

24<sup>ème</sup> Congrès Générale de la  
Société Française de Physique  
Orsay 05/07/2017

# Les conséquences de l'intermittence des énergies renouvelables et comment les gérer

D. Grand, A. Latrobe, C. Le Brun, R. Vidil  
GIRE

<http://www.realisticenergy.info>

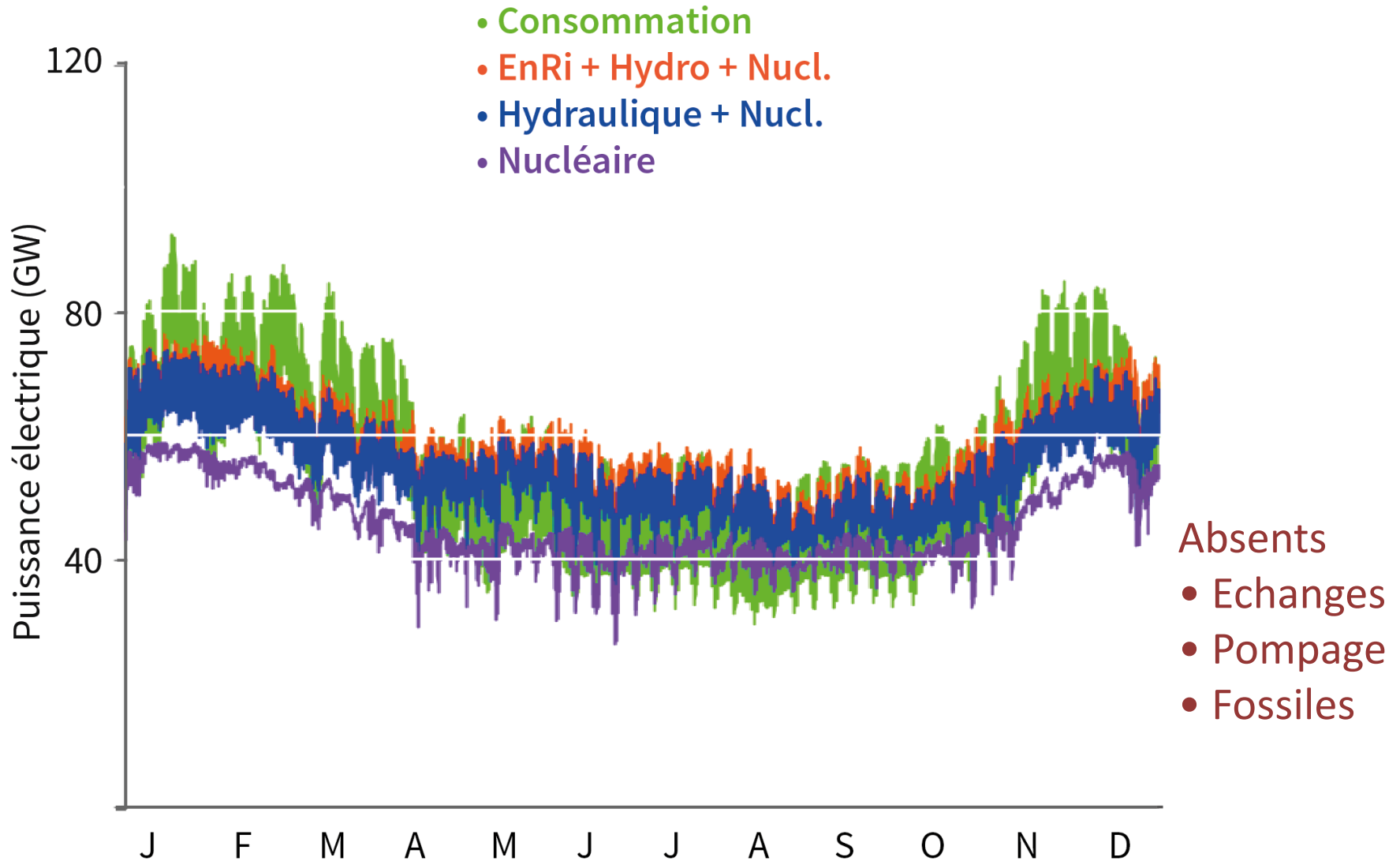
# Transition énergétique (électrique)?

- Réduction des émissions de CO<sub>2</sub>
- Développement soutenable:
  - pour l'homme et la société
  - pour l'environnement
- Apport des énergies renouvelables à l'UE?
  - hydraulique, biomasse (plafond atteint)
  - éolien et solaire (croissance possible)

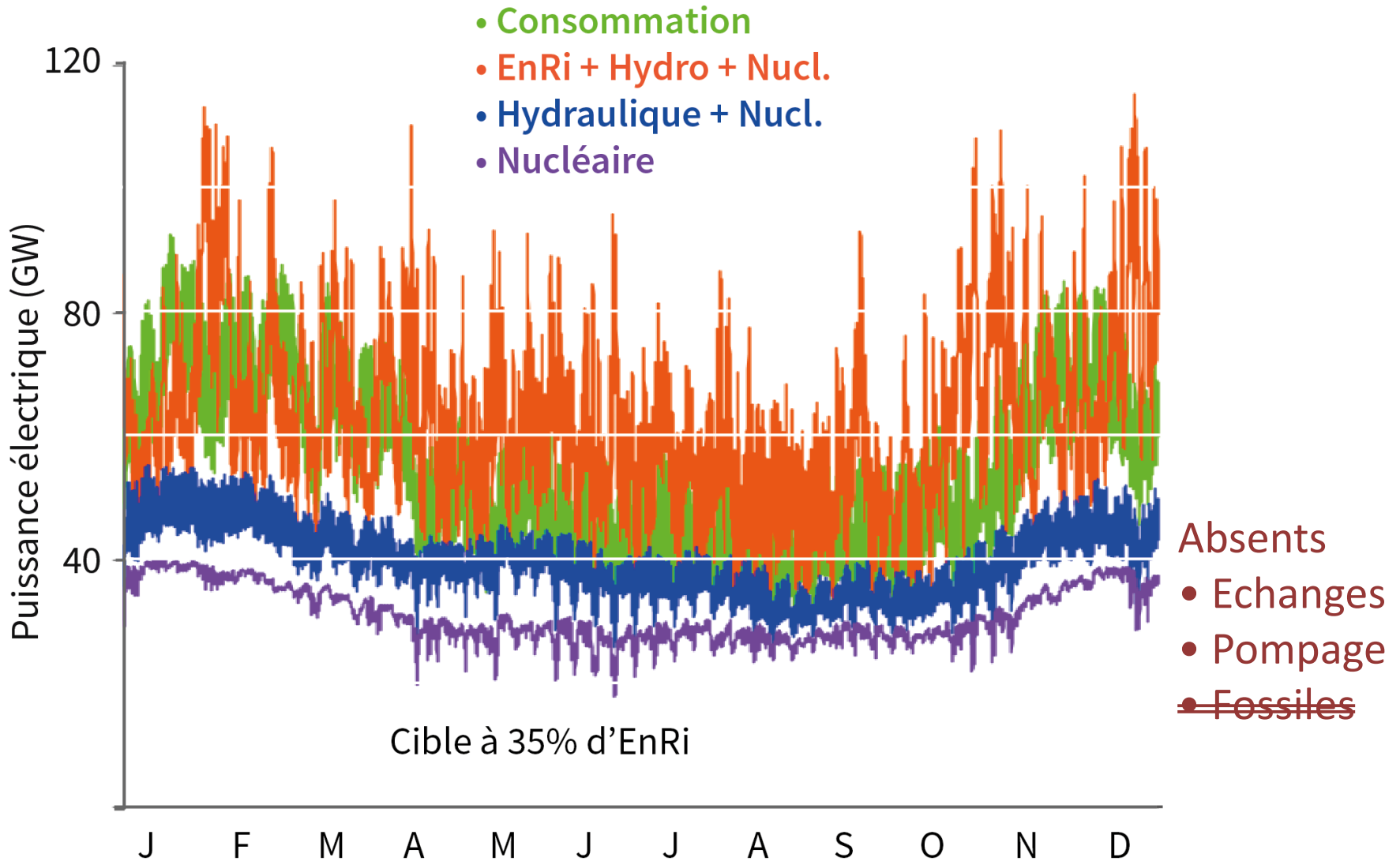
# Sommaire

- Intermittence et équilibrage du réseau
- Allemagne et France
- Moyens d'équilibrage
- Conséquences climatiques

