République algérienne démocratique et populaire

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou UMMTO

Faculté : Génie électrique et informatique

Département : électrotechnique

Option : réseau électrique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention de diplôme

D'ingénieur d'état en électrotechnique.

Thème :

# ETUDE COPMARATIVE DES DEUX FORMES DE COURANT CA/CC DANS LE TRANSPORT DE L'ENERGIE ELECTRIQUE.

*PROMOTION : 2007 / 2008*

*Proposé et dirigé par :*

*Monsieur : K - HADJ SAID*

*Etudié et réalisé par :*

*Monsieur : MEZAGUER Mohamed*

*Remerciement :*

*Je tiens à remercier mon promoteur Mr : K-Hadj Saïd pour toute la documentation qu'il a mis à ma disposition et son orientation ainsi que sa disponibilité qui m'ont permis de réaliser ce modeste mémoire de fin d'étude.*

*Je remercie mes parents, pour leur soutient moral et financier, tout au long de mes années D'études.*

*Je remercie mes sœurs : Nassima - Kahina –Saida – Siham pour leurs aides ainsi que Lynda et son Mari Zakaria sans oublier Nani et Louna pour les quelles je souhaite Beaucoup de réussites dans leurs études.*

*Je remercie ma Grand-Mère pour sa générosité et son soutien indéfectible.*

*Je remercie Amel Djebar (sweet) qui ma soutenue dans les moments difficiles.*

*Je remercie les membres du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Et enfin je remercie tous ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin, même, si ce n'est par des petits Mots d'encouragement s.*

Dédicace :

- Je dédie ce modeste travail à mes parents sans les quels je ne serais jamais devenu ce Que je suis aujourd'hui, encore une fois mille et un mercis.

- Je le dédie encore à mes sœurs.

- Je le dédie à tous mes amis, et aux étudiants de la promotion « ETH » 2007/2008.

- Je le dédie à AMEL DJ pour laquelle je souhaite un prompt rétablissement ; que dieu T'accorde longue vie, pleine de santé.

# *Sommaire*

**Introduction générale…….…… 1**

**Chapitre I : Transport de l'énergie électrique en courant alternatif**

I-1) Introduction……..3

I-1- 1) L'appel de puissance……3

I-1- 2) Centrale de production……4

I-1- 3) Différents types de centrale…….4

I-2) Le mode de transport de l'énergie électrique……...6

I-2-1) L'utilisation généralisée du courant alternatif……....6

I-2-2) L'utilisation du triphasé……6

I-2-3) L'effet de peau……..10

I-3) L'organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique……..11

I-3-1) réseau de transport ……11

I-3-2) Réseau de répartition…….….12

I-3-3) réseau de distribution…….....12

I-4) ligne aérienne……..14

I-4-1) type de ligne…….....14

I-4-2) composante d'une ligne aérienne……..15

I-4-3) l'effet couronne dans les lignes et l'interférence-radio…….....17

I-4-4) fil de garde……...20

I-4-5) mise à la terre des pylônes……...….21

I-5) propriétés des lignes aériennes……...21

I-5-1) circuit équivalent d'une ligne…….21

I-5-2) simplification du circuit équivalent d'une ligne…….....22

I-5-3) puissance maximale transportable pour une ligne…….23

I-5-4) le choix de la tension d'une ligne ……..…..31

I-6) l'échange de puissance…….34

I-7) l'interconnexion des réseaux électriques…….36

I-7-1) les avantages de l'interconnexion……..36

I-7-2) les inconvénients de l'interconnexion……..……37

I-8-) transport de l'énergie électrique par câble……38

I-8-1) constitution de principe des câbles souterrains……39

I-8-2) l'utilisation des câbles souterrains pour tension modérée…….....40

I-8-3) câbles spéciaux pour la très haute tension…….41

I-8-4) l'effet de capacité du aux câbles souterrains……..43

I-9) conclusion……43

**Chapitre II : transport de l'énergie électrique à courant continu**

II-1) introduction……44

II-2) aperçu historique……...44

II-3) domaine d'application du transport en courant continu……45

II-3-1) liaison longue souterraine ou sous-marine……..46

II-3-2) liaison aérienne de grande longueur……..……47

II-3-3) l'interconnexion transfrontalière……...… 48

II-3-4) l'interconnexion entre réseau asynchrone……..48

II-3-5) l'augmentation de la capacité de transit……48

II-4) conception de station de conversion……49

II-4-1) schéma générale d'une station de conversion……49

II-4-2) différents type de liaison à courant continu……51

II-4-3) composant d'une ligne de transport a CC……...54

II-4-4) association d'unité de conversion……57

II-5) fonctionnement d'un système de transport à CC……..60

II-5-1) le dispositif de redressement et d'ondulation……..60

II-5-2) principe de fonctionnement en mode redresseur……62

II-5-3) fonctionnement en mode onduleur……..65

II-5-4) commutation……....65

II-6) contrôle des liaisons à CCHT……68

II-6-1) introduction……..69

II-6-2) caractéristique $V_d$-$I_d$……....69

II-6-3) réglage rapide par les angles……..…… ..71

II-6-4) réglage lent par régulateur en charge……..…...73

II-6-5) réglage des liaisons multiterminales……73

II-6-6) réglage des stations « dos à dos »……74

II-7) interaction des liaisons à CC et des réseaux a CA……..75

II-7-1) généralités……75

II-7-2) compensation de la puissance réactive…… 75

II-7-3) limitation des perturbations harmoniques……76

II-7-4) surtension transitoire……...77

II-7-5) surtension temporaire……....77

II-7-6) limite de stabilité……78

II-7-7) interaction hyposynchrone……...79

II-7-8) compatibilité avec les protections du réseau……79

II-7-9) limitation des perturbations radio-électrique ……80

II-8) lignes aériennes et câbles à CC……..80

II-8-1) lignes aériennes……80

II-8-2) câble souterrain et sous marins……81

II-8-3) tension maximale en continu……...81

II-8-4) emploi de la terre ou de la mer comme conducteur de retour……....81

II-9) conclusion……82

**Chapitre III : Considération générales des systèmes en CA et en CC avec comparaison**

III- 1) Introduction……....83

III- 2) Lignes aériennes……84

III- 2- 1) Comparaison économique……83

III- 2- 2) Fiabilité……89

III- 2- 3) Retour par le sol……..90

III- 2- 4) Stabilité……....90

III- 2- 5) Facteur de puissance……...90

III- 2- 6) L'effet couronne et interférence-radio……90

III- 2- 7) L'effet de peau……....91

III- 2- 8) Dimension des pylônes……91

III- 2- 9) Comparaison des capacités de transfert des lignes en CA et en CC……93

III- 3) Les câbles…….93

III- 4) L'interconnexion des systèmes à fréquence différente…….95

III- 5) Générateurs……...96

III- 6) Régulation…….96

III- 7) Limite de transmission en courant continu à haute tension…….96

III- 8) comparaison du cout en fonction de la distance……..97

III-9) tableau récapitulatif……98

III-10) conclusion……...100

**Conclusion générale**……..101

# Introduction Générale

# INTRODUCTION GENERALE

L'énergie électrique est considérée comme la source de tout développement économique, elle est produite dans des centrales électriques, qui sont situées dans des sites ou l'énergie primaire est abondante puis transportée dans les lieux de consommation, qui peuvent être plus ou moins éloignés des sites de production.

Le transport de l'énergie électrique se fait en courant alternatif qui a pris le dessus sur le courant continu grâce a l'invention du transformateur qui permet d'élever ou d'abaisser la tension selon le besoin ainsi que et la facilité de coupure de ces courants, du fait de leur passage par zéro deux fois par période.

Mais le courant alternatif a montré certaines limites dues aux contraintes diverses qui sont :

- les pertes par effet Joule.
- l'effet inductif dans les lignes aériennes qu'il faut compenser.
- l'effet capacitif dans les câbles qui génère de la puissance réactive qui est gênante.
- la répartition non uniforme du courant dans les sections des conducteurs (l'effet de peau).
- la chute de tension
- les pertes par l'effet couronne.

Face à toutes ces contraintes et grâce à l'invention du thyristor et le développement de l'électronique de puissance qui permet la conversion du courant alternatif en courant continu CA/CC et du CC/CA.

Le transport de l'énergie électrique en courant continu (CC) qui présente d'énormes avantages et peu d'inconvénients trouve des domaines d'application de plus en plus nombreux.

Dans ce travail nous allons procéder à une étude comparative des deux formes du courant CA/CC, ou nous allons mettre en évidence les avantages et les inconvénients de chacune, dans le premier chapitre nous allons étudier le transport de l'énergie électrique en courant alternatif (CA). Et ensuite dans le deuxième le transport de l'énergie électrique en courant continu (CC). Et à la fin dans le troisième chapitre nous allons comparer les des deux formes de courant, en prenant en considération tous les paramètres et phénomènes intervenant dans le transport de l'énergie électrique. Nous avons complété notre travail par une conclusion, mettant l'accent sur le choix de l'une ou de l'autre forme du courant électrique dans le transport de l'énergie électrique.

# Chapitre 1

## I-1) Introduction :

Un système électrique est définie par l'ensemble des centrales électriques, et les liaisons qui relient ces centrales avec les consommateurs situées dans les grandes villes –zones industrielles – petites agglomérations.

Souvent les sites de production sont éloignés des zones de consommation, de ce fait l'acheminement de l'énergie électrique par voie de ligne aérienne, câble souterraine ou câble sous-marin, doit absolument satisfaire les exigences qui sont : stabilité – commodité – fiabilité, sans oublier l'aspect économique.

### I-1-1) L'appel de puissance :

La puissance demandée par l'ensemble des consommateurs d'énergie d'un réseau electrique subit de grande fluctuation, selon le creux et la pointe au sein d'une journée, au sien d'une semaine ou entre saison.

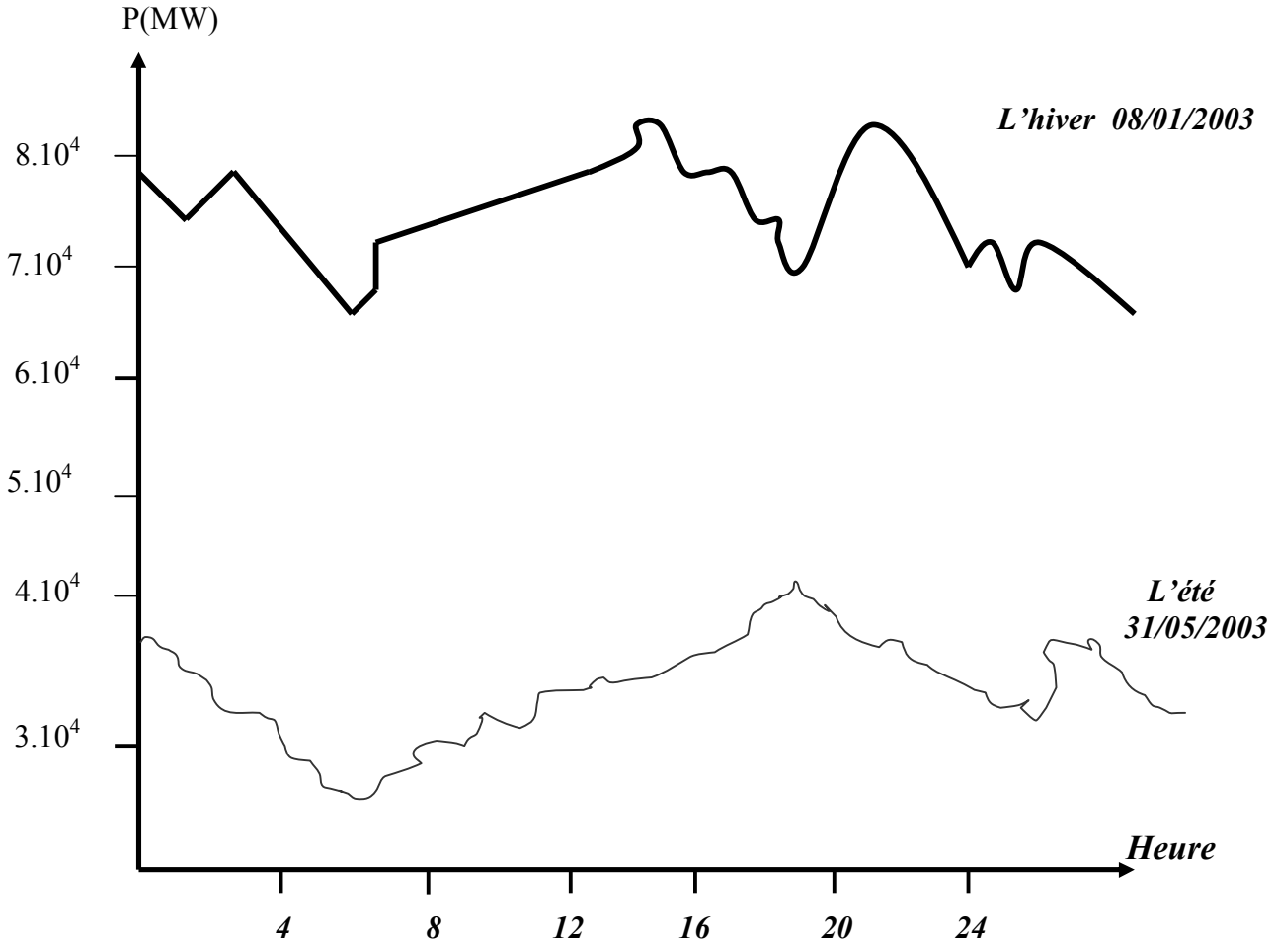



*Figure I-1 : la consommation de l'énergie électrique en une journée D'hiver et l'autre journée d'été en France. [1]*

La demande de puissance par le consommateur, oblige les compagnies de production de l'électricité, a prévoir une production continue et ininterrompue de l'énergie.

## I-1-2) Centrale de production :

L'emplacement des centrales de production, des lignes de transport et des postes de transformation demandent toujours une analyse détaillée pour arriver à une solution acceptable et économique.

Parfois on peut installer une centrale à coté de la source d'énergie primaire et utiliser des lignes pour transporter l'énergie électrique. Quand cela n'est pas pratique ou économique, on doit alors transporter la matière première jusqu'aux centrales.

## I-1-3) Différents types de centrale :

Selon le type de l'énergie primaire, on distingue différents types de centrale qui sont.

### I-1-3-a) Centrale hydro-électrique :

Les centrales hydro-électriques convertissent l'énergie cinétique de l'eau, en énergie électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abords transformée dans une turbine hydraulique en une énergie mécanique, cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique.

Leur puissance est donnée par :

$$P = \rho . g . h . Q \qquad \text{(I-1)} \qquad [14]$$

Avec :

P : puissance brute [MW]

$\rho$ : Masse volumique de l'eau [Kg/m$^3$]

h : la hauteur brute de la chute d'eau [m]

g : l'accélération de la pesanteur [m/s$^2$]

Q : le débit d'eau [m$^3$/s]

On distingue trois types de centrales hydro-électriques :

a-) Centrale de haute chute :

Ce sont des centrales qui ont des hauteurs de chute supérieure à 300 m, elles utilisent les turbines PELTON.

b-) Centrale de moyenne chute :

Ce sont des centrales qui ont des hauteurs de chute comprise entre 30 et 300 m ; elles utilisent des turbines FRANCIS.

c-) Centrale de basse chute :

Ce sont des centrales qui ont des hauteurs de chute inférieure à 30 m ; elles utilisent des turbines FRANCIS.

### I-1-3-b) Centrale thermique :

Les centrales thermiques utilisent l'énergie sous forme de chaleur, que dégage la réaction de combustion du mazout ou gaz naturel ou bien charbon, pour faire tourner les turbines qui sont couplées mécaniquement a des alternateurs qui produisent a leur tours l'énergie électrique .

On les trouve prés des rivières ou la mer, car d'énormes quantités d'eau sont requise pour refroidir et condenser la vapeur qui sorte des turbines, elles comprennent essentiellement :

- Une chaudière : ou la réaction de combustion libère de l'énergie thermique du combustible.
- Ballon : ou l'eau est réchauffée est transformée en vapeur à haute pression.
- Série de trois turbines (haute –moyenne- basse) pression : elles entraînent un alternateur.
- Condenseur : c'est le lieu ou la vapeur est refroidie par une alimentation d'eau froide.
- Tour de refroidissement : l'eau est condensée et est cheminée au ballon par des pompes en passant par le réchauffeur.

### I-1-3-c) Centrale nucléaire :

Les centrales nucléaires produisent l'énergie électrique a partir de la chaleur libérée par la réaction de fission ,qui est la division du noyau de $U^{235}$ (uranium) ,bombardé par des particules d'oxygène .Ces centrales sont identiques aux centrales thermiques sauf que la chaudière est remplacée par le réacteur ou les réactions se déroulent .l'énergie dégagée sous forme de chaleur est extraite du réacteur est transportée vers un échangeur de chaleur qui produit de la vapeur qui est utilisée pour faire tourner les turbines qui sont couplées mécaniquement aux alternateurs qui produisent de l'énergie électrique.

***Remarque*** : Il existe d'autres types de centrales qui sont

- **Centrale éolienne :**

Qui convertie l'énergie éolienne des vents en énergie électrique ; ils sont installés dans les sites ou les vents sont assez fréquents.

- **Centrale solaire :** on distingue
  - Centrales à héliostats.
  - Centrales photovoltaïque.

## I-2) Le mode de transport de l'énergie électrique :

Il est choisit selon deux critères qui sont :

- L'aspect économique (le coût de revient du transport)
- Le rendement.

### I-2-1) L'utilisation généralisée du courant alternatif :

Malgré la réalisation faite en 1906 par René Thury ,consistant à transporter une puissance de 20MW sur une distance d'environ 300 Km à l'aide des génératrices a courant continu mises en série . Le courant alternatif s'est vite imposé en raison de :

- Sa simplicité de production
- La facilité avec laquelle on peut changer de tension à l'aide des transformateurs.
- La coupure aisée de ce courant grâce à son passage deux fois par période par zéro.

### I-2-2) L'utilisation du triphasé

On montre facilement qu'a puissance, tension, résistance par conducteur ; constante.

Une ligne triphasée dissipe moins d'énergie qu'une ligne monophasée (pendant le même intervalle de temps). [3]

Soient les deux lignes de la figure (I-2)

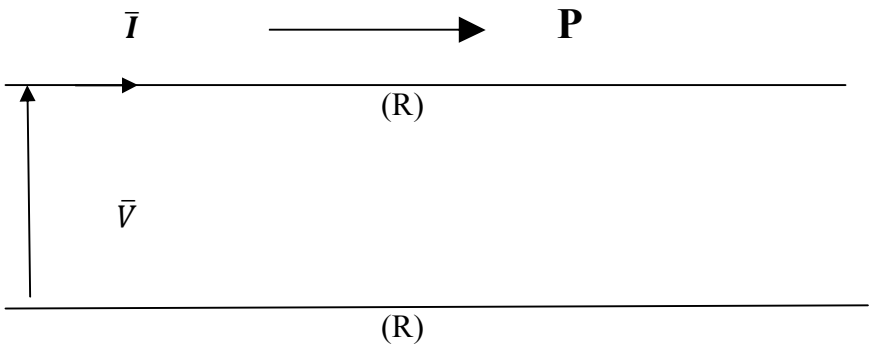



*Figure (I-2-a) : La ligne -1- composé de deux conducteurs de résistance R,*

Cette ligne transporte une puissance de :

$$P = V\ I \cos\varphi \qquad \text{(I-2)}$$

Et dissipe par effet joule une puissance de :

$$P_J = 2\ R\ I^2 \qquad \text{(I-3)}$$

On considère une ligne triphasée avec des conducteurs identiques avec ceux de la ligne monophasée précédente.

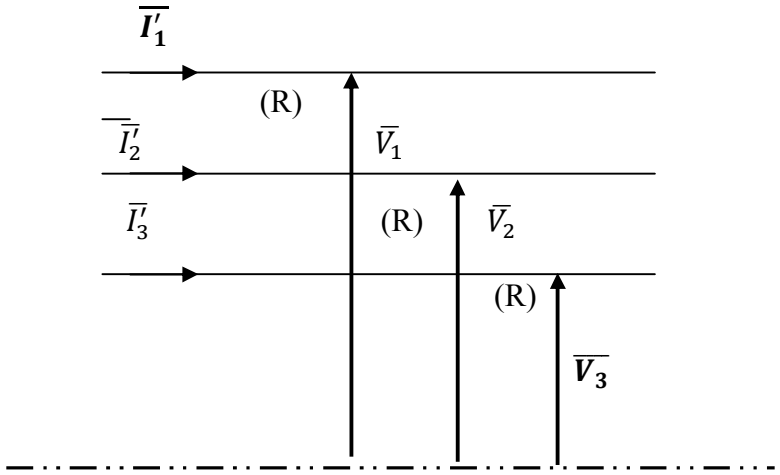



*Figure (I-2-b) : La ligne -2- composée de trois conducteurs.*

Cette ligne transporte une puissance de :

$$P = 3\ V'\ I'\ \cos\varphi \qquad \text{(I-4)}$$

Et dissipe par effet joule une puissance de :

$$P'_J = 3\ R\ I^2 \qquad \text{(I-5)}$$

Si on suppose qu'on a : $V_1 = V_2 = V_3 = V = V'$

Pour la même puissance transportée avec même facteur de puissance ;

$P = 3\,V I' \cos\varphi = V\,I \cos\varphi$

$$I' = \frac{I}{3} \qquad \text{(I-6)}$$

Les pertes dans cette ligne seraient :

$$P'_J = 3\,R\,I'^2 = 3\,R\left(\frac{I}{3}\right)^2 = \frac{2RI^2}{6} \qquad \text{(I-7)}$$

$$P'_J = \frac{P_J}{3} \qquad \text{(I-8)}$$

D'où la ligne à trois conducteurs dissipe trois fois moins d'énergie par effet de joule que la ligne a deux conducteurs.

Si on veut transporter la même puissance au même facteur de puissance au moyen d'une ligne a trois fils de résistance R, alimenté par un système de tension composée

Si on suppose que : $U_{12} = U_{23} = U_{31} = V = U$

$P = \sqrt{3}\ U\ I'' \cos\varphi = V\ I \cos\varphi$

$$I'' = \frac{I}{\sqrt{3}} \qquad \text{(I-9)}$$

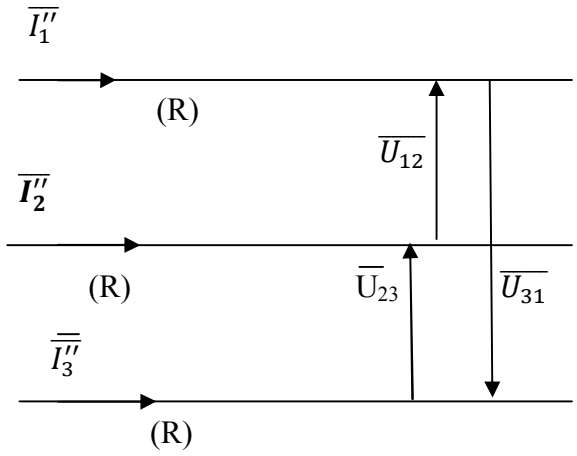



*Figure (I-2-c): Ligne triphasée de tension Composée*

.

Les pertes dans ce cas :

$$P_J'' = 3\ R\ I''^2 = 3\ R\ \left(\frac{I}{\sqrt{3}}\right)^2 = \frac{2\ R\ I^2}{2} = \frac{P_J}{2} \qquad \text{(I-10)}$$

$$\boxed{P_J = 2P_J''} \qquad \text{(I-11)}$$

Cette ligne aussi dissipe deux fois moins d'énergie que la première ligne.

- Soit à transporter une puissance P à une distance donnée, par une ligne monophasée ou, par une ligne triphasée sous la même tension et avec une perte de joule et facteur de puissance égale.

On aura :

$$P = \sqrt{3}\ U\ I''\cos\varphi = V\ I\ \cos\varphi \qquad \text{(I-12)}$$

$$\boxed{I = \sqrt{3}\ I''} \qquad \text{(I-13)}$$

$$2R_1I^2 = 3\ R_2\ I''^2 \ \Rightarrow 2\ R_1\left(\sqrt{3}I''\right)^2 = 3\ R_2\ I''^2 \qquad \text{(I-14)}$$

$$\boxed{R_2 = 2\ R_1} \qquad \text{(I-15)}$$

Sachant que

$$R = \rho\ \frac{L}{S} \qquad \text{(I-16)}$$

D'où on aura

$$S_1 = 2\ S_2$$

Conducteur de même matériau et ayant même longueur, on aura

$$S_2 = \frac{S_1}{2} \qquad \text{(I-17)}$$

Chaque conducteur du linge monophasé devait avoir une section double, de celle du conducteur de la ligne triphasée.

Dans tous les cas envisagés une ligne triphasée dissipe moins qu'une ligne monophasée, d'où l'intérêt de l'utilisation du triphasé dans le transport d'énergie électrique.

### I-2-3) L'effet de peau :

L'effet de peau est un phénomène physique, concernant le lieu de circulation des courants dans les conducteurs, l'effet de peau consiste en une répartition non uniforme du courant dans la section droite du conducteur.

En alternatif le courant tend à se concentrer dans les couches extérieures du conducteur, sa densité y sera plus forte que dans la partie centrale, ceci est du a l'existence du flux interne du conducteur, il s'ensuit en effet que les fibres centrales sont encerclées par un plus grand nombre de ligne de force, et présentent donc une inductance plus élevée que les fibres périphériques, qui ne sont encerclées que par le flux externe.

Une fibre donnée aura donc une réactance d'autant plus élevée qu'elle se trouve plus prés de l'axe du conducteur, aussi l'intensité décroît-elle de la périphérie vers l'axe.

L'effet de peau est d'autant plus élevé que la section du conducteur est plus forte, et la fréquence plus élevée. A très haute fréquence, le courant est virtuellement confiné dans la pellicule extérieure du conducteur.

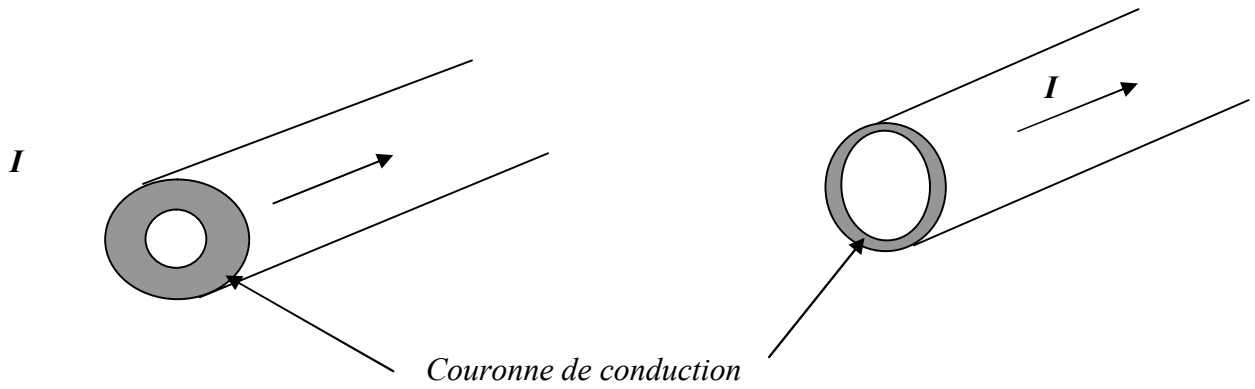



*Figure (I-3) : la répartition du courant dans la section du conducteur. [13]*

La distribution non uniforme de la densité de courant dans le conducteur donne lieu non seulement à une augmentation de sa résistance mais aussi à une variation de son inductance. [13]

## I- 3) Organisation d'un réseau de transport d'énergie électrique :

Les compagnies d'électricité divisent leurs réseaux en trois catégories qui sont :

### I-3-1) Réseau de transport :

Il a pour mission d'acheminer l'énergie électrique, et il permet de réaliser à chaque instant l'égalité entre la production et la consommation sur l'ensemble du territoire, en respectant des contraintes fortes sur le maintien de la tension. Il doit de ce fait présenter une forte garantie de fonctionnement non seulement en régime normal mais également lors d'incident d'exploitation qui entraîne la perte d'une ou de plusieurs linges, ou l'arrêt imprévu d'un ouvrage de production.

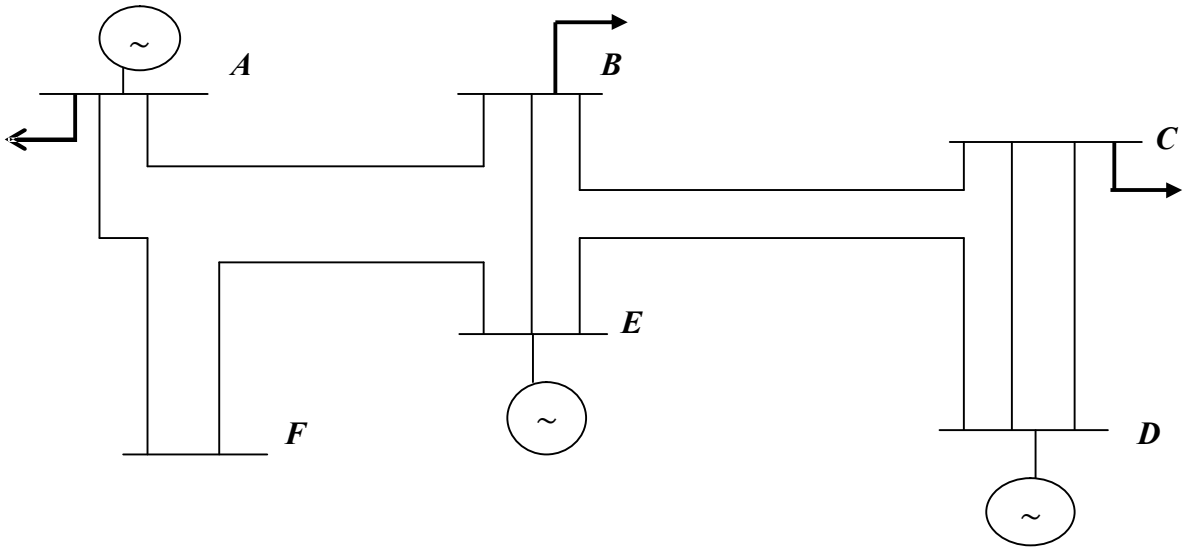



*Figure (I-4) : Réseau maillé [1]*

L'inconvénient d'une telle structure est, de présenter en certains points du réseau une faible impédance de court-circuit, et donc favoriser en cas de défaut l'apparition de courants de court-circuit élevés, il faudra donc dimensionner les protections en conséquence. [1]

### I -3- 2) Réseau de répartition :

Ces réseaux ont pour fonction de faire la liaison entre le réseau de transport et les réseaux de distribution, ils doivent assurer l'alimentation du territoire qu'ils desservent, qui sont en général des zones de consommation importante comme par exemple les grandes agglomérations ou des concentrations d'installation industrielle. Du fait de leur importance économique ils doivent être alimentés en permanence.

Pour assurer cette fonction même lors de la défaillance de certaine ligne, le réseau de répartition à une structure bouclée.

