

LU3EE104 : Réseaux électriques et Electronique de puissance

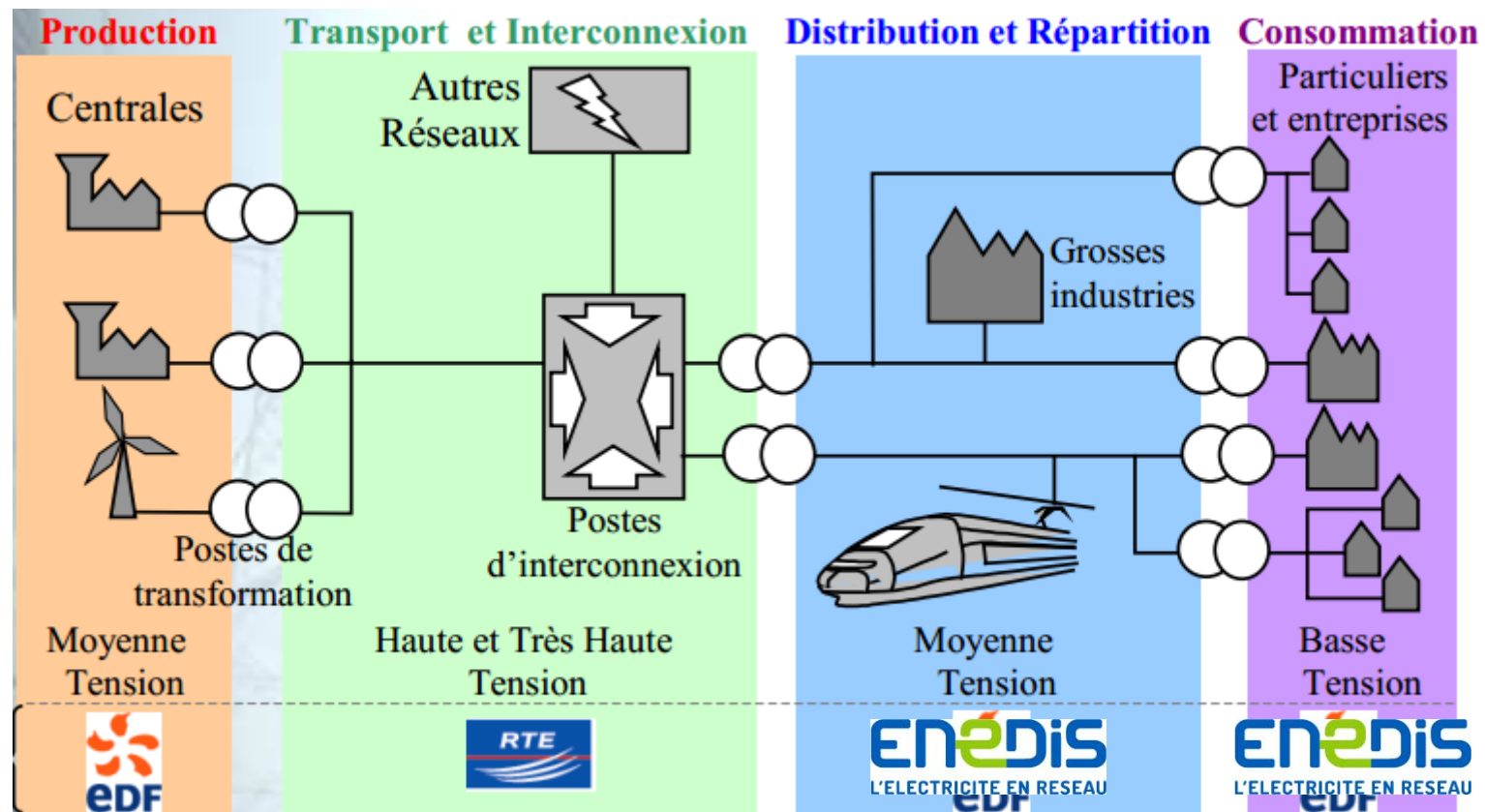
IX - RÉSEAUX ÉLECTRIQUES, FONDAMENTAUX

Ouvrage de référence :

Electrotechnique et énergie électrique, 2^e édition - Luc Lasne

Editions Dunod - ISBN 978-2-10-059892-2

Structure d'un réseau électrique

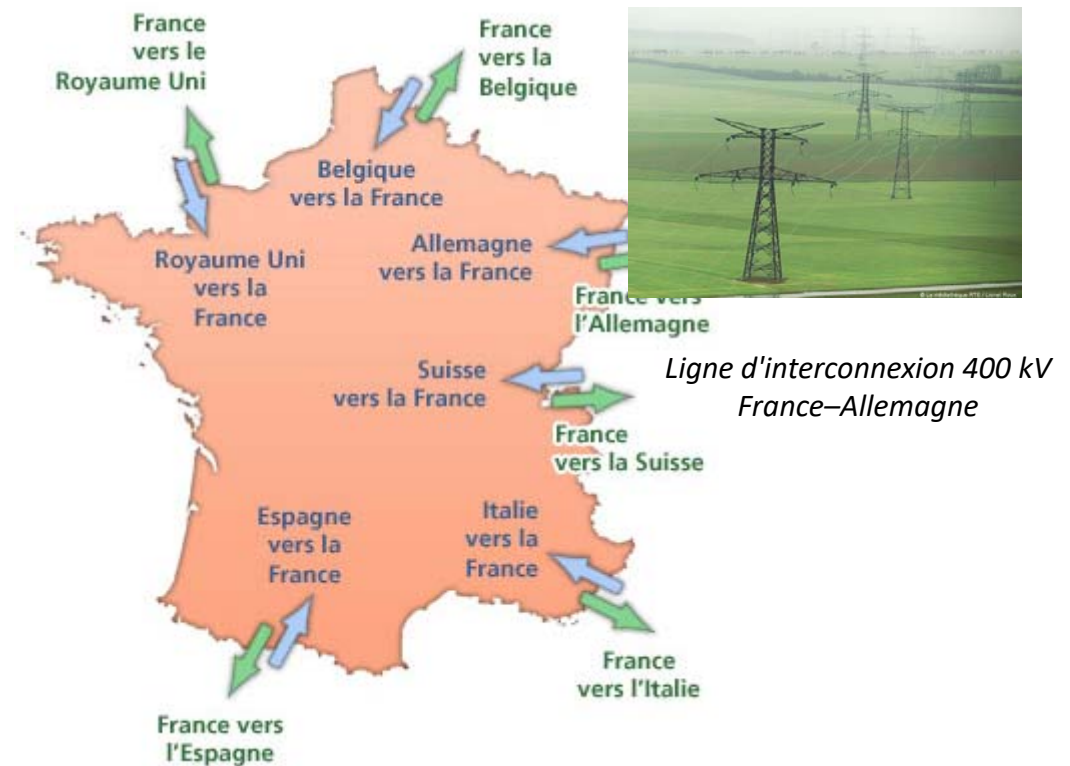


Transport et interconnexion

Maillage territorial et interconnexion



Source : RTE



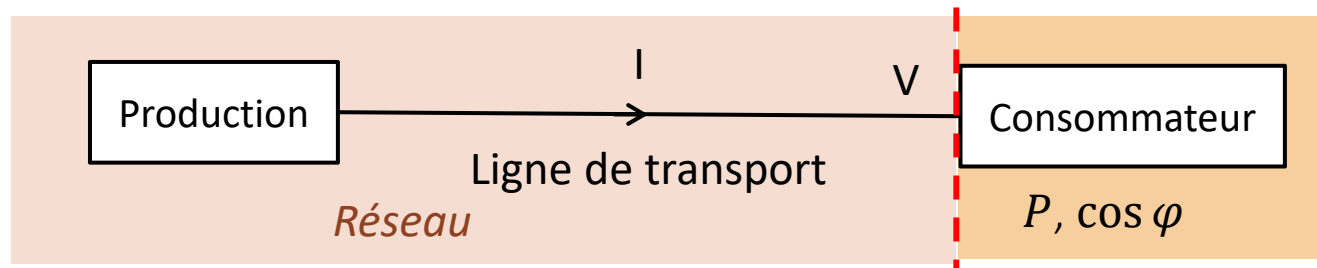
Ligne d'interconnexion 400 kV
France-Allemagne