# Production électrique France 2013

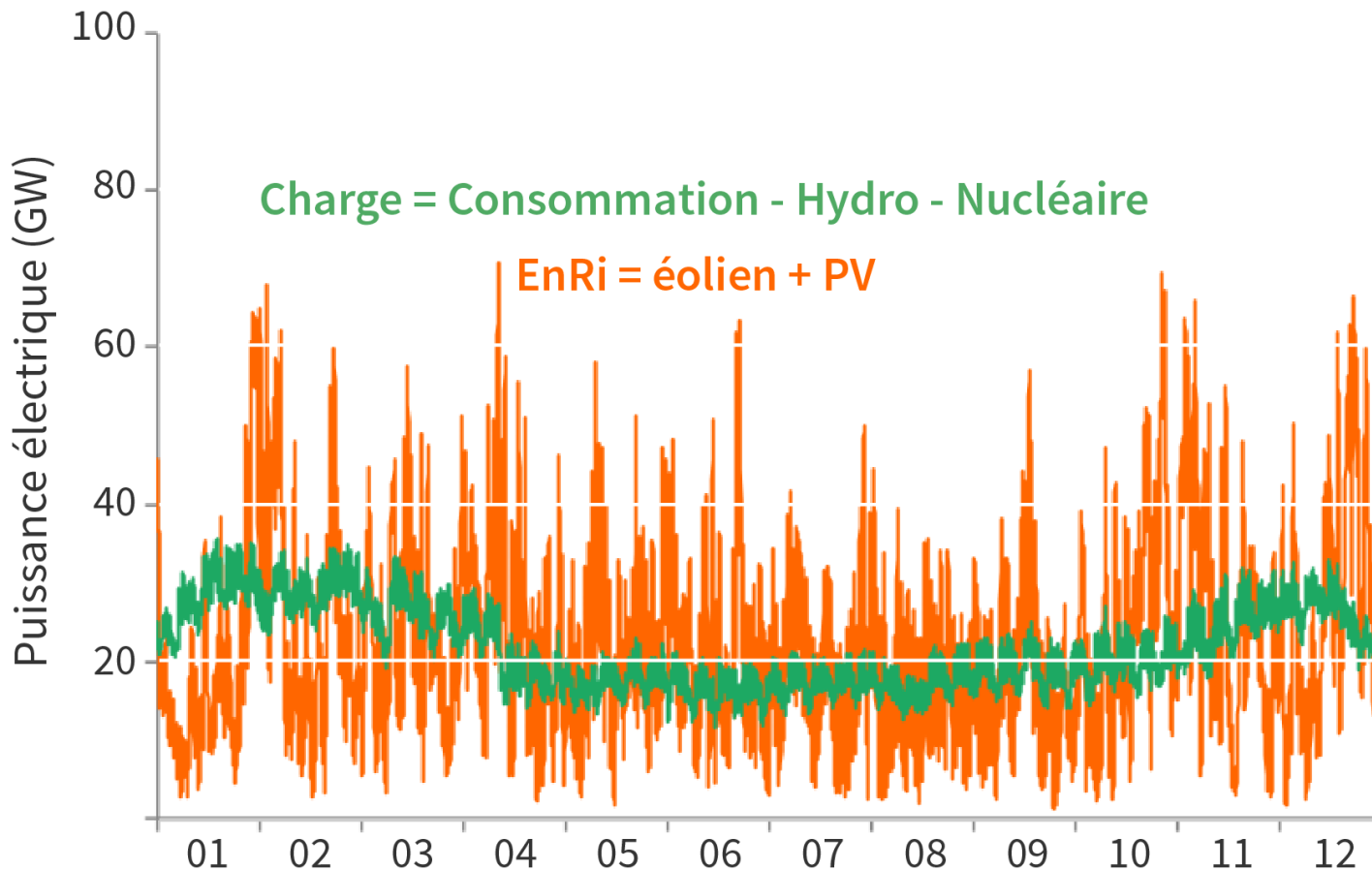


# Mix électrique à 35% EnRi

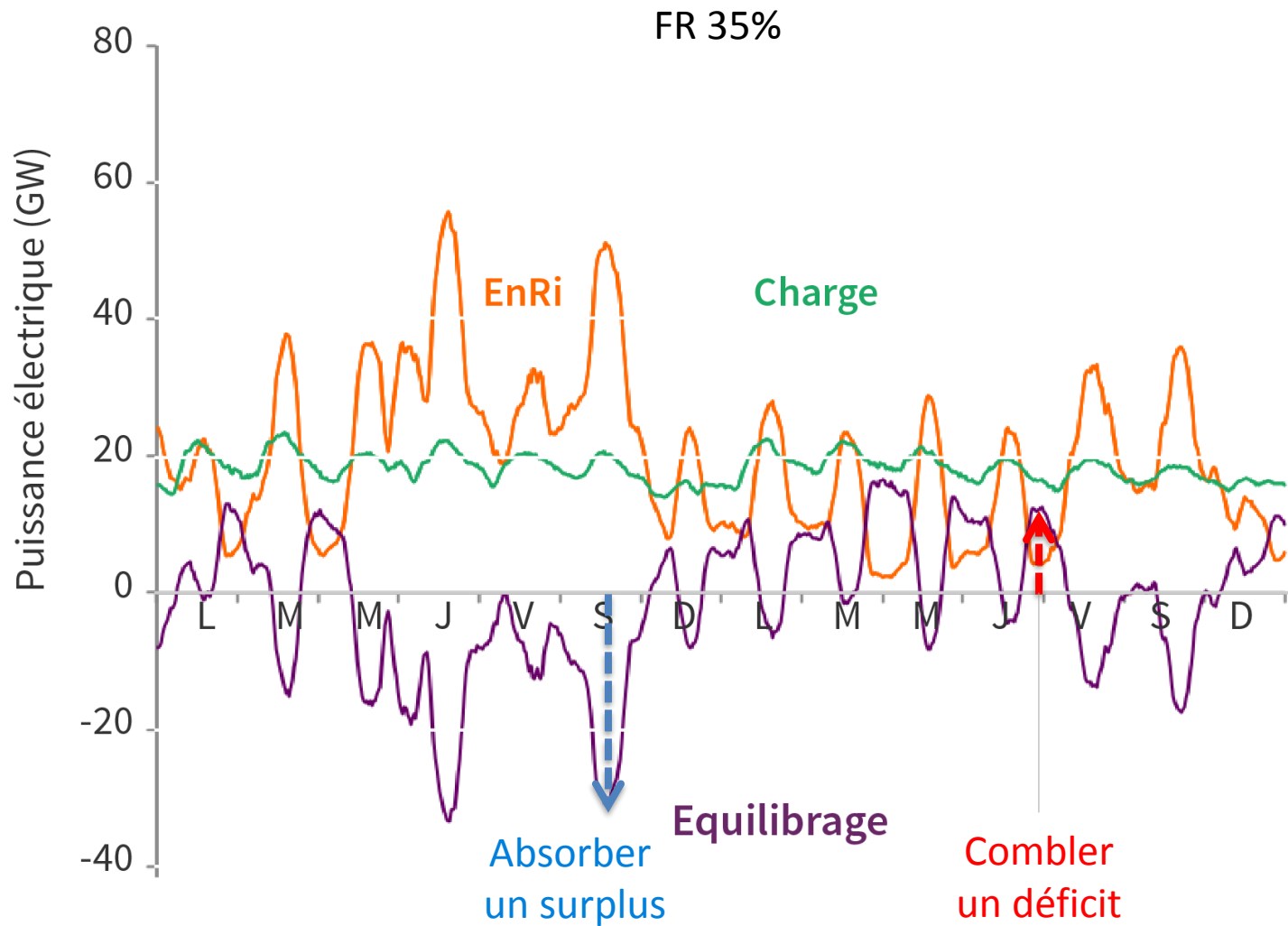


# Part de la production intermittente

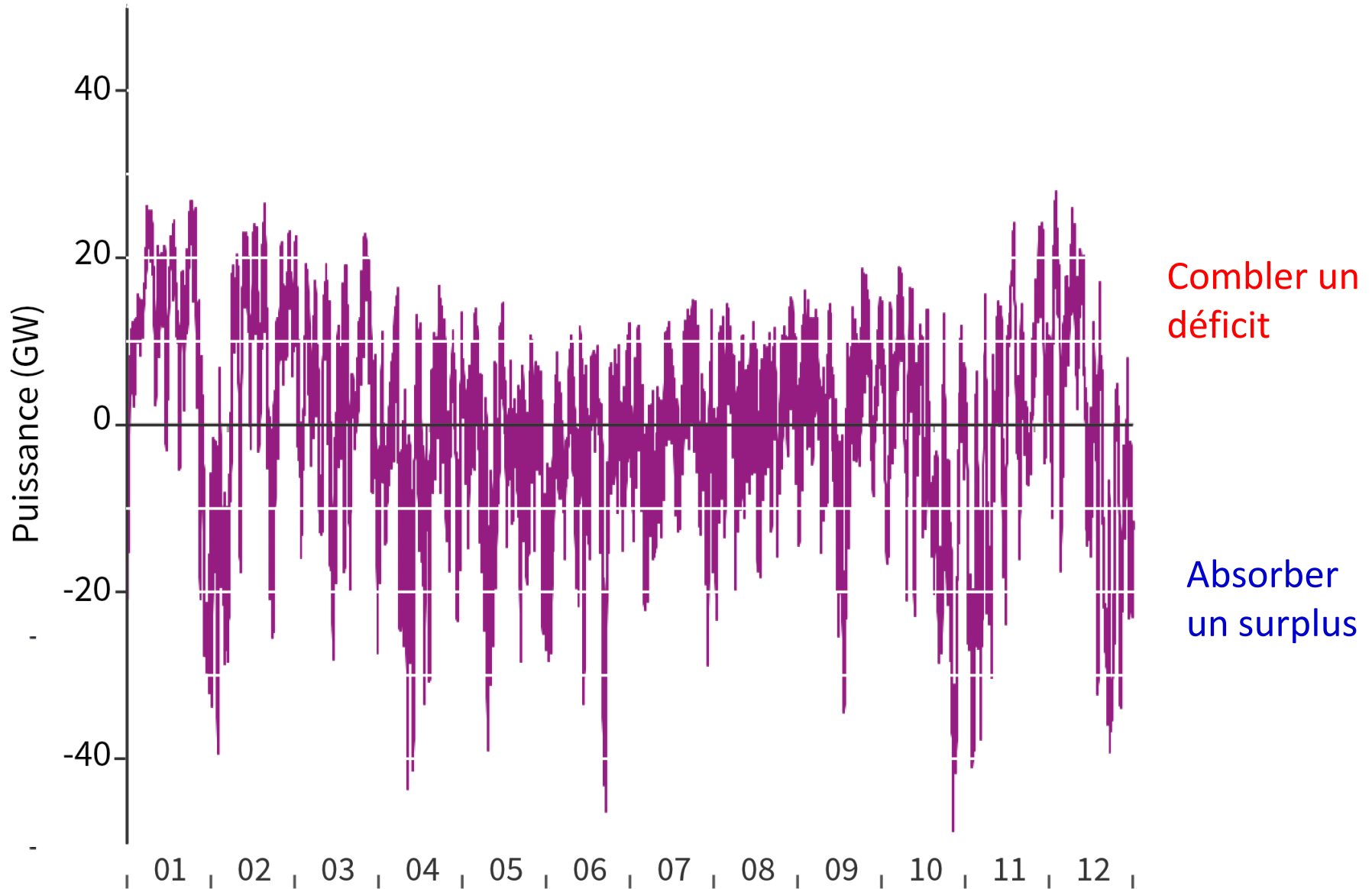
Méthode de Friedrich Wagner (Max Planck)