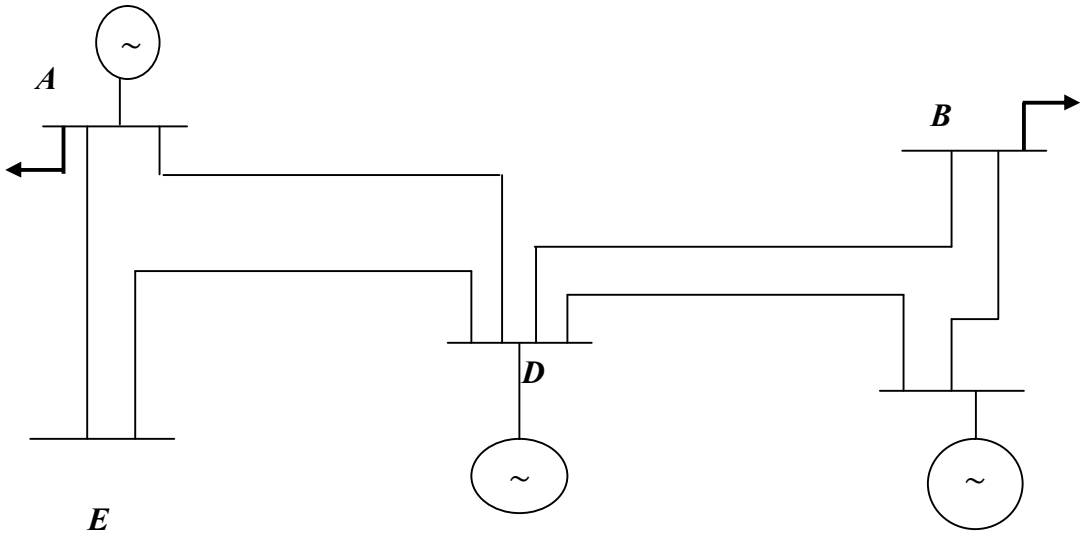



*Figure (I-5) : Réseau Bouclé [5]*

### I-3- 3) Réseau de distribution :

Les réseaux de distribution ont une structure radiale c'est à dire qu'il n'y a qu'une seule ligne entre deux nœuds, ce type de structure est utilisé pour alimenter à partir d'un poste d'alimentation, l'ensemble des consommateurs d'une rue, un lotissement ou bien une zone d'activité.

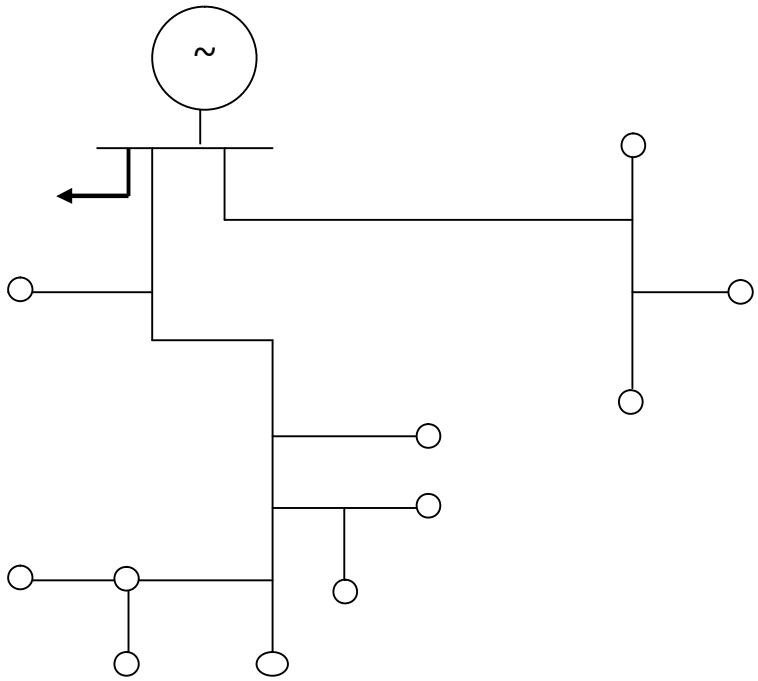



*Figure (I-6) : Réseau de Distribution [1]*

Et enfin les réseaux de transport d'énergie électrique doivent satisfaire les exigences suivantes :

**a) Puissance :** les compagnies doivent assurer aux clients la puissance dont ils ont besoin, de ce fait, il est nécessaire d'avoir toujours un équilibre entre la puissance fournie et celle consommée par les abonnés.

Les groupes des alternateurs sont munis de régulateurs qui commandent l'ouverture des vannes du fluide, ces régulateurs permettent de fixer le niveau de la puissance produite.

**b) Tension :** la valeur de la tension varie continuellement en raison des modifications des charges alimentées par le réseau.

Les gestionnaires du réseau, conçoivent et exploitent celui-ci d'une manière que la tension reste dans une plage qui n'excède pas $\pm$ 10 % de la tension nominale de ce réseau. [2]

**c) Fréquence :** les réseaux électriques alternatifs sont conçus pour une fréquence nominale de fonctionnement.

La fréquence d'exploitation doit rester relativement proche de la fréquence nominale on peut tolérer une certaine marge de variation qui est de $\pm$ 0.1 Hz pour les raisons suivantes : [2]

- Certaines appareils ne sont utilisables que dans une plage de fréquence déterminée (machines tournantes) car le dimensionnement de celle-ci est directement lié a la fréquence du réseau.

On rappelle que :

$$N = \frac{60\ f}{P} \qquad \text{(I-18)}$$

Avec p : nombre de paire de pole

f **:** fréquence

N : vitesse de rotation en (rd/s).

## I-4) Lignes aériennes :

### I– 4 – 1) Type de ligne :

Nous distinguons quatre types de lignes :

**I-4- 1- a) Ligne de distribution à basse tension (BT) :**

Ce sont les lignes et les fils installés à l'intérieur des édifices, usines et maisons pour alimenter les charges qu'utilisent ceux- ci.

Ce sont des câbles qui fonctionnent à des tensions inférieures à 600 volts. [2]

**I- 4- 1- b) Ligne de distribution moyenne tension (MT) :**

Ce sont des lignes qui relient les clients aux postes de transformation principaux de la compagnie d'électricité, leur tension est comprise entre 2,4 KV et 70KV. [2]

**I- 4- 1- c) Ligne de transport haute tension (HT) :**

Ce sont des lignes reliant les postes de transformation aux centrales de production, elles fonctionnent généralement a des tensions inférieures à 230 KV, dans cette catégorie on trouve aussi les lignes servant à échanger de l'énergie entre deux grands réseaux.

**I- 4- 1- d) Ligne de transport THT :**

Ce sont des lignes qui relient les centrales éloignées aux centres d'utilisation, elles sont encore utilisées dans l'interconnexion des réseaux électriques d'un même pays ou entre deux pays voisins.

## I-4- 2) Composante d'une ligne aérienne :

### I-4- 2- a) Les conducteurs :

Les conducteurs des lignes aériennes à haute tension sont toujours nus, on emploie des câbles en cuivre ou en aluminium avec âme en acier, ces derniers sont plus économiques.

Dans le transport de l'énergie électrique en haute tension (HT), on réalise des conducteurs creux a fin d'augmenter le diamètre de celui-ci sans accroitre sa section ainsi que son poids. Ce qui nous permet de réduire l'effet de couronne.

Pour la haute tension et ultra haute tension, on constitue chaque conducteur de phase au moyen d'un faisceau de plusieurs conducteurs câblés. Cette technique présente des avantages considérables qui sont :

- Inductance linéique sensiblement diminuée.
- L'effet couronne réduit. [5].

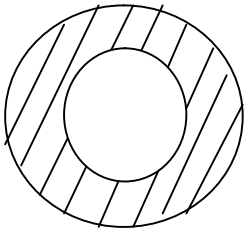


*Figure (I-7-a) : conducteur creux d'une phase d'une ligne*

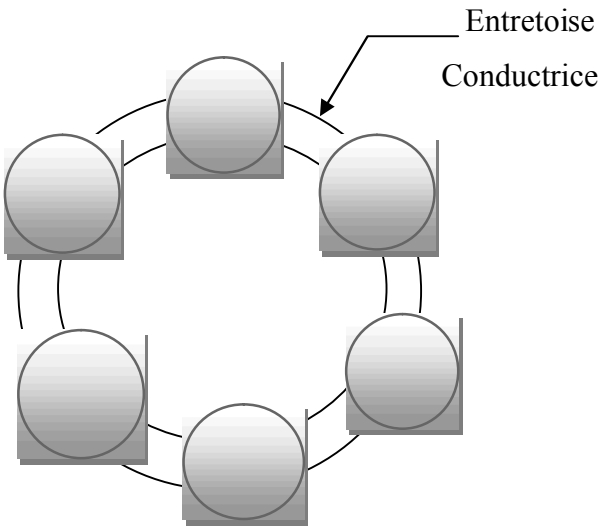



*Figure (I-7-b) : conducteur en faisceau*

### I-4- 2- b) Support (pylônes) :

Ils sont fabriqués en acier, les pylônes sont munis de traverses permettant de donner aux conducteurs un écartement approprié à la tension de service.

Nous allons donner juste un aperçu sur les supports utilisés en haute tension (HT) et en très haute tension (THT). Ils peuvent présenter des formes diverses, dépendant de la configuration adoptée pour la disposition des conducteurs et du nombre de terne que comporte la ligne.

Il y a trois grandes familles :

1- Les lignes à deux ternes à configuration en triangle :

Les trois conducteurs étant placés aux sommets d'un triangle équilatéral.

2- Des lignes à un terne à configuration en nappe :

Les conducteurs sont tous dans un même plan horizontal.

3- Des lignes à deux ternes à configuration en drapeau :

Les conducteurs sont tous dans un même plan vertical. [1]

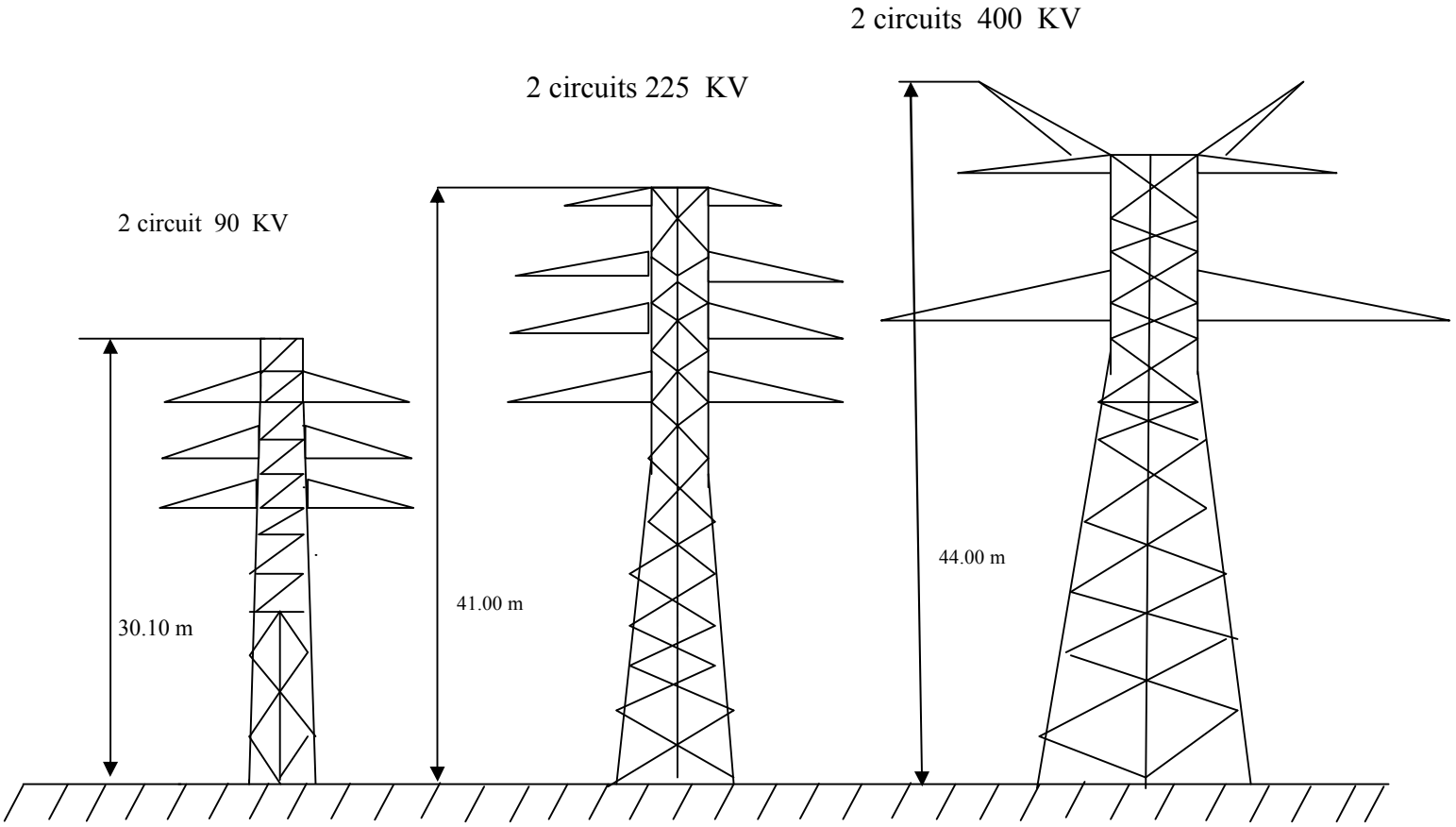



*Figure (I-8) : dimension des pylônes en fonction de la tension [1].*

**I-4- 2- c) L'isolation :**

Les isolateurs sont fabriqués en verre ou en porcelaine, ils ont des formes spéciales (jupes) pour allonger les distances d'isolement et donc la tenue diélectrique. Les isolateurs doivent présenter trois qualités principales :

- L'isolateur doit posséder une rigidité diélectrique suffisante pour tenir avec un coefficient de sécurité adéquat.
- L'isolateur doit être constitué de manière à réduire les fuites du courant.
- Enfin l'isolateur doit avoir la propriété mécanique requise pour résister aux sollicitations exercées sur lui par le conducteur.

Sur les lignes à très haute tension on constitue des chaînes d'isolateur suspendues aux traverses des pylônes, et portant le conducteur à leur partie inférieure.

Chaque élément de la chaîne est rigide, mais l'assemblage, des divers éléments entre eux ainsi que la fixation, au point d'attache s'effectue de manière qui confère à l'ensemble une grande souplesse.

Le nombre d'éléments mis en série dans une chaîne dépend évidement de la tension de service de la ligne, voici le tableau qui donne le nombre d'élément d'une chaine d'isolation en fonction de la tension de service [5].

| **Tension de service (kV)** | 70 | 150 | 220 | 400 |
|---|---|---|---|---|
| **Nombre d'éléments d'une chaîne d'isolation** | 5 à 6 | 7 à 8 | 11 à 12 | 19 à 21 |

Les chaînes d'isolations sont soumises à des tensions pour tester leurs tenues et ces essais sont faits à sec, et sous la pluie.

On définit le coefficient de sécurité comme suit :

$$K = \frac{\text{Tension de contournement sous pluie}}{\text{Tension nominale de service}}$$

## I - 4 – 3) L'effet couronne dans les lignes électriques :

L'effet couronne désigne l'ensemble des phénomènes liés a l'apparition d'une conductivité dans l'environnement d'un conducteur porté a haute tension.

Cette conductivité est due au phénomène d'ionisation, que l'on explique par :

Il existe toujours dans l'air un certain nombre de paires (ion positif -électron libre) ,crée par rayonnement cosmique ou par la radio activité naturelle .Lorsque ces éléments sont soumis à un champ électrique ,ils sont accélérés, et si le champ est assez intense, l'énergies qu'ils acquièrent devient suffisante pour provoquer l'ionisation des molécules neutres qu'il heurtent .Il se crée de nouveaux électrons libres qui vont également ioniser des molécules , et ainsi de suite ,le processus prend une allure d'avalanche.

Pour qu'une telle avalanche puisse se maintenir, il faut qu'elle atteigne une valeur critique et que le champ ait une valeur importante. [13]

L'effet couronne est influencé par

- le champ électrique superficiel du conducteur.
- le diamètre du conducteur.
- l'état de surface du conducteur.
- la densité de l'air environnant.

IL est la source de manifestations gênantes qui sont :

- les pertes d'énergie électrique.
- le bruit(le bourdonnement d'abeilles).
- perturbation radioélectrique.

- **Le champ critique :**

Il est donné par la formule de PEEK qui a pour expression (dans le cas d'un conducteur cylindrique) [6]

$$E_c = E_0 \delta n_1 n_2 \left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta . r}}\right] \qquad \text{(I-19)}$$

Eo : valeur crête du champ électrique dans les tensions normales [KV/cm]

r : rayon du conducteur en (cm)

$\delta$ : La densité de l'air tel que

$$\delta = \frac{P\,(273 + t_0)}{P_0\,(273 + t)} \qquad \text{(I-20)}$$

$t_0$ **:** la température ambiante (25° c)

$P_0$ **:** la pression atmosphérique (76 mm hg)

$n_1$ : coefficient qui tient compte de l'état du conducteur (irrégularité géométrique)

$n_2$ : coefficient qui tient compte de l'état de la pollution des conducteurs.

$\left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.r}}\right]$ Correction de PEEK

- **La tension de seuil d'apparition de l'effet couronne est :**

$$V_c = E_0 \quad \delta \quad n_1 \quad n_2 \quad \left[1 + \frac{0.308}{\sqrt{\delta.r}}\right] .r.\ln\frac{2h}{r} \qquad [6] \qquad (I\text{-}21)$$

- **En régime alternatif les pertes par effet couronne sont donnée par :**

$$P_c = 2{,}41 \frac{f+25}{\delta} (V_s - V_c)^2 \sqrt{\frac{r}{d}} \qquad [W/Km.\ Phase] \quad [6] \quad (I\text{-}22)$$

Avec :

f : fréquence réseau (Hz)

$\delta$ : Densité de l'air

d : distance entre deux conducteurs de la ligne (cm)

Vs : tension simple du réseau (KV eff)

Vc : tension d'apparition de l'effet couronne (KV eff)

***Remarque :***

- cette formule est valable pour $(V_s - V_c) \geq 0$ et pour des fréquences industrielles.

- Pour les lignes aériennes on fait le dimensionnement, de sorte que le champ éclectique sous la tension de service a la surface d'un conducteur soit toujours inferieur au champ critique de l'apparition de l'effet couronne, a fin de réduire le champ électrique a la surface du conducteur, on augmente le rayon du celui-ci par l'utilisation de l'une de ces méthodes :

- Conducteur creux à grand rayon.
- Câble central en acier entouré de brin de cuivre.
- Conducteur en faisceau pour la haute tension et la très haute tension. [6]

- **Perturbation radio électrique (radio- interférence) :**

Certaines perturbations causées aux postes récepteurs (télévision- radio) par les décharges de couronne, qui apparaissent dans les lignes de haute tension.

Ces perturbations se transmettent jusqu' aux récepteurs perturbés ; soit directement par rayonnement électromagnétique capté par les antennes des récepteurs, soit par l'intermédiaire du réseau par voie d'alimentation.

Pour les perturbations arrivant par l'alimentation, elles peuvent être neutralisées a l'aide d'un condensateur (filtre) placé à l'entrée du système d'alimentation, par contre les perturbations rayonnées sous forme d'onde électromagnétique dans l'air, elles sont gênantes et la seule solution pour y remédier, c'est d'éloigner les lignes de haute tension (HT ) et très haute tension (THT) des zones d'agglomérations.[7]

## I- 4- 4) Fil de garde :

Pour protéger les lignes aériennes contre la foudre qui peut frapper une ligne électrique ce qui engendre, une onde de surtension qui va se propager toute au long de la ligne, on installe au-dessus des lignes, au sommet des pylônes des fils appelés, fils de garde ou fils de terre.

Pour que le fil de terre assure une bonne protection des conducteurs de la ligne, il ne faut pas qu'il déborde trop. On admet généralement que l'ongle ($\alpha$)formé avec la verticale et la droite joignant un fil de terre et le conducteur qu'il protège ne dépasse pas de 30 à 35°. [5]

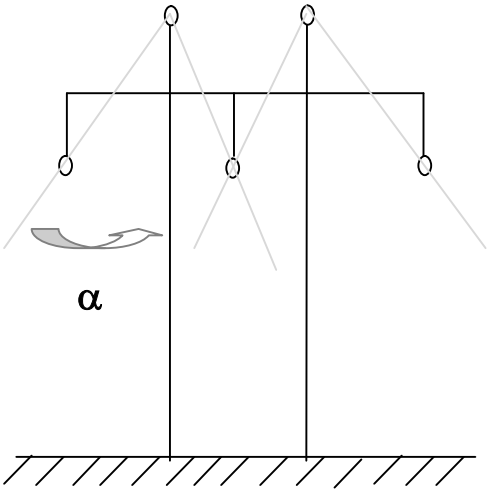



*Figure (I-9-a.) [5]*

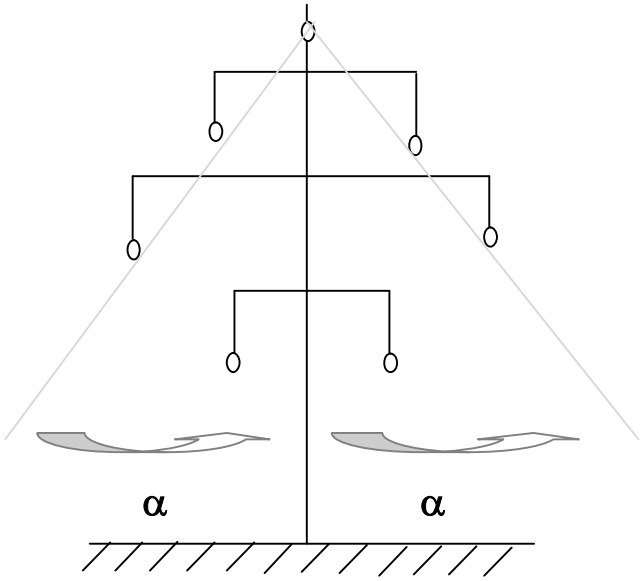



*Figure (I-9-b). [5]*

*L'emplacement du fil de garde*

L'utilisation du fil de terre est généralisée dans les lignes à hautes tensions qui sont fort exposées à la foudre, mais le cout de son installation oblige les compagnies d'électricité à le supprimer, sauf dans les derniers tronçons de ligne aboutissant aux postes de transformation et sur les postes eux mêmes pour assurer leur protection.

## I - 4 – 5) Mises à la terre des pylônes :

Le pylône métallique est lui même conducteur, mais sa fondation en béton présente une résistance appréciable qui peut atteindre plusieurs centaines d'ohms (Ω).

Le pylône devrait être relié électriquement à une prise de terre qui d'après le cas, pourra prendre une des formes suivantes :

a) Un ensemble de tubes enfoncés dans le sol, à une profondeur qui dépend des conditions de sécheresse de terre, une telle terre pourra éventuellement être améliorée en introduisant dans les tubes de l'eau additionnée d'un sel approprié (sulfate de cuivre par exemple).

b) Un certain nombre de conducteurs nus qui sont enfouis dans le sol à quelques mètres. et ces conducteurs relient les pieds des pylônes entre eux.

Ces procédés permettent de réduire la valeur des résistances de terre de quelque centaine à moins d'une dizaine d'ohms.

## I- 5) Propriétés des linges électriques :

Le rôle fondamental d'une ligne est de transporter une puissance active, si elle doit également transporter une puissance réactive celle-ci doit être faible par rapport à la puissance active.

### I-5-1) Circuit équivalent d'une ligne :

Les lignes possèdent des propriétés électriques communes, en effet, toute ligne possède une résistance, une réactance inductive, et une réactance capacitive, ces impédances sont reparties uniformément sur toute la longueur de la ligne. Si bien qu'on peut représenter la ligne par une série de section (R ; L ; C) identiques. Chaque section représente un tançons de ligne d'une longueur donnée.

Les éléments $(r, x_l , x_c)$ représentent les impédances correspondantes pour cette longueur avec :

$R = \sum r_i$

$X_l = \sum l_i . \omega$

$X_C = \frac{1}{\sum c_i \omega}$

Avec : $\omega = 2 \pi f$

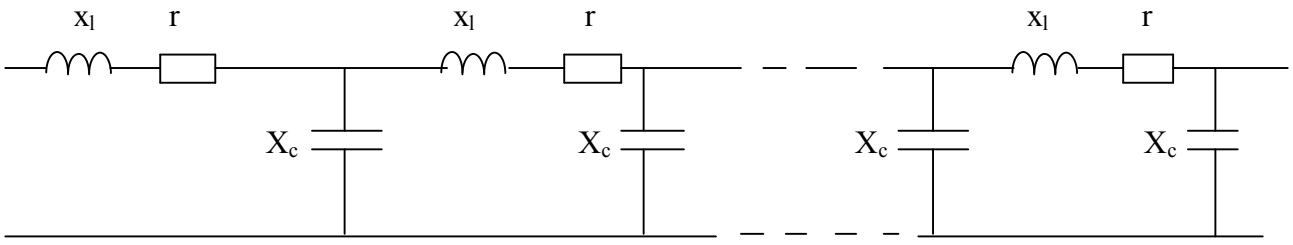



*Figure (I-10) : L'impédance d'une ligne de transport composée d'une série de section*

On peut simplifier le circuit de la figure (I-10), on additionnant les résistances individuelles pour former une résistance totale, de la même façon on obtient la réactance inductive totale ($X_l$), et la réactance capacitive totale $X_c$, qui est en dérivation

On simplifie le schéma de la figure précédente pour avoir le schéma suivant :

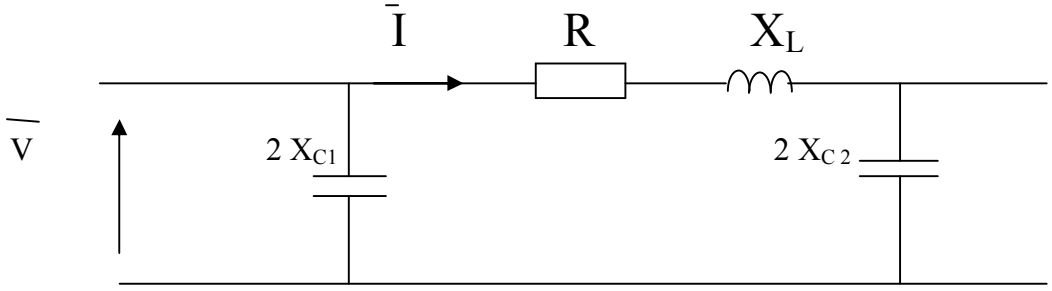



*Figure (I-11) : schéma simplifié d'une ligne électrique.*

On partage $X_c$ en deux éléments de valeur 2 $X_{c1}$ et 2$X_{c2}$ localisés aux deux extrémités de la ligne [2]

### I- 5- 2) Simplifications du circuit équivalent d'une ligne aérienne :

Le circuit obtenu précédemment peut être simplifié encore, en éliminant un ou deux éléments, et cette simplification se fait suivant, l'importance relative des puissances.

($P_J$, $Q_L$ , $Q_C$) par rapport à la puissance active P transportée par la ligne.

Sachant que :

P : la puissance active transportée par la ligne.

$P_j$:la puissance dissipée par effet joule dans la ligne tel que ($Pj= RI^2$)

$Q_L$ : la puissance réactive consommée par la ligne tel que ($Q_L= X_L I^2$)

$Q_c$ : c'est la puissance réactive générée par la ligne tel que ($Qc = \frac{V^2}{X_c} = C\omega V^2$).

## I- 5 – 3) Puissances maximales transportables par une ligne aérienne :

La limite de puissance transmissible qui ne doit pas être franchie, est l'une des contraintes techniques qu'il faut prendre en considération dans un réseau électrique, en effet pour savoir la puissance qu'une ligne peut transporter , afin de connaître ses possibilités lors des surcharges temporaires , nous allons étudier la puissance maximale que peut transporter différente type de ligne.

### I-5- 3- a) Puissance maximale pour le cas d'une ligne résistive :

Considérant une source de tension alimentant une charge à travers une ligne supposée purement résistive

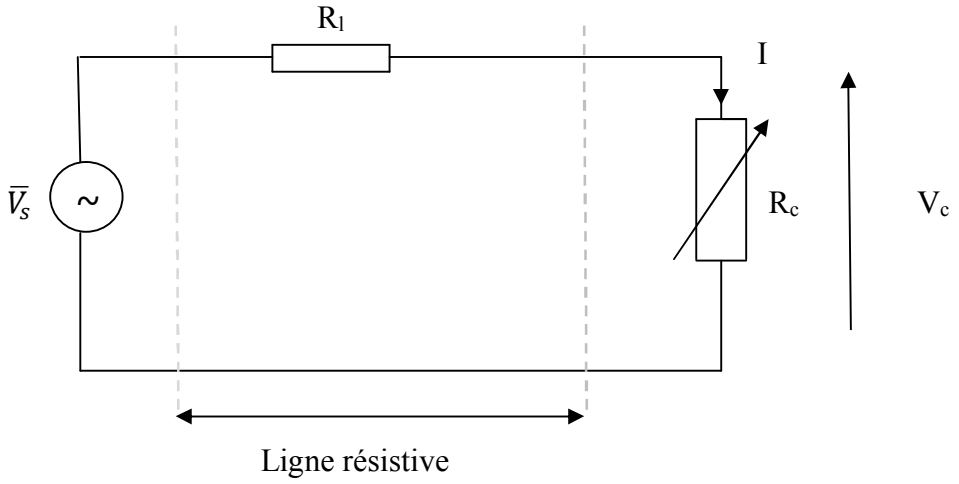



*Figure (I-12) : ligne résistive débitant sur une charge résistive.*

On a la puissance au niveau de la charge est donnée par :

$P_c = V_c I$ avec $V_c = R_c I$

$$\Rightarrow \quad P_c = \frac{V_c^2}{R_c} \qquad \text{(I-23)}$$

On s'intéresse uniquement à la puissance active transportée par la ligne.

D'un coté, on sait que lorsque la charge augmente le courant augmente aussi, et la tension aux bornes de la charge, elle diminue progressivement.

Par ailleurs on sait encore qu'il y a une puissance maximale transmissible par un dipôle à partir d'une source de tension constante, et cette puissance maximale est obtenue pour $R_l = R_C$

En écrivant les équations des mailles

$V_s = V_{ligne} + V_{charge} = R_l I + Rc I = 2R_c I = 2V_c$ (I-24)

D'où on déduit que :

$$P_{max} = \frac{V_s^2}{4.R_c} \quad \text{(I-25)}$$

Ce qui nous permit de tracer la courbe suivante :

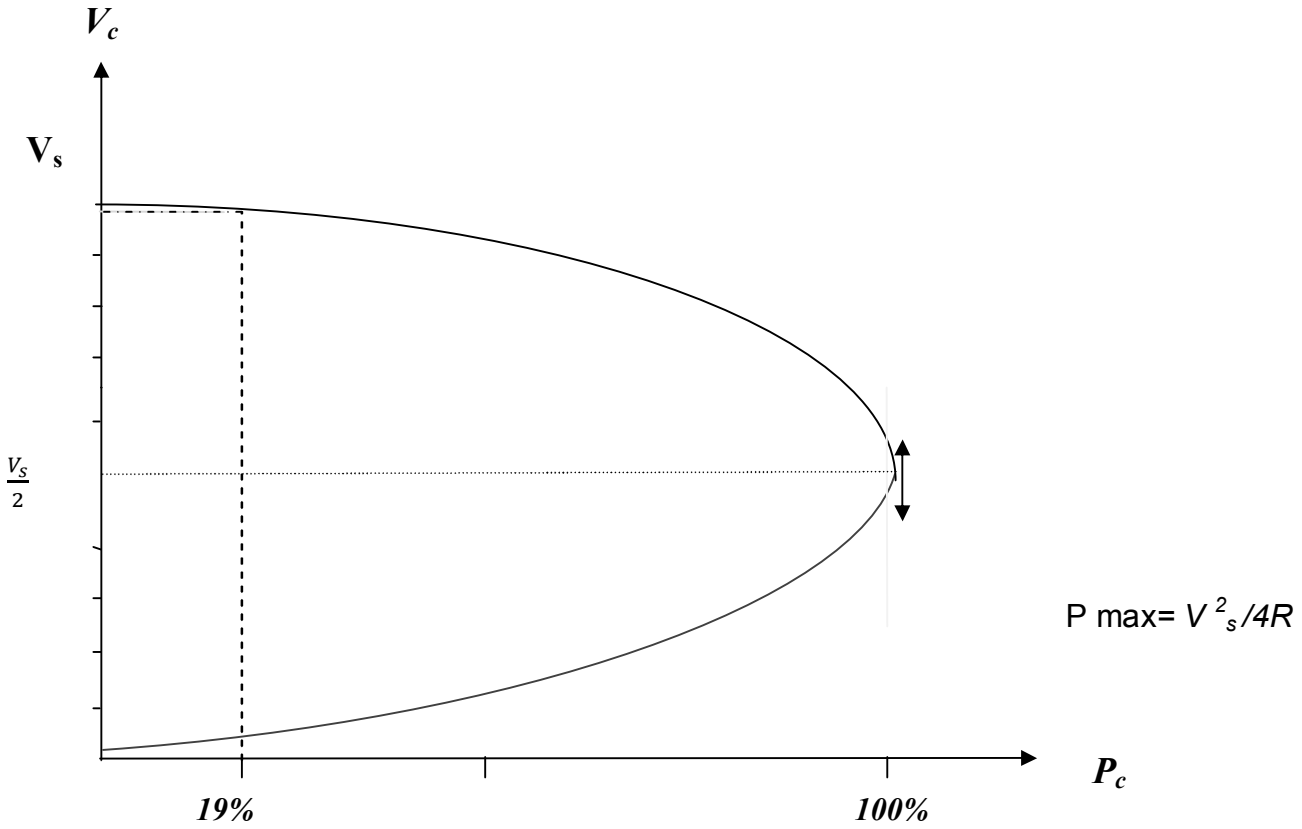



*Figure (I-13) : la puissance maximale transportée par une ligne résistive.[2]*

Si on fait une régulation de la tension à +5 % c'est-à-dire (95 % $V_s$ ⇒ 0,95 $V_s$) on obtient en faisant une projection que 19 % seulement de la puissance maximale est transportée par cette ligne de la source vers la charge. [2]

***Remarque :***

1) La ligne peut transporter une puissance beaucoup plus grande dans ce cas mais la tension aux bornes de la charge serait trop basse.
2) La source doit fournir la puissance $P_c$ absorbée par la charge plus les pertes dans la ligne par effet joule.

