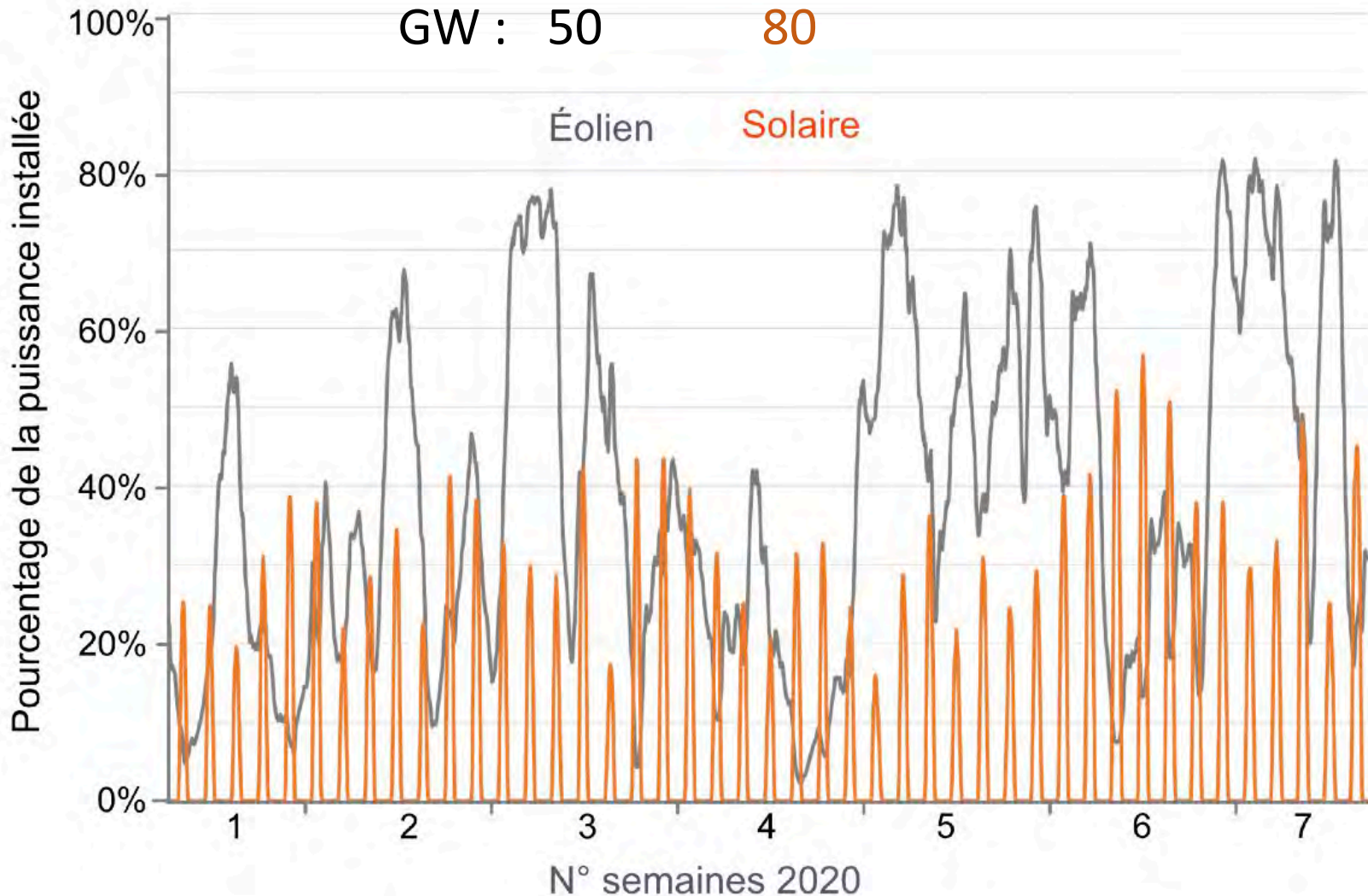

Les défis posés par les mix électriques à fort taux de renouvelables

Dominique GRAND, Christian LE BRUN et Roland VIDIL
GIRE et Hydro21

Préambule

- Scénarii de mix électrique en 2050 (NegaWatt, ADEME, Académie des Technologies, RTE)
- A base d'hypothèses de productions annuelles (éolien, solaire, hydraulique, nucléaire, biomasse, gaz,...)
- **Sous-estimant ou ignorant**, avant RTE 2021,
une contrainte forte du réseau électrique :
Production électrique = Consommation à tout instant.
- Dès 2014 Friedrich Wagner, et à sa suite GIRE (2015) démontraient :
*La nécessité de **transférer un quart de la production intermittente** des périodes de surplus vers les pénuries.*

Productions éoliennes et solaires enregistrées



Puissances
installées
nécessaires pour
produire 100
TWh/an

Éolien : 50 GW

Solaire : 80 GW

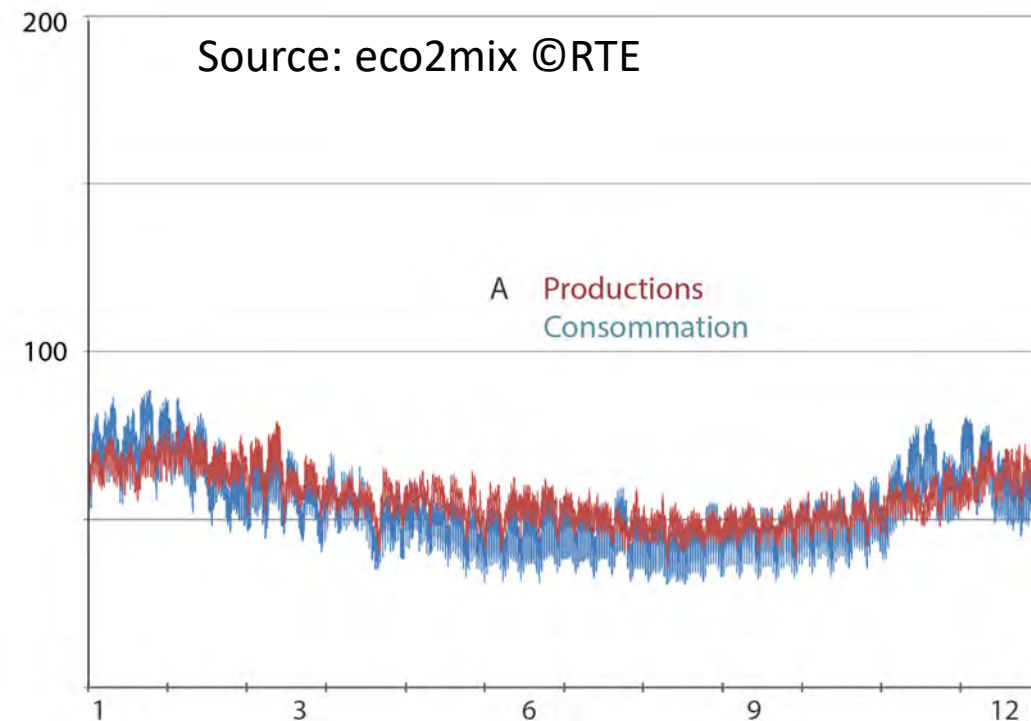
Facteurs de charge:

