

# COMPENSATION DE L'ÉNERGIE RÉACTIVE :

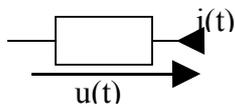
## 1. Rappel sur l'énergie réactive et le facteur de puissance :

Tout système électrique utilisant le courant périodique ou alternatif met en jeu deux formes d'énergie :

**Energie active** = sert à la transformation de l'énergie électrique en énergie mécanique, lumineuse, thermique.. ;

**Energie réactive** = sert à la magnétisation des machines, des tube fluorescents, etc..

Puissance, définition :



- **puissance active** = puissance moyenne

$$p(t) = u(t) \cdot i(t)$$

$$P_a = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) \cdot i(t) dt$$

seul les fondamentaux du courant et de la tension fournissent de la puissance active

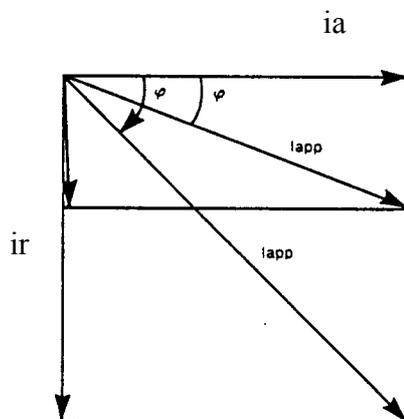
- **puissance apparente**  $S = V \cdot I$  (valeur efficace) en Voltampère  
 $S = 3 \cdot V \cdot I$  si triphasé équilibré

- **facteur de puissance**  $k = \frac{P_a}{S}$

- **puissance fluctuante**  $D$  : puissance due aux harmoniques des courants non sinusoïdaux

- **puissance réactive**  $Q = 3 \cdot V \cdot I \cdot \sin\phi$  si régime triphasé équilibré  
 $Q = \sqrt{S^2 - P^2 - D^2}$

*si régime sinusoïdale :*



Le courant appelé ( $I_{app}$ ) peut être décomposé en 2 courants :

$I_a$  = courant actif

$I_r$  = courant réactif

$$\text{Puissance réactive : } Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$k = \cos\phi \quad \text{avec } \phi = \text{déphasage entre } V \text{ et } I$$

Remarque : plus le  $\cos\phi$  d'une installation est faible, plus son rendement électrique est médiocre

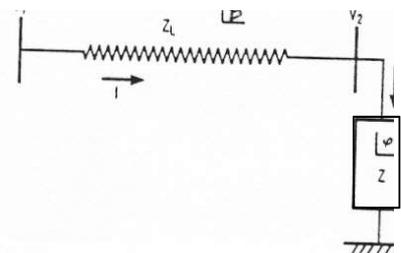
## 2. Pourquoi compenser l'énergie réactive ?

### 2.1. le point de vue du distributeur :

l'augmentation de la puissance réactive :

- Conduit à l'accroissement des puissances transitées (S) sur le réseau de transport et peut mettre en péril la stabilité en l'amenant à la limite de la puissance transmise.
  - écroulement de la tension
  - surcharge pouvant provoquer un déclenchement des protections
  - limitation en courant de certains groupes de production
- conduit à l'augmentation des pertes en ligne.

$P_2 =$  puissance transmise

$$P_2 \max = \frac{U_1^2 \cos \varphi}{Z_L} \cos^2 \left( \frac{\beta - \varphi}{2} \right)$$
$$V_2 \text{ crit} = \frac{V_1}{2 \cos \frac{\beta - \varphi}{2}}$$


D'ou l'EDF a décidé de facturer l'énergie réactive à concurrence de 40% de l'énergie active

$$\text{tg} \varphi = 0,4 \quad \cos \varphi = 0,93$$

La quantité d'énergie réactive facturée sera :

$$\text{Energie facturée} \rightarrow W_F = W_A (\text{tg} \varphi - 0,4) \rightarrow \text{Energie active}$$

### 2.2. le point de vue du consommateur :

le consommateur a intérêt à améliorer son facteur de puissance. (diminuer la puissance réactive consommée).

