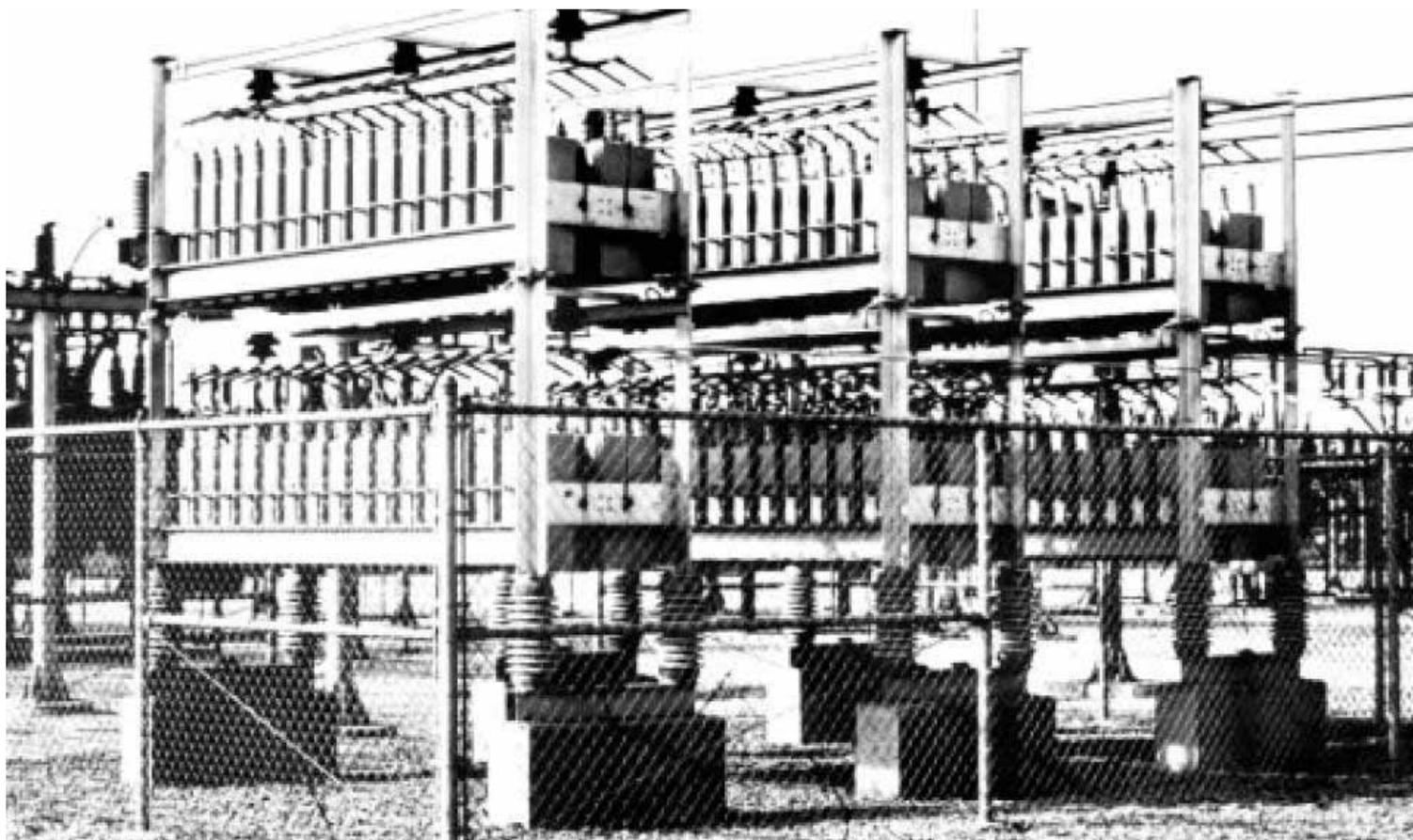


## Puissance réactive et filtres

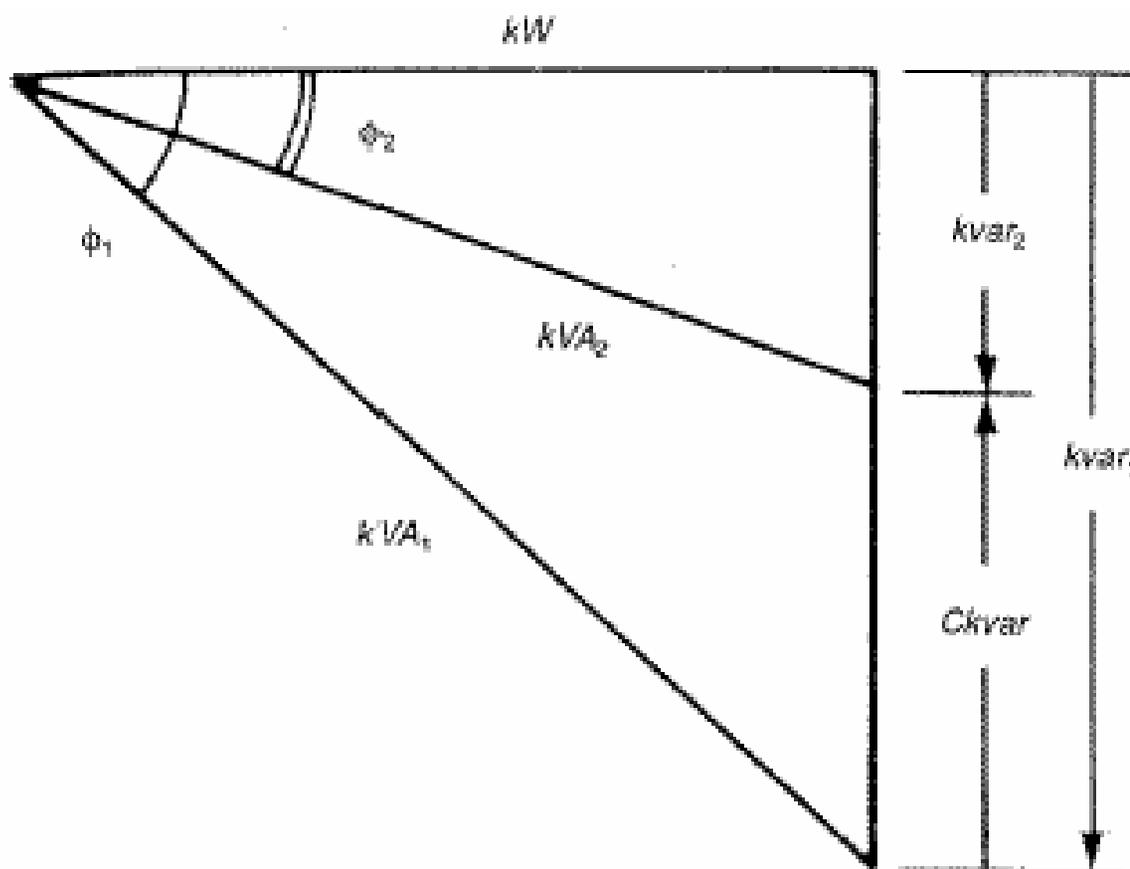


## Pourquoi de la compensation réactive?

- Modifier l'écoulement de puissance réactive dans un réseau, i.e. produire localement de la puissance réactive pour éviter de la transiter sur le réseau

## Écoulement de la puissance réactive

La charge est réduite de  $kVA_1$  à  $kVA_2$  par l'ajout de puissance réactive  $Ckvar$ .



## Formules utiles

- Relation entre les puissances

$$S = P + jQ \qquad S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$FP = \frac{P}{S}$$

- La puissance réactive requise pour corriger un FP d'une charge existante à un FP requis (ex. par la facturation)

$$kvar = kW \left[ \tan(\cos^{-1} FP_{initial}) - \tan(\cos^{-1} FP_{final}) \right]$$

- Résultats:
  - Pour la même puissance active  $P$  (kW), diminution de  $S$  (kVA) et  $I$  (A)
  - Augmentation de la capacité des installations ( $P \rightarrow S$ )
  - Diminution des pertes  $RI^2$  et  $XI^2$  (3x)
  - Diminution des chutes de tension (amélioration/augmentation de la tension)
  - Diminution de la facture d'électricité (\$) car les fournisseurs d'électricité facturent les kVA ou imposent une pénalité sur le FP

## ■ Réduction des pertes

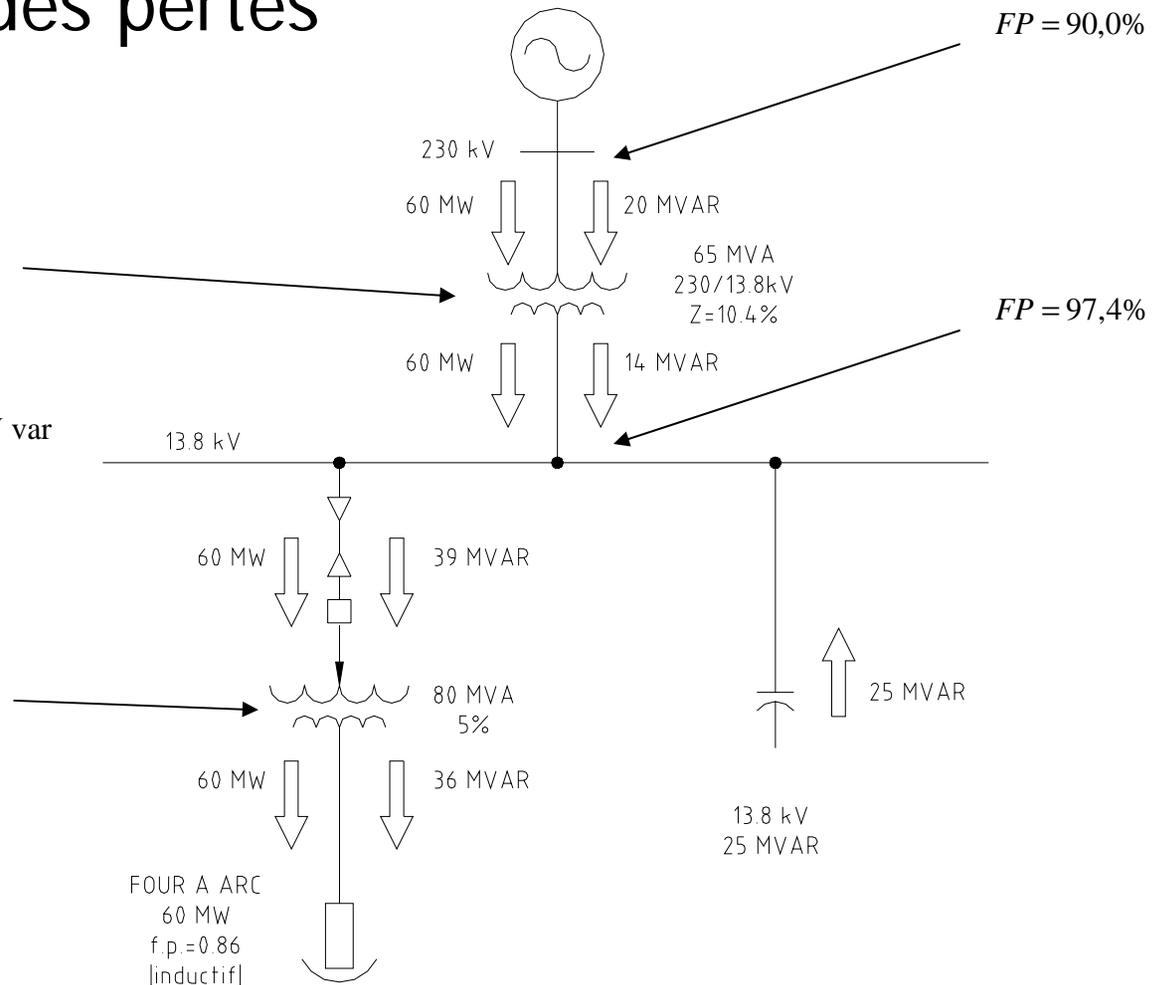
Pertes transfo. avec compensation

$$\Delta Q = 0,104 \cdot \left( \frac{\sqrt{60^2 + 14^2}}{65} \right)^2 \cdot 65 = 6 \text{ M var}$$

Pertes transfo. sans compensation

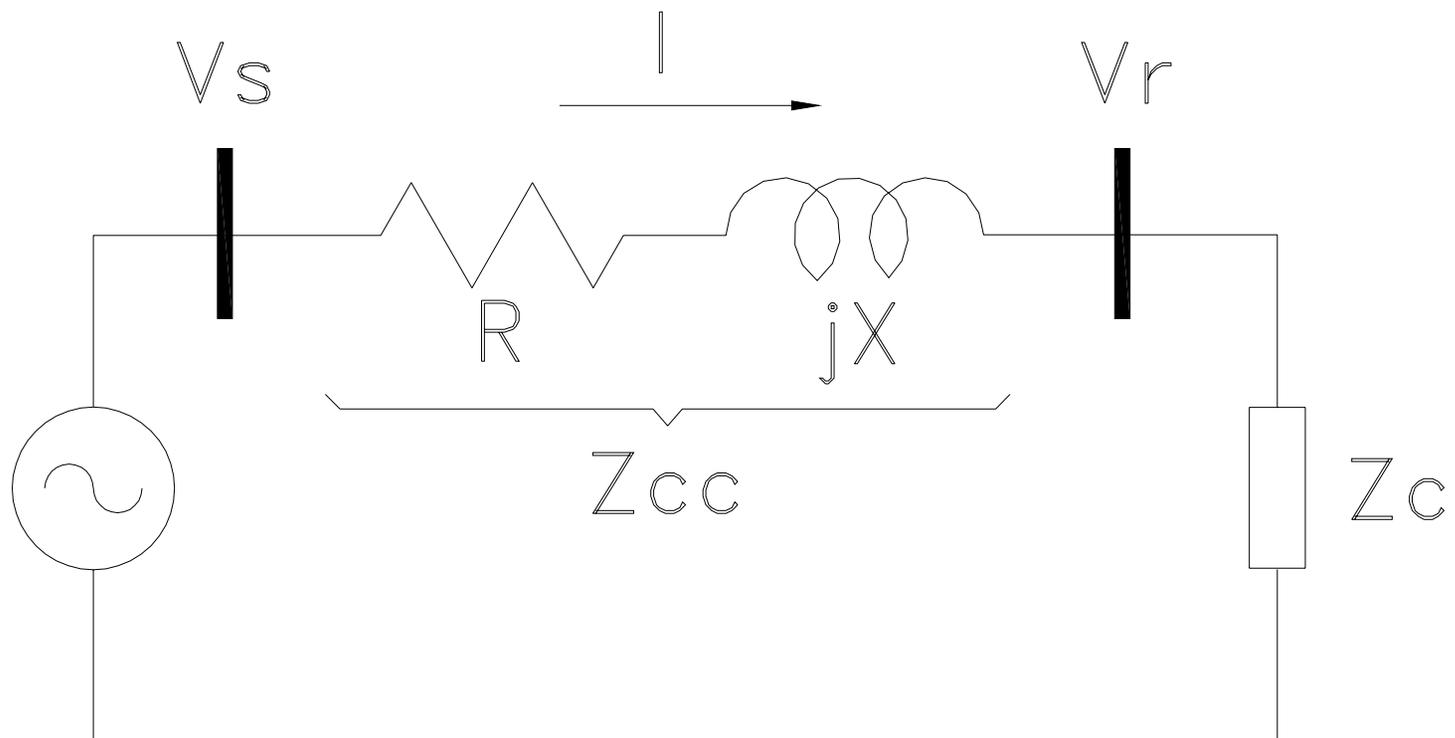
$$\Delta Q = 0,104 \cdot \left( \frac{\sqrt{60^2 + (14 + 25)^2}}{65} \right)^2 \cdot 65 = 8,2 \text{ M var}$$

$$\Delta Q = 0,05 \cdot \left( \frac{\sqrt{60^2 + 36^2}}{80} \right)^2 \cdot 80 = 3 \text{ M var}$$



