

Science en Fête 2022 - DIJON, 13 octobre 2022

# Les réseaux d'électricité outils essentiels de la future neutralité carbone

Par Georges Sapy (\*)

(\*) Membre de la SFEN, de Sauvons Le Climat et de PNC-France

# Plan de la présentation

- 1 - Quelles énergies pour 2050 ?
- 2 - Pourquoi les réseaux publics d'électricité sont indispensables
- 3 - L'organisation du système électrique européen
- 4 - Les bases fonctionnelles des réseaux électriques actuels
- 5 - Les conséquences de l'introduction d'électricité éolienne ou photovoltaïque dans les réseaux
- 6 - Les limites de cette introduction
- 7 - Perspectives 2050 selon les connaissances actuelles

# 1 - L'électricité, énergie ultra-dominante de la future « neutralité carbone » visée en 2050 - La biomasse, seule énergie de complément

1 - L'électricité peut être produite à partir d'un grand nombre de sources d'énergies « primaires » (sources existant dans la nature) en excluant les énergies fossiles carbonées, émettrices de CO<sub>2</sub> :

→ L'énergie nucléaire (la moins carbonée de toutes les énergies avec l'hydraulique)

→ Les énergies renouvelables :

- Utilisables à grande échelle : énergie hydraulique (fleuves et lacs d'altitude) ; énergie du vent (captée avec des éoliennes) ; énergie solaire (essentiellement captée sous forme photovoltaïque)

- Utilisables à petite échelle : micro-hydraulique, énergies des mers (marémotrice, courants sous-marins, énergie des vagues) ; géothermie haute température ; biomasse ; etc.

→ **L'électricité est un vecteur d'énergie « finale »** (énergie qui est directement utilisable par les consommateurs) dont les **émissions de CO<sub>2</sub> peuvent être réduites** à celles de la construction et de l'entretien des machines de production, **sans émettre de CO<sub>2</sub> lors de la production elle-même**

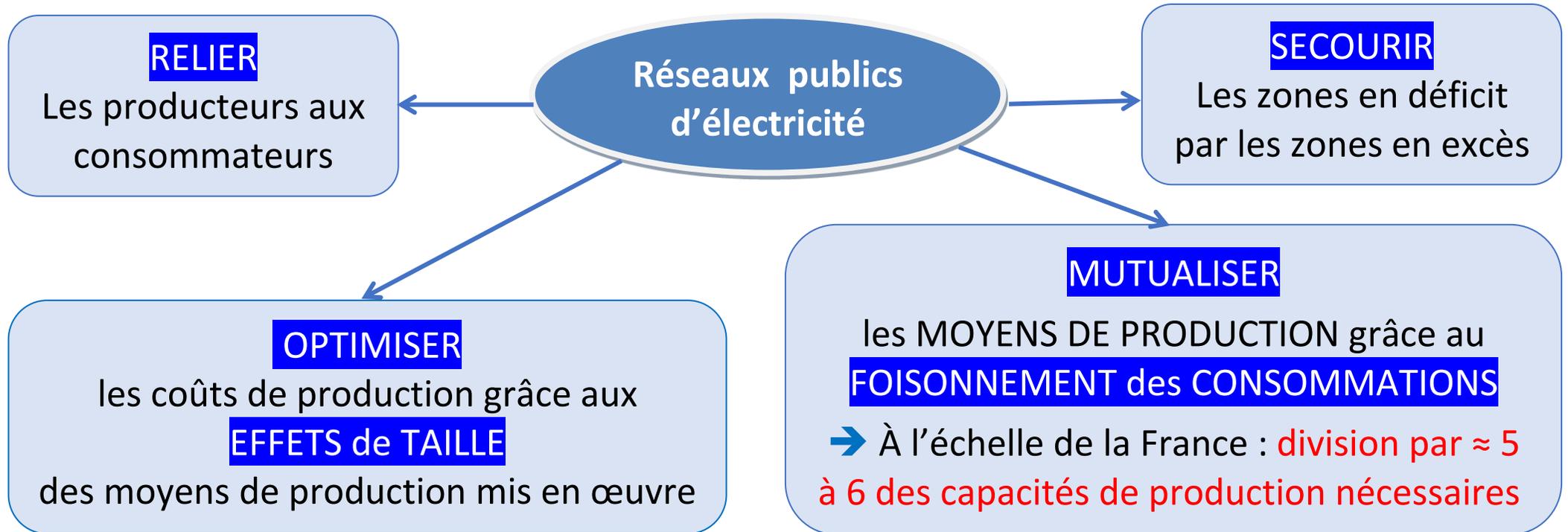
→ **L'électricité peut être retransformée en pratiquement toutes les autres formes d'énergie** : mécanique ; hydraulique ; thermique ; électromagnétique ; chimique dont **hydrogène** ; etc.

