

Problématique:

L'énergie électrique est acheminée vers les consommateurs par des liaisons en réseaux électriques, sur des distances plus au moins grandes. L'ensemble de ces réseaux remplit, hiérarchiquement, les fonctions de transport, d'alimentation, et de distribution de l'énergie électrique. Pour des raisons de stabilité, de continuité de service et d'optimisation, les systèmes électriques régionaux, appartenant à un même territoire ou à des territoires voisins différents, sont interconnectés par des lignes (liaisons) en haute tension qui peuvent être, en fonction de l'envergure des territoires, de plus ou moins grandes longueurs.

Ces liaisons permettent, donc, de mettre en commun les ressources en énergie électrique des régions ou des pays frontaliers afin de palier à des éventuels problèmes de déséquilibre et de déficit.

Il est évident, donc, qu'on doit rechercher pour ces liaisons des performances conformes aux exigences de leurs fonctions. Dans ce sens, des problèmes techniques et économiques se posent.

En effet, soumises à des effets de flux de puissances assez importants, ces liaisons doivent faire, dans un premier temps, l'objet de choix optimal de leurs paramètres de système, et, dans un deuxième temps, d'un contrôle continu de leurs paramètres de régime.

L'un des indices de la performance de la liaison est la bonne distribution de la tension. Cette dernière peut être parfaitement contrôlée par la distribution rationnelle de la puissance réactive. Tel est le problème posé dans ce travail.

L'analyse faite dans ce travail est organisée en trois chapitres :

- 1- Traitement des données et description analytique :  
Présentation, description et comparaison des différents modèles de la ligne. Choix du modèle adéquat et données essentielles ;
  
- 2- Analyse des régimes compensés de la ligne : différents aspects caractéristiques de la performance de la liaison. Evaluation des indices et des paramètres ;
  
- 3- Effets de l'interconnexion sur la stabilité du générateur : analyse et évaluation des effets de perturbation (courts circuits) sur la stabilité du générateur (source).

## **Introduction :**

Les réseaux servent d'interfaces entre les moyens de production et les consommateurs. Ils permettent non seulement de transporter et de distribuer l'énergie électrique mais aussi de diminuer les dépenses d'investissement de production.

Le besoin, toujours croissant, en consommation de l'énergie électrique engendre le souci, plus que jamais actuel, de faire augmenter la puissance de transit ; laquelle se verra alors, accompagnée par l'élévation du niveau de tension de transport. Donc la présence d'un réseau plus évolué « réseau en THT » est justifiable.

En outre, ce réseau ne nécessite, chaque année, que la construction d'un minimum d'ouvrages, malgré la croissance de la consommation. Ce souci conduit à rechercher les plus grandes performances techniques du réseau ; notamment à essayer de faire passer un maximum de puissance avec un minimum de pertes de tension par cet ouvrage.

Les problèmes de minimisation de la quantité d'ouvrages se heurtent naturellement aux problèmes de la tenue de la tension sur le réseau et de la consommation importante de la puissance réactive, d'où la nécessité de compensation du réactif au niveau des consommateurs.

Par ailleurs, le réglage de la tension au niveau du producteur est réalisé ; par des régulateurs de tension agissant sur le courant d'excitation des alternateurs, ou par les prises des transformateurs et autotransformateurs qui permettent de régler la tension dans un intervalle de 15% environ.

**PREMIER CHAPITRE :**

**TRAITEMENT DES DONNEES  
ET DESCRIPTION ANALYTIQUES**

**1.1 Description du modèle :**

On se propose d'étudier et d'analyser un modèle de ligne de longueur allant jusqu'à **1000km**. La charge est prise variable en deux paliers entre les limites minimale et maximale, (**Fig1.1**). Le choix des paramètres du système de la ligne est fait suite à l'étude comparative, faite ci-dessous, de deux modèles de ligne à phase en faisceau; l'un sous une tension de  **$U_N = 220kv$** ; et l'autre sous une tension de  **$U_N = 400kv$** .

Il est vrai que pour les longueurs de  **$\ell = 1000km$**  les tensions utilisées sont, en principe, supérieures à **220kv**; mais dans ce travail, cette dernière est prise en comparaison seulement dans le souci de mettre en évidence l'effet déterminant du niveau de tension à utiliser. D'une manière générale, la section des conducteurs de la phase pour les niveaux de tensions considérés se détermine suite à une analyse technico-économique. On peut, également, utiliser la méthode des intervalles économiques; qui consiste à choisir la section à partir du courant maximal mais telle que les dépenses réduites  **$D_r$**  soient minimales. Dans ce cas les dépenses réduites s'expriment ;

$$D_r = a + b \cdot F + k \cdot \frac{I_{max}^2}{F} = f(I_{max}, F)$$

Ainsi; pour une valeur donnée (intervalle) du courant, on peut définir, en fonction de  **$F$**  (section), plusieurs valeurs de  **$D_r$**  ;

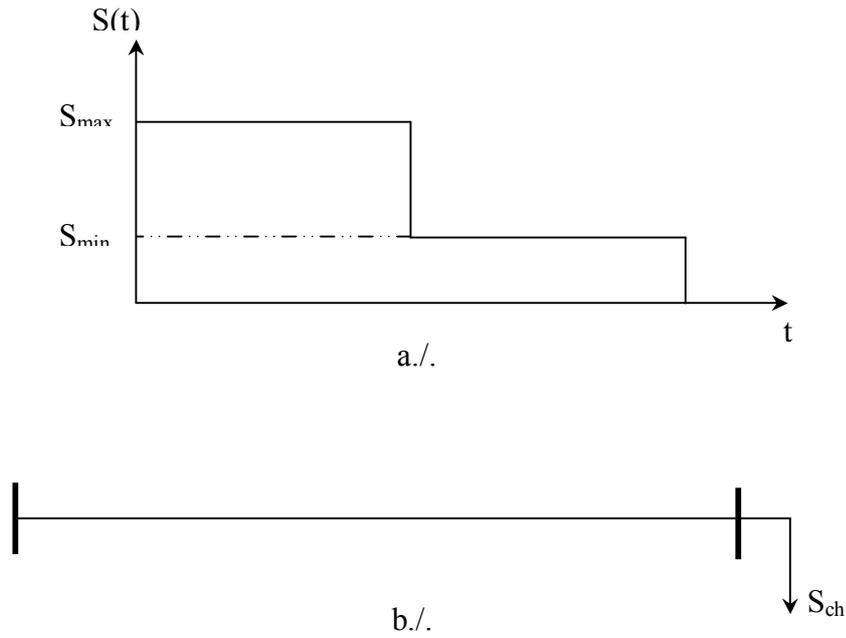


Fig.1.1. Graphique de charge (a), et schéma de principe (b).

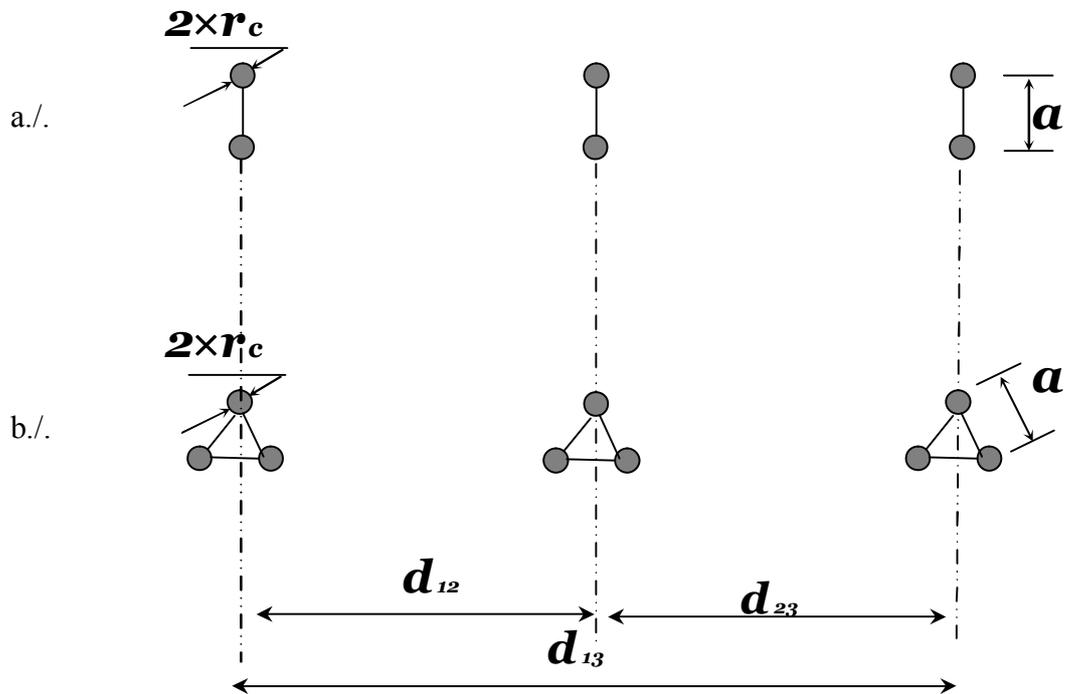


Fig.1.2. Modèles de ligne : Configuration de la phase

a./  $U_N=220kv$

b./  $U_N=400kv$

Tableau 1.1.