- Chutes de tension en réseau

$$\Delta V (\%) = \left( \frac{|V_s| - |V_r|}{|V_s|} \right) \times 100$$



$$\bar{V}_s = \bar{V}_r + \bar{I}\bar{Z}$$

$I$  : Courant, constant sur toute la longueur de la ligne

$V_s$  : Tension ligne-terre de la source

$V_r$  : Tension ligne-terre en bout de ligne (référence)

$$\bar{V}_r = V_r \angle 0^\circ$$

$$\bar{V}_s = V_s \angle \delta^\circ$$

$$\bar{I} = I \angle -\theta$$

$\cos \theta =$  facteur de puissance de la charge

$$\bar{Z} = R + jX$$

Z : Impédance de la ligne

$$\bar{V}_s = \bar{V}_r + \bar{I} \bar{Z}$$

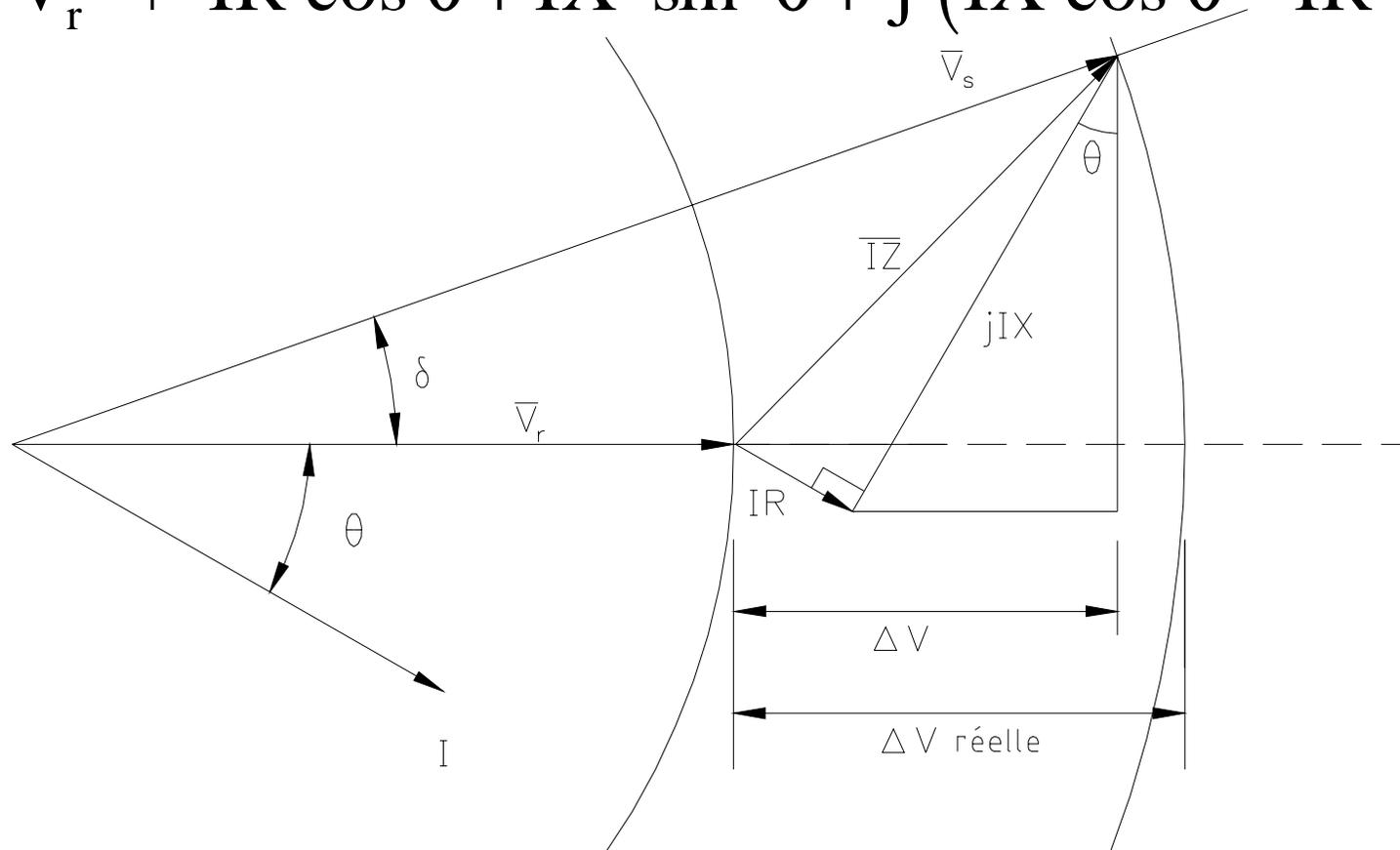
$$V_s (\cos \delta + j \sin \delta) =$$

$$V_r (\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) + I (\cos \theta - j \sin \theta) (R + jX)$$

Si la différence angulaire entre  $V_s$  et  $V_r$  est faible,  
on peut négliger le terme  $\sin \delta$   
et écrire, avec  $\cos \delta = 1$

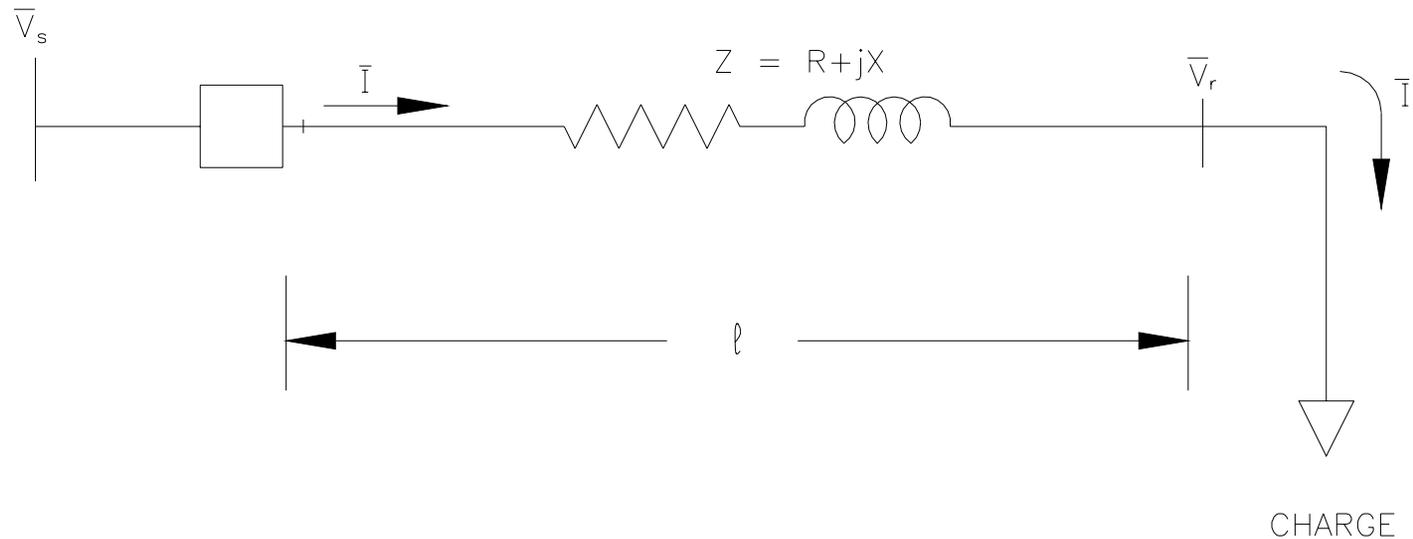
$$V_s = V_r + I (\cos \theta - j \sin \theta) (R + jX)$$

$$V_s = V_r + IR \cos \theta + IX \sin \theta + j (IX \cos \theta - IR \sin \theta)$$



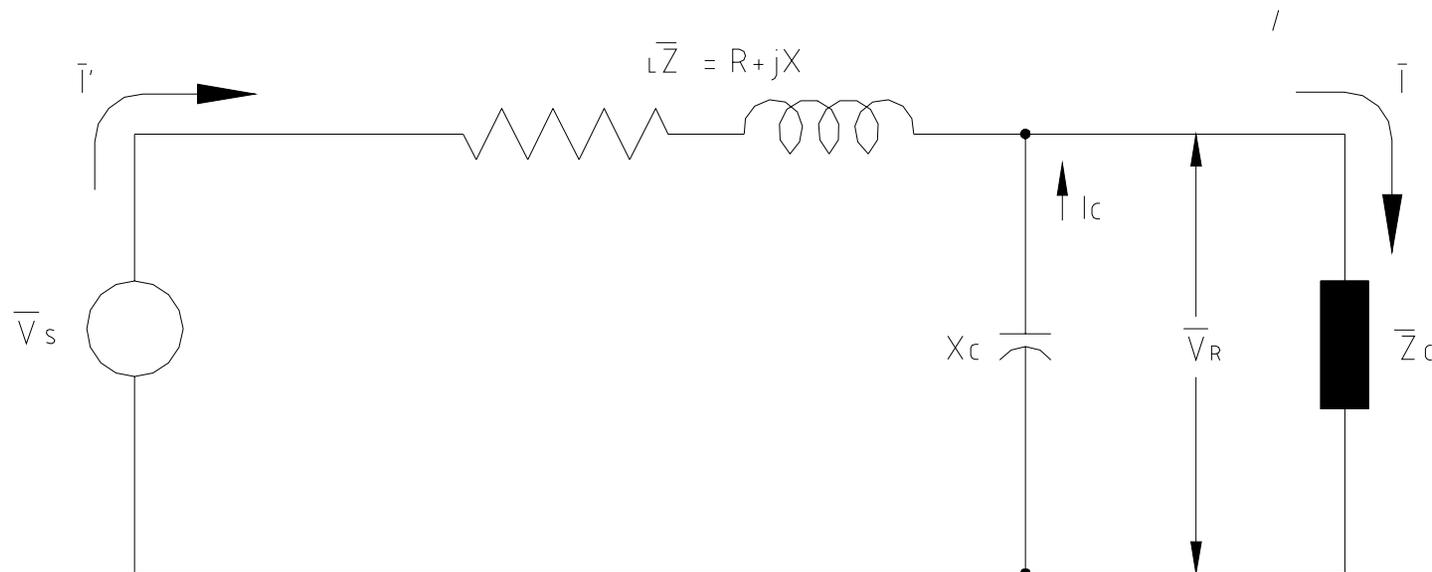
En négligeant le terme en quadrature, on obtient :  $V_s \approx V_r + I (R \cos \theta + X \sin \theta)$

- Modèle simplifié pour une charge concentrée en bout de ligne

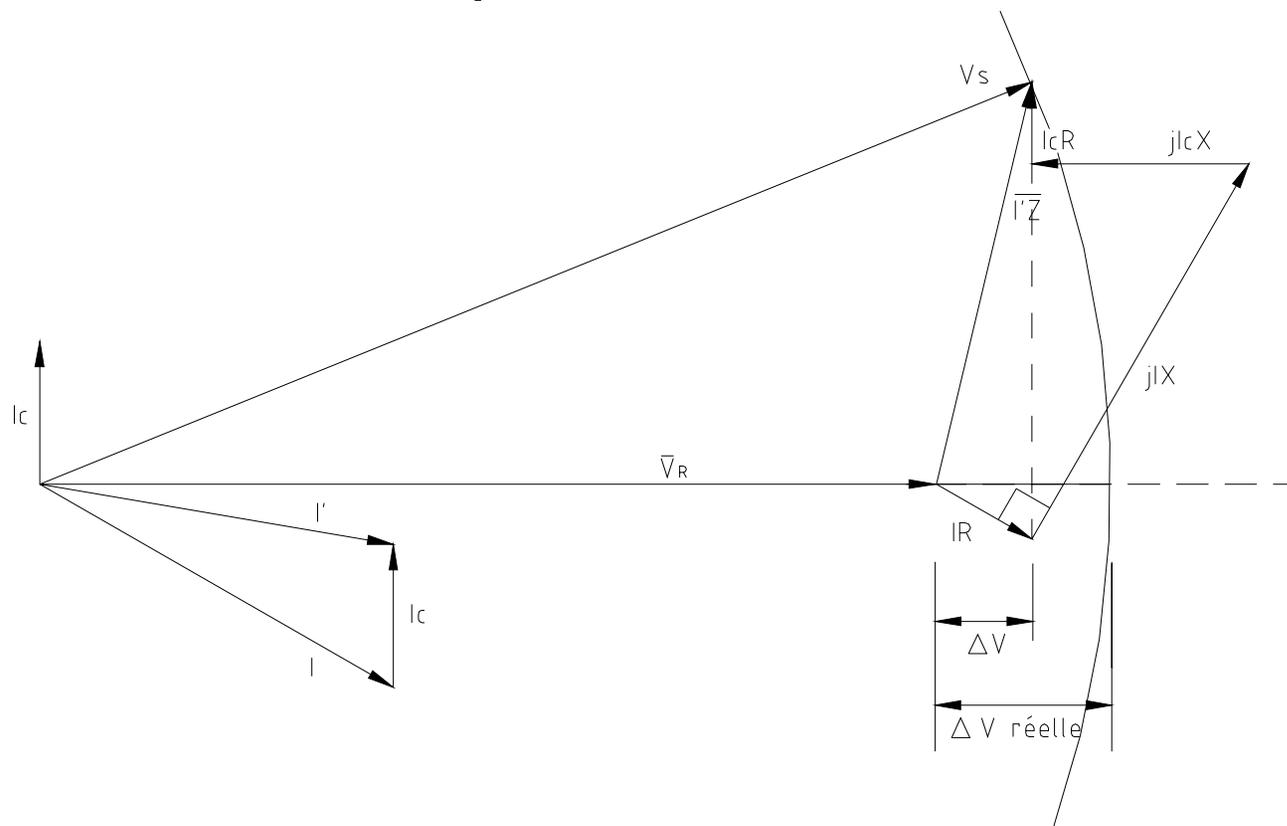


$$\Delta V_{L-N} \approx I (R \cos \theta + X \sin \theta)$$

- Effet de la compensation sur la chute de tension
  - Lorsqu'on compense localement le facteur de puissance, la chute de tension est diminuée puisqu'une partie du courant réactif ne circule pas dans le réseau d'alimentation.