Éolien : 24%

Solaire: 14%

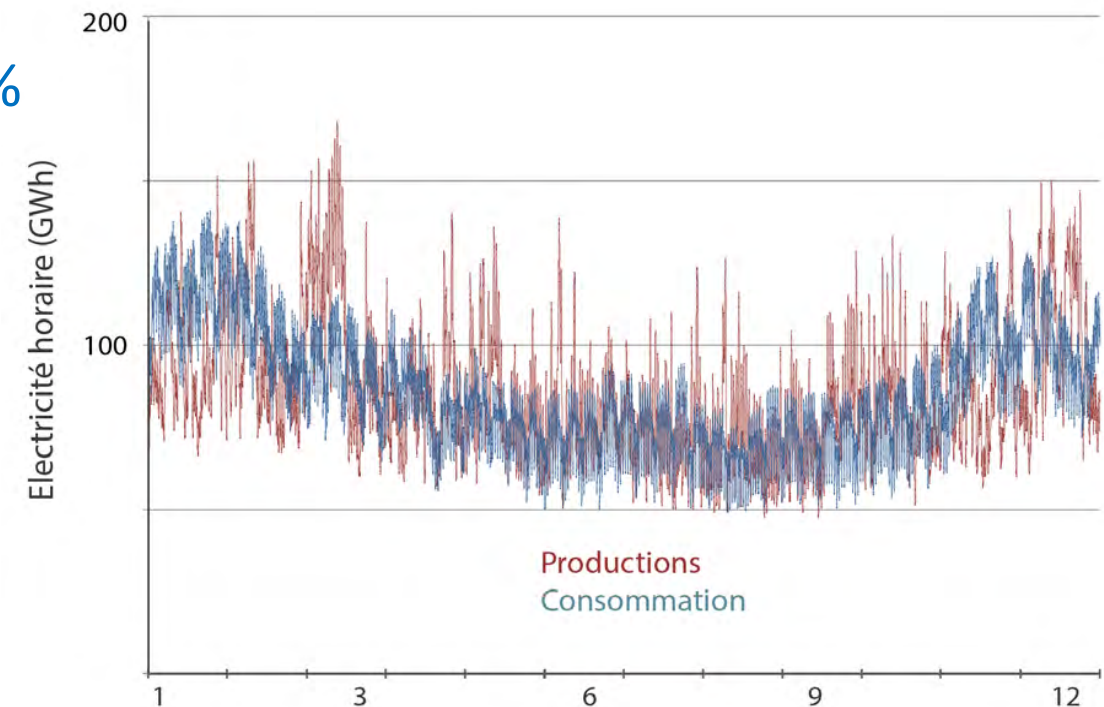
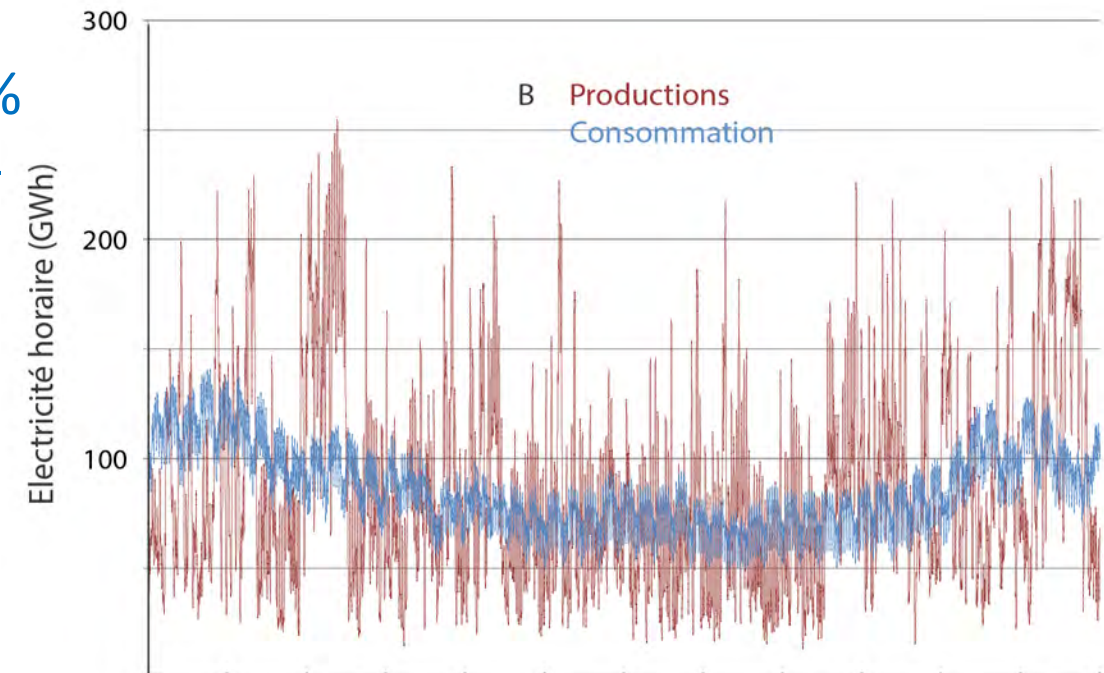
2019 et projections