→ **MAIS pour être utilisée, l'électricité requiert des réseaux de transport et de distribution**

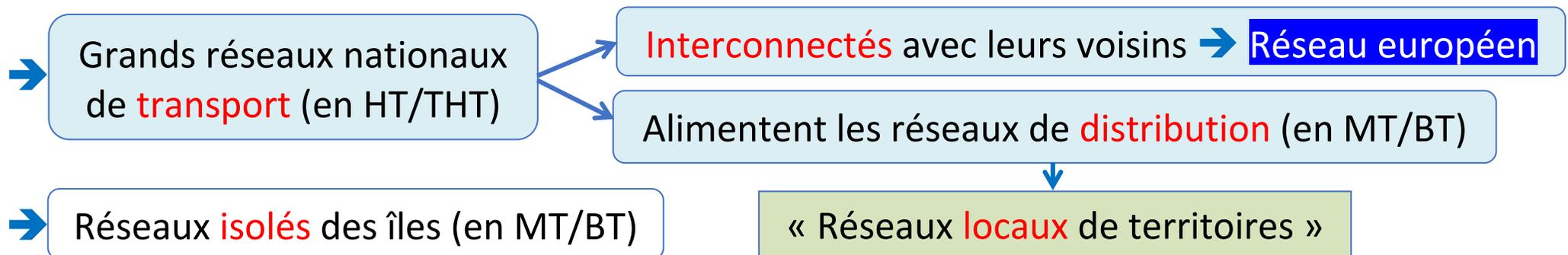
2 - La biomasse (= énergie solaire transformée) : 2<sup>ème</sup> source d'énergie « non carbonée ». Mais est limitée par sa croissance annuelle. Utilisable sous forme de bois énergie, déchets végétaux ou biogaz + **Applications limitées** : production de **chaleur**, de **biocarburants** ou... **d'électricité** (avec le biogaz)

## 2 - Les réseaux publics d'électricité, outils de : Mise en relation - Solidarité - Mutualisation - Optimisation

\* Les quatre apports majeurs des réseaux publics d'électricité :



\* Des réseaux publics d'électricité de tailles et puissances très différentes...



### 3 - L'organisation du système électrique européen :

**L'ENTSO-E : European Network of Transmission System Operators for Electricity**

Regroupe depuis 2009 les gestionnaires des réseaux de transport d'électricité (« GRT » dont RTE en France) pour 39 pays du continent européen avec deux objectifs :

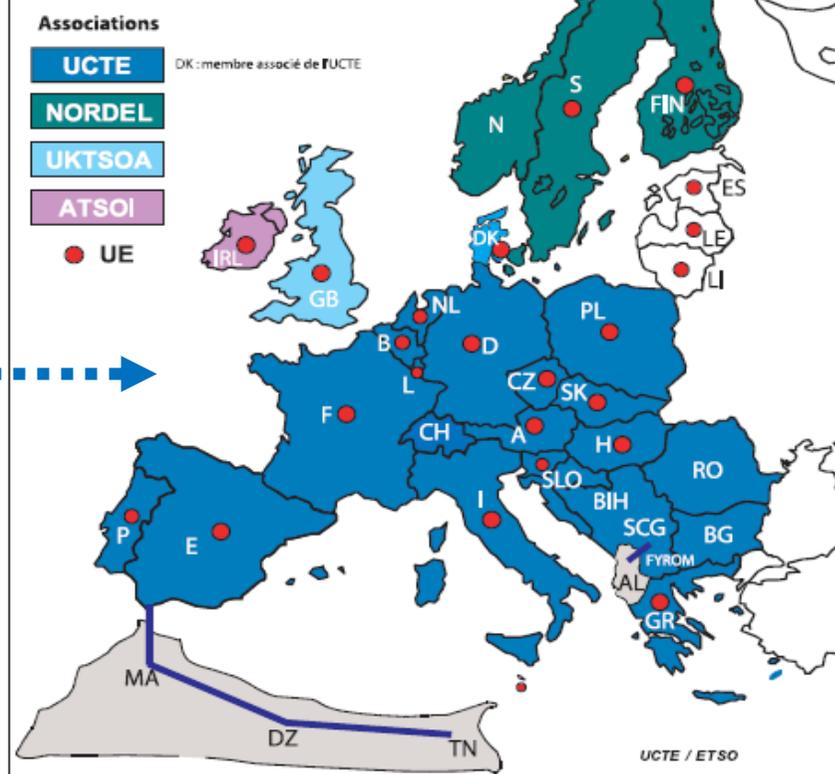
- ➔ **TECHNIQUE** : coordonner, optimiser et sécuriser le fonctionnement des réseaux nationaux
- ➔ **COMMERCIAL** : faciliter les échanges via les marchés de l'électricité