# Evolution lors d'une quinzaine d'avril

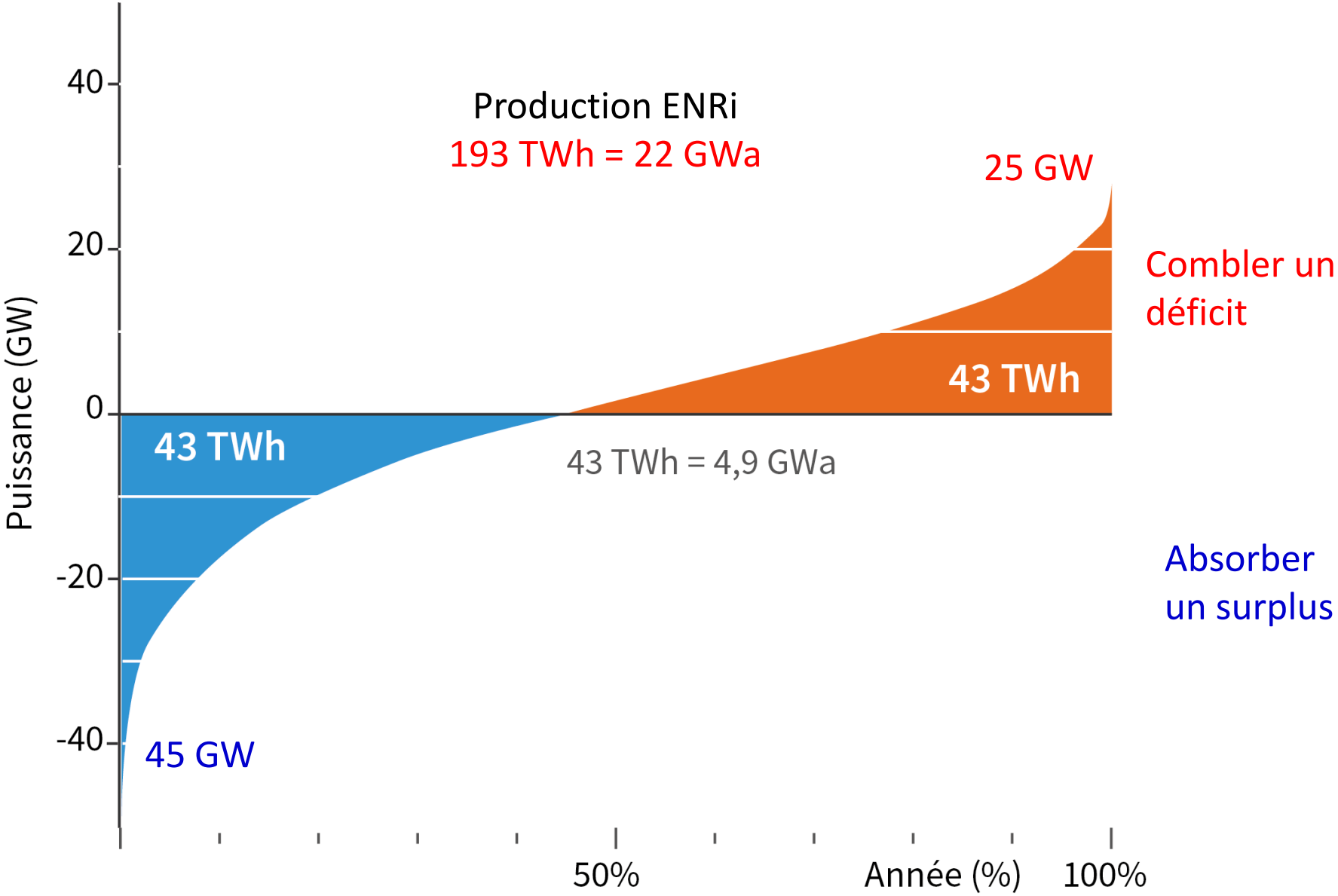


# Equilibrage : historique de l'année





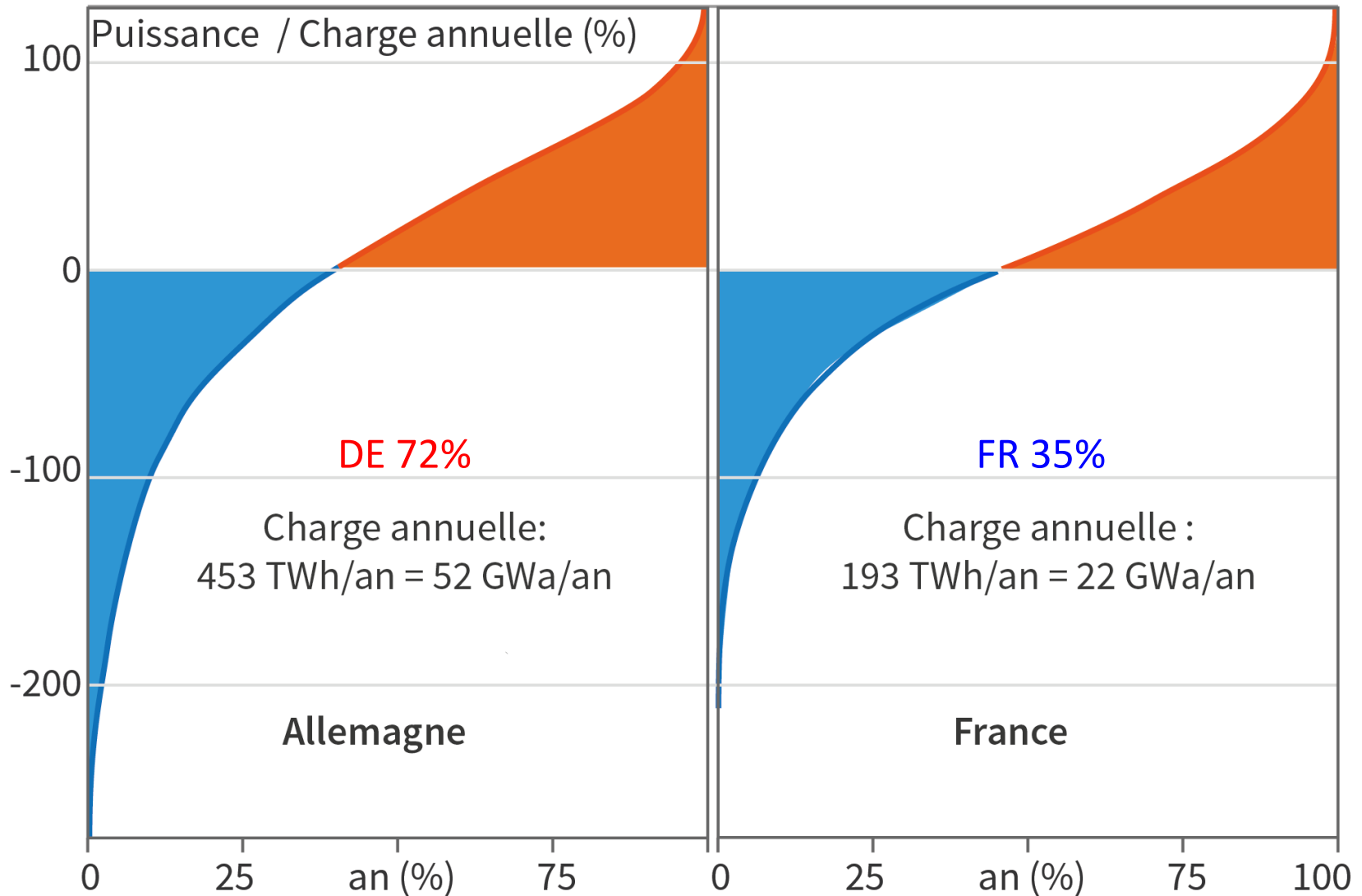
# Monotone de charge d'équilibrage



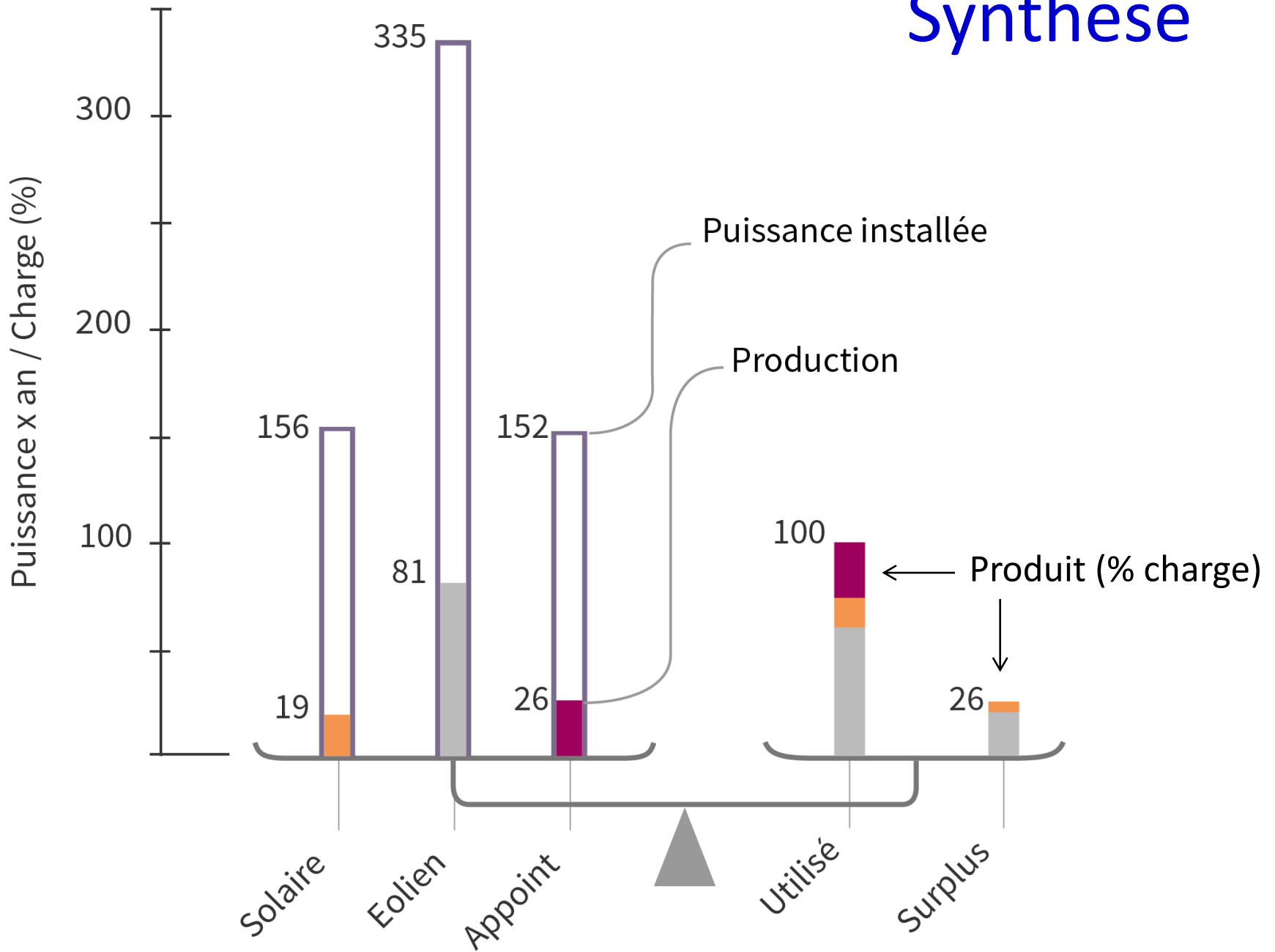
# Sommaire

- Intermittence et équilibrage du réseau
- **Allemagne et France**
- Moyens d'équilibrage
- Conséquences climatiques