**I-5- 3- b) Puissance maximale pour une ligne purement inductive :**

Considérons une source de tension $V_s$ qui alimente une charge à travers une ligne qu'on suppose purement inductive.

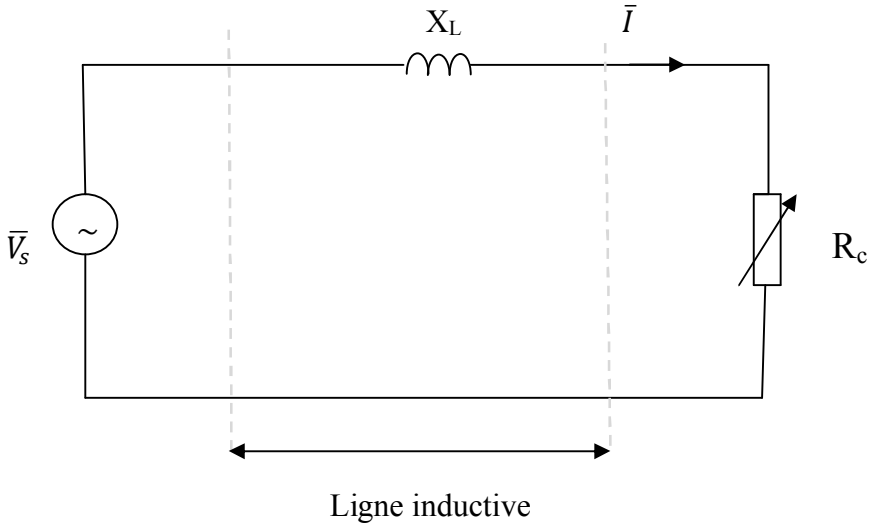



*Figure (I-14) : ligne inductive débitant sur une charge résistive*

Les équations du circuit équivalent sont :

$$\bar{V}_s = (R_C + jX_L)\,\bar{I} \qquad \text{(I-26)}$$

Le module du courant est : $$I = \frac{V_s}{\sqrt{R_c^2 + X_L^2}} \qquad \text{(I-27)}$$

Coté charge :

$$P_C = V_C.I_C \quad \text{d'où} \quad P_C = \frac{R_c \ .V_s^2}{X_l^2 \ .\left[1+(\frac{R_c}{x_l})2\right]} \qquad \text{(I-28)}$$

On obtient $P_{c\,max}$ en faisant

$$\frac{dp_c}{dR_c} = 0$$

Ce qui donne : $X_l = R_C$

$P_{Cmax} = P_C(X_l=R_C)$

D'où :

$$\boxed{P_{C\,max} = \frac{V_s^2}{2.X_l}} \qquad \text{(I-29)}$$

Si on trace l'allure de $V_c = f(P_c)$ on aura :

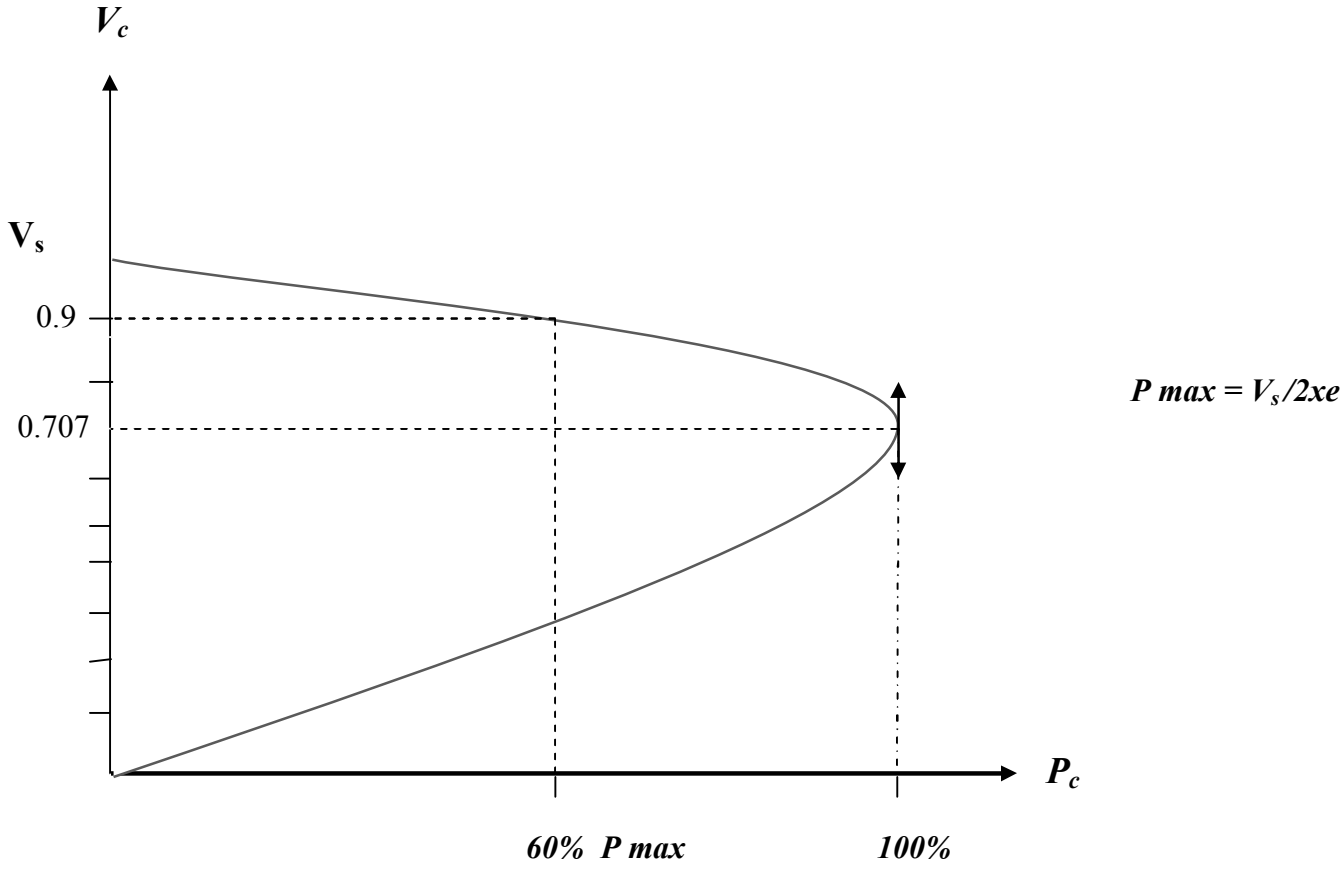



*Figure (I-15) : Puissance maximale transportée par une ligne inductive [2]*

Si on effectue une régulation de la tension $V_s$ à 10 % c'est-à-dire à 90 % $V_S$ on obtient en faisant une projection, que 60 % de la puissance maximale sont transportée par cette ligne, on constate la même chose que pour la ligne résistive, la ligne peut transportée une puissance beaucoup plus grandes, mais la tension aux bornes de la charge serait alors trop basse.[2]

Dans ce cas aussi la source fournit non seulement la puissance active $P_c$ consommée par la charge , mais la puissance réactive consommée par la ligne .

**I- 5- 3- c) $P_{max}$ pour une ligne inductive compensée :**

**i) Compensation parallèle** :

Une source de tension $V_s$ alimente une charge résistive $R_c$ à travers une ligne inductive, ayant à sa fin une réactance capacitive placée en parallèle avec charge.

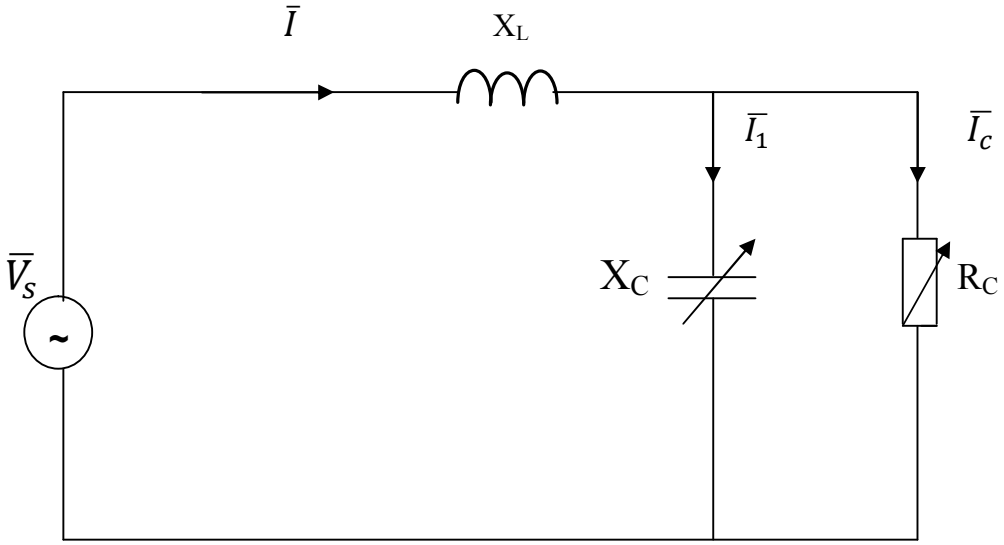



*Figure (I-16-a) : ligne inductive compensée*

Les équations régissant le circuit :

$$\bar{V_c} = X_c \bar{I_1} = \frac{1}{jcw} \bar{I_1} \quad \text{(I-30)}$$

$$\bar{V_c} = R_c \bar{I_c} \quad \text{(I-31)}$$

$$\bar{V_s} = R_c \bar{I_c} + j X_l \bar{I} \quad \text{(I-32)}$$

$$\bar{I} = \bar{I_1} + \bar{I_c} \quad \text{(I-33)}$$

(I-30) = (I-31) ⇒

$$\overline{I_1} = j\,(cw)\,R_c\,\overline{I_c} \qquad \text{(I-34)}$$

En remplaçant $\overline{I_1}$ par son expression dans l'équation (I-33)

$$\overline{I} = (j\,(cw)\,R_c + 1)\,\overline{I_c} \qquad \text{(I-35)}$$

D'où :

$$\overline{V_s} = [R_c\,\overline{I_c} - (cw\ R_c\,X_l + jX_l)\,\overline{I_c}] = [R - \frac{X_l R_c}{X_c} + j\,X_l]\,\overline{I_c} \qquad \text{(I-36)}$$

Le module du courant :

$$I_c = \frac{V_s}{X_l\sqrt{(\frac{R_c}{X_l^2} - \frac{R_c}{X_l X_c})^2 + 1}} \qquad \text{(I-37)}$$

Par ailleurs on a :

$$P_C = V_c\ I_c = R_c\ I_c^2 = \frac{R_c}{X_l}\ \frac{V_s^2}{\left(\frac{R_c}{X_l} - \frac{R_c}{X_c}\right)^2 + 1} \qquad \text{(I-38)}$$

L'expression de la puissance maximale est obtenue pour

$$\frac{dP_c}{dR_C} = 0$$

On trouve :

$$\boxed{R_c = \frac{X_l X_c}{X_c - X_l}} \qquad \text{(I-39)}$$

D'où

$$\boxed{P_{c\,max} = \frac{V_s^2\,X_c}{2\,X_l(X_c - X_l)}} \qquad \text{(I-40)}$$

Pour augmenter $P_{max}$ on effectue des réglages sur les réactances capacitives.

Et pour $X_c = 2X_l$

On aura

$$\boxed{P_{max} = \frac{V_s^2}{X_l}} \qquad \text{(I-41)}$$

En générale on place deux réactances capacitives, l'une au début de la ligne, et l'autre a la fin de celle-ci. Leur réglage se fait de sorte que les deux réactances capacitives fournissent la puissance réactive consommée par la ligne , qui fait transporter toute la puissance de la source vers la charge.

**ii) Compensation série :**

Une source de tension $V_s$ alimente une charge résistive $R_c$ à travers une ligne inductive, ayant a sa fin une réactance capacitive placée en série avec charge.

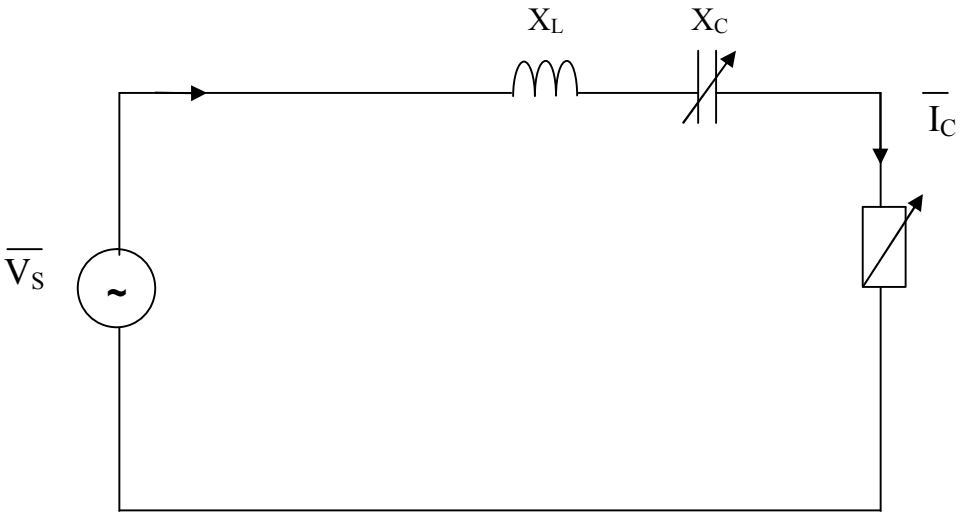



*Figure (I-16-b) : ligne inductive compensée.*

Les équations régissant le circuit

$$\overline{V_S} = (Rc + j\,(X_l - X_c))\,\overline{I_c} \qquad \text{(I-42)}$$

module du courant

$$I_c = \frac{V_s}{\sqrt{R_c^2 + (X_l - X_c)^2}} \qquad \text{(I-43)}$$

La puissance est donnée par

$$P_c = V_c I_c = R_c I_c^2 = \frac{R_c V_s^2}{R_c^2 + (X_l - X_c)^2} \qquad \text{(I-44)}$$

On obtient $P_{max}$ pour : $R_c = X_l - X_c$

D'où :

$$\boxed{P_{c\,max} = \frac{V_s^2}{2(X_l - X_c)}} \qquad \text{(I-45)}$$

Dans ce cas pour augmenter $P_c$ on effectue le réglage sur les réactances capacitives. pour :

$X_c = 1/2\ X_l$

On aura comme précédemment :

$$\boxed{P_{c\,max} = \frac{V_s^2}{X_l}} \qquad \text{(I-46)}$$

Pour les deux types de compensation la courbe caractéristique d'une ligne inductive compensée serait.

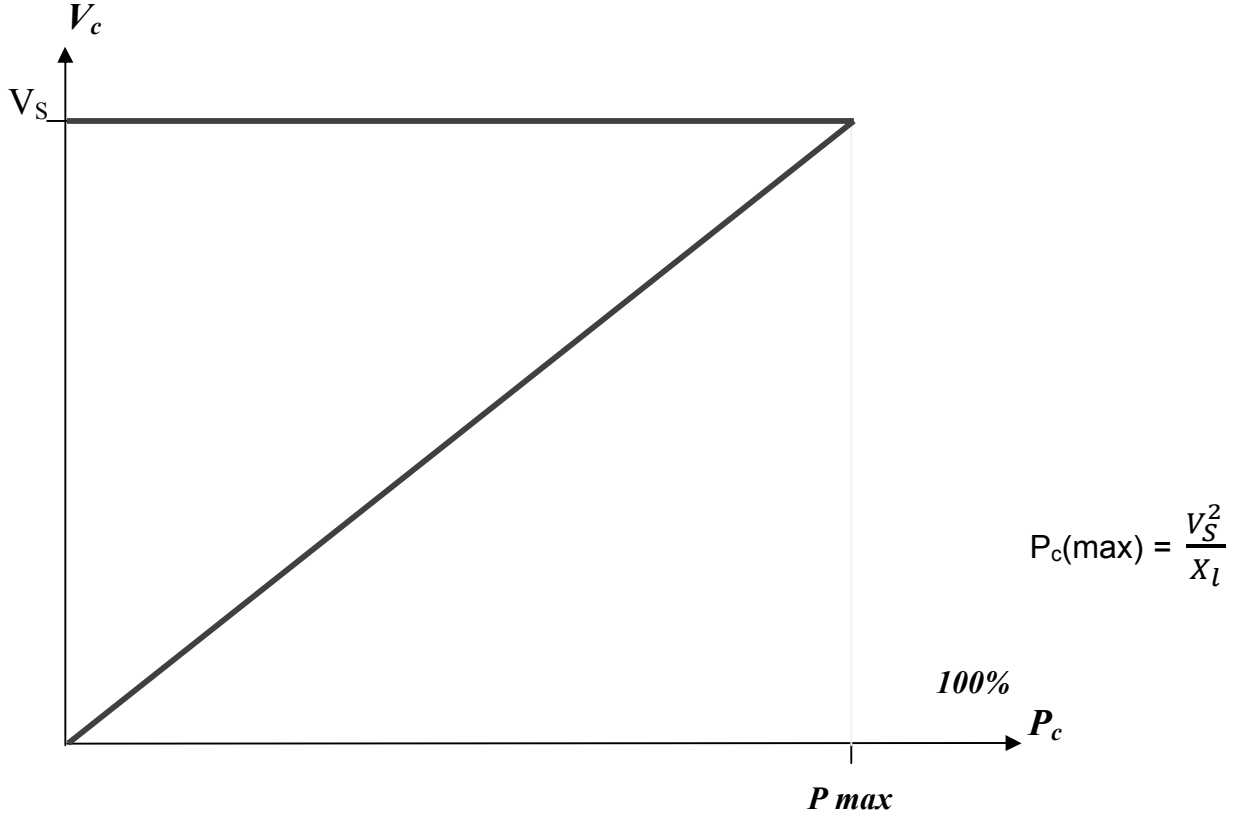



*Figure (I-17) : la puissance maximale transportée par une linge inductive compensée.*[2]

D'après cette courbe on constate encore, qu'il ya une limite à la puissance active que la ligne peut transporter à la charge, on obtient une régulation parfaite avec

($V_s = V_c$) et la tension demeure constante jusqu'a la limite de la ligne.

$$P_C \text{ max} = \frac{V_S^2}{X_L} \qquad \text{(I-47)}$$

Si on compare cette courbe à celle d'une ligne inductive sans compensation on constate que la ligne compensée, transporte le double de puissance toute en gardant la tension constante, d'où l'utilité des condensateurs dans les lignes de transport de l'énergie électrique à haute tension est très haute tension.

## I- 5- 4) choix de la tension de ligne :

On choisit la tension d'une en utilisant l'expression suivante :

$$U = K \sqrt{P\, l} \qquad [2] \qquad \text{(I-48)}$$

Avec :

U **:** tension composée (tension de ligne à ligne) [KV]

P **:** puissance à transporter sur les trois phases [MW]

l **:** distance du transport…….. [Km]

K **:** facteur approximatif qui dépend de la régulation permise, et de type de la ligne.

A noter que le choix de la tension dépend aussi des facteurs économiques.

## I – 5 – 5) Transport de l'énergie électrique à très haute tension :

Le transport de l'énergie électrique à très haute tension crée des problèmes particuliers qui nécessitent l'installation d'énormes appareils pour maintenir la tension constante et pour garantir la stabilité.

Considérons une ligne triphasé de tension entre phase 735 KV**,** de longueur de 600 Km

On à

$X_l = 192\ \Omega$

$X_c = 667\ \Omega$

Coté source :

$V_s = \frac{735}{\sqrt{3}} = 424$ KV

Coté charge :

$V_c = \frac{V_s.X_c}{X_c - X_l}$ [2] (I-49)

Ce qui donne

$V_c = 595$ KV $\Longrightarrow U_c = \sqrt{3}\ 595 = 1030.6$ KV.

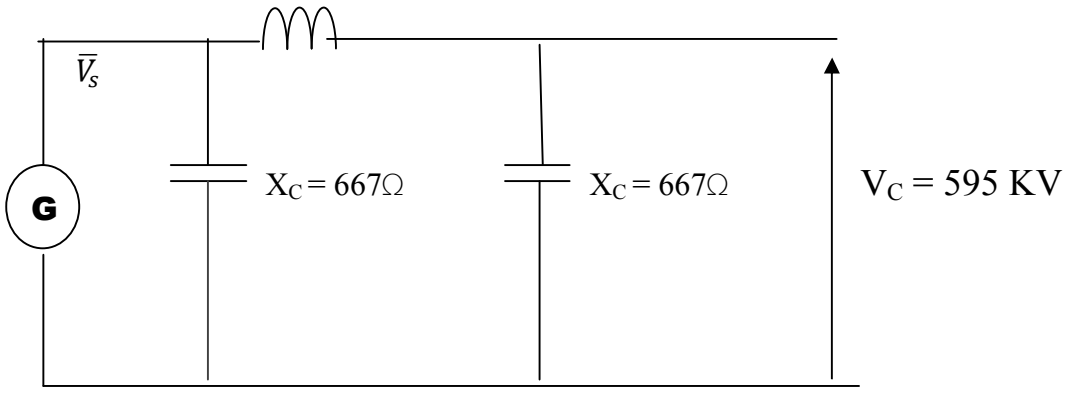



*Figure (I-18)*

On voit que la tension à augmentée de 40 % par rapport à la tension nominale, une telle surtension est inacceptable, et on doit la réduire en branchant des réactances inductives (shunt).

- L'installation des réactances inductives (Shunt) :

L'augmentation de la tension à la fin de la ligne est gênante, car elle oblige les compagnies d'électricité à surdimensionné les systèmes de protection qui sont (disjoncteurs-sectionneur –relais etc.……..) c'est pour cela qu'il faut impérativement renduire ces surtensions.

Ces surtension en régime permanent sont dues à l'effet ferranti qui se manifeste lorsque les lignes à haute tension sont à vide ou faiblement chargées, il est du aux courant capacitifs qui circule sur la ligne

Pour résoudre ce problème, on injecte a la fin de la ligne un courant qui est opposé a celui de ligne, ce courant est généré par les réactances inductives qu''on installe.

la valeur de ces réactance est égale à

$$X_{L\,2} = X_{C\,2} \qquad \text{(I-50)}$$

- Si on revient à l'exemple précédent, on obtient le circuit suivant :

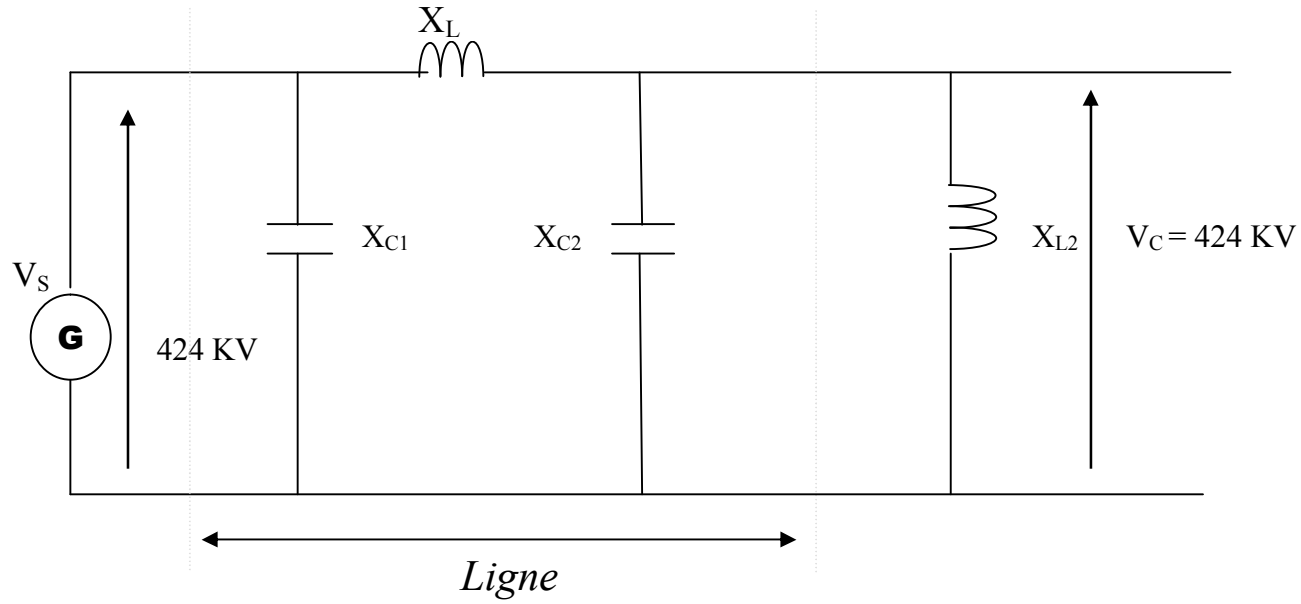



*Figure (I-19) : Ligne de haute tension ayant à sa fin une réactance inductive shunt.*

***Remarque :***

Le transport de l'énergie électrique en très haute tension nécessite les installations d'énormes appareils de compensation qui peuvent être (compensateurs statique – compensateur synchrone - réactance inductive) ces derniers qui nécessitent à leurs tours des équipements de protection qui sont :

Disjoncteurs – sectionneurs – parafoudre - mises a la terres - relais de protection, et les systèmes de télécommande sophistique ce qui fait que le cout devient exorbitant et l'investissement revient très cher pour les compagnies d'électricités.

## I – 6) Echange de puissance :

Les lignes d'interconnexions permettent des échanges d'énergie entre des régions de forte consommation et même entre pays voisins.

Ces lignes qui relient deux régions sont des lignes inductives ayant des tensions à leurs extrémités égales et constantes, et le sens de circulation de la puissance active dans un sens comme de l'autres est défini par l'angle de déphasage entre ces deux tensions.

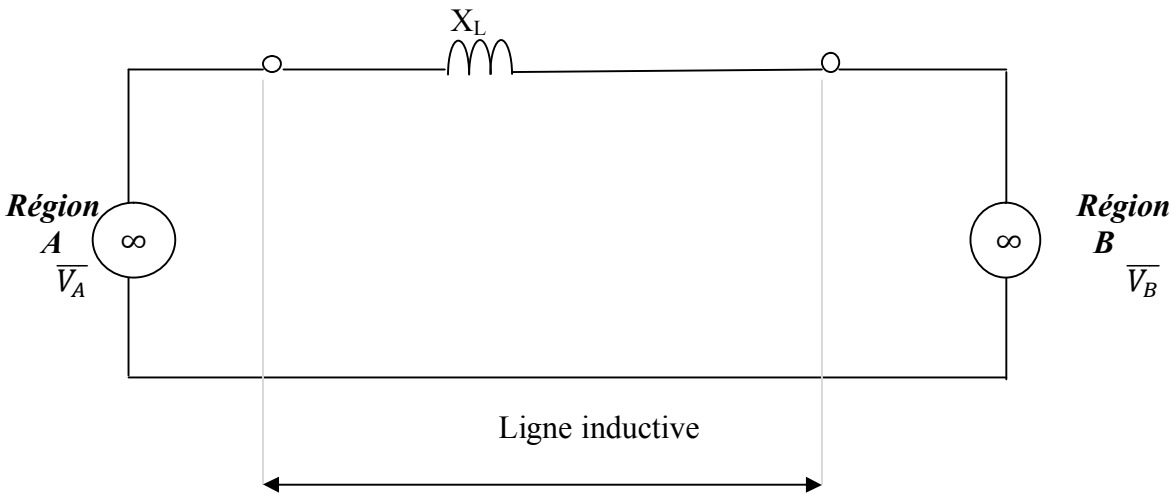



*Figure (I-20) : ligne inductive reliant deux réseaux.*

- Les régions A et B se comportent comme étant des réseaux infinis.

**i) Les tensions $V_A$ et $V_B$ sont en phase :**

Pas de courant qui circule dans la ligne d'où, aucune puissance n'est transportée.

**ii) La tension $V_A$ est en avance d'un angle $\delta$ par rapport a $V_B$ :**

Dans ce cas la région A fournit de l'énergie à la région B, le courant circule de la région A vers la région B.

Le diagramme vectoriel serait alors

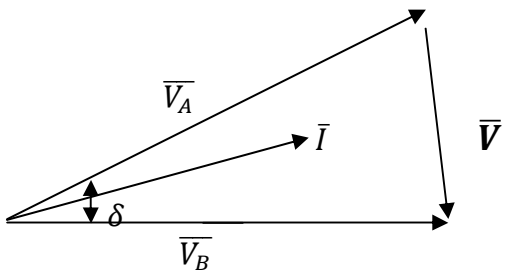



*Figure (I-21-a) : diagramme vectoriel du déphasage entre les tensions des deux réseaux*

**iii) La tension $V_A$ est en retard d'un angle $\delta$ par rapport à $V_B$ :**

Dans ce cas le courant circule de la région B vers la région A, d'où le transfert d'énergie se fera de B vers A.

- Le diagramme vectoriel serait alors

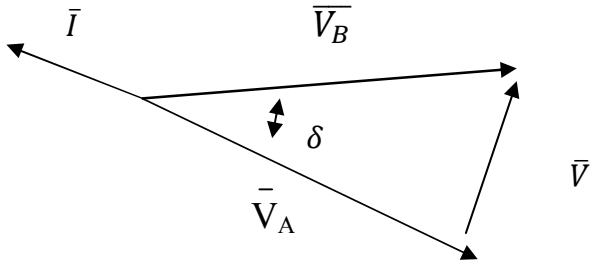



*Figure (I-21-b) : diagramme vectoriel du déphasage entre les tension des deux réseaux.*

On constate que dans les deux cas la puissance active transportée est donnée par l'équation :

$$P = \frac{V_A V_B}{X_l} \sin\theta = \frac{V^2}{X_l} \sin\theta \qquad [2] \qquad (I\text{-}51)$$

Comme précédemment une ligne reliant deux réseaux impose une limite à la puissance maximale que l'on peut transporter.

Souvent on installe des lignes supplémentaires pour satisfaire les besoins énergétiques d'une zone ou d'une région forte consommatrice, et ces lignes servent aussi pour améliorer la stabilité générale des réseaux électriques.

Pour ce faire ; comme la puissance active ne circule pas souvent dans le sens voulu, on installe sur ces lignes des autotransformateurs qui ont pour rôle de faire varier l'angle de déphasage d'une tension par rapport à l'autre , d'où on pourra commander à volonté le sens de transfert de la puissance active d'une région à une autre .

On peut de la même façon, faire circuler de la puissance réactive d'une région à une autre, en utilisant cette fois ci des autotransformateurs (dévolteur / survolteur) selon le sens dans le quel, on veut écouler cette Puissance réactive.