#### **Les avantages économiques :**

- Une réduction de la souscription de puissance en kVA dans le cas d'un contrat « tarif jaune »
- Une suppression de la facturation des consommations excessives d'énergie réactive dans le cas d'un contrat « tarif vert »

#### **Les avantages techniques :**

- Une augmentation de la puissance disponible au secondaire des transformateurs.
- Une diminution des pertes joules dans les câbles.
- Une diminution des chutes de tension dans les câbles.

Ces 2 points concourent à retarder le vieillissement des matériels et des liaisons

### 3. comment compenser l'énergie réactive ?

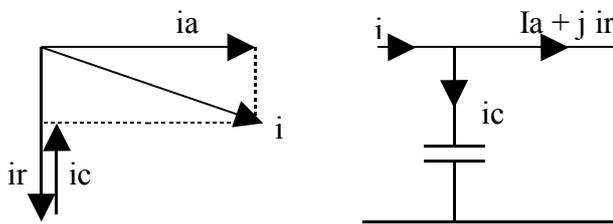
#### 3.1. Par machine synchrone :

On effectue une surexcitation de la machine synchrone pour lui permettre de fournir au réseau de la puissance réactive.

- Possibilité d'asservissement du facteur de puissance.
- Encore utilisé avec les alimentations ininterrompibles de très forte puissance ( couplage réseau, machine synchrone, groupe électrogène ).

**Depuis les progrès effectués dans l'électronique de puissance, la machine synchrone a été remplacé par un statocompensateur.**

#### 3.2. Par batterie de condensateurs :

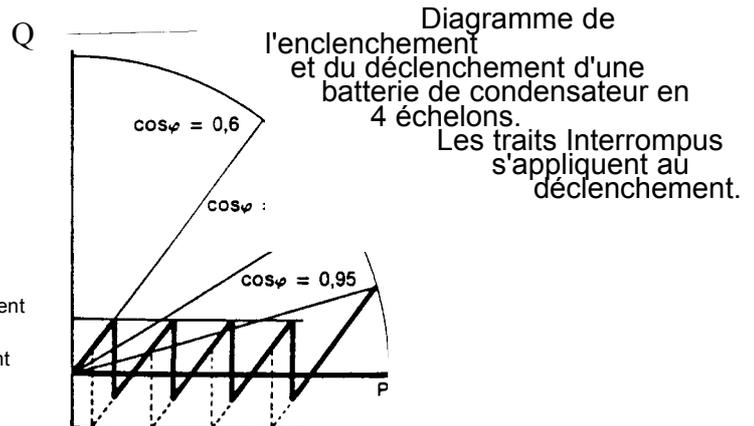
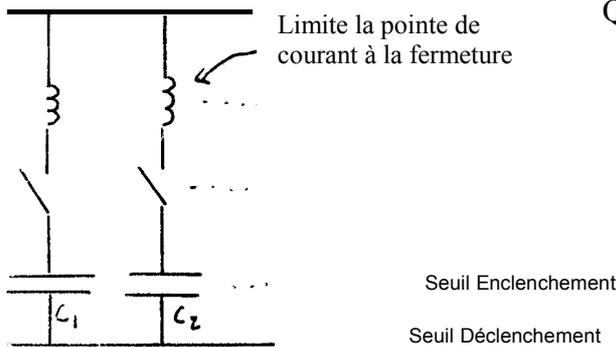


On place des condensateurs sur la ligne ou l'on doit compenser l'énergie réactive :

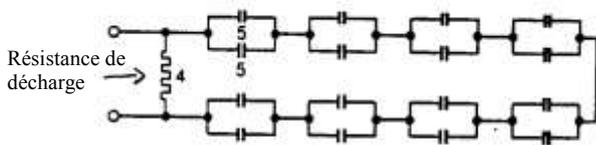
Avec un *montage Triangle* triphasé :  
 $Q_c = 3 \cdot w \cdot C \cdot U^2$