100%

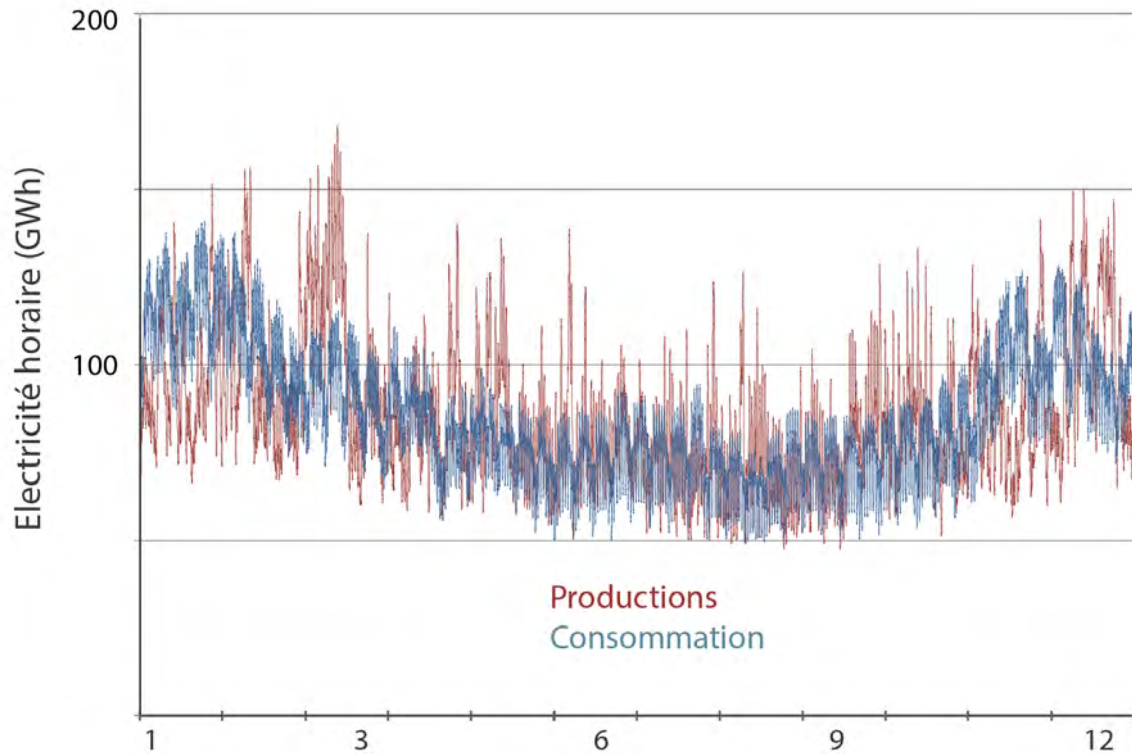


50%

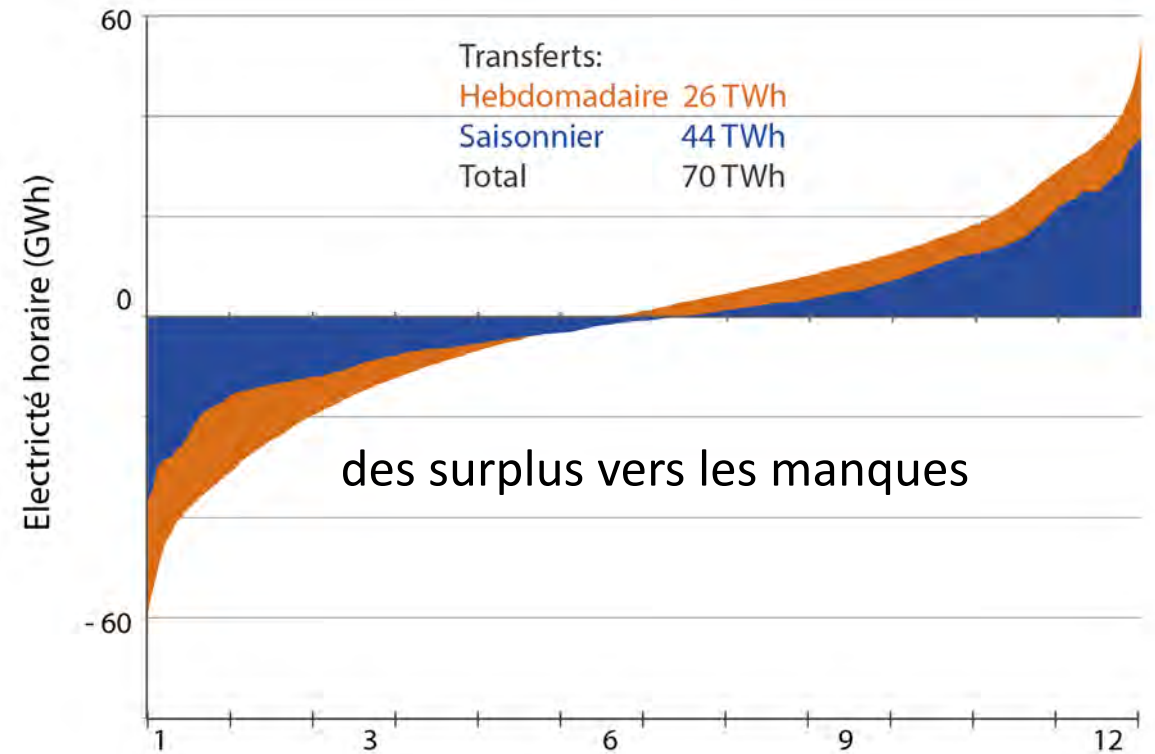
Energie TWh	Conso	Nucléaire	Eolien	Solaire	Hydro	Biomasse
Valeurs 2019	470,8	379,2	33,8	12,1	59,5	9,7
Scénario 100%	750	0	520	130	60	40
Scénario 50%	750	375	220	55	60	40