- Effet de la compensation sur la chute de tension



$$\Delta V \approx I (R \cos \theta + X \sin \theta) - I_c X$$

L'élévation de tension causée par l'enclenchement ou la présence d'une batterie de condensateurs peut être exprimée par :

$$\Delta V_c \approx I_c X$$

puisque  $Q_c = 3V_r I_c$

et  $S_{cc} = (\sqrt{3} V_s)^2 / X = 3 V_s^2 / X$

Alors:

$$\Delta V_c (\%) = \frac{\Delta V_c}{V_s} \times 100\% \approx \frac{Q_c}{S_{cc}} \times 100\%$$

## Exemple :

Soit un réseau 25 kV avec un niveau de défaut de 250 MVA.

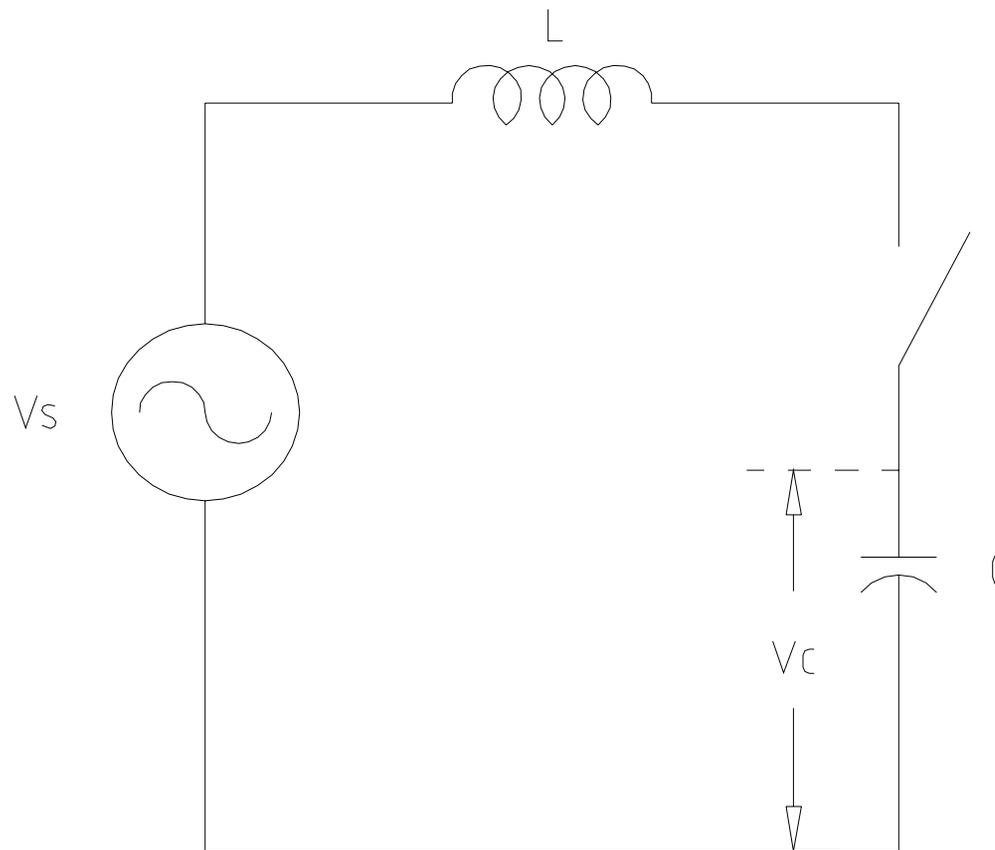
Calculer la capacité maximale d'une batterie de condensateurs commutée en un seul gradin pour limiter la variation de tension permanente à moins de 3% de la tension nominale

$$\Delta V_{\max} = \frac{Q_c}{S_{3\phi}} \leq 3\% \quad Q_c \leq 0.03 \times 250 \text{ MVA} = 7.5 \text{ M var}$$



## Phénomènes transitoires

Courant à l'enclenchement d'une 1<sup>ère</sup> batterie de condensateurs sur un réseau



Courant à l'enclenchement d'une 1<sup>ère</sup> batterie de condensateurs sur un réseau

$$I_{pk} = 1.41 \sqrt{I_{CC} \times I_1}$$

$I_{pk}$  : Courant d'appel de la batterie (A crête)

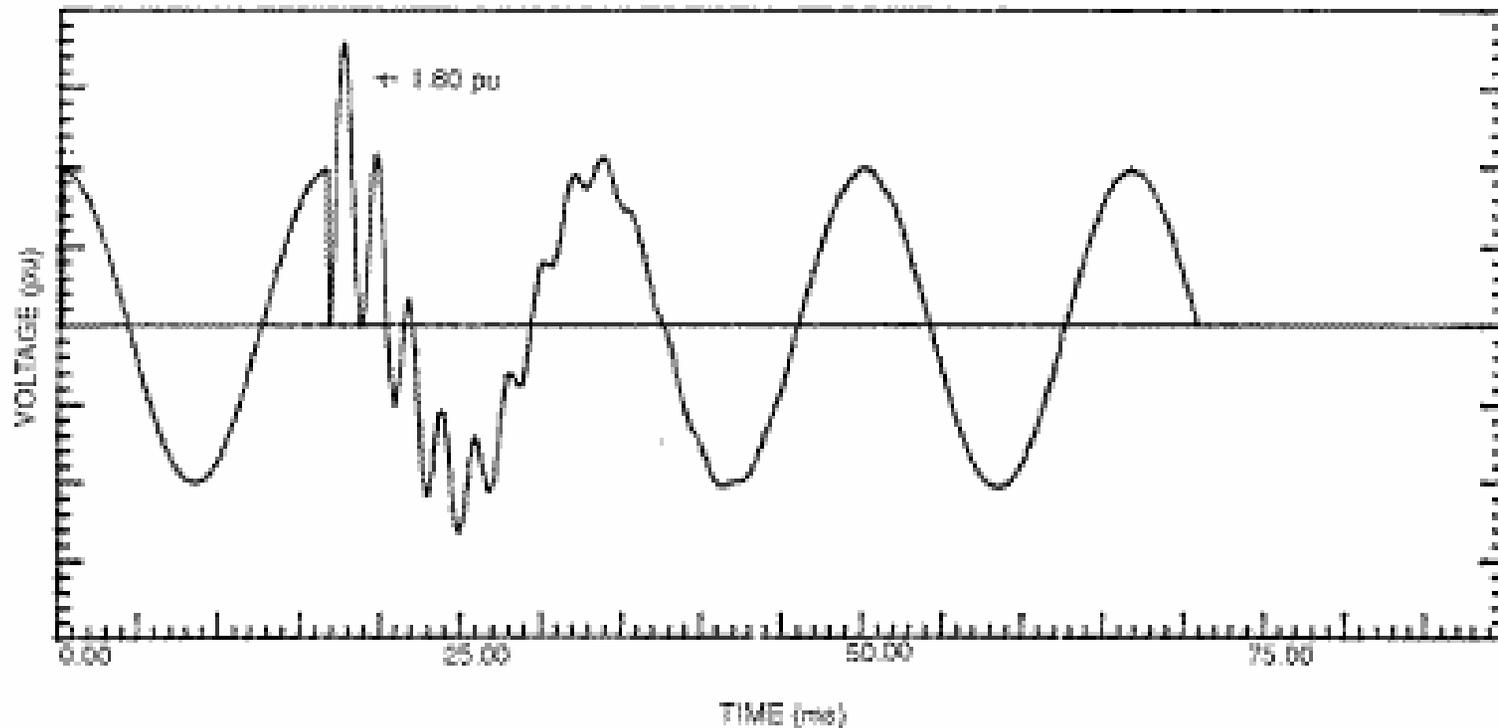
$I_{CC}$  : Courant de défaut triphasé disponible (A)

$I_1$  : Courant nominal de la batterie (A)

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

$f_0$  : Fréquence naturelle du courant d'appel de la batterie (Hz)

## Sur-tension transitoire à l'enclenchement d'une batterie de condensateurs



Courant à l'enclenchement d'une 2<sup>e</sup> batterie de condensateurs sur un réseau

$$I_{pk} = 1747 \sqrt{\frac{V_{LL} (I_1 \times I_2)}{L_{eq} (I_1 \times I_2)}}$$

- Pour  $f_s = 60$  Hz (fréquence du système)
- Énergisation d'une 2<sup>e</sup> batterie déchargée, lorsque la tension est à la valeur crête (pire cas)

$L_{eq}$  : Inductance équivalente par phase entre les deux batteries de condensateur (en  $\mu\text{H}$ )

$I_{1/2}$  : Courant nominal de la 1<sup>ère</sup>/2<sup>e</sup> batterie (A)

$V_{LL}$  : Tension ligne-ligne (en kV)

Fréquence à l'enclenchement d'une 2<sup>e</sup> batterie de condensateurs sur un réseau

$$f_t = 9.5 \sqrt{\frac{f_s \times V_{LL} \times (I_1 + I_2)}{L_{eq} (I_1 \times I_2)}}$$

- Pour  $f_s = 60$  Hz (fréquence du système)
- Énergisation d'une 2<sup>e</sup> batterie déchargée, lorsque la tension est à la valeur crête (pire cas)

$f_t$  : Fréquence du courant transitoire (en kHz)

## Exemple :

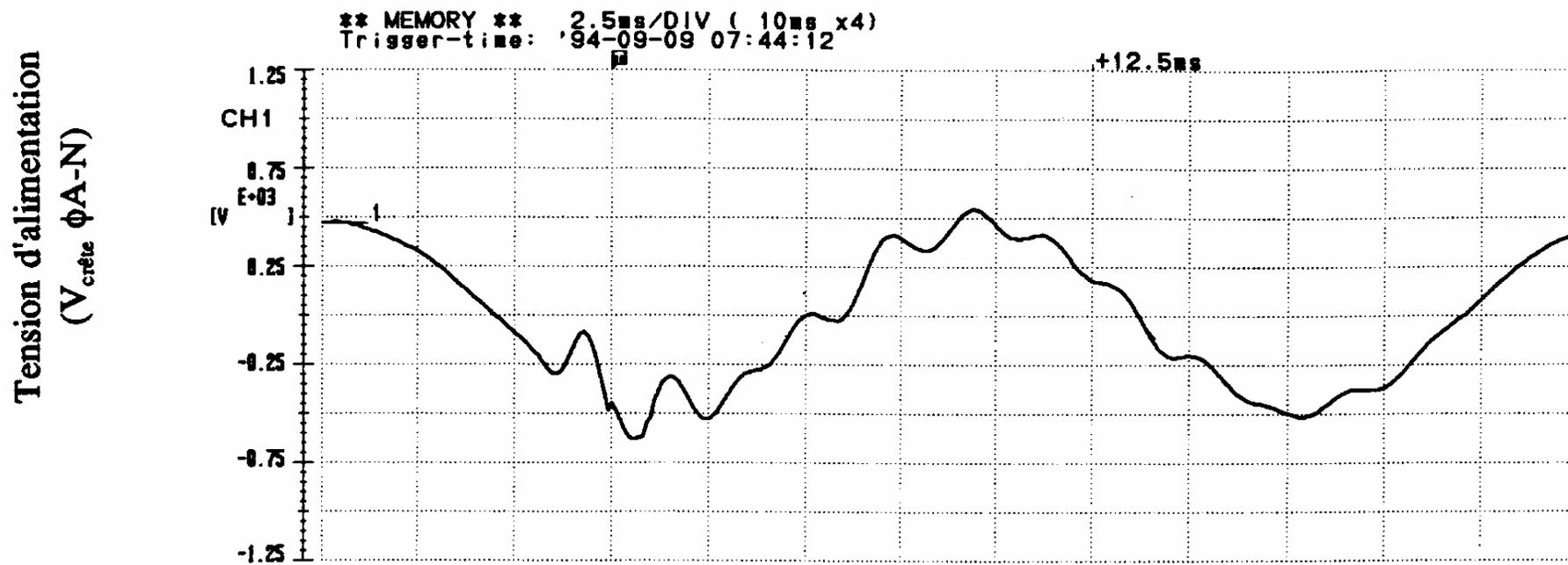
Soit un réseau 25 kV avec un niveau de défaut de 250 MVA et une batterie de condensateur de 7,5Mvar ( $\Delta V_{\max} = 3 \%$ )

$$I_1 = \frac{Q_c}{\sqrt{3}V_{LL}} \qquad I_{CC} = \frac{S_{3\phi}}{\sqrt{3}V_{LL}}$$