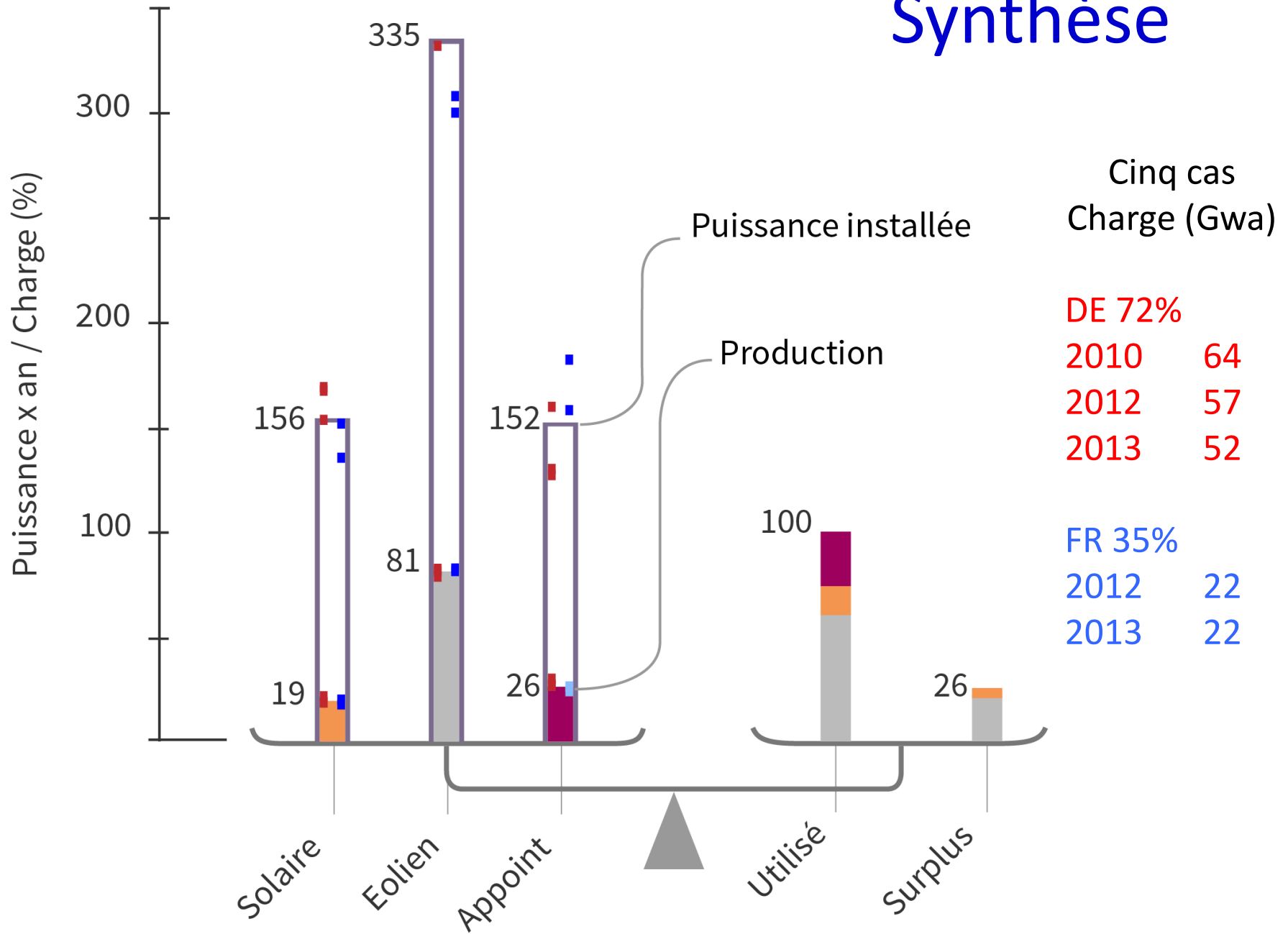
# Monotones d'équilibrage comparées



# Synthèse



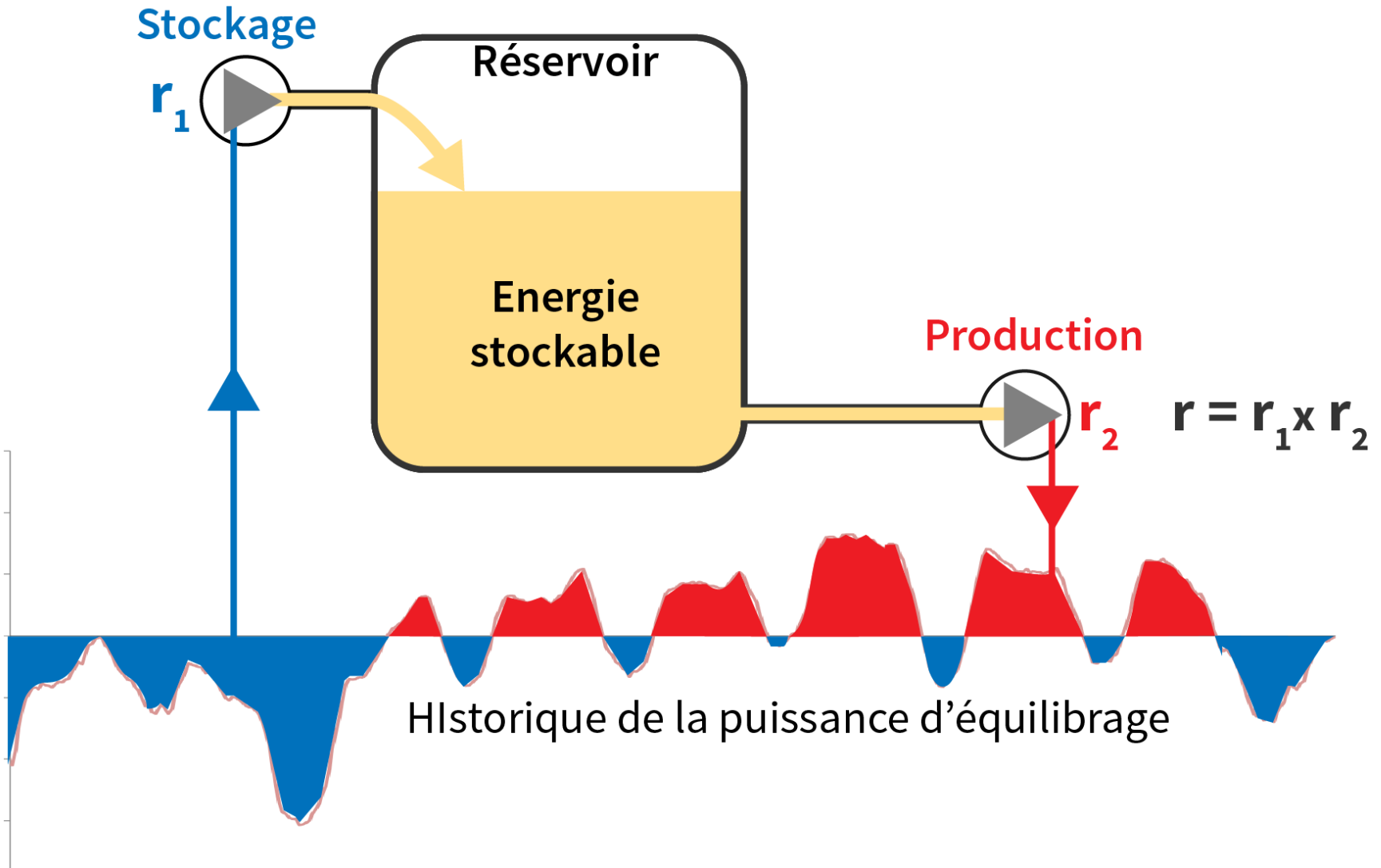
# Synthèse



# Sommaire

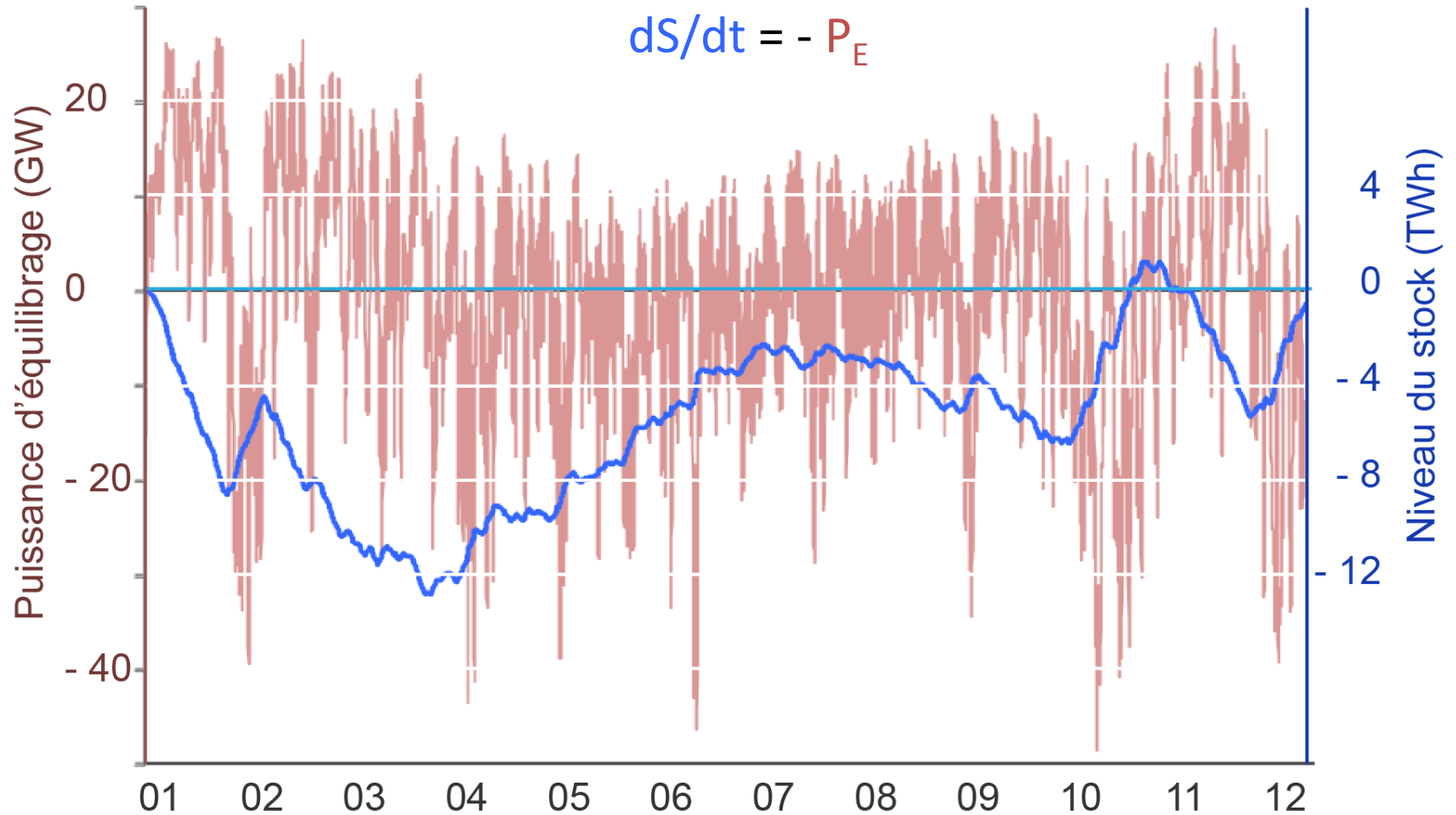
- Intermittence et équilibrage du réseau
- Allemagne et France
- Moyens d'équilibrage (FR35%)
- Conséquences climatiques