$U_N$		<b>220kv</b>	<b>(220-400)kv</b>	<b>400kv</b>
<b>Paramètres</b>				
<b>Données</b>	<b><math>n</math></b>	1	2	3
	<b><math>F</math> [mm<sup>2</sup>]</b>	600	2×600	3×600
	<b><math>2 \times r_c</math> [mm]</b>	31.5	31.5	31.5
	<b><math>d</math> [m]</b>	10	10	10
	<b><math>a</math> [cm]</b>	40	40	40
<b>Paramètres calculés</b>	<b><math>D_m</math> [m]</b>	12.6	12.6	12.6
	<b><math>d_m</math> [cm]</b>		40	40
	<b><math>R_{\text{éq}}</math> [cm]</b>	1.575	7.937	13.608
	<b><math>x_o</math> [Ω/km]</b>	0.217	0.162	0.144
	<b><math>b_o</math> [Ω<sup>-1</sup>/km]</b>	$5.222 \times 10^{-6}$	$6.889 \times 10^{-6}$	$7.708 \times 10^{-6}$
	<b><math>\alpha_o</math> [° / km]</b>	0.060	0.060	0.060
	<b><math>Z_c</math> [Ω]</b>	203.85	153.60	136.68
	<b><math>P_c</math> [MW]</b>	237.429	220-315.112 400-1041.694	1170.60
	<b><math>\xi = \frac{S_N}{P_c}</math></b>	1.348	220-1.016 400-0.768	0.683

on choisira alors la valeur de  $F$  qui correspond à  $D_{rmin}$ . Dans ce travail, on procède par comparaison de deux modèles (Fig1.2).

Pour le modèle sous tension **220kv**, on considère une ligne en faisceau de deux conducteurs ( $n=2$ ) et de section  $F=2 \times 600 \text{ mm}^2$ . De même, le modèle à  $U_N=400 \text{ kv}$  est choisi tel que  $n=3$  et  $F=3 \times 600 \text{ mm}^2$ .

## 1.2 Détermination des paramètres de la ligne :

Une ligne peut être définie par ses paramètres primaires et secondaires. Les paramètres primaires se calculent comme suit :

a./ La résistance active ( $r_o$ ) qui exprime l'effet joule au passage du courant dans le circuit longitudinal de la ligne ;

$$r_o = \frac{\varphi}{F} = \frac{1}{\gamma \cdot F}$$

Où ;  $r_o, \varphi, \gamma, F$  - respectivement, résistance, résistivité, conductivité, et section de conducteur.

b./ La réactance linéique ( $x_o$ ) est engendrée par le champ magnétique variable établi à l'intérieur et l'extérieur de conducteur. Elle exprime l'effet de la résistance au passage du courant du circuit longitudinal de la ligne engendrée par la f.c.e.m auto-induite par ce dernier ;

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

Où ;  $D_m = \sqrt[3]{d_{12} \cdot d_{13} \cdot d_{23}}$  - distance moyenne géométrique entre les phases,  $R_{eq} = \sqrt[n]{d_m^{n-1} \cdot r_c}$  - rayon moyen équivalent de la phase en faisceau,  $d_m = \sqrt[n]{\prod_{j \neq 1}^n a_{1-j}}$  - distance géométrique moyenne entre les conducteurs d'une phase,  $n$  - nombre de conducteurs dans une phase.

c./ La susceptance ( $b_o$ ) où la capacité linéique ( $c_o$ ) de la ligne qui caractérise l'effet du champ électrique autour du conducteur et particulièrement entre phase et la terre. Elle exprime les courants de fuites capacitifs (de déplacement) entre la ligne et la terre et, par ce fait, évalue la puissance réactive propre de la ligne du circuit transversal.

$$b_o = \omega \cdot l_o = \frac{7.58 \times 10^{-6}}{\log \frac{D_m}{R_{eq}}}$$

d./ La conductance linéique qui mesure les pertes de puissance active dans le circuit transversal de la ligne. Ces pertes sont dues aux courants de conduction dans le milieu isolant (très faibles et souvent négligés) où à l'effet de couronne engendré par la haute tension.

$$g_o = \frac{\Delta P_{cour}}{U_N^2}$$

Les formules de calcul de ces paramètres peuvent être trouvées, dans diverses documentations spécialisées utilisées.

En général, quand la section du conducteur augmente (ou  $R_{eq}$  augmente) la résistance et la conductance diminuent considérablement ; de ce fait, dans ce travail on suppose que  $r_o \approx g_o \approx 0$ . Ainsi, on peut écrire ;

$$Z_o = r_o + jx_o = jx_o$$

$$Y_o = g_o + jb_o = jb_o$$

Les paramètres linéiques secondaires de la ligne sont définis, en général, suite aux descriptions de processus ondulatoires à partir des équations des lignes de transport à grande distance, pour lesquelles l'effet de la répartition des

paramètres devient déterminant. Ces paramètres dépendent de ceux primaires et se définissent dans ;

**e./** Le facteur complexe linéique d'onde ( $\gamma_o$ ), qui définit, en même temps, l'amortissement du vecteur considéré et sa déviation (phase) pendant la propagation de l'onde électromagnétique le long de la ligne,

$$\gamma_o = \sqrt{Y_o \cdot Z_o} = \beta_o + j\alpha_o$$

où ;  $\beta_o [1/km]$  -facteur d'amortissement.  $\alpha_o [rd/km]$  ou  $\alpha_o [^\circ/km]$  -facteur de phase,

**f./** L'impédance caractéristique d'onde, qui dépend de la configuration des phases,

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z_o}{Y_o}}$$

**g./** La vitesse ( $v$ ) et la longueur d'onde ( $\lambda$ );

$$v = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega}{\alpha_o}$$
$$\lambda = v \cdot t = \frac{\omega}{\alpha_o} \cdot T = \frac{2\pi}{\alpha_o}$$

dans les cas considérés ( $r_o \approx g_o \approx 0$ ) on peut écrire,

$$\gamma_o = \beta_o + j\alpha_o = j\alpha_o$$
$$Z_c = \sqrt{\frac{r_o + jx_o}{g_o + jb_o}} = \sqrt{\frac{x_o}{b_o}}$$

Les données concernant les modèles de la ligne à comparer ; ainsi que les résultats de calcul des paramètres sont présentés dans le **tableau 1.1.**

### **1.3 Modèles mathématiques de la ligne électrique:**

Les équations de la ligne sous leurs formes générales s'expriment;

$$U_1 = U_2 \cdot \text{ch} \gamma_{ol} + \sqrt{3} Z_c \cdot I_2 \cdot \text{sh} \gamma_{ol}.$$

$$I_1 = \frac{U_2}{\sqrt{3} Z_c} \cdot \text{sh} \gamma_{ol} + I_2 \cdot \text{ch} \gamma_{ol}.$$

Dans ces expressions la longueur est comptée à partir de l'extrémité de la ligne, où la tension et le courant sont supposés être donnés. Ces équations représentent le premier modèle mathématique de la ligne ; ses coefficients sont des fonctions hyperboliques.

La ligne peut être représentée, également, par

**a. un quadripôle:** où les relations entre les grandeurs tension-courant sont exprimés comme suit,

$$U_1 = A \cdot U_2 + \sqrt{3} B \cdot I_2.$$

$$I_1 = \frac{C}{\sqrt{3}} \cdot U_2 + D \cdot I_2.$$

où; les constantes du quadripôle, par comparaison au modèle (1.10) s'expriment;

$$A = \text{ch}\gamma_0 l$$

$$B = Z_c \cdot \text{sh}\gamma_0 l$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \cdot \text{sh}\gamma_0 l$$

$$D = A = \text{ch}\gamma_0 l$$

Pour une ligne sans pertes actives ;

$$A = \text{cos}\alpha_0 l$$

$$B = jZ_c \cdot \text{sin}\alpha_0 l$$

$$C = j\frac{1}{Z_c} \cdot \text{sin}\alpha_0 l$$

$$D = A$$

b. Des admittances propres et mutuelles :

$$U_1 = \frac{-Y_p}{-Y_p + Y_m} \cdot U_2 + \frac{\sqrt{3}}{Y_m} \cdot I_2$$

$$I_1 = \frac{-Y_p + Y_m}{\sqrt{3} \cdot Y_m} \cdot U_2 + \frac{-Y_p}{Y_m} \cdot I_2$$

Où;  $Y_p = Y_{11} = Y_{22}$  - admittances propres,  $Y_m = Y_{12} = Y_{21}$  - admittances mutuelles,