## 7) L'interconnexion des réseaux électriques :

La fluctuation de la consommation de l'énergie électrique, comme on la vue précédemment (voir la courbe caractéristique de la demande énergétique) oblige les compagnies d'électricité à répondre à toutes les demandes énergétiques, face à l'impossibilité de stocker l'énergie électrique en quantité suffisante, pour faire face aux pics de la demande des consommateurs. D'où la nécessite d'avoir recours à l'interconnexion des réseaux électriques qui est la liaison par des lignes appelées lignes d'interconnexion, des différentes centrales de production et parfois entre deux ou plusieurs
zones qui sont classée comme zones de grande consommations (voir l'échange énergétique entre zone A et B) surtout quand il s'agit des zones privilégiées dont l'alimentation en énergies électrique doit être permanente et sans interruption par exemple ( aéroports, ports , hôpitaux , les grandes zones industrielles , etc…..). Actuellement on fait l'interconnexion non seulement entre les différentes centrales ou postes de transformation d'un même pays mais également entre différents pays qui sont voisins.

### I-7-1) Avantage de l'interconnexion :

#### I-7-1- a) La stabilité du réseau :

L'interconnexion des réseaux permet le transfert de l'énergie par des lignes d'interconnexions pour faire face à la demande accrue des consommateurs, de la, la puissance demandée est supportée par plusieurs centrales, sachant que la puissance fournie par les centrales doit être égale à celle demandée par les consommateurs en tenant compte bien sur des pertes dues aux chutes de tension

#### I-7-1- b) Continuité de service :

L'interconnexion permet d'assurer une alimentation des consommateurs d'une façon continue et ininterrompue. Si l'une des centrales tombe en panne, ou elle est à l'arrêt pour la maintenance, il suffit d'augmenter le débit des autres centrales pour assurer l'alimentation de tous les abonnés.
Parfois lors des moments creux de consommation, on fait arrêter une centrale ou bien diminuer le débit de toutes les centrales.

#### I-7-1- c) L'économie :

Comme on la cité précédemment l'interconnexion entre centrales ou postes de transformation d'un même pays ou de pays voisin permet la répartition des charges sur différentes centrales, surtout que les heures de pointes et celles de relâches, sont différentes d'un pays à un autre du au décalage horaire entre pays. D'où le cout de fonctionnement global devient minimal.

## 7- 2) Les inconvénients de l'interconnexion :

### I-7- 2- a) Réglage de la tension et de la fréquence :

L'interconnexion des réseaux électriques nécessite tout de même le réglage de tension et de la fréquence. Le réglage de la tension se fait par l'installation des autotransformateurs aux niveaux des lignes d'interconnexions, qui servent à ramener la tension à une valeur égale entre le début et la fin de ces lignes, sans cela l'écart de tension se produit, il y aura la circulation ou un échange de la puissance réactive se qui est néfaste pour le réseau. De même on installe des autotransformateurs qui effectuent des réglages au niveau du déphasage entre les deux points interconnectés. Pour qu'il n y ait pas de chute de tension dans ces lignes.

Concernant la fréquence, son réglage est beaucoup plus délicat car celle-ci varie avec la variation de la puissance et, la plage de variation de la fréquence d'un réseau est réduite. Elle ne dépasse pas $\pm 0.1\ Hz$

On à :

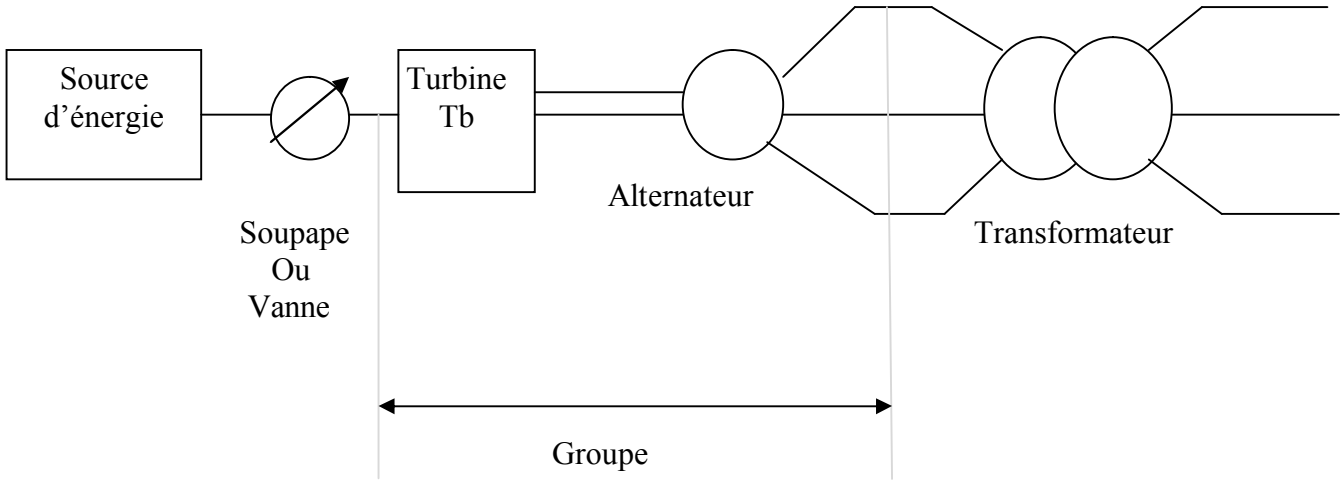



*Figure (I-22) : Groupe de production électrique.*

On appelle :

P(Tb) : la puissance produite par la turbine.

P (alt) : la puissance débitée par l'alternateur.

N : la vitesse de rotation de l'arbre qui relier la turbine à l'alternateur.

f : la fréquence du réseau.

On sait que :

P(Tb) dépend de l'ouverture et la fermeture de la vanne ou bien de la soupape.

P (alt) dépend de la demande énergétique des consommateurs.

Si : P (Tb) = P (alt.) ⇒ la vitesse N = Constante ⇒ f = Constante (alors on dit que le réseau est stable)

On rappelle que :

$$N = \frac{60\,f}{p} \Longrightarrow N = k\,f$$

Avec k = constante

On a vue précédemment que :

P (alt) est tantôt grande et tantôt petite (fluctuation de la puissance) de même :

- Si P(alt) > P(Tb ) : la vitesse du groupe commence à diminuer d'où la nécessite de l'ouverture de la vanne ou de la soupape.
- Si P(alt) < $P_{(Tb)}$ : la vitesse du groupe commence a augmenter, d'où la nécessité de la fermeture de la vanne ou de la soupape .mais si l'écart devient plus grand le groupe risque de s'emballer, a noter que le réglage de l'ouverture de la vanne ou de la soupape s'effectue par des régulateurs.

D'où on déduit que le réglage de la fréquence d'un réseau interconnecté nécessite le réglage des alternateurs au même temps et simultanément a cause de la dépendance les un des autres.

**I-7- 2- b) Condition lors d'une panne :**

Une panne majeure sur un réseau interconnecte crée un état d'urgence, et on doit réagir aussitôt afin que la perturbation n'atteigne pas d'autre réseaux, la perte d'une grosse charge ; la perte d'une génératrice ou l'ouverture inattendue d'une ligne d'interconnexion constituent les pannes majeures. Lorsqu'on perd une charge importante, la vitesse des turbines augmente et, la fréquence croit partout sur le réseau ,de même façon, lorsqu'on perd une génératrice, la vitesse des turbines et ainsi, la fréquence des réseaux diminue très vite dans ces cas la ,il faut impérativement ramener le réseau a sa fréquence nominale . Et pour cela des relais sont installés au niveau des lignes qui détectent ces variations et font ouvrir la ligne en défaut pour l'isoler du réseau par l'intermédiaire des disjoncteurs.

## I- 8) Transports de l'énergie électrique par câble :

Le transport de l'énergie par câble peut être utilisé pour les applications suivantes :

- ✓ Liaisons sous- marines
- ✓ Liaisons souterraines

Parfois l'utilisation des câbles souterrains s'impose pour diminuer l'impact des installations électro-énergétiques sur l'environnement comme par exemple dans le réseau de distribution urbaine.

Mais l'utilisation des câbles en alternatif reste très limitée, et on a recours à cette utilisation sauf dans les cas majeurs a cause du cout de ces installations qui est très onéreux, ajoutant a cela les contraintes techniques qui sont :

- Les pertes électriques dans les câbles en courant alternatif sont trop importantes à cause de l'effet de peau.
- Le transfert de l'énergie réactive dans les câbles en courant alternatif est trop important, ce qui nécessite l'installation des stations intermédiaires de compensation, et de la découle une distance critique qui est de 30 à 40 km à ne pas dépasser car au-delà de cette distance sans station de compensation on ne transporte aucune puissance active.

## I-8- 1) Constitution de principe des câbles souterrains :

Il existe deux types de câbles souterrains :

### I- 8- 1- a) Câble unipolaire :

Il se compose des constituants suivants :

- Un conducteur : généralement en cuivre ou parfois en aluminium, ce sont des fils multiples convenablement torsadés en faisceaux.
- Couche d'isolant : elle est constituée de papier imprégné d'huile, elle entoure le conducteur.
- Une gaine de plomb : elle constitue autour du conducteur isolé, une protection contre l'humidité elle est parfaitement hermétique.
- Une armure : elle sert de protection contre les chocs mécaniques.

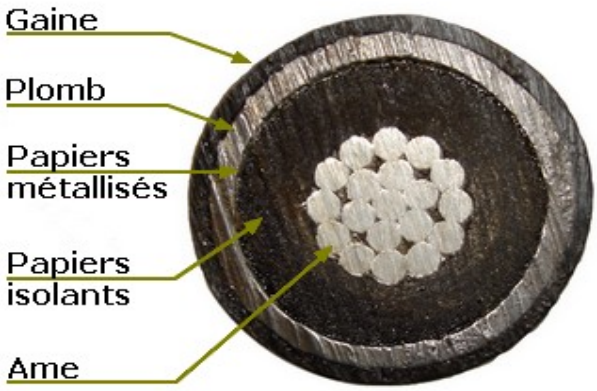



*Figure (I-23) : câble unipolaire*

**I-8- 1- b) Câble multipolaire :**

Ils comprennent trois ou quatre conducteur, isolée groupés sous une même gaine, qui est à son tour recouverte de plusieurs couches de protection [5].

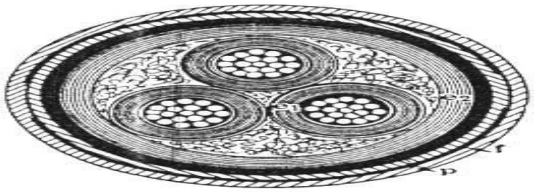


*Figure (I-24) : câble multipolaire*

## I- 8- 2) Utilisation des câbles souterrains pour la haute tension modérée :

Les câbles sont différents les un des autres, cette différence est due aux difficultés posé par le phénomène diélectrique, de ce fait on parle des câbles de tension assez modérée qui ne dépasse pas les 10 à 15 KV, ces câbles sont caractérisés par une section assez grande, et l'épaisseur d'isolant relativement faible.[5]

Ce qui nous permet de donner aux conducteurs une forme sectorale qui exploite une grande surface de la section totale.

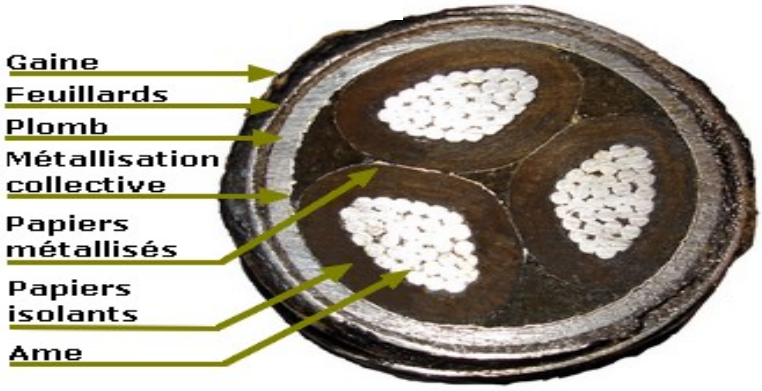



*Figure (I-25) : câble à conducteur de forme sectorale*

Lorsque les tensions dépassent les 15 KV, des mesures spéciales permettent aux câbles de résister aux contraintes diélectriques qui deviennent de plus en plus forte.

On peut citer par exemple, le non utilisation de la forme sectorale à cause des champs qui devient de plus en plus forts .

La disposition autour de l'isolant d'une couche de papier métallisée en contact électrique avec la gaine de plomb, donc au potentiel du sol, on transforme ainsi les champs qui étaient assez complexes de l'ensemble des trois conducteurs triphasés en trois champs radiaux distincts.

Ce qui fait pour les tentions de 20 à 50 KV on a le choix entre câble unipolaire et câble tripolaire.

Alors que pour les tensions supérieures à 50 KV et inferieur à 70 KV, on a recourt à l'utilisation du câble unipolaire (trois câble unipolaire pour les systèmes triphasé). La protection mécanique des câbles est réalisée par leur disposition dans des caniveaux en béton recouvert d'une dalle.

## I- 8- 3) Câbles spéciaux pour la très haute tension :

L'une des contraintes majeures dans le transport de l'énergie électrique par câble, c'est l'échauffement de celui-ci.

L'échauffement du câble, produit surtout par effet joule dans le conducteurs est variable avec la charge, lorsqu'elle fluctue, il se produit donc, dans le métal des dilatations et des contractions qui seront transmises par l'isolation a la gaine de plomb. mais celle-ci , ne suit pas facilement ces contractions et ces dilatations .D'ou il s'ensuit la possibilité de décollement des couches de papier isolant ce qu'on appelle les vacuoles dans la couche d'isolation et celle-ci seront occupés par la vapeur d'huile ayant une constante diélectrique de ( $\varepsilon_r = 1$) alors que celle du papier imprégné est de ($\varepsilon_r = 4$) ce qui a pour conséquence une distribution du potentiel créant un champ qui sera 4 fois plus intense que celui de l'isolant. D'ou la réduction a la longue des propriétés diélectriques .[5]

Donc pour les tensions de service assez grandes on adopte des procèdes qui sont :

**I-8- 3- a) Câble a huile fluide:**

Ces câbles sont réalises en laissant plusieurs espace libre qui seront remplis d'huile.

Ils consisteront des canaux longitudinaux que l'on met en communication avec des réservoirs d'expansion, prévus de distance en distance.

Concernant les câbles unipolaires, le canal d'huile se trouve au centre du conducteur.

On note que lors d'une dilatation du conducteur , l'isolant ne subit que de très faible majoration de pression , parce que l'huile d'imprégnation ne peut dépasser une pression minimum réglable par les réservoirs d'expansion , il se produit un mouvement de l'huile du câble vers ces réservoirs , tandis que lors de la contraction du conducteur il y aura un reflux d'huile des réservoirs vers le câble .

Ce procède donne d'excellent résultat car on arrive à des tensions de service de 220 K.V [5]

***Exemple :***

La ligne souterraine de tension 220 K.V reliant les postes de transformation de Clichy et Saint Denis (PARIS) en France ; cette ligne transporte une puissance de 160 MW avec une intensité de courant de 440 A. Sa longueur est de 18 Km, subdivisée en 12 sections Munis de réservoirs appropriés. Les trois câbles sont réunis dans un même caniveau. [5]

### I-8- 3- b) Câble sous pression :

Ce sont des câbles déposés dans un tube d'acier ou l'on introduit un gaz inerte généralement de l'Azote sous une pression de 15 atmosphère (atm), ceci procure trois grands avantages :

- La pression a pour but de réduire la dilatation de câble pour un accroissement donné de température du conducteur, et d'autre part elle oblige la gaine de plomb à suivre les mouvements des conducteurs.
- La rigidité diélectrique de l'isolant est accrue par l'effet de pression.
- A la suite d'un meilleur refroidissement de sa surface extérieure en contact avec le gaz sous pression, la capacité de courant est accrue.

Le transport de l'énergie électrique par câble présente d'énorme inconvénient. Ce qui fait le coût très élevé de ces installations, mais à noter que d'énorme progrès ont été réalisés dans ce domaine a titre d'exemple ou peut citer :

- Perfectionnement apporté à la technique d'isolation qui permet d'améliorer le gradient Moyen dans l'isolant ,il était de 3 à 4KV/mm,ilest devenu actuellemen de 10 à 11KV/mm.[5]
- L'existence des liaisons souterraines ou sous marines pouvant transportés jusqu'à 360 MW avec des câbles qui peuvent supporter une intensité de 550 A. [5]

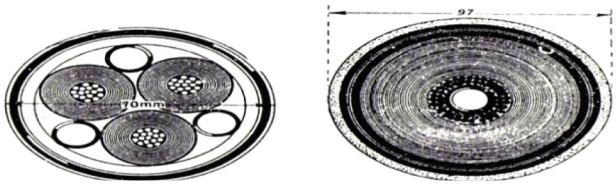


*Figure (I-26) : câble utilisé pour la haute tension.*

## I- 8- 4) L'effet de capacité dus aux câbles souterrains :

Les câbles souterrains présentent une capacité relativement importante, qui provoque dans les réseaux à courant alternatif certains effets spéciaux d'où la limite de l'utilisation de se mode de transport. On peut citer :

**a-** Le courant de charge de cette capacité entraine un effet joule important, ce qui fait un grand échauffement du câble d'où perte importante, ce qui fait, une réduction du rendement du transport.

Le courant de charge est donné par

$$I = \frac{U}{\sqrt{3}} \text{ Cw}$$

**b -** L'effet magnétisant de ce courant peut causer un auto-amorçage des alternateurs des centrales de productions, dont la régulation devient très difficile.

**c -** Le renforcement de certains harmoniques par les capacités des câbles provoquent des Résonnances avec certaines inductances du réseau.

## I-9) conclusion :

Le transport de l'énergie électrique en courant alternatif, soit par lignes aériennes ou câbles souterrains ou sous-marins présente des limites, ce qui fait, il y'a toujours des contraintes à surpasser.

Les progrès technologiques dans ce domaine ont permis de surmonter beaucoup d'entre elle, mais malheureusement pas toute à cause de l'aspect économique qui entre en jeu.

De la, le transport de l'énergie électrique en alternatif trouve son application dans beaucoup de domaines sauf dans certaine cas ou il cède la place a l'application du courant continu.

# Chapitre II

## II- 1) Introductions :

La maitrise des transferts d'énergie en courant alternatif, dans les réseaux denses pose des problèmes de plus en plus ardus à résoudre parmi les quels on peut citer :

- La répartition des transits d'énergie dans divers branches, des réseaux maillés se fait suivant des lois physiques et non économiques.
- La consommation de la puissance réactive doit être compensée à fin de limiter les pertes et les chutes de tension.
- Le réglage de la fréquence et de la tension à fin d'avoir un réseau interconnecté qui doivent être coordonnés.
- La limite de la puissance maximale transportable par une ligne qu'il ne faut pas dépasser, à fin d'avoir la tension souhaitée aux bornes de la charge.
- L'installation des dispositifs énormes et très couteux, de protection du réseau contre les surtensions (foudre, l'effet Ferranti) courant de court-circuit (défauts symétriques et asymétriques).
- Les pertes par effet couronne et effet de peau.
- Souvent éloignement des sites de production, des lieux de consommation oblige les compagnies d'électricité à élaborer des lignes de transport d'une longueur considérable, ajoutant à cela le problème d'expropriation des terrains. (Droit de passage) à fin d'acheminer cette énergies électriques.

Par ailleurs le développement des puissants convertisseurs à haute tension à rendu possible le transport de l'énergie électrique en courant continu, qui à trouver ces domaines d'application dans les cas ou l'alternatif est freiné par des contraintes techniques ou bien économiques pour les compagnies d'électricités.

## II- 2) Aperçus historiques :

Le transport en courant continu à trouver ces premières application en 1906, en France par Réne Thury qui à voulu transporter une puissance de 20 MW sur une distance d'environ 300Km, cette puissance est produite par des génératrices à courant continu mise en série. Mais l'invention du transformateur (fin du 19$^{éme}$ siècle) à permit au courant alternatif de prendre le dessus dans diverses applications. [9]

Ensuite les études se portent sur la conversion du courant alternatif en courant continu et inversement.

La première application à été réalisé en 1935 par General Electric à l'aide des mutateurs à vapeur de mercure.

Quatre ans plu tard en 1939, une série de recherche est entreprise en Suisse par BROWN BOVERI et une première réalisation voie le jour. Qui est une ligne de transport en courant continu sous une tension de 20 KV, et de distance de 20 Km entre Wettingen et Zurich. Une autre réalisation du même genre en 1954 .Le redresseur et l'onduleur sont équipés de valve à vapeur de mercure, faite par la société suédoise ASEA avec une ligne unipolaire (un seul câble) avec le retour du courant par la mer, sous une tension de 100 KV et transportant une puissance de 20 MW. Sur ces même bases et principes, beaucoup d'autre installation ont été réalisé notamment en 1961 la liaison d'interconnexion bipolaire de 160 MW sous une tension de $\pm$ 100 KV entre la France et l'Angleterre.

L'invention en 1965 dans les laboratoires de général Electric du semi-conducteur au (silicium) thyristor qui est un interrupteur dont l'allumage est commandable, à permis d'accentué fortement la croissance des liaisons a courant continu, et la première application vient très vite, avec la réalisation de la société Suédoise ASEA en 1970 de la première valve tout thyristor à haute tension sur la liaison de Gotland.

Ensuite en 1972 une première station de conversion dos à dos voie le jour à Eel River au canada. Ajoutant à ce la, liaison entre la France et l'Angleterre qui permet un échange de puissance de 2000 MW réalisée en 1986.

Pour conclure c'est avec le développement des équipements de puissance que le transport d'énergies électrique en CCHT a pris des sauts progressifs ce qui lui à permis de trouver des domaines d'application de plus en plus importantes.

## II- 3) Domaine d'application du transport en courant continu :

Une liaison à courant continu est composée essentiellement de deux stations de conversion a son extrémité, reliées par des lignes aériennes ou câble souterraines ou bien sous-marins.

La liaison est dite bipolaire lorsqu'elle est constituée de deux ligne dont une est porté a (+ $V_d$) et l'autre a (-$V_d$), et unipolaire lorsqu'elle est constituée d'une seule ligne portée à $V_d$ et le retour du courant se fait par le sol ou la mer (figure II-2)

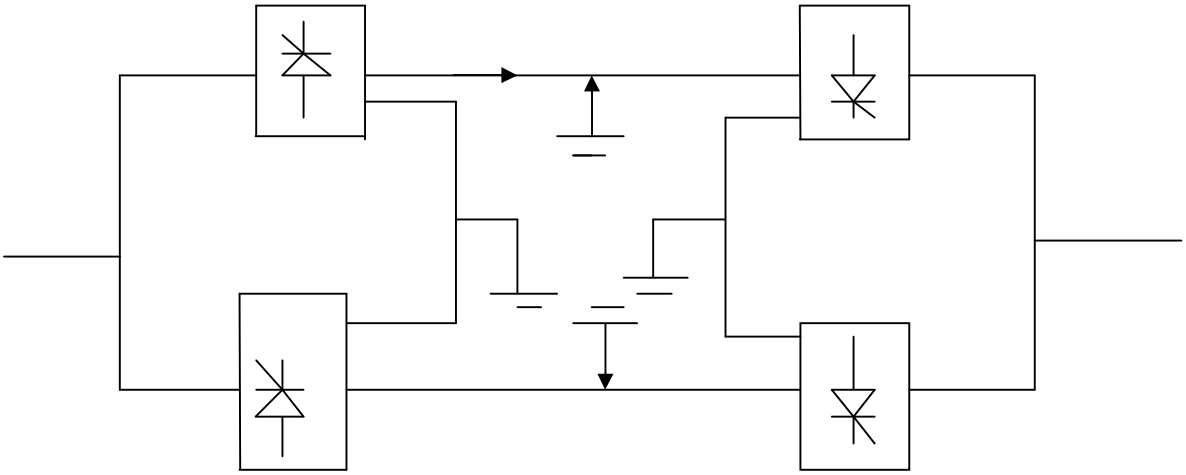


*Figure (II-1) : ligne de transport d'énergie électrique bipolaire.[1]*

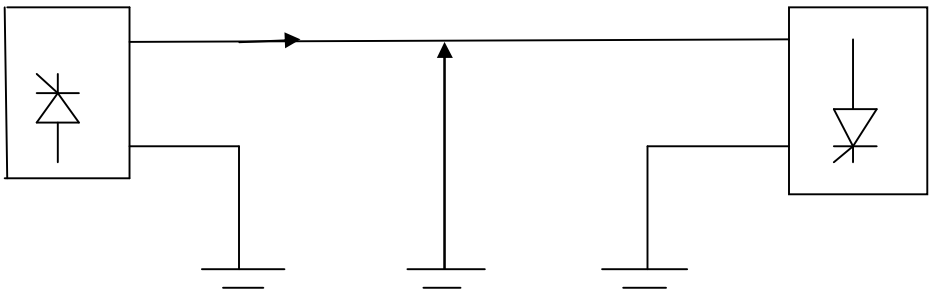


*Figure (II-2) : ligne de transport d'énergie électrique unipolaire.*[1]

Le transport de l'énergie électrique en courant continu soit par ces lignes bipolaire ou unipolaire à trouvé plusieurs domaines d'application en voici quelques- uns :

### II -3-1) Liaison longue souterraine ou sous marine :

Le transport par câble souterrain devient une nécessite des qu'il s'agit de traverser une zone fortement urbanisée, ou bien une zone dans laquelle l'opinion publique s'oppose à toute nouvelle construction de ligne aérienne, ainsi que par câble sous-marins pour alimenter une ile ou interconnecter deux réseaux séparés par un bras de mer.

On a vu précédemment, les aléas posés par le transport en alternatif de l'énergie électrique soit par câble souterrains ou câble sous- marin d'où on à recours au courant continu dé que la longueur de ces liaisons dépasse 40 Km, car celui-ci devient très compétitif, et le cout des deux stations de conversion est compensé. On trouve plusieurs application en voici quelques exemples :

- Liaison sous-terraine constituée d'un câble, avec retour par la mer entre la suède et l'ile de Gotland de longueur de 56 Km sous une tension $V_d$ = 100 KV, transportant une puissance de (20MW)
- Une ligne unipolaire à courant continu avec retour de courant par la mer qui relie la Sardaigne à l'Italie le tout transportant une puissance de 200 MW.
- La liaison d'interconnexion souterraine qui relie la France et l'Angleterre.

## II -3-2) Lignes aériennes de grande longueur :

L'exploitation de certaine ressource énergétique naturelle (thermique, hydraulique) nécessite un transport d'énergie sur des grande distances vers les centres de consommations, lorsque la distance dépasse les (600 Km) le transport en courant continu devient compétitif. Car à partir de cette distance le cout investit dans la compensation – protection – etc……. D'une ligne à courant alternatif dépasse de beaucoup celui d'installation des deux stations de conversion d'une ligne à courant continu.

On peut trouver ces applications dans les pays dit pays continent qui ont une grande superficie comme l'Amérique, la Russie, canada, Brésil. Qui possède des lignes qui atteignent 800 Km.

Le record en la matière est détenu par la liaison Ekibastouz en Russie de 2500 Km de longueur et de puissance 6000 MW sous une tension de $\pm$ 750 KV [9].

### II- 3- 3) L'interconnexion transfrontalière :

L'interconnexion des réseaux permet l'échange énergétique entre les différents réseaux interconnectes, comme elle permet aussi le secoure mutuel, en cas de perte d'un ouvrage, ainsi que la mutualisation de la réserve primaire, tous ça représente les avantages de l'interconnexion.

Comme en la vu précédemment l'interconnexion des réseaux alternatifs présente d'énormes inconvénients (réglage de la fréquence et de la tension, circulation de l'énergie réactive entre réseaux interconnectes, l'échange incontrôlé de la puissance) qui rendent cette interconnexion de plus en plus difficile a réaliser et a maitriser.

En revanche, le recours au courant continu avec sa souplesse d'exploitation d'une interconnexion nous permet de résoudre et de surmonter beaucoup de ces problèmes posé par l'alternatif.

### II- 3- 4) L'interconnections entre réseaux asynchrones :

L'interconnexion entre deux réseaux asynchrones en alternatif ne peut se faire, qu'en passant par le courant continu. Dans certains pays cette interconnexion est faite par l'intermédiaire de petites stations de convertisseurs (CA/CC/CA) dite dos-à-dos qui ont des longueurs très petites (quelque mettre parfois) qui servent à interconnecter deux réseaux asynchrones (l'un à 50 Hz et l'autre à 60 Hz).

Exemple

Au Japon (Sakuma et Shinano) [8].

Au Brésil (Itaipu et Troll A) [8].

### II- 3-5) Augmentation de la capacité de transit :

La conversion de ligne de transport existant en liaison à courant continu permet d'augmenter fortement la capacité de transite.

Cela pourrait constituer dans l'avenir face aux pressions visant à préserver l'environnement, une solution, quand il faut nécessairement augmenter la capacité d'un couloir de ligne dans une région donnée.

## II – 4) Conception de station de conversion :

### II - 4-1) Schéma général d'une station de conversion :

Le principe de la conversion alternatif – continu est le suivent

L'énergie sous forme de tension et de courant alternatif a fréquence industrielle fournie par le réseau est convertie dans les unités de conversion en énergie sous fourme de tension et de courant redressé, ce processus s'effectue avec un rendement très proche de l'unité aux prix toutefois de la génération de deux sous produits gênants.

- La puissance réactive absorbée par les unités de conversion due à la variation de la puissance active transportée par la ligne doit être compensée sur place.
- Les harmoniques qui doivent être filtré pour ne pas pénétrer dans le réseau alternatif.
- Le courant redressé n'est pas parfaitement lissé, pour réduire les ondulations, on installe, dessbobines d'inductance dans le circuit continu pour obtenir un lissage du courant redressé.

La (figure II-3) représente le schéma d'une station de conversion, elle comporte un poste à courant alternatif tout à fait conventionnel dont la fonction est de raccorder les unités de conversion au réseau alternatif.

Le poste est organisé en jeux de barre, en travées ou cellules, de façon à pouvoir effectuer différentes combinaisons de connexion entre les lignes et les unités de conversion.

Les filtres d'harmoniques, les bancs de compensation de la puissance réactive et les unités de conversion sont raccordés au même jeu de barre. Des réducteurs de mesure (transformateurs de courant ou réducteurs de tension) délivrent des signaux nécessaires au comptage de l'énergie aux protections et aux dispositifs de contrôle commande.