# Stockage: principe



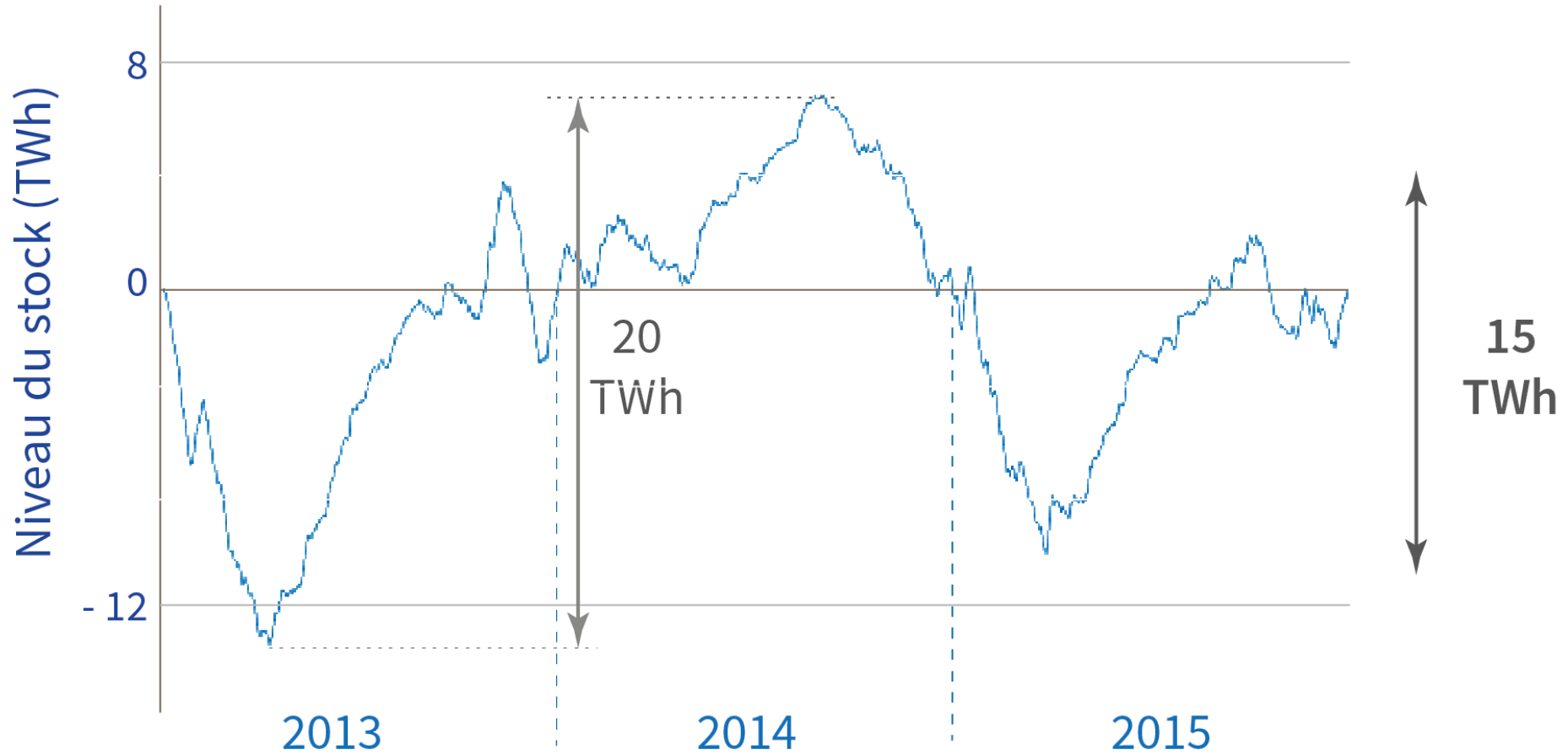
# Charge d'un stockage parfait ( $r = 100\%$ )

FR35%





# Niveau du stock sur 3 ans

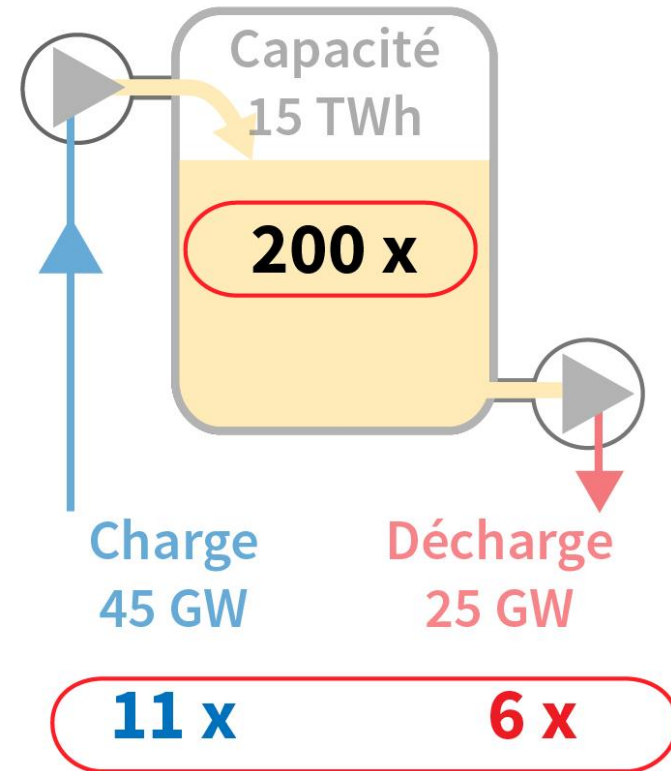


# Stockage hydroélectrique (r = 80%)



STEP françaises :

Capacité  $\approx$  70 GWh  
Puissance = 4,1 GW

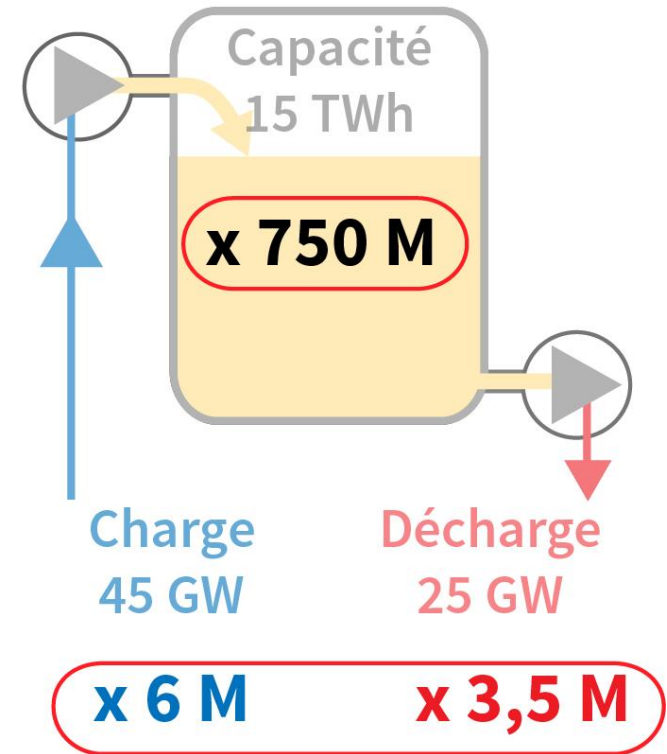


