

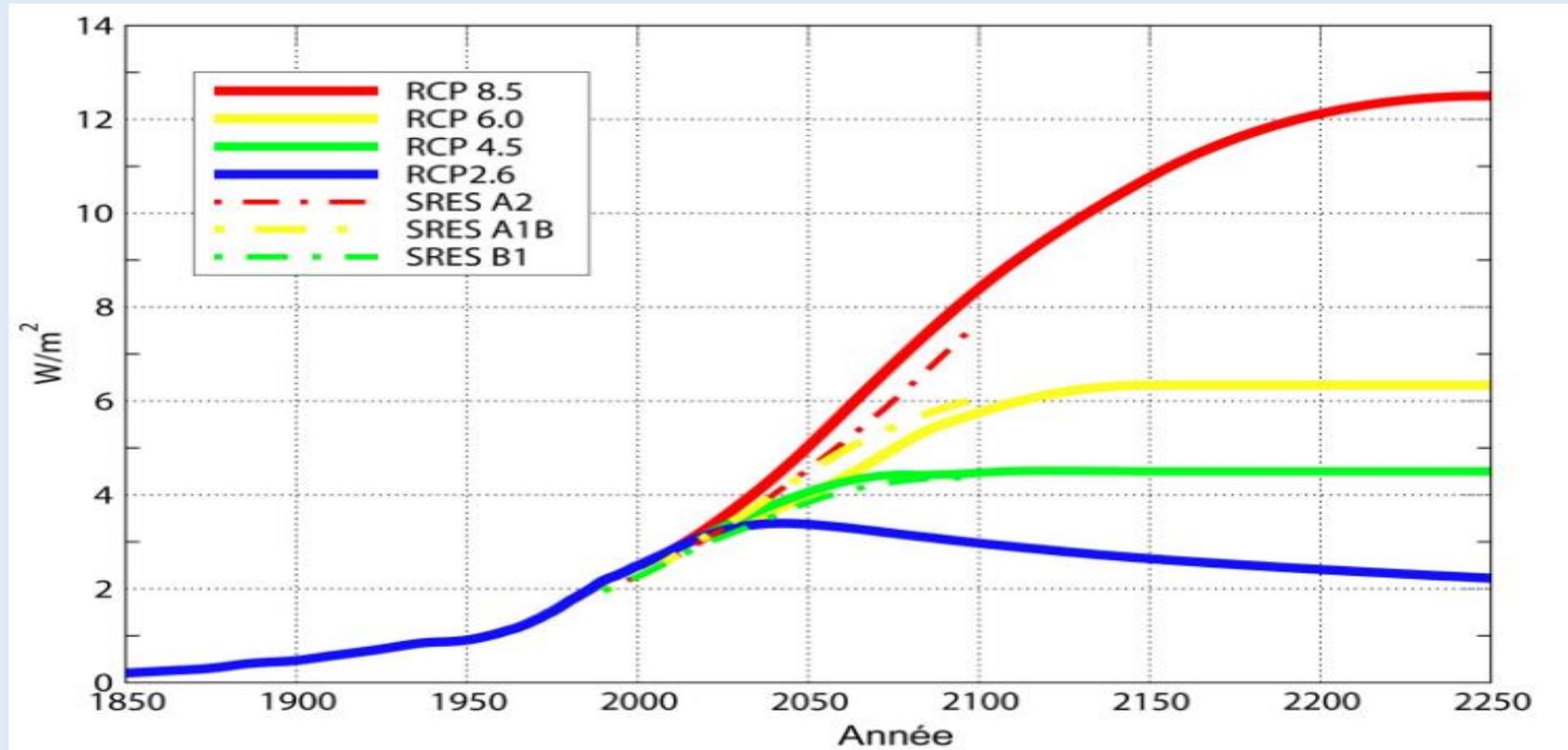
CONFERENCE SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES ELECTRIQUES INTERMITTENTES

SAINT VINCENT DE BARRES

12 JUIN 2019

TRANSITION ENERGETIQUE POUR LIMITER LA HAUSSE DES TEMPERATURES

➤ Les climatologues du GIEC ont pris plusieurs hypothèses démissions de GES en fonction du temps. On les appelle les RCP. Voici ce qu'elles donnent en augmentation de température d'ici 2100.



QUELQUES ÉLÉMENTS PRÉALABLES SUR L'ÉNERGIE EN FRANCE

CONSOMMATION D'ÉNERGIES FINALES EN 2017 (Source CGDD)