**Application:** Charge ayant de faible variation d'énergie réactive, ayant peu d'harmoniques de courant.

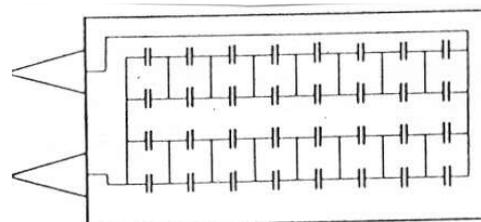
Généralement il y a plusieurs batteries de condensateurs que l'on commutent selon les variations de l'énergie réactive à compenser .malheureusement cette méthode très employée a tendance a amplifier les harmoniques lors des commutations de condensateurs



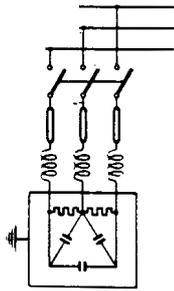
Constitution d'un condensateur de puissance MT



exemple de schéma électrique d'un condensateur moderne de 100 kvar pour un réseau 20 kV (8 groupes en série de 2 éléments en parallèle)

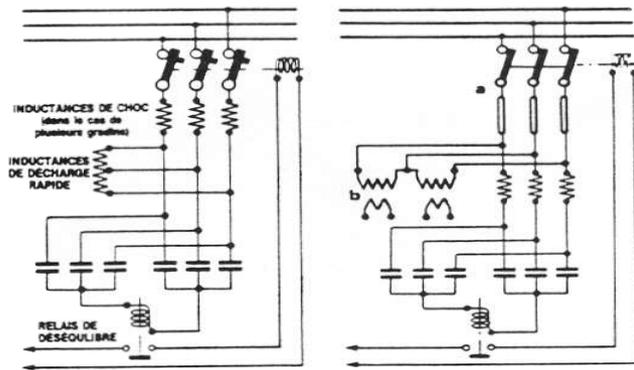


## Commande des condensateurs



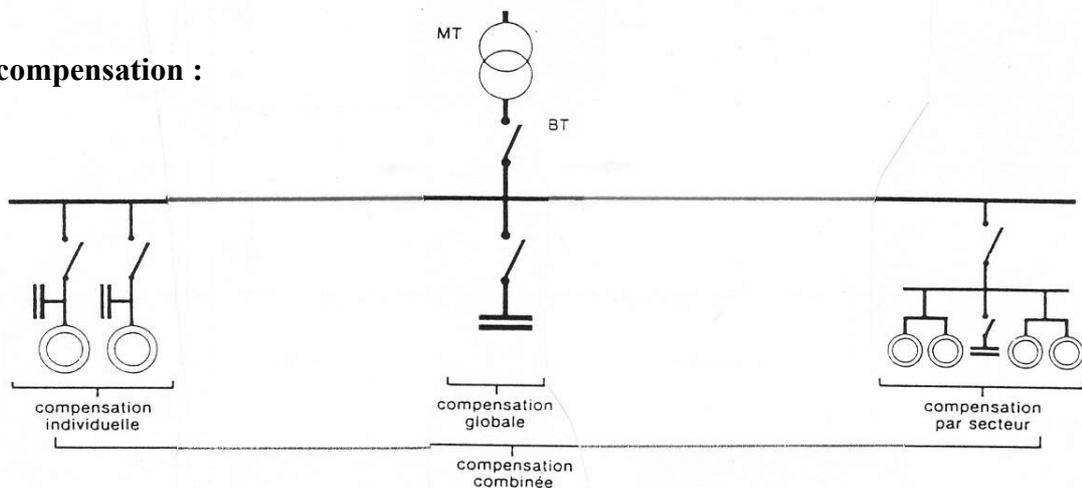
Branchement direct avec contacteur et fusibles

Option: inductances de choc ou antiharmoniques.



Branchement avec disjoncteur, inductances de choc, inductances de décharge rapide et relais de déséquilibre.

## Mode de compensation :



### Avantages:

-La production d'énergie réactive se fait directement aux bornes de la charge.  
Soulagement du câble d'alimentation.

### Inconvénients:

- Relativement coûteuse.  
- N'utilise pas au mieux la puissance des conducteurs.