# Stockage par batteries (r = 80%)



ZOE :                      Capacité  $\approx$  20 kWh  
                                  Puissance charge = 7 kW

Crédit: Jacques Treiner



30 x parc **mondial** de batteries (0,5 TWh)



# Stockage hydrogène (20% < r < 40%)

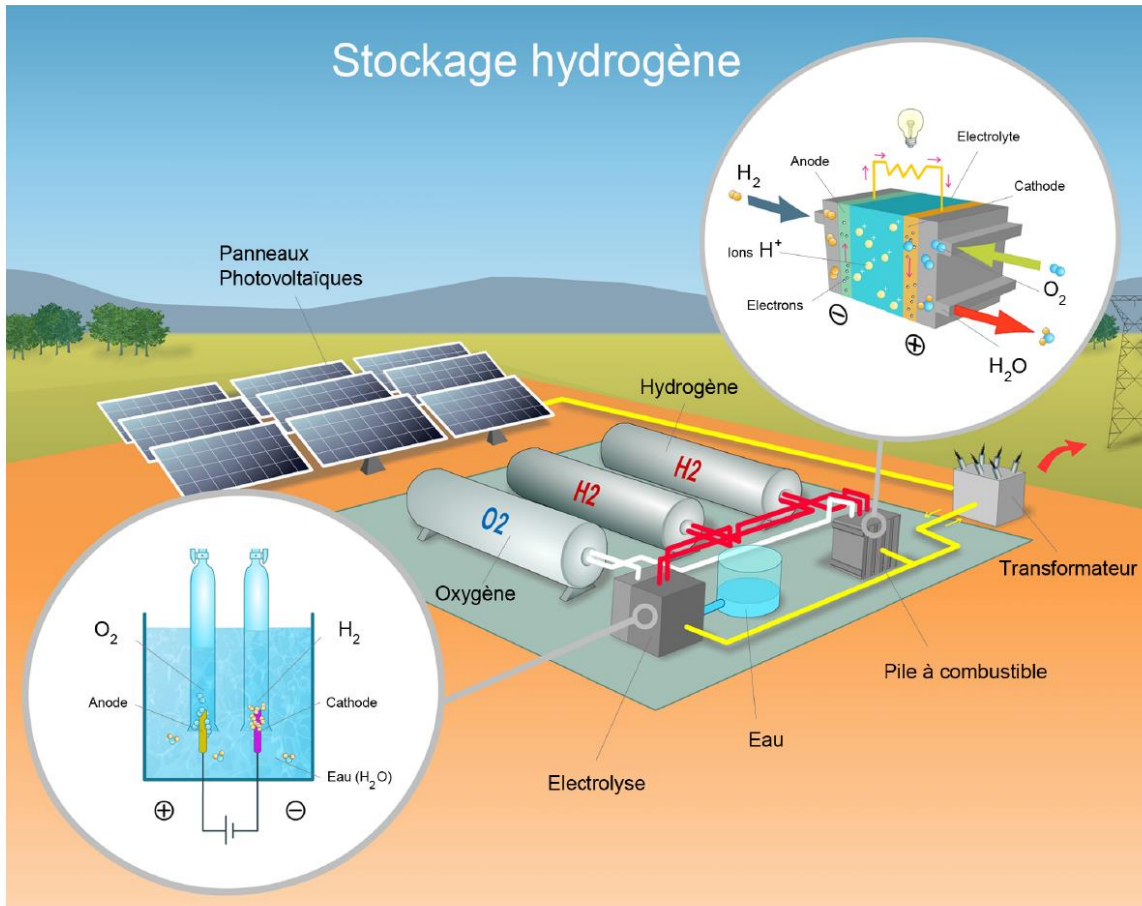
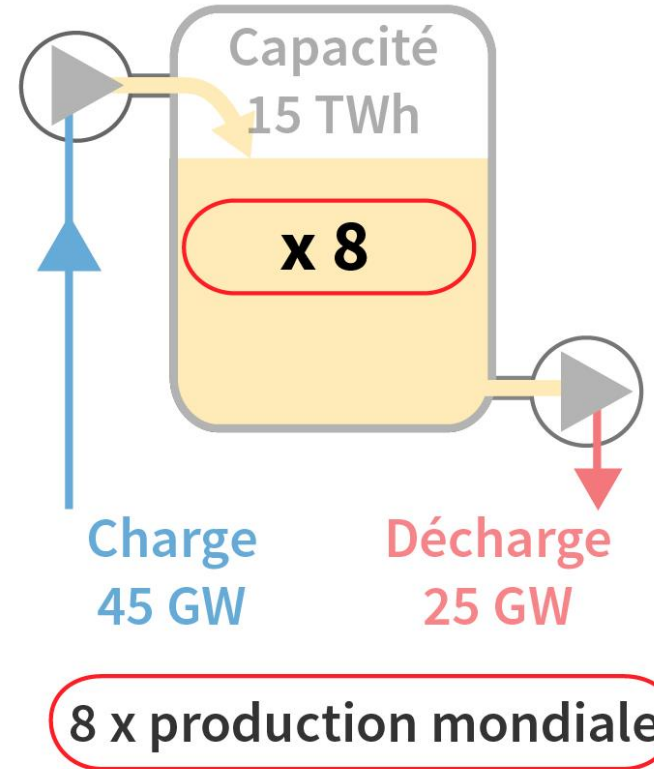