Fréquence normalisée : 50 Hz

Tensions normalisées : BT, HTA, HTB norme européenne

Transport en HT et facteur de puissance unitaire

Il faut limiter les pertes !



$$\text{Courant } I = \frac{P}{V \cdot \cos \varphi}$$

$$\text{Pertes en ligne : } R_{\text{ligne}} \cdot I^2$$

$$R_{\text{ligne}} = \rho \frac{\text{Longueur}}{\text{Section}}$$



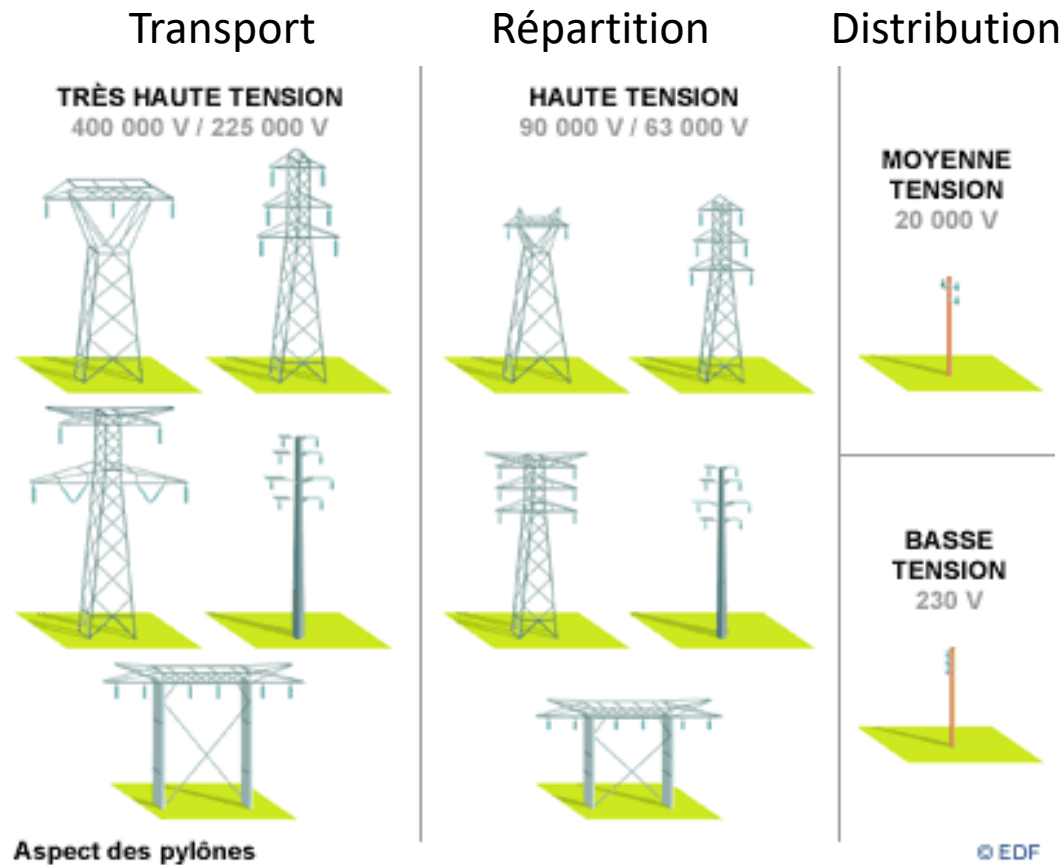
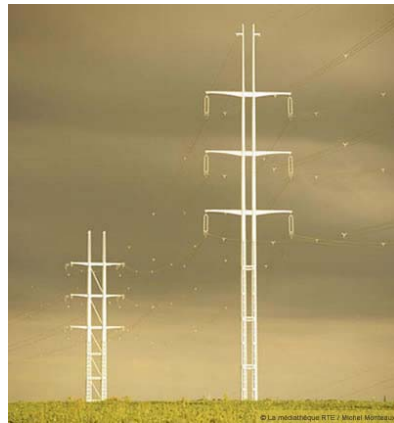
Pour limiter les pertes, il faut :

- $\cos \varphi$ le plus près possible de 1
- Tension d'autant plus élevée que la ligne est longue.

$V_{\text{max}} = 400 \text{ kV}$ en France et en Europe
750 kV au Canada, 1 MV en Russie !

Les différents niveaux de tension

Norme européenne :



THT 400 et 225 kV – HT 90 et 63 kV – MT 20 kV – BT 230 V

AC versus DC

Utilisation du régime alternatif sinusoïdal:



	Alternatif	Continu
Avantages	<ul style="list-style-type: none">- transformateur- coupure facile- production directe par alternateur	<ul style="list-style-type: none">- Pas de réactif- interconnexion facile- pas d'effet de peau
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none">- effets inductifs et capacitifs, Q- effet de peau- difficultés d'interconnexion	<ul style="list-style-type: none">- coupure délicate- terminaisons coûteuses- impossibilité d'élever les tensions dans le domaine THT

Bilan :

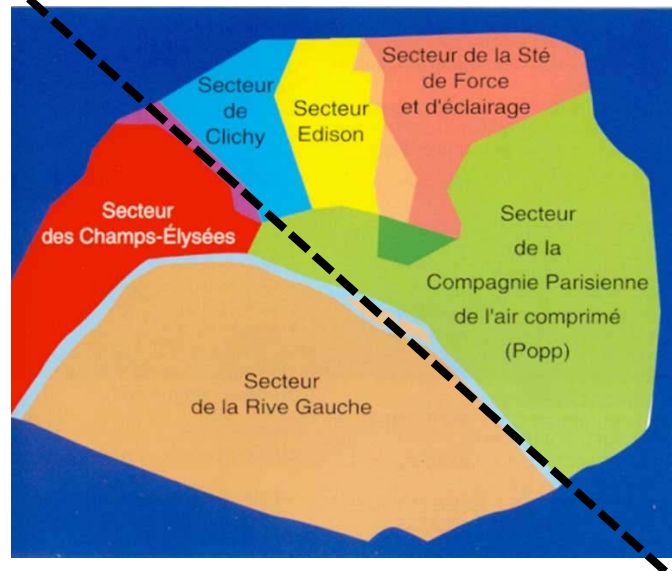
- A partir de 800 km, le DC devient concurrentiel
- Liaisons AC généralisées
- Liaisons DC pour des lignes particulières (liaison par câble)
- 50 Hz en Europe, harmoniques nuisibles

Exemple : le réseau parisien

Période 1889 / 1907 (naissance du réseau) :

2 secteurs sud/ouest :

- Distribution AC 3kV
- Livraison en 110 V



4 secteurs nord/est :

- DC 110V
- Différentes techniques

Actuellement :

- Ossature AC 20 kV
- Livraison en AC 230/400 V

<http://www.megedoudeau.jmbertho.odns.fr/index.php/electricite/histoire-de-la-distribution-a-paris/l-electricite-a-paris>

AC triphasé

Utilisation de systèmes triphasés :

Avantages :

- Utilisation de 2 fois moins de cuivre qu'en monophasé
- Pas de puissance fluctuante
- Puissance massique des alternateurs plus grande
- Alimentation optimale pour les machines électriques

