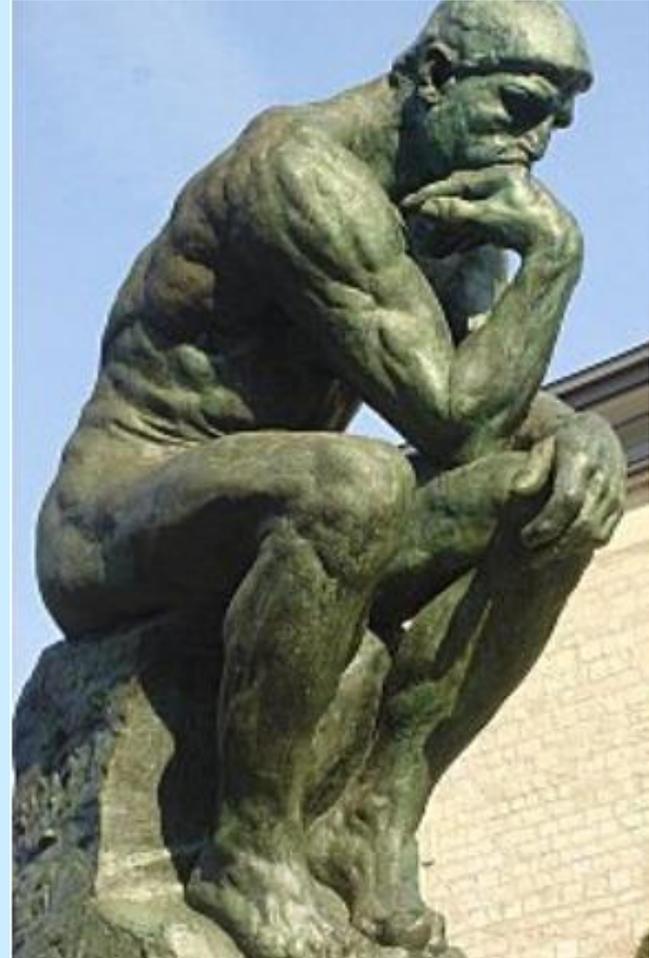
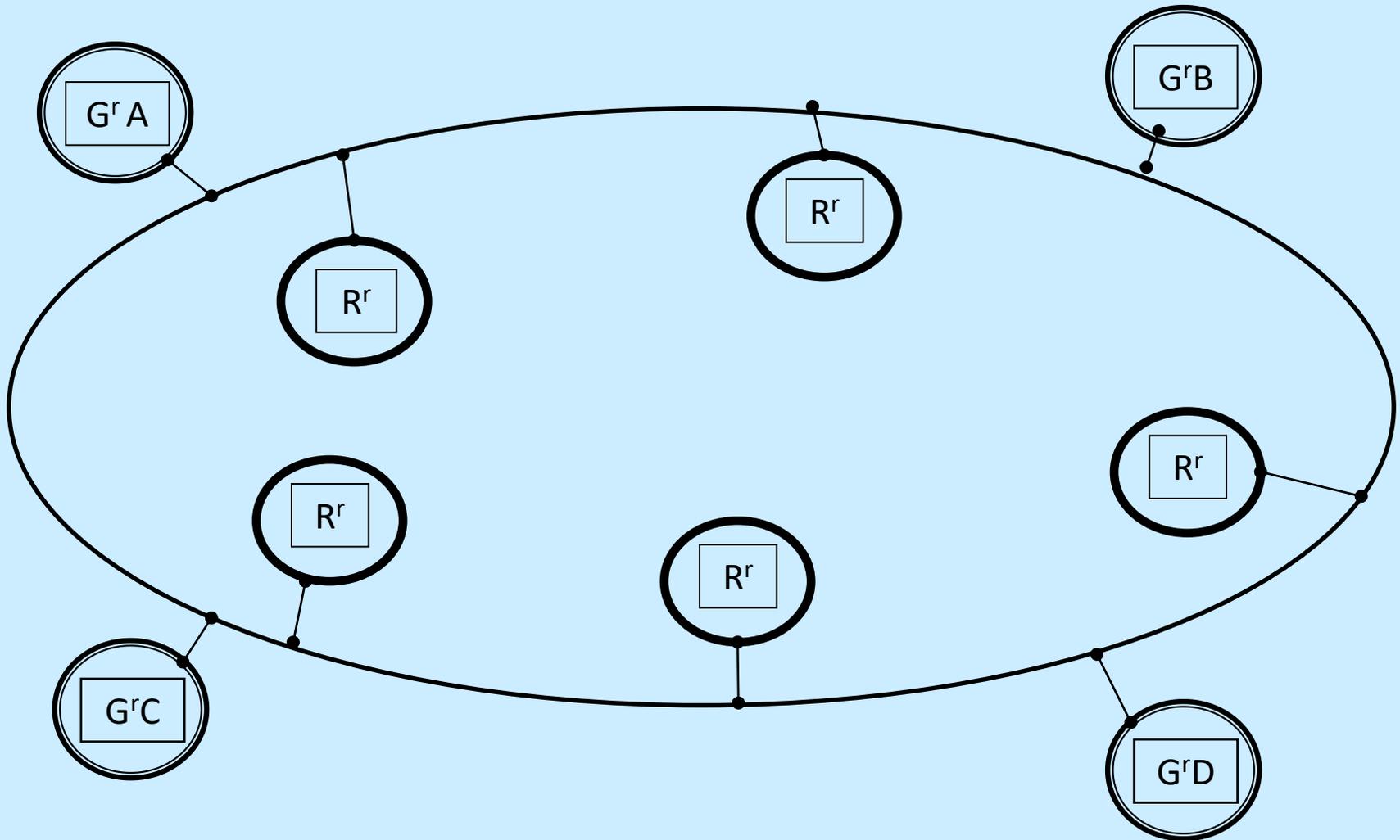


CONFERENCE SFEN LE CREUSOT LE 08 MARS 2017

LE SYSTÈME ELECTRIQUE ET SON FONCTIONNEMENT



Réseau simple ou réseau bouclé, avec générateurs et récepteurs



COURANT CONTINU OU ALTERNATIF ?

- Le transport doit se réaliser en très haute tension pour limiter l'intensité et les pertes.
- Mais les générateurs sont limités en tension pour des problèmes diélectriques. (24 000 Volts maximum)
- Il faut donc interposer entre les générateurs de puissance électrique des transformateurs élévateurs de tension,
- Or un transformateur, appelé aussi machine statique, ne fonctionne que s'il est alimenté en courant alternatif pour induire des variations du champ magnétique dans sa masse magnétique,
- Ce sont ces variations de champ qui induisent sur l'enroulement secondaire une tension plus élevée.
- A noter que les transformateurs sont des machines instantanément réversibles.
- Sur le continent Européen, les réseaux très haute tension sont à 50 cycles par seconde et 400 000 Volts ou 400 kVolts

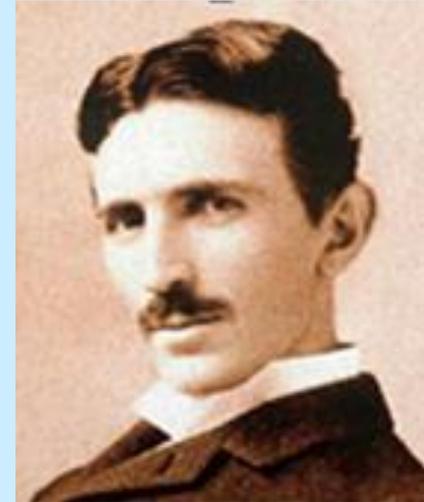
EDISON OU TESLA ?



La nécessité d'élever ou d'abaisser la tension impose d'avoir un courant électrique alternatif.

Ce sont donc les théories de Tesla (W) qui sont mises en œuvre

Mais le courant continu fait un retour en force et Edison (GE) n'a pas dit son dernier mot



Les tensions de production sont rarement supérieures à 24 kV.

Les tensions des appareils utilisateurs vont de 6.600 Volts à 220 Volts. Le réseau très haute tension va de 400 000 volts à 225 000 volts et celles du réseau de 63 000 volts au 220/380 volts. La diversité des gammes de tension requiert l'alternatif et les transformateurs.

Le principe du transformateur existe depuis 1837

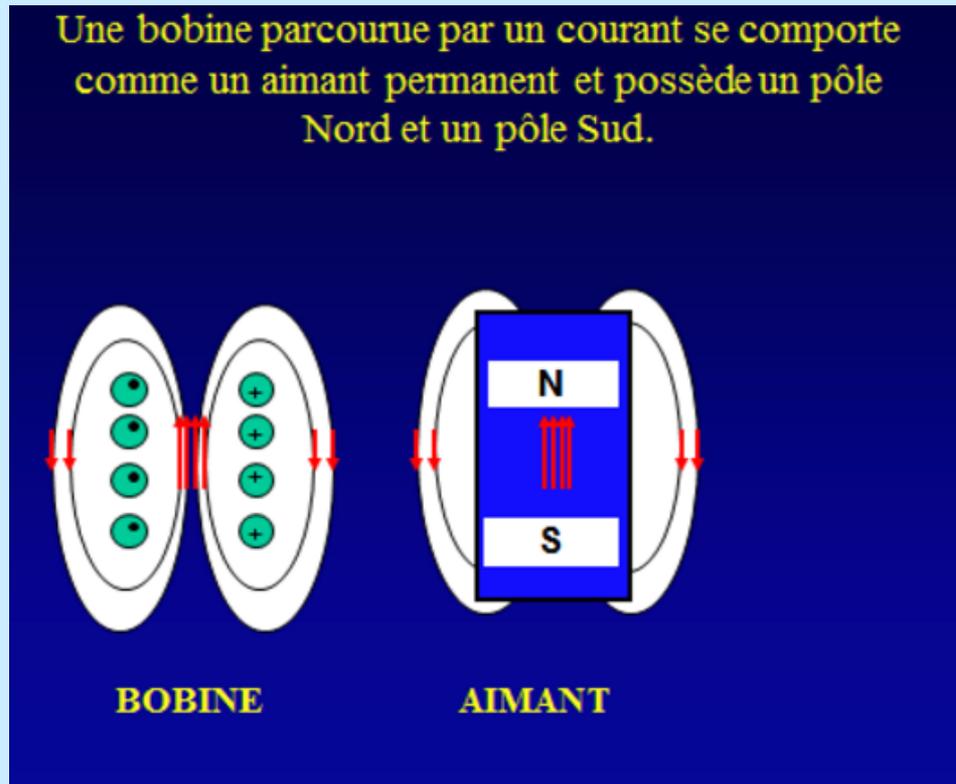
- **La boucle est alimentée par des générateurs de puissance en courant alternatif et alimente des récepteurs.**
 - Pour que ce réseau soit à l'équilibre, il faut à tout instant que la puissance délivrée soit égale à la puissance consommée,
 - Or la somme des puissances consommées varie tout le temps (de même pour la somme des puissances délivrées) induisant des déséquilibres qu'il faut rattraper en accordant la puissance délivrée par les générateurs et ceci pratiquement à la vitesse de la lumière.
- **Le réseau bouclé en 400 kVolts en courant alternatif est la structure la plus robuste:**
 - Il supporte des variations de puissances liées aux générateurs,
 - Il répartit les consommations sur tous les générateurs à commencer par les plus proches.
- **Les sous boucles ou les mailles.**

Réseau THT 400 KV de RTE



COMMENT FABRIQUE-T-ON DE L'ÉLECTRICITÉ ?

- Il suffit de faire tourner des aimants ou des électro-aimants devant des bobines via un circuit magnétique en fer qui canalise le flux pour voir apparaître une tension aux bornes de la bobine.
- Il faut donc une machine mécanique délivrant un couple moteur pour entraîner la rotation des électro-aimants.



GRUPE TURBO-ALTERNATEUR DE FLAMANVILLE



CENTRALE HYDRO-ÉLECTRIQUE DE MONTÉPIN



J. Fluchère

- Le couple moteur est issu de la transformation d'une énergie potentielle (vapeur, chute d'eau, etc.) en énergie mécanique pour entraîner la rotation des électro-aimants du rotor de l'alternateur devant les bobines du stator.
- **Le stator** comporte les bobines de l'induit.
- **Le rotor de l'alternateur, ou inducteur, porte les électro-aimants parcourus par le courant inducteur.**
- **La fréquence est fixée par la vitesse du rotor devant le stator.**

Tant que la machine n'est pas couplée au réseau électrique, une augmentation légère du couple moteur augmente la vitesse du rotor.