➔ Réseau français : très fortement interconnecté au réseau européen

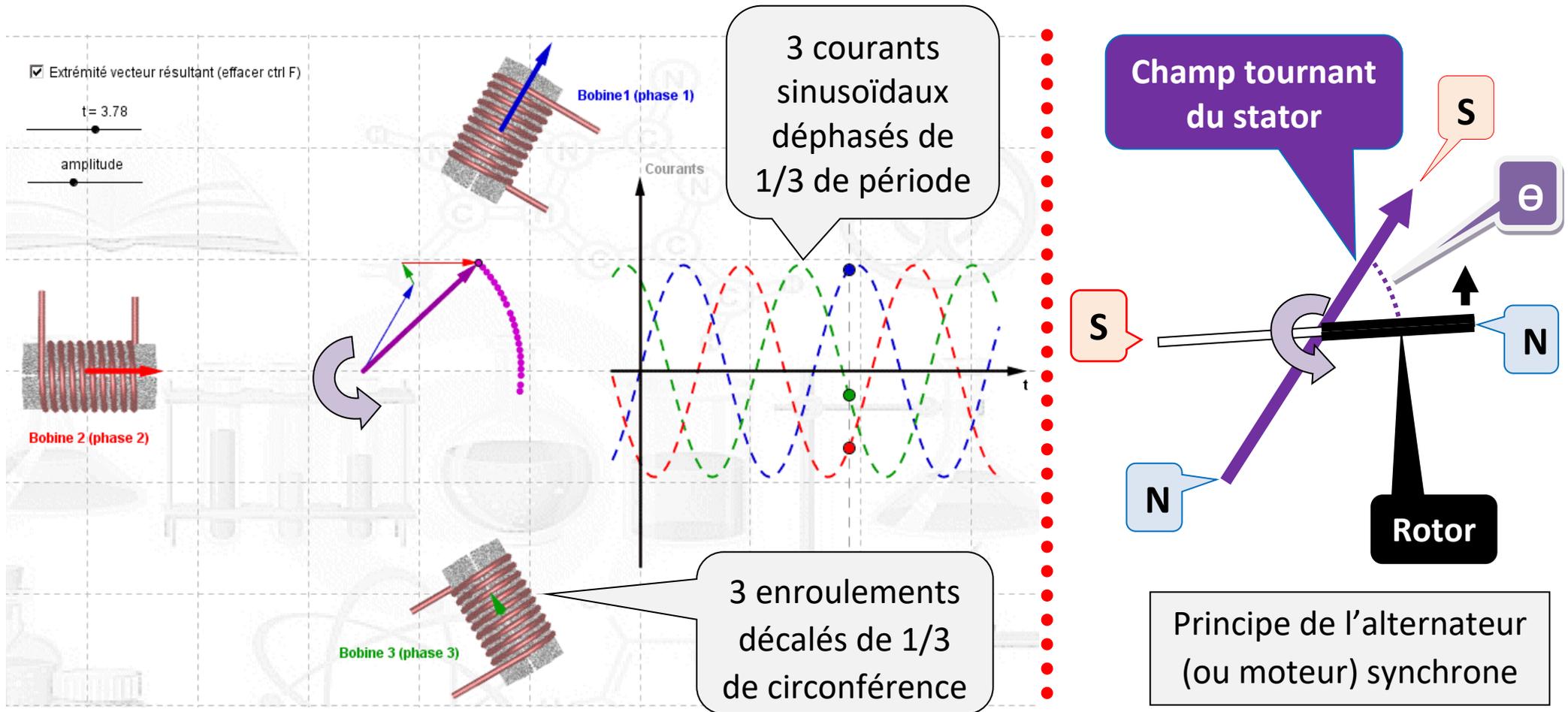
**L'interconnexion du système électrique français avec les pays d'Europe de l'Ouest**

**ENTSO-E a regroupé :**



# 4 - Bases fonctionnelles des réseaux en courant alternatif triphasé (1/3)

La géniale invention du champ magnétique **TOURNANT CONSTANT** par Nikola TESLA en 1891



- ° Le **champ tournant** du **stator** et le **rotor** d'un **alternateur** tournent exactement à la **même vitesse**  
➔ Liés par **couplage électromagnétique synchrone** via l'**angle interne  $\theta$**  (image de la Puissance)
- ° « **N** » **alternateurs** raccordés **en réseau** tournent exactement à la **même vitesse** (par couplage synchrone) et **communiquent instantanément** (fraction vitesse de la lumière) via la **fréquence COMMUNE** du réseau = Indicateur global d'un déséquilibre [Production = Consommation]

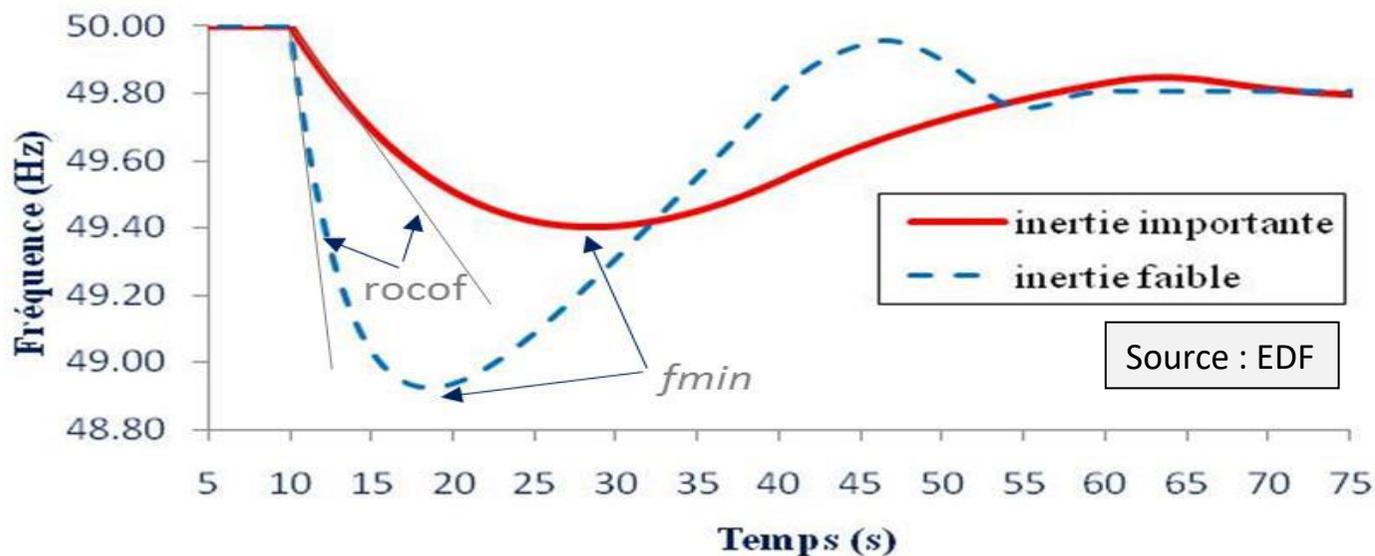
## 4 - Bases fonctionnelles des réseaux en courant alternatif triphasé (2/3)