$$Y_p = \frac{1}{Z_c \cdot \text{tg}\alpha_0 l}$$

$$Y_m = \frac{1}{Z_c \cdot \text{sin}\alpha_0 l}$$

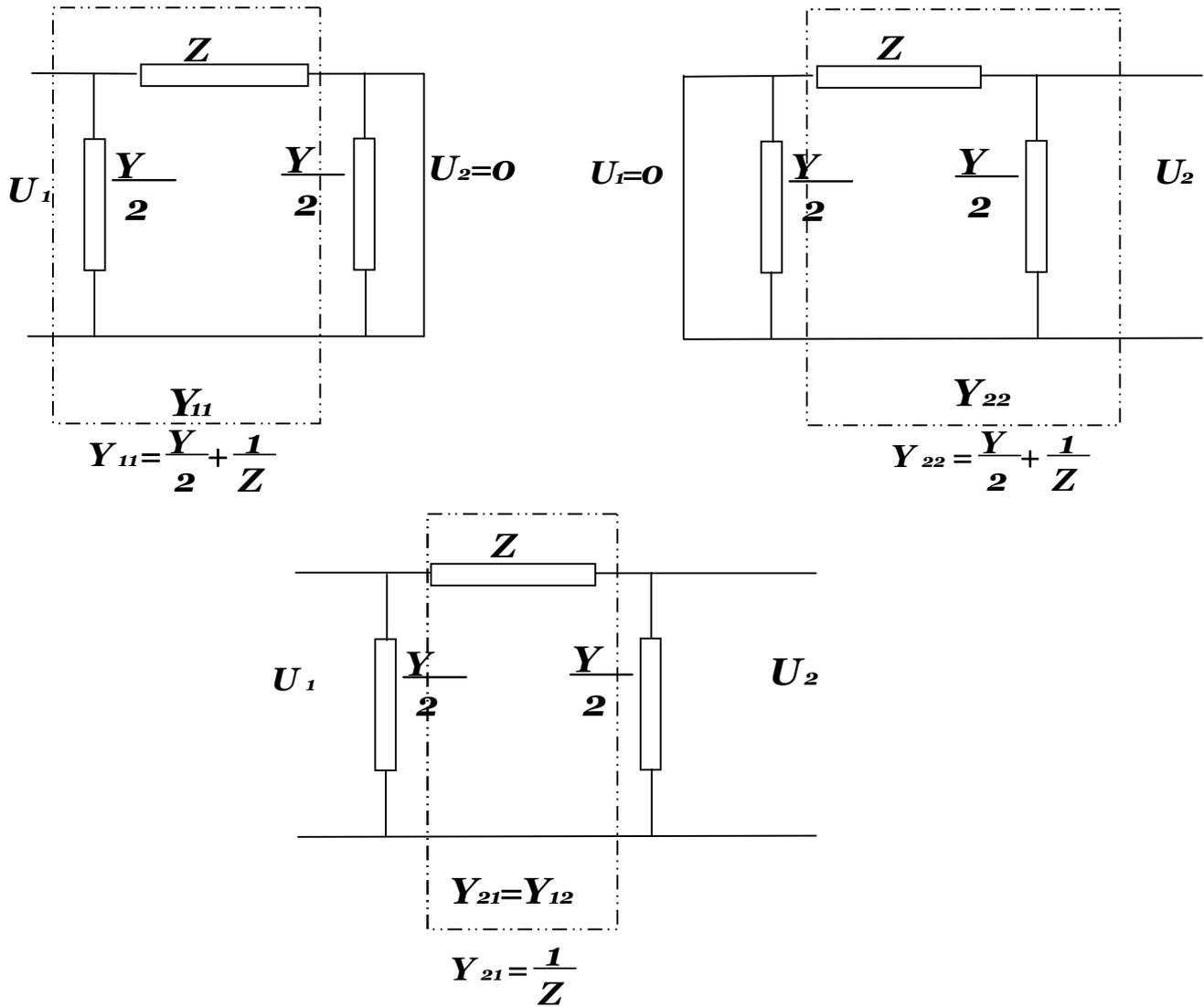


Fig.1.3. Les admittances propres et mutuelles de la ligne

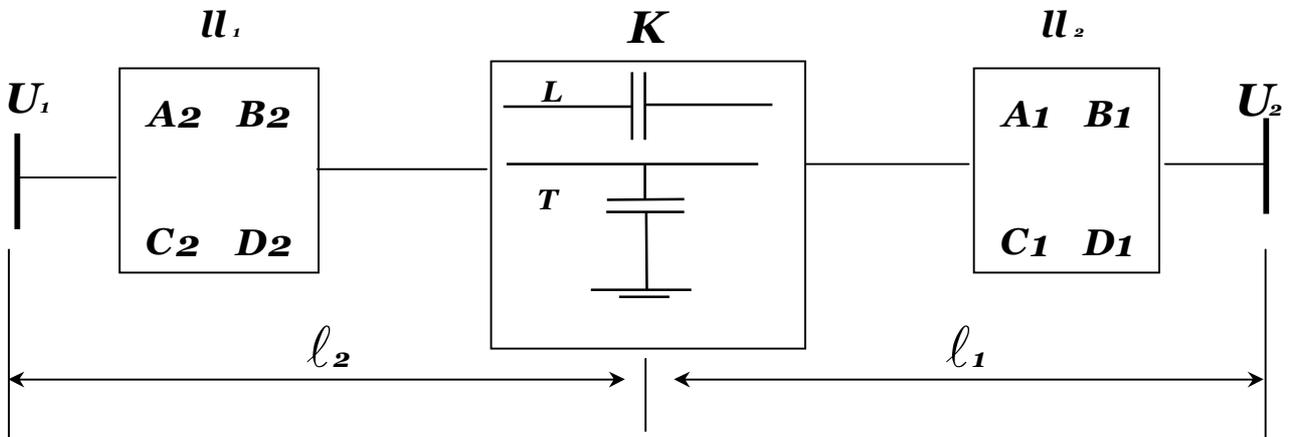


Fig.1.4. Représentation globale de la ligne avec compensation

c. Un schéma en  $\Pi$ : Dans ce cas, on peut définir;

$$U_1 = \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot U_2 + \sqrt{3} \cdot Z \cdot I_2.$$

$$I_1 = \left(2 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot \frac{Y}{2\sqrt{3}} \cdot U_2 + \left(1 + \frac{Z \cdot Y}{2}\right) \cdot I_2.$$

Où;

$$Z = Z_c \cdot \text{sh} \gamma_0 l$$

$$Y = \frac{2}{Z_c} \cdot \text{th} \frac{\gamma_0 l}{2}$$

Pour une ligne idéale,

$$Z = Z_c \cdot \sin \alpha_0 l$$

$$Y = \frac{2}{Z_c} \cdot \text{tg} \frac{\alpha_0 l}{2}$$

### 1.3.1 Introduction de l'élément compensateur :

Il est jugé plus pratique de modéliser la ligne par un quadripôle. Lors de l'insertion des batteries à une distance  $x$  de l'extrémité, la ligne peut être représentée par la matrice globale  $L$ .

$$L = [A \quad B ; C \quad D],$$

définie par le produit de trois matrices composantes, (Fig1.4);

$$L = u_1 \times K \times u_2.$$

Où;

$$\mathbf{u}_1 = [A_1 \quad B_1 ; C_1 \quad D_1 ]$$

$$\mathbf{u}_2 = [A_2 \quad B_2 ; C_2 \quad D_2 ]$$

$$\mathbf{K} = [A_K \quad B_K ; C_K \quad D_K ]$$

Pour une insertion longitudinale de la batterie de condensateurs (BC);

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_L = [A_L \quad B_L ; C_L \quad D_L] = \begin{vmatrix} 1 & -j\mathbf{x}_c^* \\ 0 & 1 \end{vmatrix} \quad \blacksquare$$

Pour une insertion transversale de la batterie de condensateurs;

$$\mathbf{K} = \mathbf{K}_T = [A_T \quad B_T ; C_T \quad D_T] = \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ j\frac{1}{\mathbf{x}_c^*} & 1 \end{vmatrix} \quad \blacksquare$$

Ainsi, conformément aux expressions (1.12)' appliquées aux matrices  $\mathbf{u}_1$ , et  $\mathbf{u}_2$ , l'expression (1.18) permet, en tenant compte de (1.19) et (1.20), d'écrire ;