### Application :

récepteur > 25 kW et sous tension en permanence

### Avantages:

bon facteur d'utilisation.  
Solution économique.

### Inconvénients:

-Câbles non compensés  
Si récepteur faisant varier souvent la charge, pas intéressant

### Avantages:

• Mieux que l'individuelle mais attention à la surcompensation qui augmente le vieillissement en créant des surtensions.

### Inconvénients:

• Tous les câbles ne sont pas soulagés.  
. Prévoir des disjoncteurs et résistances de décharge pour la maintenance  
. Surveiller les fusibles.

### 3.3. Par statocompenseur :

L'utilisation de convertisseurs statiques entraîne la génération d'harmoniques. Ces harmoniques entraînent des modifications d'impédance importantes, pouvant créer de fortes surtensions destructrices.

L'EDF recommande l'apport de tension harmonique par le seul client :

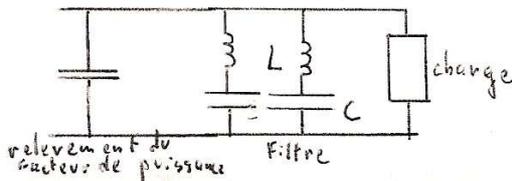
harmoniques impaires  $\frac{U_h}{U_1} < 1\%$

Taux de distorsion harmoniques

harmoniques paires  $\frac{U_h}{U_1} < 0,6\%$

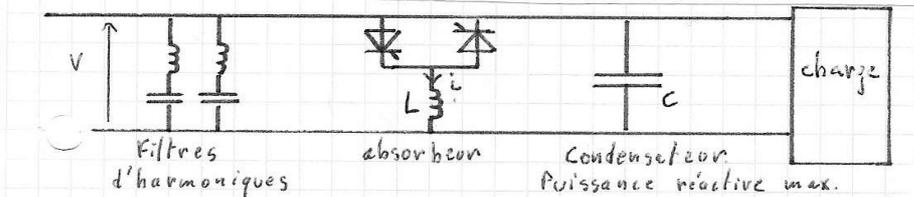
$$\tau = \frac{\sqrt{U_2^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} < 1,6\%$$

d'où la nécessité pour le client de filtrer les harmoniques en les court-circuitant par un filtre LC.



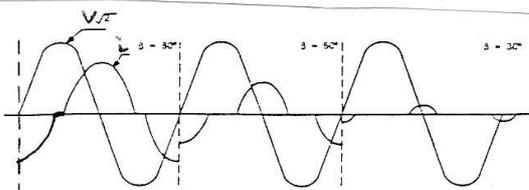
Les convertisseurs statiques entraînent aussi de grandes variations du facteur de puissance, pour éviter la multiplication de gradins de condensateurs, on asservi le relevement du facteur de puissance de manière continue. Pour cela on utilise un compensateur statique d'énergie réactive (statocompenseur).

schéma de principe d'un statocompenseur :



Rôle du condensateur: Compenser la puissance réactive maximale absorbée par la charge.

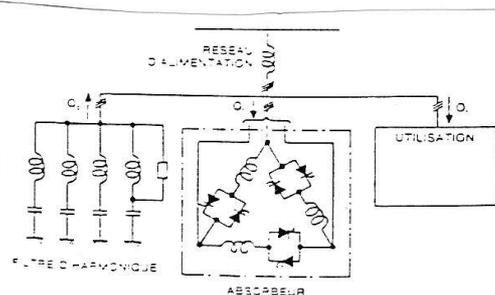
Rôle de l'inductance (absorbteur) : Absorber le surplus de puissance réactive fournie par le condensateur; Les thyristors montés en triac permettent d'ajuster cette valeur en fonction des variations de la charge.