ILLUSTRATION CORINNE BEURTEY



Production mondiale d'hydrogène = 1,8 TWh

# Echanges transfrontaliers?

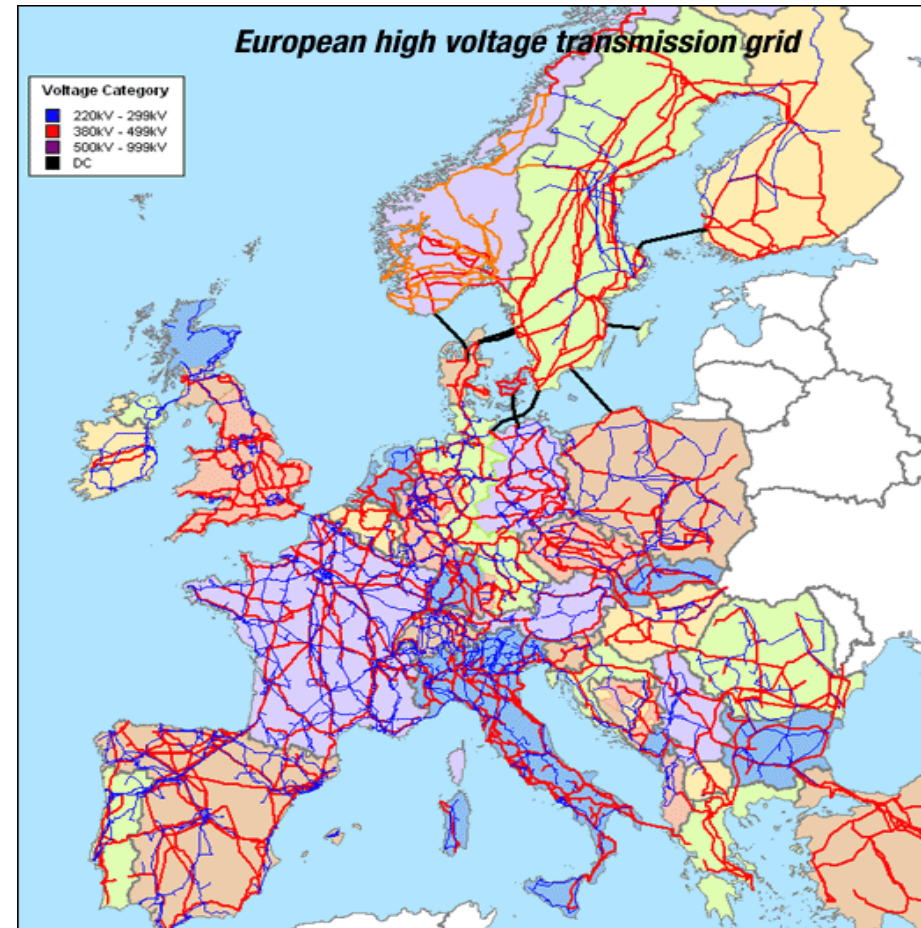
Scénario 100% ENR (Ademe):  
56 TWh (export = import)

☀️ **EnR?** Impossible: productions  
en phase.

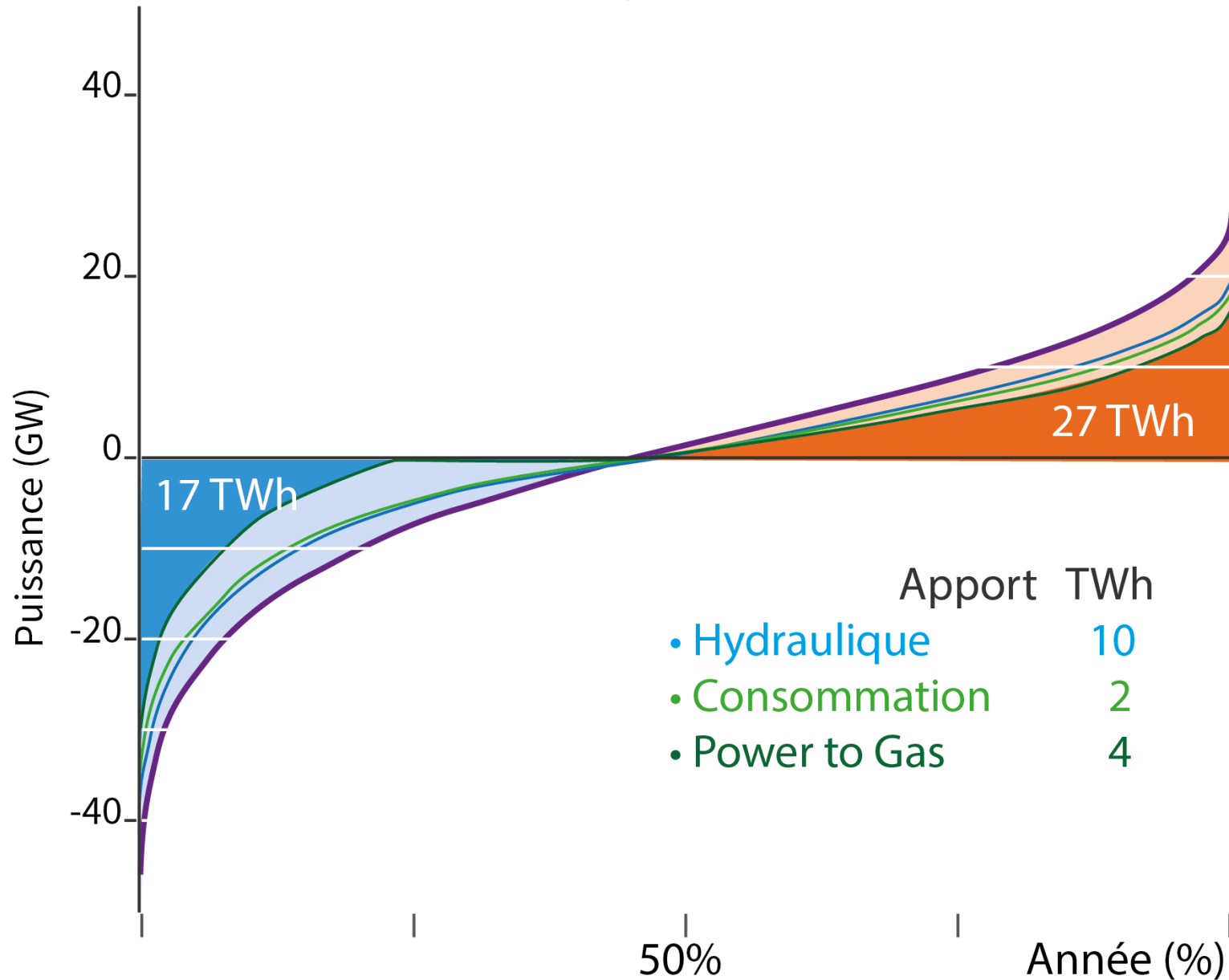
☁️ **Fossiles** : « la majorité des  
échanges exploite la flexibilité fossile  
des systèmes électriques voisins »  
(Ademe)

Exporter nos émissions de CO<sub>2</sub>?