- **Quand la machine est couplée au réseau, sa vitesse est fixe et une augmentation du couple moteur se traduit par une augmentation de la puissance, c'est-à-dire le produit de l'intensité par la tension.**
- **Le courant qui parcourt l'inducteur fixe la tension de l'alternateur.**
- **Ouverture des robinets d'admission = augmentation de puissance.**
- **Augmentation du courant inducteur = augmentation de la tension.**

Réseau très haute tension (THT) à 400 kV

- « *Moins il transporte, mieux on se porte* » était le slogan d'une certaine époque révolue.
- Disposer d'un réseau bouclé ou maillé pour répartir les points d'injection de manière optimale par rapport au point de soutirage.
- **limitation des pertes par « effet Joule » ...**
- Choix d'un niveau de tension élevée pour réduire les intensités à puissance donnée ($P = U \times I$).
- pertes réseau RTE = 3 % consommation nationale.
- **Intérêt d'un sous-réseau à 225 000 volts**

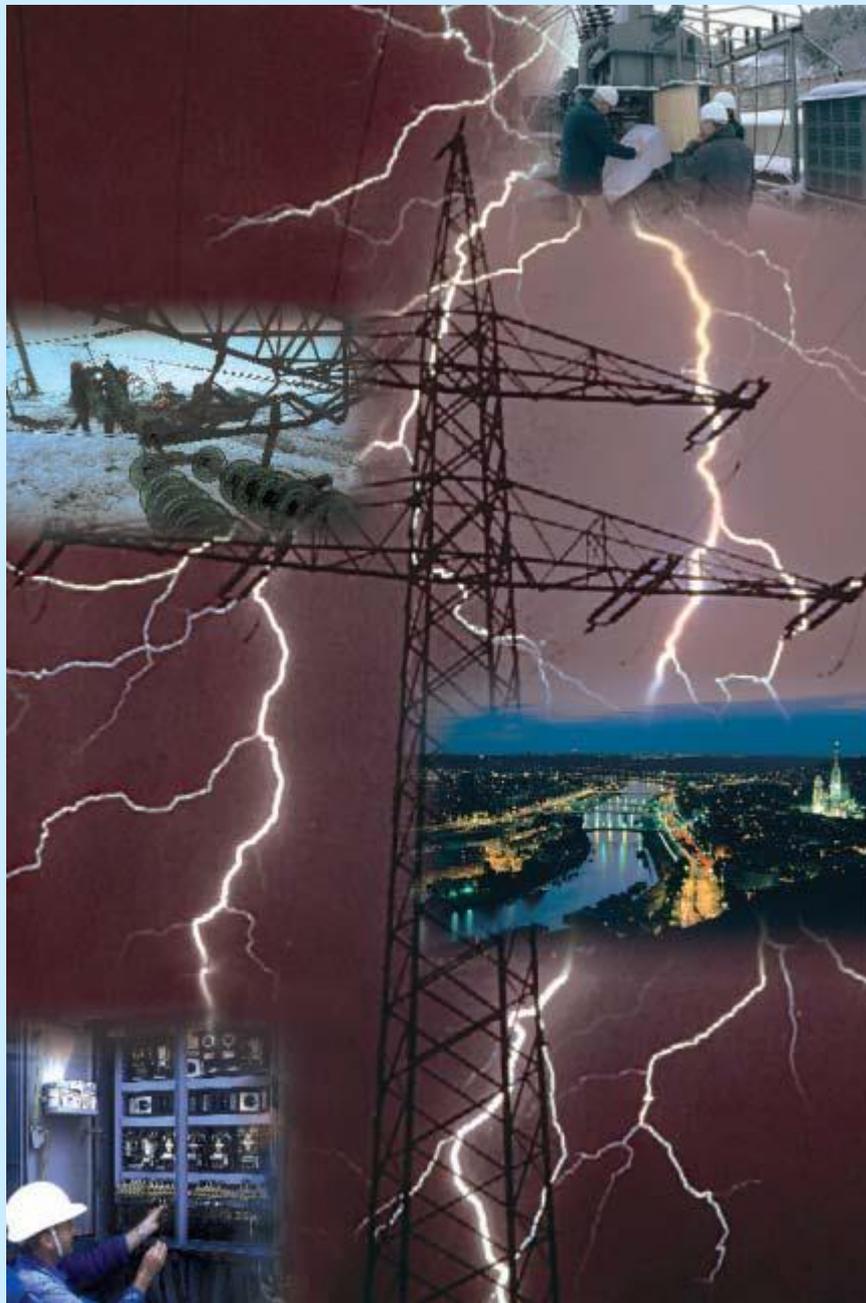
➤ **Intérêt du réseau bouclé :**

- Perte d'un point d'injection sans effet sur les points de soutirage.
- Robustesse du réseau face aux aléas, mutualisation des secours des groupes de production.
- Absence de longue portion, le 400 kV est adapté.
- Fonctionnement proche de la théorie des réseaux infinis, réglage de fréquence facilité.
- foisonnement des charges sur une zone importante

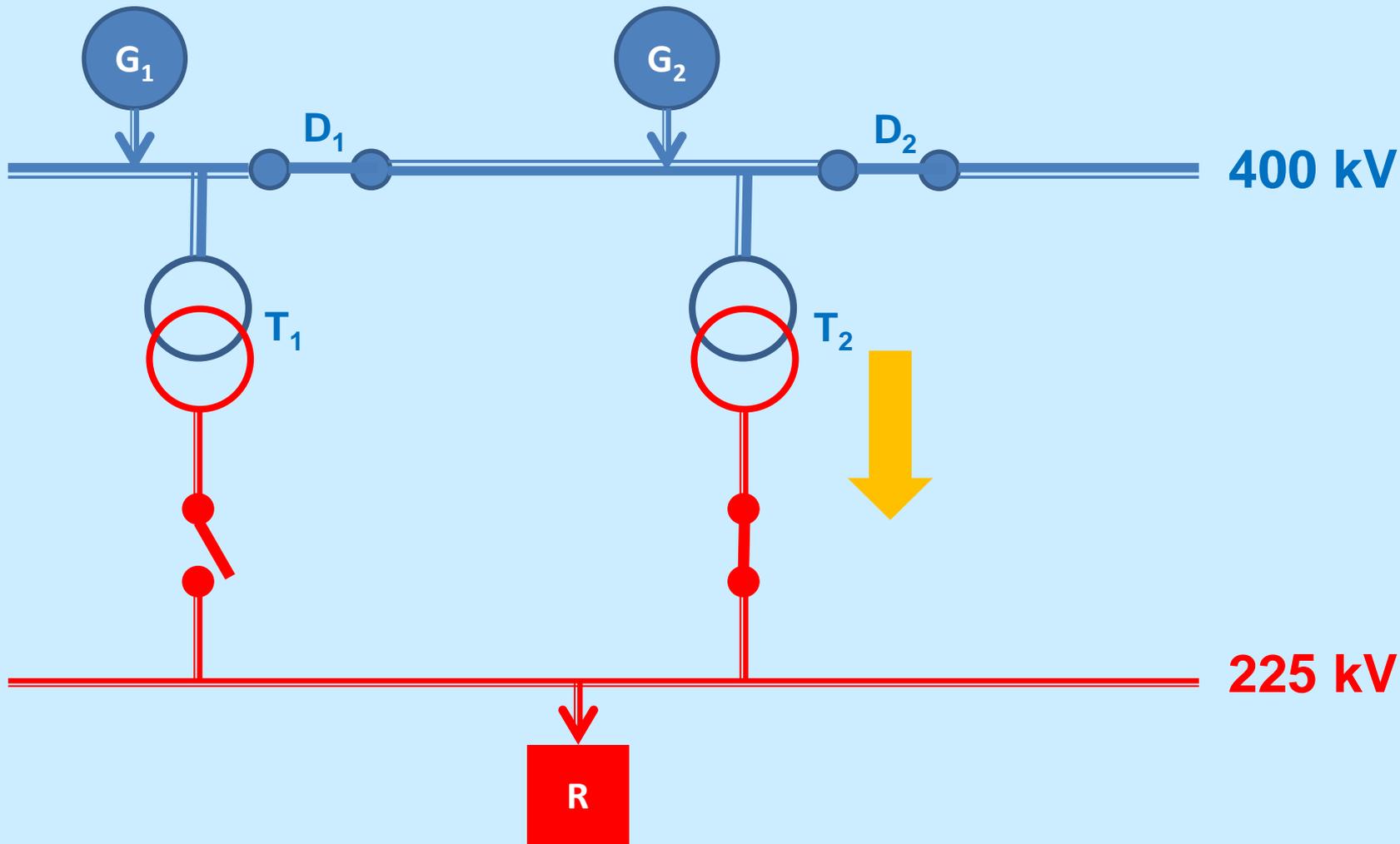
➤ **Le réseau réel** montre que la boucle peut être conservée même en cas de perte d'un brin à l'exception des presque-îles électriques

Maintenance ou incident

- **Débouclage pour maintenance ou incident sur un brin du réseau 400 kV?**
- Insertion de brins de réseau de répartition non bouclé en 225 kV.
- Ne pas boucler ce réseau pour éviter que des transferts 400 kV se fassent par le 225 kV.
- La plupart des soutirages vont s'opérer sur ce réseau 225 000 Volts.
- Injection de certaines sources de puissance.



Bouclages 400 et 225 kV : situation A (normale)

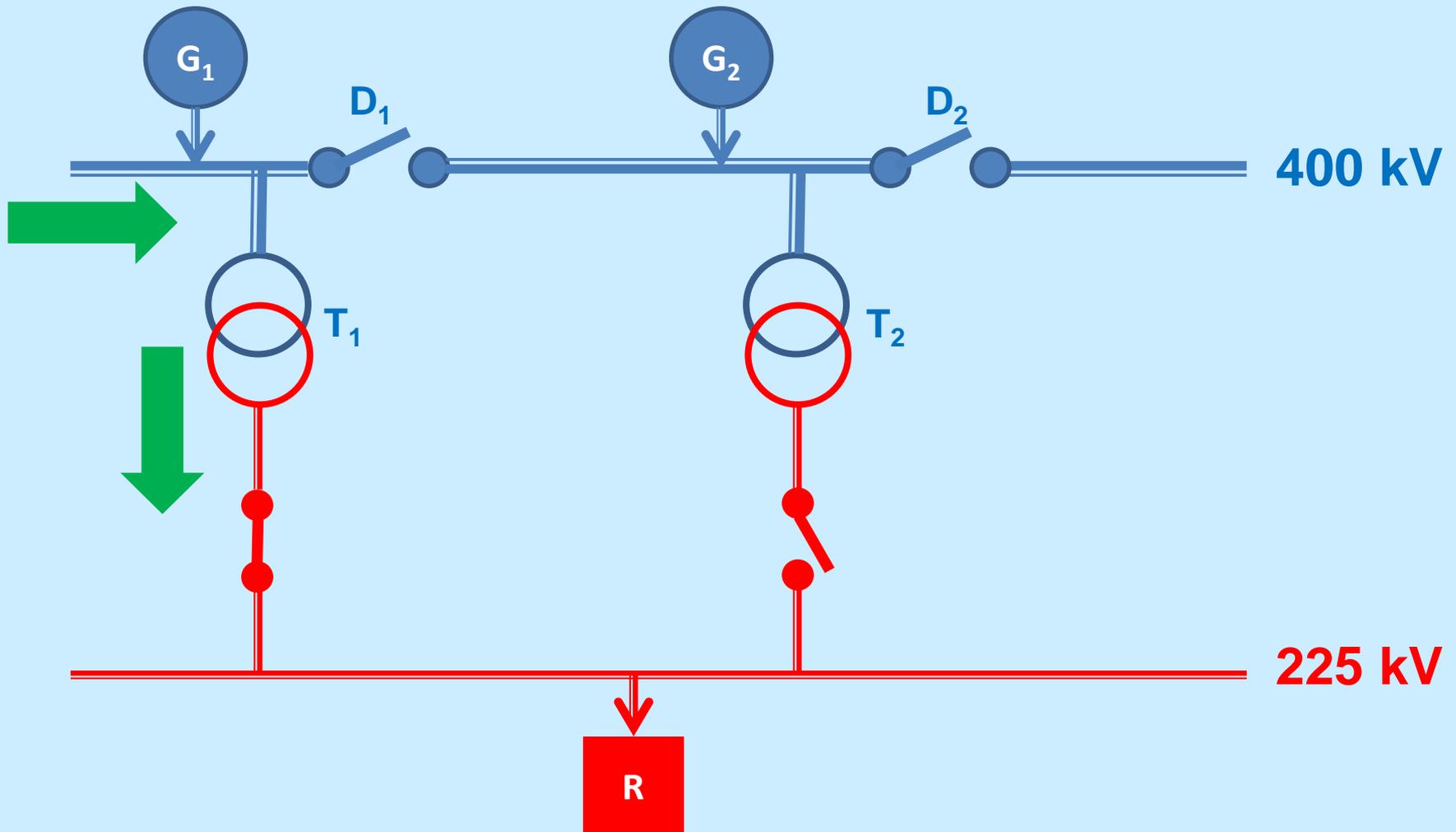




Suite à la tempête de 1999 : Renforcement de la tenue mécanique des lignes pour un vent de 150 km / h. et mise en œuvre de pylones anti-cascade pour prévenir l'effet « domino »(RTE).

