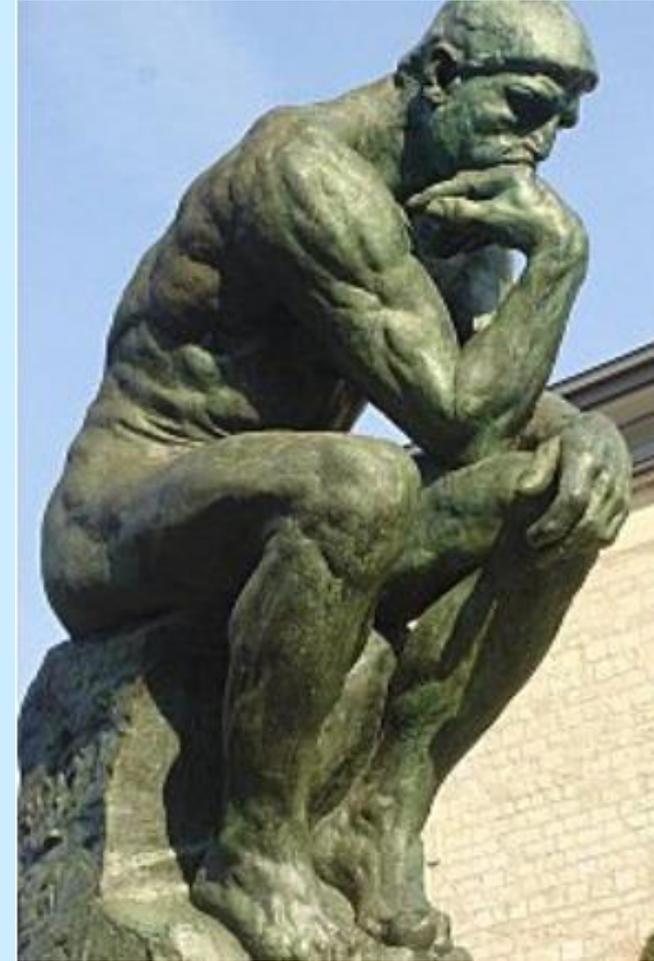


UNIVERSITÉ POPULAIRE DE MONTÉLIMAR

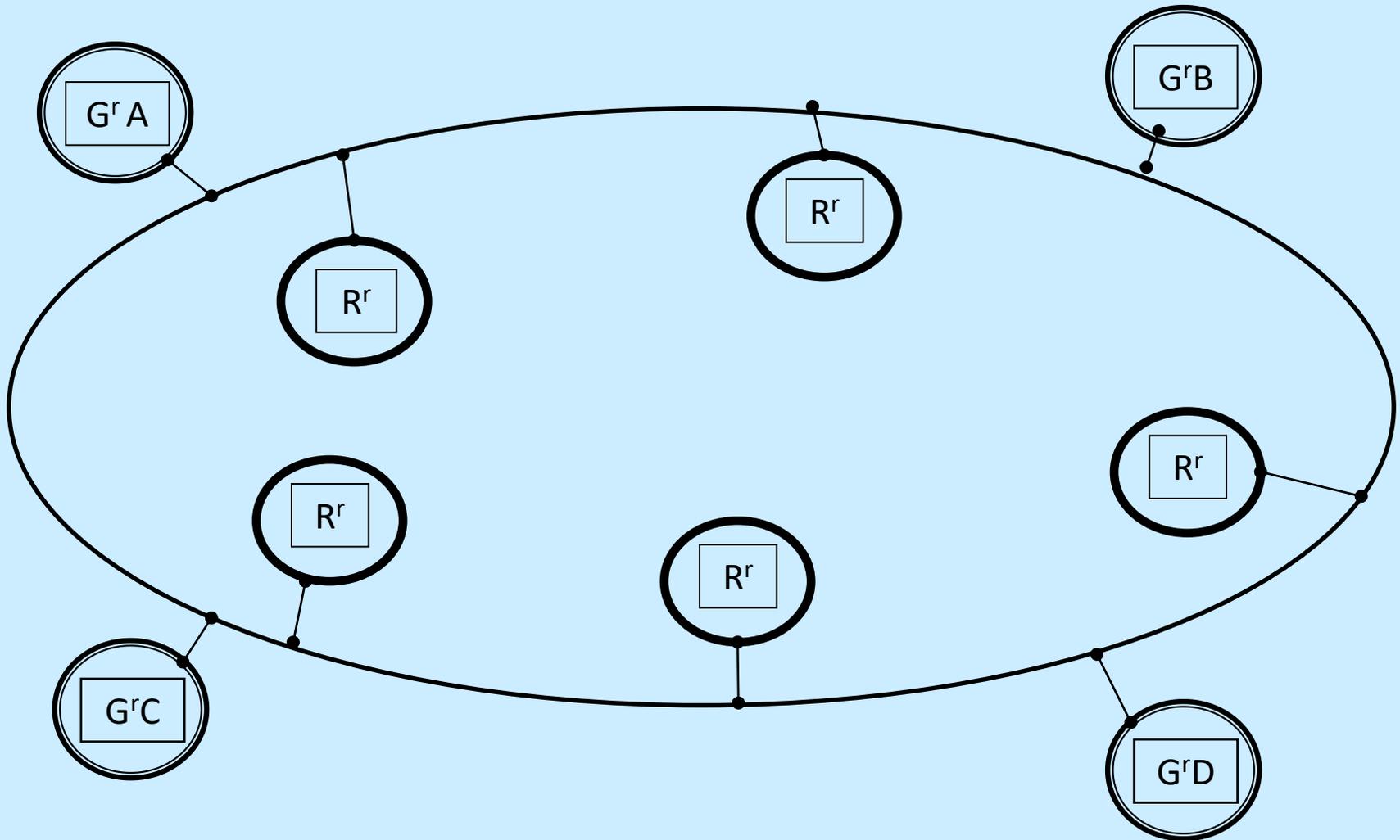
LE 25 MARS-2019

**1-LE SYSTÈME ELECTRIQUE ET SON
FONCTIONNEMENT.**

**2- LIMITE D'INSERTION DES
ENRi.**



Réseau avec générateurs et récepteurs



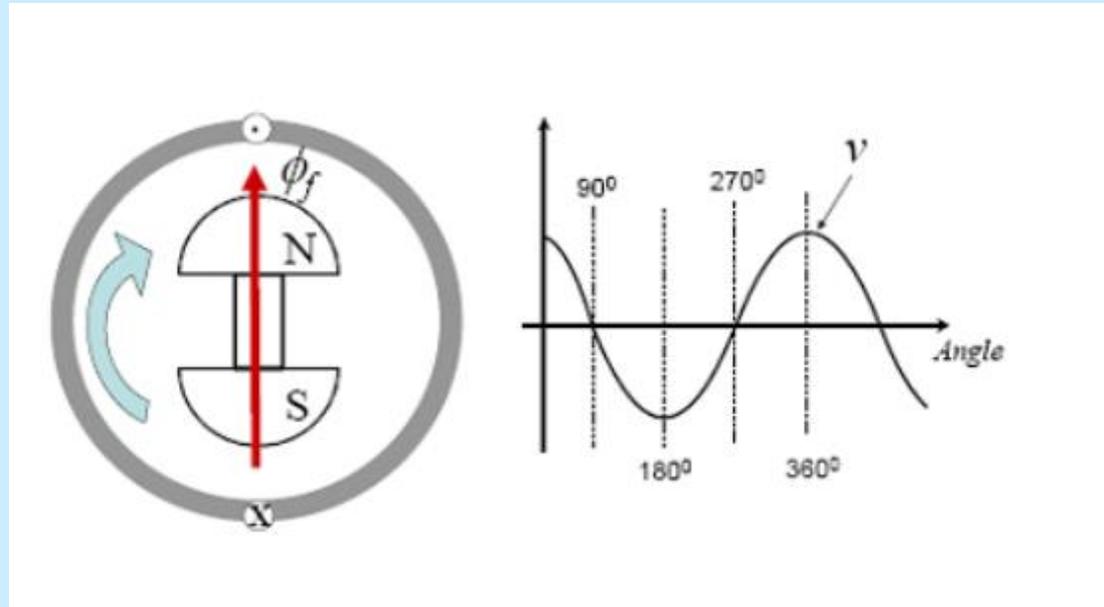
VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

A CHAQUE INSTANT IL DOIT Y AVOIR EQUILIBRE ENTRE LA
CONSOMMATION ET LA PRODUCTION



COMMENT FABRIQUE-T-ON DE L'ÉLECTRICITÉ ?