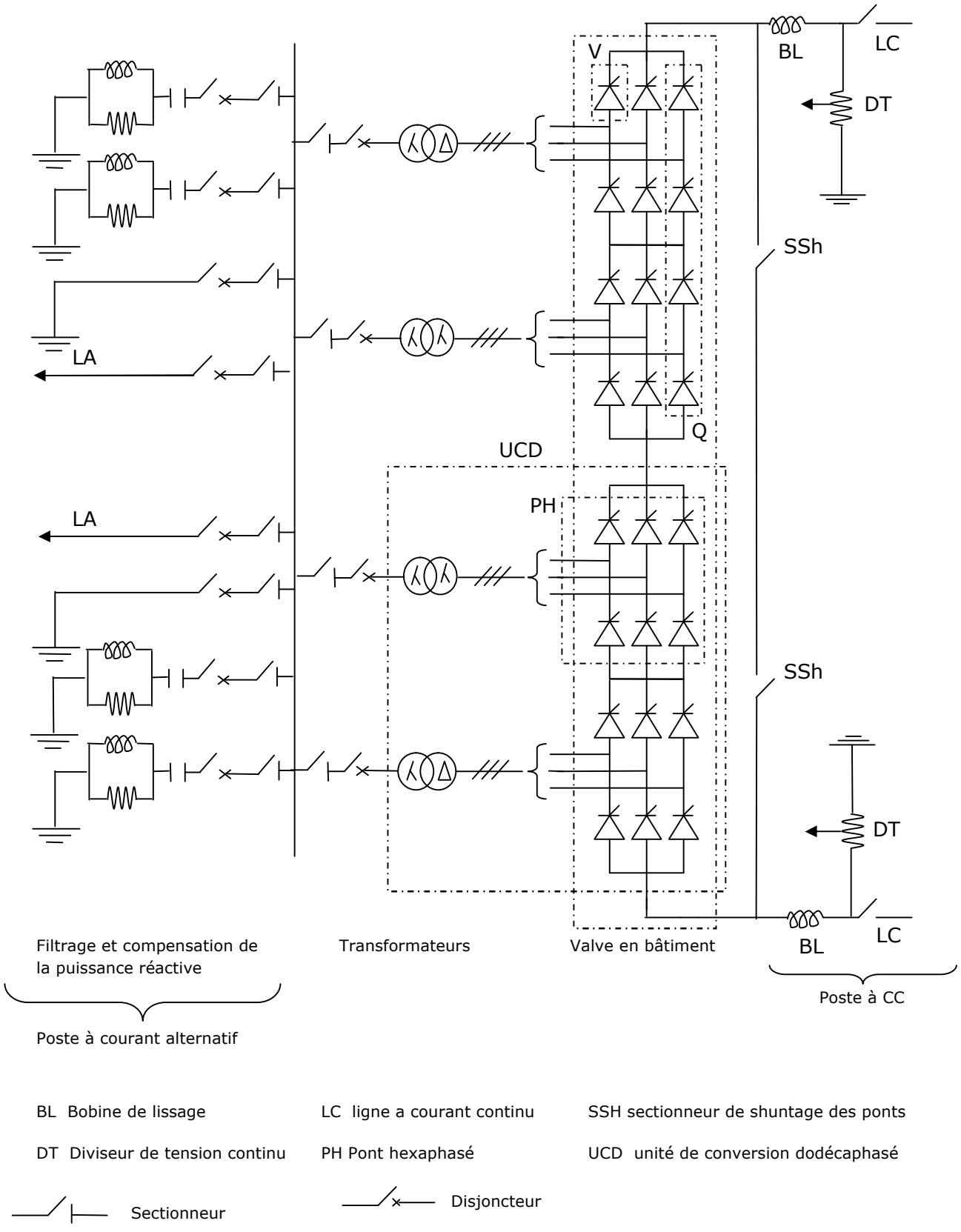



Figure (II-3) : Schéma général d'une station de conversion à thyristors [8]

## II- 4- 2) Différents types de liaisons à courant continu :

### II- 4- 2- a) Liaison à $\pm V_d$ à point milieu mis à la terre :

Ce sont des liaisons utilisées dans le transport d'énergies électriques par câbles sous marins pour les quelles le retour par la mer n'est pas possible, c'est le cas de la liaison, qui existe entre la France et l'Angleterre, cette liaison transporte une puissance de 500 MW sous une tension de $\pm$ 270 KV, elle est schématisée dans la figure suivante.

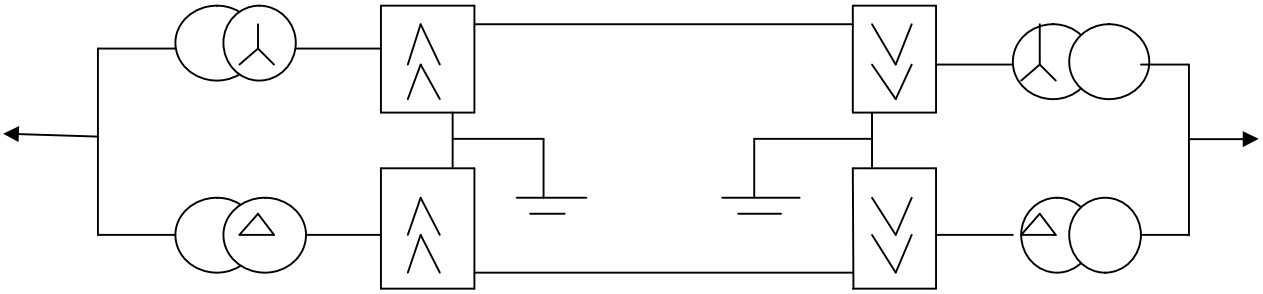


*Figure (II-4) liaison $\pm V_d$ à point milieu mis a la terre [1].*

### II- 4 - 2- b) Liaison à $+ V_d$ avec retour par le sol ou la mer :

Ce type de liaison utilise des lignes unipolaires, et le retour du courant se fait par le sol ou par la mer, elles ont l'avantage d'être très économiques, ce type de liaison existe en Italie elle relie la Sardaigne à l'Italie, elle fonctionne sous une tension de 200 KV, elle est schématisée dans la figure suivante.

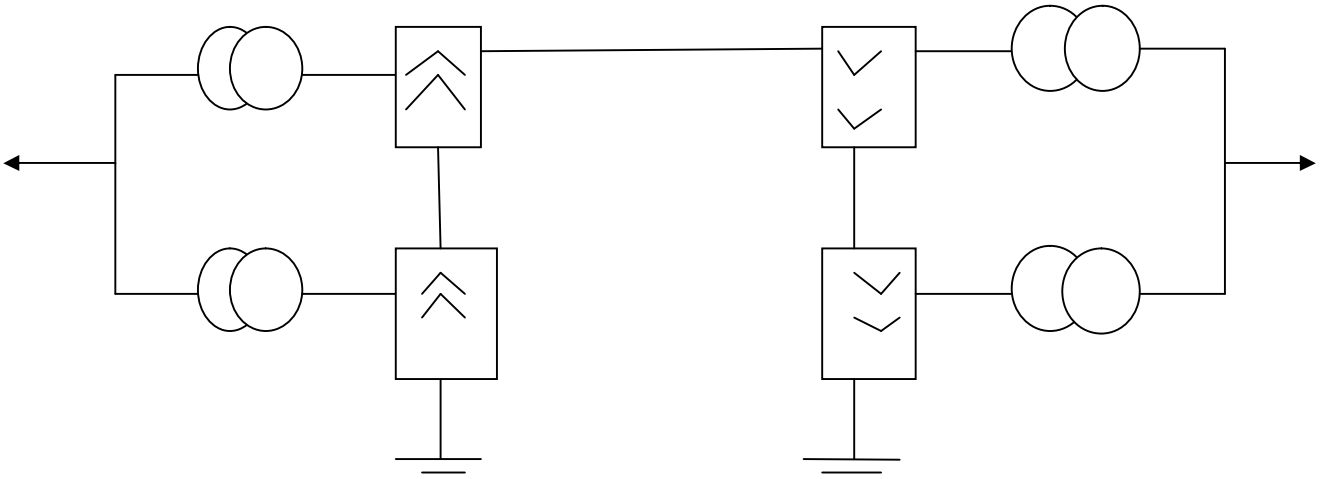


*Figure (II-5) liaison $+V_d$ avec retour par le sol (ou la mer)* [1].

### II- 4- 2- c) Liaison a $\pm V_d$ avec possibilité de marche unipolaire :

Dans ce type de liaison les électrodes sont éloignée des stations terminales afin de constituer un chemin préférentiel, pour le retour du courant par le sol ou la mer dans le cas ou à la suite d'un problème, la ligne nécessite de fonctionner en marche unipolaire.

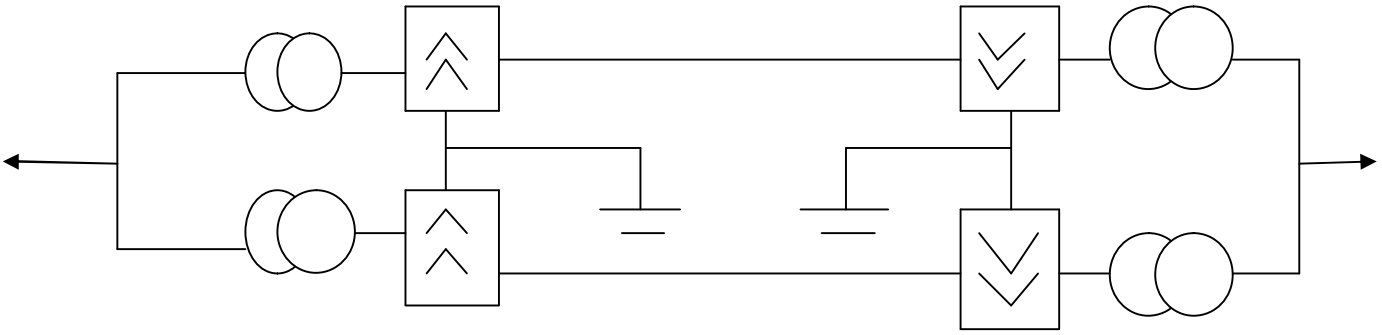


*Figure (II- 6) liaison $\pm V_d$ avec possibilité de marche unipolaire* [1].

### II- 4- 2- d) Liaison $\pm V_d$ avec conducteur de neutre pour la marche unipolaire :

Ce type de liaison est prévue lorsque l'on souhaite avoir une ligne à haute fiabilité, car la présence du neutre permet d'exploiter la ligne en marche unipolaire avec une puissance égale a la moitie de la puissance maximale.

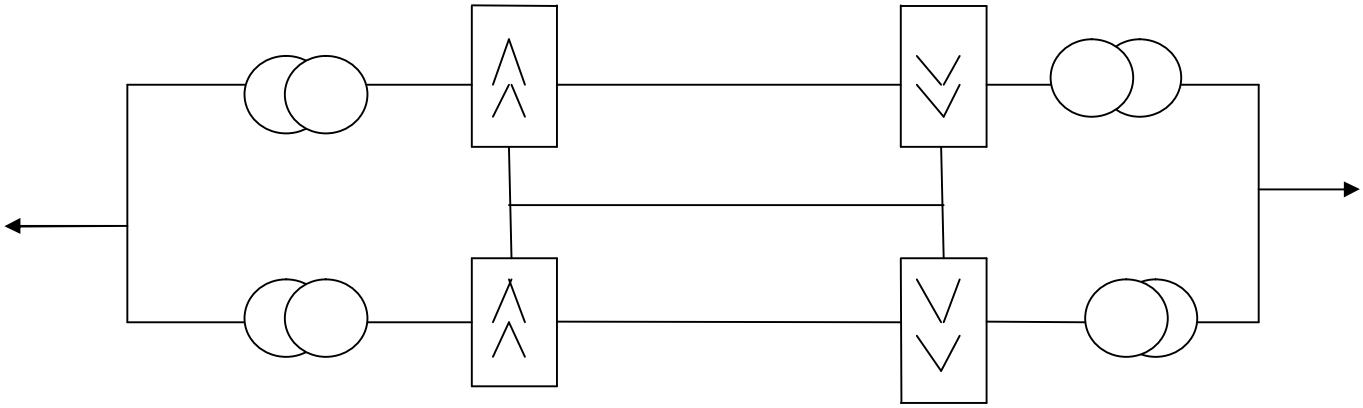


*Figure (II-7) liaison $\pm V_d$ avec conducteur neutre pour la marche unipolaire.*[1]

**II – 4 - 2- e) Liaison à $+V_1$ ; $-V_2$ :**

Cette liaison est souvent employée pour des tensions très élevées. la tension $V_2$ de polarité négative est la plus élevée, en effet les contraintes diélectriques sont plus facile à tenir lorsque la tension est en polarité négative. [1]

On trouve ce type de liaison à NELSON RIVER au canada.

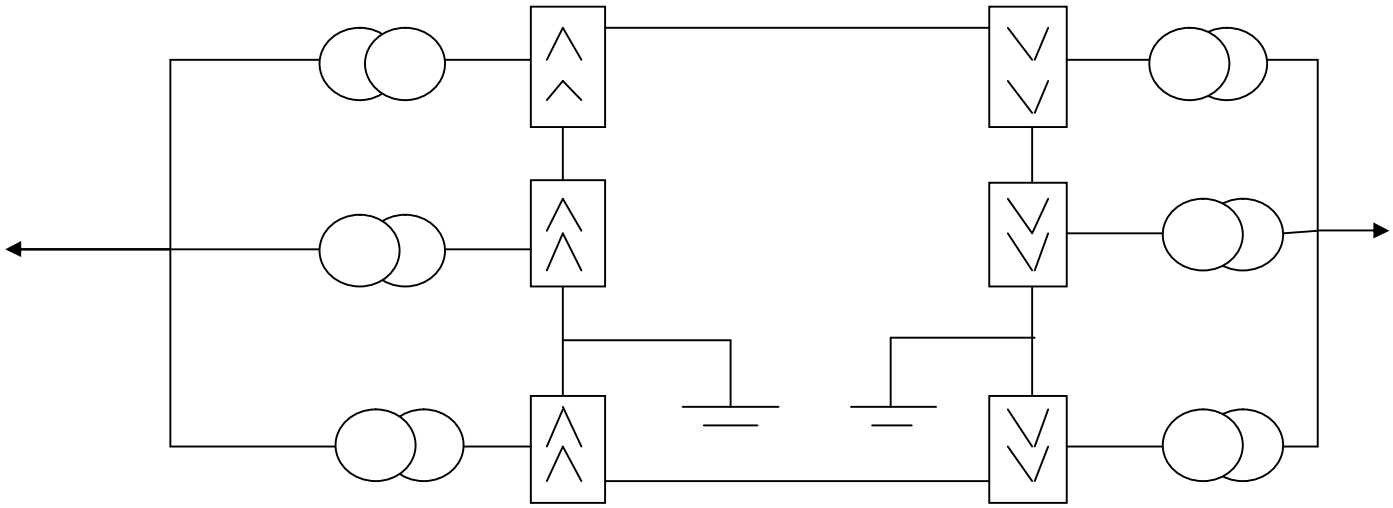


*Figure (II-8) liaison $+V_1, -V_2$.* [1]

**II – 4 - 2 - f) Liaison « dos à dos » entre deux réseaux alternatifs :**

Dans ce type d'installations il n'y a pas de ligne, mais simplement un câble de liaison de quelque dizaine de mètres, cette installation est destinée à résoudre des problèmes de liaison entre des réseaux dont les caractéristiques sont différentes, qui ne permettent pas un raccordement direct. C'est le cas des réseaux à fréquences différentes entre deux pays ou un même pays comme c'est le cas au Japon à Sakuma ou la station du genre transite une puissance de 300 MW sous une tension $\pm 125$ KV. [1]

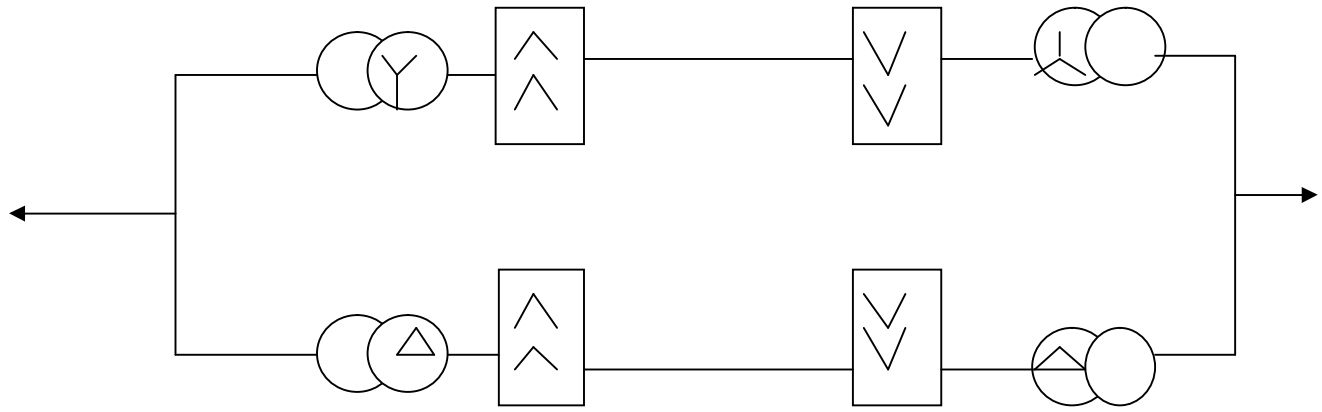


*Figure (II-9) liaison « dos à dos » entre deux réseaux alternatifs*.[1]

## II – 4 - 3) Composante d'une ligne de transport à courant continu :

Un système de transport à courant continu comprend plusieurs composants additionnés et qui assurent son bon fonctionnement.

La figure (II- 10) montre l'appareillage nécessaire pour le système de transport à courant continu dont le rôle de chacun est expliqué ci-dessous :

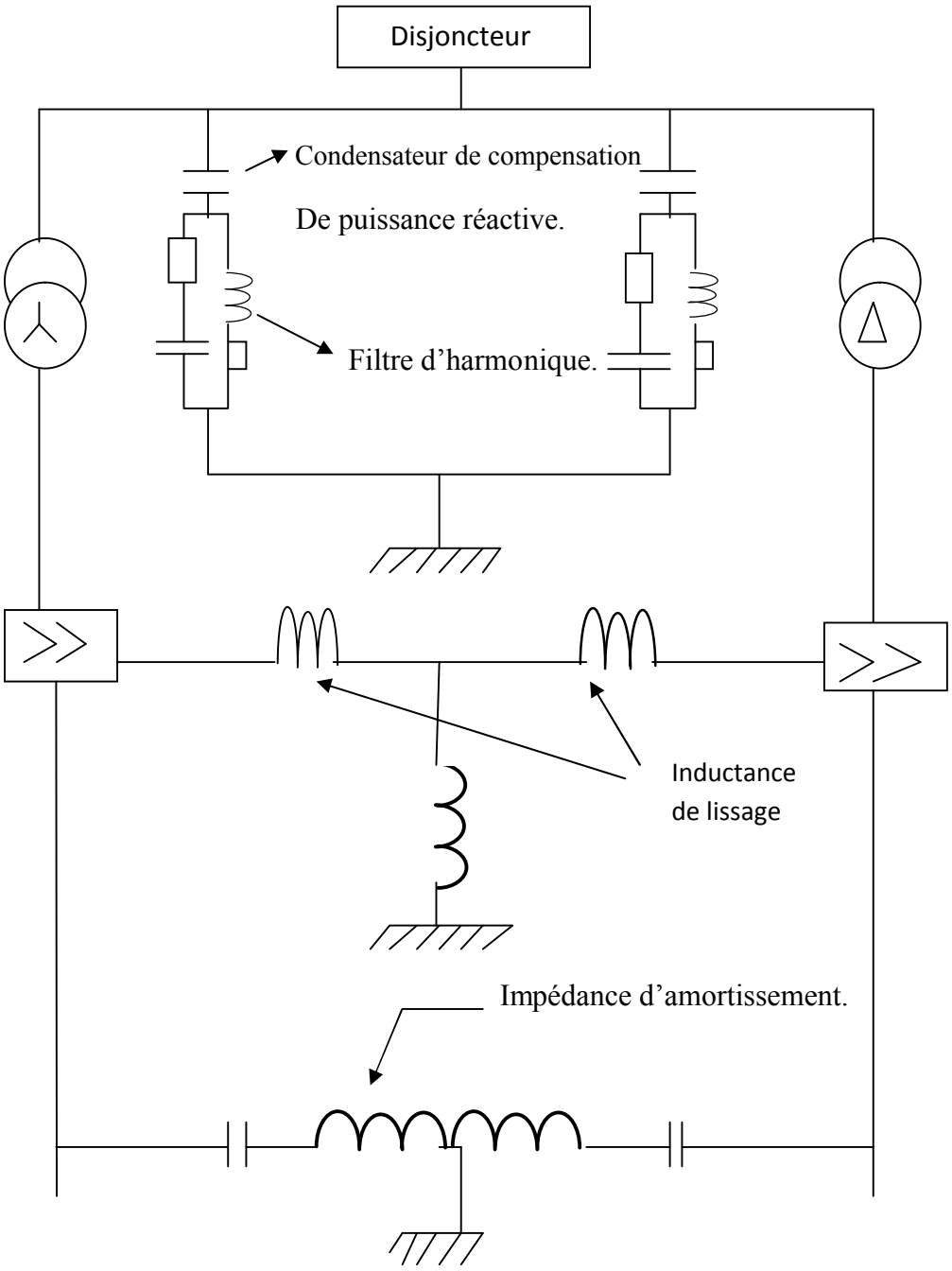



*Figure (II-10) : l'appareillage nécessaire pour un système de transport à CC.* [1]

a) Inductance de lissage et filtre du cote CC :

L'inductance de lissage dont le rôle est de lisser le courant continu et de diminuer les variations trop rapides du courant en cas de court circuit, Les filtres servent à court-circuiter les harmoniques de tension qui constituent une pollution pour la ligne.

b) Transformateurs :

Le rôle de ces transformateurs c'est d'abaisser ou d'élever la tension, requise pour le redresseur, ils sont dotés d'un enroulement tertiaire pour raccorder la source de la puissance réactive. Ils assurent aussi le découplage galvanique entre les réseaux à courant alternatif et à courant continu.

c) Source de puissance réactive :

Elle est constituée soit de batterie de condensateur statique ou bien de compensateur synchrone leurs rôle est de compenser ou fournir aux convertisseurs la puissance réactive absorbée par celui-ci, en effet la déformation due aux commutations et au retard d'allumage entraine, un déphasage du courant en arrière par rapport a la tension ce qui cause une absorption de puissance réactive de l'ordre de la moitie de la puissance active transmise.

d) Filtre harmonique cote CA :

La forme d'onde du courant est une source d'harmonique qui se propage dans le réseau alternatif et qui cause beaucoup d'effet indésirable comme les pertes dans les machines qui sont la source d'échauffement parasites.

Pour empêcher ces courants de pénétrer dans le réseau on installe des filtres qui servent aussi comme source d'énergie réactive.

e) Electrode de mise à la terre :

L'électrode de mise à terre mérite une grande attention car la présence d'un courant continu circulant dans la terre produit de la corrosion pour cette raison l'électrode est toujours placé à quelque kilomètres du poste de conversion, le conducteur de mise à la terre est, soit un câble blindé, soit une ligne aérienne supportée par des poteaux. On apporte un soin particulier à la construction de l'électrode à fin de réduire la résistance de mise à la terre.

f) Liaison de communication :

Afin de commander les convertisseurs situés aux deux extrémités de la ligne, on prévoit une liaison par télécommunication très fiable, et la transmission d'information se fait par fibre optique.

g) Unité de conversion :

Le constituant élémentaire d'une station de conversion, est l'unité de conversion hexaphasé ou dodécaphasé, constituée d'un point de Graetz pour la première et de deux ponts pour la deuxième, les unités de conversion hexaphasé ont été utilisée du temps des valves à vapeur de mercure. Depuis l'avènement du thyristor on leur préfère les unités dodécaphasés.

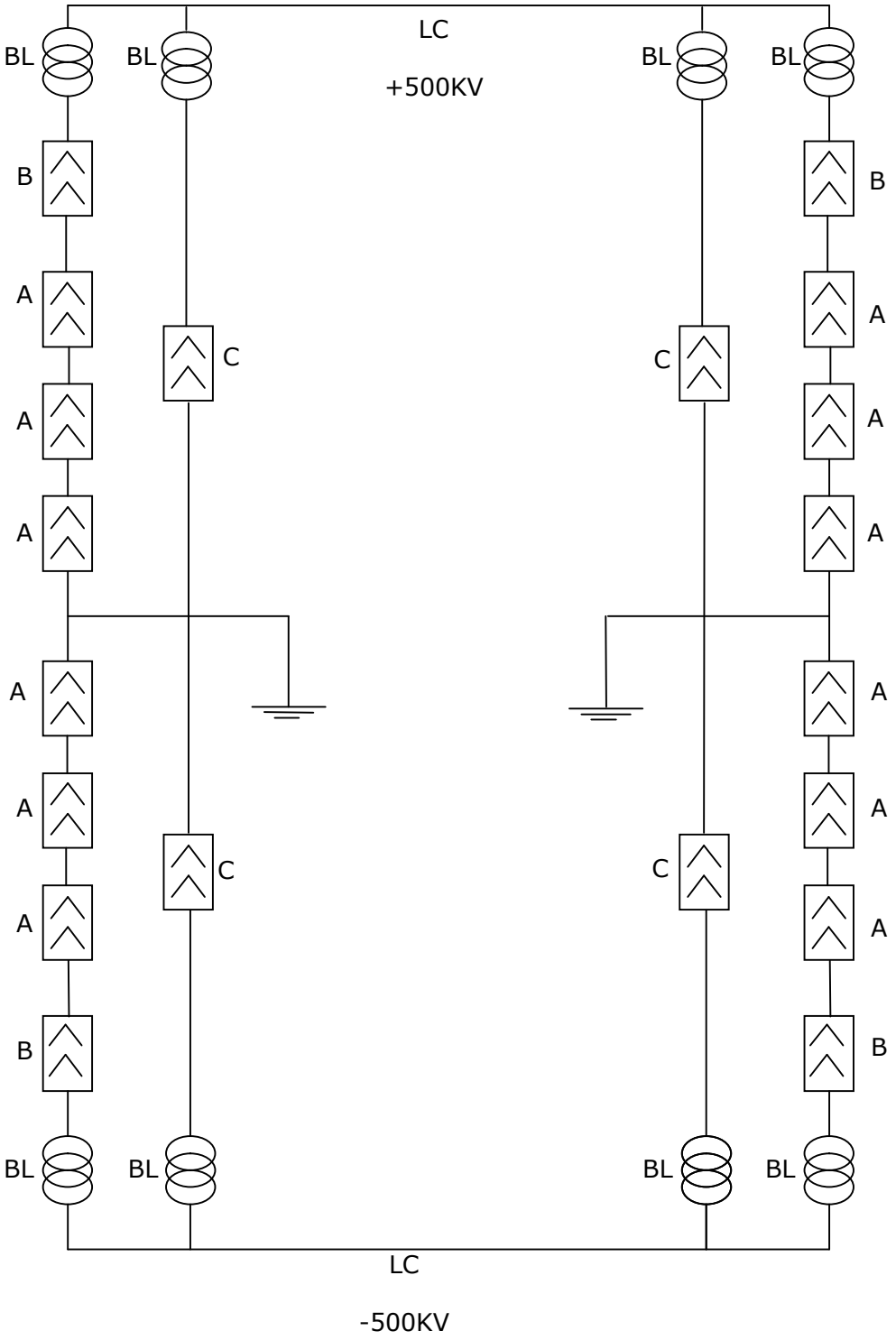
## II -4 -4) Association d'unités de conversion :

On adopte souvent un schéma de station en associant plusieurs unités de conversion pour les raisons suivantes :

- Deux unités de part et d'autre d'un point mis à la terre permettent de transporter de l'énergie sous deux tension continue symétrique par rapport au potentiel nul et un même courant cette association est appelée un dipôle.

- Une conception en plusieurs unités permet de faire fonctionner la liaison (a puissance réduite) malgré la défaillance d'un élément, même si elle n'évite pas certaine défaillance communes à toutes les unités.

- Une conception en plusieurs unités permet une construction de la liaison par étape successive et ainsi d'étaler dans le temps l'investissement en fonction du besoin croissant.




A : unité de conversion hexaphasé de 133KV et 2000 A installé en 1970 (valve à vapeur de mercure).

B : unité de conversion de 100KV et 2000 A installé en1985 (valve à thyristors)

C : unité de conversion dodécaphasé de 500KV et 1100A installé en 1989(valve tout thyristors).

BL : bobine de lissage de courant

CL : ligne aérienne à courant continu

Figure (II-11) : association d'unité de conversion : schéma unifilaire de la liaison Pacific Inertie (Etat Unis)

## II- 4- 4- a) mise en série :

Une liaison bipolaire constitue un exemple de mise en série d'unités de conversion dans lequel les points de connexion du circuit entre deux unités consécutives, sont mis à la terre aux deux extrémités (voir la figure)

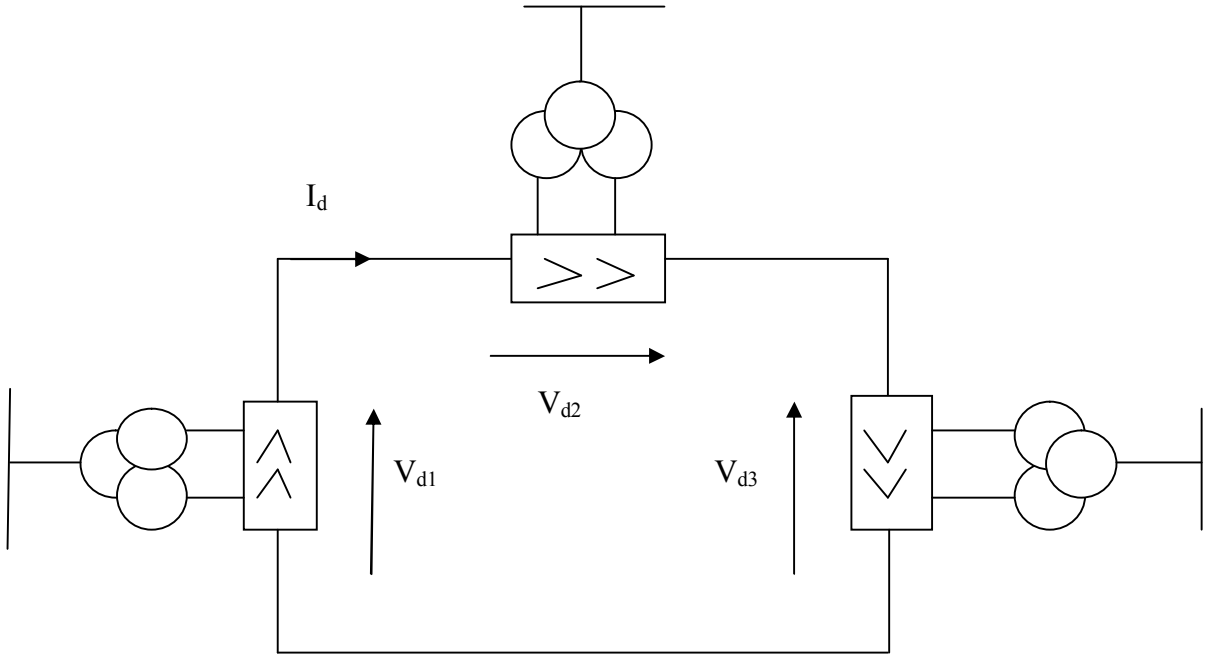



*Figure (I-12) : liaison a courant continu multiterminale schéma série* .[1]

(Schéma générale)

## II- 4- 4- b) mise en parallèle :

La mise en parallèle d'une unité de conversion est constituée par l'extension de la ligne à courant continu (figure 13)

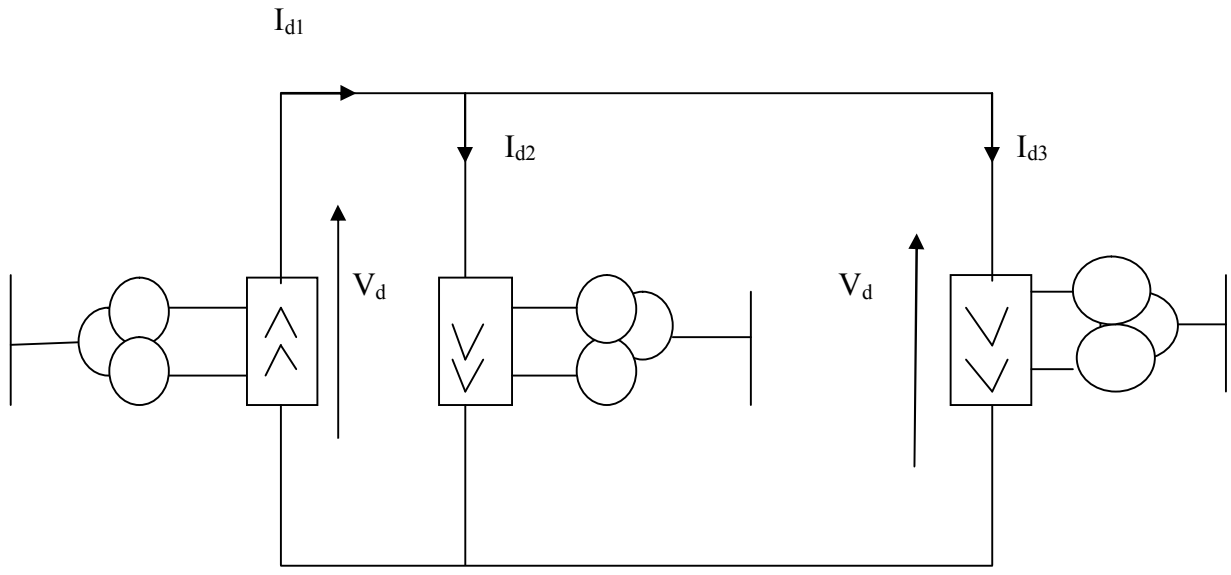



*Figure (I-13) : liaison a courant continu multiterminale schéma parallèle.*[1]

***Remarque :***

Ces deux types de liaison à courant continu sont dite liaison multiterminale, elles mettent dans la même liaison plus de deux stations de conversion.