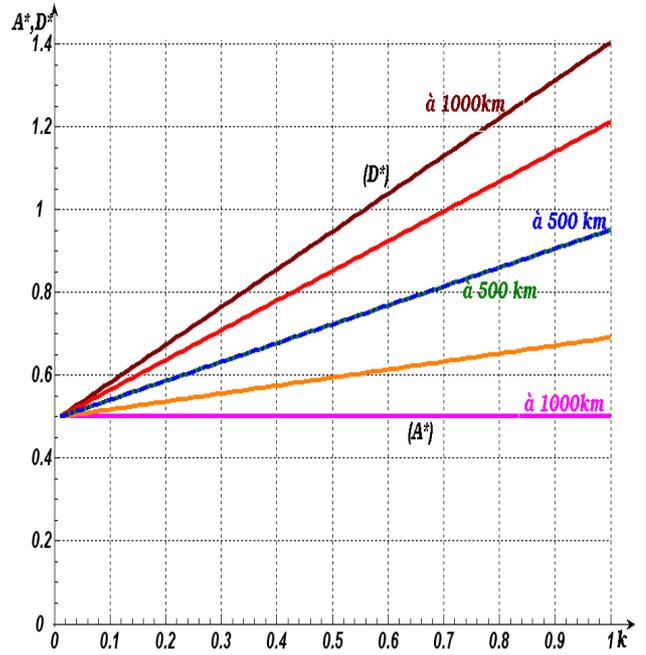
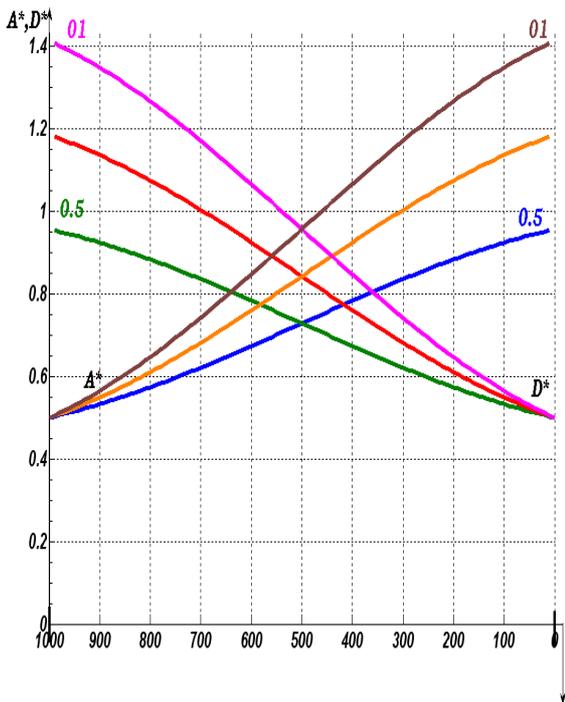
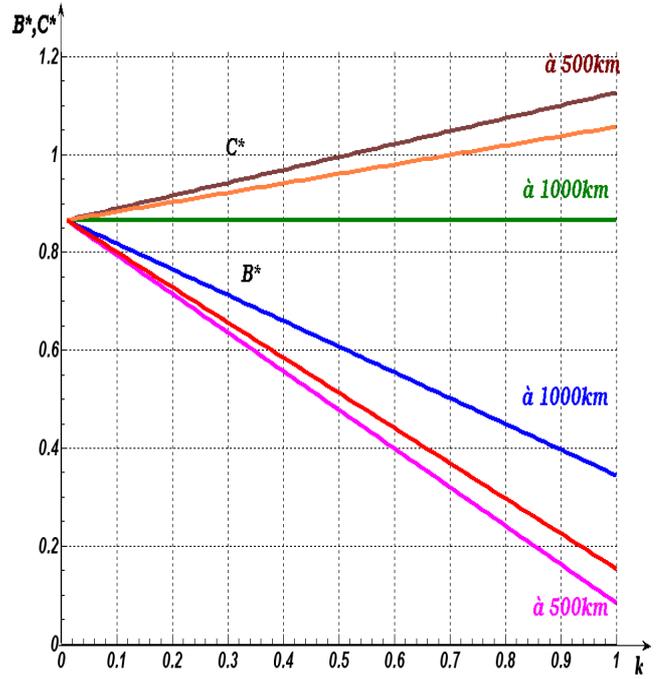
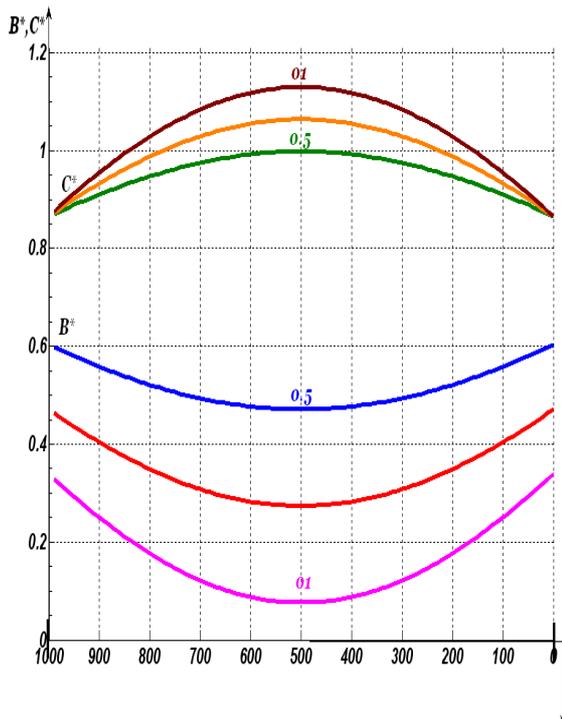


Fig.1.5. Variation des constantes  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$ , et  $D^*$  en fonction de lieu d'installation et degré de compensation

Pour une insertion longitudinale,

$$\begin{aligned}
 A^* &= \cos\alpha_{ol} + \mathbf{x}_c^* \cdot \sin\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1} \\
 B^* &= j(\sin\alpha_{ol} - \mathbf{x}_c^* \cdot \cos\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1}). \\
 C^* &= j(\sin\alpha_{ol} + \mathbf{x}_c^* \cdot \sin\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1}). \\
 D^* &= \cos\alpha_{ol} + \mathbf{x}_c^* \cdot \cos\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1}
 \end{aligned}$$



et, pour une insertion transversale;

$$\begin{aligned}
 A^* &= \cos\alpha_{ol} - \frac{1}{\mathbf{x}_c^*} \cdot \cos\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1}. \\
 B^* &= j(\sin\alpha_{ol} - \frac{1}{\mathbf{x}_c^*} \cdot \sin\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1}). \\
 C^* &= j(\sin\alpha_{ol} + \frac{1}{\mathbf{x}_c^*} \cdot \cos\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1}). \\
 D^* &= \cos\alpha_{ol} - \frac{1}{\mathbf{x}_c^*} \cdot \sin\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1}.
 \end{aligned}$$



Où ;  $B^* = B/Z_c$ ,  $C^* = C \cdot Z_c$ ,  $A^* = D^* = A$ ,  $\mathbf{x}_c^* = k \cdot \mathbf{x}_o \cdot l / Z_c$ ,

$k$  - évalue la quantité  $\mathbf{x}_c$  par rapport à la réactance de la ligne.

A l'aide des expressions (1.21) et (1.22), on peut définir l'effet du lieu d'installation du compensateur sur les paramètres globaux de la ligne ; ainsi que celui de la grandeur  $\mathbf{x}_c^*$  à insérer. Pour l'exemple on prend le cas correspondant au faisceau  $n=3$  et  $U_N=400kv$  (voir Tb.1.1).

La variation des constantes  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$ , et  $D^*$  en fonction de la position du compensateur série pour  $k \in (0.5 \div 1)$ , et de  $k$  pour la position moyenne  $l/2$  est représentée par la Fig.1.5, pour une insertion longitudinale.

On peut constater que, pour le cas considéré, l'installation des batteries séries au milieu de la ligne permet d'obtenir un meilleur effet sur les paramètres de régime de la ligne. En effet la valeur de  $B^*$  atteint son minimum à  $l_2=l_1=l/2$  ; ce qui correspond à la valeur maximale de l'amplitude de la puissance transmise ( $P_m=P_{m,max}$ ). La capacité de transport augmente. En plus, on aura une symétrie qui donnera  $A^*=D^*$ , ce qui réduira de l'unité de nombre d'équations. Ces paramètres sont encore plus améliorés si on intensifie la compensation par l'augmentation de  $k$ , (Fig.1.5, b, d). On peut faire la même observation pour l'impédance caractéristique d'onde  $Z_{c(L)}$ . En effet, cette dernière est définie comme,

$$Z_{c(L)} = \sqrt{\left| \frac{B^*}{C^*} \right|} \quad \blacksquare$$

et est représentée sur la Fig.1.6. L'impédance diminue de manière importante avec la compensation ; surtout quand le compensateur est installé au milieu de la ligne.

Les effets sur les constantes  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$ , et  $D^*$  dans le cas d'une insertion transversale peuvent être définis de la même manière, à la seule différence que l'intervalle de la variation du rapport  $k$ , correspondant à cette insertion change. En effet, par ce mode d'insertion on recherche, en fait, à injecter (ou à consommer) une puissance réactive, laquelle représente un paramètre du régime. La valeur de cette puissance est évaluée par rapport à celle consommée par la charge.

La valeur de la réactance parallèle correspondante est déterminée par la quantité de la puissance réactive de la compensation sous une tension donnée.

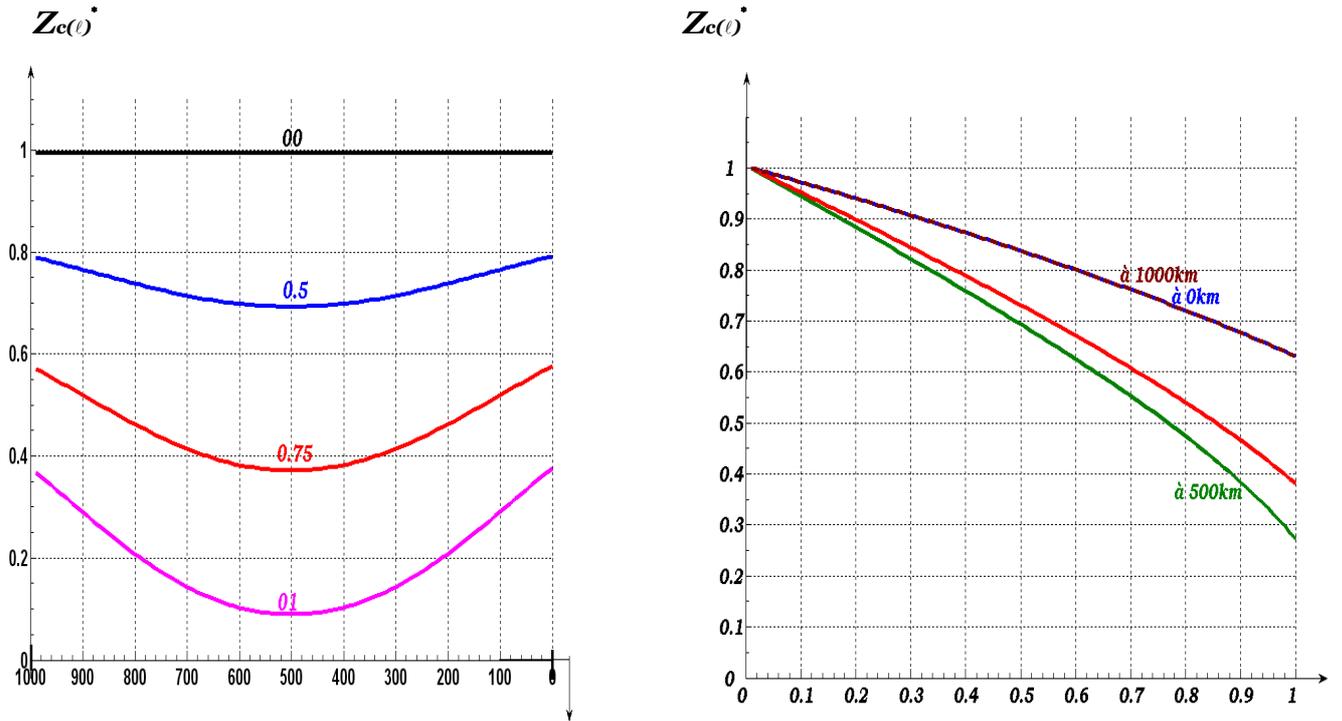


Fig.1.6. Effet de déplacement et de variation de compensation série sur l'impédance d'onde