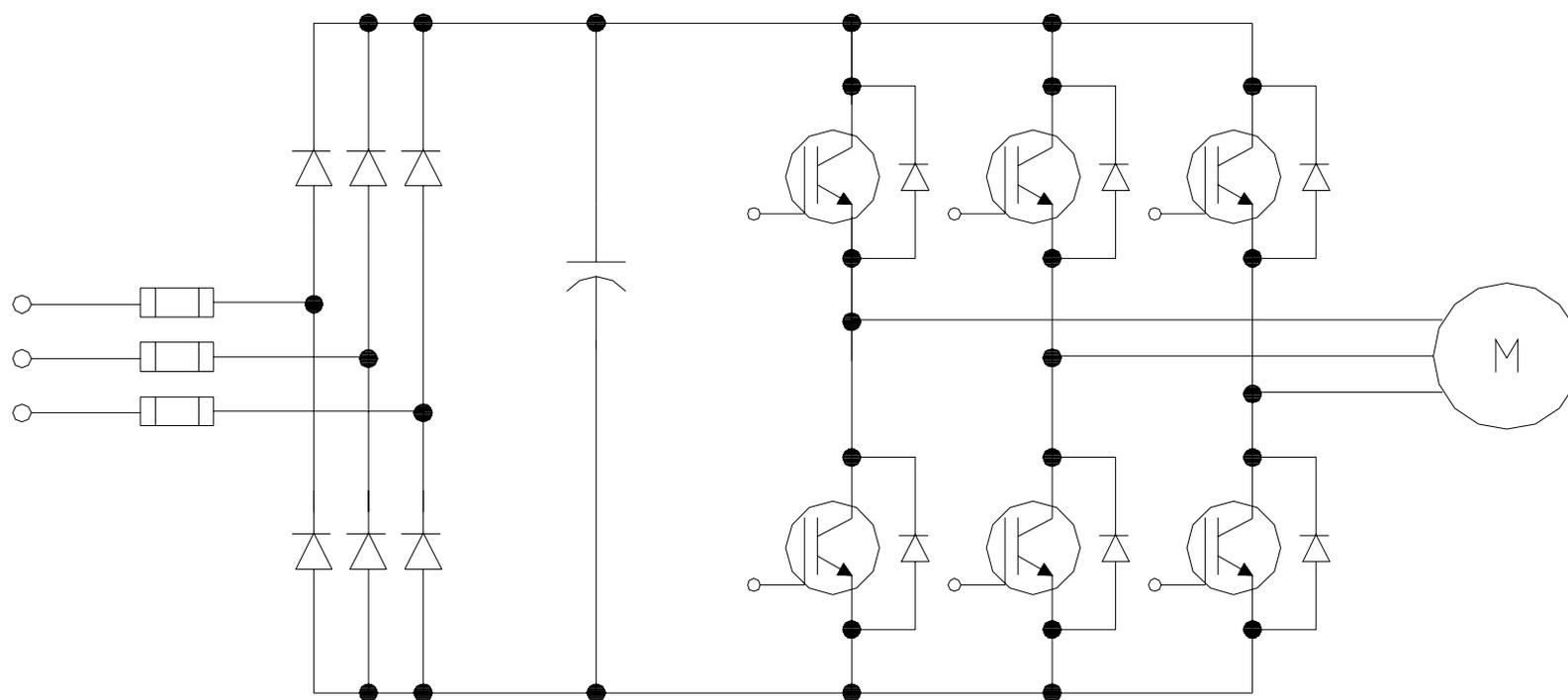
$$I_{pk} = 1.41\sqrt{I_{SC} \times I_1} = 1.41 \frac{\sqrt{S_{3\phi} \times Q_c}}{\sqrt{3} \times V_{LL}} = 1.41 \text{ kA}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = f_s \sqrt{\frac{S_{3\phi}}{Q_c}} = f_s \sqrt{\frac{1}{3\%}} = 5.8 \times f_s = 346 \text{ Hz}$$

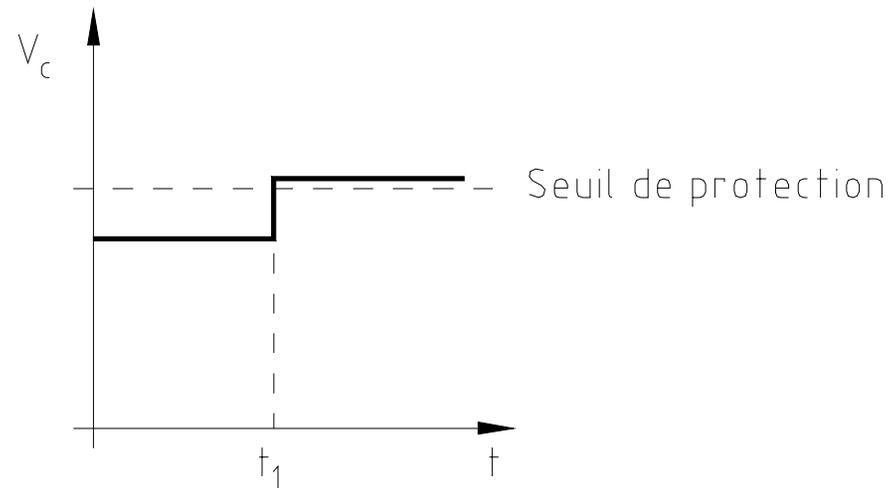
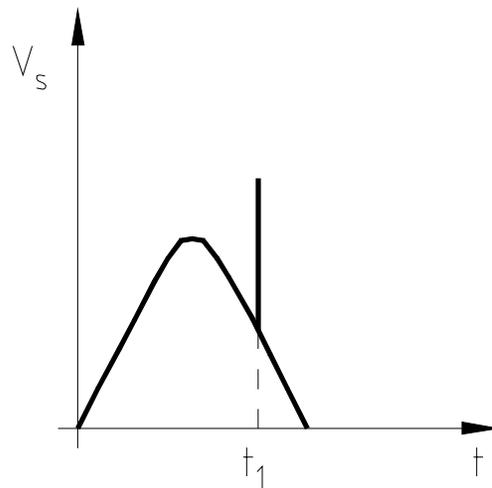
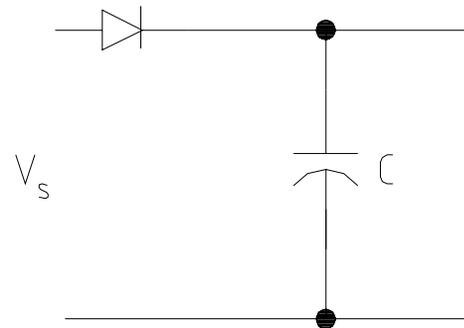
## Exemple :



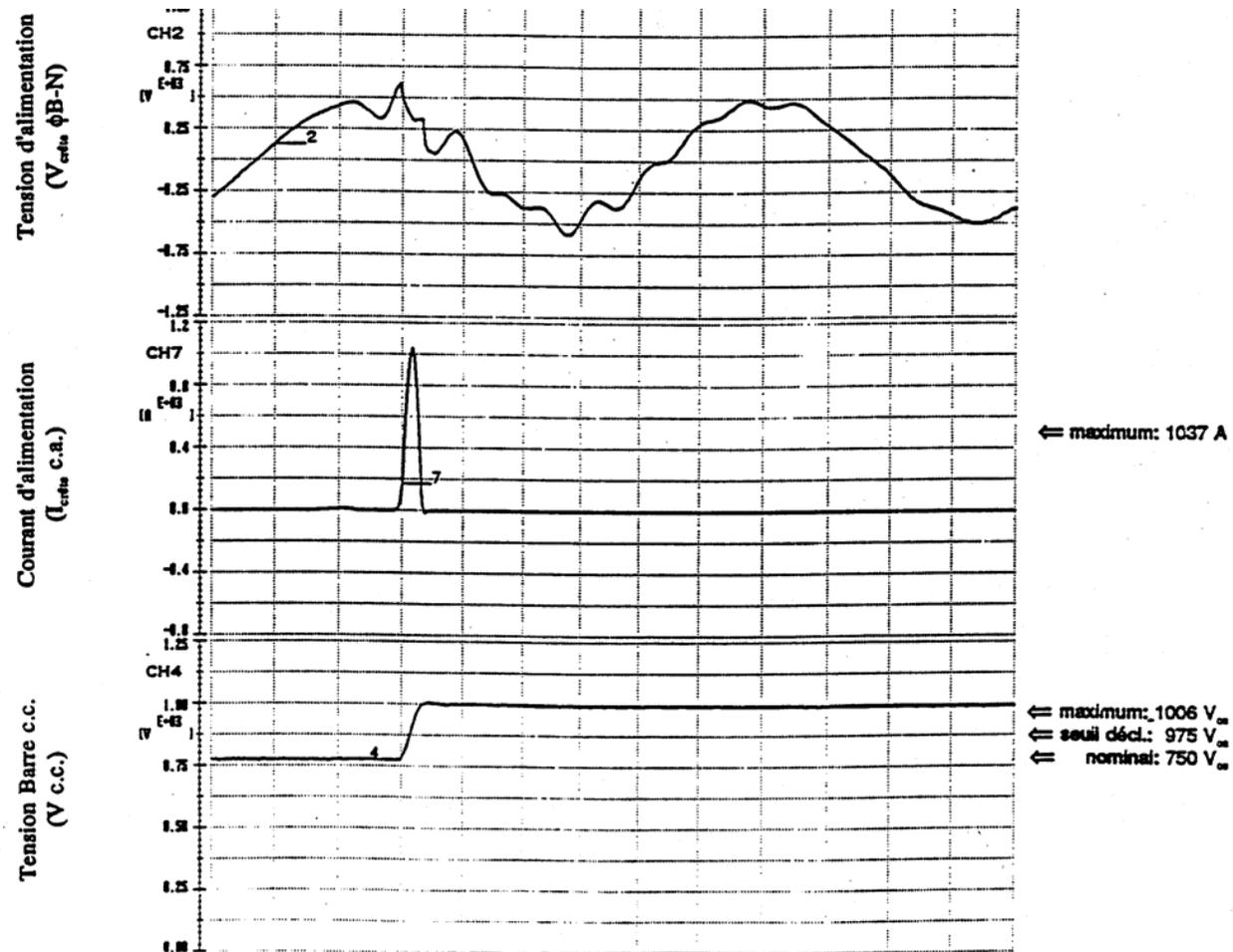
- Impact des surtensions transitoires  
Surtout sur le EVV de type MLI



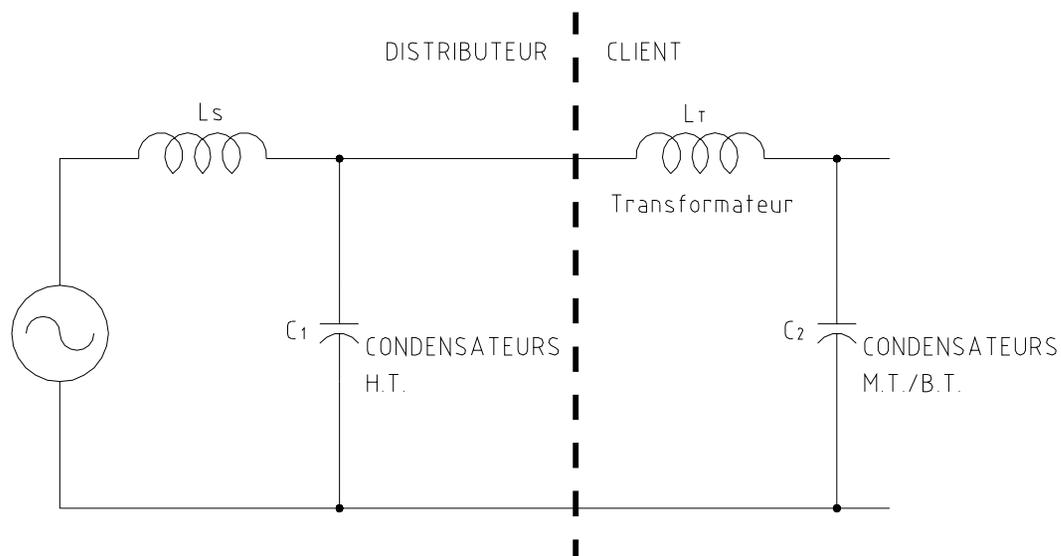
- Circuit équivalent



- Exemple de mesure



- Possibilités d'amplification de la surtension



Il y a risque d'amplification lorsque la fréquence de résonance série de l'installation du client ( $n_{BT}$ ) se situe au voisinage de la fréquence propre de la surtension transitoire ( $n_{HT}$ ) due à l'enclenchement de la batterie de condensateurs H.T.

$$n_{BT} = \sqrt{\frac{X_{CBT}}{X_T}} \qquad n_{HT} = \sqrt{\frac{X_{CHT}}{X_s}}$$

- Moyens de mitigation
  - Éliminer les résonances en syntonisant les batteries de condensateurs
  - Installer une réactance série à l'entrée de EVV
  - Utiliser une impédance de pré-insertion sur le dispositif de commutation de la batterie de condensateurs
  - Utiliser un dispositif pour l'enclenchement synchrone de la batterie de condensateurs (i.e. lorsque la tension du réseau passe par 0)