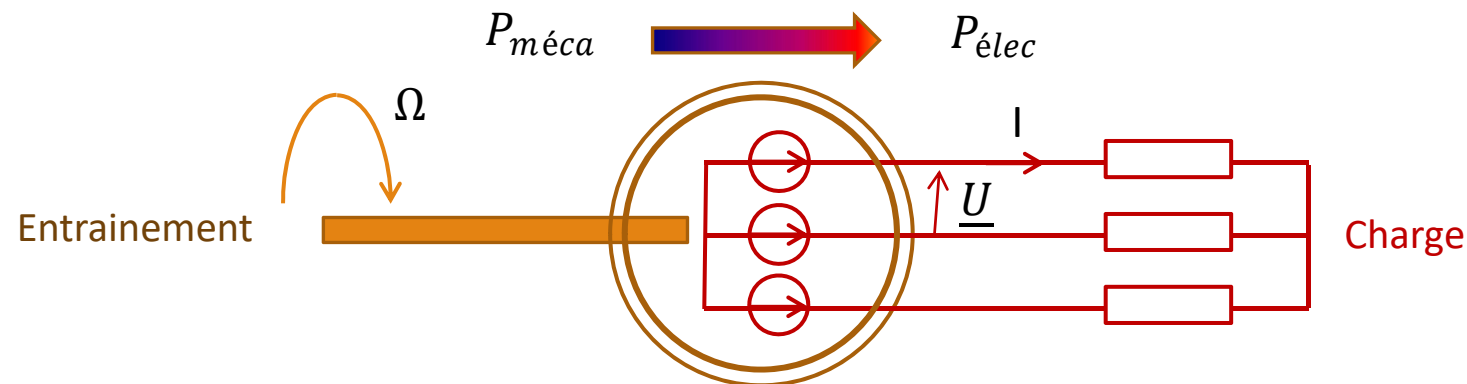
Inconvénient :

- Mise en œuvre plus complexe

Couplage « fréquence / puissance »

Principe de la production :

- La génératrice, entraînée à la vitesse de rotation Ω , produit une tension alternative de fréquence proportionnelle à Ω .

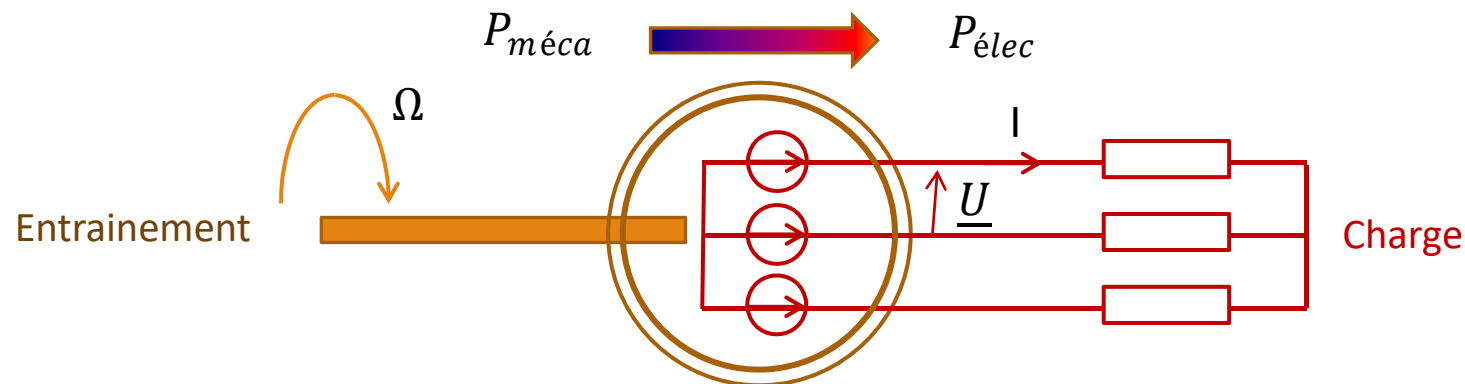


- Le contrôle de la fréquence passe par le contrôle de la vitesse de rotation Ω .*

Couplage « fréquence / puissance »

Principe de la production :

- La génératrice, entraînée à la vitesse de rotation Ω , produit une tension alternative de fréquence proportionnelle à Ω .



- Equation dynamique : $J \frac{d\Omega}{dt} = C_{entraînement} - C_{charge}$
- Où J est le moment d'inertie de la machine
- $C_{entraînement}$: couple fournit par l'entraînement (chute d'eau, débit de vapeur, ...)
- C_{charge} : couple résistif, liée à la charge électrique du réseau via le courant I

Couplage « fréquence / puissance »

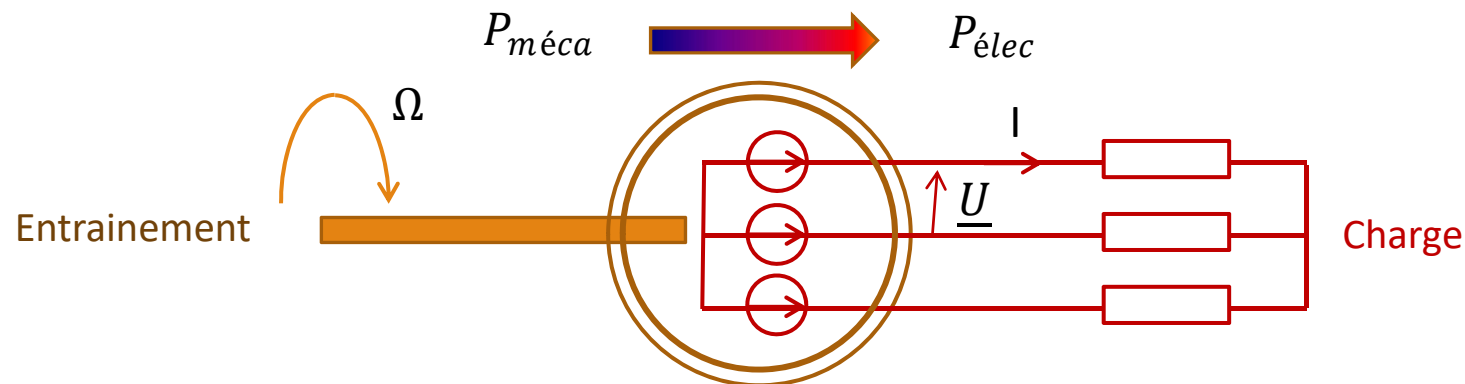
Equilibre production-consommation :

- Tout déséquilibre entre la production et la consommation entraîne une modification de la fréquence du réseau.
- Equation dynamique : $J \frac{d\Omega}{dt} = C_{\text{entraînement}} - C_{\text{charge}}$
- A l'équilibre : $P_{\text{entraînement mécanique}} = P_{\text{charge électrique}}$
 - $C_{\text{entraînement}} = C_{\text{charge}} \Rightarrow d\Omega/dt = 0 \Rightarrow \Omega \text{ stable} \Rightarrow f \text{ stable}$
- Surcharge électrique : $P_{\text{entraînement mécanique}} < P_{\text{charge électrique}}$
 - $C_{\text{entraînement}} < C_{\text{charge}} \Rightarrow d\Omega/dt < 0 \Rightarrow \Omega \text{ diminue} \Rightarrow f \text{ diminue}$
- Sous-charge électrique : $P_{\text{entraînement mécanique}} > P_{\text{charge électrique}}$
 - $C_{\text{entraînement}} > C_{\text{charge}} \Rightarrow d\Omega/dt > 0 \Rightarrow \Omega \text{ augmente} \Rightarrow f \text{ augmente}$

Couplage « fréquence / puissance »

Principe de la production :

- La génératrice, entraînée à la vitesse de rotation Ω , produit une tension alternative de fréquence proportionnelle à Ω .