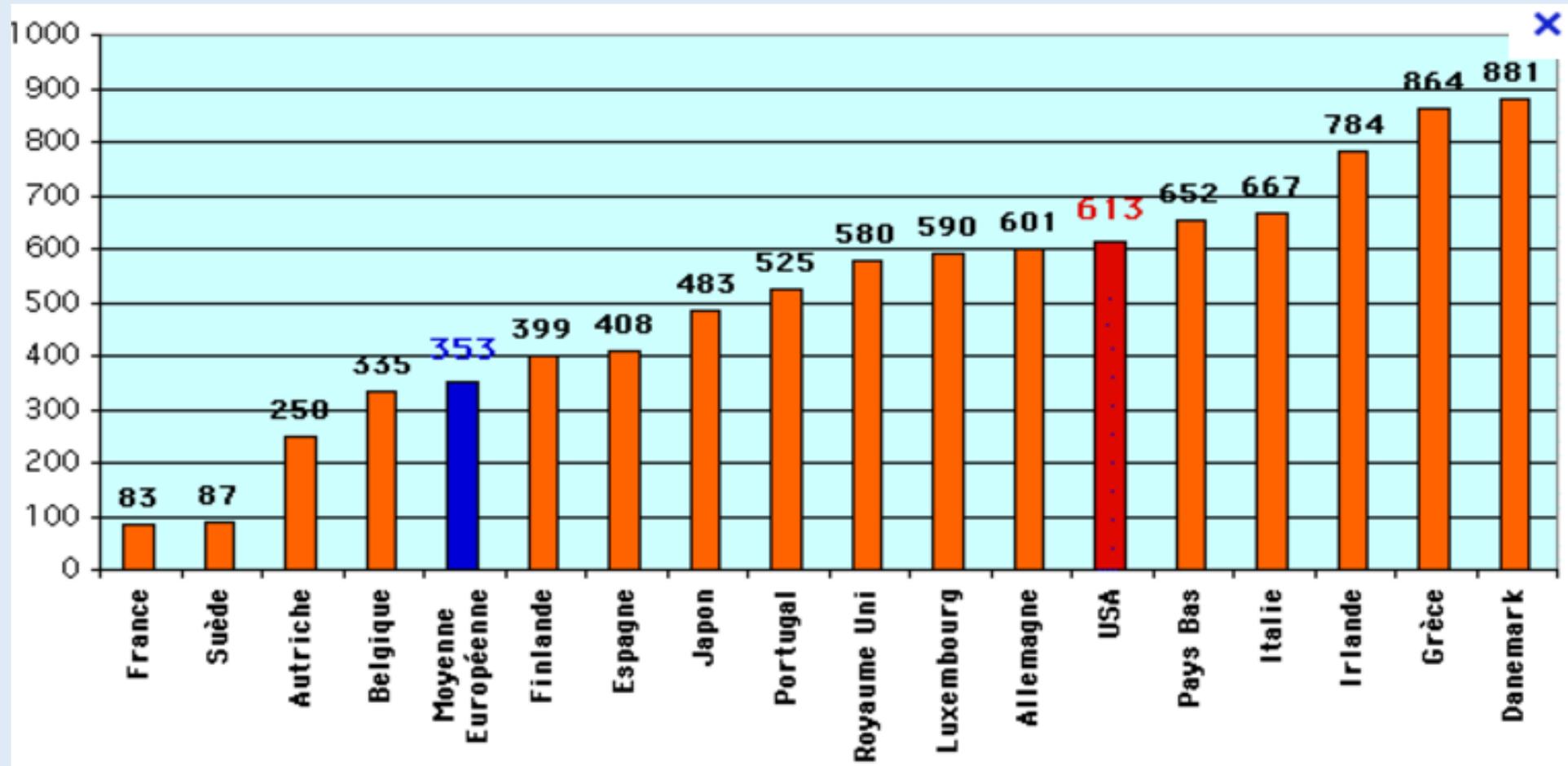
Energies finales carbonées	Millions de tonnes équivalent pétrole Mtep
Charbon	1,3 Mtep
Produits pétroliers	54,3 Mtep (67-12,7 non énergétique)
Gaz	29,6 Mtep
Chaleur charbon	3,4 Mtep
TOTAL Carbonées	88,6 Mtep
Energies finales décarbonées	Millions de tonnes équivalent pétrole Mtep
Electricité nucléaire + hydraulique + aléatoire	38 Mtep
EnR thermique (biomasse + Pompes à chaleur + biocarburants)	14,5 Mtep
TOTAL décarbonées	52,5 Mtep
Total Général	141,1 Mtep

➤ Pour faire simple :

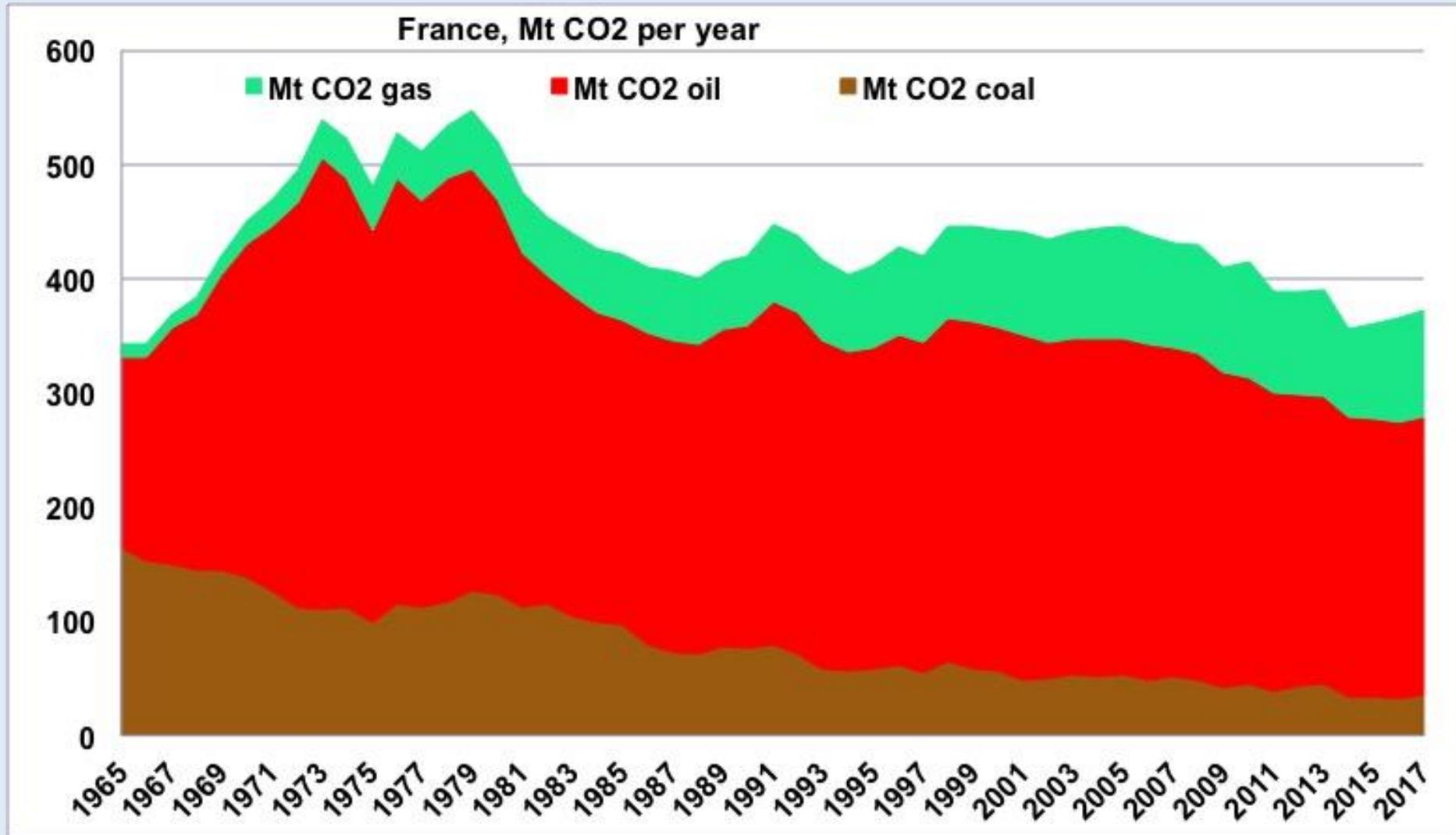
- les produits pétroliers servent essentiellement aux transports et une partie pour le chauffage résidentiel tertiaire,
- Le gaz sert au chauffage,
- Le charbon à l'industrie et au chauffage