Bouclages 400 et 225 kV

Pour maintenance ou sur incident



Réseaux 225 kV et 400 kV



➤ **Le réseau bouclé reçoit des sources de puissance de 2 natures différentes:**

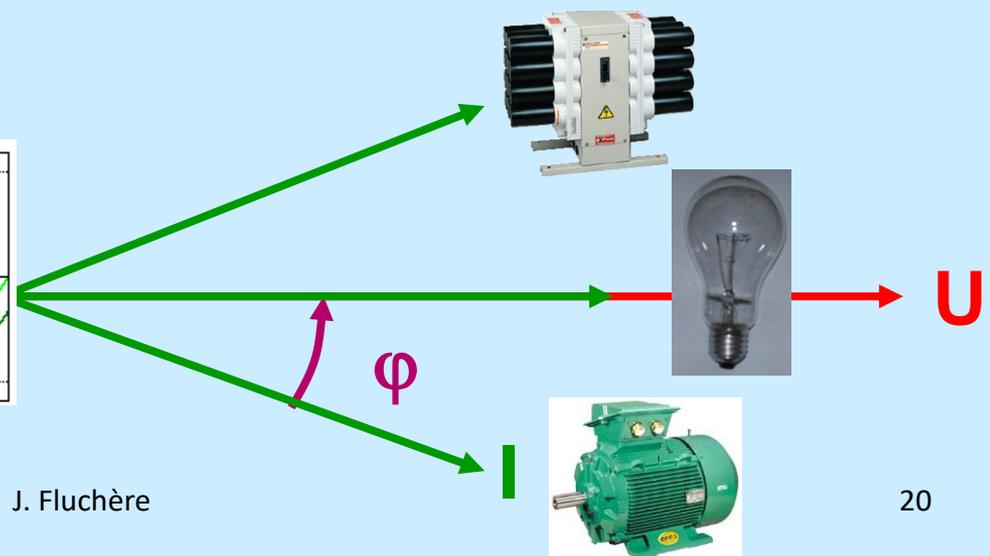
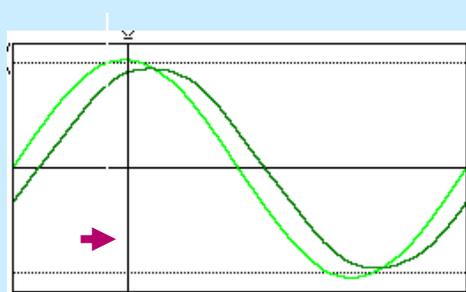
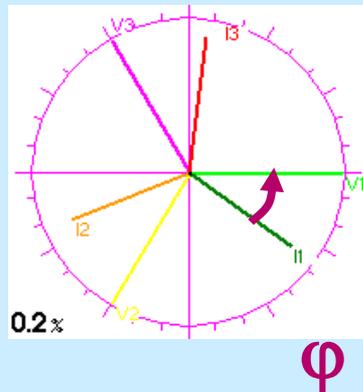
- **Des alternateurs (ou machines synchrones) entraînés par des turbines hydrauliques ou à vapeur qui fournissent de l'électricité à 50 cycles par seconde,**
- **Des interfaces statiques alimentées par des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.**

➤ **Il alimente:**

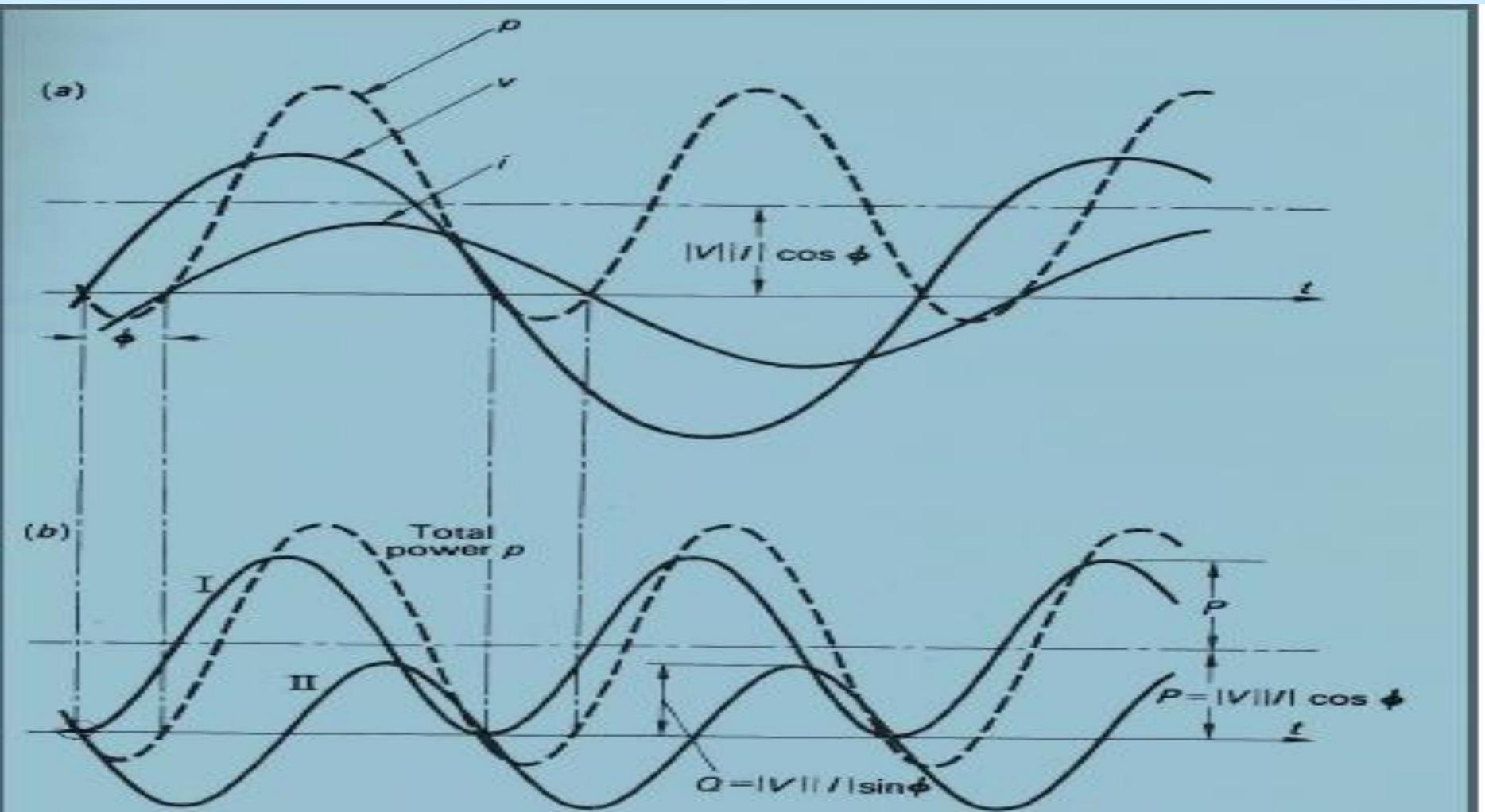
- **Soit un réseau de tension inférieure via un transformateur de tension,**
- **Soit directement des récepteurs dont l'impédance est très variable.**

NOTION DE DÉPHASAGE

- **Déphasage d'un angle φ** entre tension et intensité en fonction de la nature des charges.
- **Résistance pure:** tension et intensité **en phase** : (radiateur, ampoule à incandescence).
- **Inductance** : Intensité **en retard** sur la tension : (moteur, transformateur)
- **Capacité:** Intensité **en avance** sur la tension : (réseau électrique souterrain)



Puissance active, réactive et « apparente »

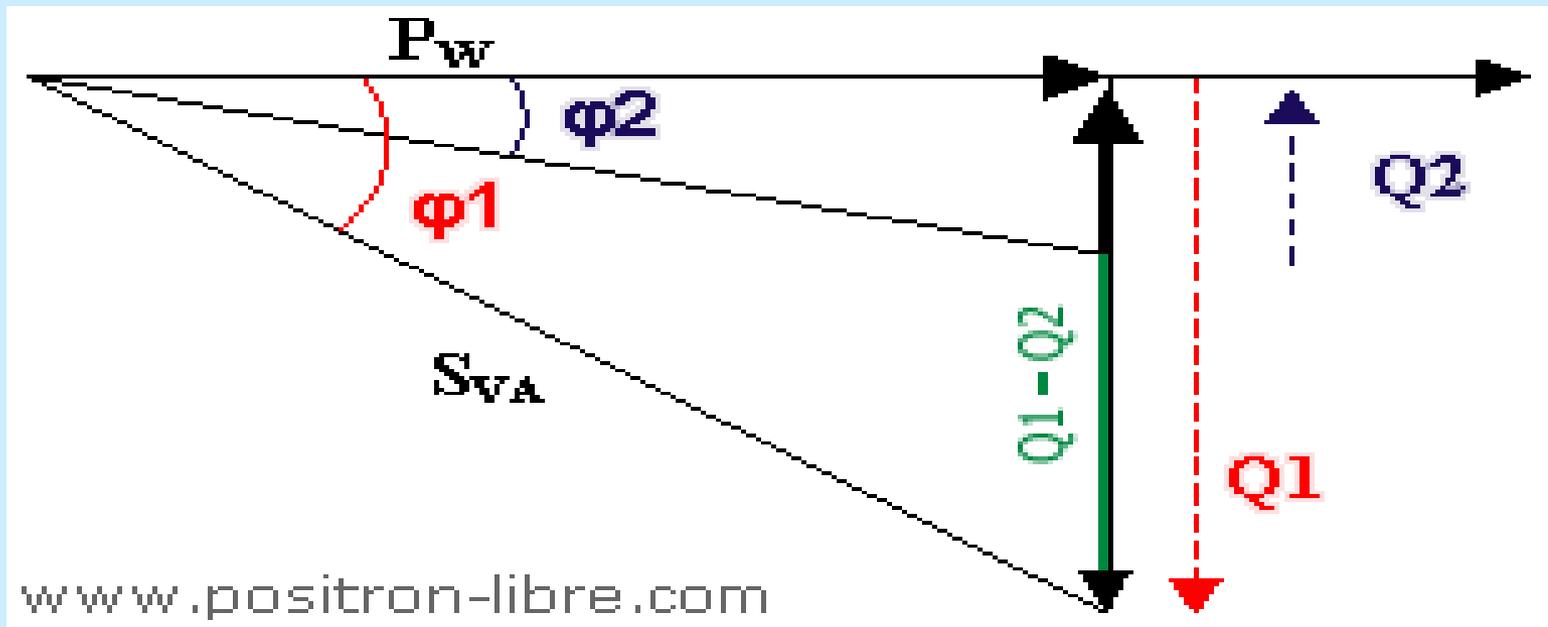


INDUCTANCES et CAPACITES

- Les impédances sont inductives ou capacitives.
- Une **inductance** agit comme un **amortisseur d'intensité** et le **courant est en retard par rapport à la tension**.

Dans ce cas, la machine doit produire de la puissance active et réactive en augmentant l'intensité dans l'inducteur (surexcitation).

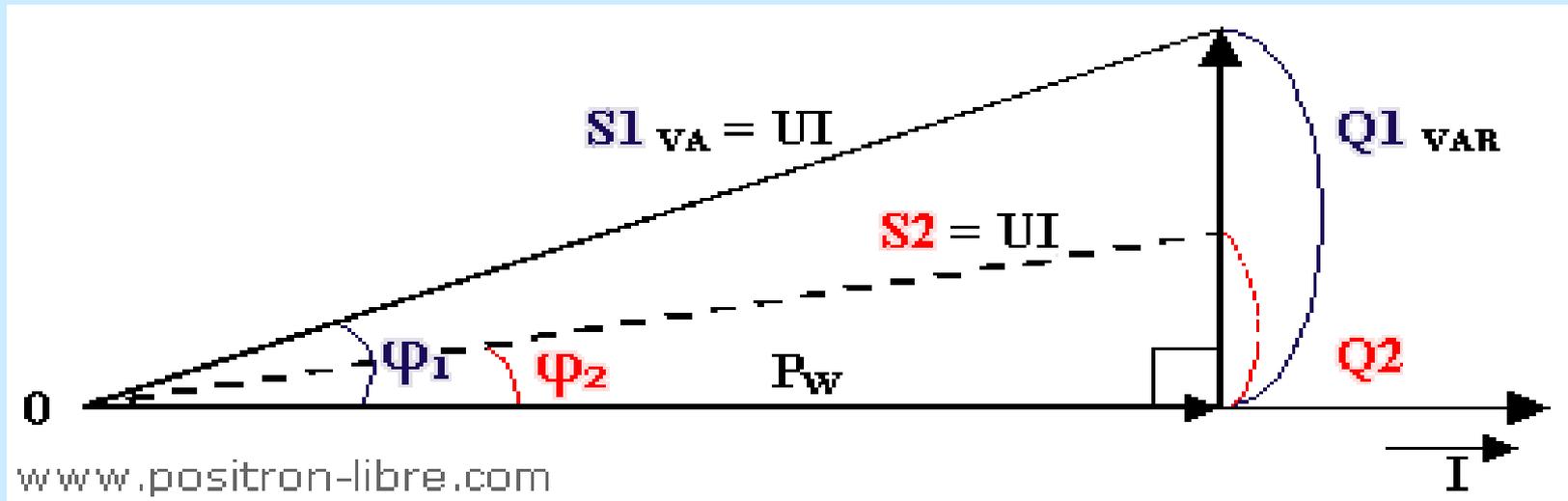
- **Inductance: l'intensité est en retard par rapport à la tension**



•Au contraire, les capacités font avancer l'intensité par rapport à la tension.