- Il suffit de faire tourner les aimants ou les électro-aimants de l'inducteur devant des bobines via un circuit magnétique en fer qui canalise le flux électro-magnétique pour voir apparaître une tension aux bornes de la bobine de l'induit.
- Il faut donc une machine mécanique délivrant un couple moteur pour entraîner la rotation des électro-aimants de l'inducteur.
- Inducteur 50 t/ sec = 50 Hertz



COURANT CONTINU OU ALTERNATIF ?

EDISON OU TESLA?

- **Le transport doit se réaliser en très haute tension pour limiter l'intensité et les pertes.**
Cependant 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 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 magnétique 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 Hertz (cycles par seconde) et 400 000 Volts ou 400 kVolts**

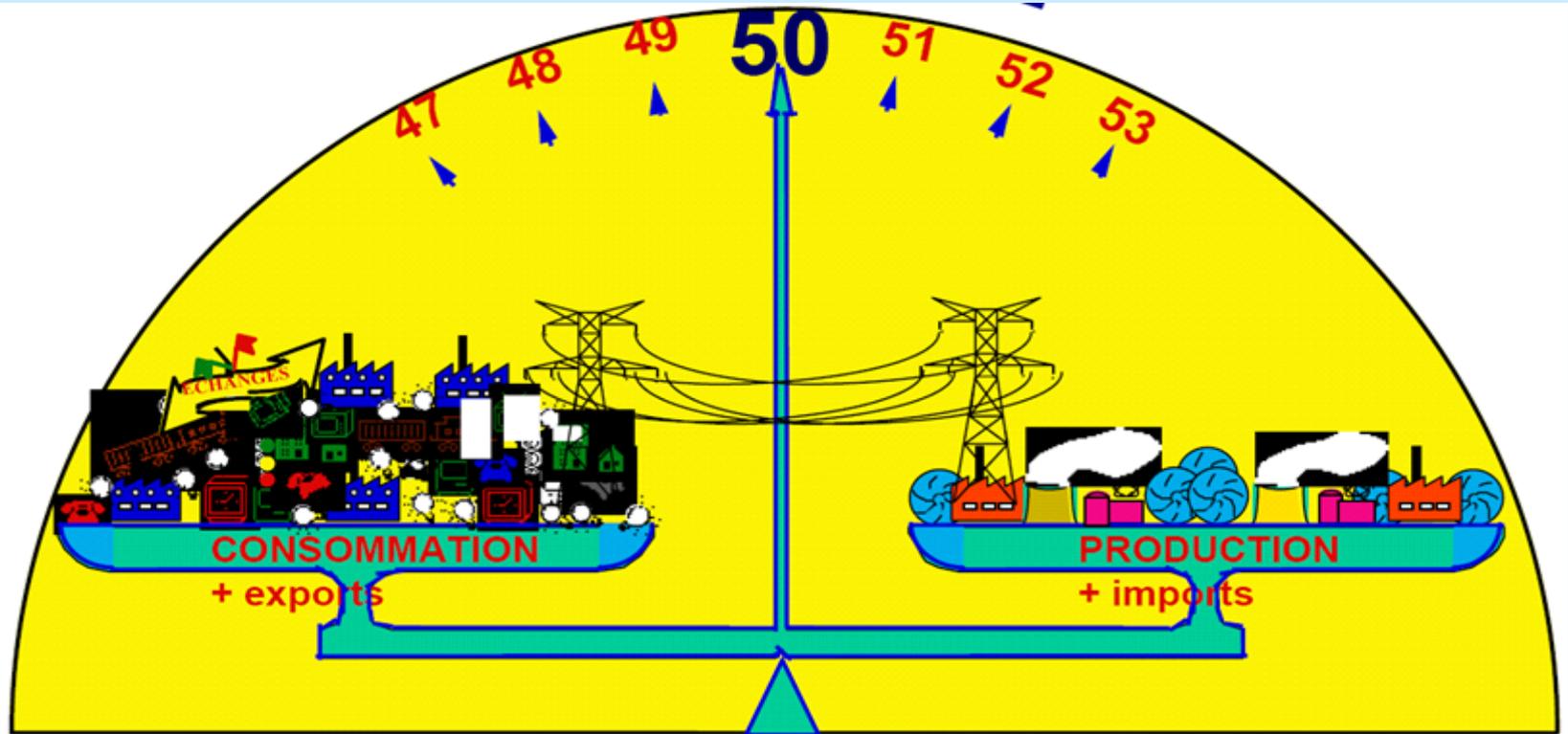
- Le couple moteur est issu de la transformation d'une énergie potentielle (vapeur, chute d'eau, turbine à gaz, etc.) en énergie mécanique pour entraîner la rotation des électro-aimants du rotor de l'alternateur devant les bobines du stator.
- **Le stator** comporte les bobines de l'induit.
- **Le rotor 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 (n, phase), 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.**

Equilibre production / consommation

FREQUENCE (en Hz ou cycles par seconde)