Scénario 50%



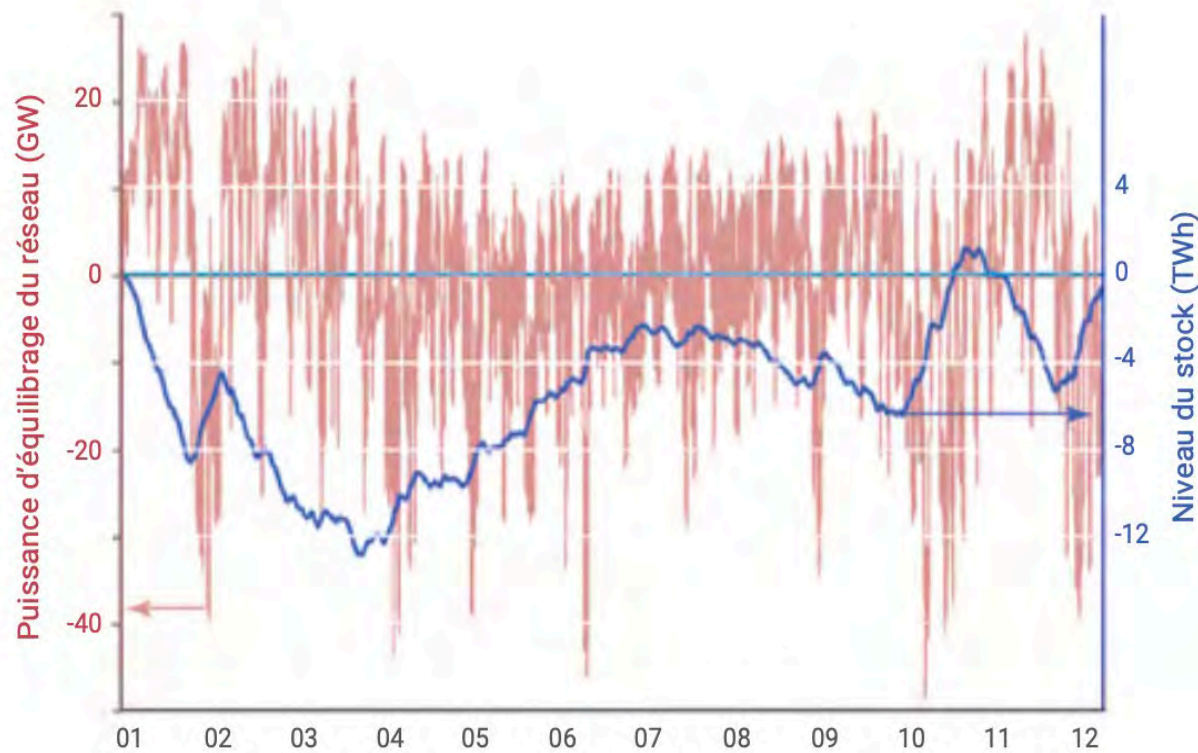
Historique



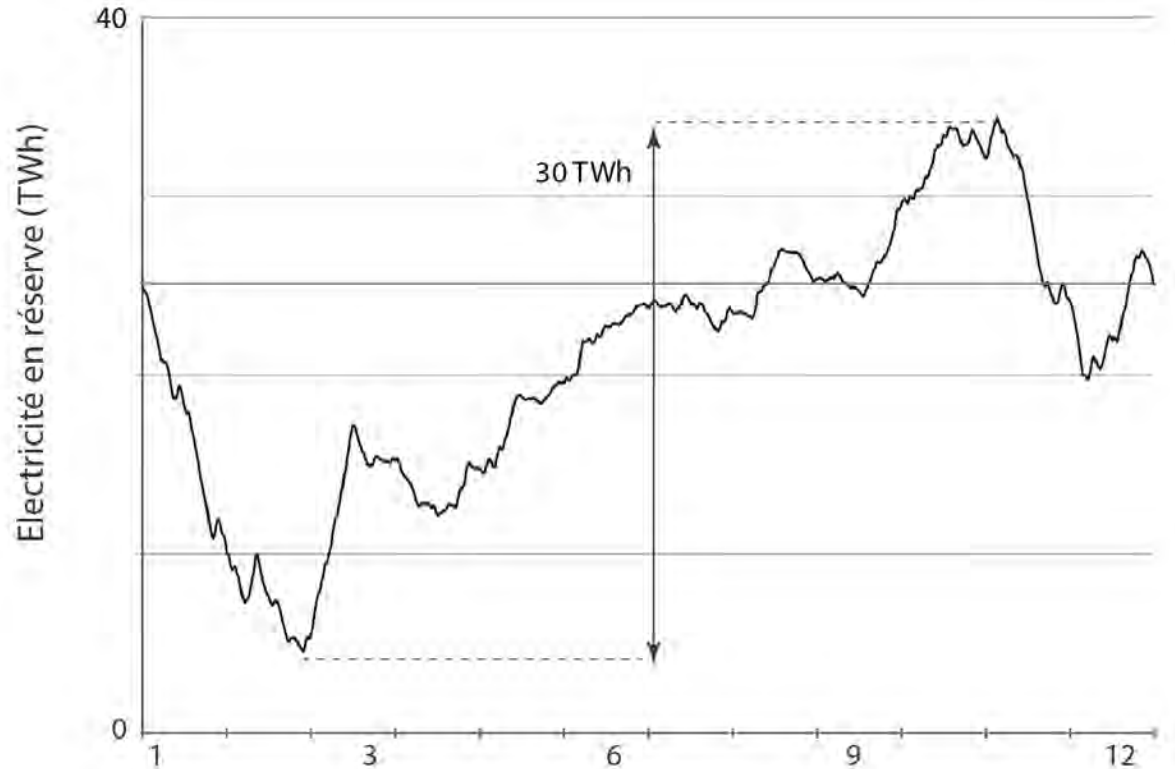
Monotone de Conso – Prod

Transférer 70 TWh pour 275 TWh produits par éolien et solaire = 25,5%
Scénario 100% : transférer 159 TWh pour 650 TWh produits = 24,5%

« Y'a qu'à stocker! »