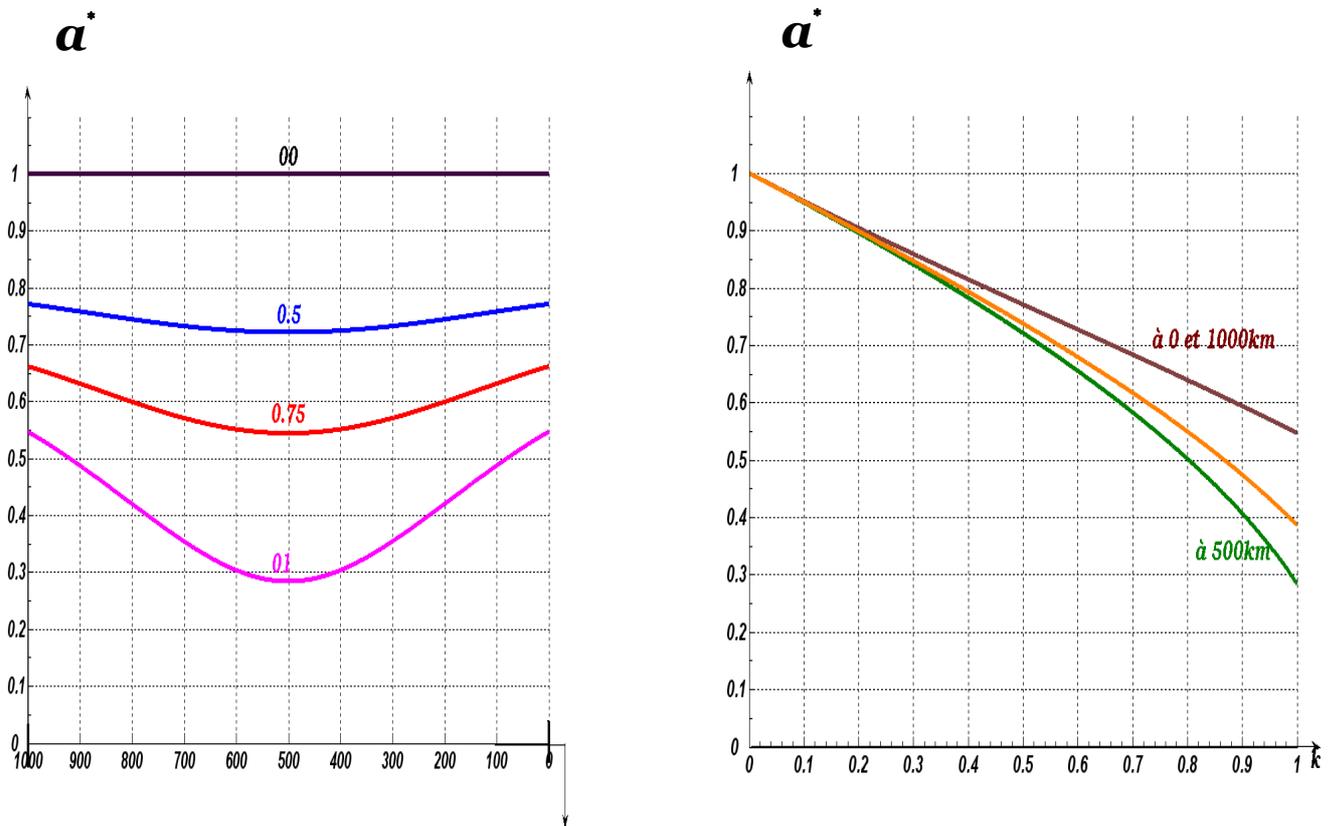


Fig.1.7. Effet de la variation de compensation série (valeur; et lieu) sur le facteur de phase

La réactance de compensation transversale peut être, également, évaluée par rapport à la susceptance de la ligne. L'analyse de ces cas de compensation sera développée dans le chapitre suivant.

Ainsi; en introduisant un compensateur, les constantes de l'équation (1.11) changent. Leurs nouvelles valeurs équivalentes, qui contiennent la capacité insérée, permettent de représenter la ligne avec le compensateur par une ligne simple. Le facteur équivalent de phase de l'onde (**a**) peut être déterminé, donc, comme suit;

$$\frac{|B^* \cdot C^*|}{|A^* \cdot D^*|} = \frac{|Z_c \cdot \sin a| \cdot \left| \frac{1}{Z_c} \cdot \sin a \right|}{|\cos a \cdot \cos a|} = \text{tga}^2$$

Ou bien ;

$$\text{tga} = \sqrt{\frac{|B^* \cdot C^*|}{|A^* \cdot D^*|}}$$

Cette équation a permis de tracer les courbes, **Fig.1.7**, conformément au **Tab.1.2**.

Le facteur de phase (**a**) a diminué considérablement avec l'introduction de **x<sub>c</sub><sup>\*</sup>**, **Fig.1.7.a**. Cette diminution est maximale quand **x<sub>c</sub><sup>\*</sup>** est installée au milieu de la ligne, **Fig.1.7.b**. Si on doit remplacer la ligne avec compensateur installé en son milieu par une ligne équivalente simple ayant la même configuration de phase, on peut alors écrire ;

$$a = \alpha_o \cdot l_{eq}$$

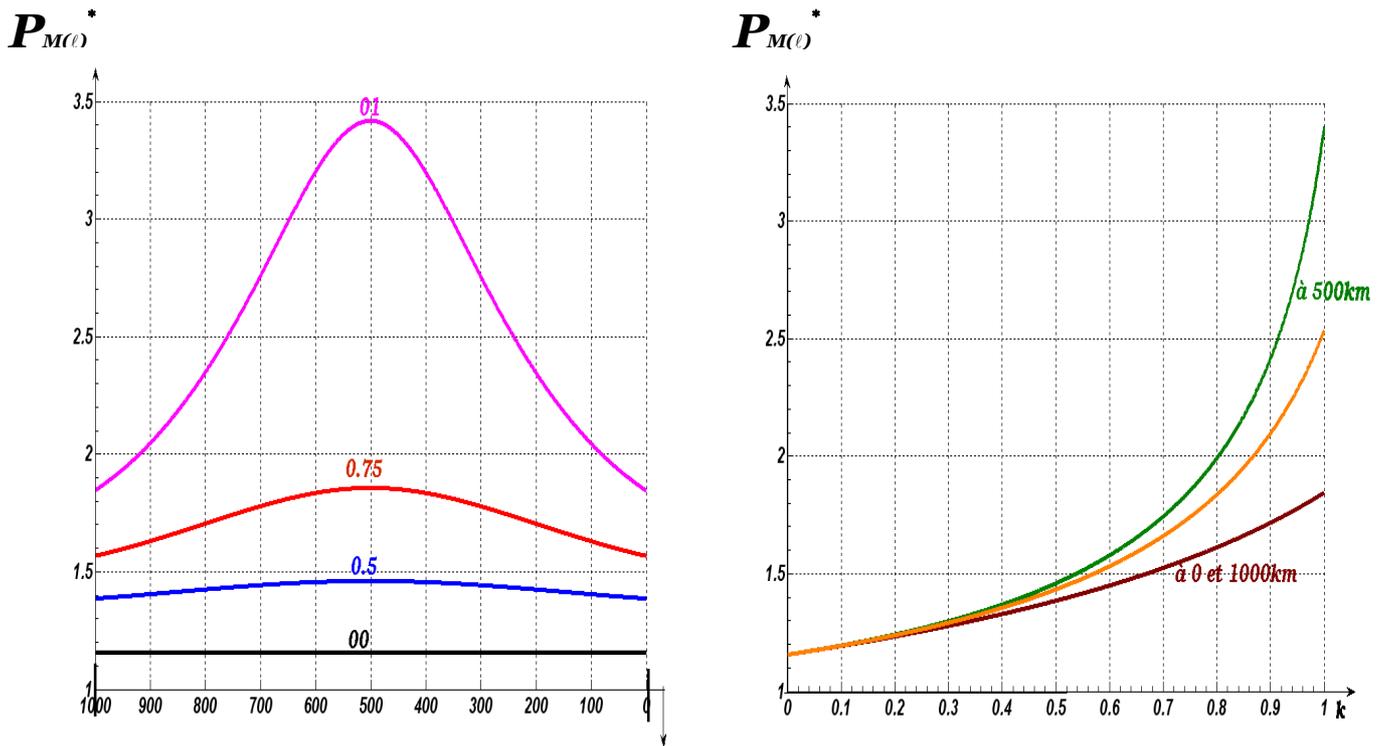


Fig.1.8. Amélioration de la capacité de transport pour une ligne de longueur donnée