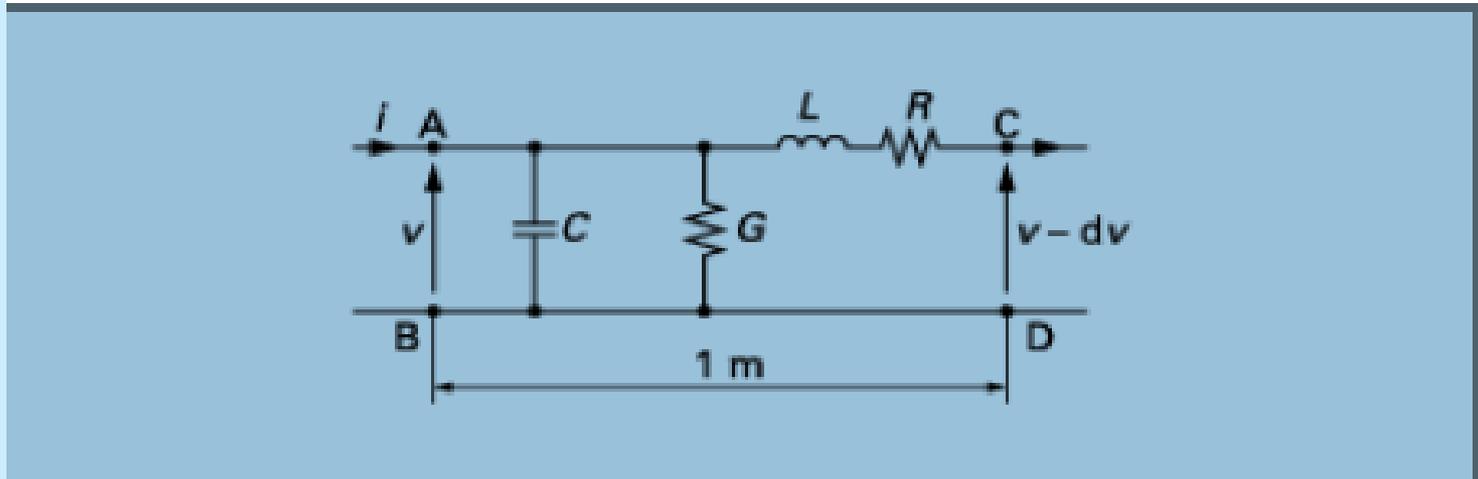
Dans ce cas il faut produire de l'actif et absorber du réactif par réduction du courant dans l'inducteur (sous excitation)

L'intensité est en avance par rapport à la tension



On a toujours intérêt à minimiser la puissance réactive produite ou absorbée car elle est produite ou absorbée au détriment de la puissance active

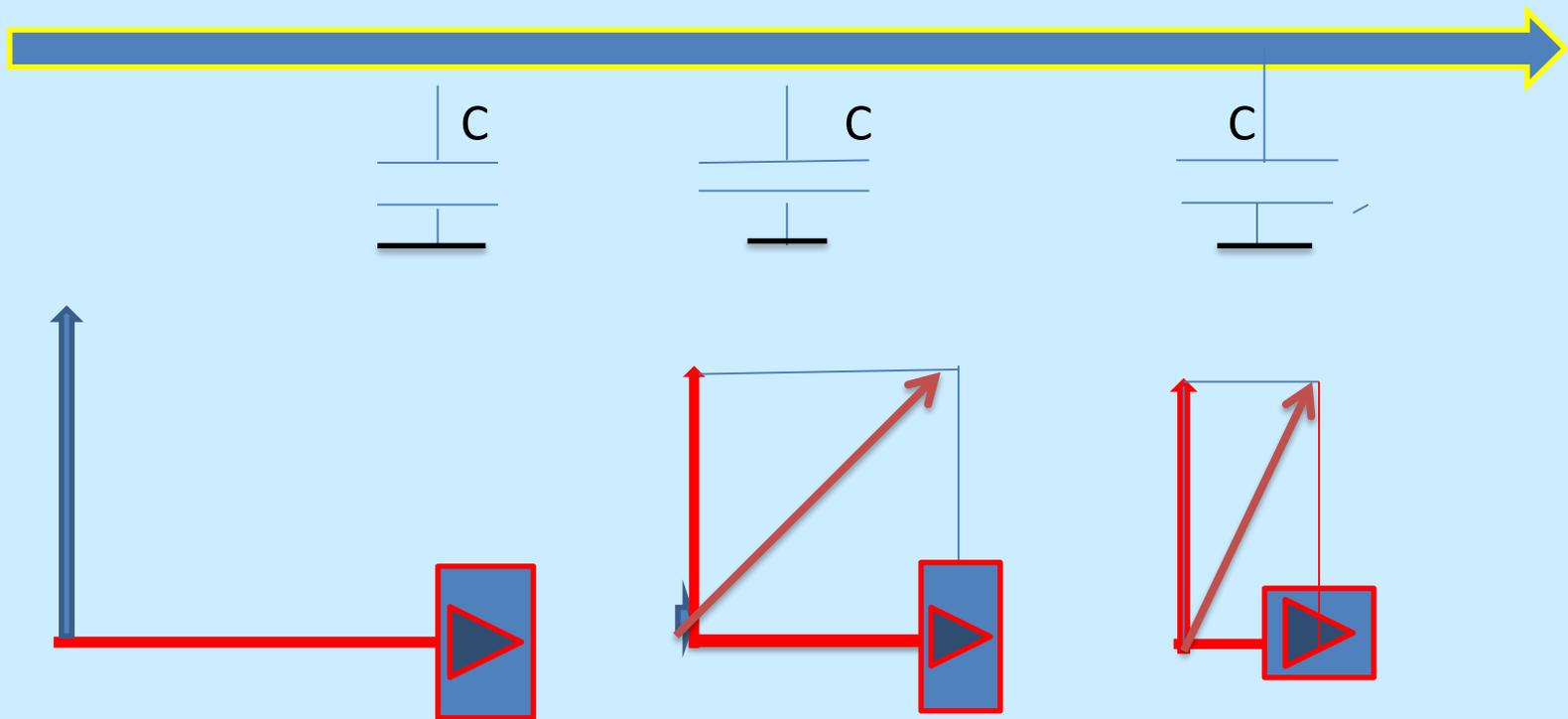
Les réseaux électriques en alternatif



On peut les représenter de la façon ci-dessus. L'évaluation de R , L et C dépend de la configuration (mono, triphasée, distances) et des matériaux utilisés pour le conducteur et le diélectrique.

- Un réseau aérien est principalement inductif à cause de l'inductance la ligne et parce que la plupart des installations sont aussi inductives, et consomment du réactif.
- Un réseau souterrain est principalement capacitif à cause de son isolement par rapport à la terre

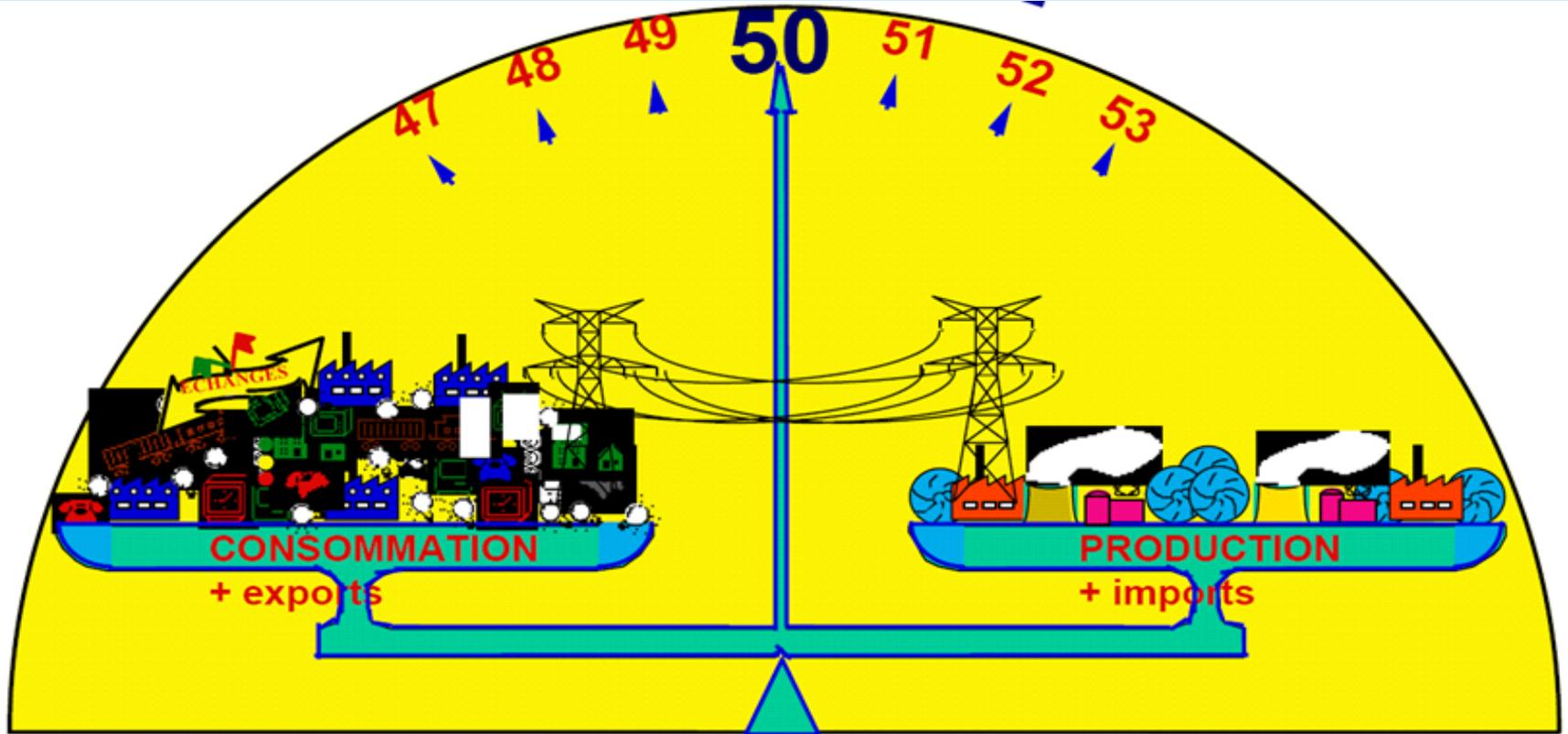
PROPAGATION DE LA PUISSANCE DANS UNE LIGNE SOUTERRAINE OU SOUS MARINE



- Progressivement, par l'effet capacitif, la puissance active se transforme en réactif. Il faut donc insérer entre la ligne et la terre des inductances