➤ L'achat des combustibles carbonés coûtent au pays entre 60 et 70 Mds d'€/an qui sortent de la zone €

GRAMMES DE CO2 POUR PRODUIRE UN kWh ELECTRIQUE



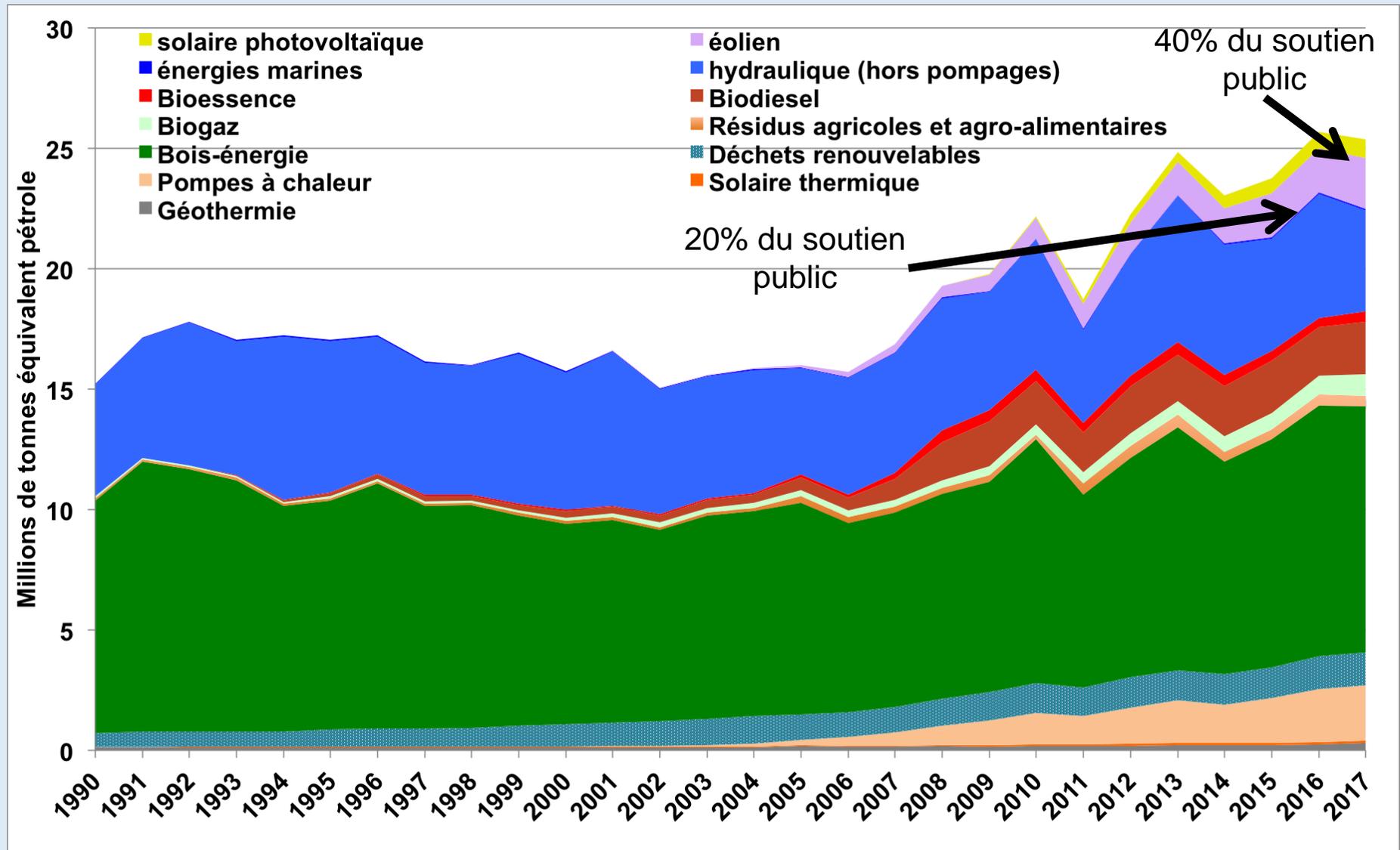
D'où vient le CO₂ tricolore ?



Du pétrole, du gaz et du charbon et pas de l'électricité !

Emissions de CO₂ en France depuis 1965. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review, 2018

Où sont nos ENR tricolores ?



CSPE (éolien et PV) TTC 2019 = 6,36 Mds d'€ (Source CRE)

ENR produites en France, en millions de tonnes équivalent pétrole d'énergies primaires (sur un total de 240. Données CGDD)

LE PLUS SUR MOYEN DE SE TROMPER DE SOLUTION EST DE SE TROMPER DE PROBLEME !