# Correction du facteur de puissance (FP)

## Comment produire de puissance réactive ?

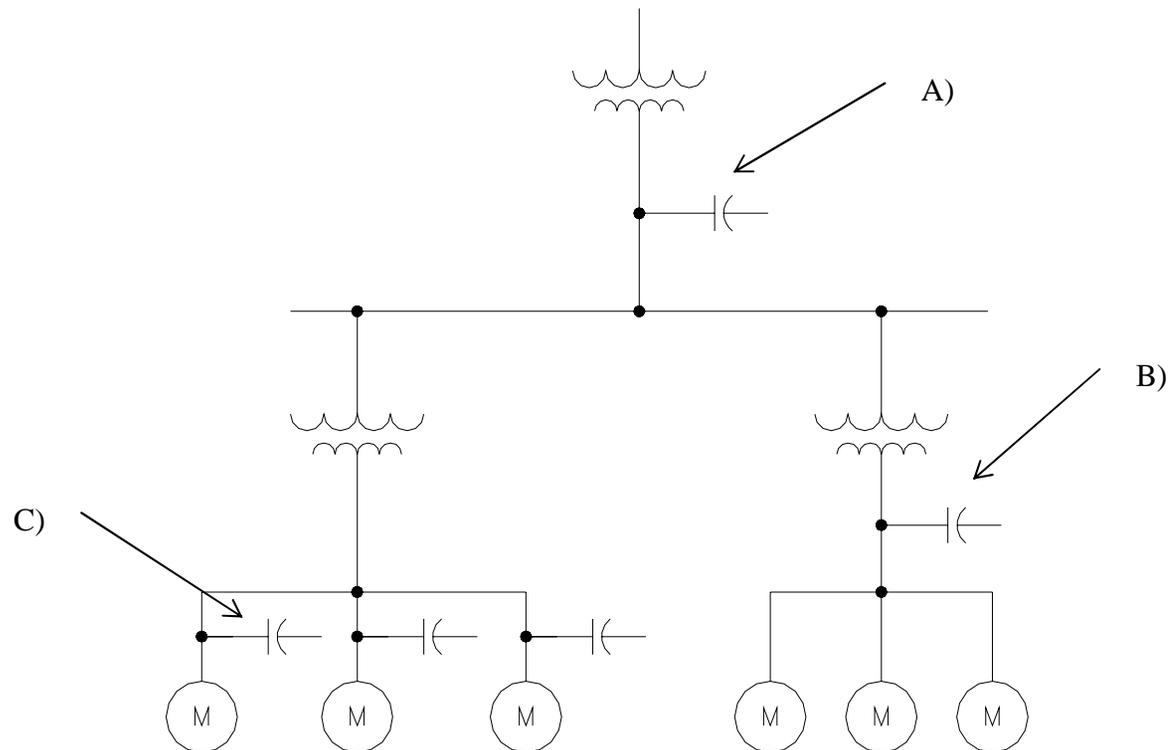
- Condensateurs
  - plus utilisés
- Moteurs synchrones surexcités
  - Économique si on a aussi à entraîner des grosses charges dans l'usine
- Compensateurs synchrones
  - Techno. conventionnelle utilisée surtout dans les réseaux
- Compensateurs statiques (filtres actifs)
  - Plus récent et encore peu utilisés (+ + \$\$)

## Meilleur endroit pour corriger le FP ?

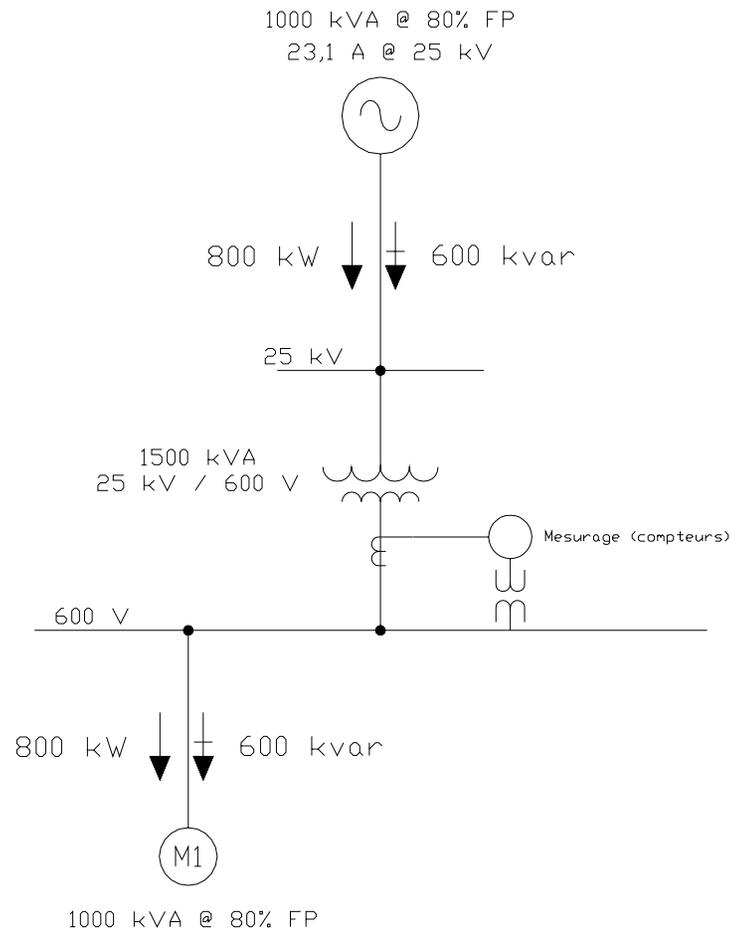
- Théoriquement :
  - le plus près possible de la charge qui consomme la puissance réactive afin de réduire les pertes dans les conducteurs (souvent peu significatif)
- En pratique :
  - Plus pratique et économique de regrouper les condensateurs (i.e. banc de condensateurs) pour:
    - Réduire les coûts d'installations et l'ajout d'infrastructure (sectionneurs, disjoncteurs, câbles, etc.)
    - Faciliter l'entretien, les vérifications et les remplacements
    - Éviter les problèmes de résonance harmonique (voir ci-après)

**Localisation**    **Description**

- A) **Batterie de condensateurs installée à l'entrée de l'usine en aval de l'unité de mesure pour la facturation.**
- B) **Installation de batteries de condensateurs à chaque sous-station, artère ou transformateur de l'usine.**
- C) **Batterie de condensateurs commutée avec un moteur ca.**



## Exemple : réduction de la facture d'électricité par la correction du FP



### Compteurs d'électricité:

- Énergie (kW.h)
- $kW_{max}$  appelé
- $kVA_{max}$  appelé
- 3 Valeurs mesurées sur une période de facturation ( $\approx$  30 jours)

### Facture (tarif M, P < 5 MW):

- Énergie -> 4 ¢/kWh
- Puissance -> 12,48 \$/kW
  - maximum entre  $kW_{max}$  ou  $0,9 \times kVA_{max}$

## Pénalité due à un FP < 90 %

Compteurs d'électricité:

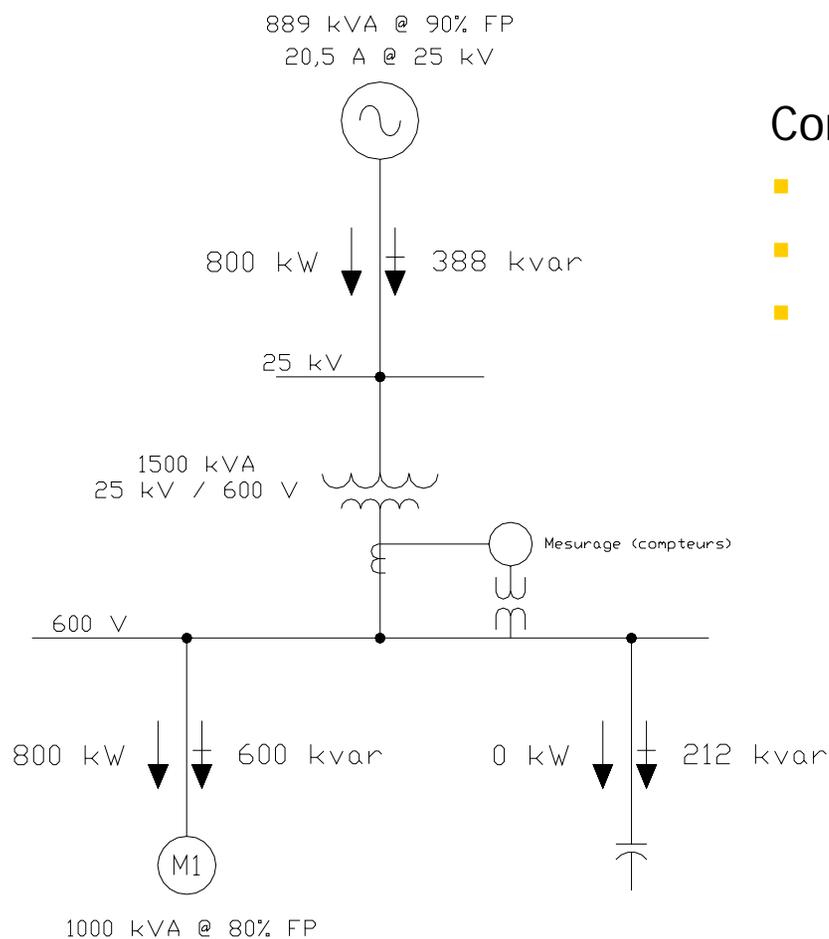
- Énergie (kW.h) =  $800 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 30 \text{ j} = 576000 \text{ kWh}$
- $\text{kW}_{\text{max}}$  appelé = 800 kW
- $\text{kVA}_{\text{max}}$  appelé =  $0,9 \times 1000 \text{ kVA} = 900 \text{ kW}$
- Valeurs mesurées sur une période de facturation ( $\approx 30$  jours)

Facture:

- Énergie =  $4 \text{ ¢/kWh} \times 576000 \text{ kWh} = 23\,040 \text{ \$}$
- Puissance (max. entre  $\text{kW}_{\text{max}}$  ou  $0,9 \times \text{kVA}_{\text{max}}$ )  
=  $900 \text{ kW} \times 12,48 \text{ \$/kW} = 11\,232 \text{ \$}$

Pénalité due au FP < 90 %:

- Puissance active non consommée (aucun travail effectué)  
 $100 \text{ kW} \times 12,48 \text{ \$/kW} = 1\,248 \text{ \$ / mois, soit } 15\,000 \text{ \$/an}$



Condensateurs requis :

- 212 kvar
- Pour avoir FP = 90 %
- Pas payant d'aller à FP > 90 %

## Facture avec $FP \geq 90 \%$

Compteurs d'électricité:

- Énergie (kW.h) =  $800 \text{ kW} \times 24 \text{ h} \times 30 \text{ j} = 576000 \text{ kWh}$
- $W_{\max}$  appelé =  $800 \text{ kW}$
- $kVA_{\max}$  appelé =  $0,9 \times 889 \text{ kVA} = 800 \text{ kW}$

Facture:

- Énergie =  $4 \text{ ¢/kWh} \times 576000 \text{ kWh} = 23\,040 \text{ \$}$  (pas de changement)
- Puissance (max. entre  $kW_{\max}$  ou  $0,9 \times kVA_{\max}$ )  
=  $800 \text{ kW} \times 12,48 \text{ \$/kW} = 9\,984 \text{ \$}$

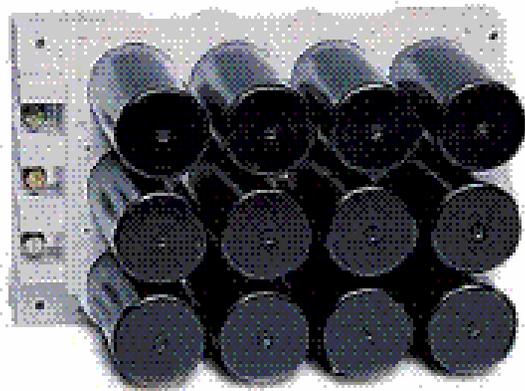
Réduction de la facture permettant de justifier l'installation de condensateurs :

- $100 \text{ kW} \times 12,48 \text{ \$/kW} \times 12 \text{ mois} = 15\,000 \text{ \$}$

## Types de filtres

## Batterie de condensateurs (BT)

- Condensateurs commutés par gradin (stages)
- Contacteurs et contrôleur qui mesure le FP cible



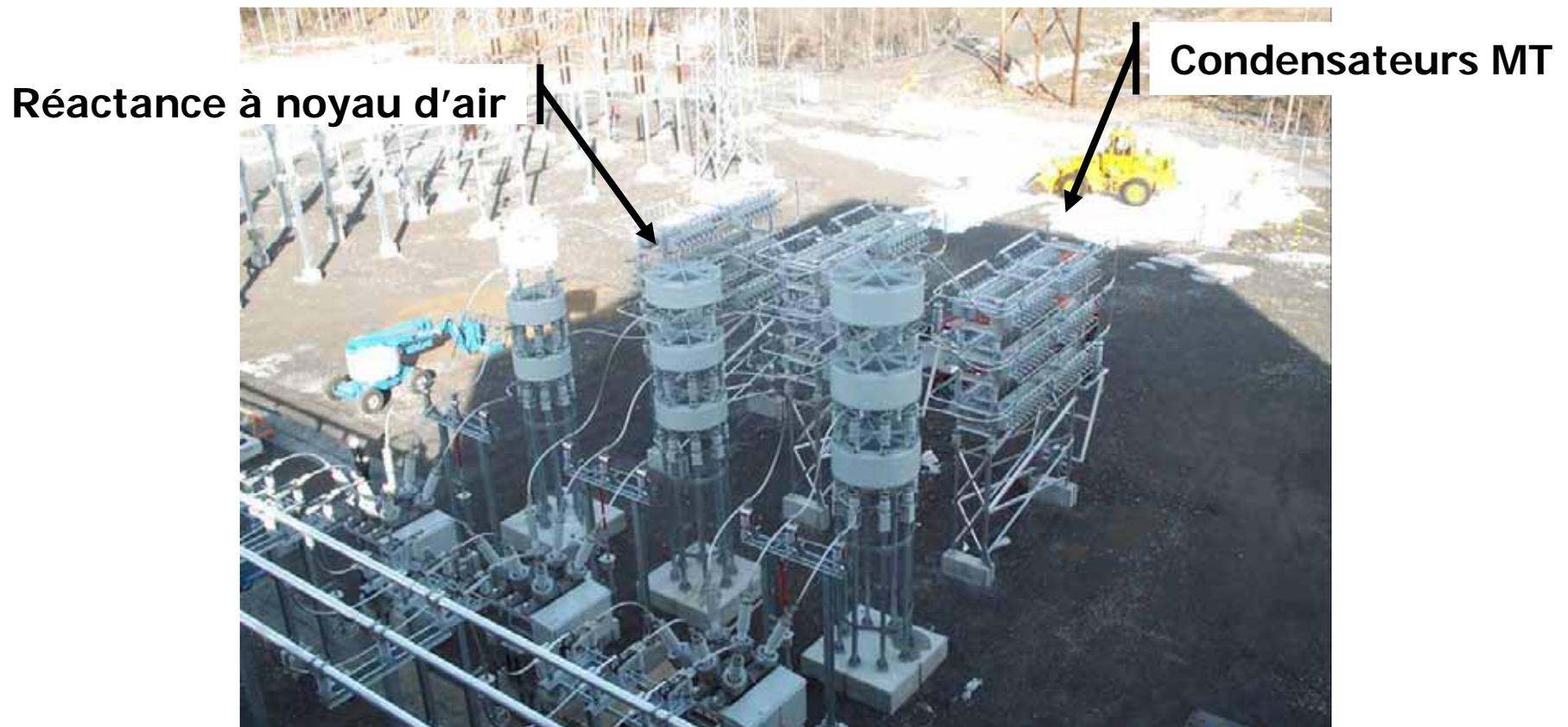
Heavy Duty Capacitor



Iron Core Tuning Reactor



## Batteries de condensateurs (MT/HT)



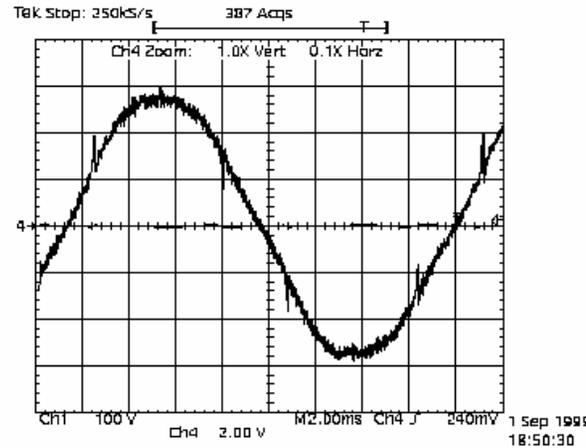
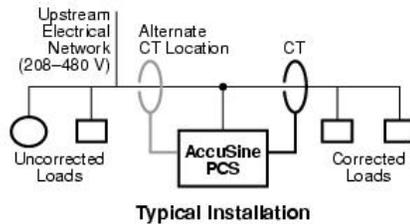
## Condensateurs