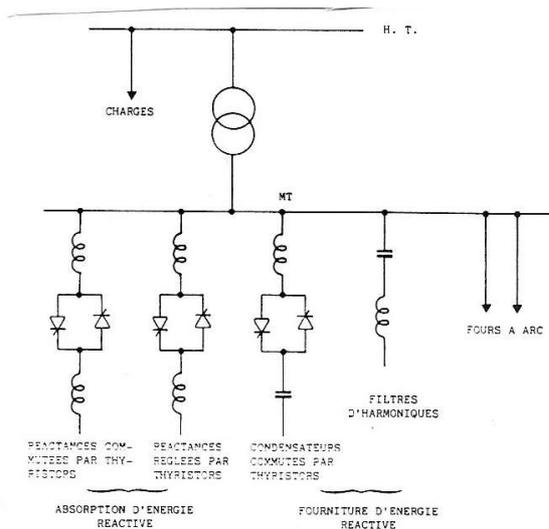
Formes d'onde des tensions et courants à divers déphasages

Rôle du filtre LC: éliminer les harmoniques notamment ceux créés par l'absorbteur.

Généralement on crée un asservissement de  $\tau$  pour rester dans les limites imposées par l'EDF ( $tg\tau < 0,4$ ).



Dans la réalité on se sert des condensateurs de filtrage des harmoniques pour le relèvement du facteur de puissance :



Le statocompenseur est aussi utilisé en forte puissance pour atténuer le phénomène de Flicker ( clignotement des lampes a incandescence ) du essentiellement aux fours à arc.

### Application des statocompenseurs:

Charge ayant de grande variation de puissance réactive  
 Charge créant beaucoup d'harmoniques

#### 5 .. Pour en savoir plus; Annexes:

##### 5.1 .. Pour en savoir plus

on peut consulter au lycée:

- . "Mémotech électrotechnique" de mrs. Bourgeois ,Cogniel
- "La production de l'énergie électrique" exposé de mrs. Lande,Lemeunier,Petit
- "Transport et distribution de l'énergie électrique" exposé de mrs. Krol, Lhommo, Mourafiq
- "L'appareillage électrique" de mr. Gauthier ( EDF
- "La haute tension dans l'industrie" de mr. Ricuort
- "TCCHT pacifiq inertie" de CGEE ALSTHOM
- "Compensation d' énergie réactive: mode d'emploi" EDF( cahier de l'ingénierie 1988)
- "Compensateur statique d'énergie réactive" projet de L.Quai

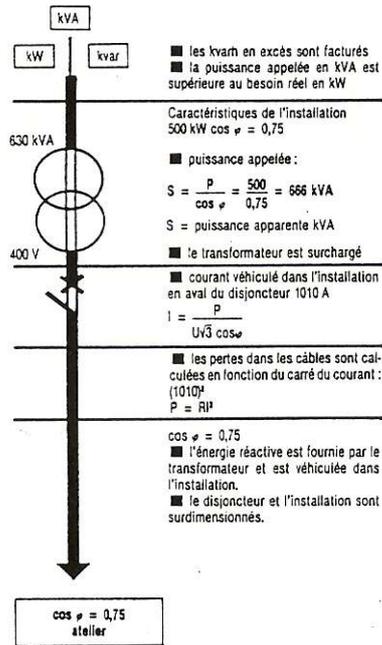
##### 5.2 .. Annexes:

- Les avantages de la compensation
- Modèle de réseau en régime harmonique
- Perturbation de la télécommande imputable a la présence de selfs antiharmoniques
- Calcul de l'impédance harmonique du réseau en présence de condensateurs

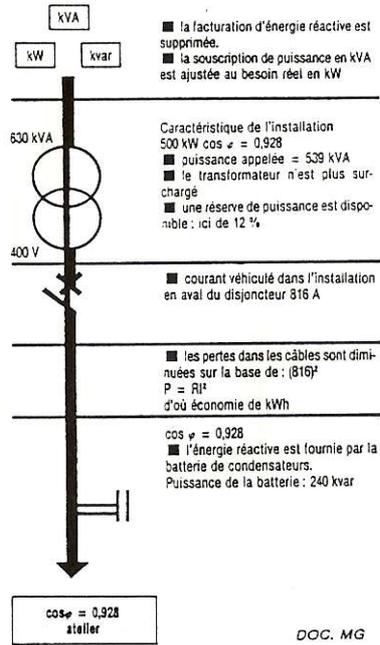
Réflexion d'Hubert Rébasc : Les baigneurs qui n'ont pas de bol boivent la tasse.

