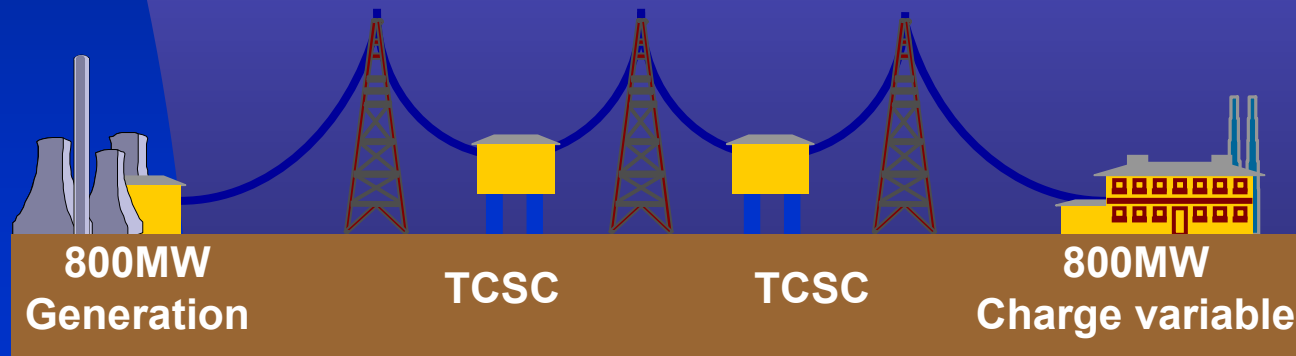


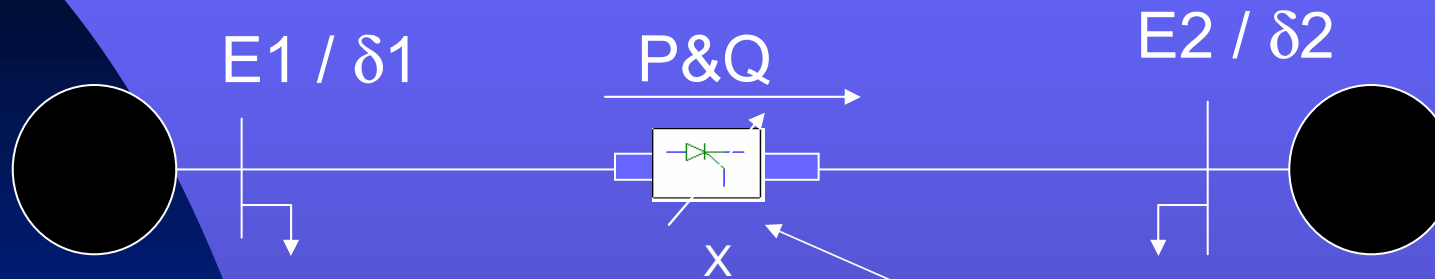
Thyristor Controlled Series Capacitor TCSC

Qu'est-ce qu'un TCSC?

- Rappels:
 - ◆ La capacité de transport d'une ligne AC est naturellement limitée:
 - ★ Effet de sa réactance qui augmente avec la longueur
 - ★ Difficulté de conserver la tension au niveau de la charge dans les limites de variation contractuelles
 - ★ Cette limitation est généralement inférieure à la limitation thermique maximale de la ligne
- LES TCSC sont des systèmes de compensation Série : Intégration de condensateurs sur la ligne
 - ★ Une technologie émergente et compétitrice des systèmes SVC et HVDC



Implantation de FACTS - TCSC ...



Compensation de l'impédance de ligne
Peut contrôler le flux de puissance de
façon continue

$$P1 = E1 (E2 \cdot \sin (\delta)) / X_{eff}$$

$$X_{eff} = X - X_c$$

Avantages d'un TCSC

- Accroît:
 - ◆ La longueur “électrique” d'une ligne de transmission AC
 - ◆ L'amortissement des oscillations de puissance
 - ◆ La stabilité de la tension
- Permet:
 - ◆ Le control dynamique du flux de puissance, par palier ou de façon continue
 - ◆ L'équilibrage des flux de charge dans les réseaux de transmission
 - ◆ Une grande plage de variation de l'impédance équivalente
 - ★ Capacitive à inductive
 - ◆ La réduction des problèmes dus aux phénomènes de résonance sub-synchrone
 - ★ Prévention des risques de rupture des arbres mécaniques

Sous-Station TCSC de Slatt , USA

- Client - Bonneville Power Administration
- Objectifs
 - ★ Réaliser la première implantation d'un TCSC dans un environnement réel
 - ★ Créer un TCSC multi-mode commercial
 - ★ Opération continue en tant que part entière du système de transmission de BPA, sous des conditions de fonctionnement sévères
- Sponsorisé par l'EPRI
- Site choisi afin d'exposer le TCSC à des conditions de fonctionnement sévères

Première implantation Mondiale d'un TCSC

Schéma filaire du TSCS de Slatt

Compensation nominale pour les 3 phases: 202 MVar

Vers Buckley

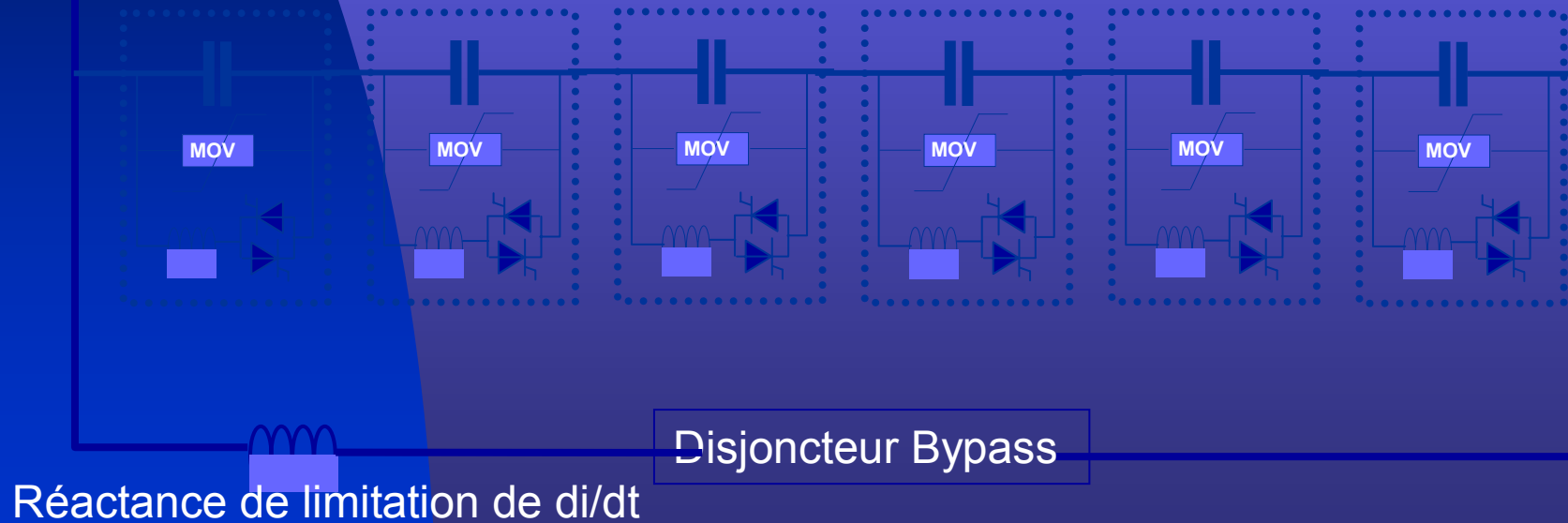
Bypass déconnection

Vers Slatt

Déconnexion
Isolation

Déconnexion
Isolation
(avec résistance)