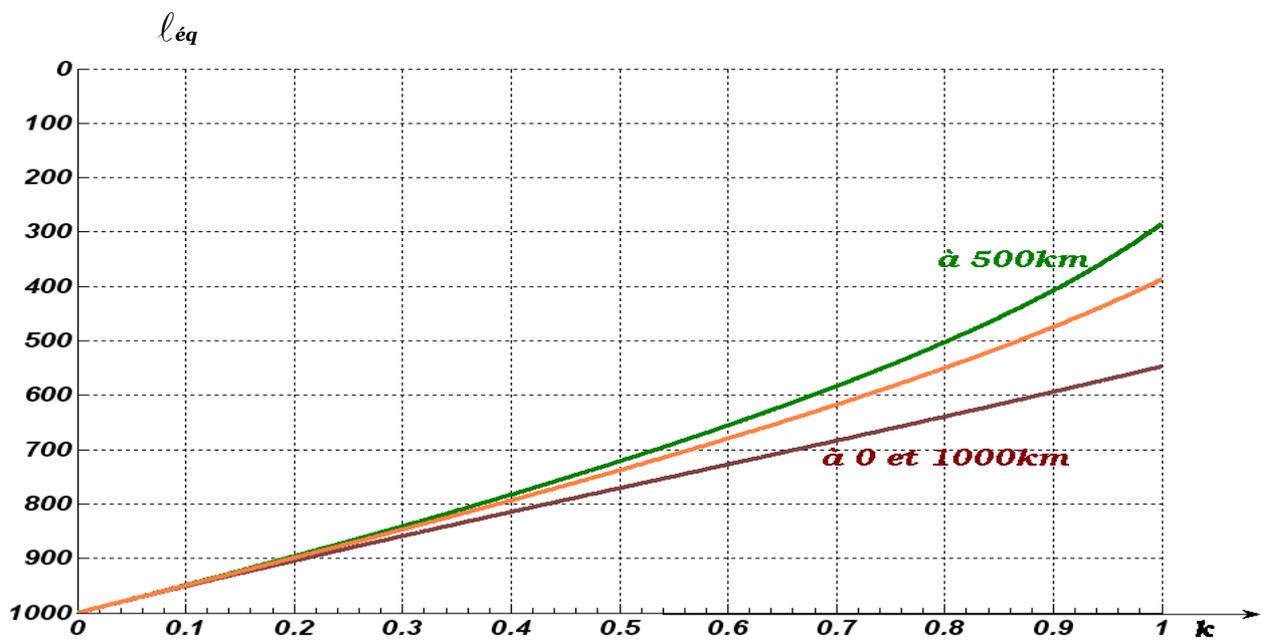


Fig.1.9. L'effet de la variation (lieu; degré) compensation série sur La longueur équivalente

Ce qui donne;

$$l_{eq} = \frac{\alpha}{\alpha_0}$$

La longueur équivalente est, donc, fonction du degré de compensation (**tab.1.3**). En outre, le facteur de phase renseigne sur la capacité de transport de la ligne. En effet, des expressions (1.11) pour une ligne sans pertes actives, on peut déduire la relation entre la puissance réactive  $Q_2^*$  aboutissant à l'extrémité de la ligne équivalente et la puissance active  $P_2^*$  consommée pour différents rapport  $k_u$  des tensions des deux extrémités ;

$$Q_2^* = -ctga + \sqrt{\left(\frac{k_u}{sina}\right)^2 - P_2^{*2}}$$

Où,  $Q_2^*, P_2^*$  ; sont exprimées **p.u** de la puissance caractéristique équivalente. La puissance  $P_{2m}$  maximale (amplitude) de la caractéristique de la machine peut être déterminée par l'égalité ;

$$\left(\frac{k_u}{sina}\right)^2 - P_{2m}^{*2} = 0.$$

Ce qui donne ;

$$P_{2m}^* = \frac{k_u}{sina}$$

**Tableau.1.2.** Variation du lieu d'installation

$\ell$		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
$A_s^*$	<b>k=0.5</b>	0.9563	0.9239	0.8830	0.8353	0.7830	0.7282	0.6735	0.6211	0.5735	0.5325	0.5002
	<b>k=0.75</b>	1.1844	1.1358	1.0744	1.0029	0.9244	0.8423	0.7601	0.6816	0.6101	0.5487	0.5002
	<b>k=01</b>	1.4124	1.3477	1.2659	1.1705	1.0658	0.9563	0.8468	0.7124	0.6467	0.5649	0.5002
$D_s^*$	<b>k=0.5</b>	0.9563	0.9239	0.8860	0.8353	0.7830	0.7282	0.6735	0.6211	0.5735	0.5325	0.5002
	<b>k=0.75</b>	0.5002	0.5487	0.6101	0.6816	0.7601	0.8423	0.9244	1.0029	1.0744	1.1358	1.1844
	<b>k=01</b>	0.5002	0.5649	0.6467	0.7421	0.8468	0.9563	1.0658	1.1705	1.2659	1.3477	1.4124
$B_s^*$	<b>k=0.5</b>	0.6025	0.5579	0.5211	0.4936	0.4766	0.4708	0.4766	0.4936	0.5211	0.5579	0.6025
	<b>k=0.75</b>	0.4707	0.4039	0.3487	0.3074	0.2819	0.2733	0.2819	0.3074	0.3487	0.4039	0.4707
	<b>k=01</b>	0.3390	0.2499	0.1763	0.1212	0.0872	0.0757	0.0872	0.1212	0.1763	0.2499	0.3390
$C_s^*$	<b>k=0.5</b>	0.8659	0.9105	0.9473	0.9748	0.9918	0.9976	0.9918	0.9748	0.9473	0.9105	0.8659
	<b>k=0.75</b>	0.8659	0.9327	0.9880	1.0292	1.0548	1.0634	1.0548	1.0292	0.9880	0.9327	0.8659
	<b>k=01</b>	0.8659	0.9550	1.0286	1.0837	1.1177	1.1292	1.1177	0.9880	1.0286	0.9550	0.8659
$a^*$	<b>k=0.5</b>	0.7540	0.7405	0.7269	0.7152	0.7073	0.7045	0.7073	0.7152	0.7269	0.7405	0.7540
	<b>k=0.75</b>	0.6318	0.5998	0.5666	0.5373	0.5175	0.5100	0.5175	0.5373	0.5666	0.5998	0.6318
	<b>k=01</b>	0.4991	0.4322	0.3554	0.2769	0.2103	0.1816	0.2103	0.2769	0.3664	0.4322	0.4991
$Z_{c(\ell)}^*$	<b>k=0.5</b>	0.8135	0.7643	0.7250	0.6963	0.6788	0.6729	0.6788	0.6963	0.7250	0.7643	0.8135
	<b>k=0.75</b>	0.7019	0.6249	0.5626	0.5160	0.4871	0.4772	0.4871	0.5160	0.5626	0.6249	0.7019
	<b>k=01</b>	0.5688	0.4533	0.3509	0.2623	0.1945	0.1667	0.1945	0.2623	0.3509	0.4533	0.5688
$P_{M(\ell)}^*$	<b>k=0.5</b>	1.6069	1.6304	1.6553	1.6775	1.6929	1.6984	1.6929	1.6775	1.6553	1.6304	1.6069
	<b>k=0.75</b>	1.8624	1.9487	2.0494	2.1490	2.2246	2.2532	2.2246	2.1490	2.0494	1.9487	1.8624
	<b>k=01</b>	2.2982	2.6264	3.1610	4.0244	5.2689	6.0891	5.2689	4.0244	3.1610	2.6264	2.2982

**Tableau .1.3.** Installation de compensateur au milieu de la ligne

<b>k</b>	0	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	01
<b>A<sub>s</sub>* et D<sub>s</sub>*</b>	0.5403	0.5846	0.6290	0.6733	0.7176	0.7619	0.8062	0.8506	0.8949	0.9392	0.9835
<b>B<sub>s</sub>*</b>	0.8415	0.7603	0.6792	0.5981	0.5169	0.4358	0.3547	0.2735	0.1924	0.1113	0.0301
<b>C<sub>s</sub>*</b>	0.8415	0.8657	0.8899	0.9141	0.9383	0.9625	0.9868	1.0110	1.0352	1.0594	1.0836
<b>a*</b>	1	0.9464	0.8906	0.8322	0.7704	0.7045	0.6330	0.5537	0.4626	0.3504	0.1816
<b>Z<sub>c(l)</sub>*</b>	1	0.9391	0.8779	0.8158	0.7524	0.6870	0.6186	0.5457	0.4660	0.3746	0.2589
<b>P<sub>M(l)</sub>*</b>	1.2703	1.3128	1.3641	1.4270	1.5053	1.6051	0.1736	1.9193	2.1928	2.6628	3.7620

La représentation graphique de (1.28) montre clairement l'effet du facteur **a**, donc l'effet de compensation, sur la variation de la puissance **P<sub>2m</sub>\***, (Fig1.8).

La capacité de transport pour une ligne de longueur donnée peut être nettement améliorée par le passage d'un niveau nominal de tension de transport à un autre plus élevé. L'expression (1.26) peut être mise, d'une manière générale et en l'absence de compensation, sous la forme :

$$\frac{\dot{U}_1}{U_2} = \cos\alpha_{ol} + Q_2^* \cdot \sin\alpha_{ol} + jP_2^* \cdot \sin\alpha_{ol}.$$

Pour une ligne donnée de tension nominale  $U_{N1}$  et, pour simplifier, une puissance réactive  $Q_2^*$  nulle, on écrit ;

$$\dot{k}_u = \frac{U_{1(1)}}{U_{N(1)}} = \cos\alpha_{ol} + j \cdot \frac{P_{2(1)}}{P_{c(1)}} \cdot \sin\alpha_{ol}$$

Si la même ligne est soumise à une tension  $U_{N2}$  ;

$$\dot{k}_u = \frac{U_{1(2)}}{U_{N(2)}} = \cos\alpha_{ol} + j \cdot \frac{P_{2(2)}}{P_{c(2)}} \cdot \sin\alpha_{ol}$$

Pour un rapport  $k_u$  donné des tensions d'extrémités de la ligne, le même pour les deux cas, on peut écrire ;

$$\frac{P_{2(2)}}{P_{c(2)}} = \frac{P_{2(1)}}{P_{c(1)}} \cdot$$

Ce qui donne ;

$$P_{2(2)} = P_{2(1)} \cdot \frac{P_{c(2)}}{P_{c(1)}}$$

Ou ;  $P_{2(2)}, P_{2(1)}$  -Puissances transmises, respectivement, sous tensions **400kv, 220kv**, et  $P_{c(2)}, P_{c(1)}$  - Puissances caractéristiques correspondantes.