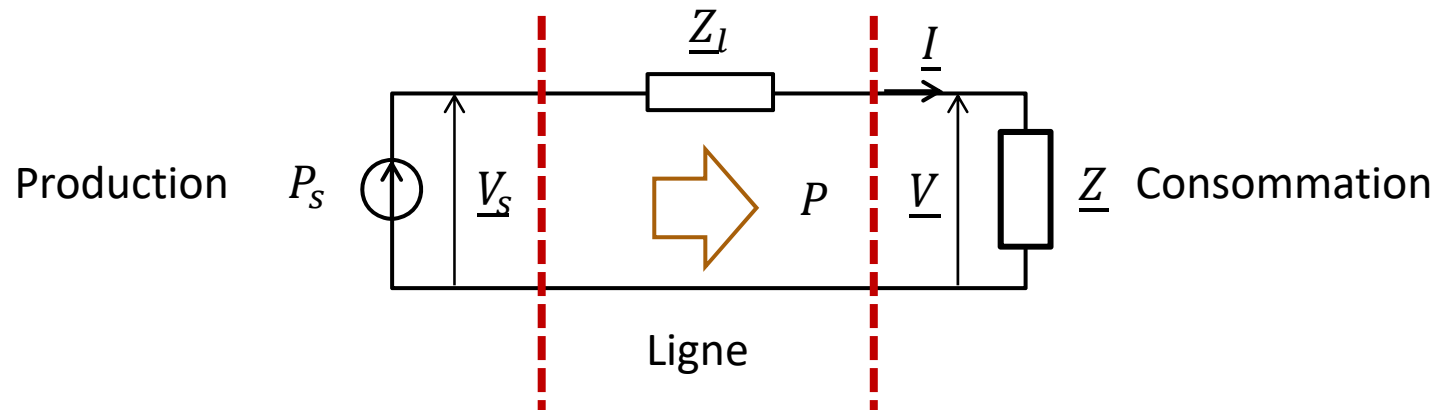


- La régulation de la fréquence se fait via la régulation de la vitesse de rotation

*Fluctuations de fréquence admissibles sur le réseau français :
+ ou - 1 % de la valeur nominale 50 Hz*

Puissance maximale transmissible

Toute association « générateur/récepteur » présente une limite de puissance transmissible de l'un vers l'autre.

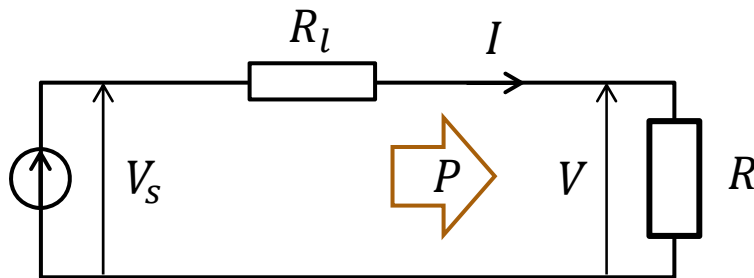


Exemple élémentaire

Une ligne de transport monophasée ayant une longueur de 10 km possède une résistance R_l de 5 Ω . Elle est alimentée par une source V_s de 400 V et la charge résistive R varie entre le circuit ouvert et le court-circuit.

Calculer la tension V aux bornes de la charge et la puissance P fournie à celle-ci lorsque les valeurs de résistance suivantes : $R = 200 \Omega$; 100Ω ; 50Ω ; 25Ω ; 10Ω ; 5Ω ; 2Ω .

Tracer la courbe tension-puissance $V(P)$.



$$V = V_s \frac{R}{R_l + R}$$

$$P = V \cdot I$$

$$I = \frac{V_s}{R_l + R}$$

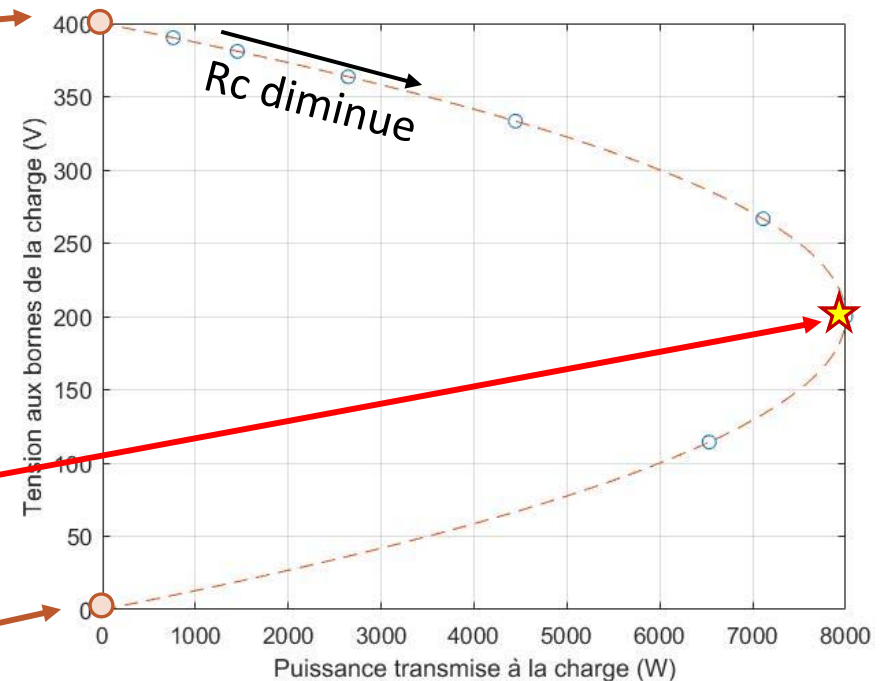
$$P = V \cdot \frac{V_s - V}{R_l}$$

Caractéristique tension-puissance au niveau de la charge

$$P = V \cdot I = V \cdot \frac{V_s - V}{R_l}$$

avec $V = V_s \frac{R}{R_l + R}$ et $I = \frac{V_s}{R_l + R}$

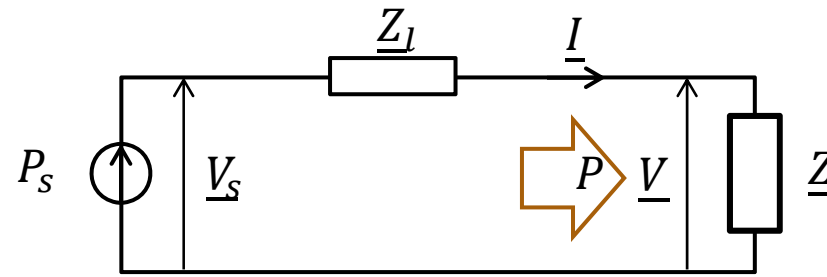
R [Ω]	V [V]	I [A]	P [W]
∞	400	0	0
200	390	2,0	761
100	381	3,8	1451
50	364	7,3	2645
25	333	13,3	4444
10	267	26,7	7111
5	200	40,0	8000
2	114	57,1	6531
0	0	80	0



NB : Puissance fournie par la source = $V_s \cdot I$, augmente toujours, jusque 32 kW !

Puissance maximale transmissible

Toute association « générateur/récepteur » présente une limite de puissance transmissible de l'un vers l'autre.



Cas général :

- ligne inductive (aérienne) ou capacitive (sous-terre)
- Charge quelconque (le plus souvent inductive)

- $P_{max} = \frac{V_s^2}{4R_l}$ pour $\underline{Z}_c = \underline{Z}_l^*$ $\eta = \frac{P}{P_s} = 50\%$

Exemple : Ligne inductive, charge résistive

Une ligne de transport monophasée de longueur 10 km possède une réactance inductive X_l de $5\ \Omega$. Elle est connectée à une source V_s de 400 V et alimente une charge résistive. Tracer la courbe tension-puissance $P(V)$.