Modules TCSC (6 identiques)



TCSC - Valve Thyristor

- Tension jusqu'à 36kV
- Courant nominal jusqu'à 3000A
- Système de contrôle tout numérique "hautes performances" permet un contrôle local et distant
- Des algorithmes de contrôle spécifiques ont été développés afin d'accroître les performances dynamiques



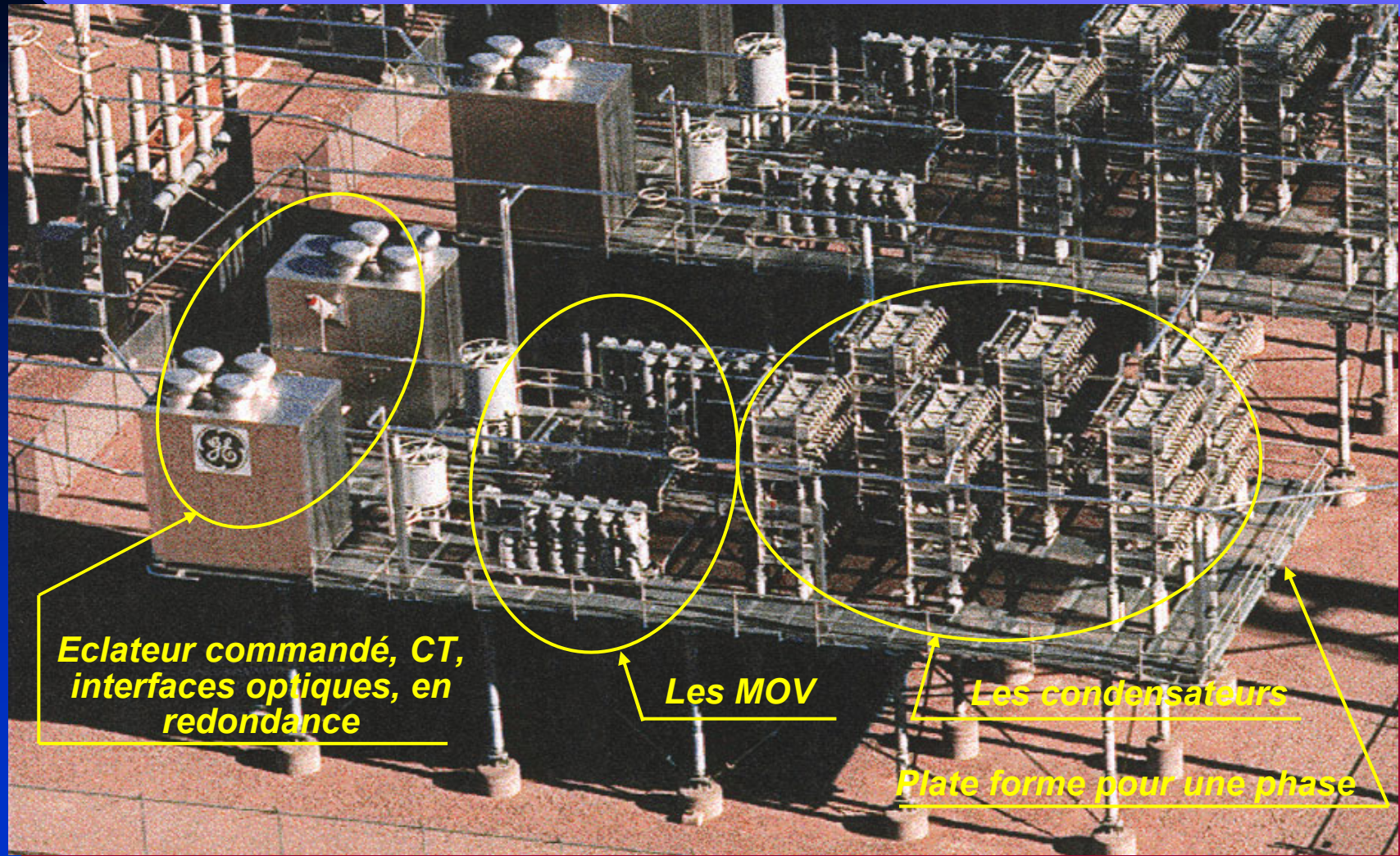
Sous-Station TCSC de Slatt , USA

- Six modules TCSC identiques par phase
- Contrôle indépendant de chaque module
- Courant nominal: 2900A
- 202Mvar
- Installé in 1993



En Opération Commerciale depuis 1995

COMPENSATION SERIE: Installation GE



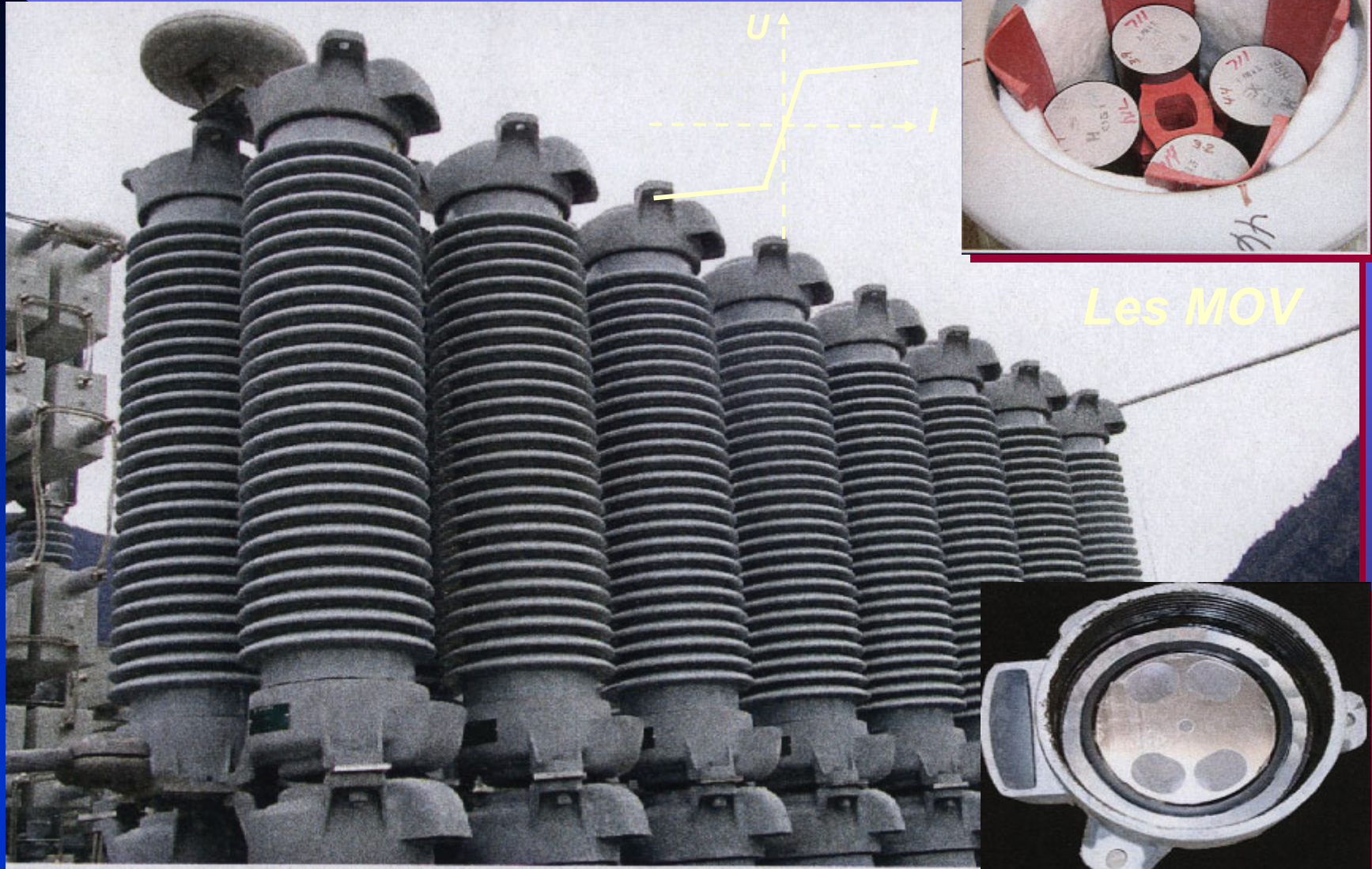
*Eclateur commandé, CT,
interfaces optiques, en
redondance*

