852 | -0.9992 | -1.0686 | -1.0902 | -1.0632 |

$U_N = 500$ kV régime max $n = 3$, $F = 400$ mm², $Ku = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.0006 | -0.2286 | -0.4476 | -0.6466 | -0.8168 | -0.9505 | -1.0417 | -1.0864 | -1.0826 |

Tableau 3.24 :
Régime de puissance réactive avec contrainte de tension
Charge maximale $n=3$, $F = 400$ mm²

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$, $Ku = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.1008 | -0.0733 | -0.2441 | -0.4040 | -0.5456 | -0.6628 | -0.7501 | -0.8037 | -0.8211 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$, $Ku = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.1853 | 0.0118 | -0.1622 | -0.3289 | -0.4808 | -0.6111 | -0.7139 | -0.7846 | -0.8200 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 2$, $Ku = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.2675 | 0.0961 | -0.0796 | -0.2517 | -0.4125 | -0.5548 | -0.6721 | -0.7592 | -0.8121 |

**Tableau 3.25 :
Régime de puissance réactive avec contraintes de tension
Charge minimale $n=2$**

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.1642 | 0.0049 | -0.1545 | -0.3071 | -0.4460 | -0.5650 | -0.6588 | -0.7232 | -0.7553 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.2440 | 0.0864 | -0.0751 | -0.2332 | -0.3809 | -0.5116 | -0.6195 | -0.6998 | -0.7489 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 600$ mm², $Ku = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.3222 | 0.1675 | 0.0053 | -0.1571 | -0.3125 | -0.4540 | -0.5752 | -0.6707 | -0.7364 |

Tableau 3.26 :
Régime de puissance réactive avec contrainte de tension
Charge minimale $n=3$, $F = 600$ mm²

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 400$ mm², $K_u = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.1562 | -0.0050 | -0.1660 | -0.3196 | -0.4589 | -0.5777 | -0.6707 | -0.7338 | -0.7641 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 400$ mm², $K_u = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.2366 | 0.0769 | -0.0862 | -0.2455 | -0.3938 | -0.5245 | -0.6318 | -0.7109 | -0.7583 |

$U_N = 500$ kV régime min $n = 3$, $F = 400$ mm², $K_u = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.3153 | 0.1584 | -0.0055 | -0.1692 | -0.3254 | -0.4670 | -0.5878 | -0.6823 | -0.7464 |

Tableau 3.27 :
Régime de puissance réactive avec contrainte de tension
Charge minimale $n=3$, $F = 400$ mm²

$U_N = 500$ kV régime à vide , $K_u = 0.95$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.3839 | 0.2857 | 0.1748 | 0.0561 | -0.0651 | -0.1834 | -0.2935 | -0.3906 | -0.4701 |

$U_N = 500$ kV régime à vide , $K_u = 1$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.4507 | 0.3569 | 0.2472 | 0.1264 | 0.0000 | -0.1264 | -0.2471 | -0.3569 | -0.4507 |

$U_N = 500$ kV régime à vide , $K_u = 1.05$

| | | | | | | | | | |
|---------|--------|--------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
| L (km) | 0 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 600 | 700 | 800 |
| Q_1^* | 0.5174 | 0.4289 | 0.3213 | 0.1993 | 0.0684 | -0.0655 | -0.1966 | -0.3188 | -0.4268 |

Tableau 3.28 :
Régime de puissance réactive avec contrainte de tension
Régime à vide