Source RTE

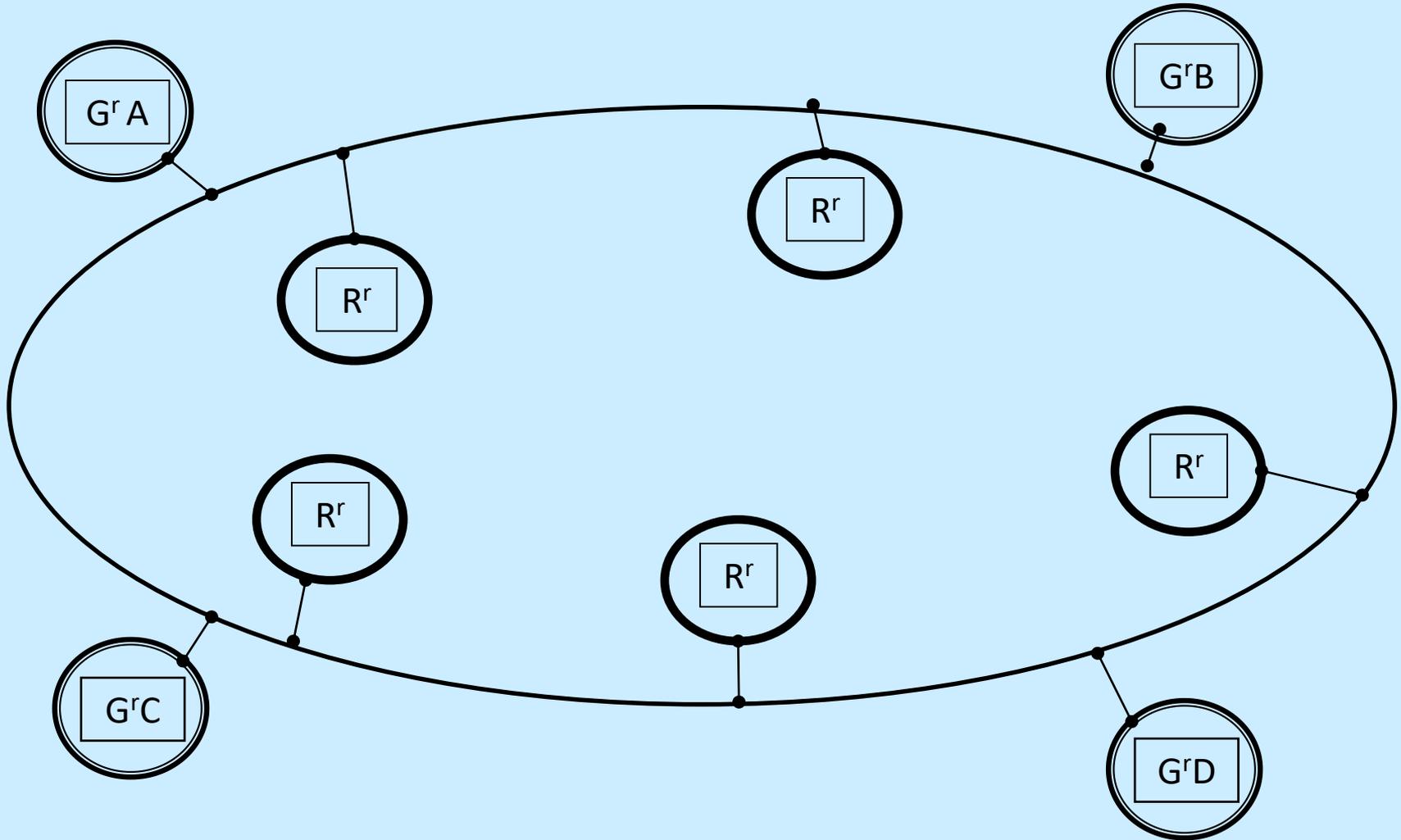
Production = Consommation

La fréquence est la vitesse du courant électrique dans le réseau

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).
- 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.

Réseau simple ou réseau bouclé, avec générateurs et récepteurs



- **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 généralisé en Europe.**
 - 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 rendent le système plus robuste.**

Réseau THT 400 KV de RTE



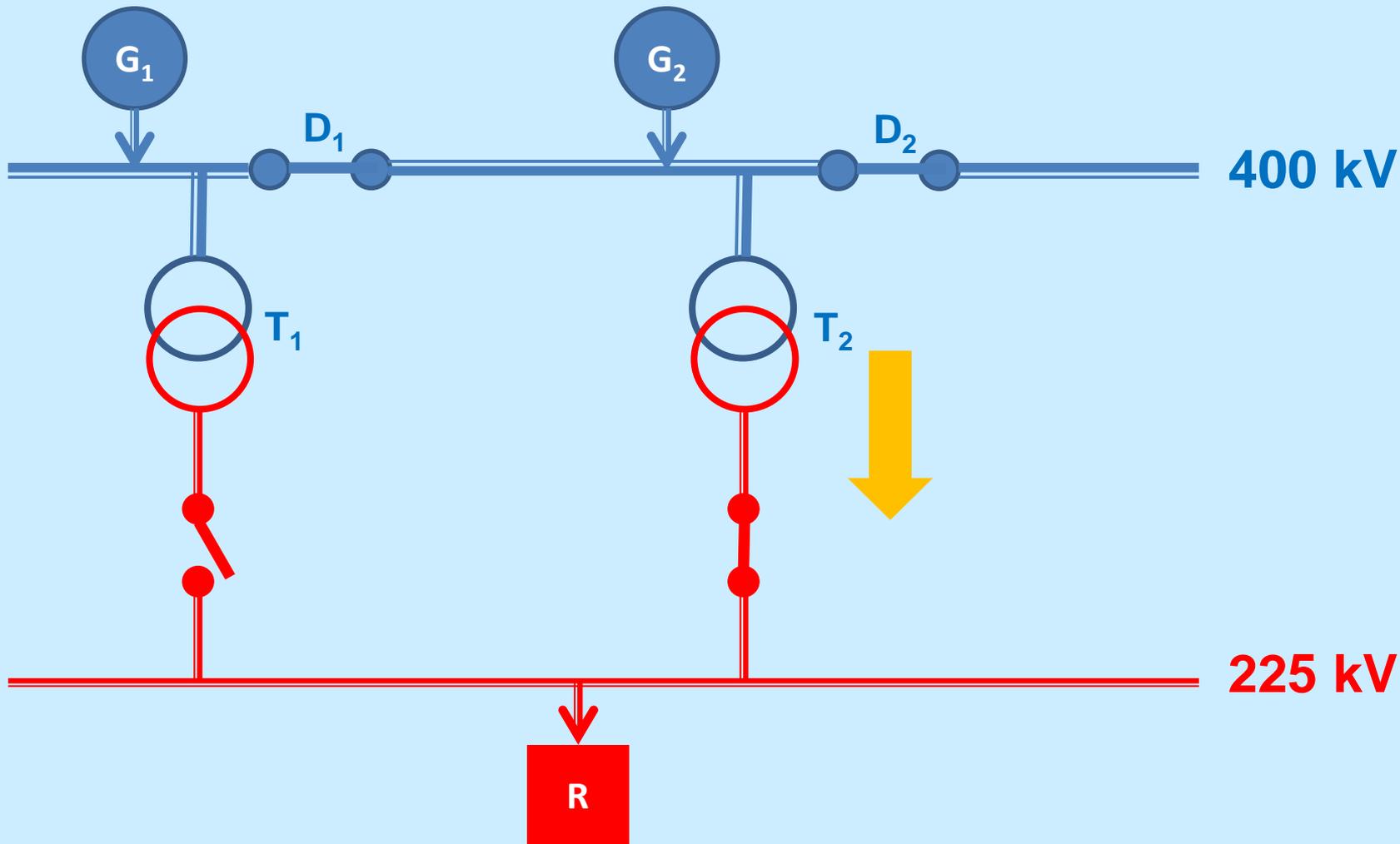
Réseau très haute tension (THT) à 400 kV

- « *Moins il transporte, mieux on se porte* » était le slogan d'une certaine époque révolue.
- Disposer d'un réseau bouclé et maillé pour répartir les points d'injection de manière optimale par rapport au point de soutirage.