Les MOV

Les condensateurs

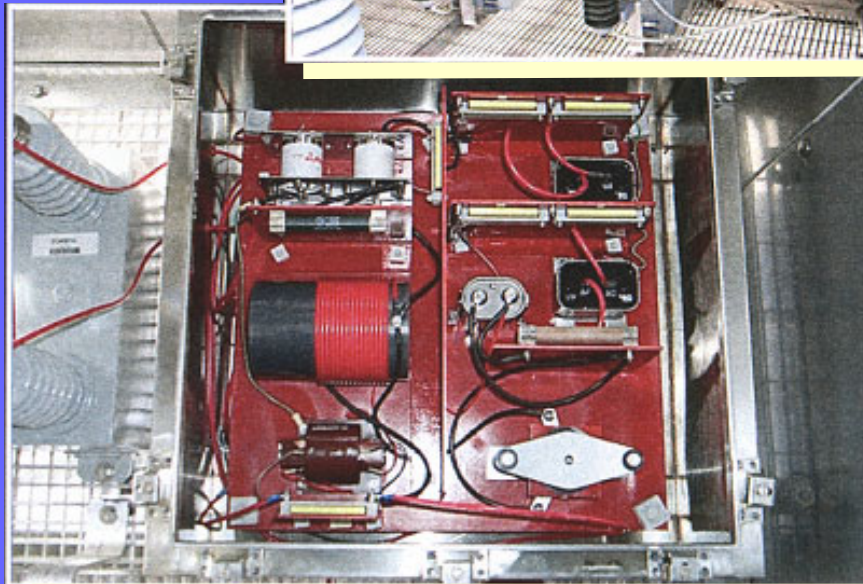
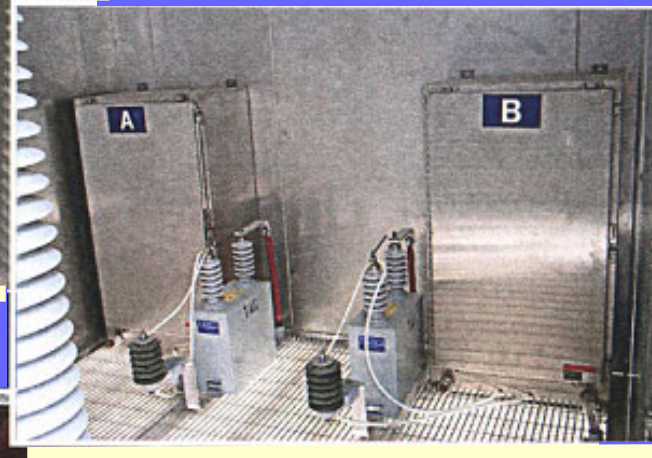
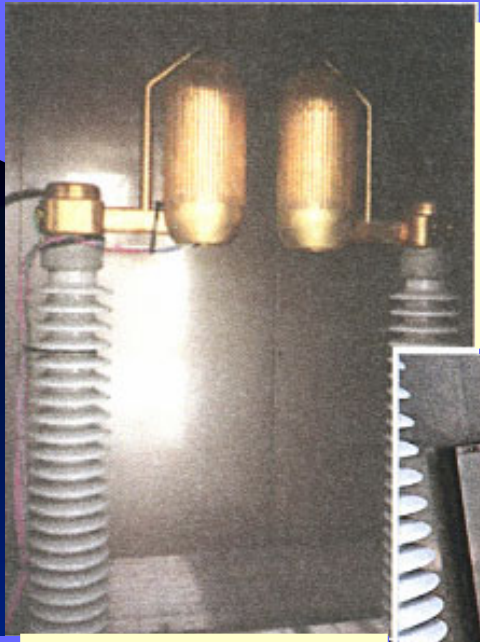
Plate forme pour une phase