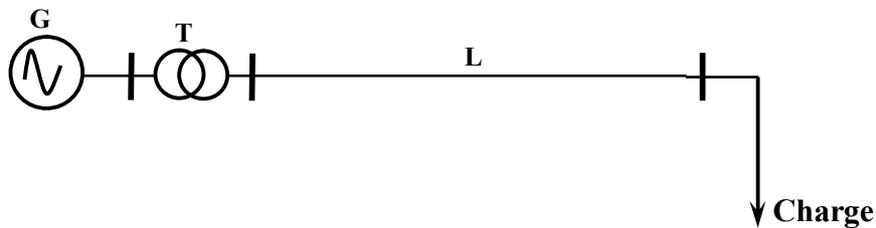
Ainsi, le rapport des puissances transmises, par la même ligne, sous des tensions nominales différentes et pour le même rapport des tensions d'extrémités, est égal au rapport des puissances caractéristiques (naturelles) correspondantes.

Pour les deux modèles considérés ;  $P_{c(2)}=1170.6MVA$ , et  $P_{c(1)}=315.112MVA$  ; ce qui permet d'obtenir ;

$$P_{2(2)} = P_{2(1)} \cdot \frac{1170.6}{315.112} = 3.7 \times P_{2(1)}$$

La puissance qu'on peut transmettre sous  $U_N=400kv$ , dans les conditions données, représente **3.7** fois celle qu'on peut transmettre sous  $U_N=220kv$ .

### 1.3.2 Introduction de l'ensemble générateur-transformateur:



L'introduction de ces éléments ajoute au modèle global deux autres matrices ; celle du générateur et celle du transformateur.

$$g = [ A_g \quad B_g ; C_g \quad D_g ] ;$$



$$T = [ A_t \quad B_t ; C_t \quad D_t ] ;$$

Pour simplifier la procédure de mise en forme des expressions, on présente ces deux matrices par une seule;

$$G = g \times T = \begin{vmatrix} 1 & jx_G \\ 0 & 1 \end{vmatrix}$$



Donc, en tenant compte de l'ensemble générateur-transformateur, on définit la matrice équivalente ;

$$\mathbf{S} = [ \mathbf{A}_s \quad \mathbf{B}_s ; \mathbf{C}_s \quad \mathbf{D}_s ] = \mathbf{G} \times \mathbf{L} \quad \blacksquare$$

Où ;  $\mathbf{x}_G$  - représente la somme des réactances du générateur et du transformateur. De la même manière que précédemment, on détermine les facteurs  $\mathbf{A}_s, \mathbf{B}_s, \mathbf{C}_s, \mathbf{D}_s$ . En effet, la multiplication des matrices (1.17) et (1.30) donne pour (1.31) ;

$$\mathbf{A}_s^* = \mathbf{A}^* + j\mathbf{x}_G^* \cdot \mathbf{C}^*$$

$$\mathbf{B}_s^* = \mathbf{B}^* + j\mathbf{x}_G^* \cdot \mathbf{D}^*$$

$$\mathbf{C}_s^* = \mathbf{C}^*$$

$$\mathbf{D}_s^* = \mathbf{D}^*$$

Donc ;

$$\mathbf{A}_s^* = \cos\alpha_{ol} - \mathbf{x}_G^* \cdot \sin\alpha_{ol} + \mathbf{x}_c^* \cdot (\sin\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1} - \mathbf{x}_G^* \cdot \sin\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1})$$

$$\mathbf{B}_s^* = j \cdot [\sin\alpha_{ol} + \mathbf{x}_G^* \cdot \cos\alpha_{ol} - \mathbf{x}_c^* \cdot (\cos\alpha_{ol2} \cdot \cos\alpha_{ol1} - \mathbf{x}_G^* \cdot \cos\alpha_{ol2} \cdot \sin\alpha_{ol1})]$$

$$\mathbf{C}_s^* = \mathbf{C}^* \quad \blacksquare$$

$$\mathbf{D}_s^* = \mathbf{D}^*$$

Les constantes  $\mathbf{A}_s^*$ , et  $\mathbf{B}_s^*$  dépendent, dans ce cas, non seulement de la réactance  $\mathbf{x}_c^*$  du compensateur, mais aussi de la réactance  $\mathbf{x}_G^*$  de l'ensemble (G-T), laquelle est, elle même, un

paramètre variable suivant le type de réglage du générateur. Pour un générateur non réglable  $x_G^*=1$ ; mais pour un réglage forcé  $x_G^*=0$ . Dans l'analyse considérée, cette réactance est prise variable dans l'intervalle  $x_G^* \in [0;1]$ , pour exprimer, également, l'effet du réglage proportionnel. La constante  $A_s^*$ ; renseigne en général, sur le rapport de tension entre les deux extrémités en cas de marche à vide; tandis que  $B_s^*$ , décrit la capacité de transport de la ligne, puisque la puissance débitée par la source en dépend. Il est donc très justifié d'analyser la constante  $B_s^*$  en fonction des éléments introduits pour assurer le contrôle de la puissance.

#### 1.4 Effet du réglage du générateur :

L'ensemble (G-T) est représenté par la réactance  $x_G^*$ . D'une manière générale la puissance transmise s'exprime par ;

$$P = \frac{E \cdot U}{|B|} \sin \delta = P_m \cdot \sin \delta$$

Où ;  $P_m$  - Amplitude de la caractéristique de la machine (puissance maximale).  $\delta$  - angle de déphasage entre la f.e.m  $E$  de la machine et la tension  $U$  à un nœud donné du système.

De l'expression (1.32) le paramètre  $B_s^*$  peut être mis sous la forme ;

$$B_s^* = j \cdot (\sin \alpha_{ol} + x_G^* \cdot \cos \alpha_{ol} - x_c^* \cdot K_B)$$

Où,

$$K_B = \cos \alpha_{ol2} \cdot \cos \alpha_{ol1} - x_G^* \cdot \cos \alpha_{ol2} \cdot \sin \alpha_{ol1}$$

Pour une réactance  $\mathbf{x}_c^*$  donnée, la diminution de  $\mathbf{B}_s^*$ , donc l'augmentation de  $\mathbf{P}_m$  (capacité de transport), est directement proportionnelle au facteur  $\mathbf{K}_B$ . Mais ce dernier, dans les mêmes conditions, dépend de  $\mathbf{x}_G^*$  et du lieu d'installation du compensateur. En l'absence de compensation  $\mathbf{K}_B=0$ , la constante  $\mathbf{B}_s^*$  devient ;

$$\mathbf{B}_s^* = \mathbf{j} \cdot (\sin \alpha_{ol} + \mathbf{x}_G^* \cdot \cos \alpha_{ol})$$

et ne dépendra que de  $\mathbf{x}_G^*$  et de la longueur donnée de la ligne, (Fig.1.10). On constate, de l'expression et du graphique, qu'en passant d'un générateur non réglable  $\mathbf{x}_G^*=1$  à un autre à réglage forcé  $\mathbf{x}_G^*=0$ ; la réactance  $\mathbf{B}_s^*$  diminue et entraîne l'augmentation du  $\mathbf{P}_m$ , donc, celle de la capacité de transport. L'insertion de la réactance du compensateur changera, encore plus, l'état du régime ; puisque dans ce cas la constante  $\mathbf{B}_s^*$  sera déterminée non seulement par  $\mathbf{x}_G^*$  ; mais aussi par  $\mathbf{x}_c^*$  et le lieu de son insertion. Cet état de régime peut être décrit et analysé à partir de la représentation graphique Fig.1.11 des relations  $\mathbf{K}_B = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{x}_G^*)$  ( $\mathbf{x}$ -lieu d'insertion du compensateur); Lesquelles suffiront pour évaluer  $\mathbf{B}_s^*$  et, par conséquent; la puissance  $\mathbf{P}_m$  maximale. En effet la variation de  $\mathbf{x}_G^*$  donne lieu à quelque