- Les émissions de gaz carbonique qui menacent la survie de notre civilisation et d'une partie de la biodiversité proviennent de l'utilisation des combustibles carbonés **produits pétroliers (mobilité et chauffage) et gaz de chauffage soit 90 Mtep, et absolument pas de l'électricité 38 Mtep en France.**
- Or nous nous ruinons avec des électricité renouvelables aléatoires, éolien et PV, qui représentent un engagement de 160 Mds d'€ (120 + 40) pour remplacer de l'électricité décarbonée pilotable. **L'absurdité à l'état pur. D'autant que cela ne représente pratiquement rien en électricité.**
- En réalité, il faut consacrer nos maigres ressources financières, pour rénover les habitations qualifiées de « passoires thermiques » soit 7 millions de logements sur 27 millions et basculer la mobilité individuelle et les transports publics (35 Mtep de produits pétroliers) sur la mobilité électrique.

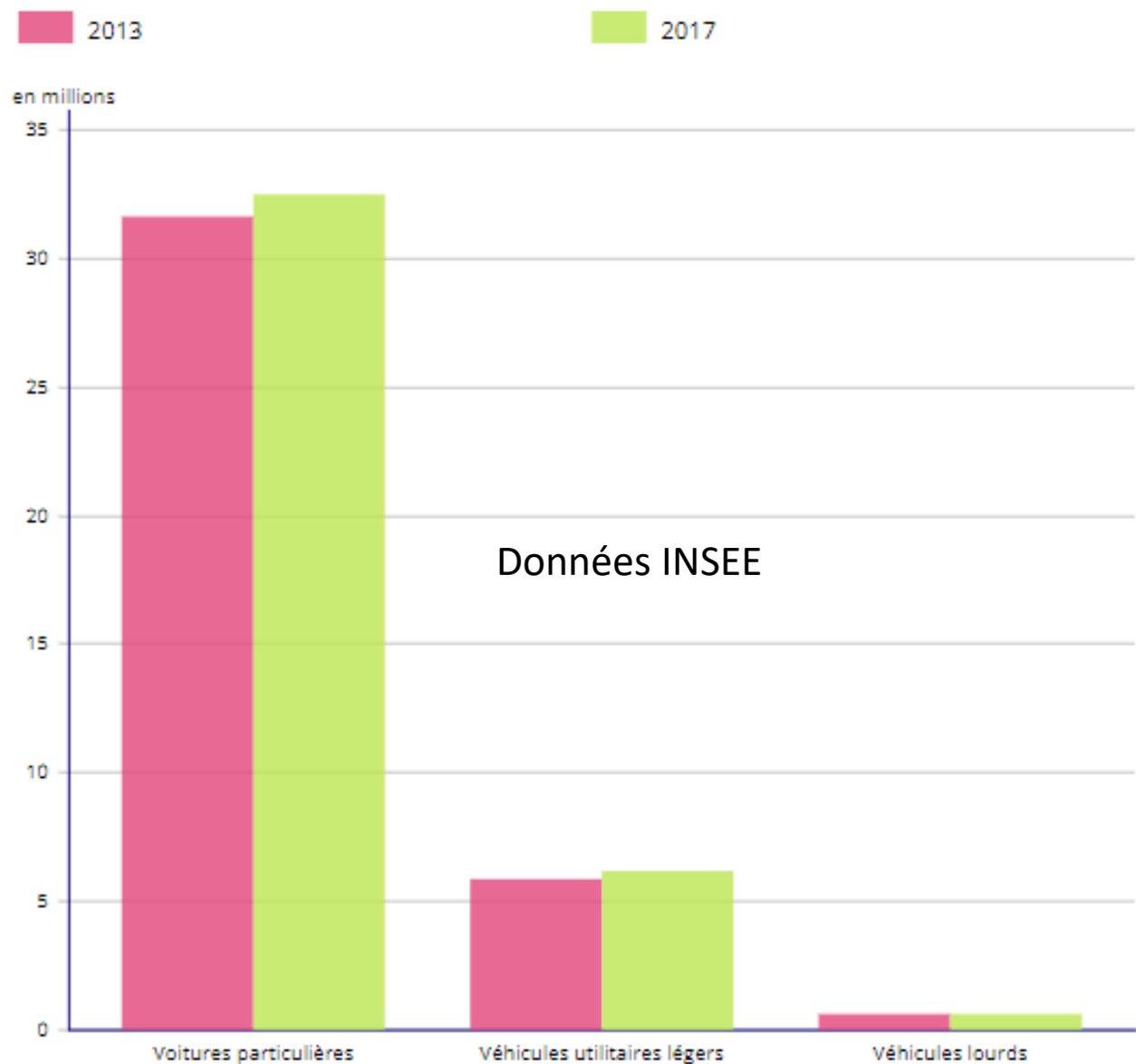
DEUX ACTIONS PRIORITAIRES POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE

- **1 - RENOVATION THERMIQUE DES LOGEMENTS MAL ISOLES (Economies d'énergie, confort et gain de pouvoir d'achat)**
- **7 millions de logements sur les 27 millions de logements en France,**
- **Coût moyen de rénovation y compris changement de chauffage : 30 000 €,**
- **Capacité de rénovation par les professionnels 700 000/an d'après RTE, 500 000 d'après l'ADEME et moins de 400 000 d'après le shift power et les professionnels,**
- **Si l'on prend 400 000, cela représente une somme annuelle de 12 Mds d'€/an, et une durée de 17,5 ans, 12 Mds d'€ à comparer aux 6,36 Mds d'€ payés aux EnR intermittentes,**
- **Les habitants, souvent en précarité énergétique, ne peuvent pas payer de telles sommes,**
- **L'Etat leur alloue un chèque énergie (contribuable) et fait du déficit balance des paiements,**
- **Il y a des solutions de financements plus intelligentes d'autant que cette opération crée des emplois non délocalisables. Baisse du nombre de chômeurs.**