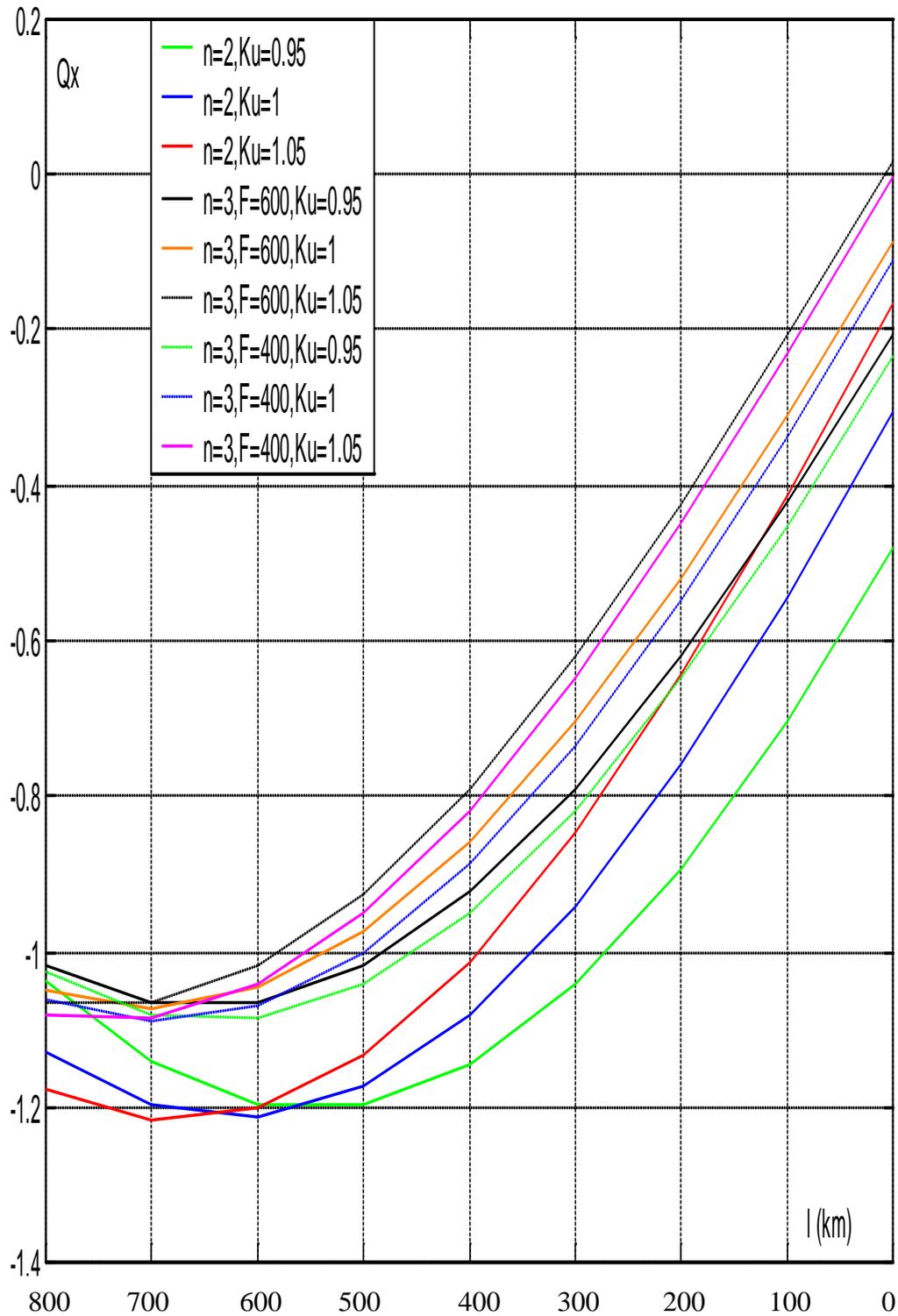


Fig (3.7) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de tension, régime maximum de charge