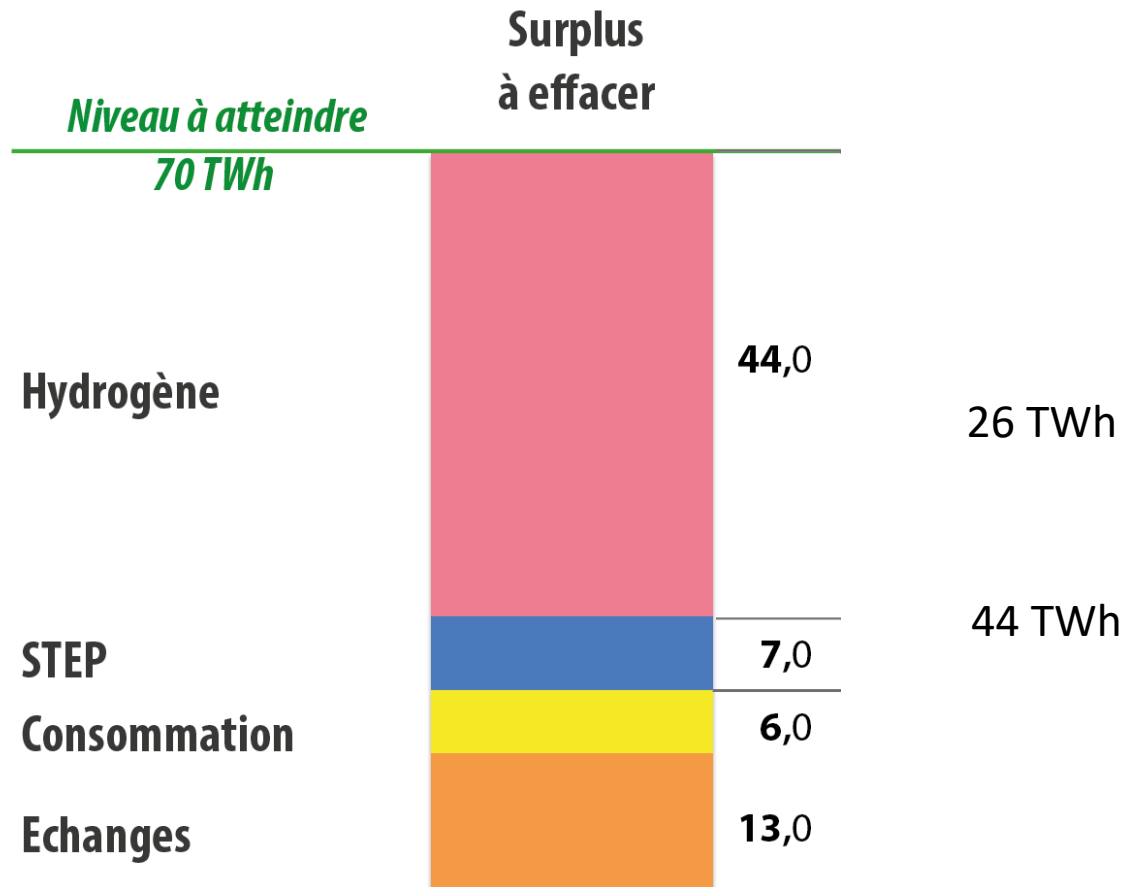
Reflets de la Physique



CRAS Chimie 2021

Besoin de capacité de stockage de plusieurs dizaines de TWh
(entre 8 et 11% de la production d'éolien et solaire)

Comment?



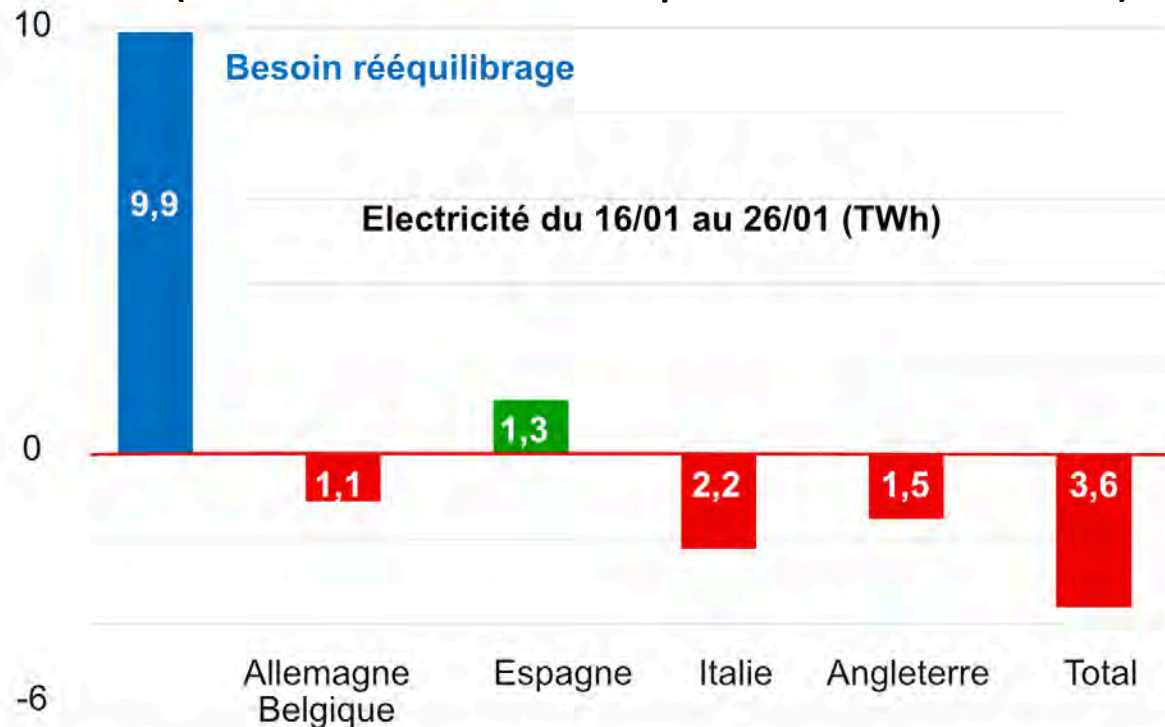
- Journalier
 - Échanges transfrontaliers
 - Effacement consommation (VEL)
- Hebdomadaire
 - STEP
- Saisonnier
 - Productions pilotables (hydraulique, nucléaire)
 - Stockage d'hydrogène