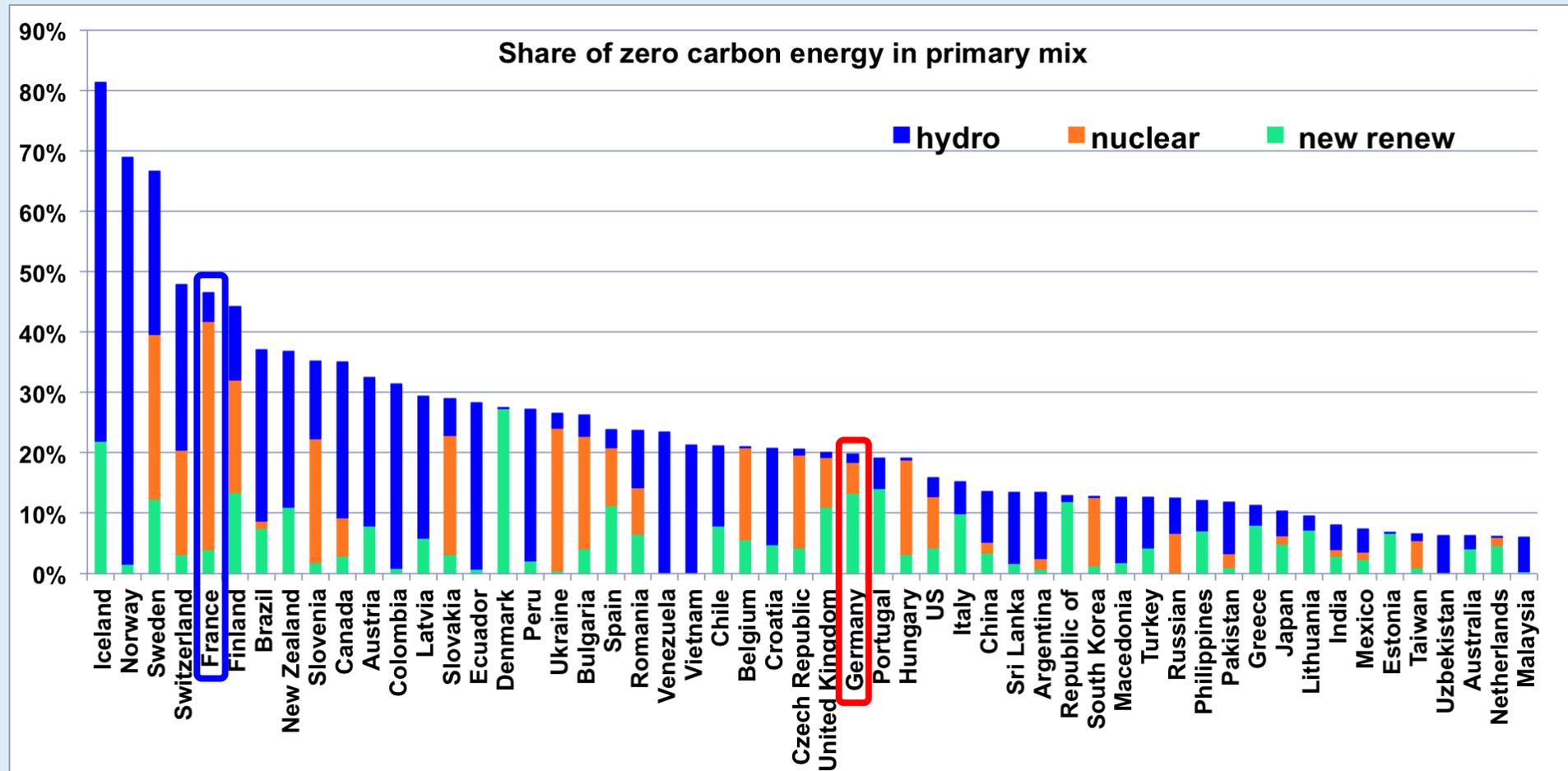
DEUX ACTIONS PRIORITAIRES POUR LA TRANSITION ENERGETIQUE

- **2 – La mobilité électrique. (économies d'énergie, diminution des rejets de CO2 et de la pollution, augmentation de la durabilité)**
 - **Nombre de véhicules individuels en France : 35 millions d'après l'INSEE,**
 - **Parcours moyen annuel 13 000 km, (INSEE),**
 - **Consommation moyenne annuelle 1tep en produits pétroliers soit 35 Mtep/an,**
 - **Emission moyenne de gaz carbonique 110 g/km (ADEME),**
 - **Durée moyenne de possession 8 ans (INSEE) en augmentation.**
- **Le passage au véhicule électrique fait gagner à minima un facteur 3 en rendement.**
 - **Si tout le parc de véhicules individuels était électrifié, la consommation passerait de 35 Mtep en produits pétroliers à 12 Mtep électrique (1 million de VE consomme 3,5 TWh).**
- **L'Etat a mis en place les dispositions financières.**