Equilibre production / consommation

FREQUENCE (en Hz ou cycles par seconde



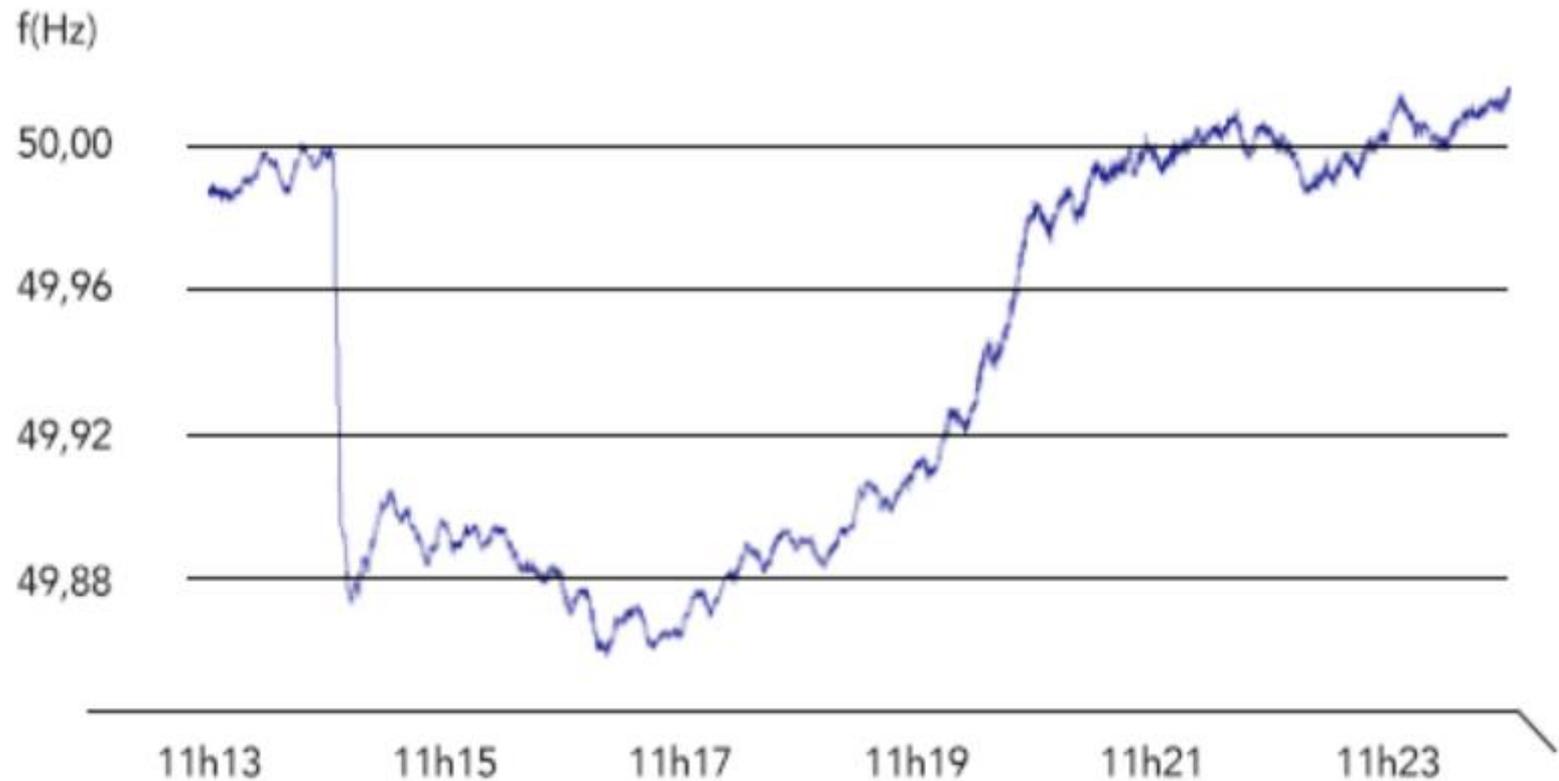
Source RTE

Production = Consommation

La fréquence = Vitesse du réseau

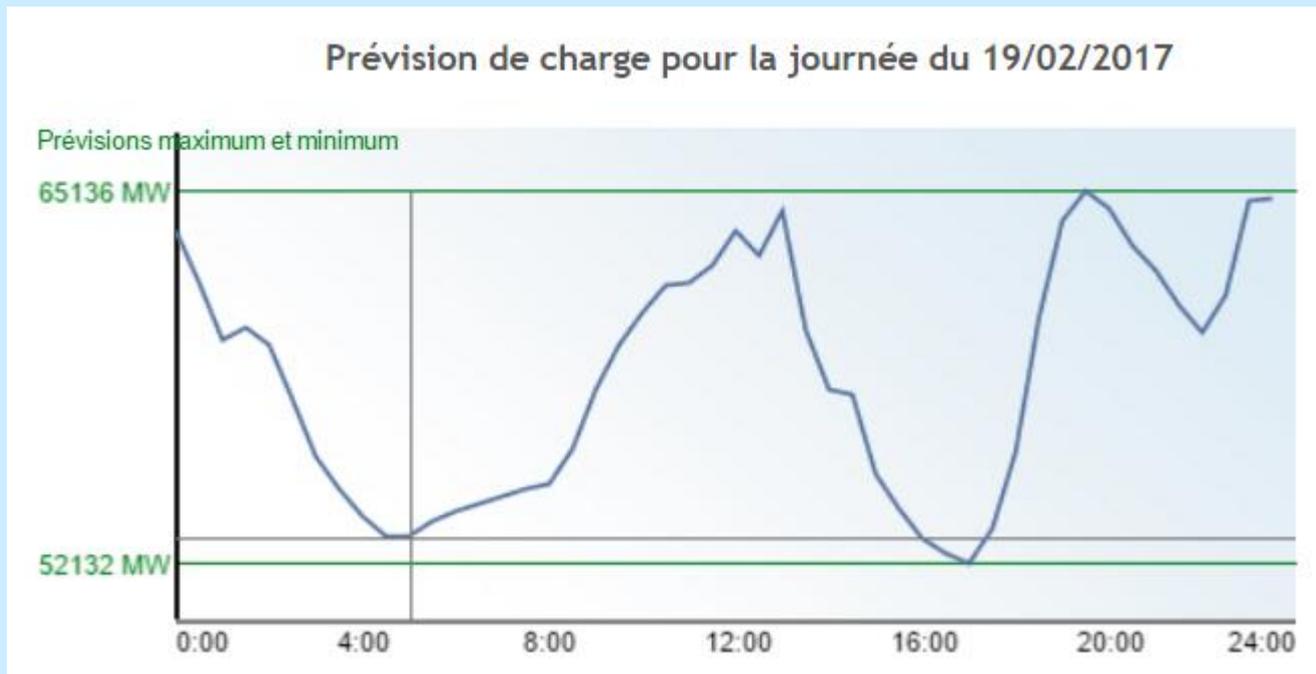
- La fréquence, un indicateur qui donne l'image à tout instant de l'équilibre entre la production et la consommation.
- En Europe, elle est fixée à 50 Hertz (Hz), et c'est une grandeur commune entre les pays interconnectés.
- On parle de zone synchrone à 50 Hz avec une tolérance de $\pm 0,5$ Hz (pour les réseaux des pays interconnectés de l'UE).
- S'il y a plus de demande que d'offre, la fréquence baisse. A contrario, si l'offre est supérieure à la demande, la fréquence augmente. Freinage ou accélération.

Évolution de la fréquence suite à un aléa de production de 2 800 MW



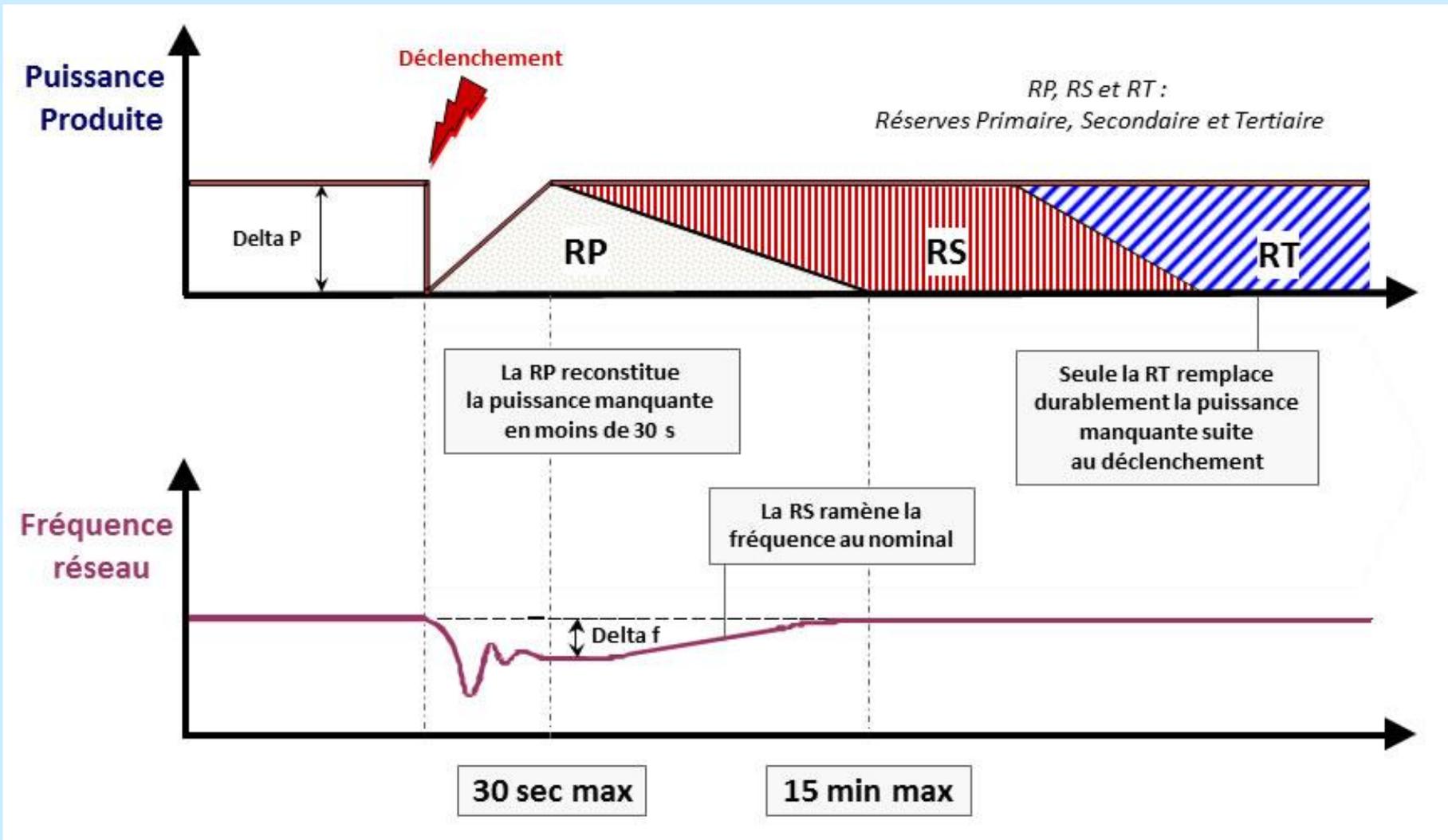
RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE

- Pour la prévision, RTE dispose des:
 - données météo et de ses outils statistiques qui lui permettent de tracer la prévision pour la journée à venir,
 - des moyens de production classés par ordre de coûts.
 - Il va donc donner à chaque installation sa courbe de charge pour le lendemain. Cette puissance sera actualisée en temps réel

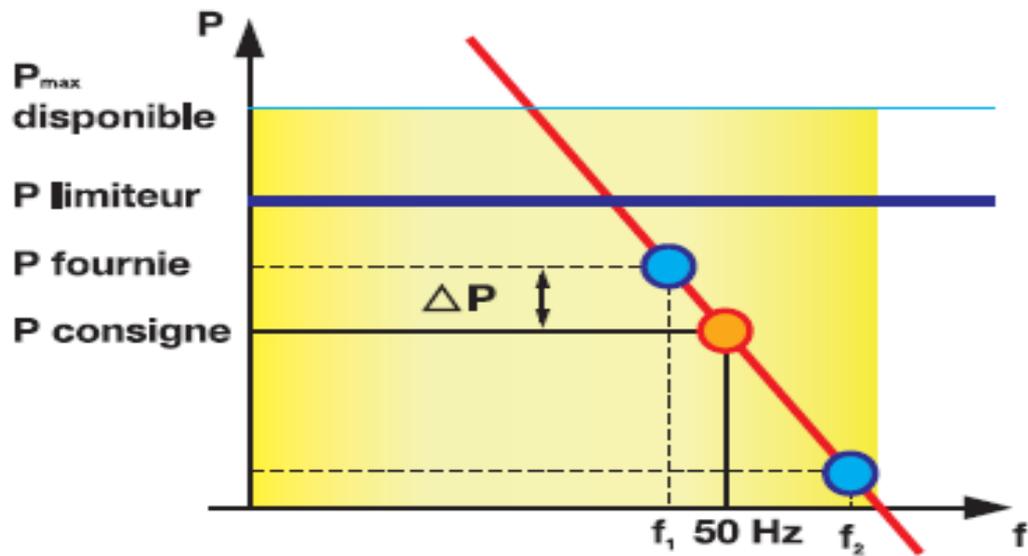


RÉGLAGE DE LA FRÉQUENCE

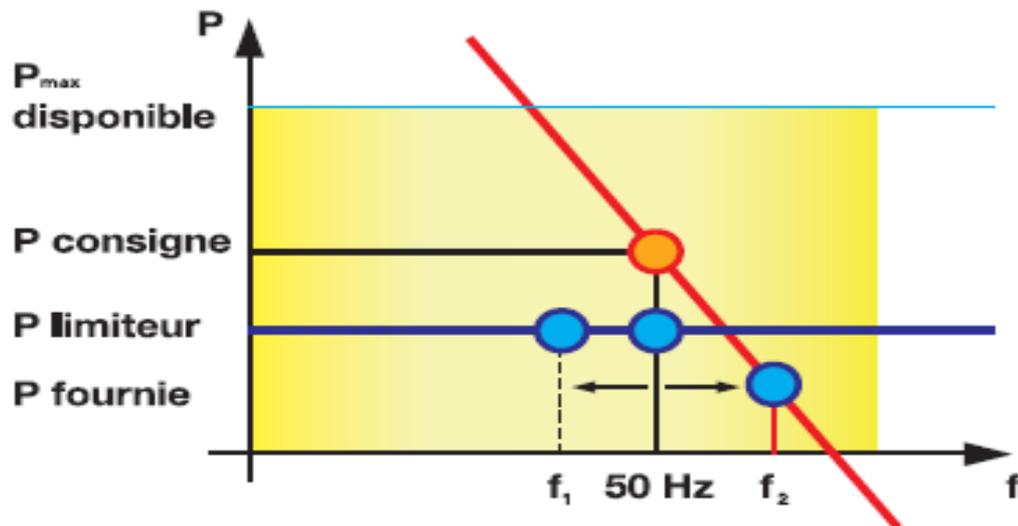
- **En cas de déséquilibre imprévu : production < consommation,** l'ensemble des machines tournantes raccordées au réseau va amortir la baisse de fréquence.
- **Réglage primaire:** automatismes des machines synchrones tournantes autour de 50 Hz. Cet automatisme ouvre les robinets d'admission de vapeur ou d'eau pour accroître le couple moteur ou les referme pour le baisser.
- **Réglage secondaire volontaire:** suivi de la charge fait par les opérateurs à la demande du réseau.
- **Réglage secondaire automatique ou télé-réglage.** Participation d'une machine dans une bande de puissance déterminée à la disposition du réseau.
- **Réglage tertiaire:** il se fait manuellement par appel aux producteurs et aux consommateurs connectés au réseau pour qu'ils modifient très rapidement leur programme de fonctionnement prévu