## LES AVANTAGES DE LA COMPENSATION

### Installation sans condensateur



### Installation avec condensateur



DOC. MG

## MODELE DE RESEAU EN REGIME HARMONIQUE

**Lignes et câbles**

Réactance  $X_L = \omega L$   
 Capacité  $C$

Résistance en  $\Omega/\text{km}$ , avec  $S$  en  $\text{mm}^2$   
 pour le cuivre, prendre  $R = \frac{18}{S}$   
 pour l'aluminium, prendre  $R = \frac{29}{S}$   
 pour l'alimélec, prendre  $R = \frac{32}{S}$   
 pour l'aluminium-acier, prendre  $R = \frac{34}{S}$

Lignes  $0,4\Omega/\text{km}$  en H.T.  
 $0,35\Omega/\text{km}$  en MT

Câbles isolés  $0,07$  à  $0,15\Omega/\text{km}$

Capacité négligeable pour les phénomènes harmoniques  
 les catalogues des câbles indiquent un mode de calcul précis.

**Transformateurs**

$L = \frac{U_{cc} U^2}{S_n \omega}$   
 $R_p = \frac{U^2}{90 \text{ à } 110 S_n}$   
 $R_s = 13 \text{ à } 30 \frac{U^2}{S_n}$

**Équipements électroniques de puissance**

$I_h = \frac{I_1}{h}$  (pont de diodes)  
 $I_h = \frac{I_1}{(h - \frac{1}{h})^{1,2}}$

avec  $I_1$  intensité consommée à 50 Hz  
 $h = kp \pm 1$ ,  $p$  étant l'indice de pulsation du pont

**Charges hors équipements électroniques de puissance**

$R = \frac{U^2}{P}$

$Q_n = 4 Q_{50}$  (moteur asynchrone)

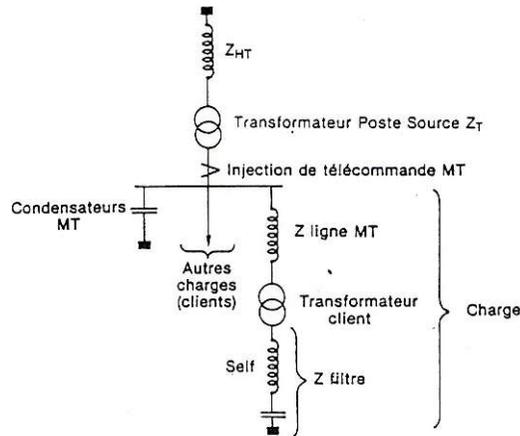
$X_s = 0,073 \text{ hR}$   
 $X_p = \frac{\text{hR}}{6,7 \tan \varphi_{50} - 0,74}$

modèle empirique des charges M.T. ; les 2 modèles précédents sous-évaluent les taux de distorsion en tension

Transformateur MT.

**PERTURBATIONS DE LA TÉLÉCOMMANDE IMPUTABLES A LA PRÉSENCE DE SELFS ANTIHARMONIQUES**

Représentons le schéma équivalent dans le cas d'une self antiharmonique raccordée en aval du transformateur de l'utilisateur.  
Ensemble self et condensateur accordé avant l'harmonique 5.



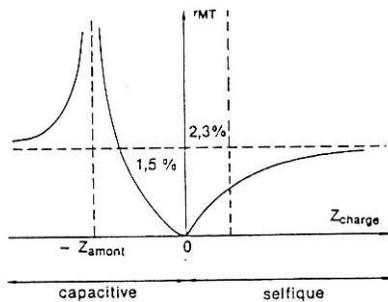
L'impédance de la charge est, en négligeant les autres charges :

$$Z_{ch} = Z_{ligne} + Z_{transfo} + Z_{filtre}$$

MT                  client

Étudions l'allure de l'impédance de la charge et son influence sur les tensions 175 Hz