- MT (isolés à l'huile)
- BT (à sec ou isolés à l'huile)

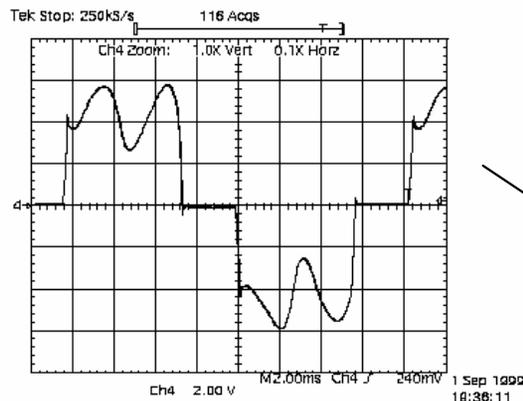


## Filtres actifs

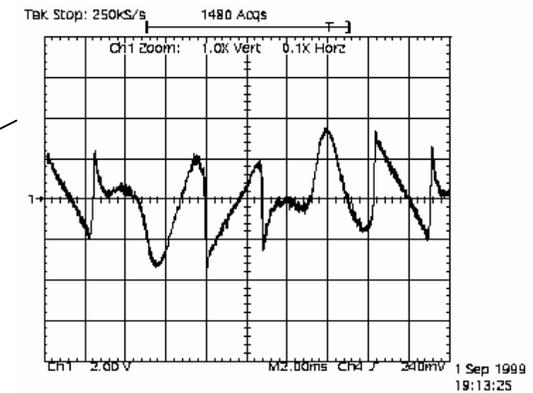
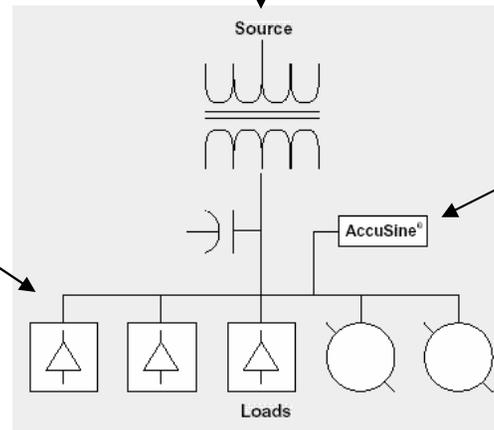
- Onduleur IGBT



Corrected waveform. <4% Ithd



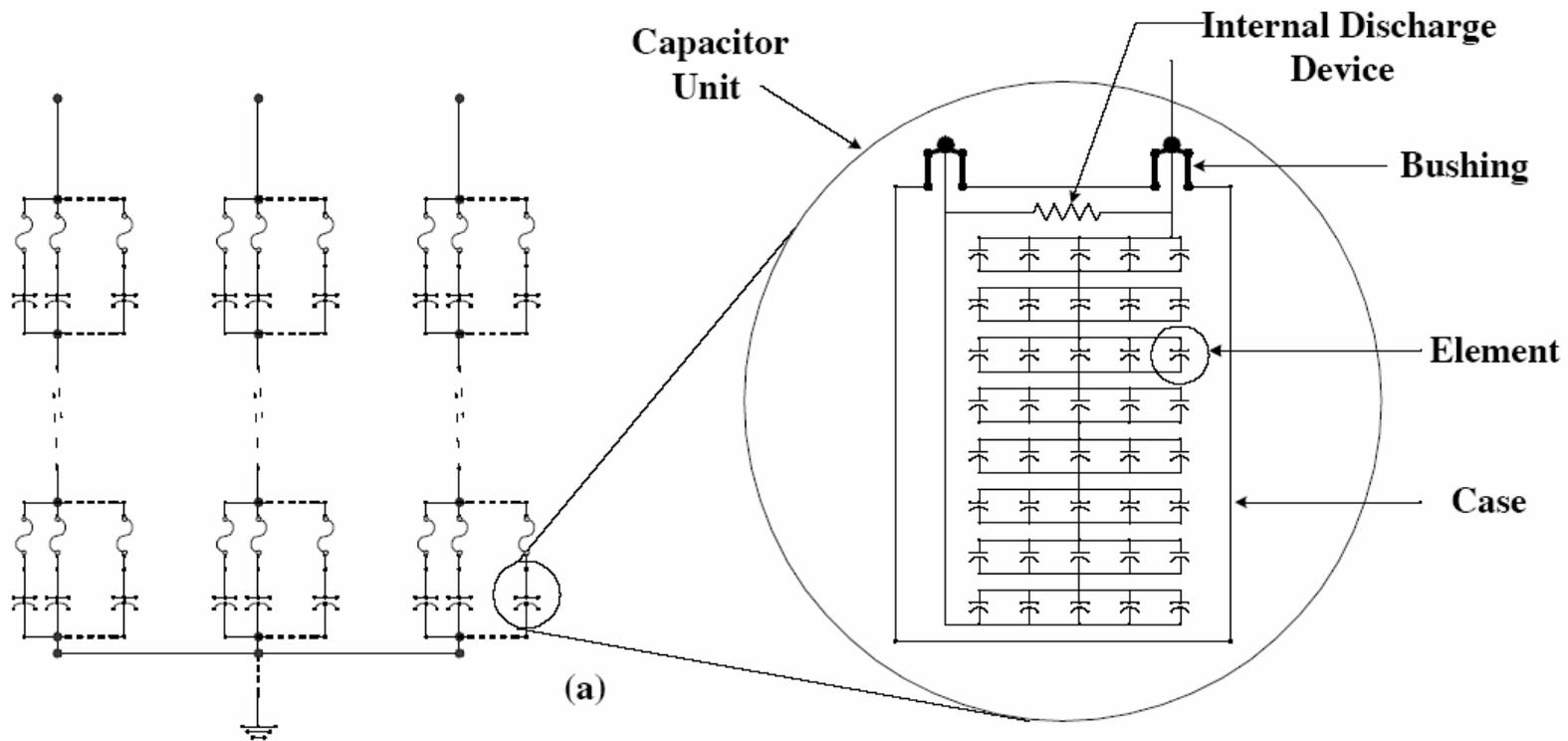
Current waveform - 38% Ithd



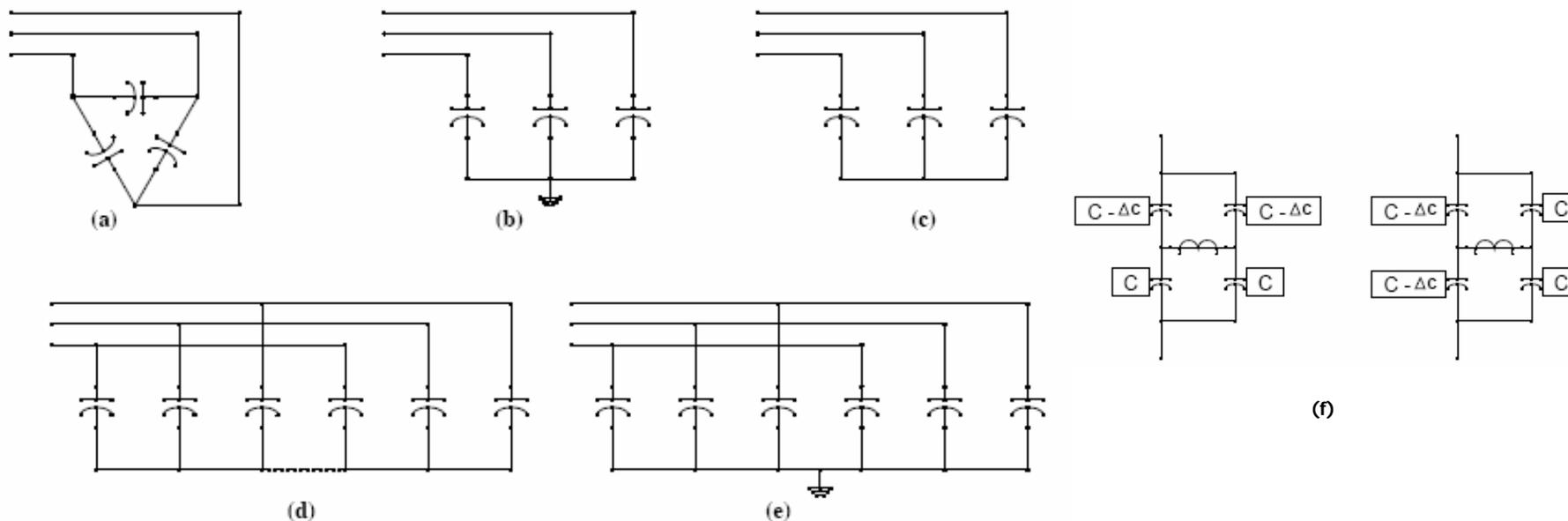
AccuSine® Injection Current

## Types de configurations Batteries de condensateurs et de filtres

## Condensateur MT/HT



## Configuration de filtres MT/HT



a) Triangle	b) Étoile neutre MALT	c) Étoile neutre flottant
d) Double étoile neutre flottant	e) Double étoile neutre MALT	f) Pont en H

## Triangle

- Surtout utilisé en distribution et pour les filtres actifs
- Les condensateurs doivent avoir deux traversées isolées à pleine tension
- Ne permet pas de filtrer les harmoniques homopolaires (multiples du rang 3)
- Nécessite des fusibles limiteurs de courant (défaut d'un condensateur résulte en défaut phase-phase élevé)

## Étoile avec neutre mis à la terre

- Requier une protection de surtension et de déséquilibre
- Procure une certaine protection contre les surtensions transitoires (foudre par exemple)
- Peut causer des problèmes de résonance
- Produit des courants de séquence homopolaire lors de la perte d'une des phases du filtre
- Peut augmenter le courant de défaut phase-terre

## Étoile avec neutre flottant

- Bloque la circulation de courants homopolaires
- N'augmente pas le courant de défaut phase-terre
- Le neutre doit être isolé à pleine tension pour supporter l'énergisation du filtre
- Difficile à détecter le déséquilibre dû aux pertes d'éléments de condensateurs
- On utilise une configuration « double étoile à neutre flottant » pour mesurer le courant de déséquilibre dans le neutre plus facilement et aussi augmenter la capacité totale du filtre

## Pont en H

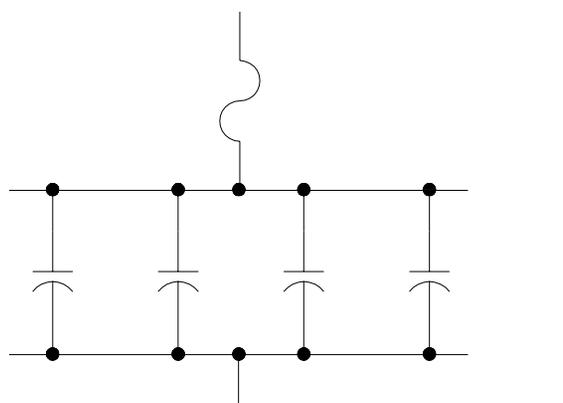
- Utilisé dans les branches de chaque phase d'un filtre dans le cas de batteries de condensateurs à grande capacité
- Permet une plus grande sensibilité de détection des déséquilibres de courant



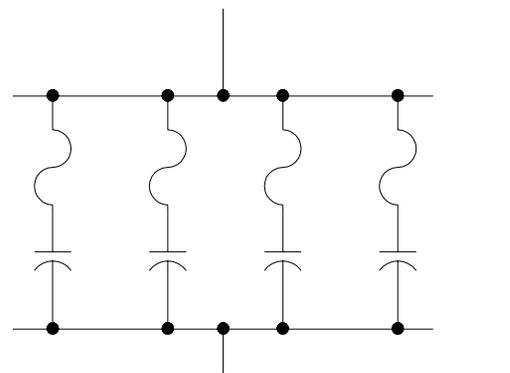
## Protection des filtres

## Protection des condensateurs

- La tension d'exploitation ne devrait pas excéder 110 % de la tension nominale en marche normale
- Le courant ne devrait pas être supérieur à 180 % du courant nominal pour les condensateurs MT