Réseau de répartition

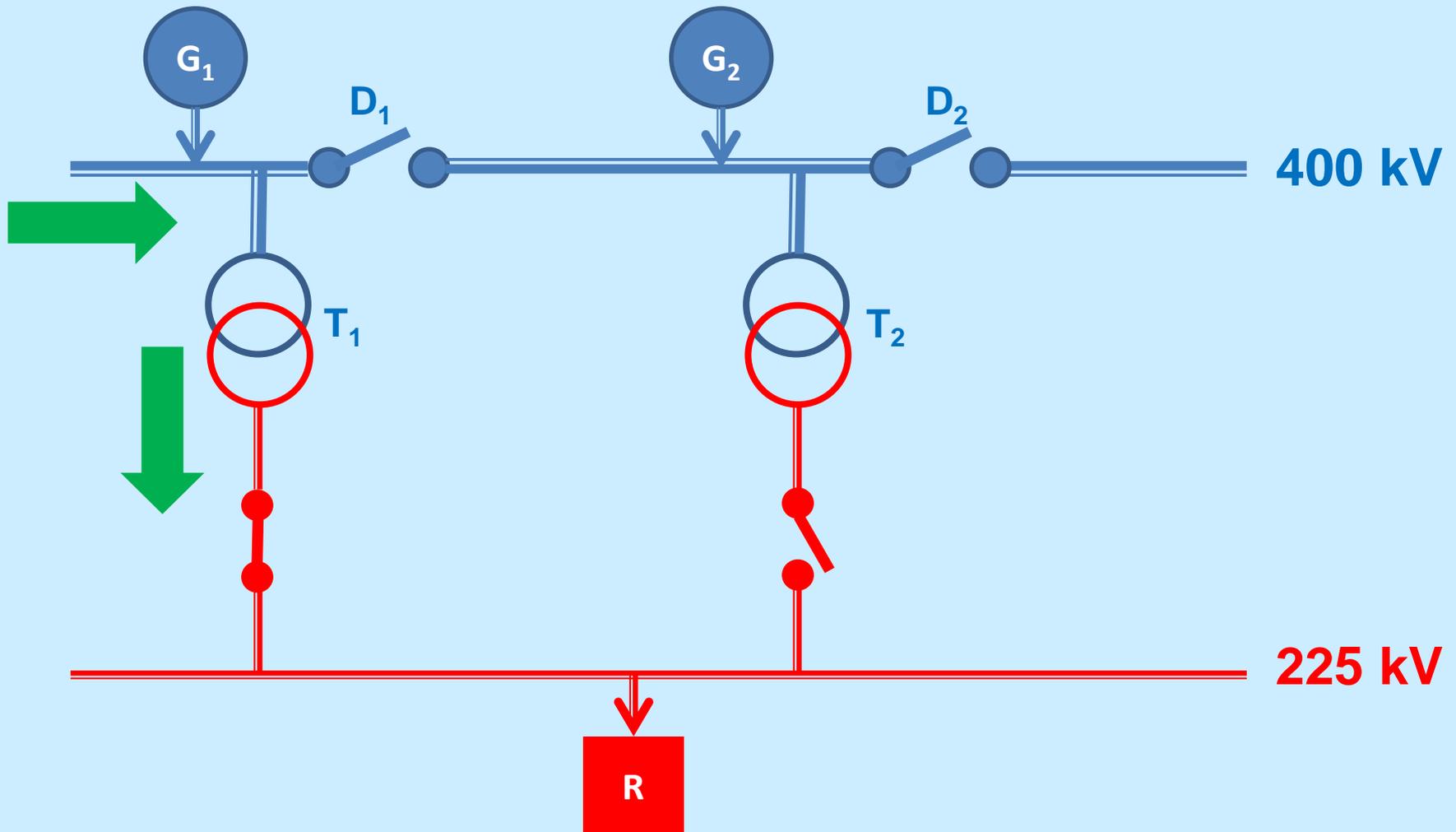
- Fonctionnement proche de la **théorie des réseaux infinis**, réglage de fréquence facilité.
- **limitation des pertes par « effet Joule » ...**
- Choix d'un niveau de tension élevée pour réduire les intensités à puissance donnée (**$P = U \times I$**).
- pertes réseau RTE = 3 % consommation nationale. Fonction de I^2
- **Intérêt d'un sous-réseau à 225 000 volts.**

Bouclages 400 et 225 kV : situation A (normale)