Véhicules en service en 2017 : parc moyen

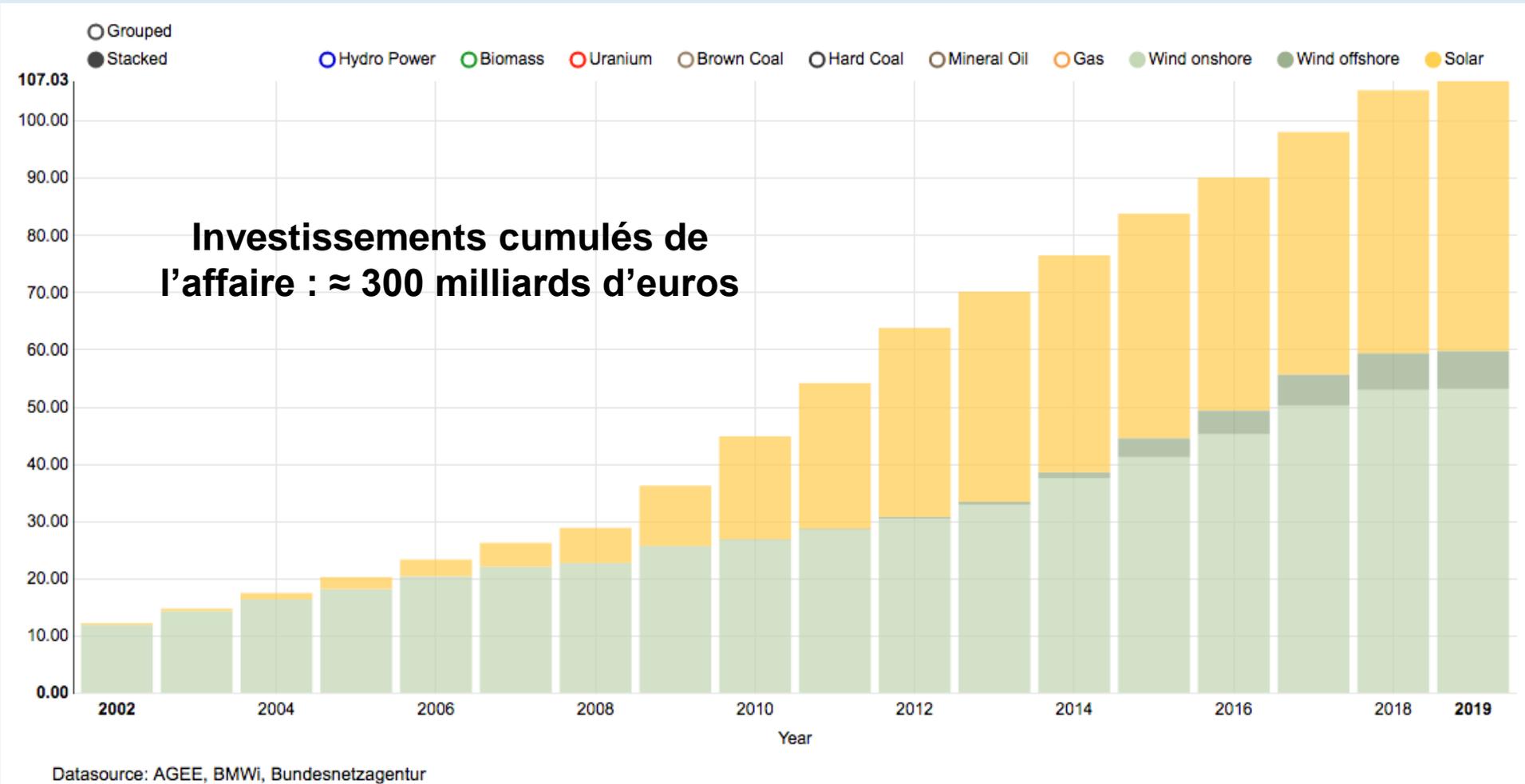


En retard, la France, vraiment ?



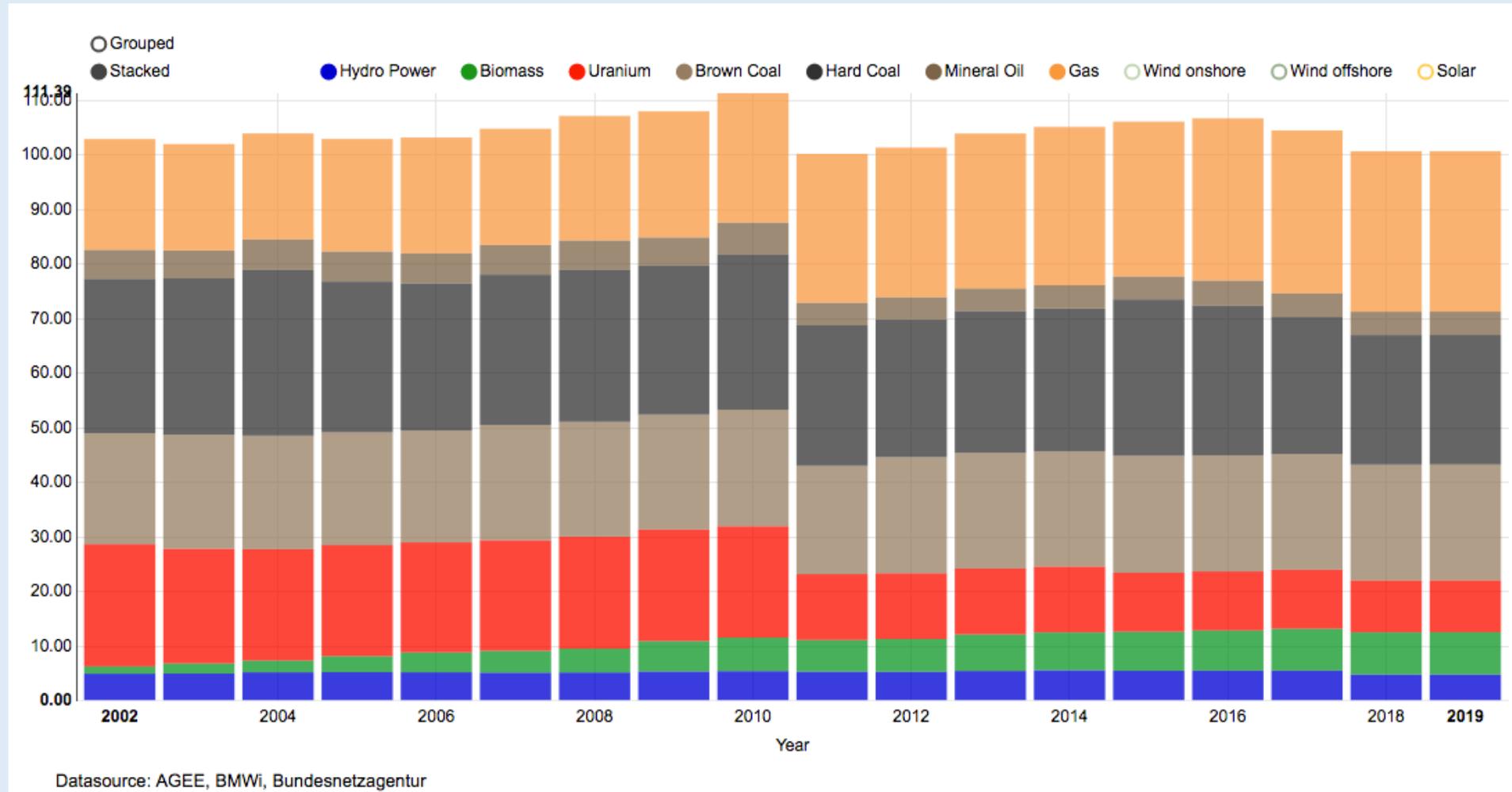
Part de l'énergie primaire « bas carbone » par pays. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review, 2018