COMPENSATION SERIE: Installation GE



Les MOV

COMPENSATION SERIE: Installation GE

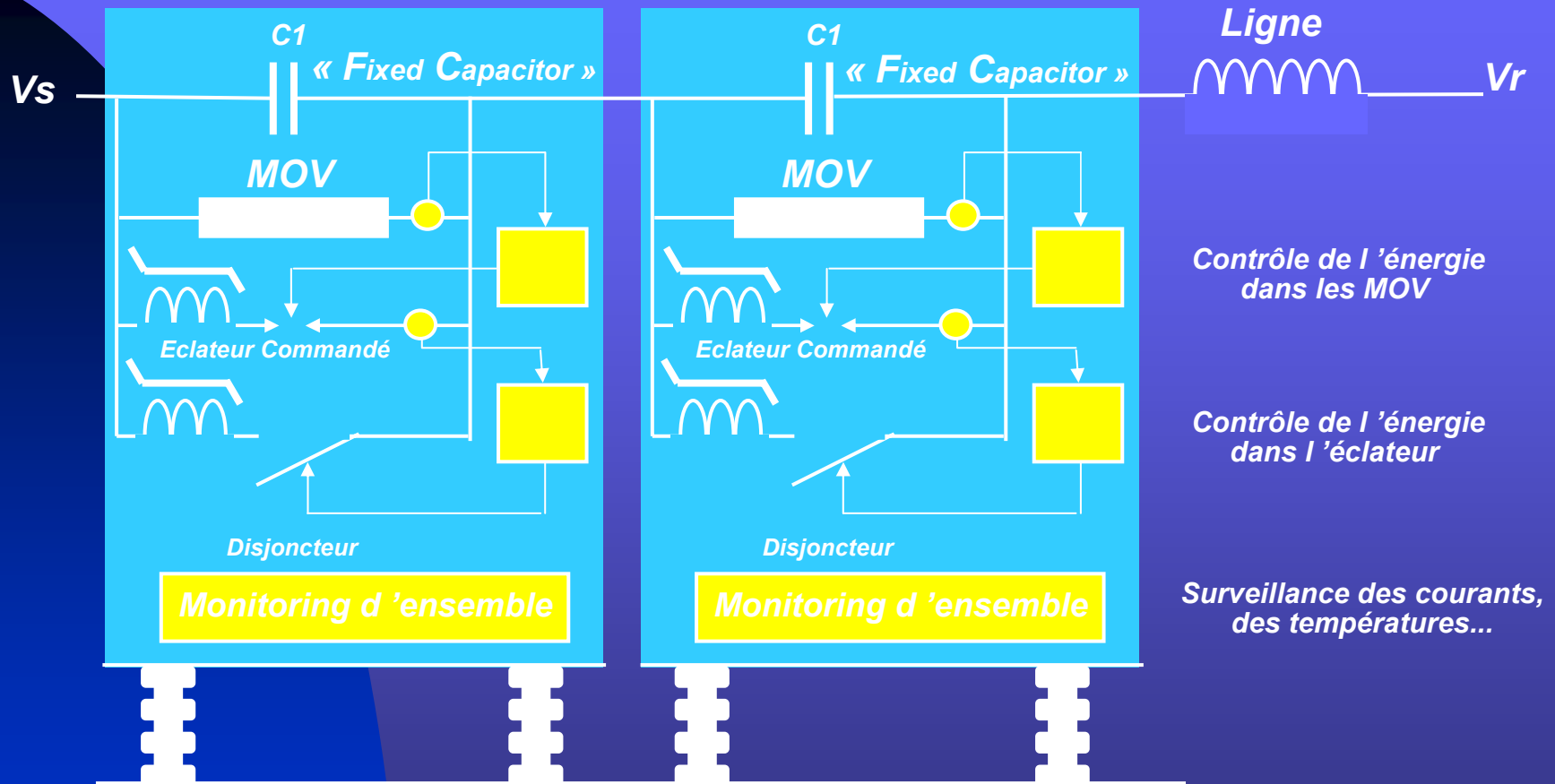


L 'Eclateur commandé

Ça a l 'air simple et rustique, mais il ne faut pas se méprendre, c 'est de la haute technologie...

A noter malgré tout, que dans certains cas favorables il est possible de ne pas utiliser d 'éclateurs, mais des thyristors : courants de défaut réduits... Impédance de ligne... Hypothèses de localisation des défauts...

COMPENSATION SÉRIE « Condensateur fixe » Principe

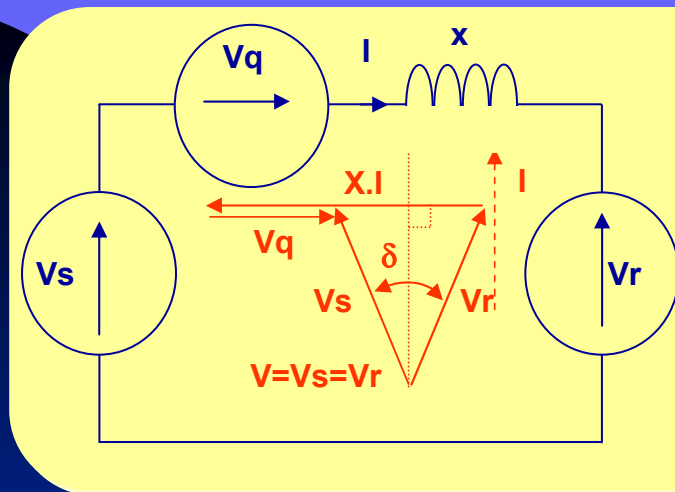


La fiabilité du système repose sur la qualité de ses protections
Deux composants clés: les MOV et l'éclateur commandé.

Static Synchronous Series Compensator

SSSC

FACTS MODERNES : Compensation série



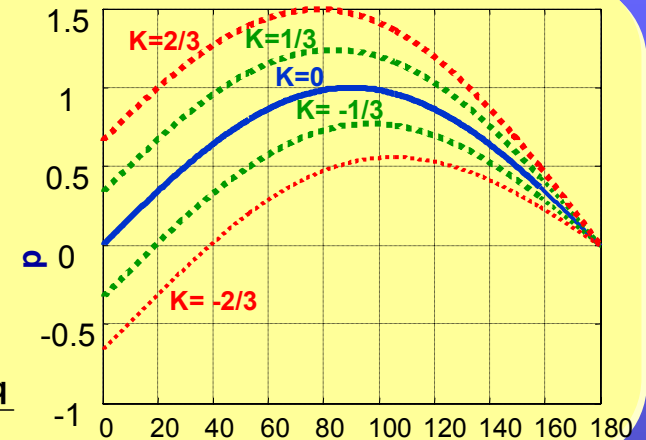
$$P = V \cdot I \cdot \cos \frac{\delta}{2}$$

$$X \cdot I - V_q = 2 \cdot V \cdot \sin \frac{\delta}{2}$$

$$I = \frac{V_q + 2 \cdot V \cdot \sin \frac{\delta}{2}}{X}$$

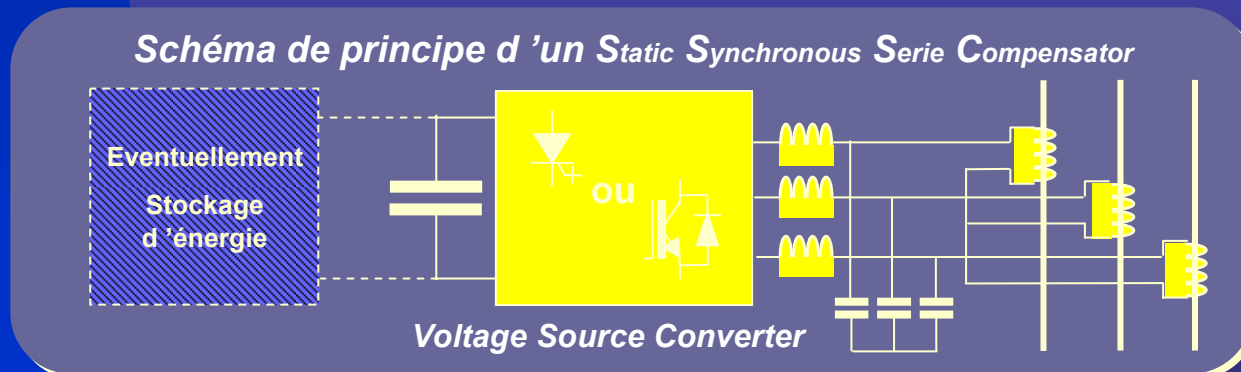
$$P = \frac{V^2}{X} \cdot \sin \delta + \frac{V \cdot V_q}{X} \cdot \cos \frac{\delta}{2}$$