## II-5) Fonctionnement de système de transport à courant continu :

### II- 5- 1) Le dispositif de redressement et d'ondulation :

Le pont de Graetz triphasé est le meilleur dispositif pour convertir l'énergie électrique soit de l'alternatif en continu ( par redressement ), ou bien de continu en alternatif ( par ondulation) , avec une meilleure utilisation du transformateur, ainsi le plus bas pic (sommet) de tension inverse est appliquée aux valves du convertisseur, ce pont peut être hexaphasé qui est une association en série de deux montage l'un en anode commune, et l'autre en cathode commune , qui sont alimenter par le secondaire du transformateur ,la valeur moyenne de la tension redressée fournie par le redresseur est donnée par :

$$V_d = \frac{3.\sqrt{2}}{\pi} V_c \cos\alpha \qquad \text{(II-1)}$$

avec

$V_c$ : Valeur efficace de la tension du réseau triphasé alternatif

$\alpha$ : L'angle de retard à l'amorçage

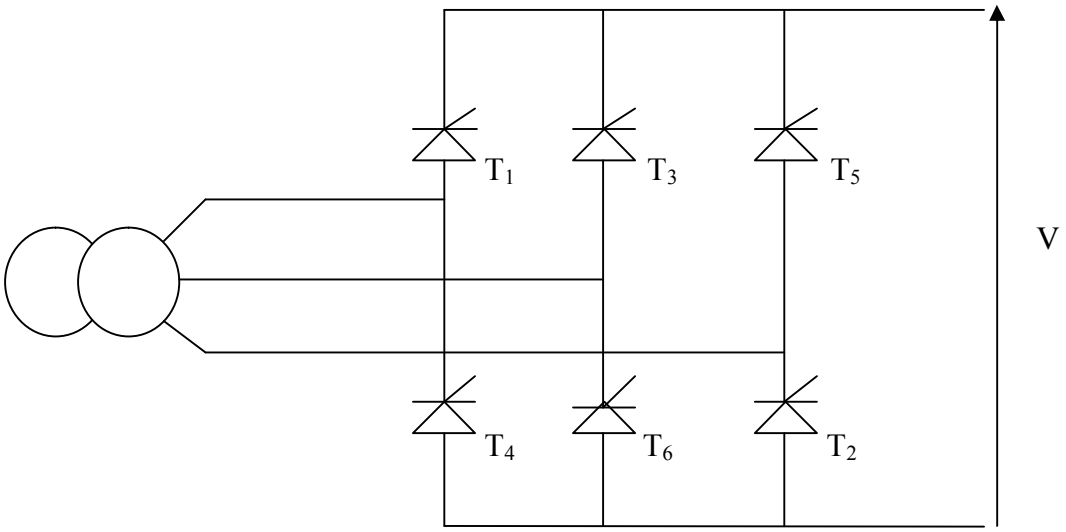



*Figure (II-14) : pont de Graetz hexaphasé*

Afin de diminuer l'amplitude des ondulations de la tension continu, on est amené a utiliser un double pont de Graetz qui est alimenté par des tensions triphasées issues de deux transformateurs couplés au secondaire l'un en étoile et l'autre en triangle constituent ainsi un système de tension déphasée de 30° et formant un système dodécaphasé.

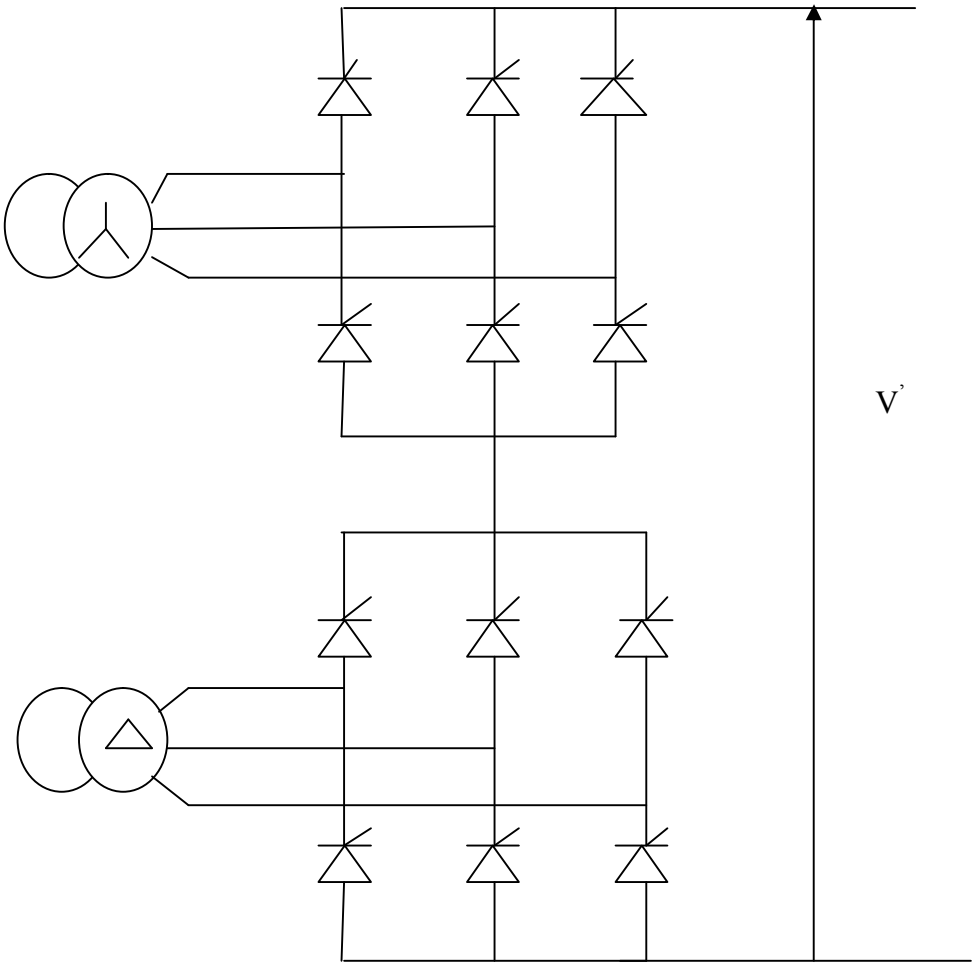



*Figure (II-15) : pont de Graetz dodécaphasé.*

La valeur moyenne de la tension redressée fournie par le redresseur est :

$$V'_d = \frac{6.\sqrt{2}}{\pi} V_c \cos\alpha \qquad \text{(II-2)}$$

## II- 5 -2) Principe de fonctionnement en mode redresseur :

Un pont de Graetz tout thyristor fonctionne en redresseur pour des valeurs de l'angle de retard à l'amorçage ∝ compris entre 0° et 90°, dans ce cas le pont transmet la puissance au réseau continu.

On considère le cas d'un pont convertisseur idéal connecté à un système de puissance infini c'est-à-dire l'impédance de la source est nulle.

Les valves $T_1$ , $T_3$, $T_5$ en haut et $T_4$, $T_6$,$T_2$ en bas sont connectée aux phases 1, 2,3

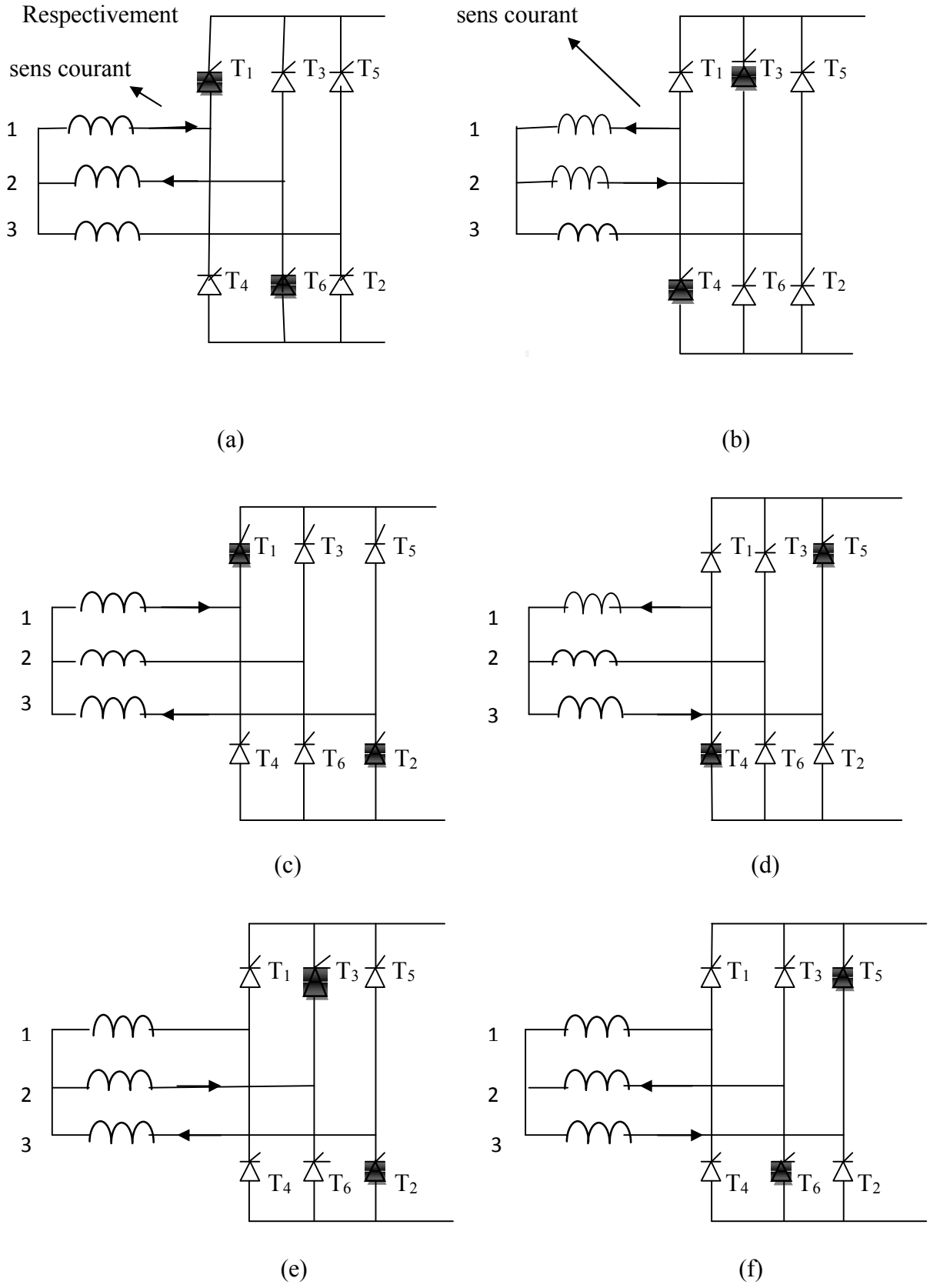



*Figure (II-16) : séquences de commutation des différentes thyristors.*

- **la tension moyenne et facture de puissance**

La valeur de la tension moyenne est donnée par

$$V_{c\,moy} = \frac{1}{T}\int_{\propto_0}^{\propto_0+\frac{\pi}{3}} \sqrt{2}V_s \sin\theta\, d\theta \qquad \text{(II-3)}$$

Autre que le secondaire transformateur délivre les tensions suivantes :

$$V_{s1} = \sqrt{2}V_s \sin\theta \qquad \text{(II-4)}$$

$$V_{s2} = \sqrt{2}V_s \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \qquad \text{(II-5)}$$

$$V_{s3} = \sqrt{2}V_s \sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \qquad \text{(II-6)}$$

Avec : T= $2\pi$

$$T' = \frac{T}{6} = \frac{\pi}{3}$$

$$V_{c\,moy} = \frac{1}{T'}\int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sqrt{2}V_s \sin\theta d\theta \qquad \text{(II-7)}$$

$$V_{cmoy} = \frac{\pi}{3}\sqrt{2}V_s \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{2\pi}{3}} \sin\theta\, d\theta \qquad \text{(II-8)}$$

$$\boxed{V_{cmoy} = \frac{2\sqrt{3}V_s}{\pi}} \qquad \text{(II-9)}$$

- Facture de puissance :

Il est défini comme étant cosinus de l'angle de retard (déphasage $\varphi$) entre la tension et le courant des composants de même pont de conversion.

Si les pertes sont négligeable et les filtres sont parfaits, la puissance active coté alternatif est égale à celle coté continu.

$$\boxed{P = \sqrt{3}V_c I \cos\varphi = V_d I_d} \quad [11] \qquad \text{(II-10)}$$

A noter que la décomposition en série de fourrier du coté alternatif du courant instantané dans chaque phase met en évidence une composante fondamentale d'amplitude.

$$I = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \quad [11] \qquad \text{(II-11)}$$

### II – 5 – 3) Fonctionnement en mode onduleur :

Un pont de Graetz tout thyristor fonctionne comme onduleur, pour des valeurs de l'angle de retard à l'amorçage $\alpha$ compris entre 90° et 180°, plus la satisfaction de ces trois conditions.

1) La disposition d'une source à courant continu qui est la ligne dans notre cas.

2) Le convertisseur doit être branché à une source triphasée capable de maintenir une tension sinusoïdale, cette condition est satisfaite par le réseau infini dans le quel on branche le convertisseur.

3) Pour réaliser un transfert de puissance au réseau triphasé, l'amorçage des thyristors doit être synchrone avec la tension alternative.

Dans ce cas le pont transmet la puissance de la ligne à courant continu au réseau alternatif, le fonctionnement du convertisseur en mode onduleur est identique à celui du mode redresseur c'est-à-dire même séquence de commutation sauf que, dans ce cas le courant circule dans le sens contraire de celui du mode redresseur.

### II-5-4) Commutations :

La commutation est le passage de courant d'une valve à une autre valve, de même groupe (à anode commune ou à cathode commune). Ce phénomène prend naissance à chaque fois qu'une valve reçoit l'ordre d'amorçage, alors qu'une autre valve de même groupe est en conduction, l'amorçage de l'une et le désamorçage de l'autre ne s'effectue pas instantanément d'où le transfert du courant dure un certain intervalle angulaire $v$ appelé angle de commutation ou d'empiètement,

ce qui fait que la valve conduit pendant un intervalle (120°+ *v*) au lieu de 120°.

Le phénomène de commutation engendre les effets suivants :[16]

- La réduction de la valeur absolue de la tension continue délivrée par le pont, la chute de tension induite est dite chute inductive qui est donnée par la relation suivante :

$$\Delta V = \frac{\sqrt{3}}{\pi} X_t I_d = V_d \left( \frac{\cos\alpha - \cos(\alpha - v)}{2} \right) \quad [16] \qquad \text{(II-12)}$$

Avec $X_t$ : réactance de commutation égale à l'impédance de courant–circuit monophasée de la source alternative, en pratique lorsqu'il existe des batteries de compensation, la réactance à prendre en compte est celle comprise entre le convertisseur et ces batteries.

- L'augmentation du déphasage du courant fondamental par rapport au cas de la commutation instantanée, cet effet entraine une augmentation de la puissance réactive absorbée par le pont sur le réseau.

Une valeur approchée de l'angle de déphasage supplémentaire du à la commutation est (*v/2)*

On montre que le facteur de déphasage est :

$$\cos \propto = \cos \varphi \; - \frac{X}{2} . \frac{I_d V_n}{I_{dn} V_c} \quad [16] \qquad \text{(II-13)}$$

n : Correspond aux valeurs nominales

X : réactance de fuite du transformateur en ( % ).

La base pour les valeurs réduites étant $\frac{V_n^2}{S_n}$ avec :

$V_n$ : tension composée nominale.

$S_n$ : puissance apparente nominale.

- La réduction dans de fortes proportions des taux d'harmoniques des courants engendrés par le pont par rapport au cas de commutation instantanée, ce qui est un effet favorable pour le réseau alternatif.

La durée de conduction des valves est augmenté d'un angle *v,* il est donc nécessaire en fonctionnement onduleur de réduire les angles de retard à l'amorçage, d'autant plus que le courant redressé augmente, pour que l'angle de marge minimale soit respecté. En effet si l'angle de marge devient trop faible la valve initialement en conduction peut ne pas se bloquer, elle continue à conduire alors que la tension à ces bornes redevient positive ,la dernière valve amorcée ne peut pas conduire, un court circuit entre les deux phases est provoqué ,ce phénomène est appelé raté de commutation.

Il engendre une forte surintensité dans le transformateur et la tension continue est court-circuitée.

La puissance convertie s'annule, le redresseur impose un grand courant qui peut atteindre deux à trois fois la valeur nominale.

En fonctionnement onduleur il est nécessaire de prendre en considération le phénomène de raté de commutation pour le dimensionnement du matériels, à fin qu'il puisse tenir a ces courants de court – circuit, notons en outre que les raté de commutation annulent transitoirement la puissance, Ce qui est un fait très gênant.

Une des performances principales demandée au contrôle-commande c'est d'assurer une restauration des commutations normale, le plus rapidement possible. Pour-cela une séquence particulière d'amorçage des valves doit être appliquée.

## II- 6) Contrôle des liaisons à courant continu haute tension (CCHT) :

### II- 6-1) Introduction :

Les convertisseurs des stations de conversion sont dodécaphasés car la quasi-totalités des liaisons fonctionnent avec ces convertisseurs.

De la, dans le cas idéal c'est à dire les inductances nulles coté réseau alternatif.

Le redresseur fournit coté continu une tension redressée de valeur moyenne

$$V_{dR} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U \cos\alpha \quad [10] \qquad \text{(II-14)}$$

Avec :

U: Tension alternative efficace entre phase coté alternatif.

$\alpha$ : L'angle de retard à l'amorçage du redresseur.

La tension coté onduleur est donnée par :

$$V_{do} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} U \cos\beta \quad [10] \qquad \text{(II-15)}$$

Avec

U : Tension alternative efficace entre phase (coté alternatif).

$\beta$ : L'angle de garde (l'angle d'avance)

On note que:

$$\beta = 180° \propto - \quad [10] \qquad \text{(II-16)}$$

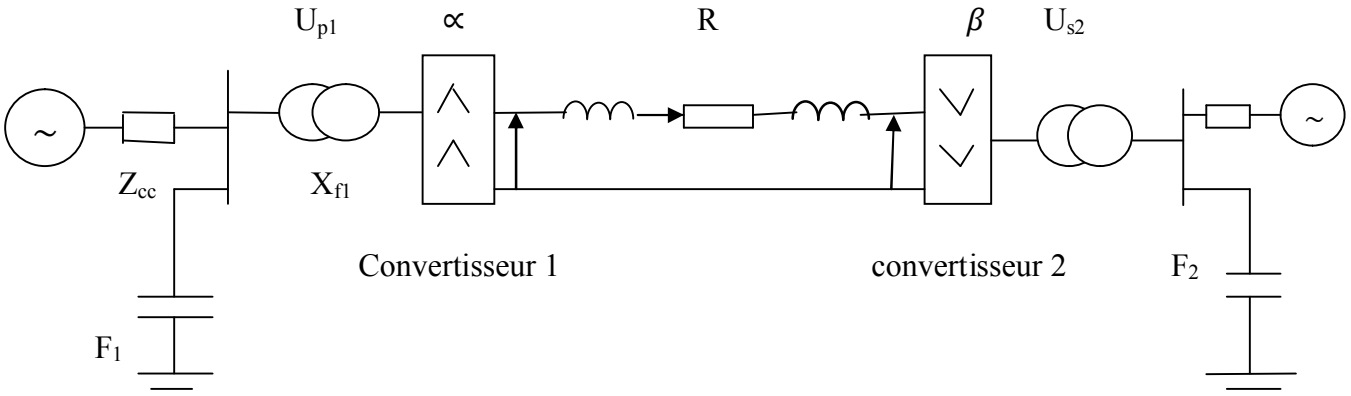



*Figure (II- 18) : schéma montrant les constitutions d'une liaison.*[10]

$F_1$ , $F_2$ : filtres

R : la résistance de ligne

Les convertisseurs produisent des tensions ($V_{dR}$ et $V_{dO}$) respectivement pour le redresseur et l'onduleur, de telle sort que le courant circulant dans la ligne est donnée par :

$$I_d = \frac{V_{dR} - V_{dO}}{R} \quad [2] \qquad \text{(II-17)}$$

La résistance est toujours faible, une légère différence entre $V_{dR}$ et $V_{dO}$ suffit pour faire circuler le courant de pleine charge dans la ligne, mais une légère variation de $V_{dR}$ et $V_{dO}$ provoque un très gros changement de $I_d$. Comme $U_{S1}$ et $U_{S2}$ subissent des fluctuations, donc $V_{dR}$ et $V_{dO}$ sont exposées directement à ces fluctuations à cause des convertisseurs, qui répondent instantanément à ces variations.

A fin de stabiliser le transport de la puissance, le redresseur et l'onduleur doivent être dotés de caractéristiques V- I spéciales.

Ces caractéristiques sont réalisées par la commande automatique effectuée plus souvent par ordinateur, des impulsions fournis aux gâchettes pour contrôler les angles ∝ et $\beta$ .

### II- 6- 2) Caractéristique $V_d - I_d$ :

La caractéristique $V_d = f(I_d)$ du redresseur est conçue comme suit : [2]

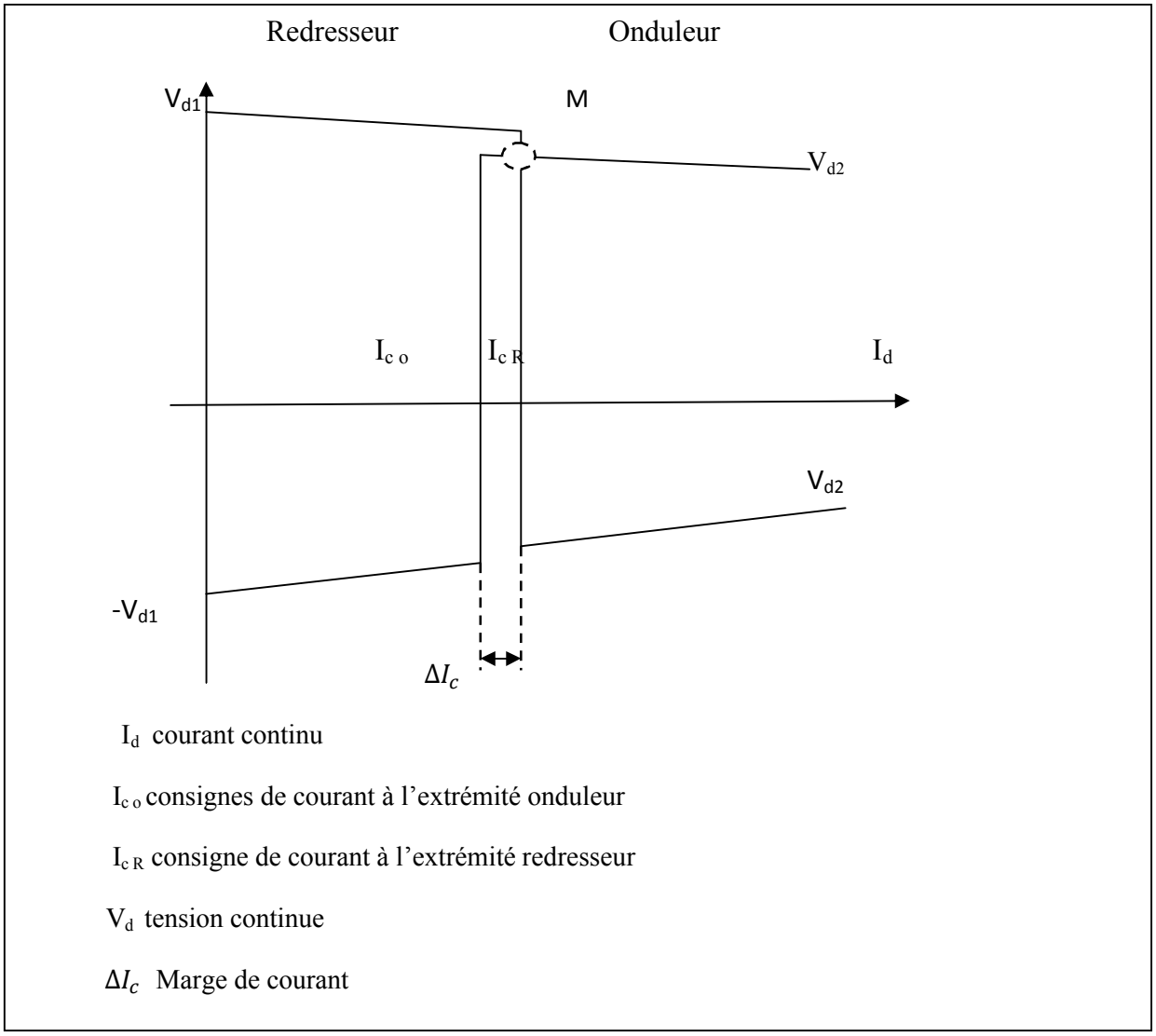
Pour une tension à CA à $U_S$ constante (voire la figure II- 19) et un angle ∝ constant la tension $V_{dR}$ demeure constante jusqu'a ce que $I_d$, atteigne la valeur de consigne $I_{cR}$ , passé ce point $V_{dR}$

diminue rapidement, l'angle de retard à l'amorçage augmente alors automatiquement et rapidement de sort que $V_{d\,R}$ tombe subitement à zéro, ou à une valeur négative.

La caractéristique $V_d = f(I_d)$ de l'onduleur est conçue comme suit : [2]

La tension C.A à $U_{S\,2}$ étant constante, la tension $V_{d\,O}$ se maintient à une valeur nulle ou négative jusqu'à ce que $I_d$ atteigne la valeur de consigne $I_{cO}$, dés que le courant attient cette valeur de consigne la tension $V_{d\,O}$ prend une valeur positive et l'angle $\beta$ (qui est supérieure à 90°) prend une valeur précise.

La superposition des deux caractéristiques nous permet de tracer la caractéristique générale de $V_d = f(I_d)$




$I_d$ courant continu

$I_{c\,o}$ consignes de courant à l'extrémité onduleur

$I_{c\,R}$ consigne de courant à l'extrémité redresseur

$V_d$ tension continue

$\Delta I_c$ Marge de courant

*Figure (II - 19) caractéristiques $U_d = f(I_d)$ complète pour les convertisseurs 1 et 2, la puissance circule du convertisseur 1 vers le convertisseur 2.*[10]

***Remarque :***

1- La tension $V_d$ et le courant $I_d$ de la ligne à CC , correspondent au point d'intersection des courbes (point d'opération) d'où on déduit que le courant de la ligne $I_d = I_{c\,R}$ Imposé par le redresseur, tandis que la tension $V_d$ est égale à $V_{d\,2}$ qui est générée par l'onduleur.

2- La différence $\Delta\, I_c$ entre $I_{c\,R}$ et $I_{c\,O}$ s'appelle marge de courant, sa valeur est d'environ de 10 % du courant nominale de la ligne.

3- Dans les conditions de fonctionnement normal la tension $V_d$ o de l'onduleur est maintenue toujours légèrement inférieure à la tension $V_{d\,R}$ du redresseur, de plus la consigne Ic o est inférieure à la consigne $Ic_{\,R}$.

## II- 6- 3) Réglage rapide par les angles :

Un convertisseur doit régler plusieurs de ses paramètres (maintenir les angles $\alpha\ et\ \beta$ supérieurs à des seuils donnés) tension et courant continu dans des plages données avec une seule variable de commande ($\alpha\ ou\ \beta$) aussi il faut choisir le quel des paramètres sera réglé.

La façon classique de procéder est de faire fonctionner plusieurs régulations en même temps, d'associer à chacune un coefficient de pondération et de choisir celle qui est plus importante pour le système.

Ces régulations fonctionnent dans un seul sens en générale, la régulation d'angle $\alpha$ minimum ($\alpha_{min}$) ne fonctionne que si l'angle est inférieure à sa valeur minimale, elle est inhibée dans le cas contraire.

Le choix des coefficients de pondération permet de classer les régulations entre celles qui sont importante et celle qui sont vitales pour le convertisseur.

Le convertisseur peut fonctionner dans les modes suivants, dont pas tous sont implémentés dans le contrôle-commande.[10]

- Le réglage en fonctionnement redresseur de l'angle d'amorçage ($\alpha_{min}$), l'amorçage des valves constituées de plusieurs thyristors en série nécessite une tension minimale à leurs bornes, il est donc primordial de s'assurer que l'angle d'amorçage n'est pas trop faible.

- Réglage en fonctionnement onduleur de l'angle d'extinction minimal ($\beta_{min}$) ; si l'angle de garde (d'avance) est trop faible, la moindre variation de la tension entrainera un défaut de commutation donc l'arrêt de la liaison , il est donc primordial de s'assurer que $\beta$ n'est pas trop faible.

- Le réglage de la tension $V_d$ par l'un des convertisseurs.

- Le réglage du courant $I_d$ par l'autre convertisseur.

- Le réglage du courant $I_d$ par le convertisseur qui régule la tension $V_d$.

***Remarque :***

C'est en générale le convertisseur fonctionnent en onduleur qui régule la tension, et le convertisseur fonctionnent en redresseur régule le courant.

La consigne de courant de l'onduleur qui n'est sollicite que l'ors d'un défaut est déduite en retranchant la marge du courant de la consigne de courant redresseur est donnée par :

$$I_{c\,O} = I_{c\,R} - \Delta I \quad [10] \qquad \text{(II-18)}$$

A noter que ce type de réglage nécessite un canal de communication entre les deux stations.

Le contrôle des angles d'amorçages et de garde permet de faire fonctionner les convertisseurs de la liaison par des points particuliers, de leurs caractéristiques $V_d = f(I_d)$ ; mais ceci se fait aux prix d'une plage de variation très grande de ces angles, et le fonctionnement à grand angle d'un convertisseur induit des effets indésirable qui sont :

- Echauffement des snubbers.

- Consommation excessive de la puissance réactive

C'est pourquoi un autre réglage coexiste avec celui des angles.

### II – 6 – 4) Réglage lent par les régulations en charge :

Les transformateurs de convertisseurs sont munis de régleur en charge dont le but est d'adopter la tension alternative secondaire au point de fonctionnement de consigne, de façon à ramener les angles ($\alpha \; et \; \beta$) dans une plage donnée, de ce fait les convertisseurs ne fonctionnent à grands angles que, pendant les changements brusque de consigne.

### II- 6- 5) Réglages des liaisons multiterminales :

Le problème est d'assurer le réglage de la puissance échangée entre le réseau alternatif en respectant toute fois la contrainte d'égalité, aux pertes de prés, de la puissance injectée dans le réseau continu et de la puissance extraite du réseau continu.

Le choix de type de réglage dépend fondamentalement de la structure du réseau à courant continu série on parallèle.

a) La structure série :

Le courant continu est commun à tous les convertisseurs, un point de fonctionnement stable est obtenu si une seule des stations de conversion règle courant, toutes les autres réglant leurs tension de façon à maintenir la puissance au niveau requis.