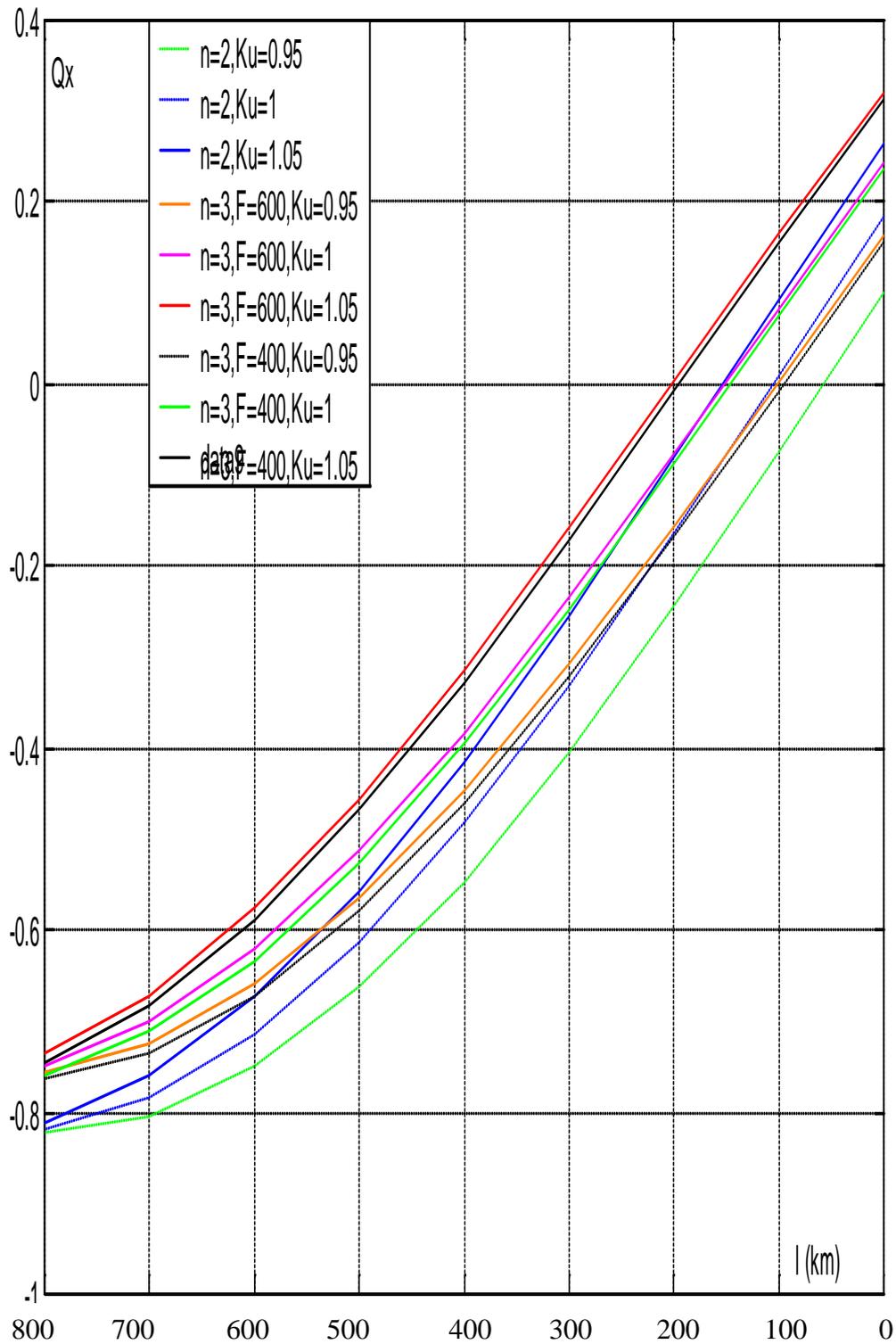


Fig (3.8) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de tension, régime minimum de charge

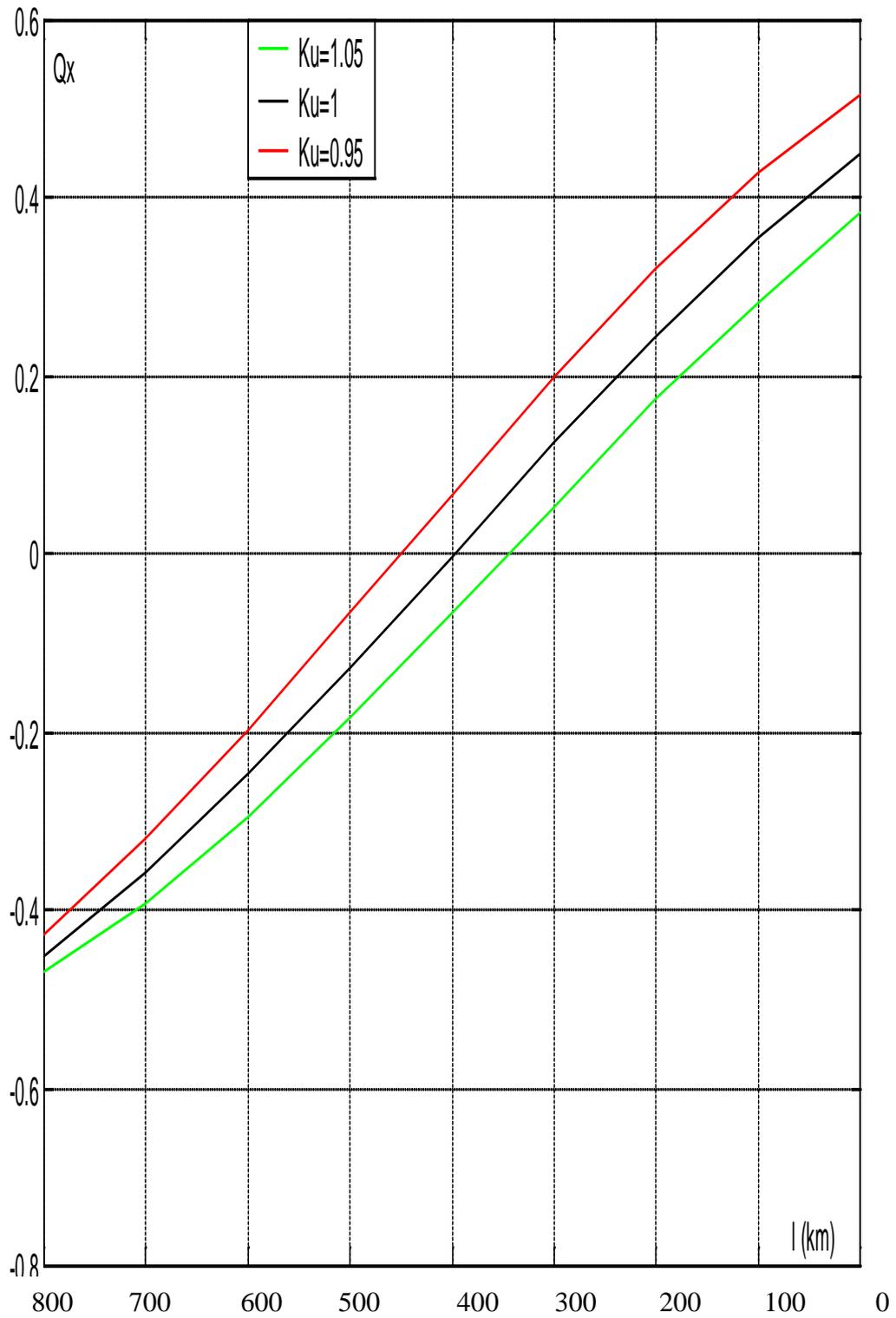


Fig (3.9) : régime de puissance réactive pour différentes contraintes de tension, régime à vide