$$p = \sin \delta + k \cdot \cos \frac{\delta}{2}, \quad k = \frac{V_q}{V}$$



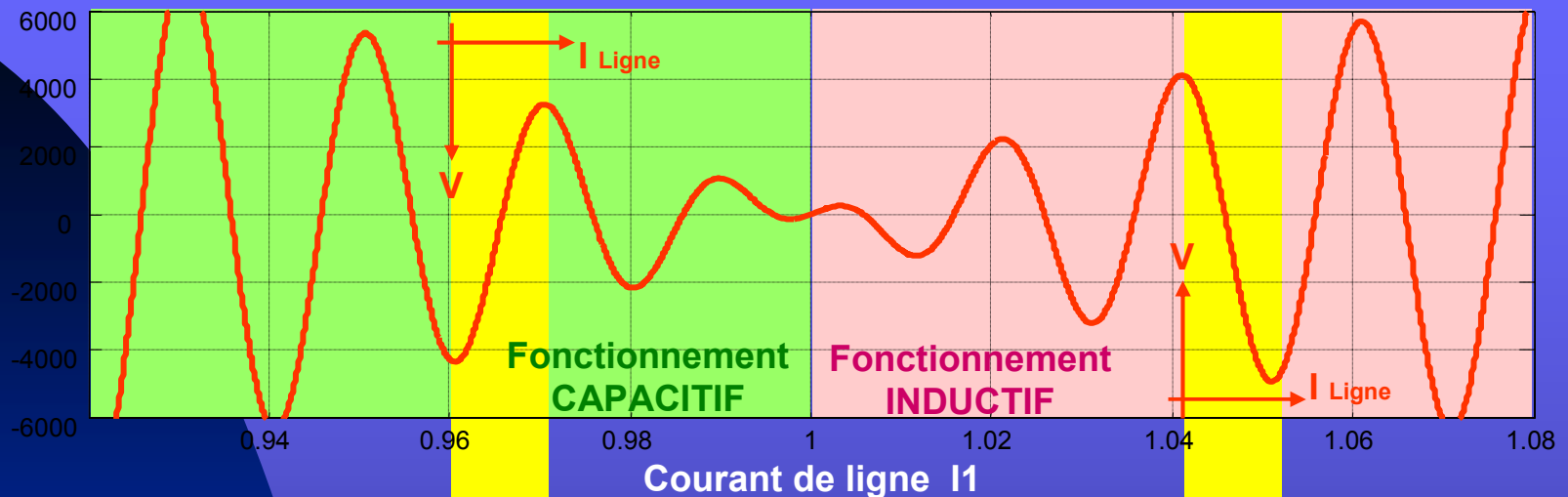
Le SSSC, a une la fonction comparable au TCSC. Mais contrairement à ce dernier qui présente une zone morte à la résonance parallèle, le réglage est continu. De plus, l'introduction d'un stockage d'énergie est possible du fait de la structure VSC du convertisseur. En distribution, à des niveaux de puissance plus faibles, cette topologie est utilisée pour fiabiliser les utilisations critiques, face aux micro-coupures: elle porte alors le nom de DVR, (Dynamic Voltage Restorer).

Schéma de principe d'un Static Synchronous Serie Compensator

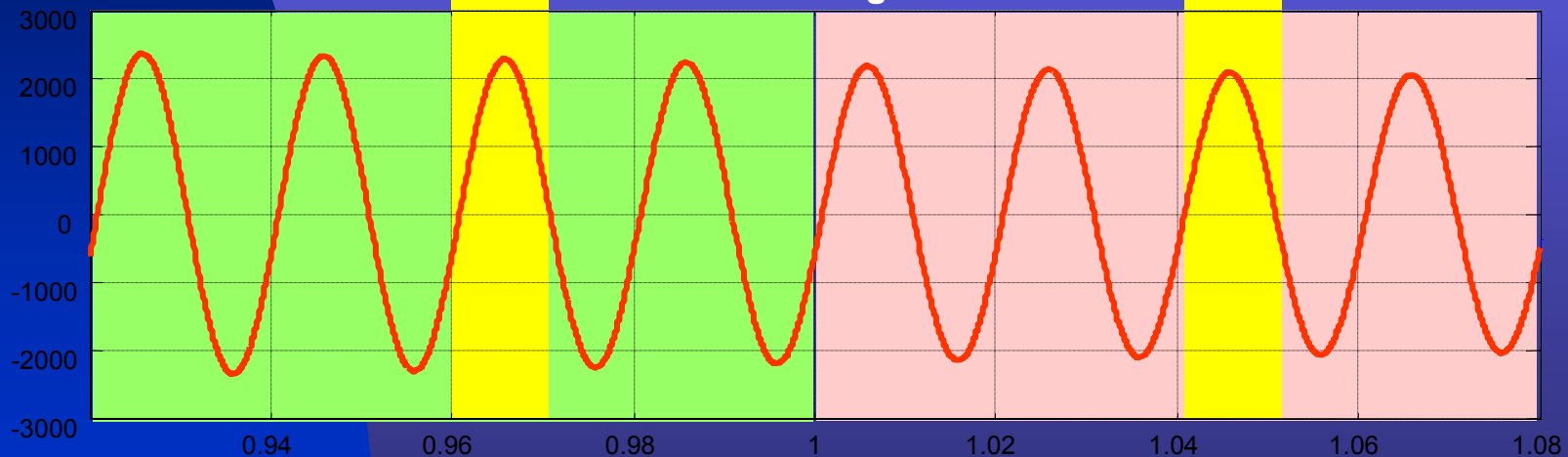


FACTS MODERNES : Compensation série

Tension injectée en série V1



Courant de ligne I1



**LE PASSAGE CAPACITIF , INDUCTIF EST PROGRESSIF,
SANS DISCONTINUITÉ**

COMPENSATION SERIE

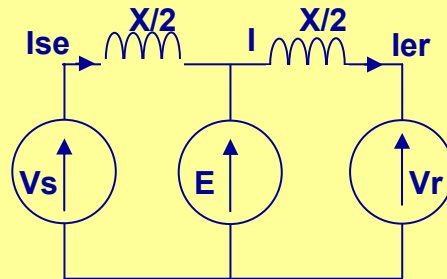
V.S.

COMPENSATION SHUNT

COMPARAISON SHUNT ET SERIE

Comparaison des dimensionnements

Le but du calcul qui suit est d'évaluer la puissance des dispositifs de compensation, dans le cas suivant: même réseau, même puissance P_m et pour un même angle maximal de transmission δ_m .

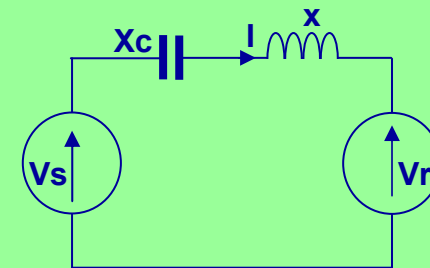


Puissance transmise de s vers r.

$$P_m = \frac{2 \cdot V^2}{X} \cdot \sin \frac{\delta_m}{2}$$

Puissance du dispositif

$$Q_{sh} = \frac{4 \cdot V^2}{X} \cdot (1 - \cos \frac{\delta_m}{2})$$



Puissance transmise de s vers r. $P_m = \frac{V^2}{X - X_c} \cdot \sin \delta_m$

Puissance du dispositif $Q_{se} = \frac{4 \cdot V^2}{X} \cdot \sin^2 \frac{\delta_m}{2} \cdot \frac{X \cdot X_c}{(X - X_c)^2}$

$$P_m = \frac{2 \cdot V^2}{X \cdot (1 - \frac{X_c}{X})} \cdot \sin \frac{\delta_m}{2} \cdot \cos \frac{\delta_m}{2}$$