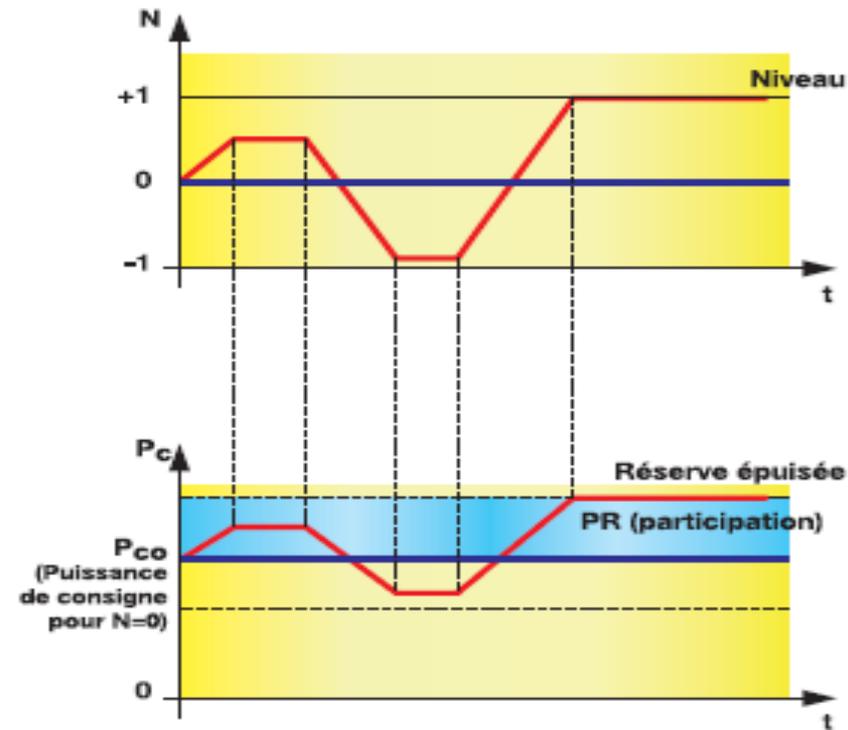
Groupe avec réserve primaire



Groupe sans réserve primaire



Évolution d'un groupe en réglage secondaire



Le respect, par chaque groupe, de la contribution demandée par le réglage secondaire permet d'assurer la qualité de la fréquence et le respect du programme d'échanges.

➤ La réserve primaire

La constitution de la réserve primaire est assurée par l'ensemble des producteurs européens interconnectés aux réseaux de transport de la plaque continentale européenne synchrone.

Pour dimensionner cette réserve, on considère qu'elle doit pouvoir répondre à la perte simultanée des deux plus gros groupes de production présents sur cette plaque, soit une puissance de 3000 MW.

Le système français contribue à hauteur d'environ 600 MW : tous les nouveaux groupes de production de plus de 40 MW et tous les anciens groupes de production de plus de 120 MW connectés au réseau de transport français ont l'obligation de réserver une partie de leur puissance pour la réserve primaire.

RTE fait partie du réseau européen des gestionnaires de réseaux de transport d'électricité (ENTSO-E).

La réserve secondaire manuelle ou réglée depuis le dispatching.

Tous les producteurs de la zone France possédant des groupes de production de plus de 120 MW ont l'obligation d'affecter une partie de leur puissance à la réserve secondaire.

Cette dernière est comprise entre 500 MW et 1000 MW, selon la plage horaire et la période de l'année. De fait, elle peut ne pas être suffisante pour compenser toutes les perturbations, comme par exemple la perte du plus gros groupe couplé (1500 MW). Dans ce cas, la réserve primaire reste entamée - voire intégralement utilisée - et la réserve secondaire est épuisée : il faut donc mobiliser la réserve tertiaire.

La réserve tertiaire ou mécanisme d'ajustement toujours manuelle.

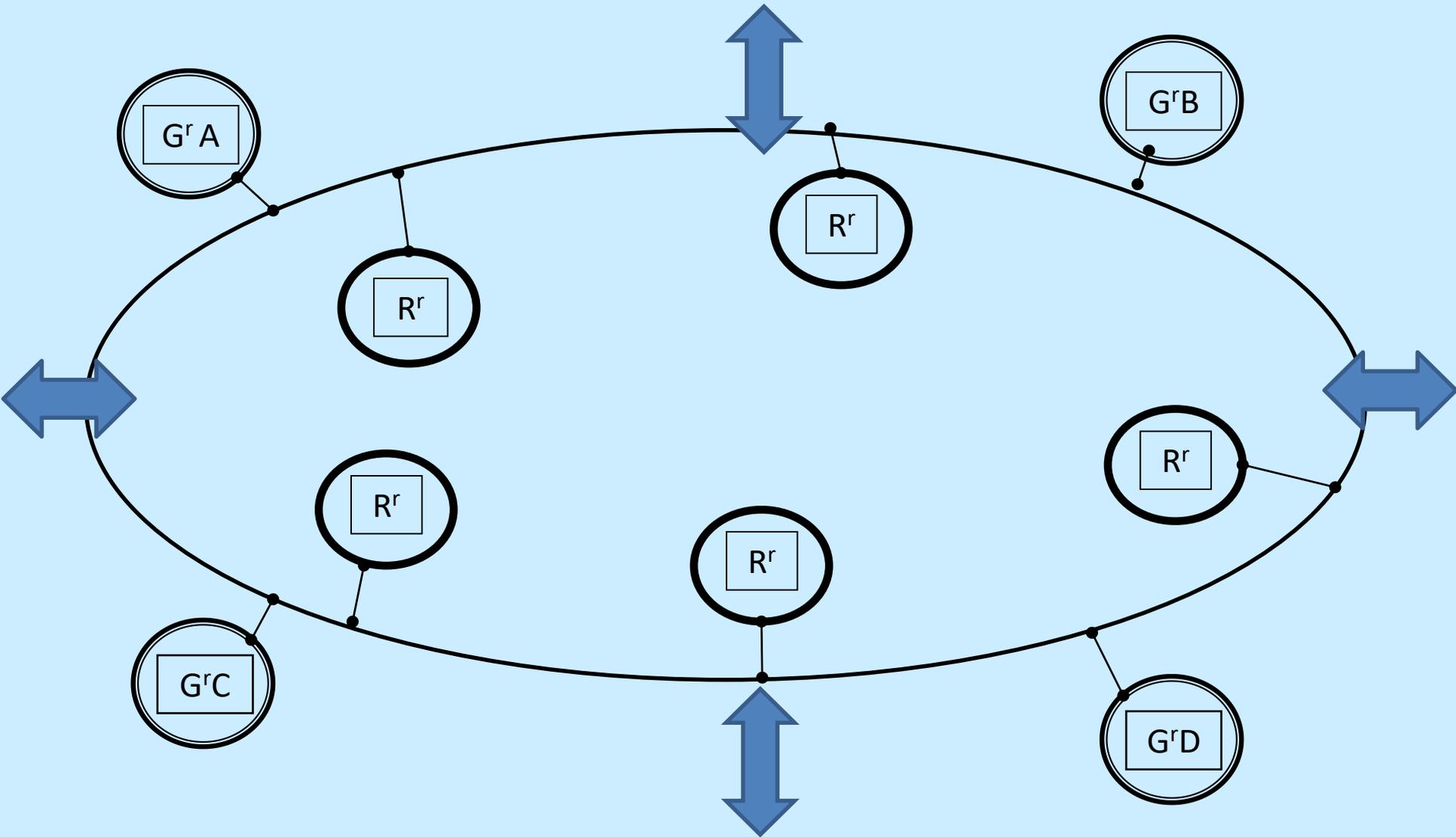
Tous les producteurs et consommateurs français, ainsi que certains acteurs étrangers peuvent, à condition de disposer de 10 MW, participer au mécanisme d'ajustement.

CONSÉQUENCE DE LA PERTE D'UN GROUPE DE 1 300 MW EN FRANCE

- **Si la France était seule en réseau séparé** (déconnectée du reste de l'Europe) avec $K = 5\,000$ MW/Hz, ***la chute de fréquence serait de 260 mHz***, et la contribution de chaque groupe au réglage primaire devrait être de 13 % de sa puissance nominale (au delà des capacités constructives de réglage primaire de fréquence de la plupart des installations de production) ;
- **Si la France est interconnectée au reste de l'Europe** (situation normale) avec $K = 20\,000$ MW/Hz, ***la chute de fréquence est de 65 mHz***, et chaque groupe réglant participe pour 3,2 % de sa puissance nominale.

L'interconnexion permet à tous les partenaires de mutualiser les participations au réglage primaire de fréquence et à chacun de réduire le dimensionnement de sa réserve primaire aussi bien au niveau des dispositions constructives des nouvelles unités de production qu'en exploitation.

RÉSEAU INTERCONNECTÉ



LES INTERCONNEXIONS INTERNATIONALES

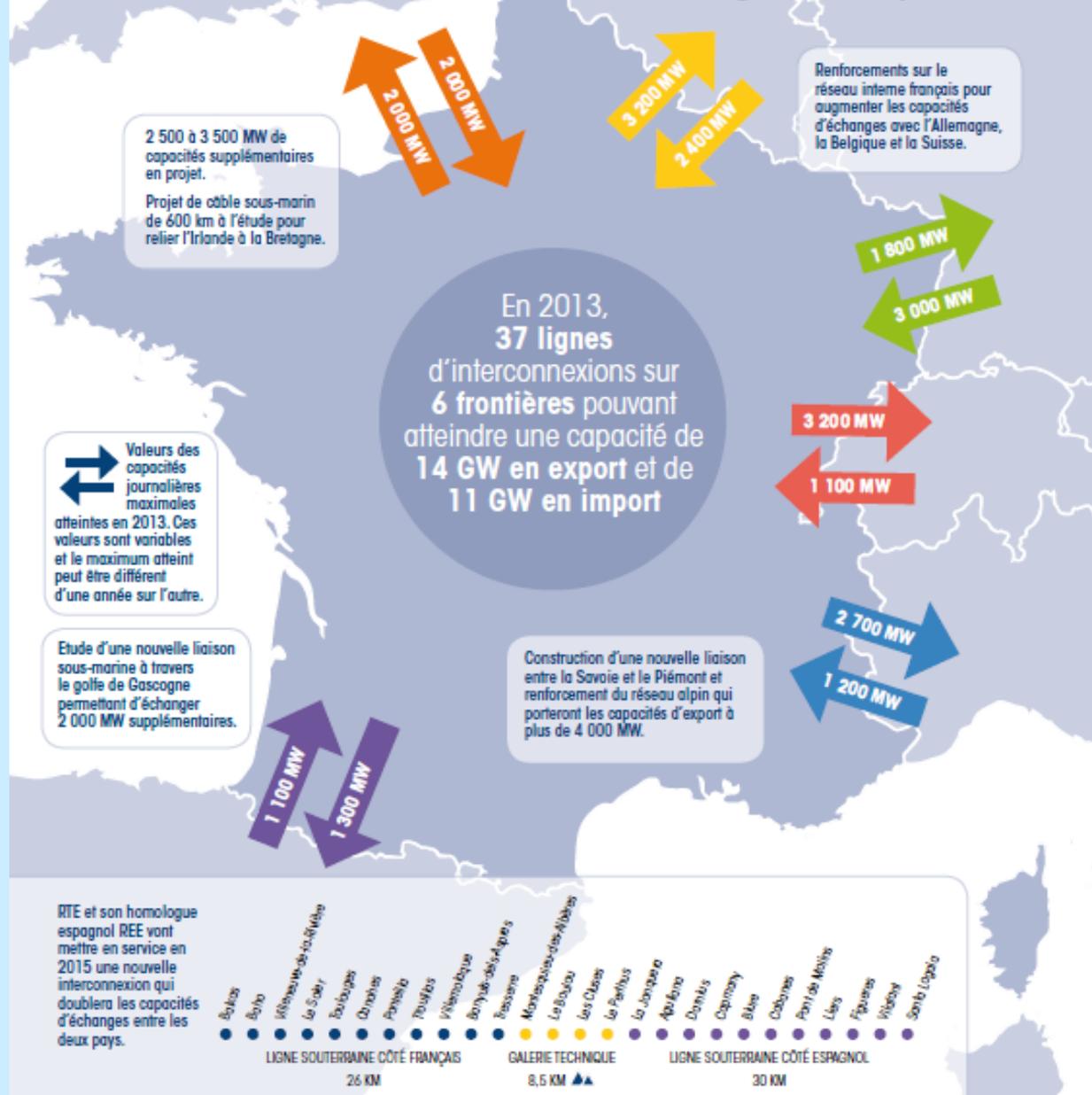
❖ Rôle historique:

- Sécurité électrique. Stabilité de fréquence.
- Optimisation des puissances installées par chaque pays.
- Recherche de l'optimum économique des productions.