Introduction :

La compensation série est utilisée dans les lignes THT, essentiellement, pour :

- Augmenter la capacité de transport par la réduction de l'impédance du système.
- Contrôler la tension le long de la ligne

Les condensateurs série sont utilisés pour des lignes de transport dans plusieurs pays. Leur puissance est comprise entre 100 et 1000 MVAR et représentent généralement un degrés de compensation allant de 20 à 70%.

IV – 1-/ description du réseau en tenant compte de la compensation série :

On aura à considérer une ligne à $n = 3$, $F = 600 \text{ mm}^2$, Figure (4.1).

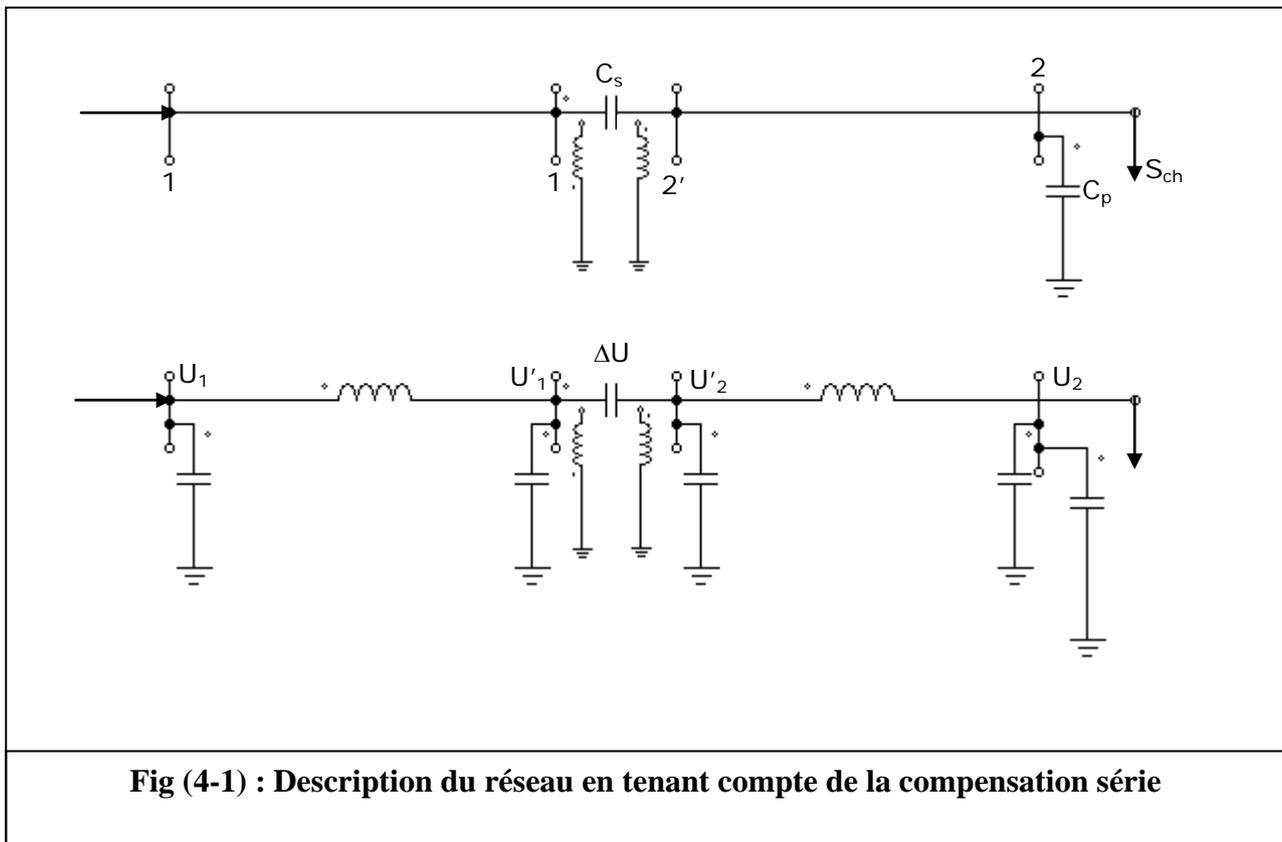


Fig (4-1) : Description du réseau en tenant compte de la compensation série

On a vu dans le chapitre précédent que pour le cas où $K_u = 1$, on a eu deux valeurs de Q_2^*