Égalité des puissances transmises $\rightarrow 1 = \frac{\cos \frac{\delta_m}{2}}{1 - \frac{X_c}{X}} \rightarrow X_c = X \cdot (1 - \cos \frac{\delta_m}{2})$

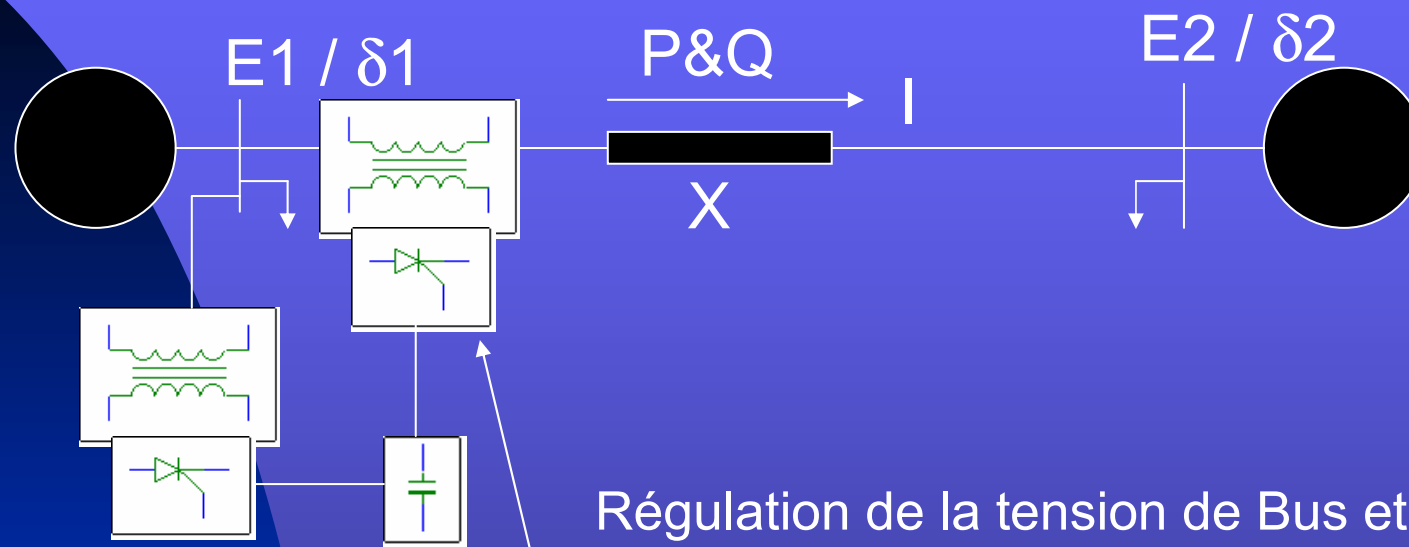
$$Q_{se} = \frac{4 \cdot V^2}{X} \cdot \text{tg}^2 \frac{\delta_m}{2} \cdot (1 - \cos \frac{\delta_m}{2})$$

$$\frac{Q_{se}}{Q_{sh}} = \text{tg}^2 \frac{\delta_m}{2}$$

En terme de dimensionnement
l'intérêt de la compensation série
est évident

Unified Power Flow Controller UPFC

Implantation de FACTS - UPFC ...



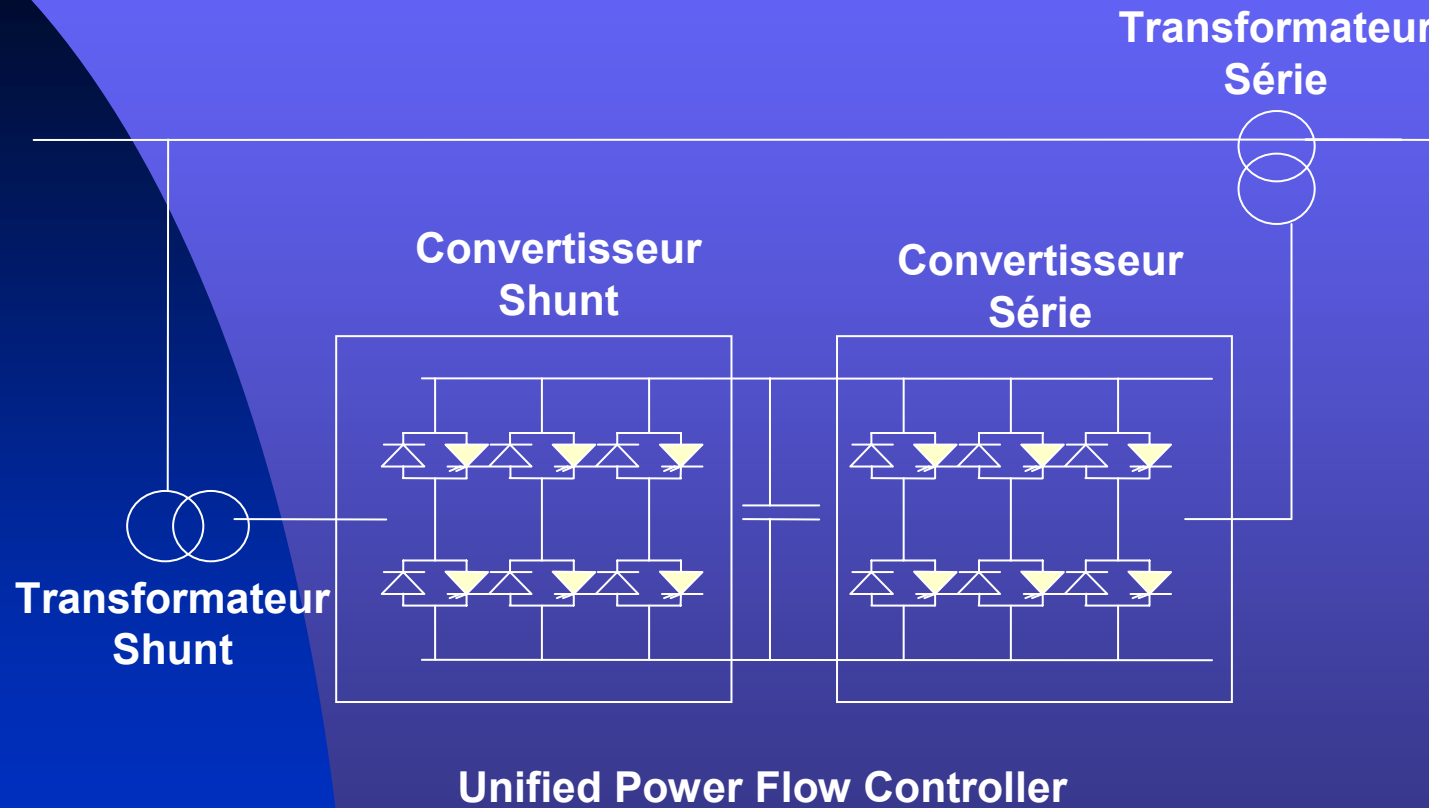
Régulation de la tension de Bus et
injection de tension en série sur la ligne
Peut contrôler le flux de puissance

$$P1 = E1 (E2 \cdot \sin(\delta)) / X_{eff}$$

$$X_{eff} = X - V_{inj} / I$$

$$Q1 = E1(E2 - E2 \cdot \cos(\delta)) / X$$

Implantation de FACTS - UPFC ...