Plus de GW renouvelables, c'est sur...



Capacités renouvelables non pilotables en Allemagne. Données Fraunhofer Institute, 2019

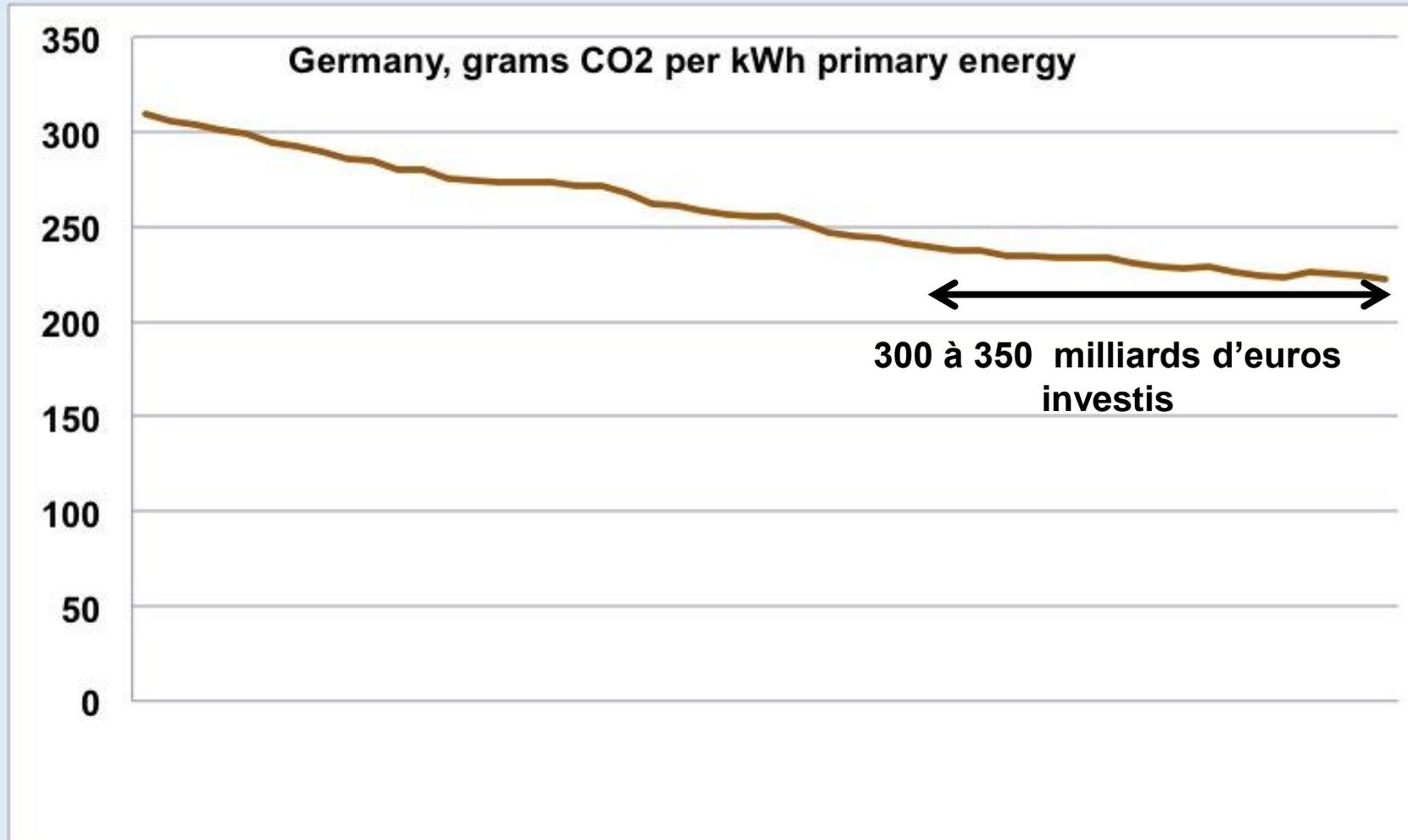
...Mais pas vraiment moins de pilotable pour autant !