- En régime maximum de charge : $Q_{2\max}^* = - 0.0861$
- En régime minimum de charge : $Q_{2\min}^* = 0.244$

Ce qui donnera deux valeurs de la puissance réactive provenant de la compensation locale Q_{comp}^* :

$$Q_{\text{comp}}^* = Q_{2\text{ch}}^* - Q_2^* \tag{4-1}$$

- En régime max : $Q_{compmax}^* = 0.89 - (-0.0861) = 0.9761$
- En régime min : $Q_{compmin}^* = 0.535 - (0.244) = 0.291$

En sachant que $P_c = 902.7$ (valeur prise comme référence dans le calcul de puissances en unités réelles), on aura :

- $Q_{compmax} = 0.9761 \times 902.7 = 881$ MVAR
- $Q_{compmin} = 0.291 \times 902.7 = 263$ MVAR

Ces résultats sont très importants pour le choix des compensateurs employés :

La valeur $Q_{compmin}$ sera installée à l'extrémité de la ligne (compensation locale) donc $Q_p = 300$ MVAR sera la valeur minimale à installer.

IV – 2 -/ Modélisation de la ligne :

La ligne étudiée peut être divisée en deux tronçons séparés par le compensateur :

1^{er} tronçon : qui s'étend de l'extrémité de la ligne jusqu'à la sortie du compensateur série (sur une distance de 400 km)

La distribution de la tension sera définie par l'équation (III-13), avec $0 \leq l \leq 400$ km

A l'origine du tronçon, on aura :

$$Q_2^* = (k u_2^2 - 1) \cdot \text{ctg} [\alpha_0 \cdot (l/2)] - Q_2^* \quad (4-2)$$

Avec $U_2^* = U(400)$

Bornes du compensateur : (2' – 1')

La chute de tension aux bornes du compensateur est égale à :

$$\Delta U_c = -j \cdot x_c^* \cdot I_2 = -j \cdot x_c^* \cdot [P_2^* - j \cdot Q_2^* / \text{conj}(U_2^*)] \quad (4-3)$$

Sachant que $x_c^* = x_c / Z_c$

D'autre part :

$$U_2^* = k_{u2}^* U_2^* e^{j\delta_2} = U_2^* [\cos(\alpha_0 \cdot l/2) + Q_2^* \sin(\alpha_0 \cdot l/2) + j \cdot P_2^* \sin(\alpha_0 \cdot l/2)] \quad (4-4)$$

$$\begin{aligned} \delta_2 &= \arctg [P_2^* \sin(\alpha_0 \cdot l/2) / \cos(\alpha_0 \cdot l/2) + Q_2^* \sin(\alpha_0 \cdot l/2)] \\ &= \arctg [P_2^* \text{tg}(\alpha_0 \cdot l/2) / 1 + Q_2^* \text{tg}(\alpha_0 \cdot l/2)] \end{aligned} \quad (4-5)$$

Ce qui donne:

$$\Delta U_c = -j x_c^* \cdot (P_2^* - j \cdot Q_2^*) / (k_{u2}^* U_2^* e^{j\delta_2}) = -j x_c^* \cdot [(P_2^* - j \cdot Q_2^*) / k_{u2}^* U_2^*] e^{j\delta_2} \quad (4-6)$$

En multipliant et divisant le deuxième membre par P_c , on obtient :

$$\begin{aligned}\Delta U_c &= -j \mathbf{x}_c^* [(P_2^* - j \cdot Q_2^*) / k_{u2}^* U_2^*] e^{j\delta} (P_c / P_c) \\ &= -j \mathbf{x}_c^* [(P_2^* - j \cdot Q_2^*) / k_{u2}^* U_2^*] e^{j\delta} U_2^{*2} / Z_c \cdot P_c\end{aligned}\quad (4-7)$$

Ou bien :

$$\Delta U_c = -j \mathbf{x}_c^* (P_2^* - j \cdot Q_2^*) (U_2^* / k_{u2}^*) e^{j\delta^2} \quad (4-8)$$

Au début à l'entrée, c'est-à-dire au point 1', on aura :

$$U_1^* = U_2^* + \Delta U_c \quad (4-9)$$

Ou bien, en tenant compte de (4-4) et (4-8) :

$$U_1^* = k_{u2}^* \cdot U_2^* e^{j\delta^2} - j \mathbf{x}_c^* (P_2^* - j \cdot Q_2^*) (U_2^* / k_{u2}^*) e^{j\delta^2} \quad (4-10)$$

ou, en unité relative :

$$U_1^{**} = U_1^* / U_2^* = k_{u2}^* - (\mathbf{x}_c^* \cdot Q_2^* / k_{u2}^*) - j (\mathbf{x}_c^* \cdot P_2^* / k_u^*) \cdot e^{j\delta^2} \quad (4-11)$$