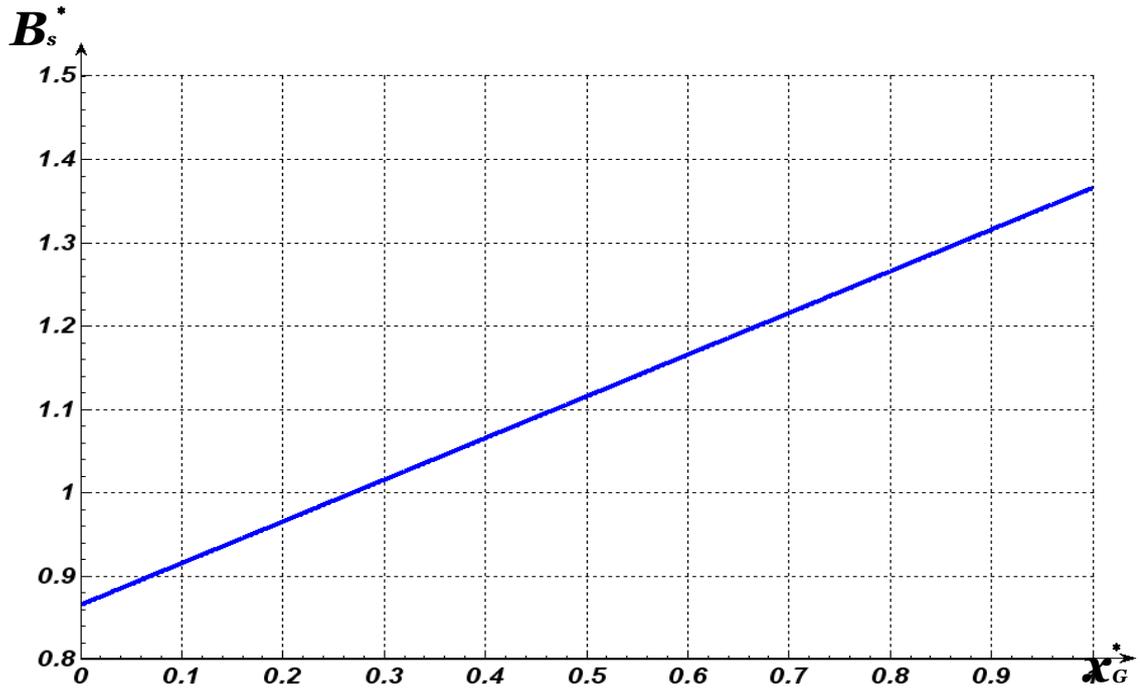


Fig.1.10. Influence de  $x_G^*$  sur le paramètre  $B_s^*$

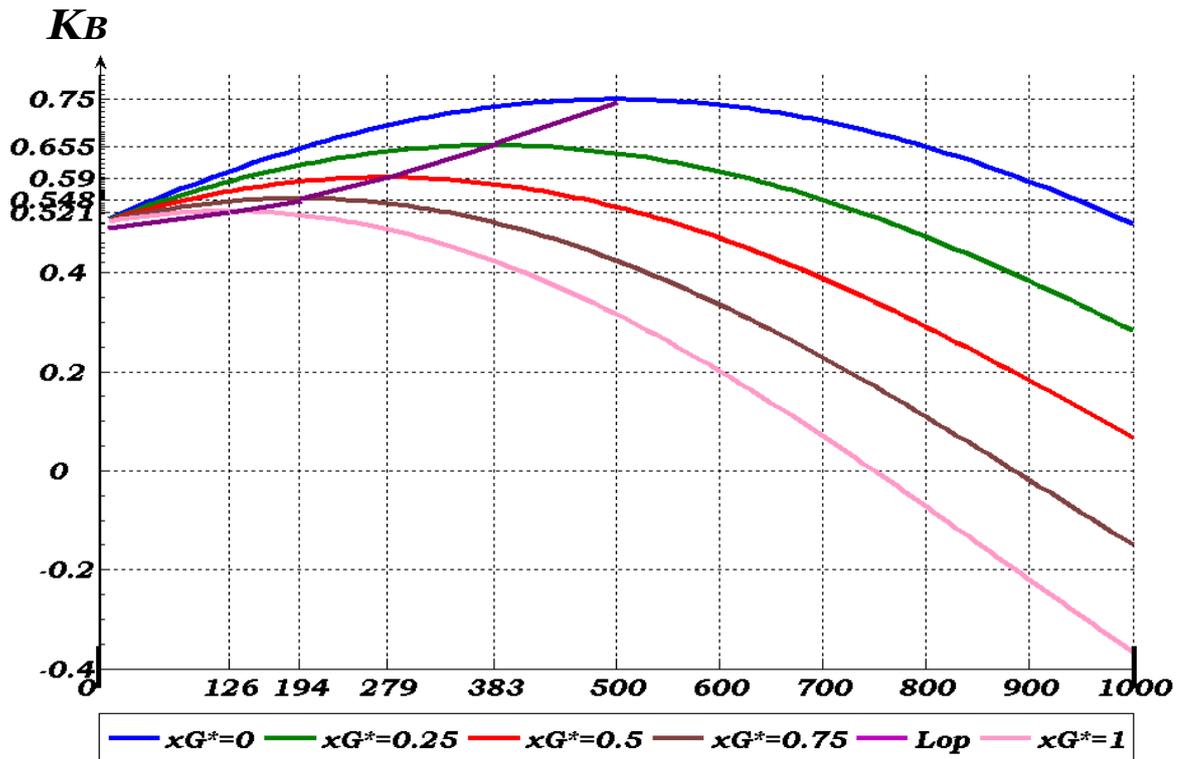


Fig.1.11. Lieux optimaux d'installation des batteries de compensation

caractéristiques de  $K_B$ ; lesquelles représentent chacune une valeur maximale à une distance déterminée.

Ces valeurs maximales correspondent à des valeurs minimales de  $B_s^*$ , donc, à des amplitudes maximales  $P_m = P_{m,max}$  de la puissance. Comme on peut le constater, le réglage du générateur déplace le lieu optimal d'insertion du compensateur (BC) en amont de la ligne, et définit, ainsi, une courbe optimale correspondante à ce déplacement. Pour une meilleure quantification de ces effets, il serait utile d'analyser la relation  $B_s^* = f(x_c^*)$  conformément à cette courbe optimale. Pour se faire, on peut utiliser l'expression (1.34), dans laquelle on introduit pour chaque  $x_G^*$  une valeur correspondante de  $K_B$ . On obtiendra, ainsi, une série de caractéristiques linéaires, (Fig1.12). Chaque caractéristique  $B_s^* = f(k)$  correspond à un lieu optimal donné d'insertion de  $x_c^*$  et à un réglage donné du générateur. Il est clair qu'en augmentant  $x_c^*(k)$  la capacité de transport augmente. Mais les valeurs optimales de  $x_c^*$  restent tributaires des conditions de stabilité. Ces valeurs doivent être, en effet, déterminées à partir des contraintes relatives aux marges de stabilité en angle et en puissance et conformément à la limite admissible de la tension aux bornes de la capacité de la batterie. Pour se faire il est nécessaire de développer une autre analyse; laquelle sort du cadre de ce travail.

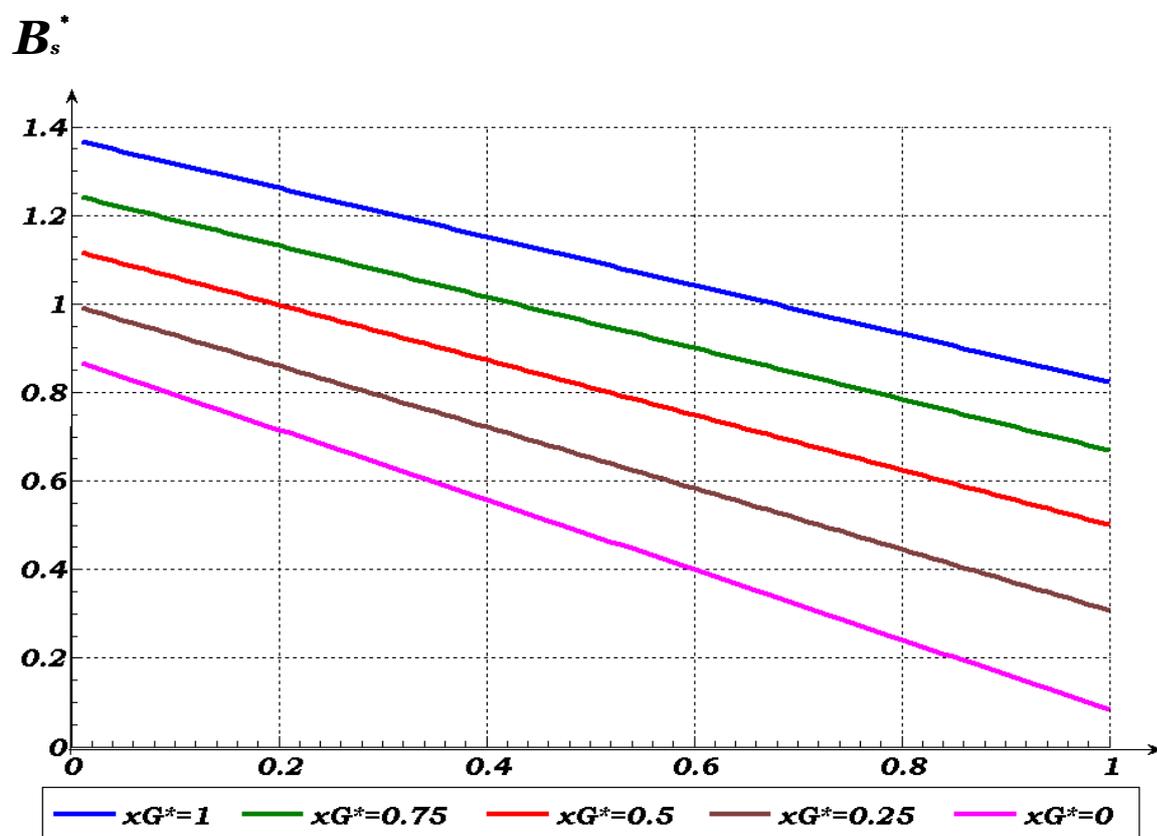


Fig.1.12. Valeurs optimales de  $B_s^*$