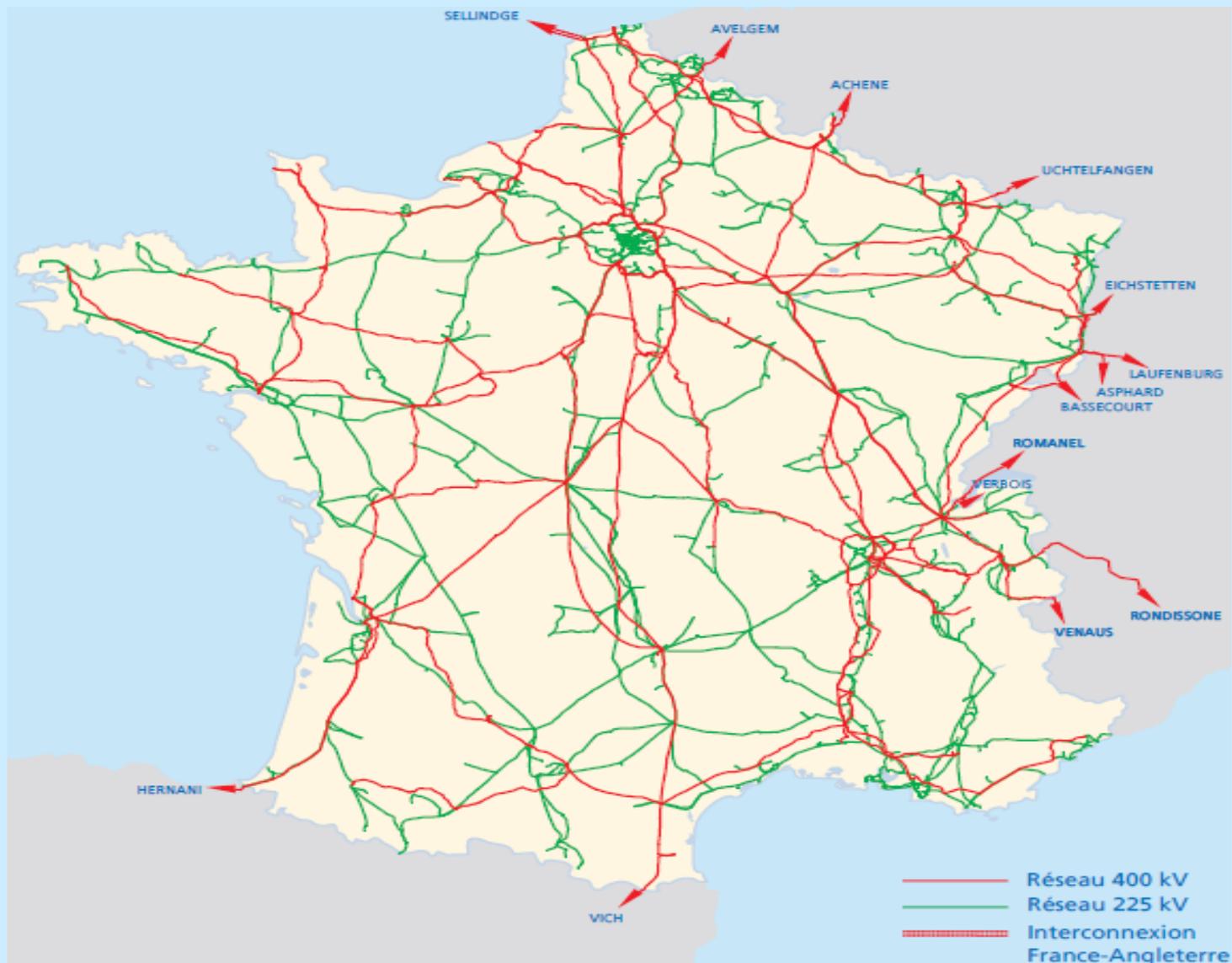


Bouclages 400 et 225 kV

Pour maintenance ou sur incident



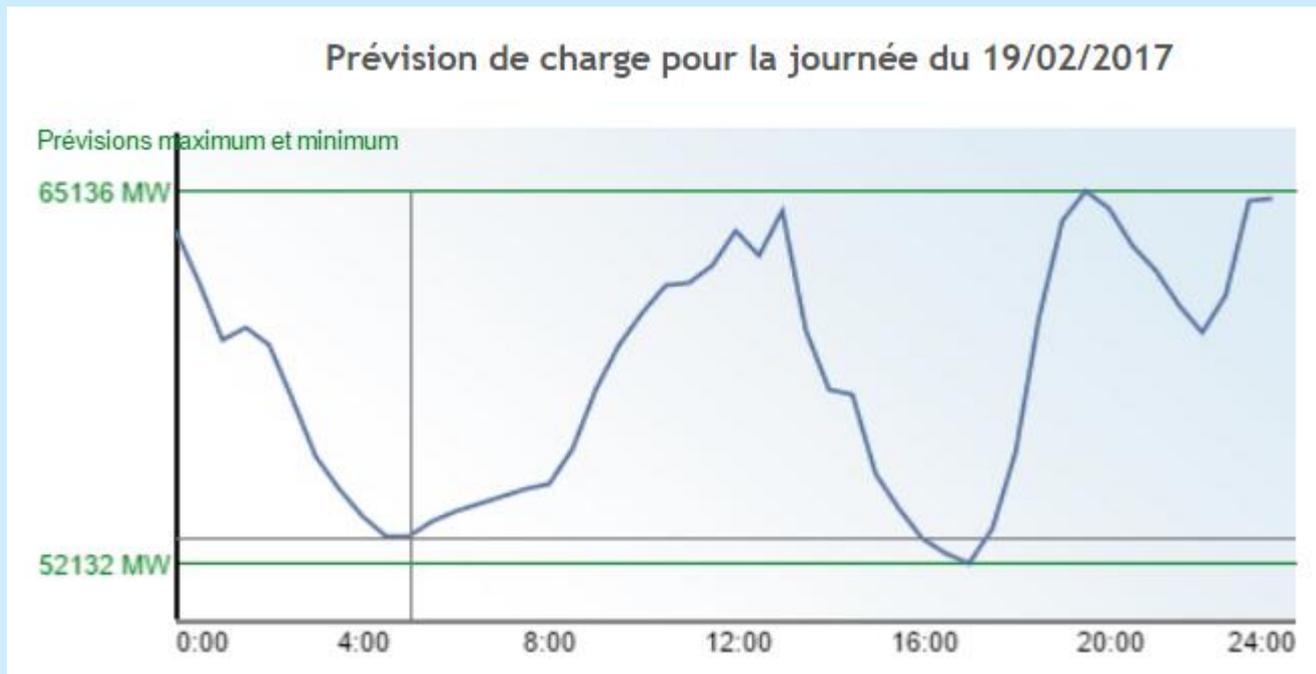
Réseaux 225 kV et 400 kV



- **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 ou à gaz qui fournissent de l'électricité à 50 cycles par seconde,**
 - **Des interfaces statiques (onduleurs) alimentées par des éoliennes et des panneaux photovoltaïques.**

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 disponibles 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



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

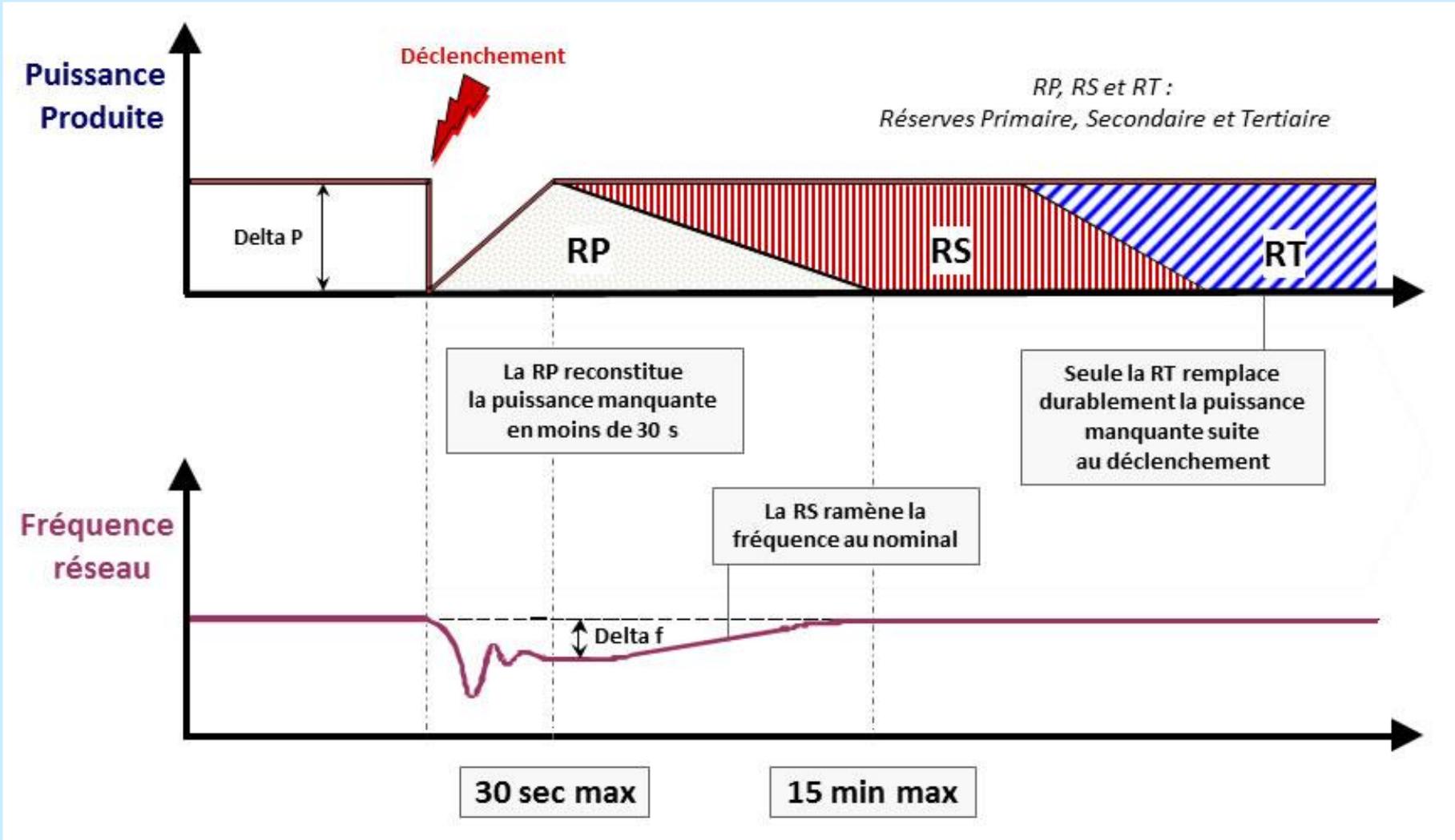


Perte de 120 mHz instantanément

Stabilisation de la fréquence grâce à l'inertie des machines tournantes

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 par l'inertie.
- **Réglage primaire:** automatismes des machines synchrones tournantes autour de 50 Hz. Cet automatisme ouvre les robinets d'admission de vapeur, d'eau, ou de gaz pour accroître le couple moteur ou les referme pour le baisser.
- **Réglage secondaire manuel:** 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



➤ **La réserve primaire- Grid code**

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

La constitution de la réserve primaire est assurée par l'ensemble des producteurs européens interconnectés par les 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.