Sous une autre forme, on peut écrire :

$$\begin{aligned}U_1^{**} &= [k_{u2}^* - (\mathbf{x}_c^* \cdot Q_2^* / k_{u2}^*) \cos \delta_2 + (\mathbf{x}_c^* \cdot P_2^* / k_u^*) \sin \delta_2 + j [(k_{u2}^* - (\mathbf{x}_c^* \cdot Q_2^* / k_{u2}^*) \sin \delta_2 + (\mathbf{x}_c^* \cdot P_2^* / k_u^*) \cos \delta_2)] \\ &= U_{1a}^{**} + j U_{1r}^{**}\end{aligned}\quad (4-12)$$

La tension à l'entrée du compensateur étant donnée (la tension à la sortie du premier trançon), on peut exprimer la tension U_1 à l'entrée de la ligne :

$$U_1^* = U_1^* [\cos (\alpha_0 l/2) + Q_1^* \sin (\alpha_0 l/2) + j \cdot P_1^* \sin (\alpha_0 l/2)] \quad (4-13)$$

Pour étudier cette tension, on doit déterminer d'abord, la puissance réactive Q_1^* , la puissance active étant $P_1^* = P_2^* = P_2$.

Puisque le courant $I_1^* = I_2^*$ on peut obtenir Q_1^* à partir de la puissance complexe :

$$S_1^* = \sqrt{3} \cdot U_1^* \cdot \text{conj}(I_1^*) = \sqrt{3} (U_2^* + \Delta U_c) \cdot \text{conj}(I_2^*) = S_2^* + S_c = P_2^* + j (Q_2^* - Q_c) \quad (4-14)$$

Ou en unité relative:

$$\begin{aligned}S_1^* &= P_2^* + j (Q_2^* - Q_c) \\ Q_c &= \Delta U_c^2 / x_c \quad \text{et} \quad Q_c^* = \Delta U_c^{*2} / \mathbf{x}_c^*\end{aligned}\quad (4-15)$$

Le module de ΔU_c^* peut être obtenu à partir de (VI-12) comme :

$$\begin{aligned}\Delta U_c &= (\mathbf{x}_c^* / K_{u2}^*) \cdot [(P_2^* \sin \delta_2 - Q_2^* \cos \delta_2) - j (P_2^* \cos \delta_2 + Q_2^* \sin \delta_2)] \\ &= \Delta U_{ca} + j \Delta U_{cr}\end{aligned}\quad (4-16)$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned}Q_c^* &= (\mathbf{x}_c^* / K_{u2}^{*2}) \cdot [(P_2^* \sin \delta_2 - Q_2^* \cos \delta_2)^2 - j (P_2^* \cos \delta_2 + Q_2^* \sin \delta_2)^2] \\ &= f(\mathbf{x}_c^*)\end{aligned}\quad (4-17)$$

Ainsi,

$$Q^{*'}_1 = Q^{*'}_2 - Q^*_c \quad (4-18)$$

Où $Q^{*'}_2 = (k_{u2}^2 - 1) \cdot \text{ctg} [\alpha_0 \cdot (l/2)] - Q^*_2$

Pour une charge donnée au bout de la ligne, la puissance $Q^{*'}_1$ est fonction de la réactance x^*_c du compensateur. Cette dépendance est induite dans les tensions sur les deux bout du premier trançon de la ligne et est évaluée par l'expression . Cette dernière peut être réduite à la forme :

$$U^*_1 = k_{u1}(x_c) U^*_1 e^{j\delta_1(x_c)} = U^*_2 k_{u2}(x_c) k_{u1}(x_c) e^{j\delta_1(x_c)} = K_u(x_c) e^{j\delta_1(x_c)} \quad (4-19)$$

Avec,

$$K_u(x_c) = [k_{u2}^* - (x^*_c \cdot Q^{*'}_2 / k_{u2}^*) \cos \delta + (x^*_c \cdot P^{*'}_2 / k_u^*) \sin \delta]^2 + [(k_{u2}^* - (x^*_c \cdot Q^{*'}_2 / k_{u2}^*) \sin \delta + (x^*_c \cdot P^{*'}_2 / k_u^*) \cos \delta]^2$$

$$k_{u1}(x_c) = [\cos(\alpha_0 \cdot l/2) + Q^{*'}_1(x_c) \sin(\alpha_0 \cdot l/2)]^2 + [P^{*'}_2 \sin(\alpha_0 \cdot l/2)]^2$$

$$\delta_1(x_c) = \arctg [P^{*'}_2 \text{tg}(\alpha_0 \cdot l/2) / 1 + Q^{*'}_1(x_c) \text{tg}(\alpha_0 \cdot l/2)]$$

$$K_u(x_c) = k_{u2}(x_c) \cdot k_{u1}(x_c)$$

2^{ème} trançon : (1' - 1)

Puisqu'on a les paramètres au bout (point 1'), on peut facilement calculer ceux de l'origine (point 1).

$$U^*_1(x) = U^*_1 \cdot [\cos(\alpha_0 x) + Q^{*'}_1 \sin(\alpha_0 x) + j \cdot P^* \sin(\alpha_0 x)]$$

Avec $x = [0 \div 400]$ km (sachant que l varie de 400 à 800 km)

Ce qui nous intéresse vraiment ici c'est de déterminer la répartition de la tension le long de la ligne. L'organigramme de calcul est représenté à la (Fig (4-2)).