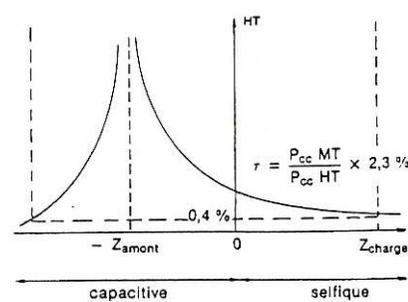
Courbe  $r_{MT}$  en fonction de  $Z_{charge}$



L'impédance en amont du générateur de télécommande est :

$$Z_{amont} = Z_{HT} + Z_T$$

Courbe  $r_{HT}$  en fonction de  $Z_{charge}$



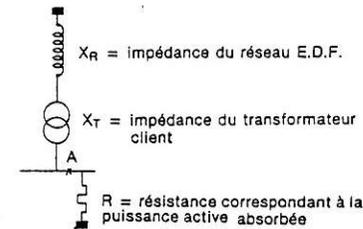
Au vu de ces graphes, on constate les conditions de bon fonctionnement de la télécommande :

- l'impédance de la charge est très selfique.
- l'impédance de la charge est très capacitive.

Le premier cas est très difficile à réaliser dans le cas de grosses batteries de condensateurs.  
Le second cas est réalisable dans le cas de très faibles batteries de condensateurs.

**CALCUL DE L'IMPÉDANCE HARMONIQUE DU RÉSEAU EN PRÉSENCE DE CONDENSATEURS**

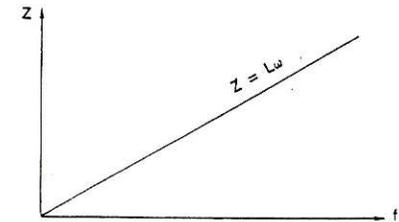
1 - Réseau sans condensateur  
Le schéma du réseau est le suivant :



L'amplitude de l'impédance à la fréquence de résonance est :

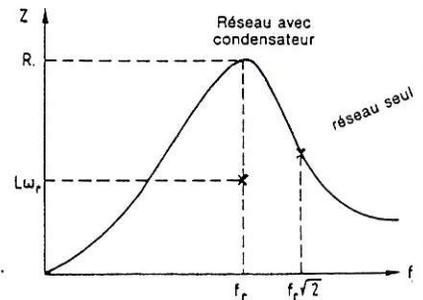
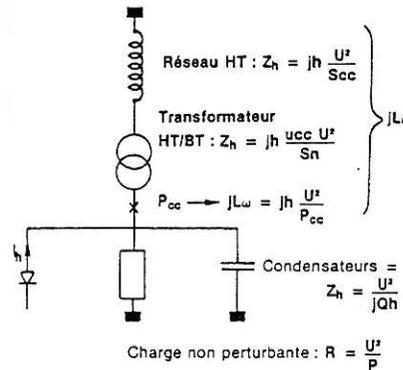
$$Z_{hr} = \frac{U^2}{P} = R$$

L'impédance du réseau au point A peut être considérée comme la somme de  $X_R$  et  $X_T$  que l'on représente en fonction de la fréquence sur le schéma ci-dessous.



L'allure de l'impédance du réseau avec condensateurs en fonction de la fréquence est la suivante :

2 - Réseau avec condensateur



L'impédance du réseau a pour valeur :

$$Z_h = \frac{h U^2}{\sqrt{(P_{cc} - Qh^2)^2 + h^2 P^2}}$$

Le facteur d'amplification F a pour expression

$$F = \frac{R}{Lw_r} = \frac{\sqrt{Q P_{cc}}}{P}$$

La fréquence de résonance est calculée en fonction de la puissance de court-circuit et de la puissance des condensateurs :

$$f_r = 50 \sqrt{\frac{P_{cc}}{Q}}$$

Nota : L'expression du facteur d'amplification nous montre que ce dernier est d'autant plus faible que la charge non perturbante est élevée.

Dans le cas contraire, il peut atteindre des valeurs importantes.  
Notons également que, pour obtenir un facteur d'amplification faible, il est conseillé de raccorder une puissance faible de condensateurs.