Zéro



# Transferts surplus vers déficits



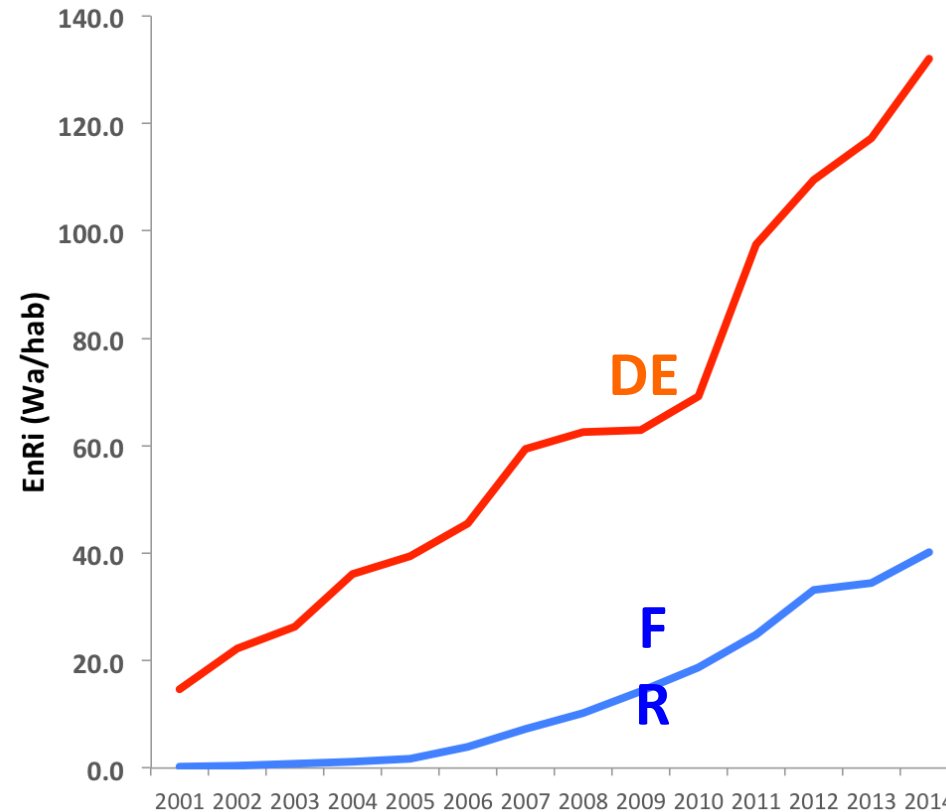
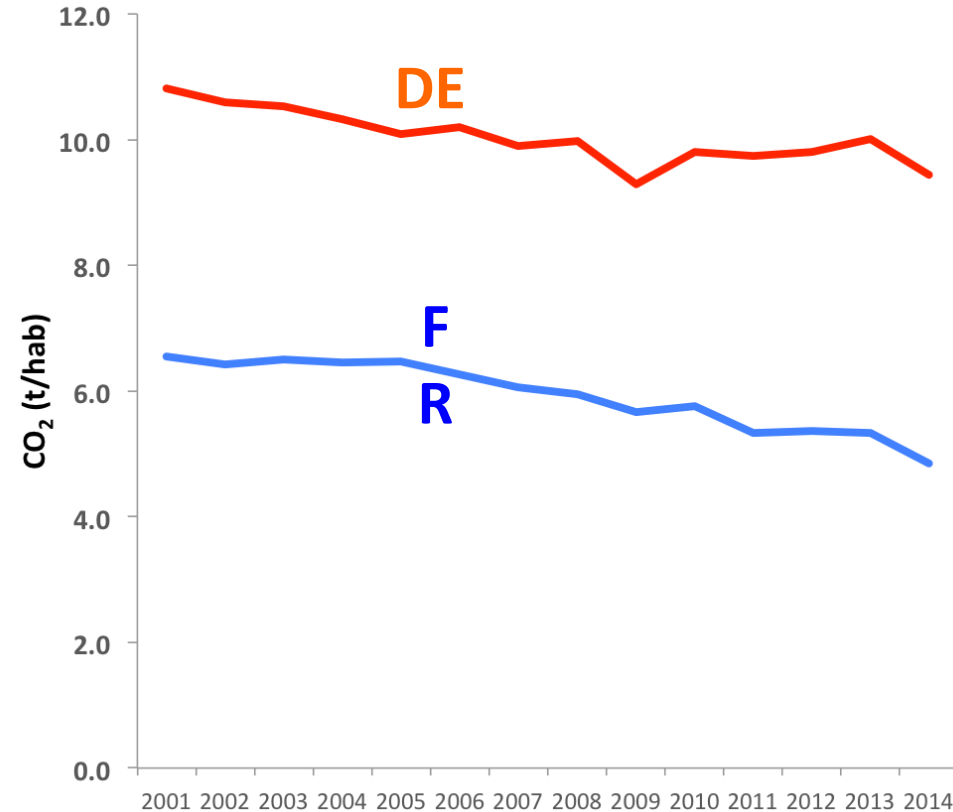
# Sommaire

- Intermittence et équilibrage du réseau
- Allemagne et France
- Moyens d'équilibrage
- Conséquences climatiques

# EnRi et CO2 : évolutions depuis 2001

## CO<sub>2</sub> du secteur énergétique

## Productions d'éolien et PV





# Conclusion : Méthode

- Mix électrique transition énergétique :  
50% ENR: 35% EnRi et hydro.
- Méthode F. Wagner (Max Planck) appliquée à FR
- Comparaison DE et FR

# Résultats de l'intermittence

- Cause **surplus et déficits  $\approx 26\%$**   
(% de la charge (énergie) annuelle EnRi)
- Nécessite de **rééquilibrer la puissance**:
  - ✧ **220%** pour absorber **surplus**
  - ✧ **120%** pour combler **déficits**  
(% puissance moyenne de charge)
- Nécessite de **stocker  $\approx 8\%$**  de la charge annuelle EnRi
  - ✧ **x 200** capacité des STEP françaises
  - ✧ **x 30** parc mondial batteries (FR 1% pop. monde)

# Attention aux lieux communs

❑ Loi transition énergétique timide?

➤ Nécessite de GROS moyens.

❑ Vent et soleil gratuits?

➤ Pas leur collecte ni leur gestion (coûts des infrastructures en Europe).

❑ ENR bonnes pour le climat?

➤ Si la production d'appoint n'émet pas de CO<sub>2</sub>.

# Références (1/2)

WAGNER (F.) , *Electricity by intermittent sources: an analysis based on the German situation 2012*, Eur. Phys.J. Plus, **129** : 20 (2014)

GRAND (D.), LE BRUN (C.) et VIDIL (R.), *Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique* Techniques de l'Ingénieur, IN-301 (2015)

GRAND (D.), LE BRUN (C.) et VIDIL (R.) *Un mix électrique 100% renouvelable: avec quelles conséquences?* Revue de l'Energie, 631 (2016)

GRAND (D.), LE BRUN (C.), VIDIL (R.) et WAGNER (F.) *Electricity production by intermittent renewable sources: a synthesis of French and German studies* Eur. Phys. J. Plus **131** : 329 (2016)

VIDIL (R.), LATROBE (A.), LE BRUN (C.), GRAND (D.) et FINON (D.) *Le mirage de mix électriques à très forte proportion d'énergies intermittentes* Revue de l'Energie, 634 (2016)

TREINER (J.) *Le stockage de l'énergie, vessies et lanternes* Blog Mediapart (2016) <https://blogs.mediapart.fr/jacques-treiner/blog>

# Références (2/2)

TOURNERY (J.) *Les stations de pompage (STEP)*, Encyclopédie de l'Énergie (2016) <http://encyclopedie-energie.org/articles/les-stations-de-pompage-step>

DEGRANCOURT (T.) *Accumulateurs: le futur du stockage d'énergie*, Encyclopédie de l'Énergie (2016) [http://encyclopedie-energie.org/articles/accumulateurs-le-futur-du-stockage-d'énergie](http://encyclopedie-energie.org/articles/accumulateurs-le-futur-du-stockage-d-energie)

ALLEAU (T.) *L'hydrogène* Encyclopédie de l'Énergie (2015) [http://encyclopedie-energie.org/articles/l'hydrogène](http://encyclopedie-energie.org/articles/l-hydrogene)

ANCRE *Prospective énergétique France 2050 : le scénario de l'ANCRE pour la Loi de Transition Énergétique* Encyclopédie de l'Énergie (2017) [http://encyclopedie-energie.org/articles/prospective-énergétique-france-2050-le-scénario-de-lancre-pour-la-loi-de-transition](http://encyclopedie-energie.org/articles/prospective-energetique-france-2050-le-scenario-de-lancre-pour-la-loi-de-transition)

WAGNER (F.) *Surplus from and storage of electricity generated by intermittent sources* Eur. Phys. J. Plus **131** : 445 (2016)