### Les deux atouts des systèmes triphasés actuels pour la stabilité INSTANTANÉE des réseaux

➔ Ils possèdent une inertie naturelle importante : celle des masses tournantes des rotors des machines synchrones = **volants d'inertie** ayant deux **actions stabilisatrices** complémentaires :

° Mécanique : **ralentit** les **variations brutales** de **vitesse = fréquence**

° Énergétique : par **stockage/déstockage d'énergie cinétique AUTORÉGULANTE**



Constantes de temps ➔  
 $f_{min}$  atteinte en :

\* **≈ 10 à 11 secondes** sur  
réseau européen (Perte  
de référence de **3 GW**)

\* **< 5 secondes** sur  
réseaux isolés des îles

**Inertie** : laisse aux régulateurs de puissance P des turbines entraînant les alternateurs  
le **temps d'agir** (selon une loi de régulation proportionnelle) :  $\Delta P = -k \times \Delta f$

➔ Signal fréquence commune ➔ **DÉCLENCHE** instantanément les régulations de **TOUS les alternateurs participants, au PRORATA de leur puissance** ➔ Participation **UNITAIRE** de chaque alternateur au rééquilibrage en puissance **limitée à  $\approx \pm 2\% P_n$**  ➔ **⚡ les temps de réponse**

## 4 - Bases fonctionnelles des réseaux en courant alternatif triphasé (3/3)

Des paramètres à maintenir en permanence dans d'étroites limites

### 1 - La fréquence : **f**

➔ Paramètre global, image de l'indispensable équilibre [Production = consommation]

➔ Fluctue en permanence autour de sa valeur nominale de 50 Hz en fonction des variations de la consommation. Depuis l'injection dans les réseaux de productions variables et intermittentes éoliennes et photovoltaïques, les variations de ces dernières s'ajoutent algébriquement à celles de la consommation pour des variations combinées >> à celles de la seule consommation

➔ Mais **f** doit toujours rester dans des limites strictes inchangées pour la sécurité des réseaux et le bon fonctionnement des machines de production et des récepteurs des consommateurs :

- Plage normale de fonctionnement : 50 Hz  $\pm$  1 % soit 50  $\pm$  0,5 Hz

- Alerte fréquence basse critique : 49,7 Hz (- 0,3 Hz)

- Limite basse de sécurité ENTSO-E : 49,2 Hz (- 0,8 Hz)

- Risques très élevés de délestages incontrôlés :  $\leq$  49 Hz (- 1 Hz) ➔ Risques de « Black-out »...

### 2 - La tension : **U**

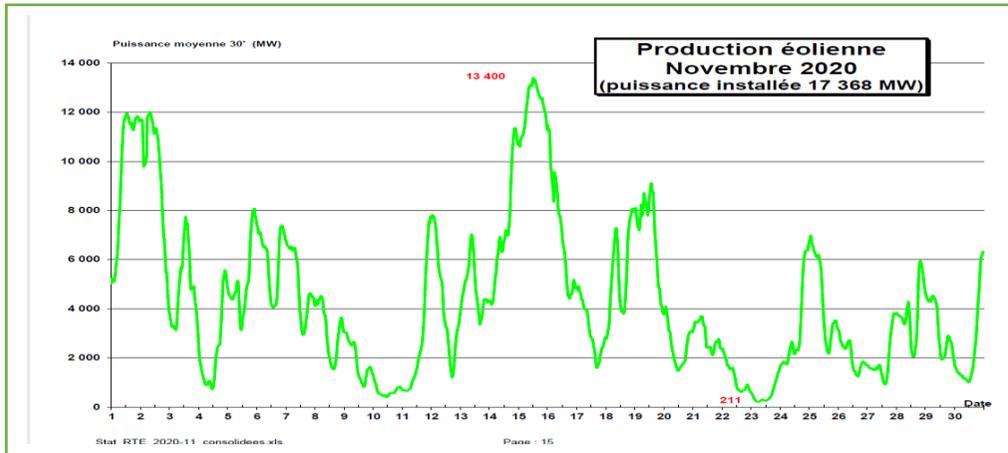
➔ C'est l'autre paramètre de base caractérisant le réseau. Il est géographique (local ou régional)

➔ Sa plage admissible de fonctionnement est plus large :  $\pm$  5 % pouvant être exceptionnellement portée à  $\pm$  10 % pendant quelques minutes