Ligne inductive, charge résistive

Une ligne de transport monophasée de longueur 10 km possède une réactance inductive X_l de 5Ω . Elle est connectée à une source V_s de 400 V et alimente une charge résistive. Tracer la courbe tension-puissance $P(V)$.

$$\underline{V} = V_s \frac{R}{R+jX_l}$$

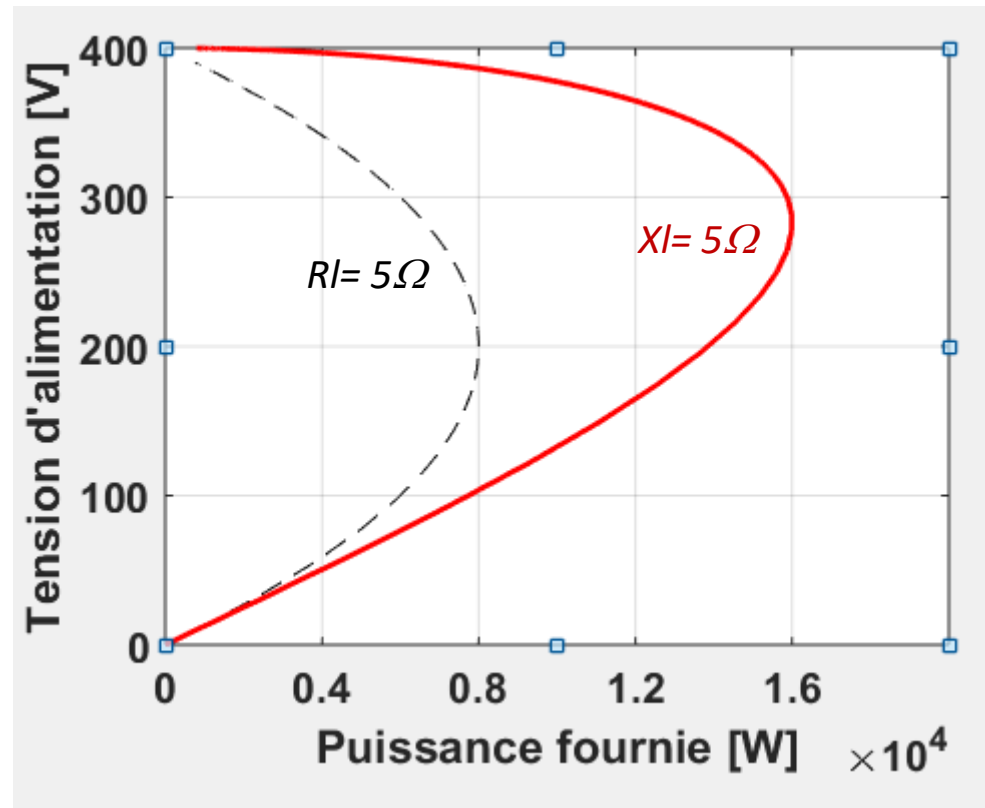
$$\underline{I} = V_s \frac{1}{R+jX_l}$$

$$\underline{S} = \underline{V} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$$

$$\underline{S} = V_s^2 \frac{R}{R^2 + X_l^2}$$

$$P = V_s^2 \frac{R}{R^2 + X_l^2}$$

$$Q = 0 \text{ (normal, charge R)}$$



Commentaires

Les caractéristiques de la ligne impactent la forme de la caractéristique tension-puissance au niveau de la charge, et en particulier la puissance transmissible.

Rôle du distributeur : garantir la valeur de la tension aux bornes de la charge (qualité de distribution)

Autre cas : ligne inductive, charge quelconque

Une ligne de transport monophasée de longueur 10 km possède une réactance inductive inductive X_l de 5Ω . Elle est connectée à une source V_s de 400 V et alimente une charge $\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$.

Tracer la courbe tension-puissance $P(V)$ à φ donné

Autre cas : ligne inductive, charge quelconque

Une ligne de transport monophasée de longueur 10 km possède une réactance inductive X_l de 5 Ω . Elle est connectée à une source V_s de 400 V et alimente une charge $\underline{Z} = Z \cdot e^{j\varphi}$.

Tracer la courbe tension-puissance $P(V)$ à φ donné

$$\underline{V} = V_s \frac{\underline{Z}}{\underline{Z} + jX_l}$$

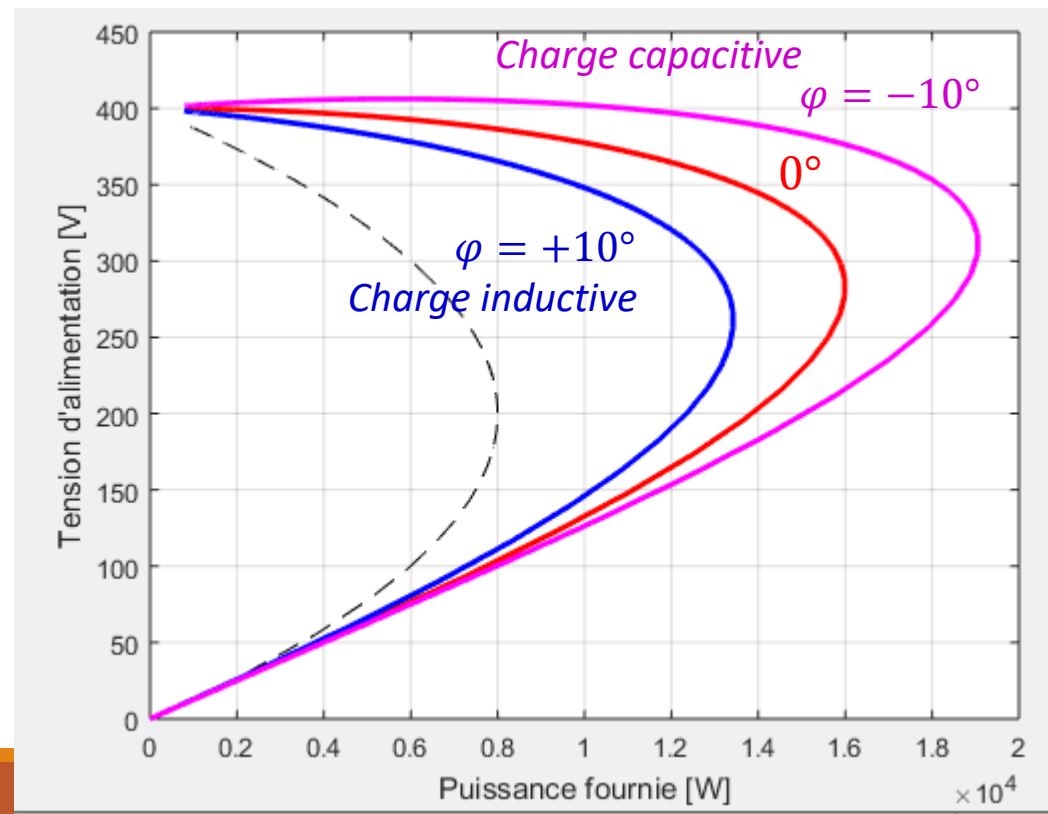
$$\underline{I} = V_s \frac{1}{\underline{Z} + jX_l}$$