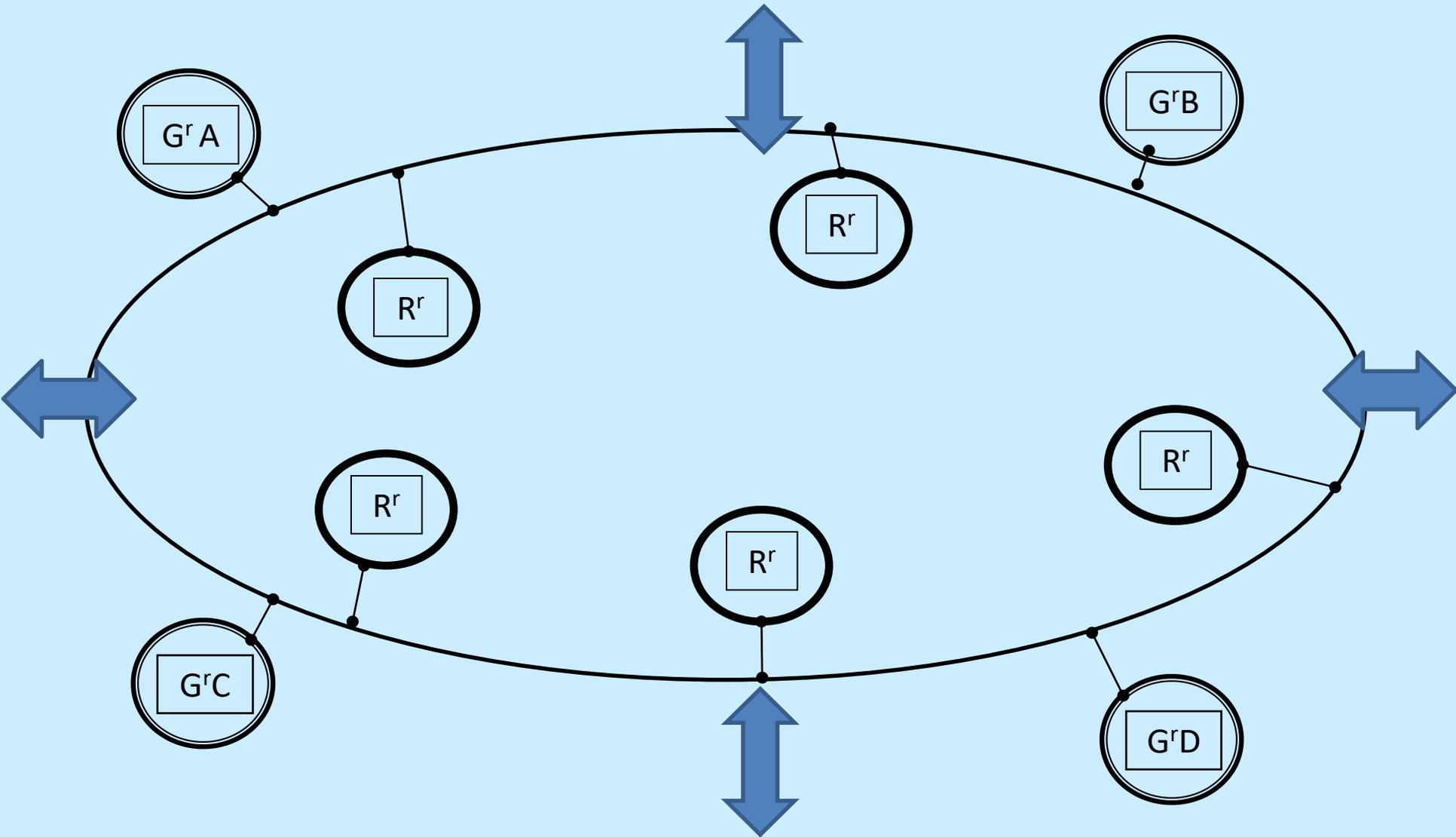
Le système français contribue à hauteur d'environ 600 MW : tous les nouveaux groupes de production de plus de 40 MW et tous les anciens groupes de production de plus de 120 MW connectés au réseau de transport français ont l'obligation de réserver une partie de leur puissance pour la réserve primaire.

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.

Grande-Bretagne
Export : 14,7 TWh
Import : 1,8 TWh

CWE
Export : 18,5 TWh
Import : 12,4 TWh

France
Export : 86,3 TWh
Import : 26,1 TWh

Solde : 60,2 TWh

Suisse
Export : 17,6 TWh
Import : 7,0 TWh

Italie
Export : 19,1 TWh
Import : 0,5 TWh

SOLDE DES ECHANGES EN 2018

RÉGLAGE DE LA TENSION.

- Déphasage U et I- Inconvénient de l'alternatif!
- Inductance-Capacité
- $\cos \phi$
- Puissance active-réactive et apparente.
- Rôle du courant inducteur.
 - Lorsque la tension baisse, le réseau a besoin de réactif.
L'accroissement du courant dans l'inducteur fait monter la tension réseau et donc quand la machine est couplée fournit du réactif (ΣI dans l'induit à surveiller),
 - Une augmentation de la tension réseau est signe d'un excès de réactif d'où baisse du courant inducteur pour absorber ce réactif.