On va donner la valeur $Q^*_p = 0$ (compensation locale) et étudier le régime de tension pour différentes valeurs de x_c (0.05, 0.1, 0.15, 0.2 et 0.25). Ensuite, on refait les mêmes calculs pour différentes valeurs de Q^*_p .

Les résultats seront montrés dans les tableaux [Tab (4-1) à Tab (4-7)], ensuite, interprétés sur les figures [Fig (4-3) à Fig (4-9).

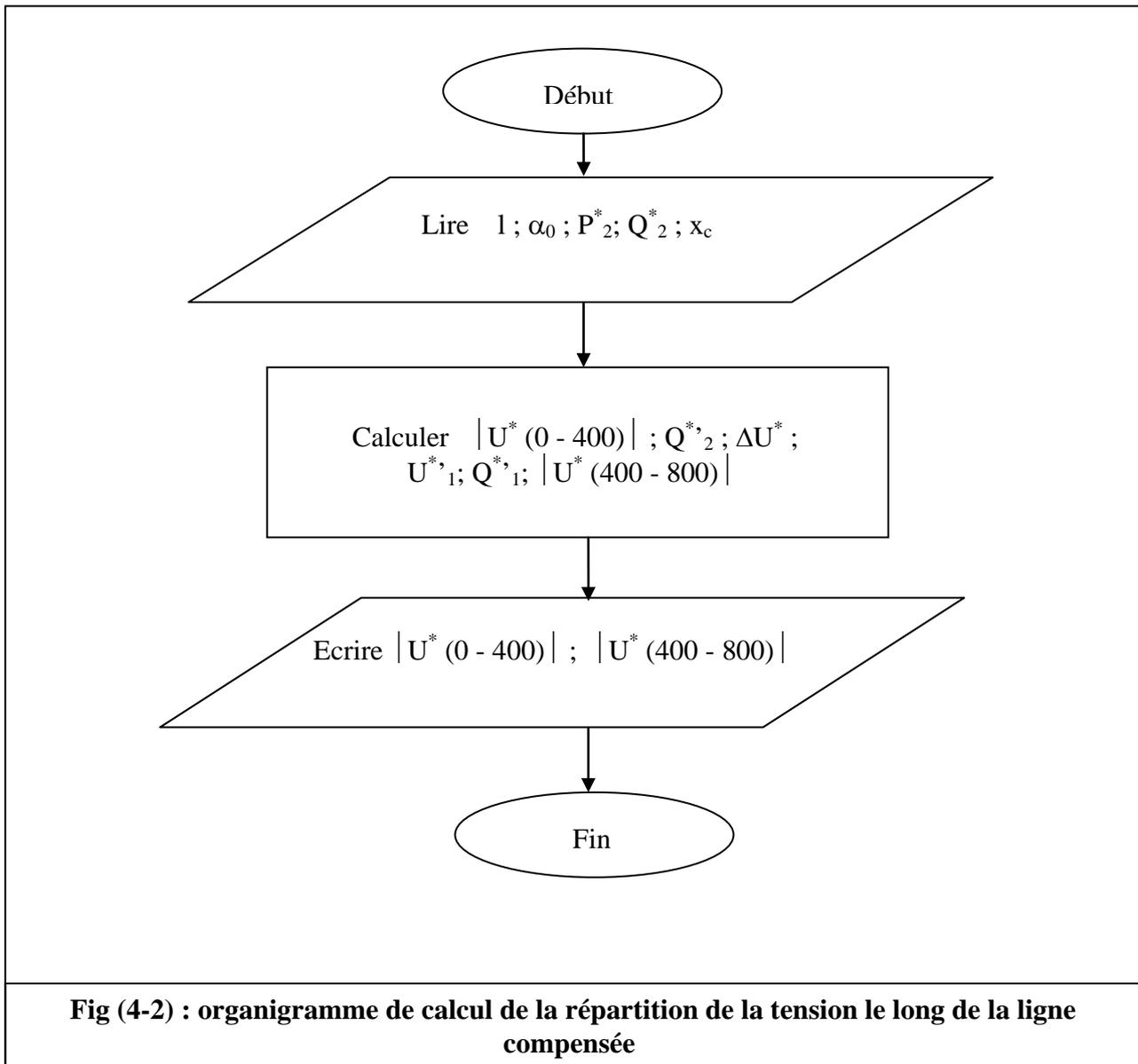


Fig (4-2) : organigramme de calcul de la répartition de la tension le long de la ligne compensée

Conclusion générale :