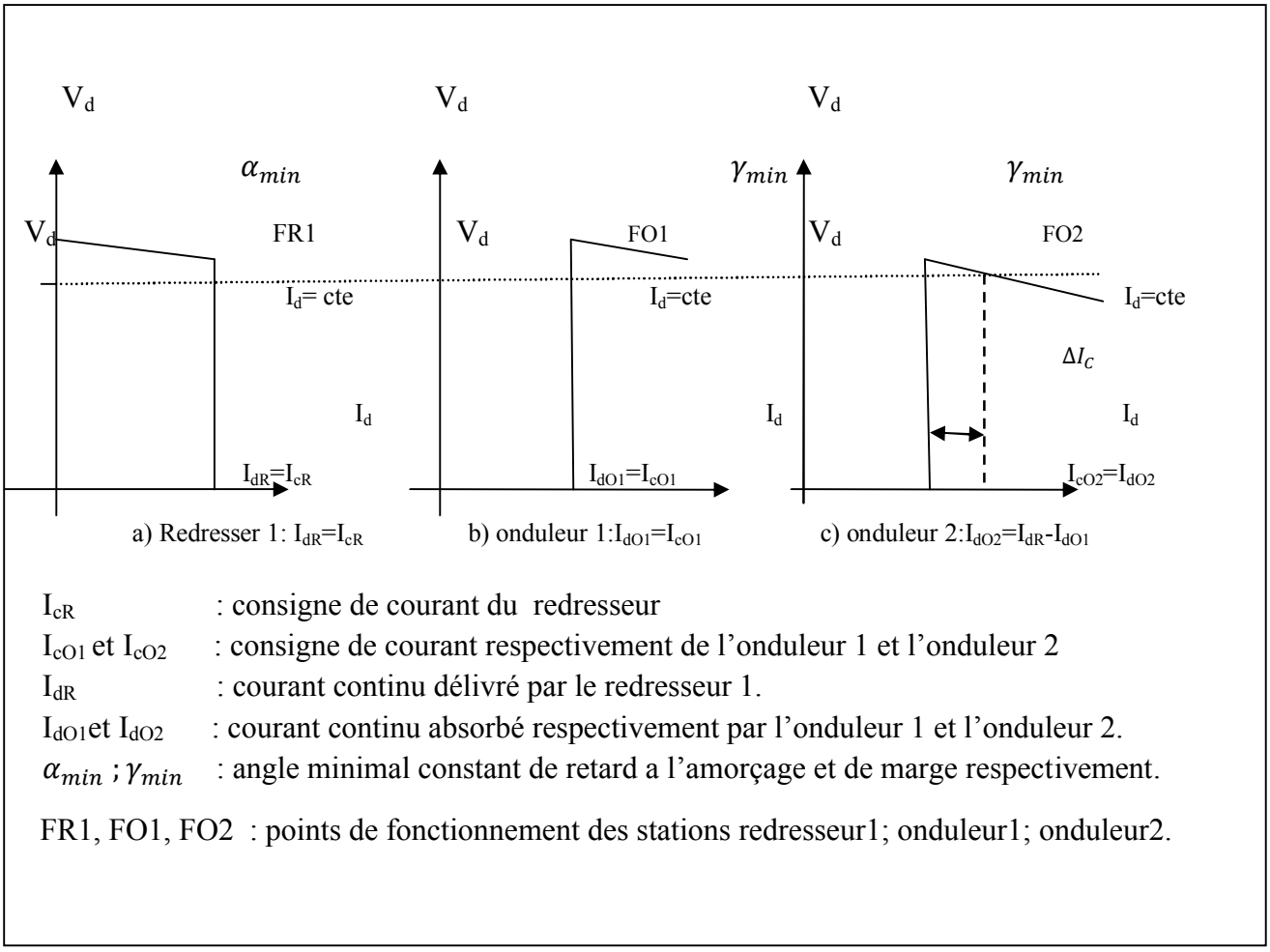
Les stations dont la puissance convertie est faible doivent nécessairement fonctionner avec de grands angles de retard à l'amorçage et consomment donc beaucoup de puissance réactive ce qui constitue un inconvénient de ce type de liaison à structure série.

b) La structure parallèle :

La tension continu $V_d$ est commune à l'ensembles des stations , aux chutes de tension en ligne de prés, un point de fonctionnement défini et stable est obtenu quand une seule station impose la tension continue, tandis que toutes les autres règlent le courant qu'elles absorbent ou fournissent au réseau continu, le principe de réglage utiliser sur la liaison Sardaigne , corse , Italie , est une simple extrapolation à trois stations de la méthode de réglage utilisée dans les liaisons point à point .

***Remarque :***

Le réglage des liaisons point à point c'est le réglage rapide par les angles et le réglage lent par régleur en charge utilisée simultanément.




$I_{cR}$ : consigne de courant du redresseur

$I_{cO1}$ et $I_{cO2}$ : consigne de courant respectivement de l'onduleur 1 et l'onduleur 2

$I_{dR}$ : courant continu délivré par le redresseur 1.

$I_{dO1}$et $I_{dO2}$ : courant continu absorbé respectivement par l'onduleur 1 et l'onduleur 2.

$\alpha_{min}$ ; $\gamma_{min}$ : angle minimal constant de retard a l'amorçage et de marge respectivement.

FR1, FO1, FO2 : points de fonctionnement des stations redresseur1; onduleur1; onduleur2.

*Figure (II -20) réglages de puissance d'une liaison multi terminale*

*Exemple de la liaison SACOI (Sardaigne, corse, Italie)* [11]

## II-6- 6) Réglages des stations dos -a-dos :

Le principe de réglage de ces stations est le même que pour une liaison point à point, en revanche la proximité du redresseur et de l'onduleur permet de disposer localement de deux degrés de libertés, l'angle $\alpha$ du redresseur et $\beta$ celui de l'onduleur, pour régler indépendamment deux grandeurs sur un des réseaux. Ainsi, on peut simultanément régler la puissance active injectée dans le réseau de l'onduleur et maintenir constante sa tension alternative en ajustent sa puissance réactive, ce principe est particulièrement intéressant dans le cas ou le réseau de l'onduleur est impédent.

Pour obtenir les mêmes performances avec une liaison point à point il faut installer des moyens rapides de compensation statique, dans la station onduleur ou mettre en œuvre des moyens de télé – communication d'une très haute fiabilité.

## II- 7) Interactions des liaisons à CC et des réseaux à CA :

### II- 7- 1) Généralités :

Pour un réseau alternatif une liaison à courant continu peut être considérée comme une charge consommant une part notable de la puissance transitant sur le réseau ou comme une source de puissance active dont la contributions à l'alimentation du système alternatif est significative, c'est pourquoi une intégration harmonieuse d'un tel ouvrage passe par l'examen des interactions possibles entre le réseau à courant continu et les réseaux alternatifs, et par la mise en œuvre des solutions permettant de maitriser ces interactions.

Une grandeur significative, souvent utilisée pour caractériser le degré d'interaction entre une liaison à CC et le réseau alternatif adjacent est le rapport de court circuit donné par :

$$K_{cc} = \frac{P_{cc}}{P_{dn}} \quad [10] \qquad \text{(II-19)}$$

$P_{cc}$ : puissance de courant du réseau au point de raccordement de la liaison du réseau alternatif.

$P_{dn}$ : puissance nominales des convertisseurs

$K_{cc} \geq 3$ : les interactions sont limitées et facilement maitrisable. [11]

$K_{cc} < 2$ : une forte interdépendance de la liaison et du réseau alternatif ce qui fait des dispositions spécifiques doivent alors être étudiées et mises en œuvre. [11]

### II – 7 – 2) Compensation de la puissance réactive :

Le fonctionnement des convertisseurs aussi bien en redresseur qu'on onduleur se traduit par une consommation de la puissance réactive.

Ainsi par exemple ; avec un angle de 15° et une réactance de fuite de transformateur de 16 %, un convertisseur consomme au régime nominal, une puissance réactive égale à la moitie de la puissance active convertie. [11]

De la en fonction des possibilités de fourniture de cette puissance réactive par le réseau alternatif, des moyens de compensation plus ou moins importants sont donc nécessaires.

- La solution la plus simple consiste à utiliser des gradins de condensateur, mis sous tension en fonction du besoin.

- Un compensateur synchrone ou un compensateur statique peut être utilisé pour un réglage fin.

- Un compensateur statique est indispensable lorsqu'une réaction rapide est nécessaire pour mieux maitriser la tension alternative.

### II- 7- 3) Limitation des perturbations harmoniques :

Les convertisseurs dodécaphasé engendrent du coté alternatif des courants harmoniques dits caractéristiques dont les plus importants sont de rangs

$$h = 12\,k \pm 1$$ [11] (II-20)

Avec K : entier

Du fait de déséquilibre divers, les convertisseurs engendrent également des courant harmoniques non caractéristiques, les principaux facteurs, gouvernant l'émission de ces derniers sont [11]

- Les déséquilibres qui peuvent exister entre les réactances de fuites des transformateurs de conversion d'une même unité dodécaphasé.

- Un éventuel déséquilibre des tensions du réseau alternatif, provoqué par la proximité de charges importantes alimentées en monophasé ou en biphasé ou du fait de la non-transposition des conducteurs de ligne.

- Des dispersions des instants d'allumage des valves par rapport à une séquence d'idéale.

En pratique, les amplitudes de ces harmoniques non caractéristiques sont plus faibles que celles des harmoniques caractéristiques. Des conditions particulières de résonnance dans le réseau alternatif peuvent cependant introduire des tensions harmoniques d'amplitude inacceptable et imposer, dans ce cas, un traitement approprie de ces harmoniques par filtrage.

L'injection, par les convertisseurs, des courants harmoniques dans l'impédance du réseau alternatif donne lieu à des tensions harmoniques $V_h$ qui distordent l'onde de tension fondamentale. Il est donc nécessaire de limiter cette injection cela est réalisé par l'utilisation d'unités de conversion dodécaphasé.

(Pour ces convertisseurs le $1^{er}$ rang d'harmoniques est de rang 11).

- L'installation des filtres d'harmonique shunt au point de raccordement des unîtes de conversion qui absorbent ces courants d'harmonique.

### II - 7- 4) Surtensions transitoires :

Des surtensions transitoires surviennent lors des manœuvres des gradins de condensateur ou des filtres. Leurs amplitudes et leur durée dépendent essentiellement de la puissance du gradin mis sous tension, de la puissance de court circuit du réseau au point de raccordement de la station au réseau alternatif ainsi que de l'amortissement du système (réseau -gradin de condensateur –filtres). Leur limitation et la maitrise de leurs effets sur le matériel des postes résultent du choix des éléments de l'accord des filtres et des niveaux de protection des parafoudres du coté alternatif.

### II- 7- 5) Surtensions temporaires :

Un défaut d'isolement peut affecter, une ou plusieurs phases de l'un des réseaux alternatifs connectés à une liaison à courant continu. Dans cette circonstance le comportement du convertisseur dépend du niveau du creux de la tension perçu au droit de la station de conversion, du nombre de phase concernée et du fonctionnement en redresseur ou en onduleur du convertisseur affecté.

Un onduleur est nettement plus sensible à un défaut monophasé qu'un redresseur. Tout creux de tension à ces bornes d'une profondeur supérieur a 10 % conduit en pratique a un raté de commutation de l'onduleur ce défaut se traduit, par une annulation temporaire de la puissance transmise et donne lieu a des surtensions sur les phases saines alimentant l'onduleur, aussi que sur le réseau de redresseur. Les tensions sont dues aux maintiens sous tension des gradins de condensateur pour compenser la puissance réactive, alors que les convertisseurs absorbent moins, voir plus du tout de puissance réactive .Le niveau des surtensions est d'autant plus élève que le rapport de court-circuit est faible. En revanche même si la tension d'une des phases d'alimentation s'est annulée, un redresseur est capable d'assurer la conversion alternatif –continu, et de maintenir quelque soit le type de fonctionnement du convertisseur. Un court circuit polyphasé proche d'une station de conversion entraine l'annulation de la puissance transmise, parce que les commutations ne sont plus possibles .Cette interruption conduit à des surtensions liées à la rejection de la charge de l'interconnexion vue des réseaux alternatifs.

Souvent l'élimination du défaut s'accompagne d'une réduction importante de la puissance de court circuit du réseau affecté, combiné à la saturation des transformateurs de conversion remis sous tension, ce concours de circonstance peut donner lieu à des surtensions temporaires d'un niveau très élevés, qu'il convient de limiter pour protéger le matériel des postes.

Dans certains projets, la limitation des surtensions temporaires, a un niveau acceptable a conduit à installer des compensateurs statiques, présentant de fortes capacités d'absorption de puissance réactive instantanément, l'excès de puissance réactive des gradins de compensation, jusqu'a la mise hors tension de ces derniers.

### II- 7- 6) Limite de stabilité :

Les caractéristiques de stabilités des stations des conversions sont essentiellement imputables à la boucle interne du réglage du courant continu de la liaison.

La stabilité est également influencée par la valeur du rapport court circuit décrété précédemment pour une valeur supérieure à trois, le système réseau alternatif et réseau continu stable sans qu'il soit nécessaire de prendre des mesures particulières .En revanche, lorsque le réseau devient plus impudent et donc la puissance de court – circuit plus faible le maintient de la stabilité passe par la mise en œuvre d'un réglage de la tension alternatif par les convertisseurs ou par un dispositif complémentaire (compensateur , statique, compensation synchrone).

### II – 7 – 7) Interaction hyposynchrone :

La boucle interne de réglage de courant continu permet un réglage de la puissance transmise rapide en regard des constantes de temps, des phénomènes électromécaniques apparaissent sur le réseau alternatif, vis-à-vis de ces phénomènes lents par rapport à sa dynamique propre, une liaison à courant continu fonctionne à puissance constante, apparait comme une charge très particulière et non linéaire qui tend à augmenter sont courant lorsque la tension alternatif est diminuée. Elle introduit donc un amortissement négatif dans une certaine bande de fréquence (inférieure à 50 Hz ou 60 Hz) cela présente une grand importance vise à – vis des oscillations de tension des arbres des turbo-alternateurs présent au voisinage d'une station de conversion. [10]

Les fréquences propres de la tension la plus basses peuvent descendre jusqu'à 6 Hz (cas des turbo-alternateurs des centrales nucléaires de 900 MW d'EDF) [11]

Lorsque l'amortissement négatif introduit par les convertisseurs devient supérieure à l'amortissement apporté par le réseau alternatif lui – même, par le frottement de la vapeur dans les turbines et par la régulation de la tension des alternateurs. Le phénomène peut conduire à des oscillations d'amplitudes divergentes entrainent la rupture de la ligne d'arbre, cela peut être le cas notamment lorsqu'un groupe de production se retrouve seul à débiter dans une liaison à courant continu. [10]

Une parade efficace à ces problèmes consiste à introduire un amortissement positif aux fréquences préalablement identifiées comme critique, introduisant des boucles stabilisatrices agissant en parallèle avec la boucle interne de courant continu, afin de corriger la dynamique des convertisseurs , de plus les machines doivent être équipées de protection spéciale détectant l'apparition d'oscillation de tension pour pallier une éventuelle défiance des boucles stabilisatrices.

### II – 7 – 8) Compatibilité avec la protection du réseau :

La présence d'une puissance réactive importante fournie par les condensateurs de compensation dans une station de conversion, peut se traduire par une modifications des formes d'ondes vues par les protections proches de la station, les harmoniques de courant et de tension sont également mesurés par les protections.

Pour garantir les performances d'une protection, il est nécessaire dans certains cas de la modifier en introduisant par exemple un filtrage des mesures.

Par ailleurs quand la puissance injectée dans un réseau par une liaison en courant continu devient voisine de la puissance consommée par ce réseau, la stratégie de la protection de réseau doit être réexaminé notamment si la station de conversion n'est pas équipée de compensateur synchrone capable d'apporter une certaine puissance de court-circuit.

### II – 7 – 9) Limitation des perturbations radio électrique :

Les valves et les enroulements secondaires d'un transformateur de conversion sont le siège de variation de tension particulièrement rapide , à chaque commutation du pont, l'application de front de tension très raides (typiquement 100 KV en 1 us) aux nombreux éléments d'impédance du circuit (capacités ou inductance localisée ou reparties) donne lieu à des oscillations a des fréquences élevées, le spectre de ces oscillations présente deux bandes principales de 10 à 60 KHz et de 0 ,5 à 40 MHz correspondant du domaine des fréquences utilisées en radio électricité.[10]

Afin de limiter l'émission de ces perturbations à l'extérieur du bâtiment des valves, on confine les convertisseurs dans une cage de faraday aussi étanche que possible aux ondes, radio électrique dans certaine cas, on installe des filtres destinés à arrêter la propagation des perturbations conduites lors quelles interférent avec des fréquences utilisées pour la radio télécommunication.

## II – 8) Lignes aériennes et câbles à courant continu :

### II- 8 -1) Lignes aériennes :

Le dimensionnement d'une ligne aérienne en CCHT relève des mêmes règles que celle utilisées pour une ligne en courant alternatif dont la tension entre phase et terre sensiblement égale à la tension continue retenue pour la liaison.

### II- 8 -2) Câbles sous-marins et souterrains :

On distingue deux types de câble utilisés pour le transport à courant continu a haute tension CCHT.

- Câble de type solide est le plus économique son isolation est assurée par des bandes de papier imprégnée d'huile à haute viscosité, ce type de câbles peut être utilisé pour des tensions continue allant jusqu'à 400KV. Il n'y pas de limitation de longueur dans le transport a courant continu par câble sauf à considère les moyens de transport et de pose pour de très long câble qui peuvent atteindre des milliers de tonnes. [11]

- câble a huile sous pression qui est complètement rempli d'huile à basse viscosité maintenue sous pression, la pression d'huile nécessaire augmente avec la longueur, de long câbles sous-marins demanderaient une pression extrême élevée, ces câbles sont utilisés pour des tensions continues de 300 KV.[11]

### II – 8 – 3) Tension maximale en continu :

En théorie la tension de transport en courant continu est illimitée bien que en pratique elle est limitée à 750 KV pour les lignes aériennes et 400 KV pour les liaisons par câble sous-marin ou souterrain pour les lignes aériennes, c'est à cause de la sensibilité à la pollution atmosphérique des ouvrages de transport en courant continu.

En continu, ou on est amené à adopter des longueurs de ligne de fuite qui atteigne jusqu'à 4cm/KV de tension appliquée régime permanent alors qu'en alternatif elle est de 1,5cm/KV de tension efficace.

Pour les câbles cette tension est limitée à cause des problèmes de pose due aux poids des câbles qui atteigne des tonnes.

### II – 8 – 4) Emploi de la terre ou la mer comme conducteur de retour du courant :

Dans certain cas la puissance d'une ligne à courant continu à réaliser est telle qu'elle ne justifie pas un découpage en plusieurs unités de conversion dans chaque station dans ces condition, il est clair que l'utilisation du retour du courant par la terre ou la mer dans un schéma monopolaire économisant un conducteur de retour constitue une solution moins chère.

En contrepartie, il faut installer une électrode et éventuellement une ligne entre la station et le site de l'électrode, le cout correspondant est très inférieur à celui d'un second conducteur pour des raisons de disponibilités, il faut prévoir plusieurs circuits indépendants, le choix de l'utilisation ou non d'un retour par terre n'est pas aussi évident.

Le retour permanent ou occasionnel du courant par le sol ou la mer pose des problèmes de la corrosion électrolytique des structures métallique au voisinage de l'ouvrage et également celui des interférences avec d'autre installation comme les circuits de télécommunication des voies de chemin de fer. En mer, le champ magnétique crée par un seul conducteur peut perturber les navires qui naviguent à proximité du câble à courant continu.

La conception d'une électrode doit concilier des exigences de faible résistance ; de capacité suffisante de collecte ou de distribution du courant sur une surface étendue, d'accessibilité pour la maintenance, d'adaptation aux conditions locales du réseau et en particulier à sa résistivité, et ce au meilleur cout.

## II- 9 Conclusion :

Face aux progrès constant de l'électronique de puissance, le transport à courant continu connait des évolutions progressives. L'exploitation de cette technique est satisfaisante, fiable et économique quand la distance est de (600 Km à 800 Km) pour les lignes aériennes et de (40 à 60 Km) pour les câbles souterrains ou sous- marins.

Quant à l'interconnexion, il n'apparait aucune limite technique à l'emploi du courant continu en haute tension (CCHT).

Du fait, par le passé l'utilisation du transport en courant continu se résumait à quelque ligne (une dizaine dans le monde entier) mais actuellement on compte des centaines de lignes, et beaucoup de projets sont en cours de réalisation.

De la découle l'intérêt de l'utilisation des courant continu dans le domaine des transports d'énergie électrique.

# Chapitre III

## III- 1) Introduction :

L'énergie électrique peut être transportée par les câbles souterrains ou lignes aériennes, et c'est utile de comparer les avantages du transport de cette énergie en courant alternatif et ceux du transport en courant continu.

L'intérêt du choix du type de transport n'est pas fait pour des applications particulières mais il est fait à base d'indication économique.

## III- 2) Lignes aériennes :

### III- 2- 1) Comparaison économique :

#### III- 2- 1- a) Méthode 1 :

Considérons un nouveau système de transmission à courant continu à comparer à un système alternatif transmettant la même puissance, ayant le même pourcentage de perte et les mêmes dimensions des conducteurs.

Le système a courant continu est considéré comme étant à deux conducteurs à $\pm \frac{V_d}{2}$ avec la terre. (Comme le montre la figure III-1).

Puissance dans le système alternatif est donnée par :

$P_a = 3\ E_p\ I_L = \sqrt{3}\ E_L\ I_L$ (III-1)

(En considérant que $\cos\varphi = 1$)

Puissance dans le système à courant continu est donnée par :

$P_d = V_d\ I_d$ (III-2)

Perte en CA sont : $\Delta P_a = 3\ R\ I_L^2$ (III-3)

Perte en CC sont : $\Delta P_d = 2\ R\ I_d^2$ (III-4)

Aux mêmes pertes de puissance : $\Delta P_a = \Delta P_d$

$3\ R\ I_L^2 = 2\ R\ I_d^2 \Rightarrow$ $\boxed{I_d = \sqrt{\frac{2}{3}}\ I_L = 1,22\ I_L}$ (III-5)

**Un même conducteur peut transporter un courant d'intensité 1,22 fois plus grande en transport d'énergie en courant continu qu'en alternatif.**

- En égalisant les puissances : $P_a = P_d$

$3\ E_P\ I_L = V_d\ I_d$ (III-6)

$$V_d = 3\sqrt{\frac{2}{3}}\ E_P \Rightarrow \boxed{V_d = 2,44\ E_P} \qquad \text{(III-7)}$$

**Le même conducteur peut être sous une tension de 2,44 fois plus grande en transport d'énergie en continu qu'en alternatif.**

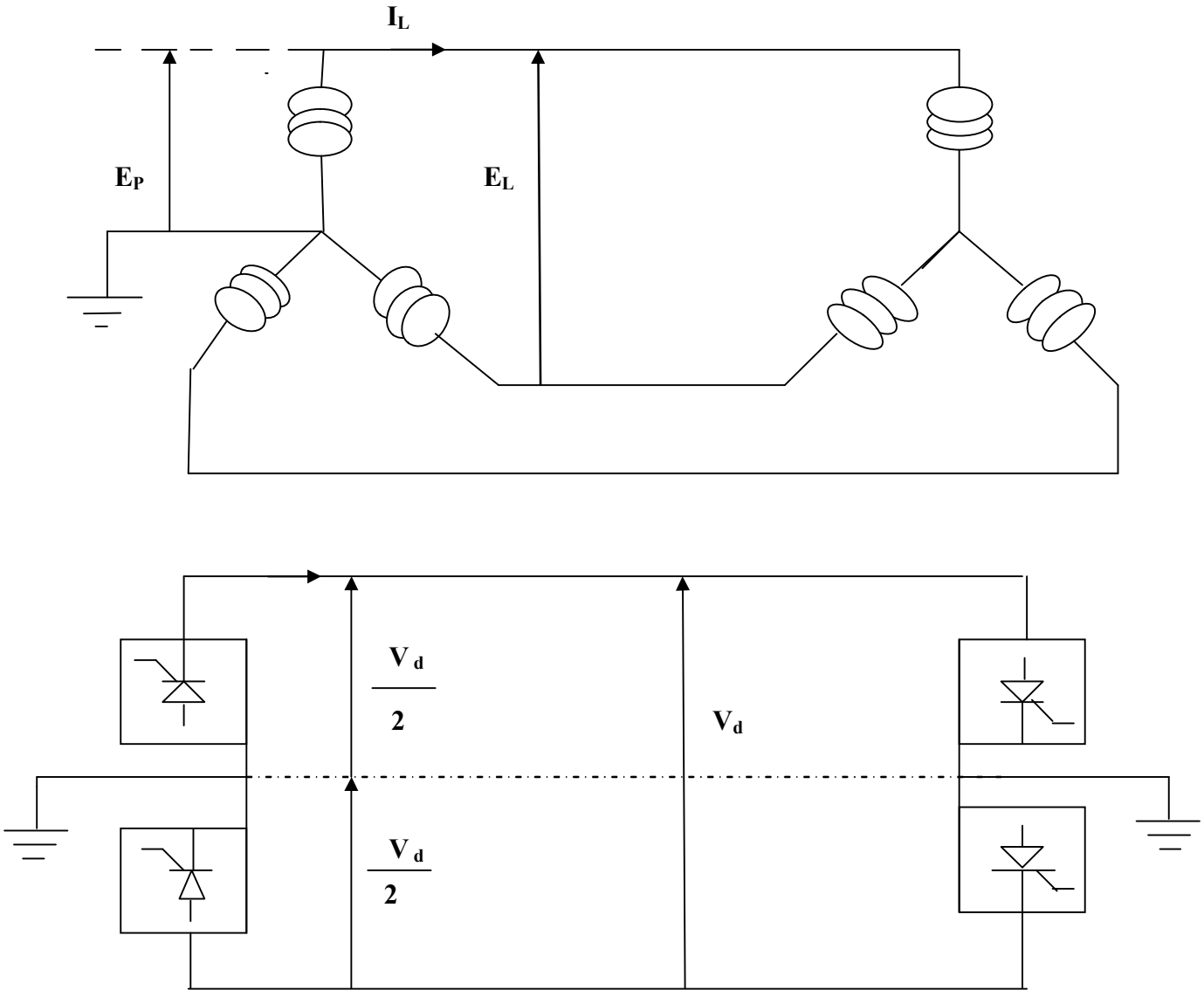



*Figure : (III – 1) Deux systèmes de transmission d'énergie en CA et CC.[4]*

Maintenant supposons que la tension continue de rupture d'un isolateur est égale à la valeur maximale de la tension alternative qui cause la rupture d'isolation.

- Pour la ligne alternative :

$$U_r = \sqrt{2}\ E_P K_1 \qquad \text{(III-8)}$$

- Pour la ligne en courant continu :

$$V_r = \frac{V_d}{2} K_2 \qquad \text{(III-9)}$$

$K_1$ et $K_2$ : facteur de multiplication de surtension interne ou atmosphérique.

Comme approximation on prend $K_1 = K_2$

$$\frac{Niveau\ d'isolation\ en\ CC}{Niveau\ d'isolation\ en\ CA} = \frac{\frac{V_d K_2}{2}}{\sqrt{2}\ E_P\ k_1} = \frac{V_d}{2\sqrt{2}E_P} = \frac{3\sqrt{\frac{2}{3}}}{2\sqrt{2}}\frac{E_P}{E_P} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0{,}87$$

$$\boxed{\frac{Niveau\ d'isolation\ en\ CC}{Niveaau\ d'isolationen\ AC} = 0.87} \qquad \text{(III-10)}$$

Ainsi une ligne à courant continu aura non seulement deux conducteurs à la place de trois conducteurs pour la ligne alternative, mais aussi le niveau d'isolation sera de 87 % seulement que celui d'une ligne alternative

**III- 2- 1- b) Méthode 2 :**

Une autre méthode de comparaison c'est de considérer un réseau alternatif triphasé existant pour lequel on installe une station, pour le convertir en ligne à courant continu.

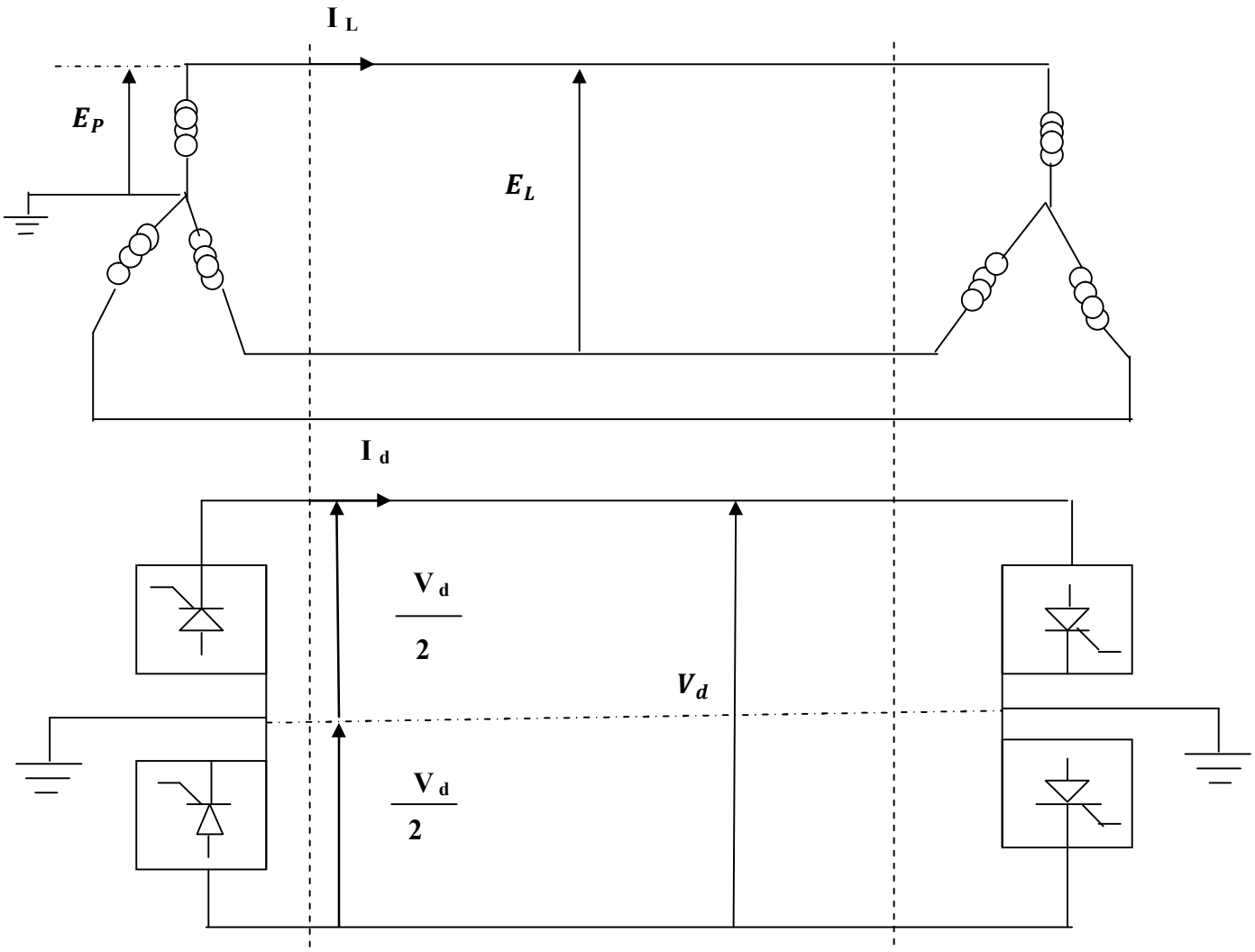



*Figure (III-2) : comparaison économique de la transmission d'énergie en CA et CC [4]*

Sur la base du même courant et même, niveau d'isolation la puissance transmise par la ligne alternative :

$$P_a = 2 .3. E_p I_L \qquad \text{(III-11)}$$

La ligne à courant alternatif peut être convertie en trois circuits à courant continu, chaque circuit à deux conducteurs à $\pm \frac{V_d}{2}$ par rapport a la terre.

$$P_d = 3\ V_d\ I_d \qquad \text{(III-12)}$$

On a : $I_d = I_L$

Et pour le même niveau d'isolation on a : $\frac{V_d}{2} = \sqrt{2}\ E_P$ (III-13)

$$\frac{Puissance\ avec\ le\ CC}{Puissance\ avec\ li\ AC} = \frac{3\,V_d I_d}{6\,E_P\,I_L} = \frac{3.2.\sqrt{2}.E_P I_L}{6.E_P.I_L} = \sqrt{2}$$

$$\boxed{\frac{Puissance\ avec\ le\ CC}{Puissance\ avec\ le\ CA} = \sqrt{2} = 1{,}44} \qquad \text{(III-11)}$$

$$\frac{Puissance\ en\ \%\ avec\ le\ CC}{Puissance\ en\ \%\ avec\ le\ CA} = \frac{Pertes\ en\ CC}{puissance\ en\ CC}\ \frac{Puissance\ en\ CA}{pertes\ en\ CA}$$

$$\boxed{\frac{Pertes\ en\ \%\ \ avec\ le\ CC}{Pertes\ en\ \%\ avec\ le\ CA} = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0{,}71} \qquad \text{(III-12)}$$

**Ainsi la puissance transmise peut être augmentée de 41% avec la réduction des pertes en ligne de 29 % .**

- En se basant sur le même pourcentage des pertes en ligne et le même niveau d'isolation.