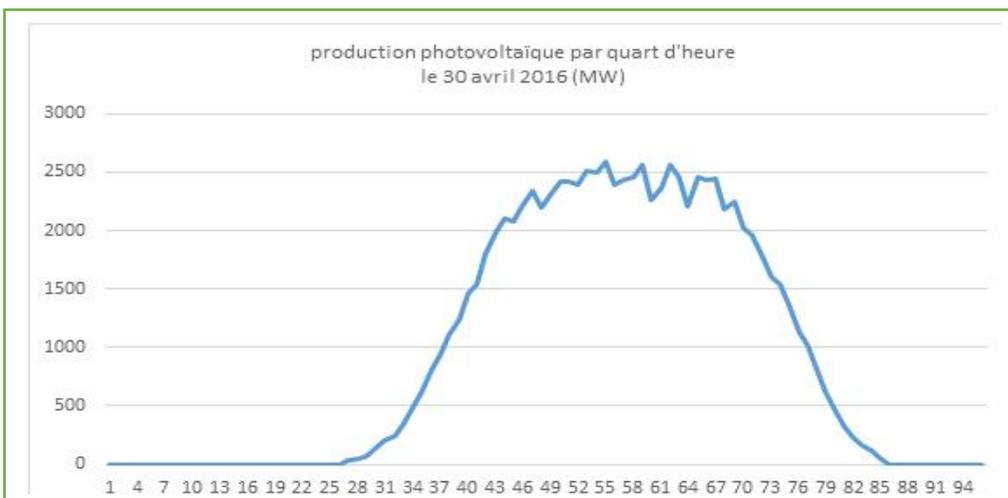
### 3 - Les moyens de réglage de ces deux paramètres : les groupes turbo-alternateurs synchrones

# 5 - Pourquoi l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** (d'origine éolienne ou photovoltaïque) **change la donne** (1/4)

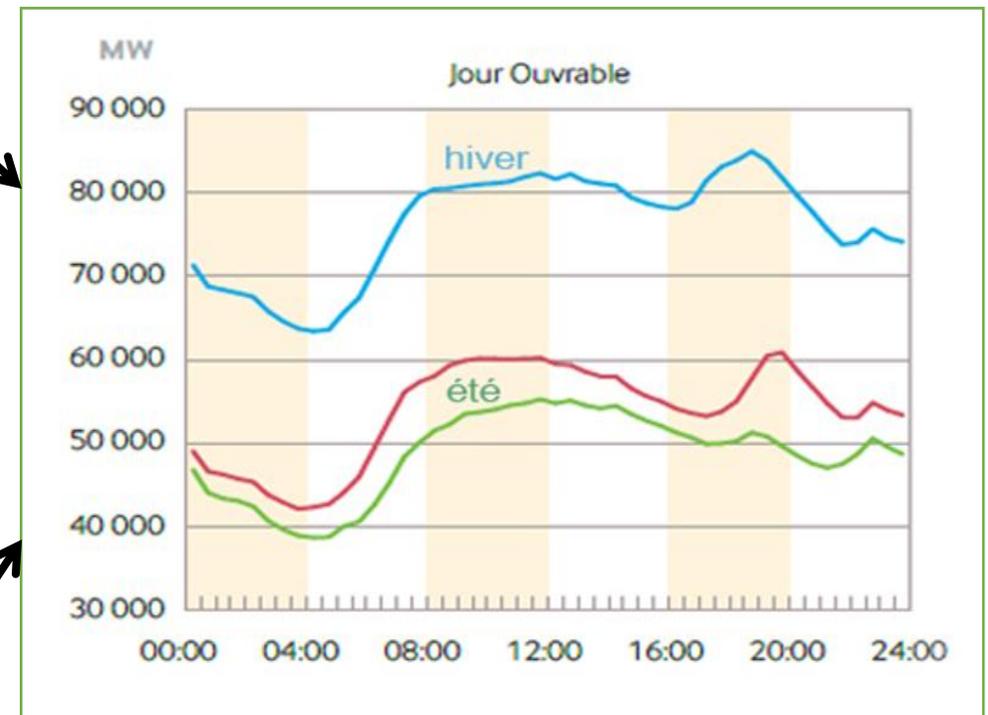
1<sup>ère</sup> raison : elle introduit une **variabilité aléatoire** dans la **PRODUCTION** d'électricité qui doit être **compensée** par différents moyens



Exemple de production éolienne (mois)



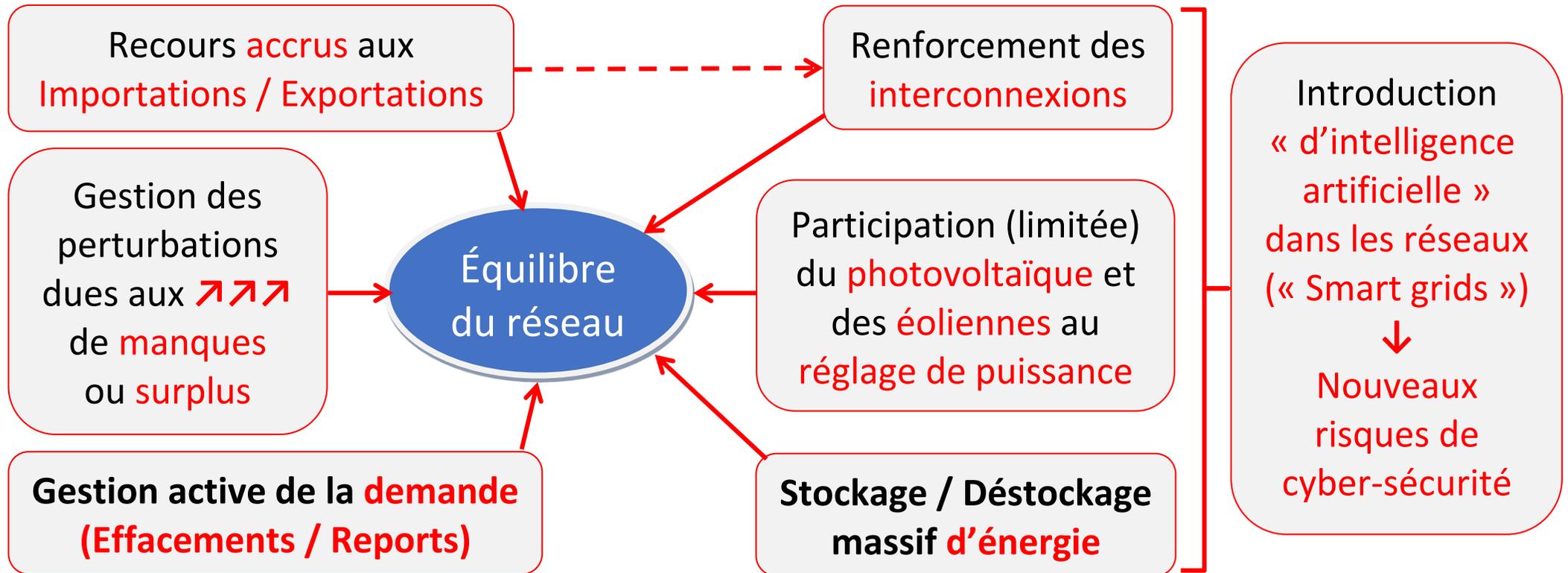
Exemple de production photovoltaïque (journée)