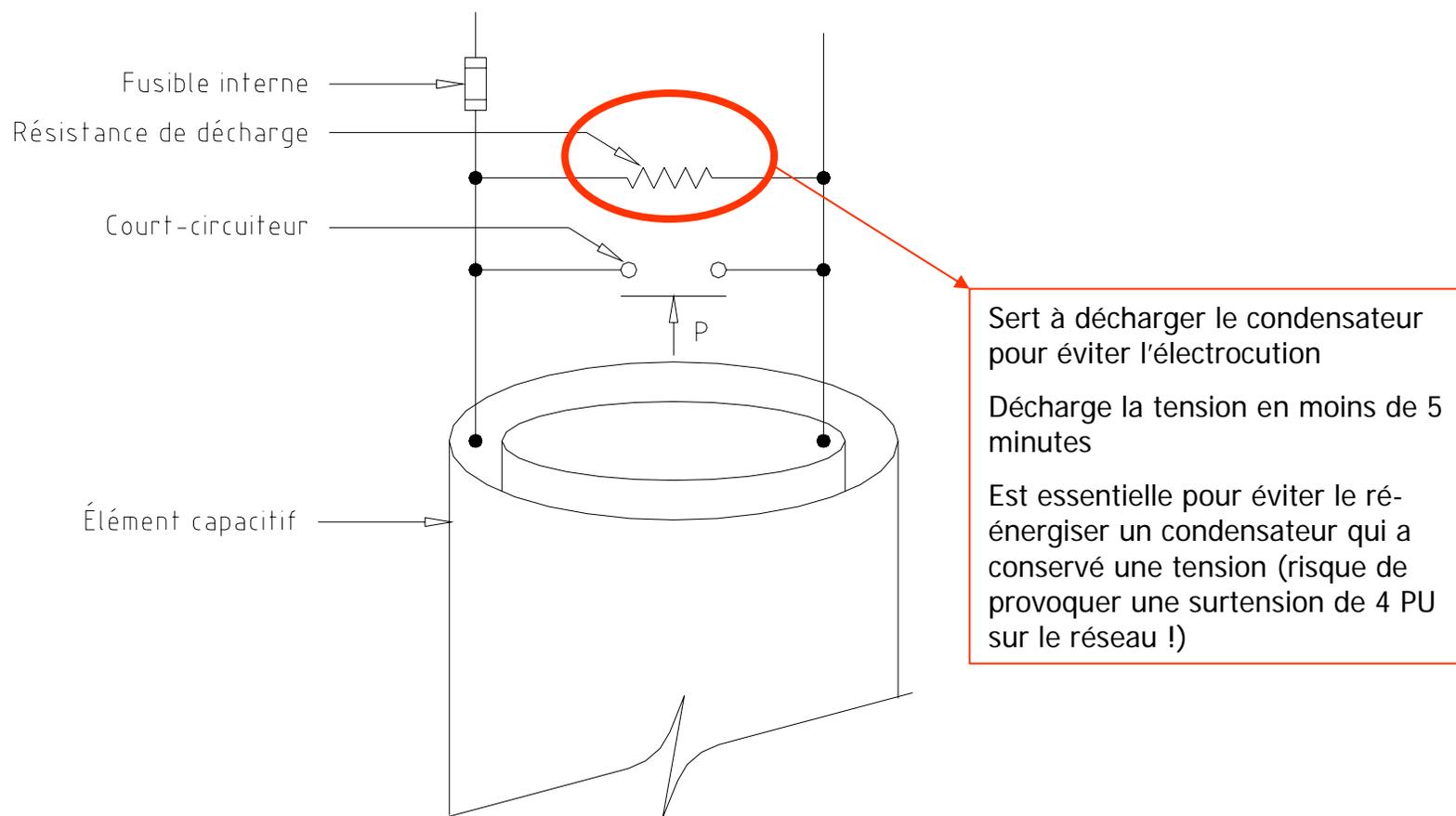


Fusibles externes

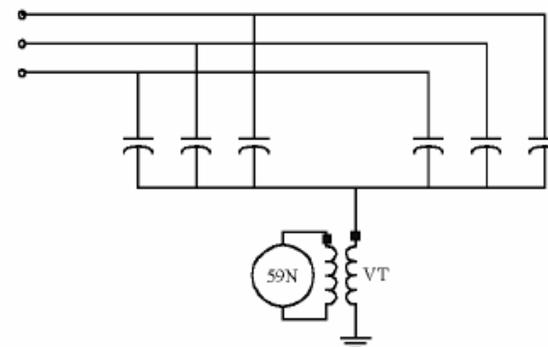
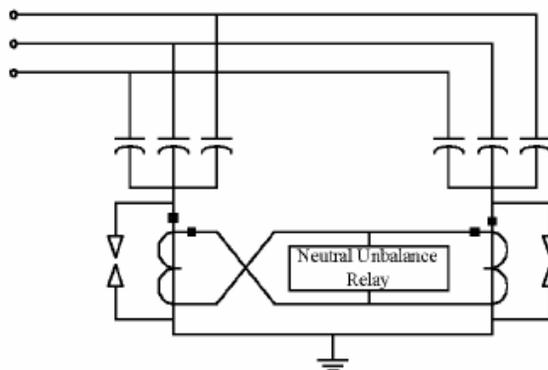
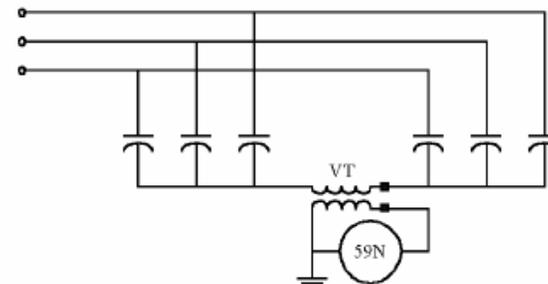
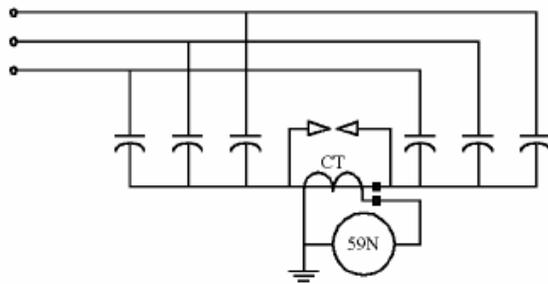


Fusibles internes

## Protection des condensateurs BT (type autoregénéral)



- Protection de déséquilibre dû aux pertes d'éléments (fusibles brûlés)





## Courants harmoniques

## Les harmoniques dans les réseaux

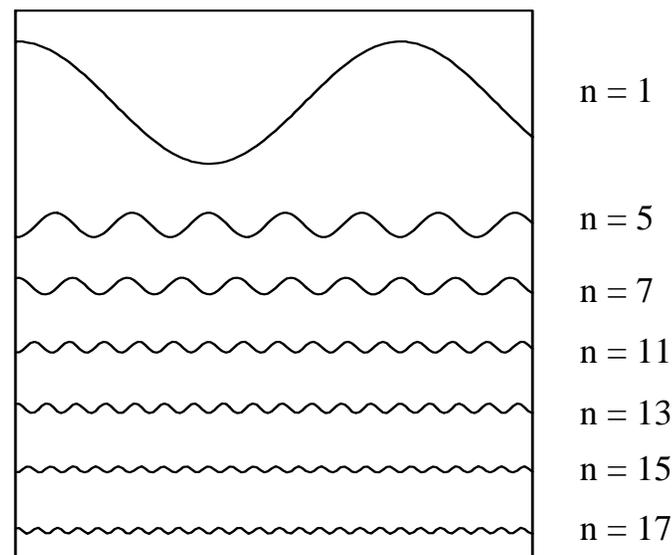
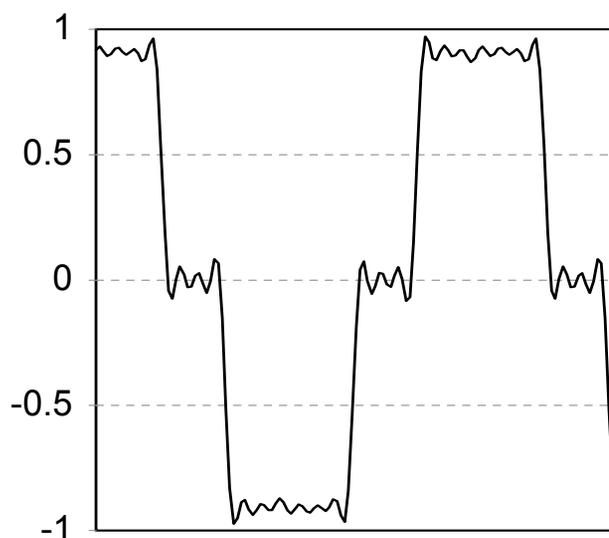
- Les éléments non linéaires ont relation courant-tension qui varie selon la tension ou le courant appliqué. Lorsqu'on applique une tension sinusoïdale à un élément non-linéaire, il en résulte un courant déformé et non sinusoïdal: il y a distorsion du courant (présence d'harmonique).
- Exemples : redresseurs à diode ou thyrisor, entraînements à vitesse variable, fours à arc, etc.

## Filtres harmoniques

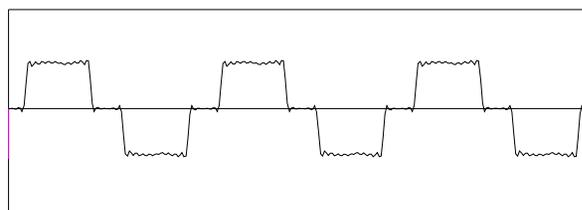
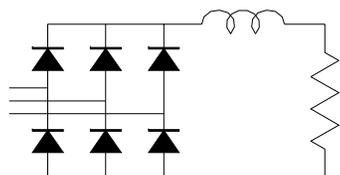
La présence d'harmoniques cause un problème lorsque :

- La source de courants harmoniques est trop importante.
- Le circuit de retour de ces courants est trop impédant, ce qui crée une distorsion de tension appréciable.
- Il y a amplification de certains courants harmoniques par la présence d'une batterie de condensateurs.

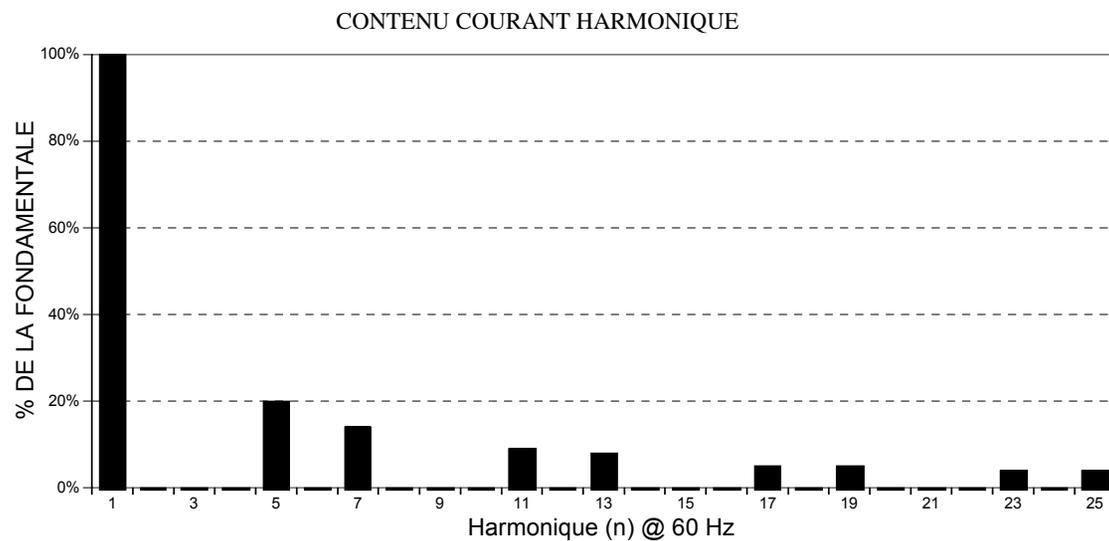
## Décomposition en harmonique



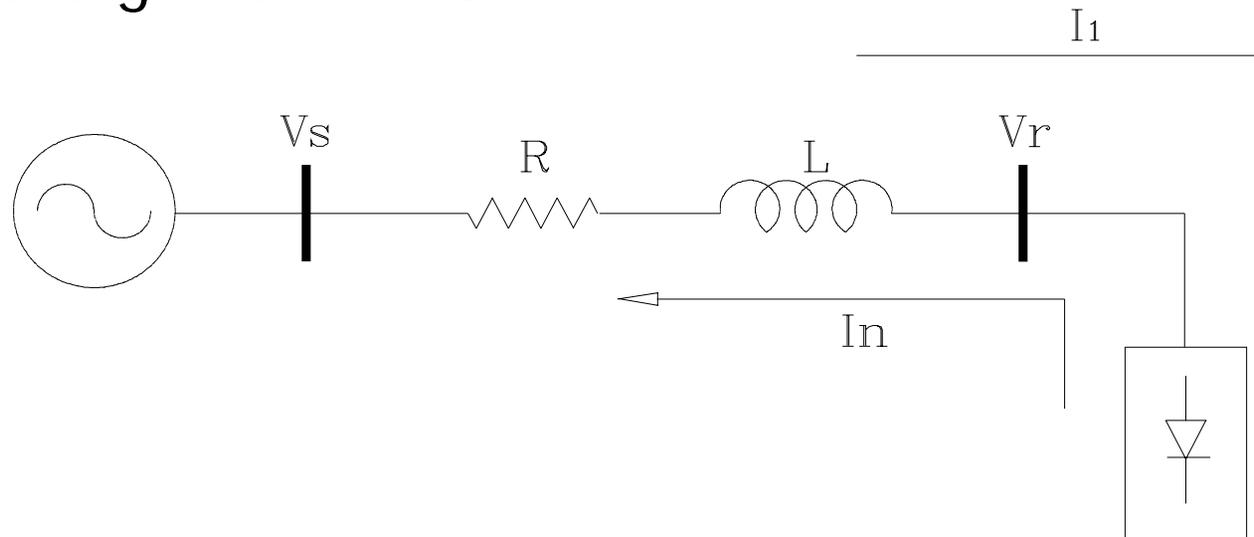
## Pont de diodes triphasé et charge RL



Onde de courant reconstituée



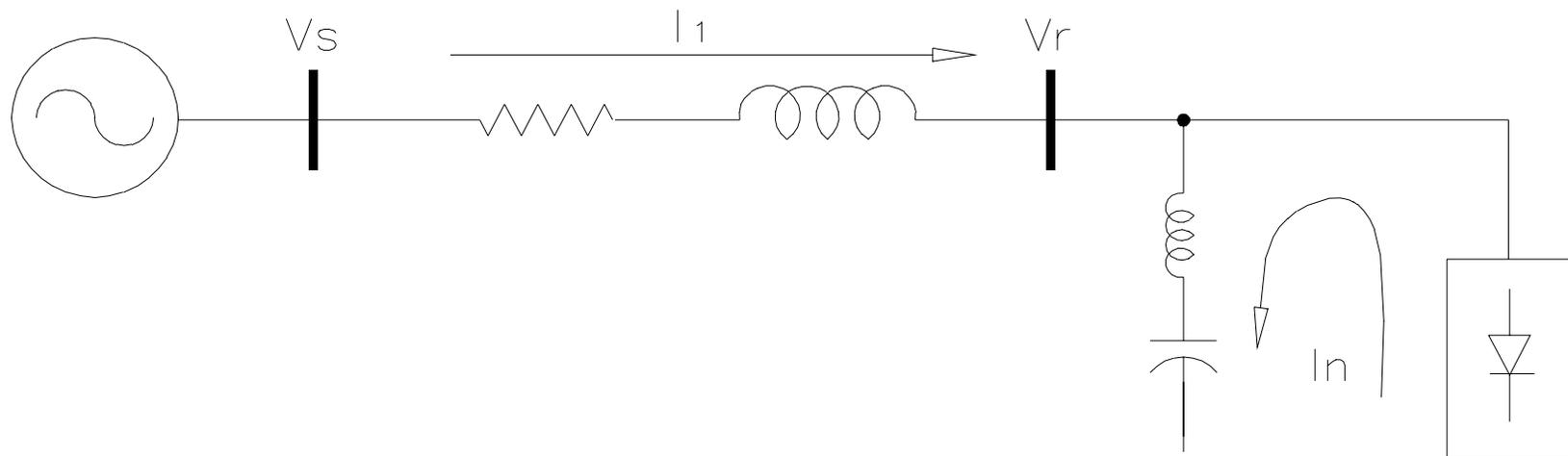
## Circulation des courants harmoniques produits par une charge non-linéraire



L'écoulement des courants harmoniques dans l'impédance interne du réseau, crée une chute de tension pour chaque rang harmonique. Il en résulte l'apparition de tensions harmoniques (distorsion).