Pour le même niveau d'isolation : $\frac{V_d}{2} = \sqrt{2}\ E_P$

Pour le même pourcentage des pertes :

$$\frac{Pertes\ avec\ le\ CC}{Puissance\ avec\ le\ CC} = \frac{Pertes\ avec\ \ le\ \ CA}{Puissance\ avec\ le\ CA}$$

$$\left.\frac{6.R.I_L^2}{6.VI_L} = \frac{6.R.I_d^2}{3.2.\sqrt{2}\,I_d}\right\} \Rightarrow \frac{puissance\ avec\ le\ CC}{Puissance\ avec\ le\ CA} = \frac{3.2.\sqrt{2}.E_p\sqrt{2}.I_L}{6.E_p.I_L} = 2$$

$$\boxed{\frac{Puissance\ avec\ le\ CC}{Puissance\ avec\ le\ CA} = 2} \qquad \text{(III-13)}$$

**Ainsi la puissance peut être augmentée de 100 % sur la même ligne à courant alternatif à circuit double, avec les mêmes pourcentages des pertes.**

- Les calcule en (a) et (b) ci-dessus, sont basés sur l'hypothèse que la tension continue qui cause la rupture d'un isolateur est égale à la valeur maximale (valeur crête). De récente étude indiquent que cette hypothèse est valide seulement dans de bonnes conditions atmosphériques. Dans le brouillard et la pollution atmosphérique, la tension continue de rupture pourra être au-dessous de la valeur crête de la tension alternative.

D'un autre coté, le niveau d'isolation actuel dépend aussi de la permission faites pour les surtensions interne que peut rencontrer durant l'opération d'allumage du système et ou les isolateurs doivent résiste avec sécurité.

Ces deux caractéristiques n'étaient pas prises en considération dans (a) et (b) et les facteurs $K_1$ et $K_2$ sont pris égaux.

Dans le système à très haute tension alternative, le niveau d'isolation est généralement basé sur les surtensions au moins 2,5 fois la tension efficace de fonctionnement.

Cependant dans le système CCHT, les expériences ont montrés que la surtension interne peut être réduite à moins de deux fois de la tension continue de fonctionnement.

Par exemple : le niveau d'isolation de la ligne de transmission CCHT de Stalingrad-Donbass, est fixé sur la base des surtensions de seulement 1,7 fois la tension continue de fonctionnement $\pm$ 400KV. [5]

En prenant en considération ces phénomènes , les calculs faits en (a) vont être reconsidérer en prenant ( $\frac{K_1}{K_2} = \frac{2.5}{2}$ ) et que le rapport de la tension continue de l'isolation sera de même valeur efficace de la tension alternative.

$$\text{Rapport} = \frac{Niveau\ d'isolation\ en\ CC}{niveau\ d'isolation\ en\ AC} = \frac{k_2 \frac{V_d}{2}}{E_p k_1}$$

Pour les mêmes puissances et pertes égales :

$V_d = 3.\sqrt{\frac{2}{3}} .E_P$ d'après a

Or

$$\frac{Niveau\ d'isolation\ \ en\ CC}{Niveau\ d'isolation\ \ en\ AC} = \frac{3.\sqrt{2}.2}{2.\sqrt{3}.2,5} = 0,98 \approx 1$$

$$\boxed{\frac{Niveau\ d'isolation\ \ en\ CC}{Niveau\ d'isolation\ \ en\ CA} \approx 1} \qquad \text{(III-14)}$$

Ainsi même si avec les hypothèses qui plaident contre le courant continu, le niveau de l'isolation d'une ligne à courant continu est le même que celui de la ligne à courant alternatif, mais celle-ci a seulement deux conducteurs au lieu de trois conducteurs nécessaires pour la transmission en courant alternatif.

### III- 2- 2) Fiabilité :

Soit à comparer trois circuits à courant continu avec deux systèmes à courant alternatif c'est à dire six conducteurs pour chacun des ces circuits.

La perte temporaire d'un conducteur pour le circuit a courant continu résulte seulement de

$\frac{1}{6}$ = 16,67 % ≈ 17% des pertes de la capacité de l'énergie transmise, alors que pour le circuit a courant alternatif ça résulte $de\ \frac{1}{2}$ = 50 % des pertes de la capacité de l'énergie transmise.

A noter que dans les systèmes alternatifs la perte dans les lignes à (TH ou THT) d'une phase provoque des défauts sur tout le système ce qui fait que, les relais de protection détectent ce défaut et ouvre les disjoncteurs d'où toute la ligne qui est mise hors service, contrairement aux lignes bipolaires en courant continu qui constitue chacune une ligne indépendante ce qui fait que la perte d'une ligne ne provoque pas la mise hors service de l'autre.

Ainsi les lignes à courant continu sont beaucoup plus fiables que celle en courant alternatif.

### III- 2- 3) Retour par le sol :

Le fait que le sol peut être utilisé comme conducteur de retour, ; temporairement ou de manière permanente est un grand avantage.

Ce dont on ne peut utiliser pour les systèmes à courant alternatif, a cause de l'association des effets inductifs, excepté quant cela est absolument nécessaire, comme dans le cas des rails électriques et même dans ce cas énormément de précaution doivent être prises.

L'utilisation du sol comme conducteur de retour pour les systèmes à courant continu a des limites d'interférences avec les circuits des rails électriques et la corrosion du blindage des câbles.

Cependant dans le cas ou ces problèmes sont affranchis, la terre peut être utilisée comme conducteur de retour pour la transmission de la puissance électrique.

### III- 2- 4) Stabilité :

Dans les lignes à courant alternatif, la stabilité dépend de la puissance transmise et de la longueur de la ligne.

Pour de grande ligne, il est nécessaire d'introduire des équipements intermédiaires stabilisant, tel que les capacités séries, réactances shunts et tout autre station de coupure intermédiaire. Ce qui augmente considérablement le coût de réalisation de la ligne.

### III- 2- 5) Facteur de puissance :

Dans cette comparaison, la puissance est prise égale à ($P_{al\,t} = \sqrt{3}\ E_L\ I_L$) mais en réalité elle est égale à ($\sqrt{3}\ E_L\ I_L.\cos\phi$)

Ainsi le rapport de la puissance continu est de la puissance alternative est augmenté d'avantage.

### III- 2- 6) Effet de couronne et interférence-radio :

Il est établit que le rapport entre les tensions critiques continues et alternatives d'apparitions d'effet couronne doit être au moins égale a la valeur crête du champ électrique ; puisque les pertes en courant alternatif augmentent plus rapidement qu'avec les hautes tentions continues.

Dans la comparaison considérer ci-dessus, les pertes par effet de couronne et les interférences radio sont supposée être de seulement $\frac{2}{3}$ de celle d'un système triphasé a courant alternatif, puisqu'il y a deux conducteurs en courant continu.

Ainsi si les pertes sont prises en considérations, la puissance continue peut être augmentée encore d'avantages.

Avec la haute tension (HT) et la très haute tension (THT), on observe que les pertes par effet de couronne et les interférence- radios dans une ligne à courant alternatif augmentent d'une façon plus rapide, comparé au courant continu, et les précautions spéciales ; telle qu'utiliser des conducteurs en faisceaux doivent être adoptés dans un système à courant alternatif en particulier, tandis qu'ils sont utilisés dans un système à courant continu équivalent.

### III- 2- 7) Effet de peau :

L'effet de peau dans un système à courant continu est complètement absent et désormais il y a une meilleure répartition et une uniformité dans la distribution de courant dans le conducteur et une meilleure utilisation de la surface est obtenue.

### III- 2- 8) Dimension des pylônes :

Le niveau d'isolation en courant continu pour la même puissance transmise à une hauteur inférieure que celle d'une ligne à courant alternatif correspondante, ainsi les dimensions déterminées sur des considérations purement électrique comme la distance de séparation entre deux conducteurs et les espaces dégagés pour un pylône ainsi que ses dimensions doivent être plus réduites.

Ainsi puisque la ligne à courant continu aura seulement deux conducteurs alors que celle en courant alternatif aura trois conducteurs ; les considérations mécaniques auront des réductions d'avantages.

La figure (III-3) montre que les résultats d'une étude faite en suède sur le dimensionnement des pylônes Conçus pour transporter $\pm$400 KV en courant continu ,sont les mêmes que ceux destiné à transporter une tension de 650 KV en courant alternatif et une même puissance de 2000 MW pour les deux lignes . [5]

| | **A** | **B** |
|---|---|---|
| Distance entre phases | 17.07 m | 10.97 m |
| Hauteur du support | 31.09 m | 22.25 m |
| Longueur de l'isolateur | 06.55 m | 03.66 m |

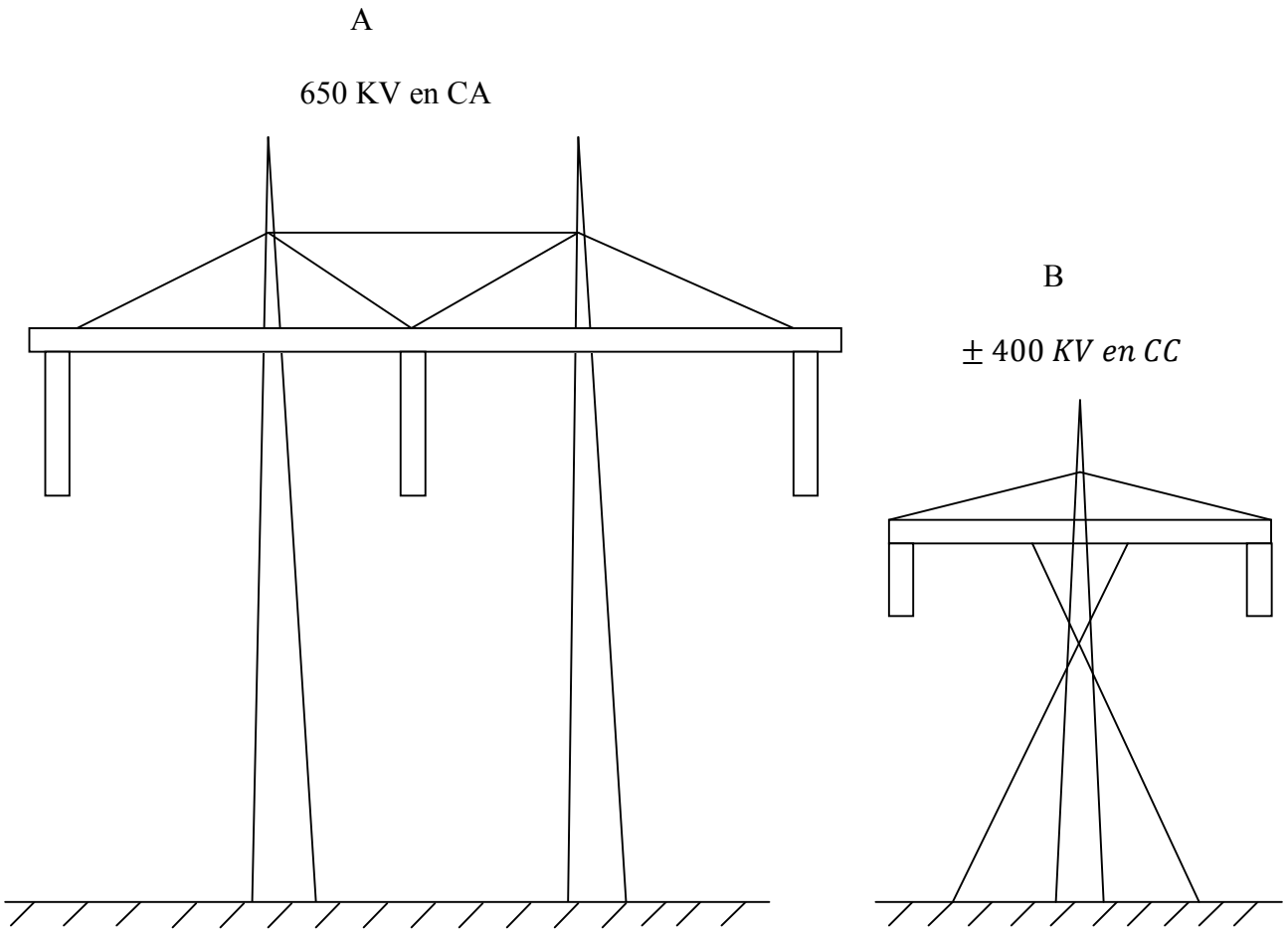



*Figure (III-3) : dimension relative aux pylônes en courant continu et en courant alternatif.* [5]

### III- 2- 9) Comparaison des capacités de transport des lignes en CA et en CC : [12]

| **Charge économique pour une ligne en CA** | | **Ligne équivalente en CC** | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **Avec même niveau l'isolation** | | **Avec même couloir occupé** | |
| KV | MW | KV | MW | KV | MW |
| 230 | 240 | $\pm 200$ | 400 | $\pm 300$ | 900 |
| 345 | 580 | $\pm 300$ | 900 | $\pm 500$ | 2500 |
| 500 | 1280 | $\pm 400$ | 1000 | $\pm 700$ | 4500 |
| 765 | 2700 | $\pm 600$ | 3600 | $\pm 1000$ | 8000 |

Pour une même tension nominale les lignes en CC conduisent à des investissements plus faibles, et à des constructions plus légères qu'en CA.

Mais le cout des stations de conversions terminales étant plus élevé, les couts totaux deviennent comparable pour la distance d'équilibre (600 à 800 km) .les liaisons en CC seront plus efficaces et moins couteuse que lorsque la distance de transport point à point augmente de plus, pour un même couloir occupé, une capacité de transport plus grande.

## III- 3) Les câbles :

Dans le cas des câbles souterrains, les avantages du courant continu sur le courant alternatif sont indiscutables.

En raison du champ unidirectionnel il n'y a pratiquement pas de courant de charge.

Le courant de charge en régime permanent pour un câble triphasé est de l'ordre de : [5]

2000 KVA / circuit/mile / à 132 KV.

5000 KVA / circuit / mile / à 220 KV.

15 000 KVA / circuit / mile / à 400 KV.

Il y a aussi une distance limite du câble au-delà, de laquelle il est nécessaire d'alimenter le courant de charge dans les points intermédiaire. [5]

Cette limite est la suivante

40 miles pour 132 KV.

25 miles pour 220 KV.

15 miles pour 400 KV.

La table suivant donne les pertes et les chutes de tension de 25 c/s et 16 c/s pour les systèmes de transmission en alternatif et continu de 10 MW par câble.

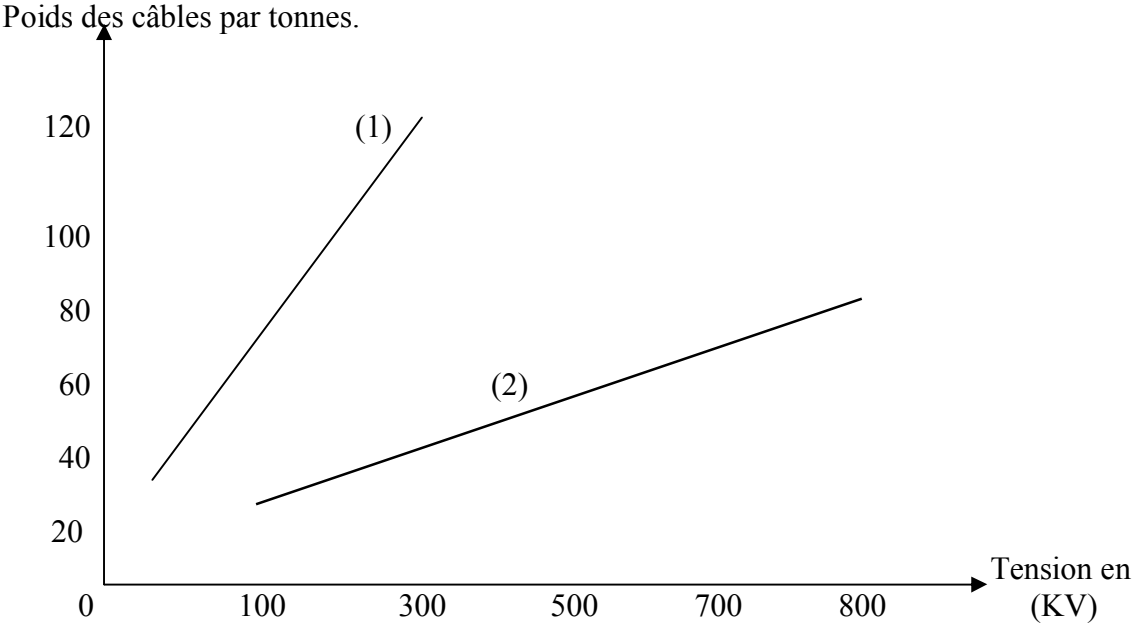
Exemple de la liaison qui existe entre l'ile de Gotland et la suède séparé par une distance de 100KM.[5]

| **Type du circuit** | **Fonctionnement normal** | **Perte de puissances en lignes en pourcentage de la puissance d'alimentation** | | **Chute de tension dans le câble en pourcentage de la tension d'alimentation** |
|---|---|---|---|---|
| | | **Par câble** | **Totale** | |
| Courant alternatif 25 $^{c}/_{s}$ | 45 KV<br>70 KV<br>100 KV | 17<br>10<br>08 | 37<br>20<br>28 | 17<br>07<br>03 |
| Courant alternatif 16 c/s | 45 KV<br>70 KV<br>100 KV | 17<br>09<br>07 | 37<br>29<br>27 | 17<br>07<br>02 |
| Courant continu | 100 KV | 02 | 10 | 02 |

Le courant continu nécessite seulement un câble de 75 $mm^2$ alors que le courant alternatif nécessite deux câbles de 75 $mm^2$ .

La table montre que la transmission en courant continu avec des câbles sous-marins est avantageuse. Le recours au courant continu dans les câbles sous-marins est non seulement une nécessité, mais aussi une solution économique. Ce mode est donc plus pratique même dans le cas des câbles souterrain.

La transmission a 50 c/s est impossible (la figure du tableau nous donne l'explication) il est donc approprie et économique d'utiliser le courant continu en transport d'énergie par câbles sous-marin, puisque les stations de compensation ne peuvent pas être installé ou bien leur installation revient très chère ce qui fait que l'utilisation de l'alternatif devient onéreuse.




*(1) : poids des câbles en fonction de la tension pour les systèmes de transport en CA (triphasé).*

*(2) : poids des câbles en fonction de la tension pour les systèmes de transport en CC.*

*Figure (III-4) : poids des câbles*. [5]

## III- 4) Interconnexion du système à fréquence différente :

Puisque le problème de fréquence ne se pose pas pour les liaisons à courant continu, ce qui nous permet d'interconnecter plusieurs réseaux électriques sans aucun inconvénient. En plus ces liaisons à courant continu offrent la possibilité d'interconnecter des liaisons alternatifs qui fonctionnent à différentes fréquences en passant par les liaisons dites stations dos-a-dos.

Cette qualité sera encore plus utile dans les échanges internationaux de puissance, comme c'est le cas de la liaison entre la FRANCE et L'ANGLETERRE ainsi que plusieurs projets similaires dans le monde.

## III- 5) Générateurs :

Dans certains cas, les générateurs désignés pour la puissance hydraulique peuvent dans l'avenir être employé principalement pour la transmission en courant continu dans les régions habitées. Dans ces cas, la technologie des générateurs ne sera pas déterminée par les considérations de stabilité du système et désormais les réactances synchrones et transitoires ainsi les rapports de court-circuit et les moments d'inertie des générateurs peuvent avoir des valeurs nominales, et la technologie des générateurs peut admettre des grandes valeurs du facteur de puissance.

Les enroulements d'amortisseurs doivent supporter la chaleur causée par les harmoniques générés par le fonctionnement des redresseurs .d'autre coté, la production d'énergie est possible a des fréquences différentes de la fréquence industrielle, ce qui est avantageux pour les centrales hydro-électrique en variant le débit de l'eau.

## III- 6) Régulation :

En raison de la commande par gâchette des redresseurs, la ligne à courant continu peut fonctionner avec la régulation a courant continu, ou la régulation à tension constante et en exportant leurs avantages, avec seulement un contrôle de gâchettes convenables.

## III- 7) Limites de la transmission en courant continu à haute tension :

- **Transformation :**

En courant continu, il n'y a pas de méthode facile de transformation de la tension comme en alternatif, pour cette raison le courant alternatif est universellement utilisé dans la distribution de l'énergie électrique .pour la transmission sur des grande distance, la transformation pourrait être obtenue du coté alternatif de la station de conversion .ainsi l'absence de moyens faciles de transformation ne constitue pas un inconvénient majeur.

- **Puissance réactive :**

Pour le fonctionnement de l'onduleur, il est nécessaire de faire fonctionner celui-ci à un facteur de puissance élevé en raison du besoin de puissance réactive .cette puissance réactive doit être fournie du coté alternatif, soit par des condensateurs, soit par des compensateurs synchrones ou soit par des compensateurs statiques.

Le besoin de la puissance réactive en régime permanent des onduleurs est de l'ordre de 40% à 50% de la puissance active, mais par rapport au régime transitoire, il est conseillé d'avoir cette puissance réactive disponible en cas de besoin, car la puissance demandée dans ce cas peut atteindre 75% de la puissance active.

- **Interruption du courant** :

L'absence de facilitée de coupure du courant continu, est la principale contrainte des systèmes à courant continu .le courant alternatif lui passe par zéro chaque demi période et cet avantage est pris en considération dans la conception des appareils de coupures et de commutations, le seul problème est d'empêcher le réamorçage.

Dans les liaisons de transmission en courant continu, aucun courant nul n'existe en pratique, et toute l'énergie du circuit devrait être dissipée avant l'interruption du courant par moyen de dispositif de coupure très sophistiqués. cependant la commande complète inclus l'interruption du courant, en utilisant les gâchettes des convertisseurs.

En fin l'interruption du courant ne constitue pas réellement un obstacle en raison de faible interconnexion.

## III – 8) Comparaison des couts en fonction de la distance :

On peut tracer le graphe qui représente qualitativement le cout du kilomètre des installations en courant alternatif et en courant continu, en fonction de la longueur de l'installation dans le cas de transport par lignes aériennes.

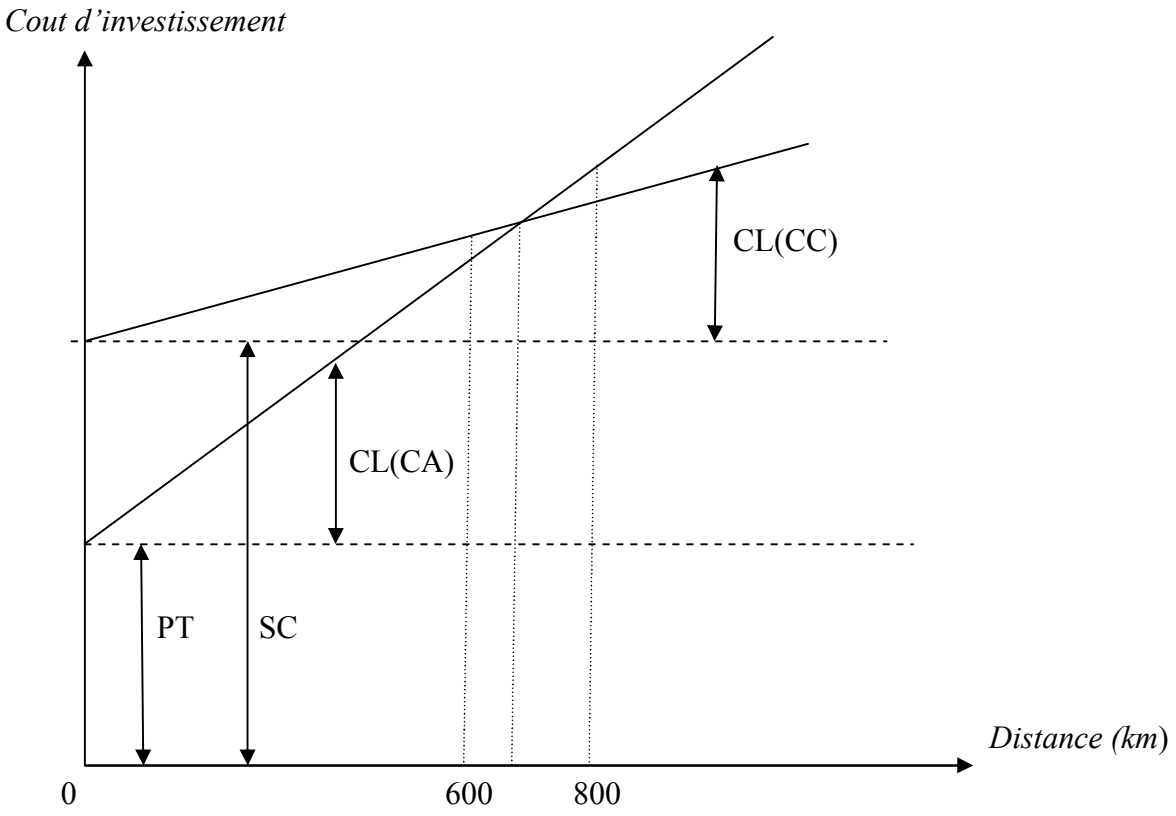



***Figure (III-5) : le cout d'investissement d'une ligne en CC et une ligne en AC en fonction de la distance***

*d : distance d'une liaison.*

*PT : cout d'investissement du poste de transformation.*

*SC : cout d'investissement des stations de conversion.*

*CL (CA) : cout de la ligne à courant alternatif.*

*CL (CC) : cout d'investissement de la ligne à courant continu.*

*CT (CA) : cout total de la ligne à courant alternatif.*

*CT (CC) : cout total de la ligne à courant continu.*

## III- 9) Tableau récapitulatif :

Voici le tableau qui récapitule d'une façon générale les avantages et les inconvénients relatifs aux modes de transport d'énergie électrique en courant alternatif (CA) et en courant continu (CC).

| | Avantages | Inconvénients |
|---|---|---|
| **Courant Alternatif (CA)** | - Permet l'utilisation de transformateur pour élever et baisser la tension.<br>- Facilite la coupure des courants du fait de leur passage par zéro, deux fois par période c'est-à-dire chaque 0,01 seconde au moyen des disjoncteurs.<br>- Production simple par les alternateurs qui sont plus fiables que les génératrices à courant continu.<br>- L'utilisation du triphasé qui forme un système équilibré, facilite la production et l'utilisation | - Difficultés d'interconnexions de plusieurs réseaux qui nécessitent le réglage de la tension et de la fréquence.<br>- Implique des effets inductifs et Capacitifs qui sont pénalisant et courant de charge dans le cas de l'utilisation des câbles.<br>- Implique l'effet de peau, c'est-à-dire la concentration du courant dans la périphérie des câbles, d'ou la nécessité de câbles et de lignes adaptées.<br>- La limite de la puissance maximale transportable.<br>- Les pertes qui sont dues aux résistances et aux inductances. |
| **Courant Continu (CC)** | - Pas d'effet réactif donc pas de puissance réactive pénalisante.<br>- Pertes réduite à celle par effet joule (perte résistive).<br>- Facilite l'interconnexion des réseaux il suffit d'avoir partout la même tension.<br>- Pas d'effet de peau, les câbles et lignes sont plus simples, donc moins chers.<br>- Pas de limite à la puissance maximale transportable (en théorie).<br>- Possibilité de faire transité la puissance dans une liaison dans les deux sens il suffit juste d'agir sur les angles de retard a l'amorçage cote redresseur et d'avance cote onduleur. | - Difficulté de coupure de courant continu, d'ou des dispositifs de coupure performante et sophistiqué donc plus cher.<br>- Station de conversion très couteuse<br>- L'impossibilité d'élever ou d'abaisser la tension qui est donc constante sur toute la ligne.<br>- Problème de corrosion lorsque la terre ou la mer sont utilisés pour le retour du courant de liaison.<br>- Les ouvrages de transport à courant continu sont plus sensibles à la pollution atmosphérique. |

**III-10) Conclusion :**

Le choix entre le transport de l'énergie électrique en courant continu (CC) ou en courant alternatif (CA) est très difficile à faire pour les compagnies d'électricité, car il dépend de plusieurs facteurs qui sont :

- la puissance à transporter.
- la distance sur laquelle on veut transporter une puissance donnée.
-le type de liaison à utiliser soit par lignes aériennes ou câbles souterrains.
-le choix de la tension de la liaison.

A tous ces facteurs on ajoute l'aspect économique qui est très important.

On déduit que dans le domaine de transport de l'énergie électrique les deux formes du courant ne peuvent que coexister, car on ne peut les séparer ou se surpasser d'aucune d'elle.

## Conclusion générale :

Les transmissions de l'énergie électrique en courant alternatif et en courant continu à chacune son propre champ de développement, et il n'y pas de compétition entre le courant alternatif (CA) et le courant continu (CC) .En fait les deux formes de transmission sont complémentaire, chacune doit être développée et améliorée, pour donner un meilleur rendement dans l'exploitation.

A travers cette étude, il est clair que la transmission de l'énergie électrique en courant continu à haute tension (CCHT) a connue des progrès grâces aux développements de l'électronique de puissance et la transmission des signaux par fibre optique et aussi le développement des microprocesseurs .qui ont des impactes importants sur ce type de transmission.

Une comparaison technico-économique entre les solutions de transport en CC ou bien en CA est toujours difficile, par la complexité et le grand nombre de facteurs qui influencent les couts .tout de même pour le transport à grande distance ,soit par lignes aériennes ou câbles souterrains, un indicateur d'efficacité est établi ; une distance limite au delà de la quelle l'utilisation du CC est beaucoup plus avantageuse au point de vue économique ,actuellement elle est de 750 Km pour les lignes aériennes et de 40Km pour les câbles souterrains ou sous-marins.

Pour trancher en faveur de l'une ou l'autre forme du courant à utiliser pour la transmission de l'énergie électrique, une étude essentiellement technique et économique doit être réalisée.

Enfin nous espérons que ce modeste travail va contribuer à enrichir la bibliothèque et servira de document pour les générations à venir.

[1] : « lignes et réseaux électriques »

J.C.Sabonnadiére et N.Hadj Saïd

Edition : LAVOISIER 2007

[2] : « électrotechnique »

Théodore Wildy .3éme édition

Edition : Presses de l'université de Laval

[3] : « réseaux et système électrique »

C.Preve.

Edition : Direction ensemble service et application Juin 1985.

[4] : « High voltage direct current power transmission «

Colin Adamson and N.G. Huigorami.

Edition : Garraway limited London.

[5] : « Cours d'électrotechnique » (3ème partie.)

Edgar Gillon.

Edition : Cabay Louvain la neuve 1981.

[6] : Thèse d'ingénieur « L'étude et modélisation de l'effet Couronne dans les lignes à haute tension ».U.M.M.T.O

Encadré par Mr : N. MUFIDZADA

[7] : technique d'ingénieur « Transport d'énergie électrique en courant continu à haute tension CCHT »

Auteur : Eric Joncquel

[8] : « Transport en courant continu à haute tension et des applications en France «

Auteur : Alain Lacoste.

[9] : technique d'ingénieur « fonctionnement des liaisons à courant continu haute tension »

Auteur : Eric Joncquel

[10] : « Etude dynamique d'un système de puissance à liaison CCHT multiterminale

Modélisation-Contrôle-Stabilité »

Thèse de magister.

Mr K. Hadj Saïd

[11] : « Electrical power systems design and analysis"

Auteur : EL HAWARY ; M.E

Edition : Reston Publishing Company; 1983

[12] : technique d'ingénieur « l'effet couronne sur les réseaux électriques aériens »

Auteur : Claude Gary.