Consommations journalières selon saisons  
(**Très peu corrélées** avec les productions **éoliennes** et **photovoltaïques**)

## 5 - Pourquoi l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** (d'origine éolienne ou photovoltaïque) **change la donne** (2/4)

➔ Cette électricité variable et intermittente est **INCAPABLE** d'assurer à elle **SEULE** l'équilibre [Production-consommation] ➔ Contributions supplémentaires **INDISPENSABLES** :



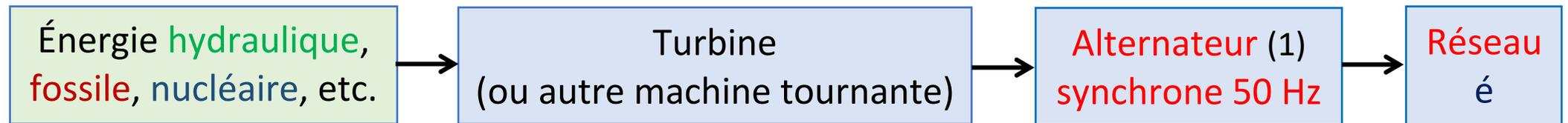
➔ **MAIS** : contributions **INSUFFISANTES** ➔ **SUPPORT INDISPENSABLE** par des moyens **PILOTABLES** (moyens de « back-up ») pour, soit :

- \* **Faire un appoint / secours** des moyens variables et intermittents **quand ils ne suffisent pas**
- \* **S'effacer** quand il y a **trop d'électricité variable et intermittente** (qui a un accès **prioritaire**)

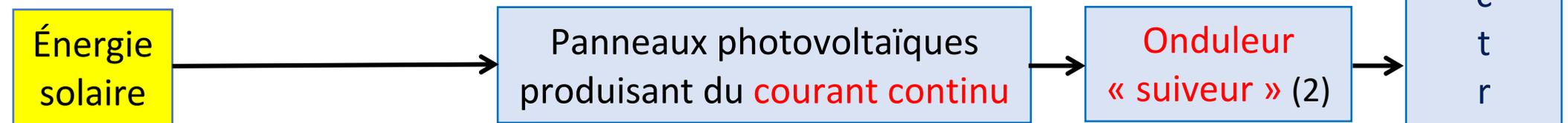
## 5 - Pourquoi l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** (d'origine éolienne ou photovoltaïque) **change la donne** (3/4)

2<sup>ème</sup> raison : **un mode de couplage au réseau très différent** : couplage **électromagnétique** des alternateurs remplacé par couplage **électronique** (onduleurs de puissance commandés)

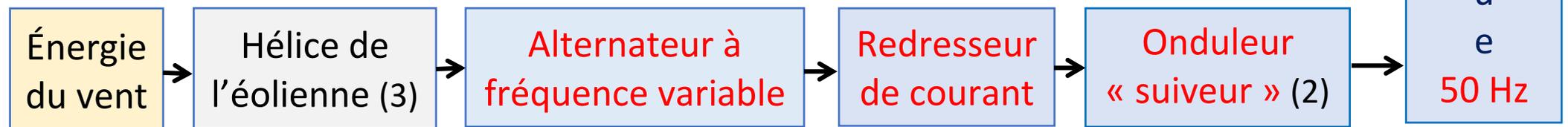
1 - **Rappel** : schéma d'une production d'électricité par **machine synchrone pilotable** :



2 - **Schéma d'une production d'électricité photovoltaïque** :



3 - **Schéma d'une production d'électricité par éolienne moderne à vitesse variable** :



(1) « **Forme** » le réseau en **fréquence f** et **tension U** et apporte son **inertie mécanique** et son **énergie cinétique**

(2) Qui « **suit** » la **fréquence f** et la **tension U** du réseau définie par les alternateurs et n'a **pas d'inertie**

(3) L'**énergie cinétique** de l'hélice de l'éolienne peut être partiellement **réinjectée** dans le réseau

## 5 - Pourquoi l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** (d'origine éolienne ou photovoltaïque) **change la donne** (4/4)

Performances des onduleurs de puissance << à celles des alternateurs (à une exception près)

→ Des conséquences négatives multiples pour le fonctionnement des réseaux :