Echanges transfrontaliers

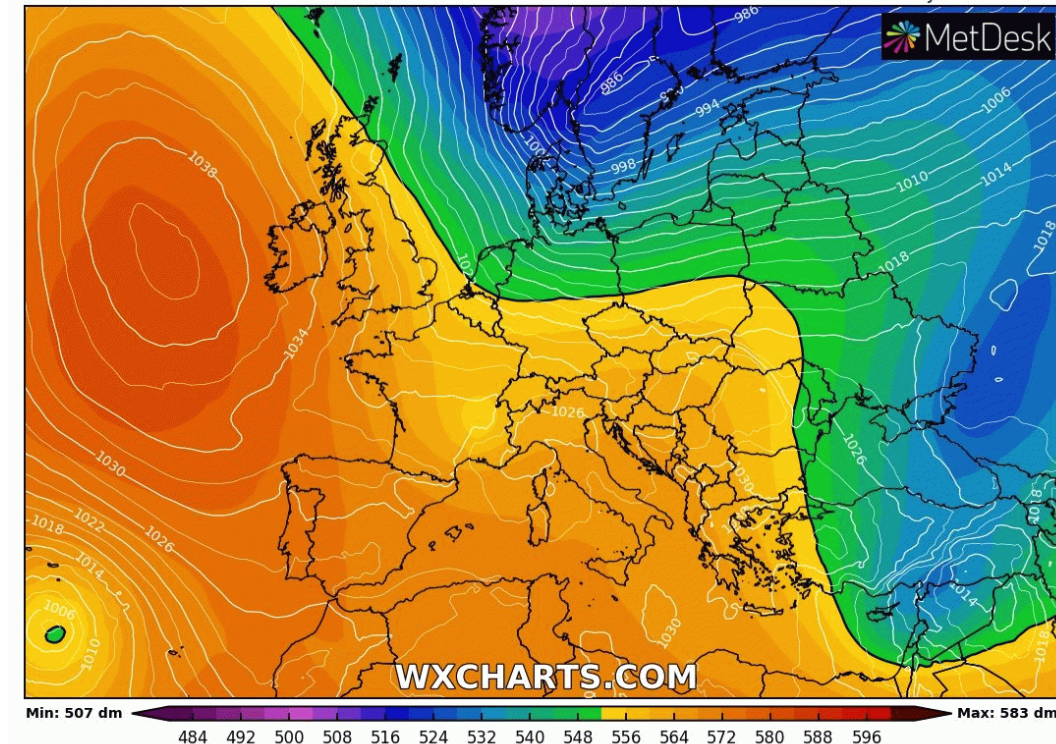
Contexte européen de productions pilotables en réduction,

Foisonnement des productions ENR?

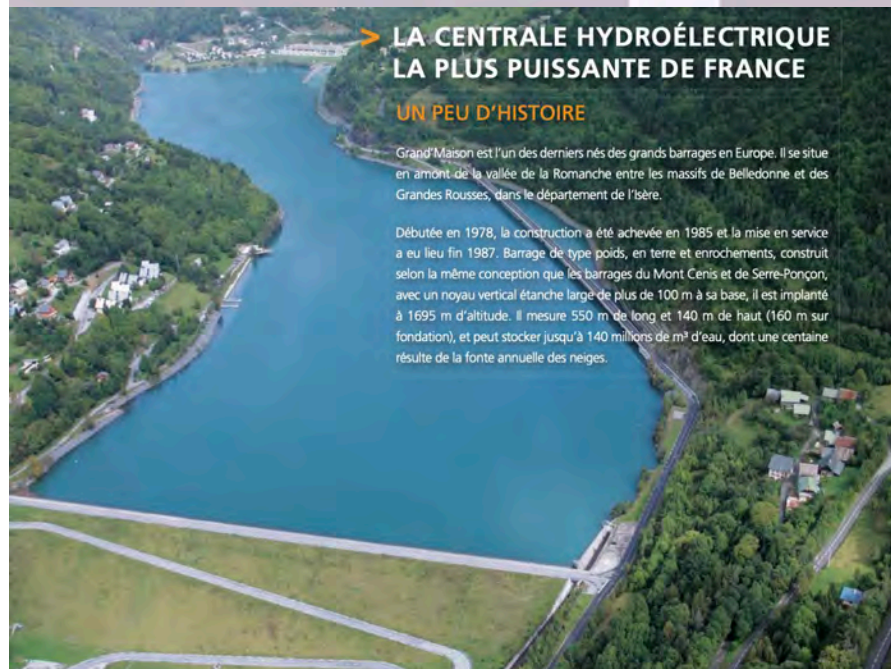
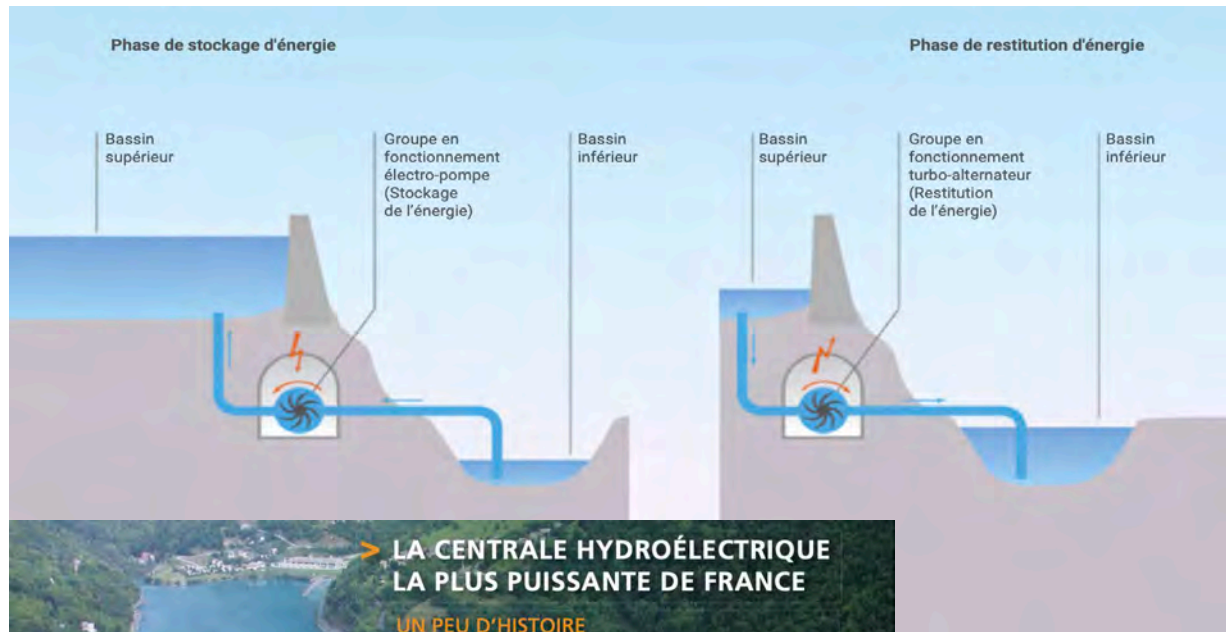
- Solaire: évidemment pas
- Apport du foisonnement éolien à la France (scénario 100% en période hivernale)