$$\underline{S} = \underline{V} \cdot \underline{I}^* = P + jQ$$

$$\underline{S} = V_s^2 \frac{\underline{Z}}{|\underline{Z} + jX_l|^2}$$

$$P = V_s^2 \frac{\text{Re}(\underline{Z})}{|\underline{Z} + jX_l|^2}$$

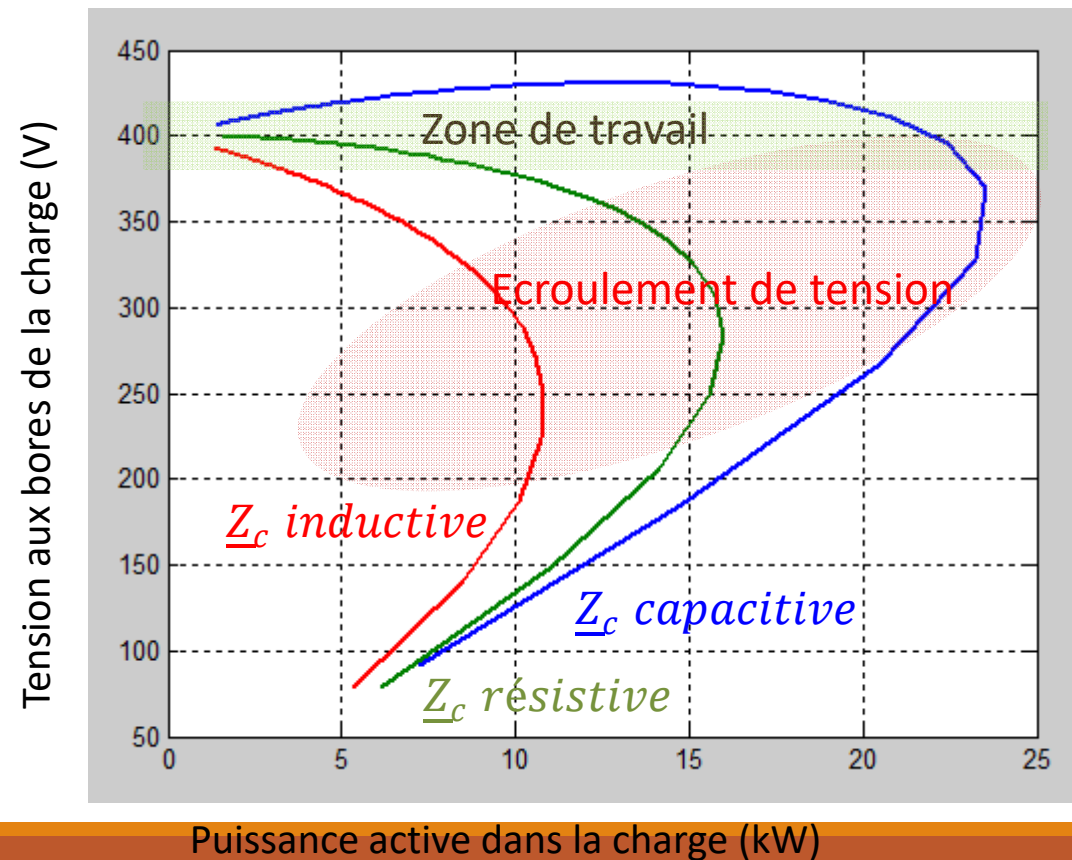
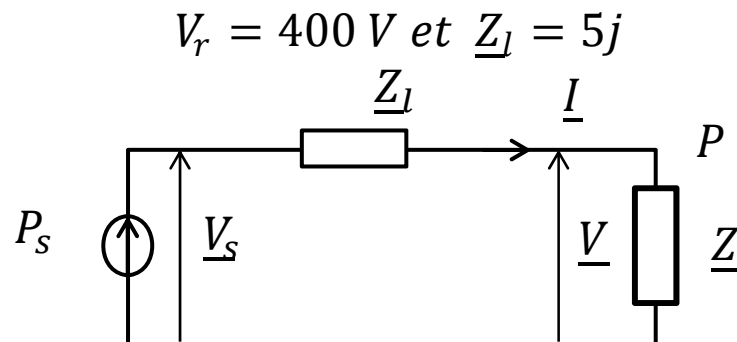
$$V = V_s \frac{|\underline{Z}|}{|\underline{Z} + jX_l|}$$



Couplage « tension / puissance active »

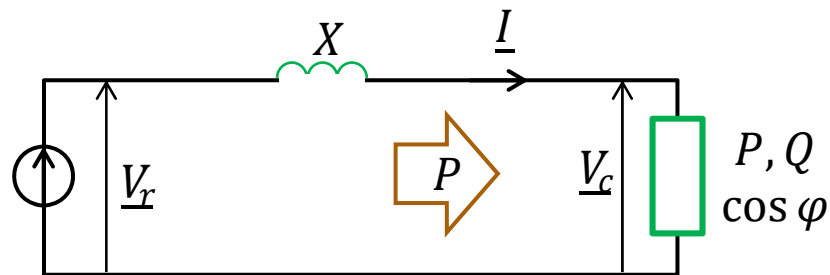
Lorsque la charge consomme de la puissance, le courant appelé sur le réseau provoque une chute de tension, que l'opérateur doit contrôler localement.

*Fluctuations de tension admissibles
sur le réseau :
+ ou - 5 % de la valeur nominale*



Couplage « tension / puissance réactive »

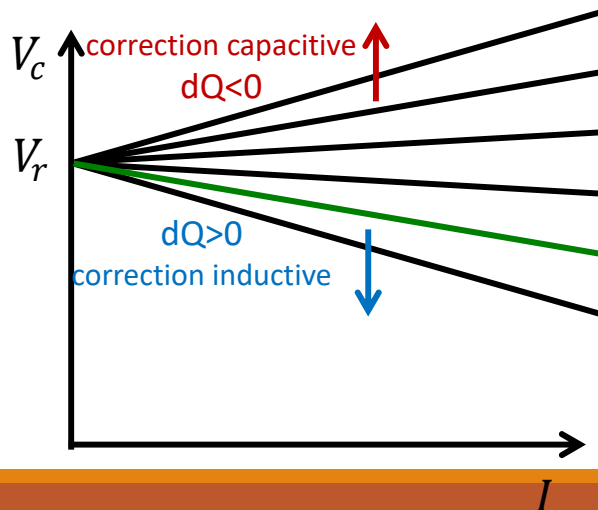
Cas le plus fréquent : ligne et charge inductives. Une capacité variable (injection de puissance réactive) permet de contrôler la tension délivrée à la charge.



Développements en TD

$$\Delta V = V_r - V_c \approx X \cdot I \cdot \sin \varphi$$

$$Q = 3 \cdot V_c \cdot I \cdot \sin \varphi \Rightarrow \Delta V \approx X \cdot \frac{Q}{3V}$$



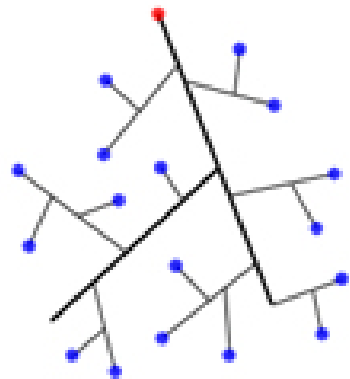
Réglage de V_c par la puissance réactive Q :

- $dQ < 0$ (capa) $\Rightarrow V_c$ augmente
- $dQ > 0$ (self) $\Rightarrow V_c$ diminue

Influence de la structure des réseaux

Réseau en antenne :

- Grandes lignes entre des groupes de production concentrés et des zones de forte consommation éparées

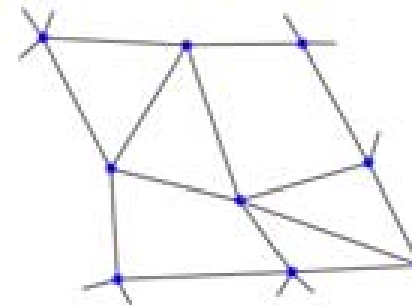


Structure arborescente

- Chutes de tension importantes, besoin de nombreux points de compensation du réactif

Réseau maillé :

- Lignes multiples et bouclées entre groupes de production et lieux de consommation bien répartis.



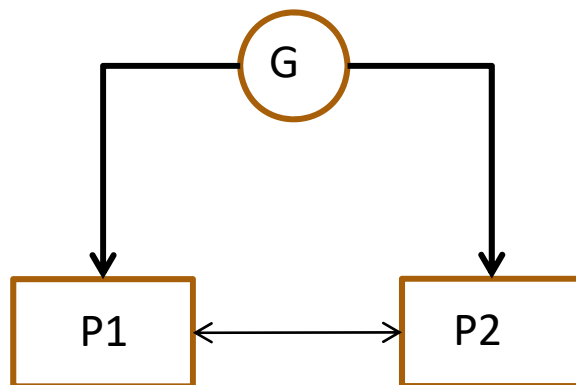
Structure maillée

- Lignes parallèles, faibles impédances et DV, compensation possible au niveau des groupes

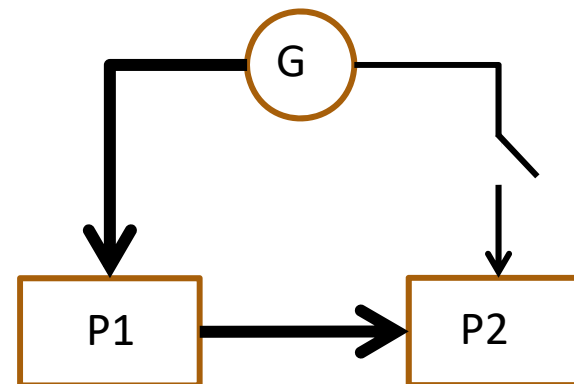
Transits et reports de transit

L'acheminement de l'énergie du lieu de production au lieu de consommation est géré en fonction de la disponibilité des lignes à chaque instant.