❖ Rôle actuel:

- L'aspect commercial s'ajoute au rôle historique.
- Les flux financiers sont désormais totalement découplés des flux physiques.

La France au carrefour des échanges européens



Bilan des échanges contractuels en 2016

Grande-Bretagne

Export : 12,7 TWh

Import : 2,7 TWh

CWE

Export : 10,6 TWh

Import : 15,9 TWh

France

Export : 71,7 TWh

Import : 32,6 TWh

Solde : 39,1 TWh

Suisse

Export : 17,4 TWh

Import : 7,3 TWh

Italie

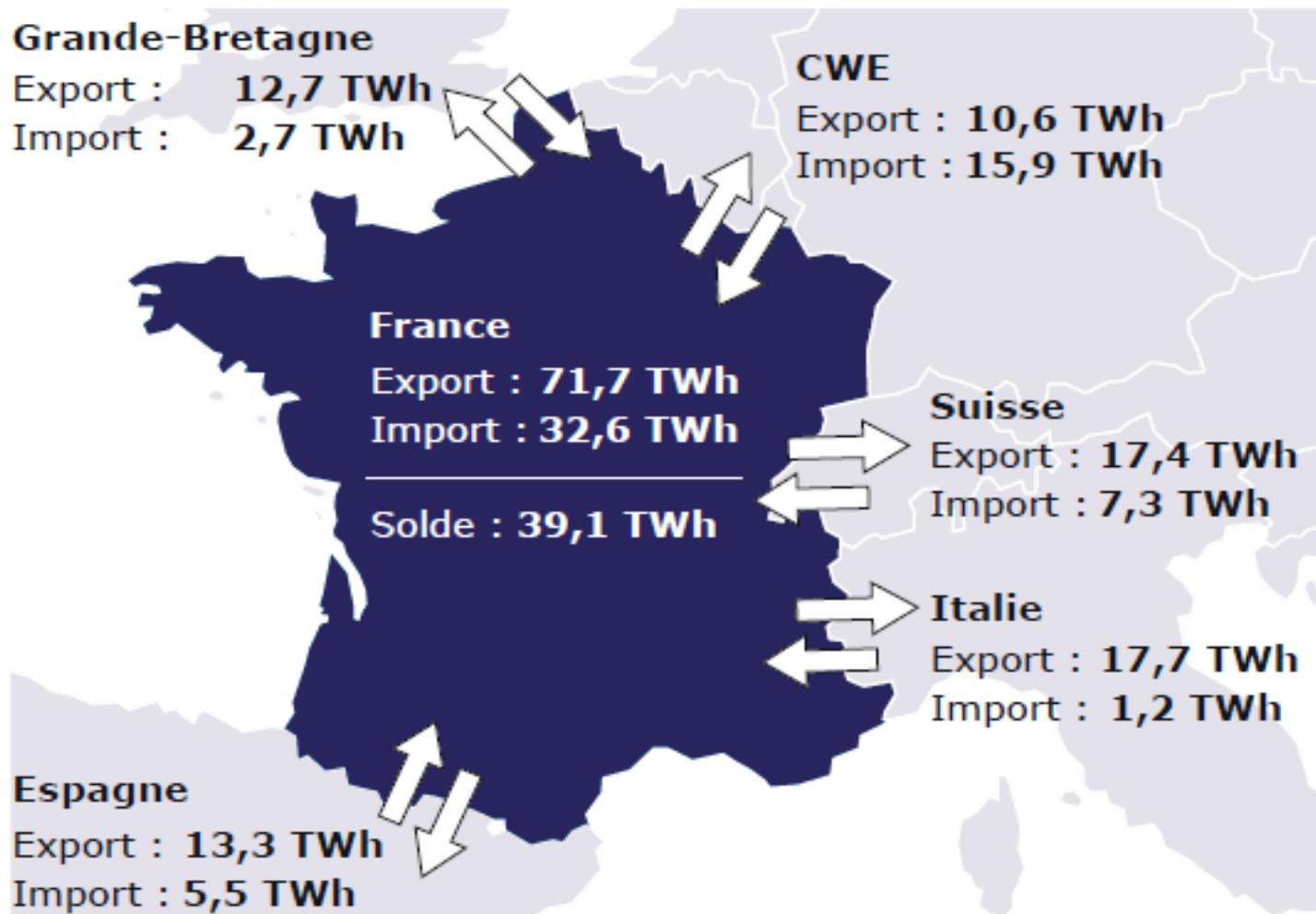
Export : 17,7 TWh

Import : 1,2 TWh

Espagne

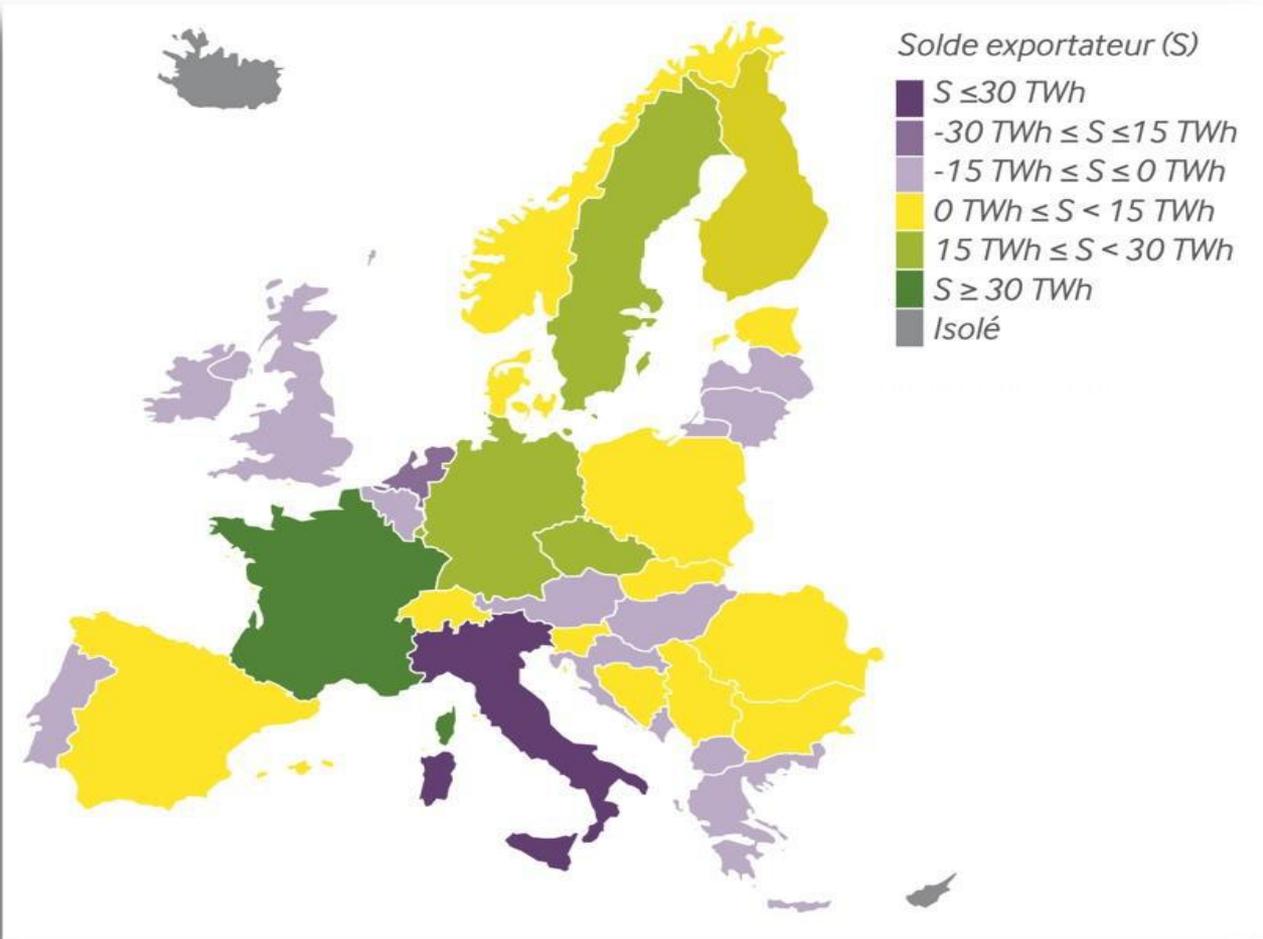
Export : 13,3 TWh

Import : 5,5 TWh



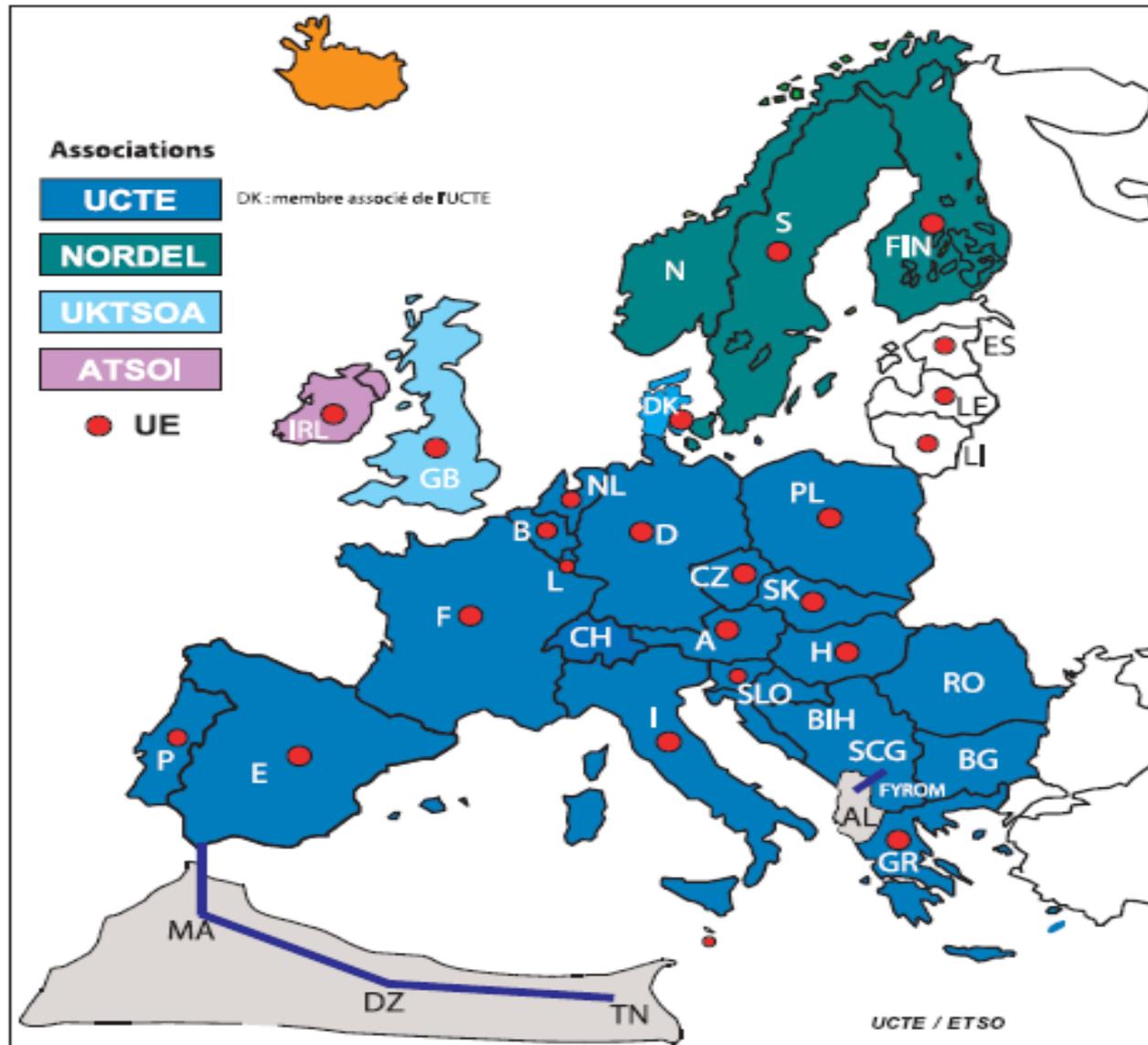
La France est le pays le plus exportateur d'Europe