M. Fontecave et D. Grand, CRAS Chimie 2023



Stockages journalier et hebdomadaire



Crédit: EDF

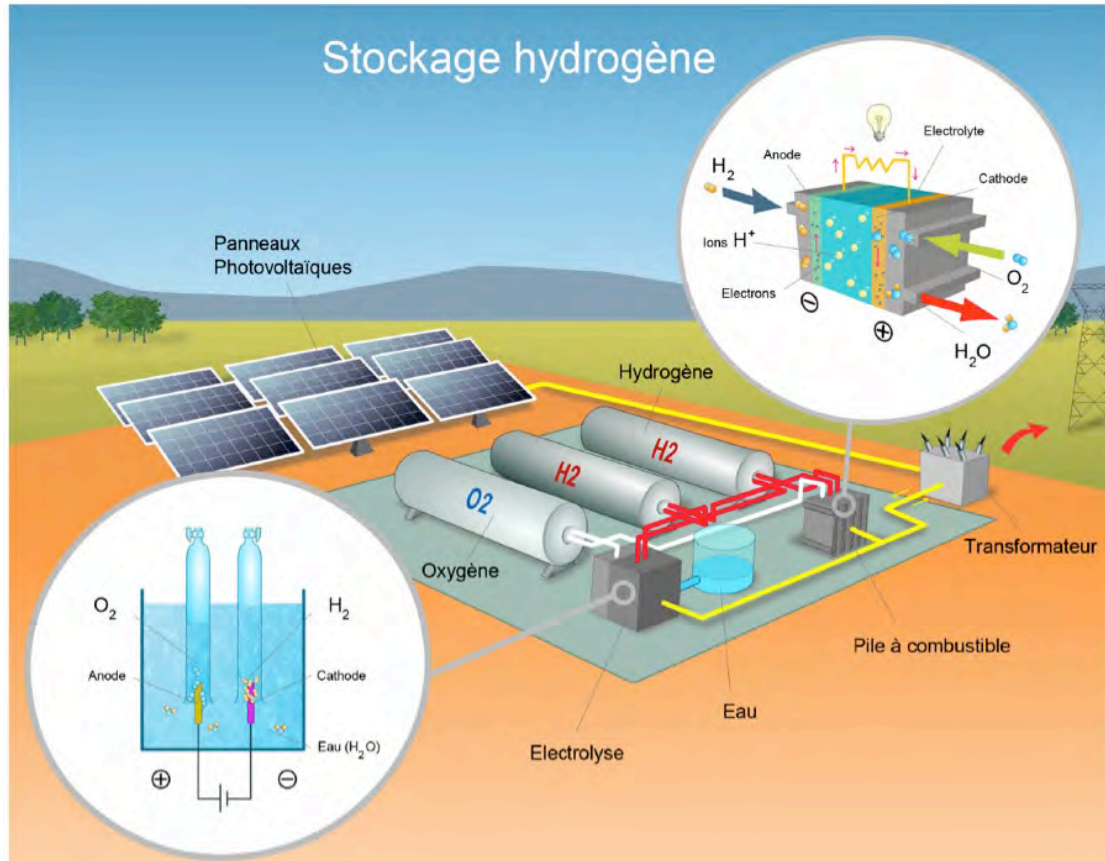


By Smnt - Own work, CC BY-SA 4.0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=85278008>