FIABILITE DE TRANSMISSION FACTS modernes UPFC

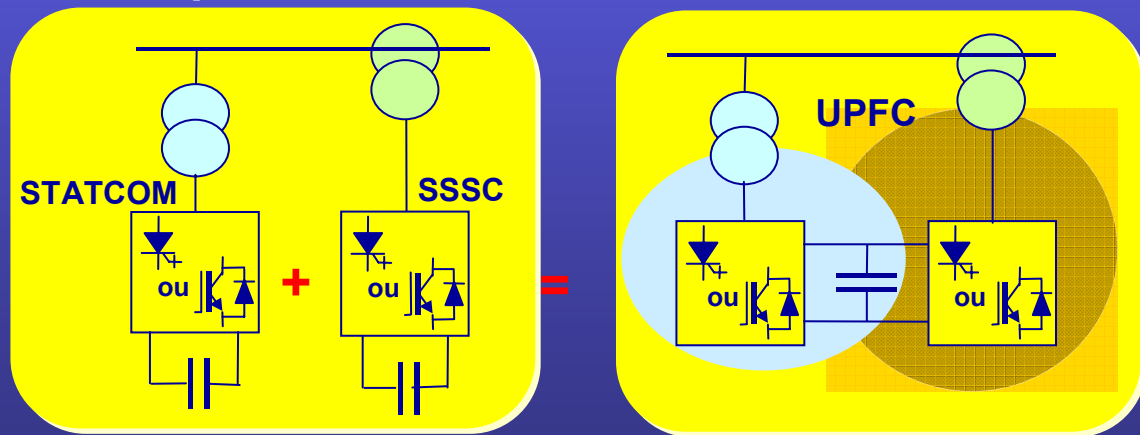
| Les **STATCOM** absorbent ou fournissent de la puissance réactive au réseau de manière parallèle, indirectement, ils ont une influence sur l'angle interne, donc sur la puissance active.

| Les TCSC et autres **SSSC** introduisent une compensation des réactances de ligne, ils ont une influence directe sur l'angle interne, donc sur la puissance active.

| Le **transformateur déphaseur**, s'il règle également les amplitudes, il règle tout à la fois la puissance active et la puissance réactive.

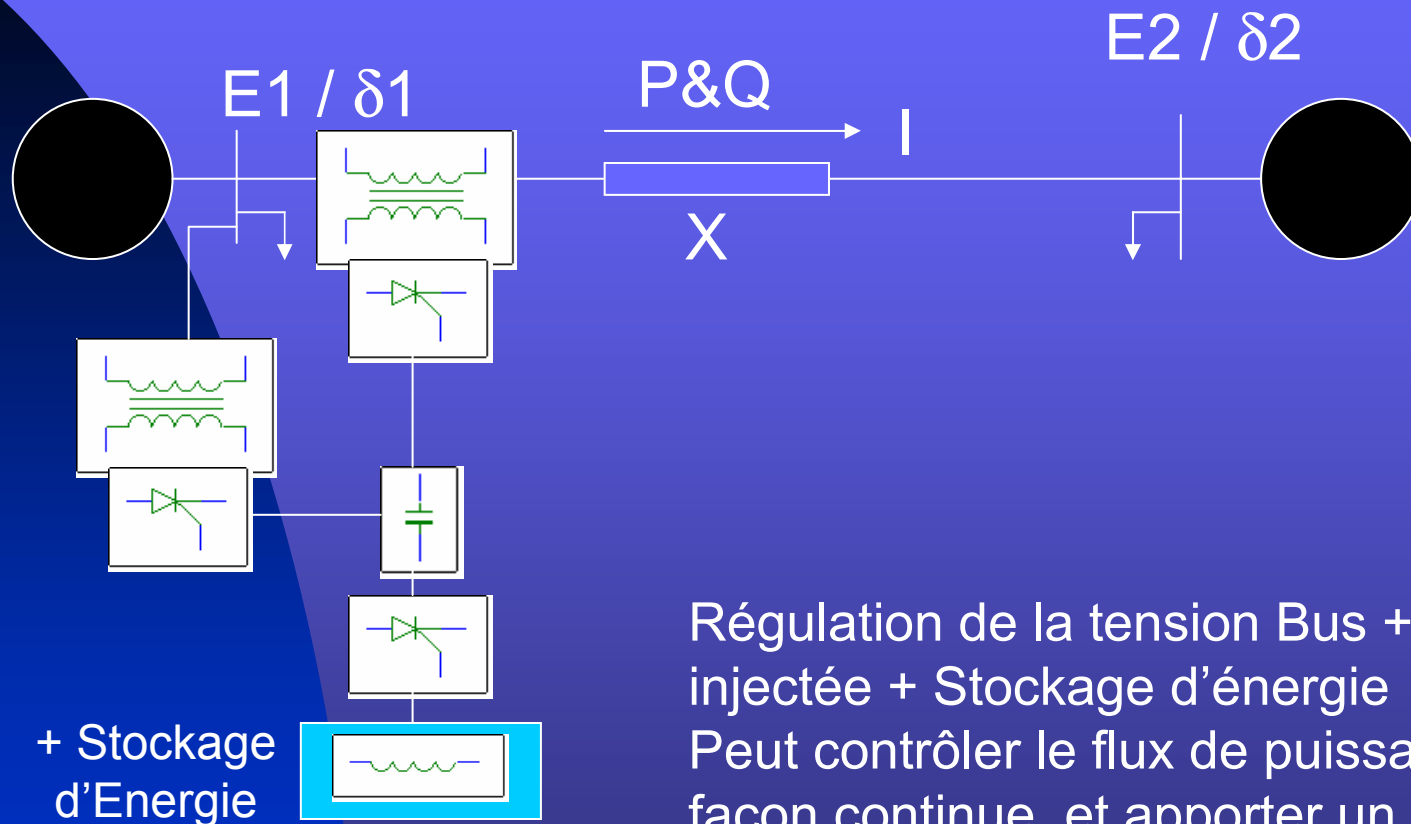
La prise en compte de ces trois composants permet d'arriver au concept de l'UPFC.

En absence de stockage d'énergie, **STATCOM** et **SSSC** sont limités dans leurs degrés de liberté pour agir sur l'angle interne... Dans la structure UPFC la puissance active a pour origine soit la topologie shunt, soit la topologie série...



Les UPFC autorisent une maîtrise totale de l'angle interne : on retrouve les fonctionnalités du transformateur déphaseur...

FACTS - UPFC + Stockage d'Énergie ...