Points faibles des onduleurs électroniques de puissance	Conséquences sur les réseaux	Moyens palliatifs possibles
Absence d'apport d'inertie	↘ L'inertie globale des réseaux → Les rend <b>instables</b> au-delà d'un certain seuil	Ajout de <b>compensateurs synchrones</b> (1)
Faibles capacités de surintensités transitoires ( $\approx 20$ à $50 \% I_n$ ) << celles alternateurs ( $500$ à $600 \% I_n$ )	→ Déconnexions lors des courts-circuits fugitifs des réseaux → ↗↗↗ Risques de <b>divisions (fragmentations)</b> des réseaux	Ajout de <b>compensateurs synchrones</b> (1)
Onduleurs actuels « <b>suiveurs</b> » (« grid following ») fonctionnant en seules <b>sources de courant</b>	Ne peuvent pas « <b>former</b> » le <b>réseau</b> en <b>fréquence f</b> et en <b>tension U</b> contrairement aux alternateurs	Ajout d'onduleurs (« grid forming ») capables de « <b>former</b> » le <b>réseau</b> (2)
Introduction d'harmoniques HF dans ondes de tension et courant	<b>Détériorent les appareils</b> dans les réseaux et chez les consommateurs	Ajout généralisé de <b>filtres « passe-bas »</b>

(1) Alternateurs couplés au réseau tournant à vide (sans couple moteur) et lui apportent leur inertie  
+ Leurs capacités de réglage de la tension

(2) Onduleurs **reproduisant électroniquement les équations internes des alternateurs**

**Une exception** : temps de réponse (TR) des onduleurs électroniques << à ceux des alternateurs

→ Réglage rapide de puissance-fréquence : TR d'un ensemble [batterie + onduleur] < 1 s

## 6 - Quelles **limites** à l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** ? (1/3)

Jusqu'où pourra-t-on remplacer les alternateurs par des onduleurs pour « former » le réseau dans des conditions de stabilité et de sécurité non dégradées ?

### 1 - **Taux MAXIMUM** de puissance injectée via des **onduleurs** (selon pays européens) :

	En valeur <b>moyenne</b> annuelle	En valeurs <b>instantanées</b>
Situation <b>actuelle</b> (1)	≈ 40 %	25 à 75 % selon <u>inertie</u> du réseau
<b>Ambitions</b> pour le futur (2)	≈ 50-55 % puis vers 90-95 %	Jusqu'à près de 100 %

(1) Réseau **restant** « formé » par des alternateurs majoritaires avec complément d'onduleurs « suiveurs »

(2) Si **trop peu** d'alternateurs **résiduels**, i.e. dans les productions **hydrauliques** ou utilisant du **biogaz** ou du gaz de **synthèse (hydrogène)** pour « former » le réseau → Réseau « formé » par des onduleurs « formant » le réseau devenant majoritaires avec toujours un complément d'onduleurs « suiveurs »

### 2 - **Mais des défis techniques considérables restent à relever pour dépasser la situation actuelle :**

→ **Incertitudes majeures** concernant le fonctionnement des onduleurs « formant » le réseau :

- Encore au stade des **laboratoires** ou des **microréseaux expérimentaux**

- **Capacité non démontrée à fonctionner en parallèle en grand nombre, de façon stable et sûre**

- **Difficile cyber-protection des fonctions internes informatisées des onduleurs formant le réseau et de leurs liaisons informatisées de contrôle-commande à longue distance (nouvelle **vulnérabilité** par rapport aux **couplages électromagnétiques à haute énergie des alternateurs**)**

→ **Diminution MASSIVE** de l'**indispensable** inertie des réseaux

## 6 - Quelles **limites** à l'introduction d'électricité **variable** et **intermittente** ? (2/3)

L'indispensable inertie quantifiée par le **RoCoF** (« Rate of Change of Frequency »)

1 - **Le RoCoF exprimé en Hz/s est :**

➔ **Proportionnel** à la puissance perdue  $\Delta P$  à l'instant  $t = 0$

➔ **Inversement proportionnel** à l'énergie cinétique du réseau après la perte de puissance due à la perte d'un **moyen de production** ou à une **division (en 2 parties ou plus) du réseau** :

➔ Quantifié par l'équation : 
$$\frac{df}{dt} = \frac{50 \times \Delta P \text{ perdue}}{2 \times (\text{E cinétique réseau} - \text{E cinétique perdue})}$$

2 - **Valeurs caractéristiques du RoCoF :**

➔ **« Grands » réseaux européens interconnectés** : **AVANT** l'introduction d'onduleurs connectant les sources d'électricité **variable** et **intermittente** :  $\approx 0,1$  à  $0,15$  Hz/s ➔ **Inertie globale importante** laissant aux régulateurs de puissance  $\Delta P = -k \times \Delta f$  le **temps de corriger les écarts**

➔ **« Petit » réseau de l'île irlandaise peu interconnectée avec l'extérieur** (« laboratoire avancé » de l'Europe) ➔ Taux de pénétration de puissance variable et intermittente **atteints** et **visés** :

Taux	Valeur <b>moyenne maximum</b> annuelle	Valeurs <b>instantanées maximales</b>	RoCoF	Inertie
Actuel	$\approx 40 \%$	$\approx 70$ à $75 \%$	$\approx 0,5$ Hz/s	↘
<b>Visé en 2030</b>	$\approx 70 \%$ (1)	$\approx 85$ à $95 \%$ (1)	$\approx 1$ Hz/s	↘↘