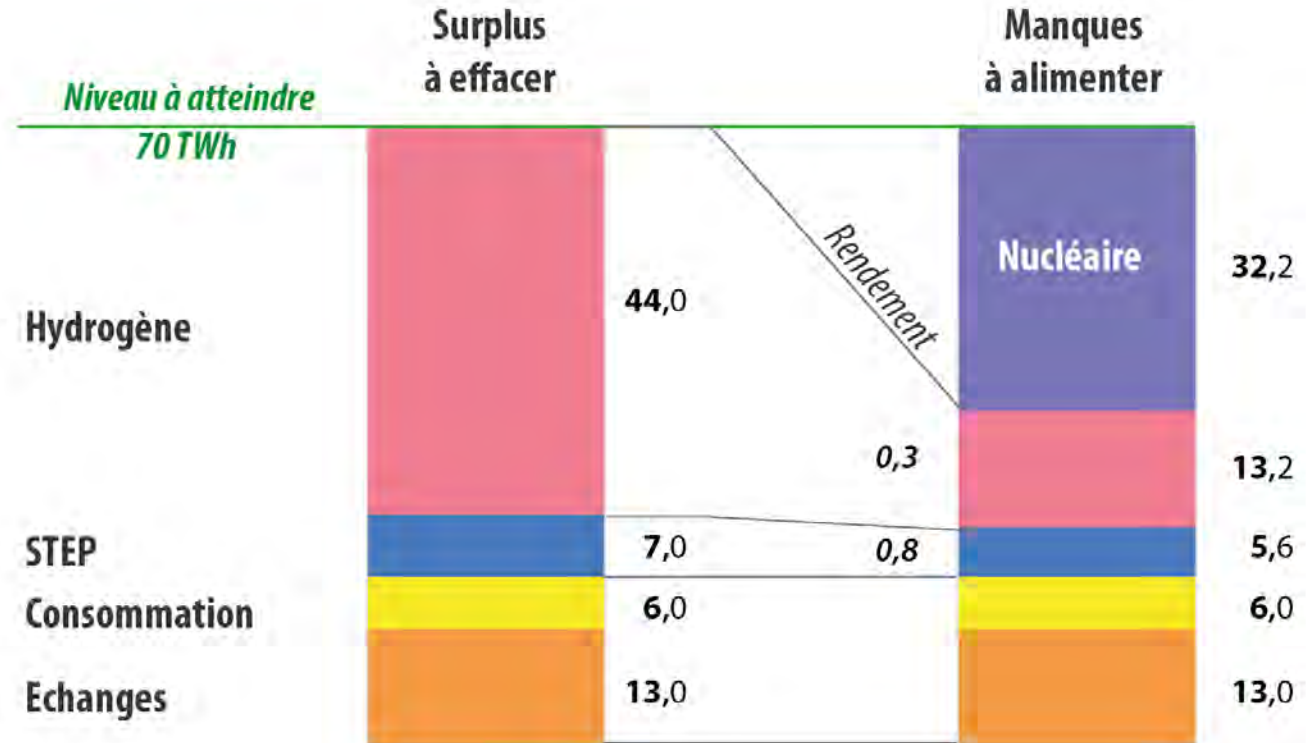
STEP
Capacité
= $35 \cdot 10^{-3}$ TWh

Mégabatteries
Capacité
= $0,8 \cdot 10^{-3}$ TWh

Stockage saisonnier: hydrogène



Rendement 25% à 30% au mieux



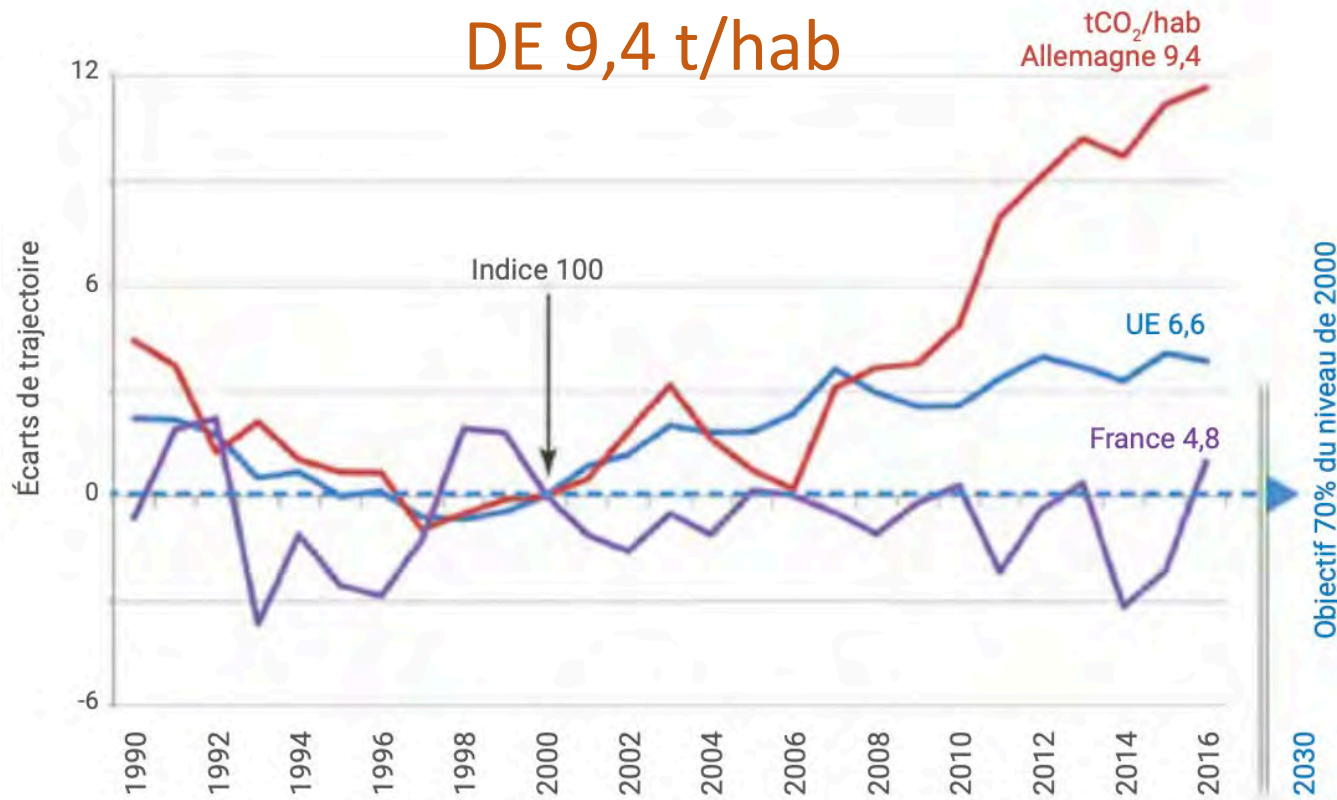
Pertes à compenser par le nucléaire pilotable

Evolution du CO2 en Europe

Emissions totales

FR 4,8 t/hab

DE 9,4 t/hab



Part électrique

« L'intensité des émissions de la production française en 2023 (32g de CO₂eq/kWh) est 10 fois inférieure à celle de l'Allemagne et plus de 8 fois inférieure à celle de l'Italie »

RTE bilan électrique 2023

Conclusions

- Un quart de la production électrique éolienne et solaire non utilisable instantanément doit être transférée des périodes de surplus aux périodes de manques
- Le foisonnement des productions éoliennes en Europe est très faible
- La construction de lignes transfrontalières bénéficiera aux pays exportateurs d'électricité en périodes de pénuries, grâce à des productions pilotables ou des stocks
- Pour passer la période hivernale critique, le stockage par hydrogène coûteux ne suffira pas compte tenu de son faible rendement
- Les productions pilotables bas carbone sont indispensables pour atteindre les objectifs climatiques (nucléaire et hydraulique)



- 1• F. Wagner, "Electricity by intermittent sources: an analysis based on the German situation 2012", *Eur. Phys. J. Plus* **129**:20 (2014).
- 2• D. Grand, C. Le Brun et R. Vidil, « Intermittence des énergies renouvelables et mix électrique », *Techniques de l'Ingénieur*, IN-301 (2015).
- 3• T. Linnemann et G.S. Vallana, "Wind energy in Germany and Europe", *Atw. Internationale Zeitschrift für Kernenergie* **64**(3) (2019) 141-148.
- 4• D. Grand, C. Le Brun, R. Vidil et F. Wagner, "Electricity production by intermittent renewable sources: a synthesis of French and German studies", *Eur. Phys. J. Plus* **131**: 329 (2016).
- 5• D. Grand et M. Fontecave, « Le foisonnement éolien : les limites d'un mix électrique à forte proportion d'énergies renouvelables intermittentes », *Comptes Rendus Chimie*, **26** (2023) 63-75. DOI : 10.5802/crchim.232
- 6• D. Grand, C. Le Brun et R. Vidil, « Un mix électrique à 100 % renouvelable : avec quelles conséquences ? », *La revue de l'énergie* **631** (2015) 192-206.
- 7• M. Fontecave et D. Grand, « Les scénarios énergétiques à l'épreuve du stockage des énergies intermittentes », *Comptes Rendus Chimie*, **24**(2) (2021) 331-350. (<https://doi.org/10.5802/crchim.115>).