- Le problème de la qualité de l'énergie électrique reste entièrement posé, surtout avec la présence des éléments non linéaires, et avec l'avènement et l'introduction progressifs des installations à nouvelles technologies.
- Le contrôle de la qualité de l'énergie électrique exige des qualités de performance quant aux caractéristiques des moyens de contrôle tels que, ici considérés, compensateurs ; puisque les performances recherchés pour les régimes de fonctionnement des réseaux électriques sont tributaires de surveillance et de régulation orientées de plus en plus vers des réponses en temps réel.
- La nécessité de résolution de ces deux contraintes, est d'autant plus justifiable que l'on traite les lignes de transmission sur de grandes distances ; puisque ; dans ce cas, on tient compte, encore, des effets impliqués par la propagation des ondes ; mettant en jeu des quantités énormes de puissance réactive ; impliquant une sensibilité considérable de la variation de la tension et posant, par conséquent, un problème sérieux de contrôle.
- L'analyse montre que la compensation parallèle branchée sur les bouts de la ligne, permet de maintenir les tensions correspondantes dans les écarts admissibles. Mais ne garantie pas une distribution admissible tout le long de sa longueur.
- Il serait intéressant d'introduire la compensation série pour le contrôle de la distribution de la tension, moyennant une combinaison avec celle parallèle. Ceci permettra d'évaluer de manière directe les influents sur le comportement de la ligne.
- La compensation pourrait impliquer avantage quand il s'agit de traiter la stabilité de la tension.

Bibliographie

- [1] Daniel FRAPART – Alain PAGES -- Guide de l'ingénierie électrique : Protection contre les perturbations Edit 1996.
- [2] Daniel PERRIER – Henri CHOREL – Production – transport – distribution publique de l'électricité en France Edit 1994
- [3] Hanane KOUARA – Application d'un filtre actif série au contrôle de la tension d'un réseau basse tension – thèse de magister – Univ de BATNA 2006
- [4] Thiery DEFLANDRE – Philippe MAURAS -- La maîtrise des harmoniques sur les réseaux industriels et tertiaires Edit 2002
- [5] Serge BERNARD – Gérard TROCHAIN -- Deuxième génération de compensateurs actifs d'harmoniques forte capacité basé sur le mode d'injection de courant Edit juin 2003
- [6] Tore PETERSSON -- Reactive power compensation – ABB power systems – AB-S-721 64 Västerås, SWEDEN Decmber 1993
- [7] C- Angeles – CAMACHO (Univ of GLASGOW) – CR – FUERTE – ESQUIVEL (Univ of MICHOACAN) -- A three phase UPFC model for power control in unbalanced transmission network 01 – 2000
- [8] Escander GHOLLIPOUR -- Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques - Thèse de Doctorat de l'Univ Henri POINCARÉ – NANCY 13 – 10 – 2003
- [9] Sevngwon AN – Thomas X GERDA -- UPFC ided transformer model – Schod of electrical and computer Engineering Oklahoma state university 11 – 1998
- [10] Théodore WILDI - Electrotechnique – troisième edition Edition 2000

- [11] Mircea EREMIA – Jaques TRECAT – Alain GERMOND -- Réseaux électriques : Aspects actuels Edit 2000 .
- [12] R.Gruenbaum – Series capacitors improve power transmission ; Modern power systems Oct 1998.
- [13] J. Samuelsson – Application & experience of series capacitors in EHV power transmission; 12th IEEE/PES transmission and distribution conference. Dallas, Texas Sept 1991.
- [14] J. Tang et al – IEEE working group – readers guide to subsynchronous resonance , transactions on power systems Feb 1992.
- [15] J.S Hedin; L. Paulsson – Application and evaluation of a new concept for compact series compensation for distribution network; CIRED conference. Birmingham, UK, May 1999.
- [16] Andersson , P.M, FARMER, R.G – Series compensation of power systems. Publish, Inc, California 1996.
- [17] CHOLLEY , P , LACOSTE , J , TROTIGNON , M. – Dynamic shunt compensation performance for transient stability enhancement. EDF – DER, 95NR00104
- [18] CIGRE Task Force 38.01.06 – Load flow control in high voltage power systems using FACTS controllers. Jan 1996.
- [19] EPRI – Future of power delivery. Washington , April 2002.
- [20] IEEE T.F – Modeling and analysis guidelines for slow transients. Part II: Controller interactions; Harmonic interactions.1996 IEE/PES winter meeting, Baltimore,1996.
- [21] KUNDER, P – Power system stability and control. McGraw – Hill N.Y, 1994.
- [22] Le DU A. – Pour un réseau électrique performant: Le projet FACTS. RGE N° 6, juin 1998.

[23] SADEGHZADEN, S.M. – Amélioration de la stabilité transitoire et de l’amortissement des oscillations d’un réseau électrique à l’aide d’un SSSC. Thèse de doctorat, INPG, MARS 1998.

[24]crappe, M. et al. – Simulation and control of FACTS. Proceedings EPE’95, Seville.