Solde des échanges physiques

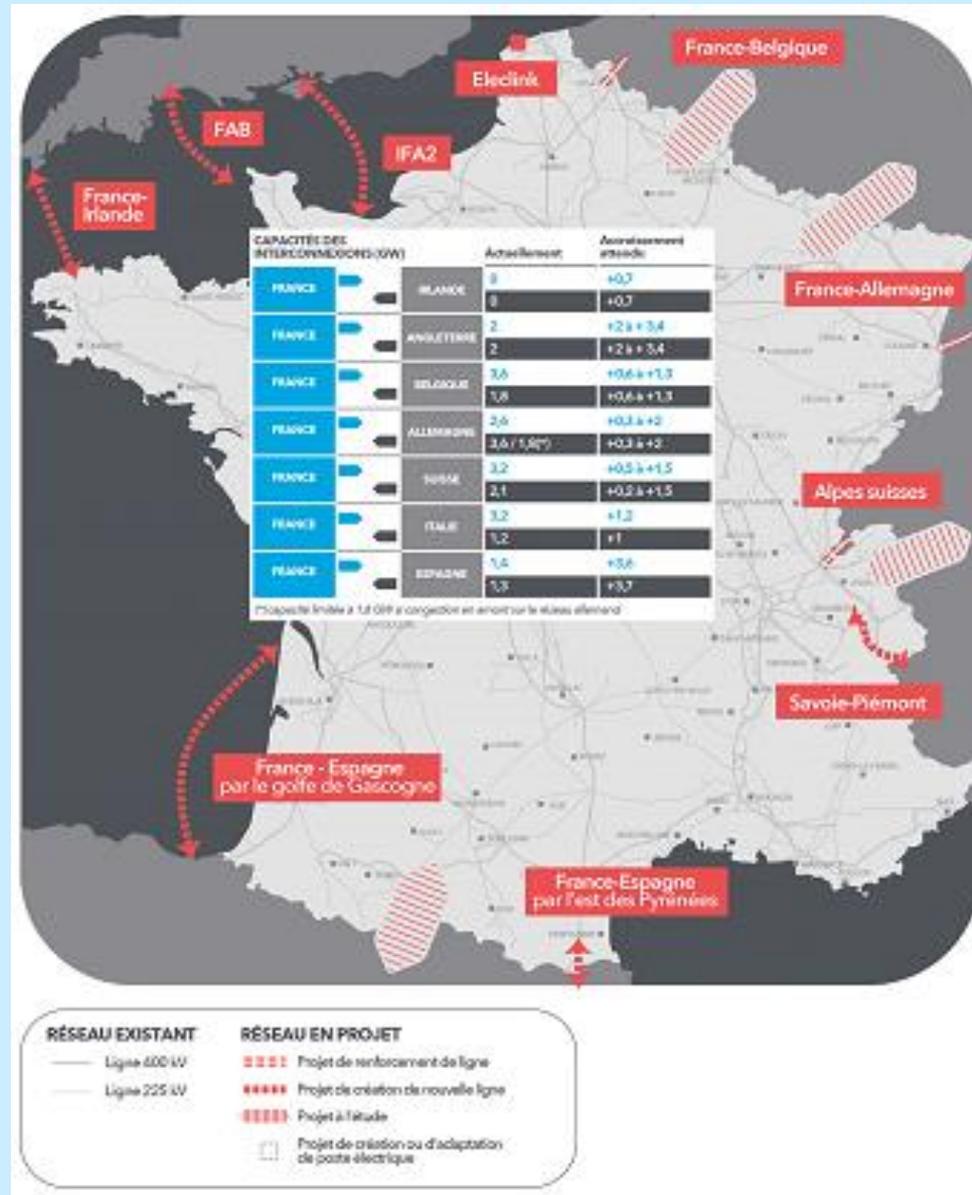


Calculé sur 12 mois de juillet 2012 à juin 2013

L'interconnexion du système électrique français avec les pays d'Europe de l'Ouest



RENFORCEMENT DES INTERCONNEXIONS



RÉGLAGE DE LA TENSION- TENSION ET RÉACTIF: COUPLE D'ENFER- LE RÉACTIF VOYAGE MAL!

- Le niveau de la tension est indicateur de l'adaptation en puissance réactive.
- Le réglage est fait principalement par la variation d'intensité dans les inducteurs des générateurs synchrones tournants pour fournir ou absorber de la puissance réactive.
- Le fonctionnement de certaines machines en compensateurs synchrones (Cas de Biblis ou de Martigues).
- La mise en place de batteries de condensateurs au plus près des consommations de réactif, mais.... FACTS
- La mise en place d'inductances sur le trajet des lignes souterraines, mais..... FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*).

LES ENR ALÉATOIRES: EOLIEN ET PV

- **Les éoliennes de grande puissance** sont des machines électriques qui délivrent une tension quasi constante, à fréquence et intensité variable.

D'où une interface statique de redressement et d'ondulation.

Conséquences: Elles n'assurent pas le service fréquence, fournissent une électricité parasitée par les harmoniques et n'ont pratiquement pas de puissance de court circuit.

Vrai également pour le photovoltaïque.

- **Les éoliennes de petite puissance** sont des génératrices asynchrones qui absorbent du réactif pour leur puissance magnétisante et fournissent de l'actif quand leur fréquence est supérieure ou égale à 50 Hz. **N'assurent aucun services système ni fréquence ni tension ni puissance de court circuit**

ENR DE FORTE PUISSANCE LOCALISÉES ÉLOIGNÉES DES ZONES DE CONSOMMATION : ÉOLIEN

- **Réseaux supplémentaires dimensionnés pour la puissance nominale (6 à 3 fois la puissance moyenne).**
 - Le dimensionnement important représente des investissements élevés.
 - Impact significatif sur les coûts du transport.
 - Leur caractère aléatoire, la difficulté de prévision des sources et leur fonctionnement quasi univoque font de ces réseaux des outils sous-utilisés.
- Les gradients de puissance arrivent à des valeurs de 30 GWe par heure en Allemagne et polluent tous les réseaux adjacents.

- Les solutions de stockage ne sont pas au rendez-vous de 2020 : délestage ou déversement et prix de marché négatif!
- La solution ne passe que par un renforcement drastique du réseau de transport et le recours à des productions pilotables à variations de puissance rapides. Nécessité d'accroître la « *réserve tournante* ».
- « *Super grid* » indispensable pour exploiter et amortir les variations de l'éolien (et du PV) de l'UE.
- Or l'UE n'a pas intégré la dimension et les crédits pour le transport.
Un câble de 200 km pour 1.000 MW = 1 G€ (aérien)

ENR ALÉATOIRES RÉPARTIES DANS LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

- **Petit éolien et photovoltaïque.**
- **Presque pas de gestion du système électrique de distribution similaire de celle du réseau THT.**
- **Prévisibilité des apports électriques :**
 - **Anémométrie ?**
 - **Ensoleillement ?**
 - **Consommation locale ?**
- **Retour de puissance sur le réseau RTE; Gestion ?**

LES NOMBREUX PROBLÈMES

- Gestion délicate de l'équilibre du « *système électrique* » : instabilité des puissances, violence instantanée des transits, incapacité Eole-Hélios.
- Ces réseaux vont transporter et pas seulement répartir, d'où une augmentation des pertes.
- Impact à prévoir sur les interconnexions.
- Quelle acceptation sociale des nouveaux réseaux?
- Recours systématique aux liaisons enfouies en courant continu ou alternatif ? Renchérissement (facteur 7) ...
- Quid du transit inverse de puissance réactive par rapport à la puissance active pour les génératrices asynchrones ?

Les certitudes

Le déficit chronique de puissances pilotables s'amplifie en Europe.

- **Les variations rapides de puissance transportée s'accroissent fortement avec les EnR aléatoires.**
- **L'impact sur les coûts des réseaux est très lourd.**
- **L'équilibre du système électrique devient de plus en plus délicat.**
- **Le niveau de risque sur la stabilité du système électrique s'élève.**
- **De plus, les prix de l'électricité vont monter, alors même que les opérateurs ("Utilities«) ont vu leur rentabilité se dégrader fortement , ce qui ne facilite pas les investissements en moyens pilotables.**

LE RISQUE DE BLACK OUT AU NIVEAU EUROPÉEN S'ACCROÎT FORTEMENT

VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

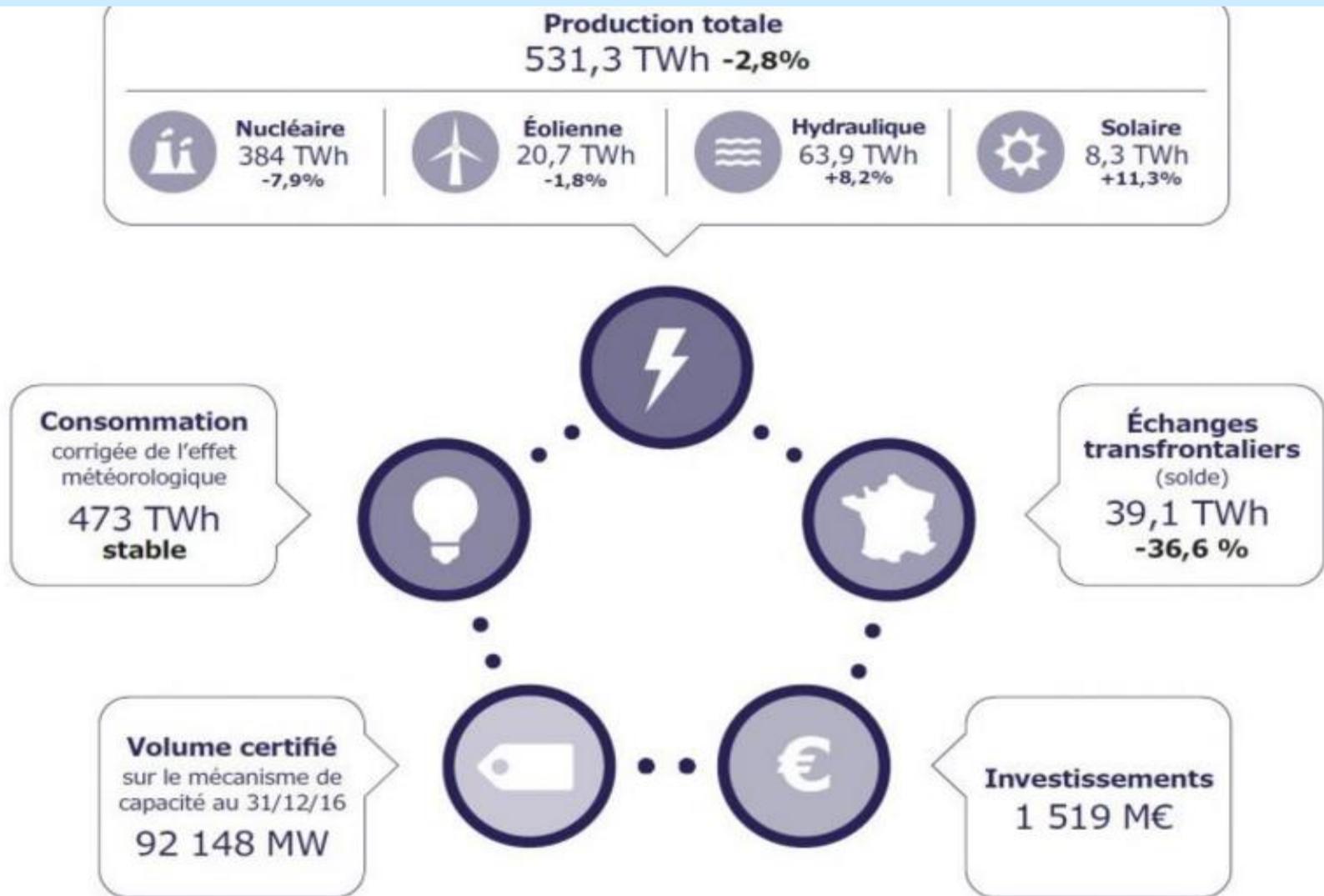


BLACK-OUT ITALIEN NUIT BLANCHE 28-09-2003 1978 EN FRANCE-2006 EN ALLEMAGNE



J. Fluchère

BILAN 2016



MERCI POUR VOTRE PATIENCE ET VOTRE ATTENTION



Action du réglage secondaire en Europe lors du déclenchement d'un groupe de 1 300 MW en France



Réglage primaire : P  325 MW

Réglage secondaire :

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta P_i + (K_{\text{France + péninsule Ibérique}}) \times \Delta f \\ &= -975 + 5\,000 \times (-0,065) \\ &= -1300 \text{ MW}\end{aligned}$$

N 



Réglage primaire : P  975 MW

Réglage secondaire :

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta P_i + K_{\text{Europe}^*} \times \Delta f \\ &= +975 + 15\,000 \times (-0,065) \\ &= 0 \text{ MW}\end{aligned}$$

N = **constante**

**Le groupe a déclenché en France.
Seul le réglage secondaire français doit compenser.**