## Principe du filtre harmonique

- Éviter que les courants harmoniques circulent dans l'impédance du réseau



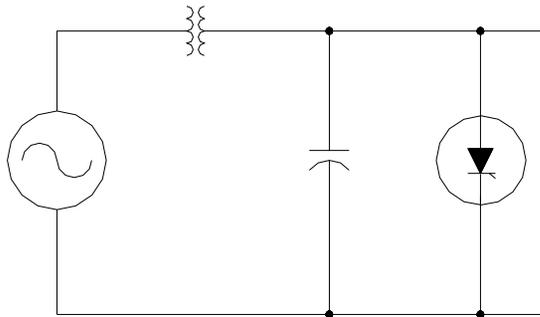


## Syntonisation des filtres

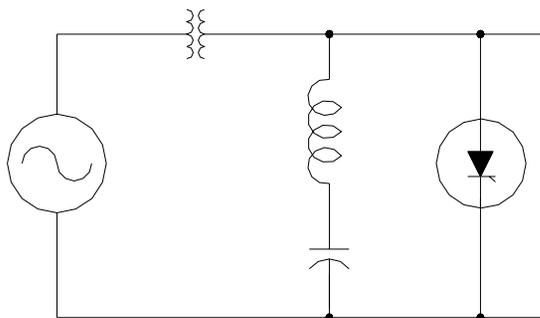
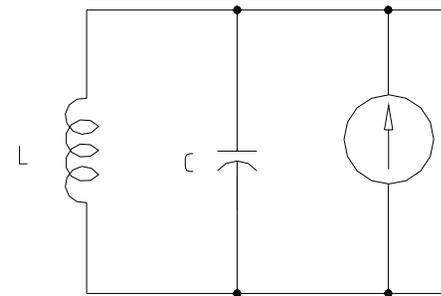
## Résonance harmonique en présence de condensateurs

- L'ajout d'une batterie de condensateurs (C) sur un réseau (impédance principalement inductive « L ») crée un circuit LC avec une fréquence de résonance naturelle ( $f_0$ )
- Si des charges non-linéaires génèrent des courants harmoniques à une fréquence voisine de la fréquence naturelle du système, il y a risque de résonance.

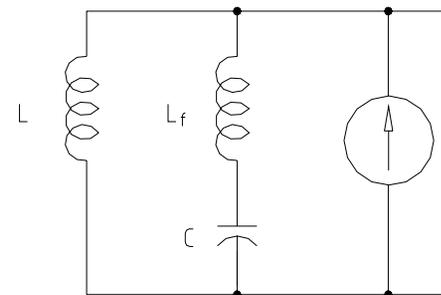
## Filtres harmoniques



Sans inductance de syntonisation

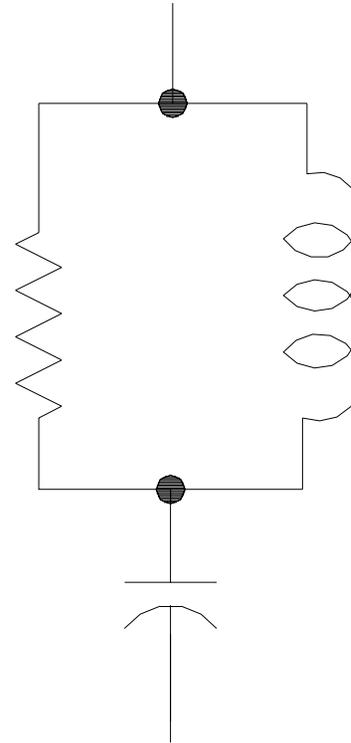


Avec inductance de syntonisation





Filtre syntonisé



Filtre passe-haut

## Résonance parallèle

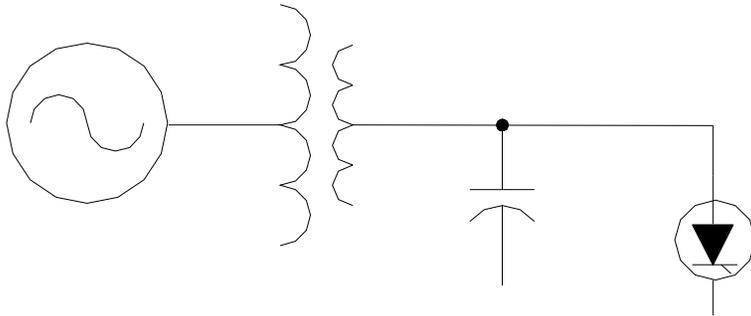
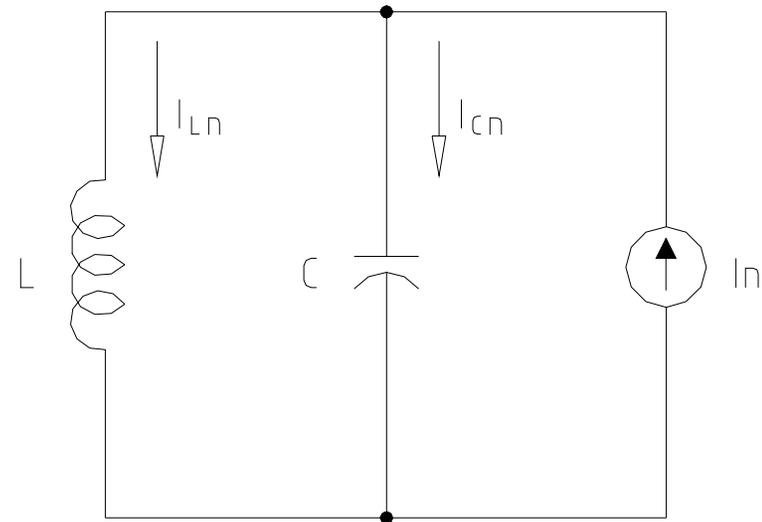


Schéma unifilaire



Circuit équivalent

Résonance parallèle lorsque  $X_L = X_C$  car:

$$Z_{\text{eq}} = Z_L // Z_c = \frac{-jX_L X_c}{(X_L - X_c)} \Rightarrow \infty \text{ pour } X_L = X_c$$

La fréquence de résonance naturelle du circuit est donnée par:

$$\omega = \omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

$$n_p = \frac{\omega_0}{\omega_1} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L}} = \sqrt{\frac{S_{cc}}{Q_c}}$$

$n_p$  = rang (x 60 Hz) de la fréquence de résonance parallèle

L'amplification de courant engendrée par la résonance parallèle provoque par exemple:

- Une forte distorsion harmonique de la tension au point de livraison
- Des risques de dommages des équipements (surcharge des condensateurs et des transfo.)
- Des déclenchements intempestifs des protections de surintensité
- Des erreurs de lecture des unités de mesurage et de facturation

## Résonance série

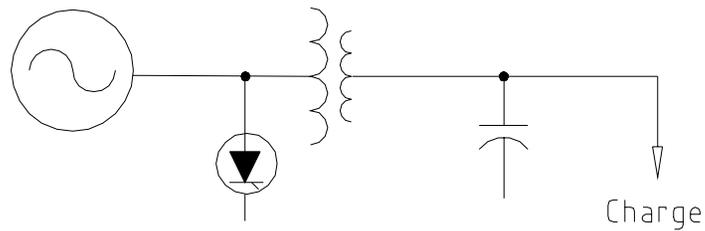
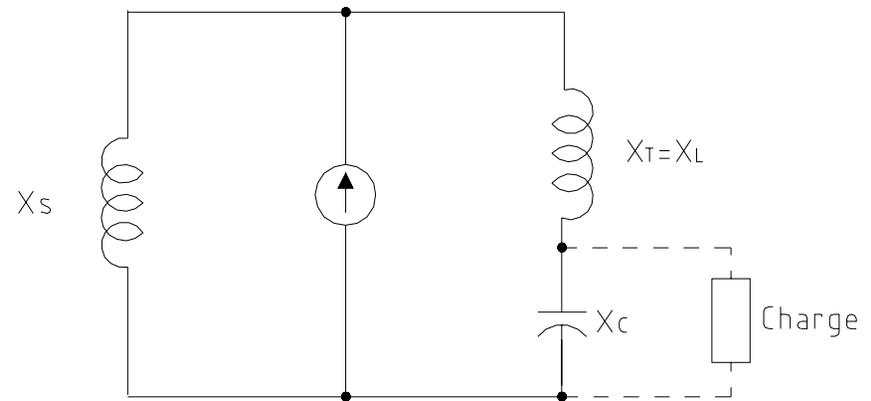


Schéma unifilaire



Circuit équivalent

Résonance série lorsque  $X_L = X_C$  :

$$\omega = \omega_0 = 1 / \sqrt{LC}$$

$$Z_{eq} = jX_L - jX_C \Rightarrow 0$$

Le courant harmonique est « absorbé » ou filtré presque entièrement dans une portion du réseau

Une SURCHARGE HARMONIQUE de la batterie de condensateurs du client peut se produire même avec un niveau de distorsion harmonique de tension acceptable sur le réseau du distributeur.

## Exemple :

Ajout d'une réactance pour syntoniser à la batterie de condensateur au rang 3

$$n_s = \sqrt{\frac{X_c}{X_f}} = 3 \quad X_f = \frac{23,8\Omega}{9} = 2,64\Omega$$

La fréquence de résonance parallèle devient donc :

$$n_p = \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X_f}} = \sqrt{\frac{X_c}{X_L + X_c / n_s^2}} = 2,6$$

## Augmentation de la tension des condensateurs

La tension fondamentale aux bornes de la batterie de condensateurs augmente à cause de la présence de l'inductance de syntonisation, ce qui oblige à surdimensionner les condensateurs en tension.

$$V_{c1} = V_{LL} \cdot \frac{-X_c}{-X_c + X_f} = 34,5 \text{ kV} \cdot \frac{-23,8}{-23,8 + 2,64} = 38,8 \text{ kV}$$

## Augmentation de la capacité

L'augmentation de tension aux bornes de la batterie fait augmenter la compensation disponible à 60 Hz comme suit:

$$Q_c = \frac{V_{LL}^2}{-X_c + X_f} = \frac{(34,5 \text{ kV})^2}{(-23,8 + 2,64) \Omega} = 56,3 \text{ M var}$$

versus 50 Mvar en absence de syntonisation, soit une augmentation de 12,5%.

En fait, à cause de l'augmentation de tension à ses bornes, la batterie de condensateur produit maintenant

$$50 \text{ M var} \times \left( \frac{38,8 \text{ kV}}{34,5 \text{ kV}} \right)^2 = 63,2 \text{ M var}$$

mais la réactance de syntonisation en consomme

$$\frac{(38,8 \text{ kV} - 34,5 \text{ kV})^2}{2,64 \Omega} = 7,0 \text{ M var}$$

## Effet de la charge résistive de l'usine

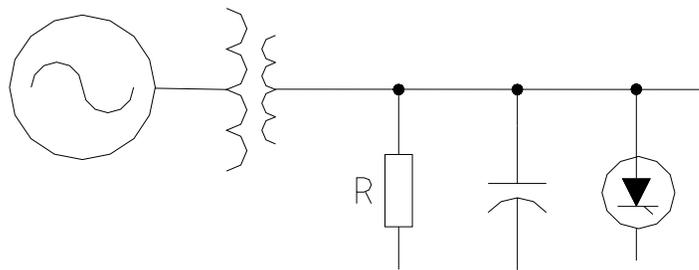
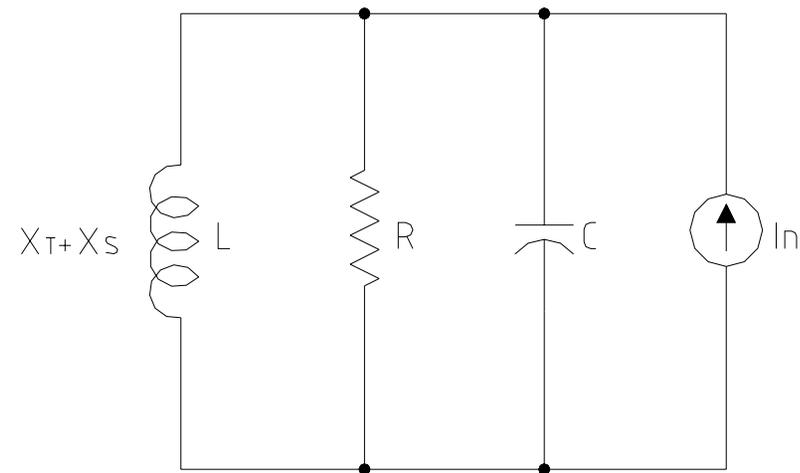


Schéma unifilaire



Circuit équivalent