Une ligne peut être ouverte suite à un incident techniques ou pour maintenance, ce qui amène à redistribuer la puissance dans autres lignes. C'est le report de charge.



Etat N



Etat N-1

Illustration du report de charge (figures issues de wikipédia)

Situation normale

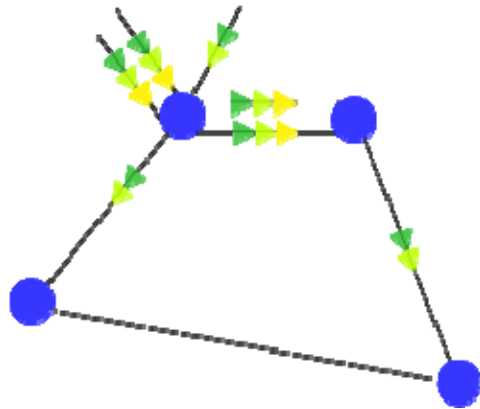


Illustration du report de charge (figures issues de wikipédia)

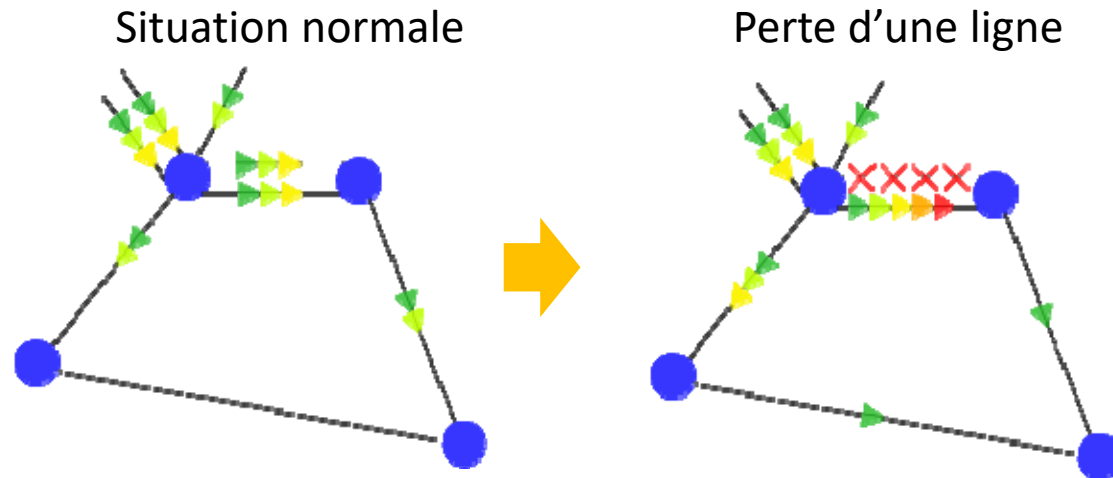


Illustration du report de charge (figures issues de wikipédia)

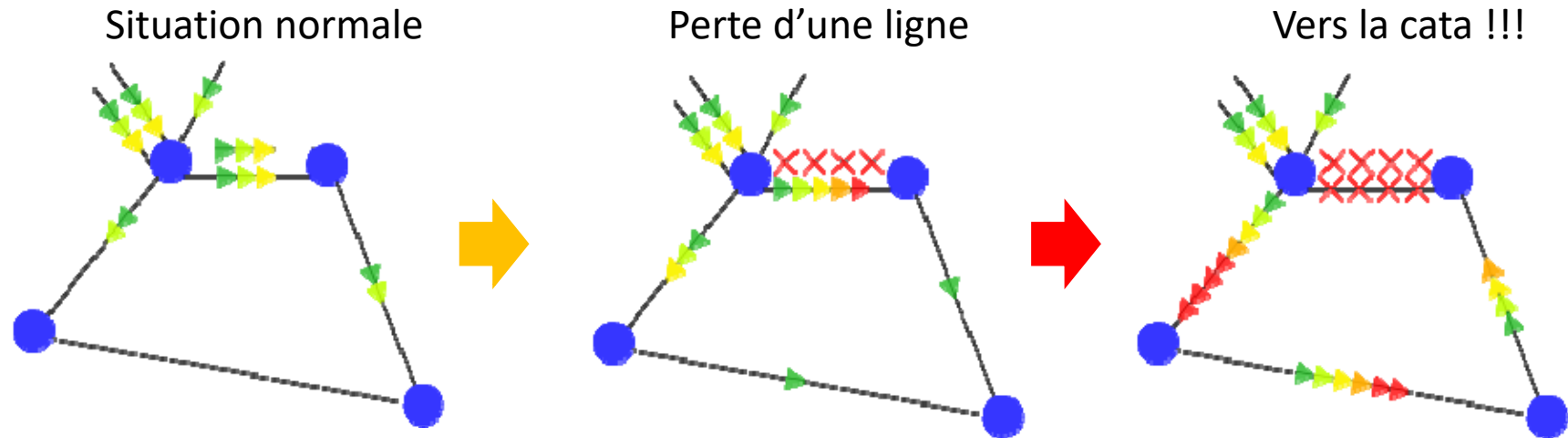
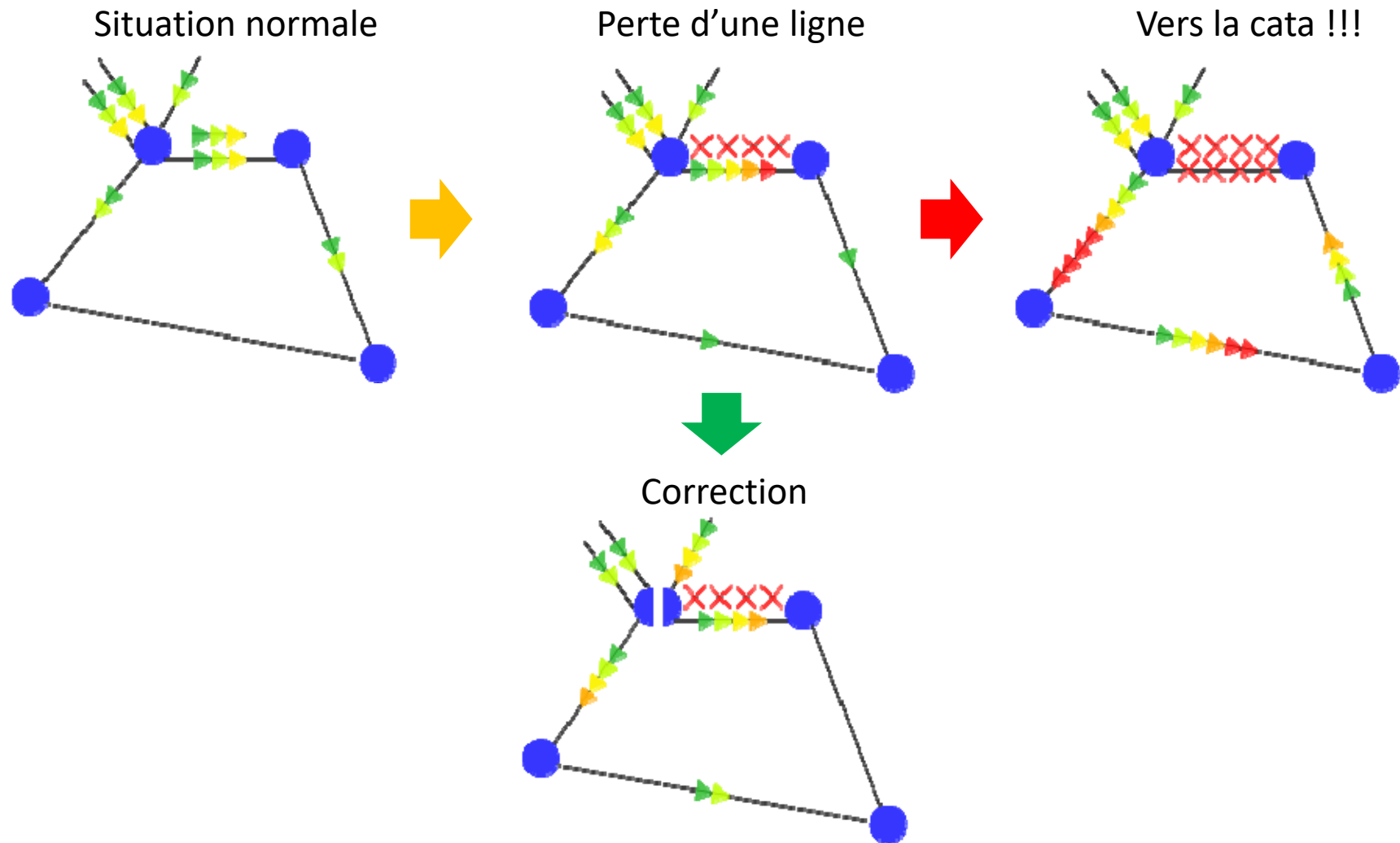