2018

Production totale d'électricité

549 TWh

+ 3,7 %



Nucléaire
393 TWh
+3,7 %



Hydraulique
68 TWh
+ 27,5 %



Éolienne
28 TWh
+ 15,3 %



Solaire
10 TWh
+ 11,3 %



Bioénergies
10 TWh
+ 2,3 %

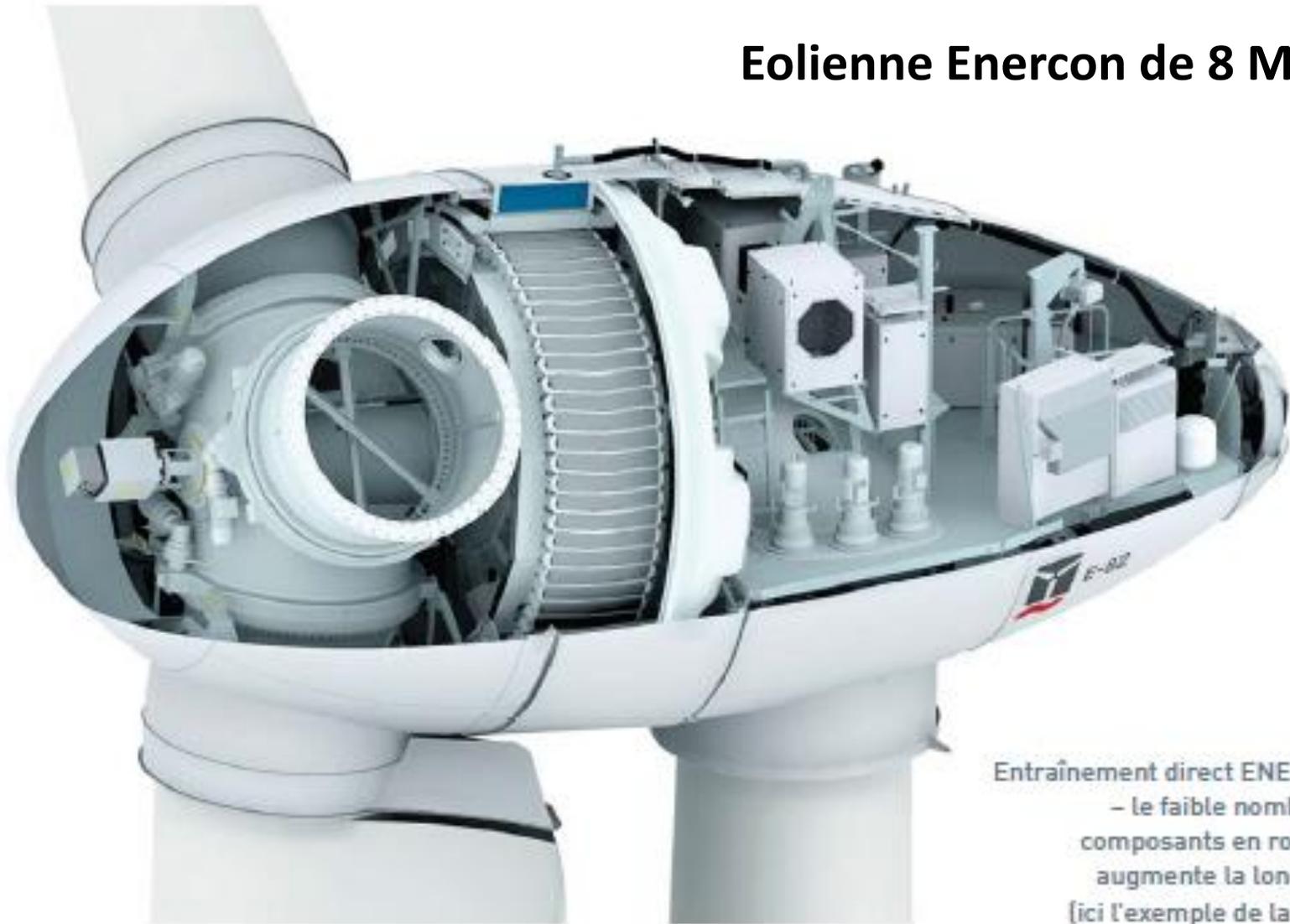


Thermique fossile
39 TWh
- 26,8 %

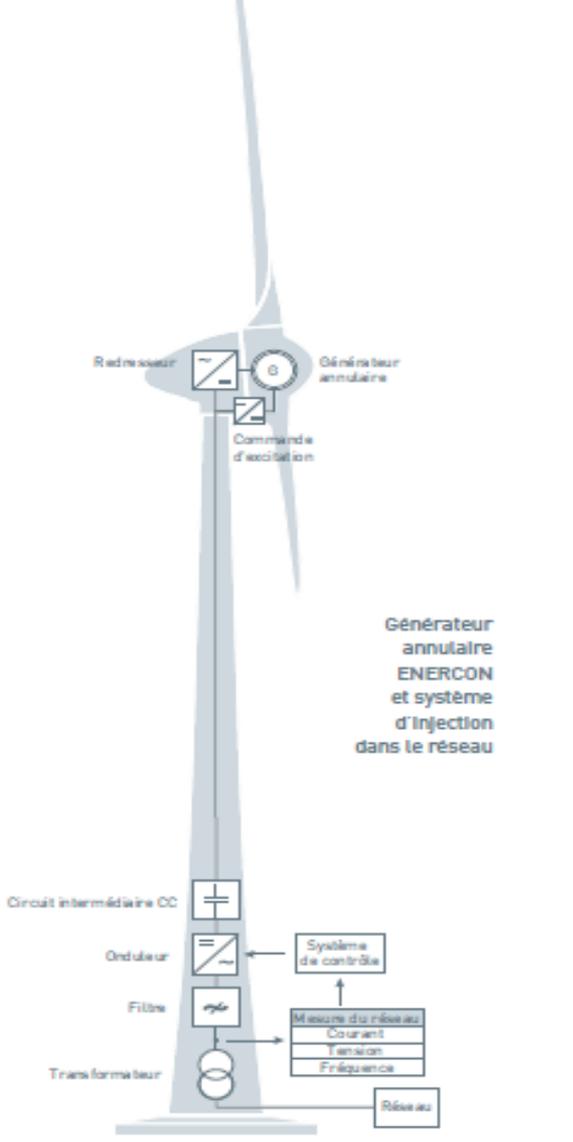
2^{ème} PARTIE

LIMITE D'INSERTION DES ENR INTERMITTENTES DANS LE RÉSEAU

Eolienne Enercon de 8 MW



Entraînement direct ENERCON
– le faible nombre de
composants en rotation
augmente la longévité
[ici l'exemple de la E-82]



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

Elles sont équipées de pales à pas variable et leur vitesse dépasse rarement les 20 tours par minute.

Leur rotor inducteur est équipé d'aimants permanents, dopés aux terres rares, pour fournir un flux inducteur très puissant afin de contrer les flux de contre-réaction des courants induits.

Leur circuit magnétique est réalisée avec des aciers spéciaux à grande perméabilité magnétique.

Compte tenu de leur vitesse et de leur facteur de charge, elles immobilisent entre 5 et 8 fois plus de cuivre qu'un alternateur hydraulique au fil de l'eau. Il s'agit donc de développement durable « non soutenable »!

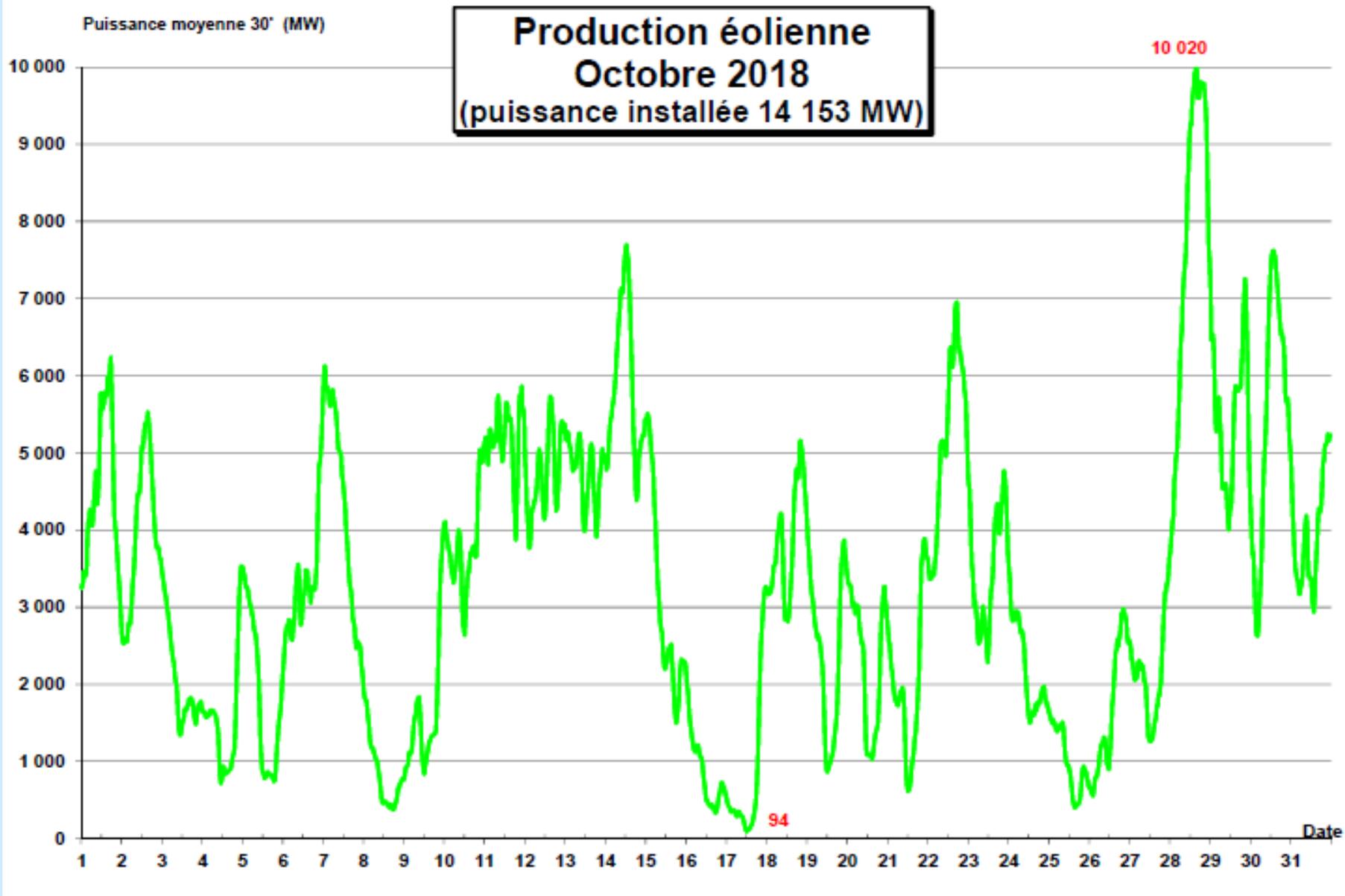
La puissance délivrée est fonction du cube de la vitesse du vent. Or les prévisions de vitesse du vent du jour pour le lendemain sont encore très imprécises.