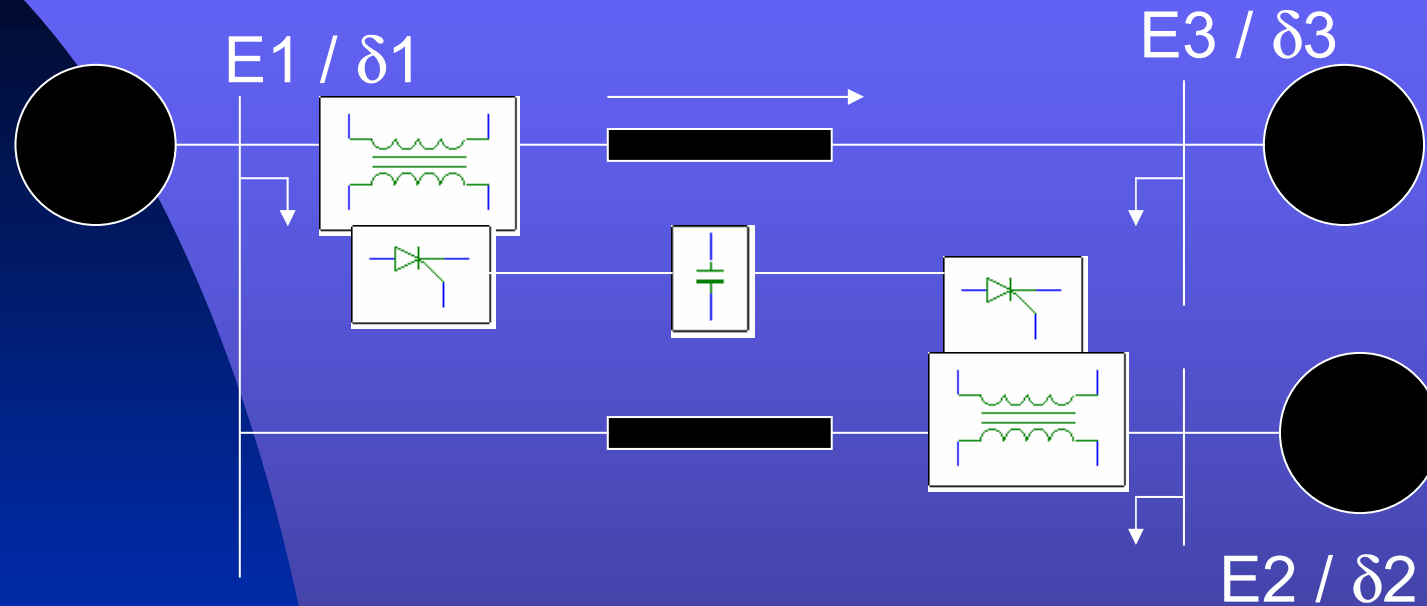


Régulation de la tension Bus + Tension injectée + Stockage d'énergie
Peut contrôler le flux de puissance de façon continue, et apporter un support dans des conditions de défaut sévère (amélioration des performances)

Interline Power Flow Controller

IPFC

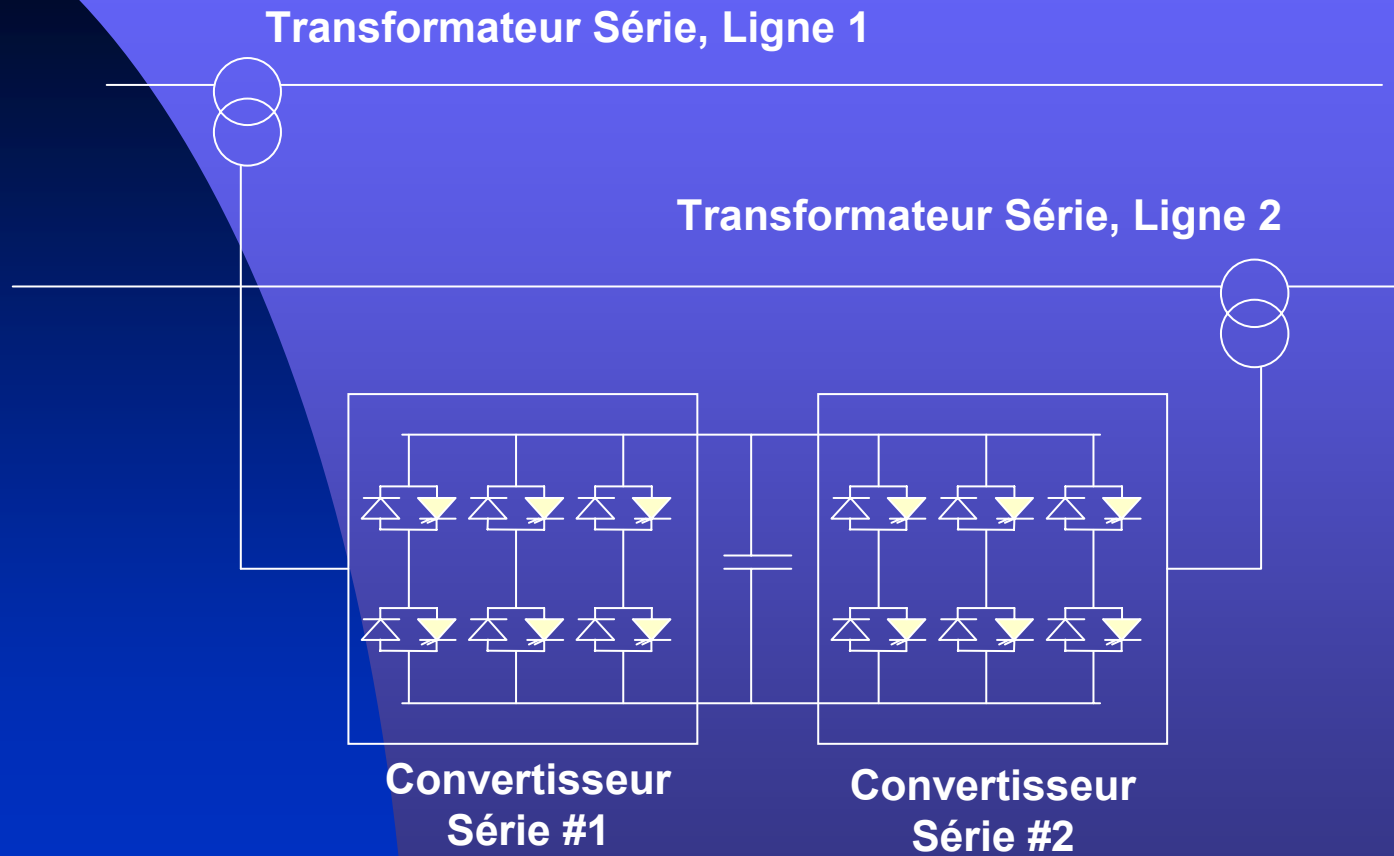
Implantation de FACTS - IPFC ...



$$P12 = E1 (E2 \cdot \sin(\delta1 - \delta2)) / X$$

$$P13 = E1 (E2 \cdot \sin(\delta1 - \delta3)) / X$$

Implantation de FACTS - IPFC ...



Interline Power Flow Controller

CONCLUSIONS ...

L 'électricité est devenue un facteur de développement incontournable de notre civilisation

L 'électricité est un produit : il doit être de qualité pour que nous puissions mieux vivre et mieux produire.

Le transport et la distribution sont les clés de cette qualité.

L 'électricité est un produit comme les autres, il y a un marché, il y aura, avec la dérégulation des réseaux, une pluralité de fournisseurs possibles.

Hélas les électrons obéissent à des lois de la physique, ils ignorent les lois du marché. C 'est donc aux gestionnaires de réseaux qu 'il appartiendra de forcer les lois de la physique. Les outils existent, il s 'agit des FACTS.

La clé du futur nous est donnée par les évolutions de l 'électronique de puissance. Les topologies du futur sont connues, les composants qui les banaliseront sont déjà disponibles, ils progressent...



www.cnam.fr