(1) Implique : Ajouts impératifs de compensateurs synchrones apportant leur inertie  
+ Réglages de puissance-fréquence très rapides par batteries + onduleurs

## 6 - Quelles limites à l'introduction d'électricité variable et intermittente ? (3/3)

L'alerte de l'ENTSO-E sur le RoCoF maximum à ne pas dépasser sur la plaque Européenne

- Raisons** : ↗↗↗ des risques d'instabilité du réseau européen due à deux effets cumulés :
  - \* ↗↗↗ des pertes incidentelles de puissance dues à deux effets : ↗↗↗ des risques de divisions du réseau européen + ↗↗↗ des puissances échangées entre pays européens → **RoCoF ↗**
  - \* ↗↗↗ des sources d'électricité variable et intermittente couplées par des onduleurs → ↘↘↘ de l'inertie globale des réseaux → **RoCoF ↗**
- L'alerte de l'ENTSO-E** : **RoCof  $\leq$  1 Hz/s à tout instant**
  - \* But : laisser aux régulations de puissance-fréquence, même les plus rapides, le temps d'agir
  - \* Solution préconisée par l'ENTSO-E : ajouter de l'inertie au réseau européen pour maintenir une valeur suffisante → Inertie quantifiée en équivalent de machines synchrones à installer :

Ajouts d'inertie au réseau européen requis selon l'ENTSO-E	En 2025	En 2030	En 2040
En équivalent de machines synchrones (1) à installer en plus (en GW)	≈ + 100	≈ + 300	≈ + 500
Nombre de machines synchrones de 250 MVA (par exemple) à ajouter	400	1 200	2 000

(1) Turbo-alternateurs fonctionnant à l'hydrogène ou au biogaz + Compensateurs synchrones

→ Maintenir la robustesse du réseau européen → Augmenter considérablement les moyens synchrones apportant de l'inertie pour remplacer ceux qui auront été arrêtés

## 7 - Perspectives 2050 selon les connaissances actuelles (1/2)

Imaginer faire fonctionner des réseaux formés par des onduleurs est donc un pari très risqué

1 - Pari confirmé par l'étude commune AIE-RTE du 27 janvier 2021. Extraits :

*« Quatre ensembles de conditions techniques strictes devront être remplies pour permettre, avec une sécurité d'approvisionnement assurée, l'intégration d'une proportion très élevée d'énergies renouvelables variables dans un système électrique de grande échelle, comme celui de la France [...] Il n'existe aucune démonstration de la faisabilité d'une intégration très poussée d'EnR variables comme l'éolien et le photovoltaïque sur un grand système électrique »*

2 - Face à ce pari, des choix pour 2050 profondément divergents entre l'Allemagne et la France

Technologies « bas carbone » utilisables	<b>Allemagne → Fuite en avant</b> Réseau formé par onduleurs	<b>France → Continuité</b> Réseau formé par alternateurs
Nucléaire	0 %	Socle majoritaire (50 à 70 %)
Hydraulique + biomasse + ...	< 10 %	≈ 10 %
Eolien + Photovoltaïque	> 90 %	≈ 20 à 40 %
<b>Turboalternateurs à hydrogène</b>	<b>Très grand nombre</b>	<b>Faible nombre</b>
<b>Stockages hydrogène associés</b>	<b>Capacités très importantes</b>	<b>Capacités limitées</b>
<b>Importations d'hydrogène</b>	<b>70 à 75 % des besoins !</b>	<b>Inutiles</b>
-	-	-
Compensateurs synchrones	Très grand nombre	Faible nombre

## 7 - Perspectives 2050 selon les connaissances actuelles (2/2)

Pour résumer et conclure : refuser le nucléaire, seule source d'énergie à la fois : décarbonée, pilotable et disponible à grande échelle a des conséquences majeures

- 1 - Saut dans l'inconnu concernant le fonctionnement et la sécurité d'alimentation du réseau e.i. Infrastructure d'importance vitale pour un pays développé + Électricité = Principale source d'énergie disponible en 2050
- 2 - Énormes capacités installées nécessaires en éolien à terre, éolien en mer et photovoltaïque. Exemple de l'Allemagne : avec son parc installé le plus important d'Europe, l'Allemagne produit à peine 35 % de son électricité avec ces moyens. Ce taux devra monter à plus de 90 % en 2050 pour une production globale doublée à cette date → L'Allemagne devra multiplier par plus de 5 ( $0,9 \times 2 / 0,35 \approx 5,1$ ) son parc actuel. Où mettra-t-elle ces éoliennes et panneaux photovoltaïques ?
- 3 - Énormes capacités installées nécessaires en moyens PILOTABLES transformant des énergies stockées, notamment des stocks d'hydrogène de très grandes capacités pour pallier les manques d'électricité soit massifs (lors des nuits sans vent) soit durables (jusqu'à  $\approx 15$  j de vents faibles)
- 4 - Coûts très élevés associés à ces moyens massifs de production et de stockage. Dans son étude « Futurs énergétiques 2050 » parue en octobre 2021, RTE évalue le prix de l'électricité produite à partir d'hydrogène à  $\approx 240$  à  $350$  €/MWh (selon moyen de production utilisé), contre  $\approx 80$  €/MWh pour le nouveau nucléaire (EPR2 optimisé de série)

→ Le choix allemand (et plus largement européen) du « 100 % renouvelable » apparaît sauf exception\* comme un saut dans l'inconnu très risqué pour un système d'importance vitale  
(\* Norvège, 96 % de production d'électricité hydraulique)

Merci de votre attention