Illustration du report de charge (figures issues de wikipédia)



Surveillance - Dispatching

Dispatching : gestion du réseau de transport en temps réel.

Le réseau doit être surveillé étroitement et adapté aux aléas de consommation, de production ou de réseau.

Plusieurs niveaux de dispatching : national ou régional. Le dispatching national est le système nerveux central du réseau de transport.



Éléments de gestion du réseau

Prévision journalière :

- Météo + statistiques + événement particulier

Maîtrise des transits :

- Transit = répartition des puissances sur les lignes
- Fait intervenir la topologie, les impédances, les moyens de compensation
- Gestion des aléas : 30 court-circuits / jour...
- Règle du N-K (N-2 en France)
- S'appuie sur la simulation en temps réel
- Objectif : décider de la topologie et de la répartition de la production

Éléments de gestion du réseau

Réglage de la fréquence :

- Consiste à ajuster demande et production
- Réglage primaire : régulation rapide de la vitesse de tous les alternateurs (action locale répartie) – Stoppe la variation de fréquence, durée d'action 30s
- Réglage secondaire : mobilise les groupes dédiés au réglage de fréquence (échelle d'une zone) pour rétablir la fréquence – rétablit les échanges contractuels au niveau des interconnexions – durée d'action 15 mn
- Réglage tertiaire : si le réglage secondaire est insuffisant, mobilisation des puissances de pointe – action manuelle

Réglage des tensions :

Enjeux :

- Sûreté de fonctionnement du réseau
- Respect des plages de tension contractuelles
- Minimisation des pertes et optimisation des puissances transmises

Moyens de réglage

- Tension = grandeur locale
- Réglage réparti dans tout le réseau
- Alternateurs : peuvent produire du réactif
- Transformateurs HTB/HTA à rapport ajustable
- Sources de réactifs : compensateurs synchrones, convertisseurs statiques, gradins de condensateurs
- A placer au plus près des lieux de consommation de réactif
- Taxation et compensation locale

$$\frac{\Delta V_c}{V} \approx X \cdot \frac{\Delta Q}{3V^2}$$

Les protections

Ensemble des disjoncteurs et organes de coupure permettant d'interrompre l'alimentation

Activé lors d'un défaut d'isolement ou d'une surcharge

Blackout (ou panne généralisée)

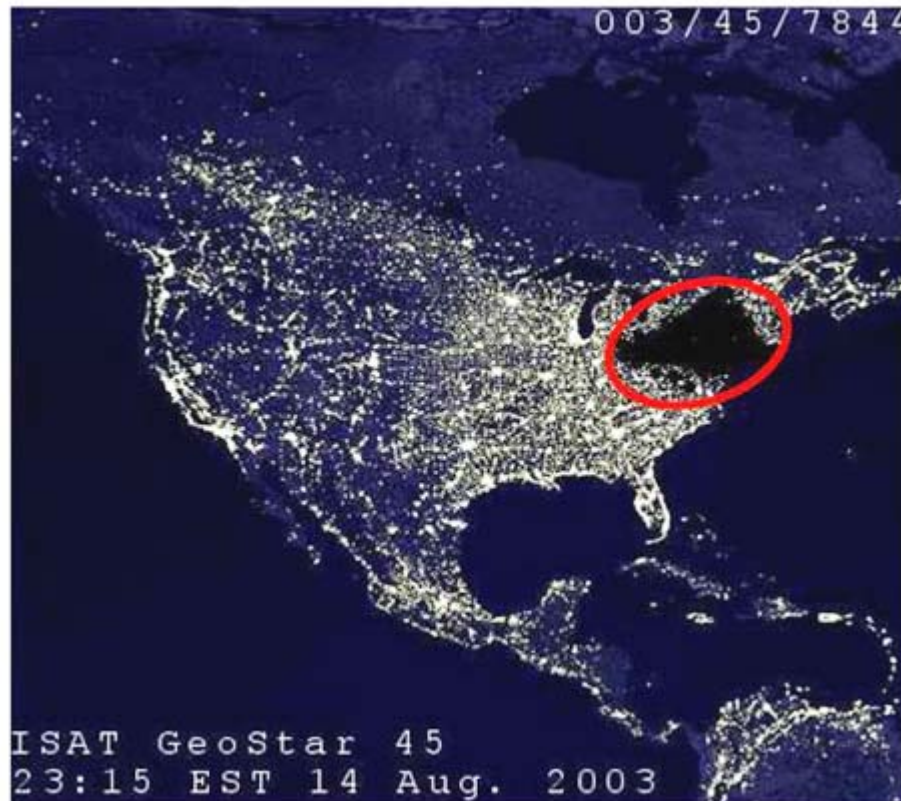
- surcharges de lignes et déclenchement en cascade
- écroulement de fréquence
- écroulement de tension
- rupture de synchronisme entre les groupes de production

Délestage :

- Pour éviter la surcharge du réseau

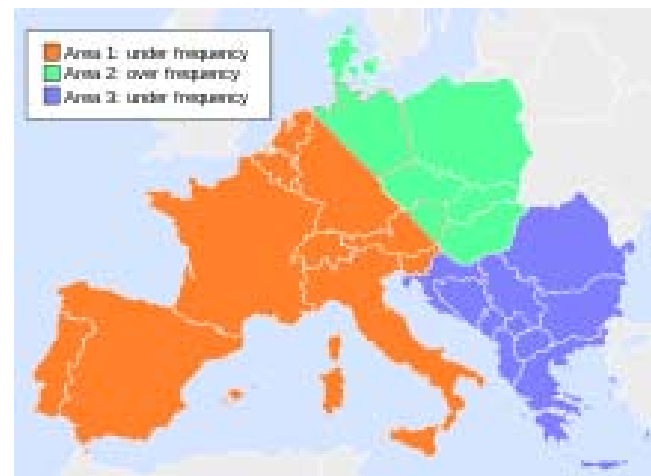
Exemple de black-out : Canada & USA, 14 aout 2003

50 million people across Ontario and eight U.S. states were plunged into darkness when the power went out just after 4 p.m. For some, they had to wait four days before the power came back on. Ontario's aging electrical system was initially blamed, but we eventually learned it was actually caused by equipment failure in Ohio.



Pannes célèbres en Europe

4 novembre 2006 : La panne de courant européenne de novembre 2006 est une panne de courant de grande importance qui a touché le réseau de l'UCTE*, privant d'électricité environ 15 millions de clients européens, le 4 novembre 2006, vers 22 h 10. Le réseau fut resynchronisé environ 38 minutes plus tard, à 22 h 47, remis en fonctionnement en environ une heure, enfin l'ensemble des pays est revenu à une situation normale en deux heures.



La séparation du réseau se produit à 22 h 10 min 28,7 s et 22 h 10 min 28,9 s, et la séparation entre l'Espagne et le Maroc se produit à 22 h 10 min 32 s