On assiste à des variations de puissance considérables au cours d'une même journée.

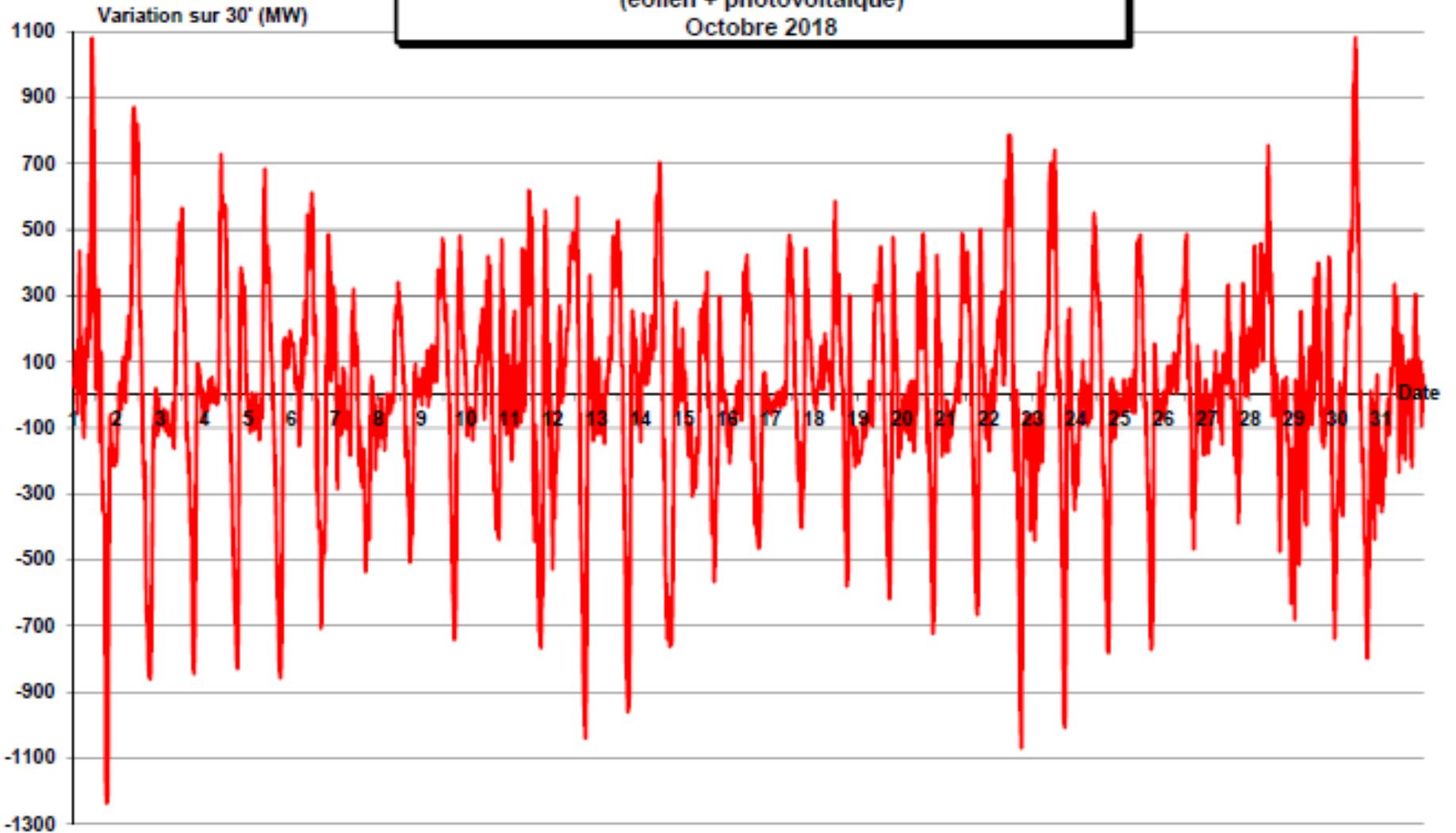
Et la production suit le même rythme dans toute l'Europe où les vents dominants sont des vents d'Ouest.

La situation la plus grave est celle de vents forts qui donnent la puissance maxi mais lorsqu'ils forcissent, les éoliennes se mettent en position de sécurité pour éviter d'être détruites.

La puissance délivrée passe ainsi du maximum à zéro et ceci pratiquement dans toute l'Europe de l'ouest en même temps.



Variation de la production cumulée des énergies intermittentes
(éolien + photovoltaïque)
Octobre 2018



- **Ce sont ces gradients de puissance qui sont très délicats à gérer par les machines qui assurent leur soutien. Car 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* ».

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) et 7 G€ en souterrain

- **Elles nécessitent une interface statique de redressement et d'ondulation à 50 Hz.**

Conséquences: Elles n'assurent pas le service fréquence et n'ont pratiquement pas de puissance de court circuit indispensable pour assurer le fonctionnement des machines tournantes.

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 que ces réseaux sont sous-utilisés.
- Les gradients de puissance arrivent à des valeurs de 30 GWe par heure en Allemagne et polluent tous les réseaux adjacents.

Eoliennes anciennes à partir de génératrices asynchrones.

Elles ne produisent de la puissance que lorsque leur vitesse devient hyper-synchrone (dépasse le 50 Hz).

Elles ne participent pas au réglage de fréquence, de tension et n'ont pas de puissance de court-circuit.

Photovoltaïque.

La production de puissance est un peu plus prévisible. Elle est 4 fois supérieure en été qu'en hiver. Ce qui n'est pas un avantage.

Il est raccordé au réseau par un onduleur c'est-à-dire une interface statique. Il ne participe pas au réglage de fréquence et n'a pas de puissance de court-circuit.

La production d'harmoniques par les onduleurs commencent à être gênantes et il va falloir installer des filtres sur les nouvelles installations.

ENR ALÉATOIRES RÉPARTIES DANS LE RÉSEAU DE DISTRIBUTION

- **Petit éolien et photovoltaïque.**
 - **Presque pas de gestion du système électrique de distribution similaire à celle du réseau THT.**
 - **Prévisibilité des apports électriques :**
 - **Anémométrie ?**
 - **Ensoleillement ?**
 - **Consommation locale ?**
 - **Smart grid très coûteux et vulnérable (cybercriminalité).**
 - **Retour de puissance sur le réseau RTE ou refoulement.**
- 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 sociétale des nouveaux réseaux ?**
- **Recours systématique aux liaisons enfouies en courant continu ou alternatif ? Renchérissement (facteur 7 au moins) ...**
- **Quid du transit inverse de puissance réactive par rapport à la puissance active pour les génératrices asynchrones ?**
- **LA LIMITE D'INSERTION des EnRi, POUR CONSERVER LA STABILITÉ DU RÉSEAU, EST DE 30 % EN VALEUR INSTANTANÉE DE LA PUISSANCE APPELÉE-ÉTUDE R&D EDF.**

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.**
- **Les prix élevés garantis ainsi que la priorité donnée à l'évacuation de cette énergie déséquilibrent complètement le marché et ruinent les opérateurs qui se trouvent face à des signaux prix ne leur permettant plus d'investir.**
- **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 nouveaux moyens pilotables.**

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

39

BLACK-OUT ITALIEN NUIT BLANCHE 28-09-2003