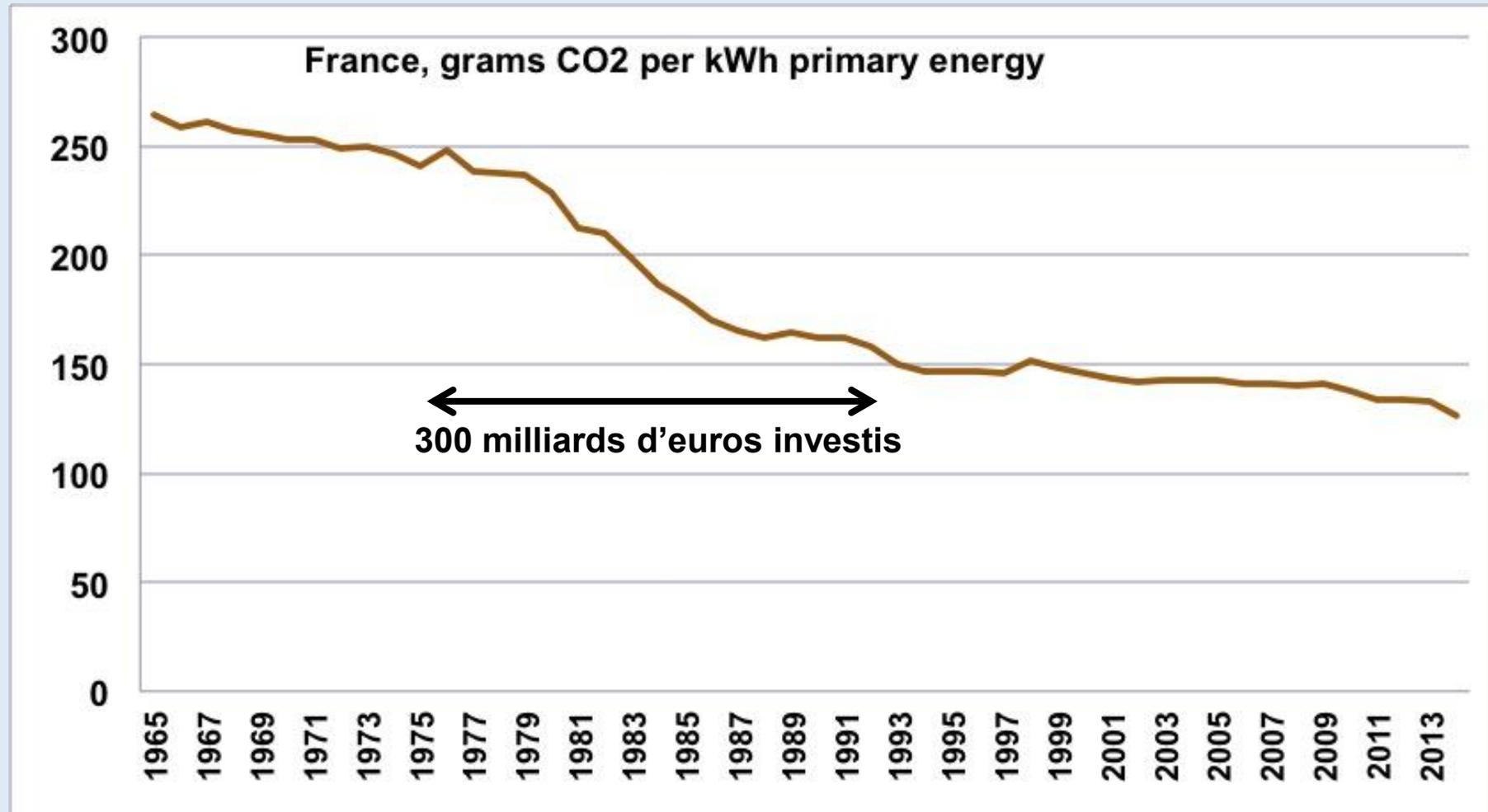
Capacités pilotables en Allemagne. Données Fraunhofer Institute, 2019

Jean Fluchère-Sauvons Le Climat

Il ne suffit pas d'investir pour décarboner...



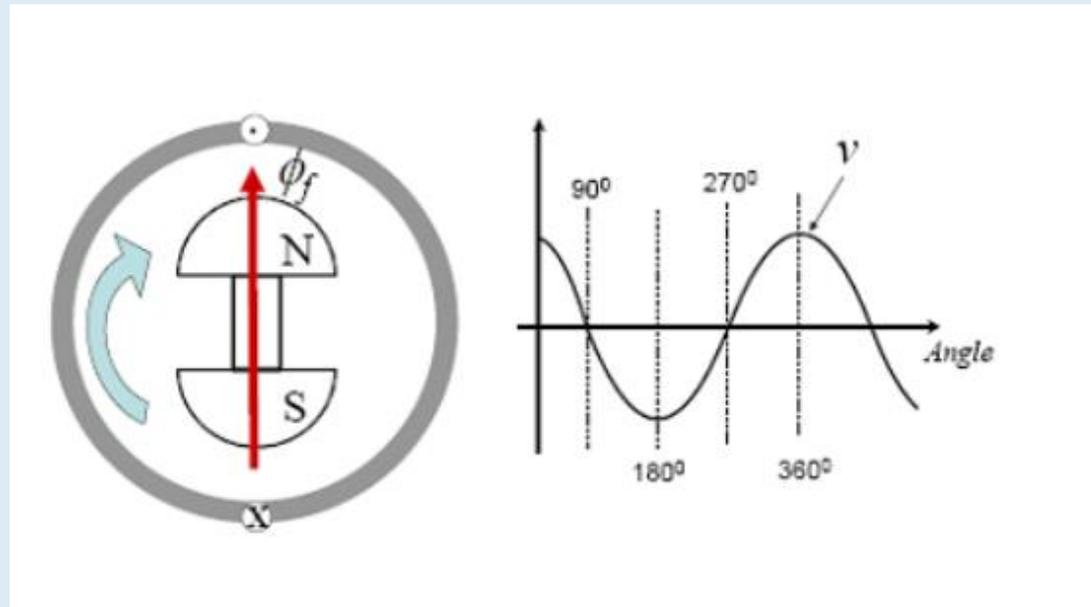
Emissions de CO2 par kWh d'énergie primaire en Allemagne depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review



Emissions de CO2 par kWh d'énergie primaire en France depuis 1965. Jancovici, sur données BP Statistical Review

COMMENT FABRIQUE-T-ON DE L'ÉLECTRICITÉ AVEC UNE MACHINE TOURNANTE ?

- Il suffit de faire tourner des aimants ou des électro-aimants 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

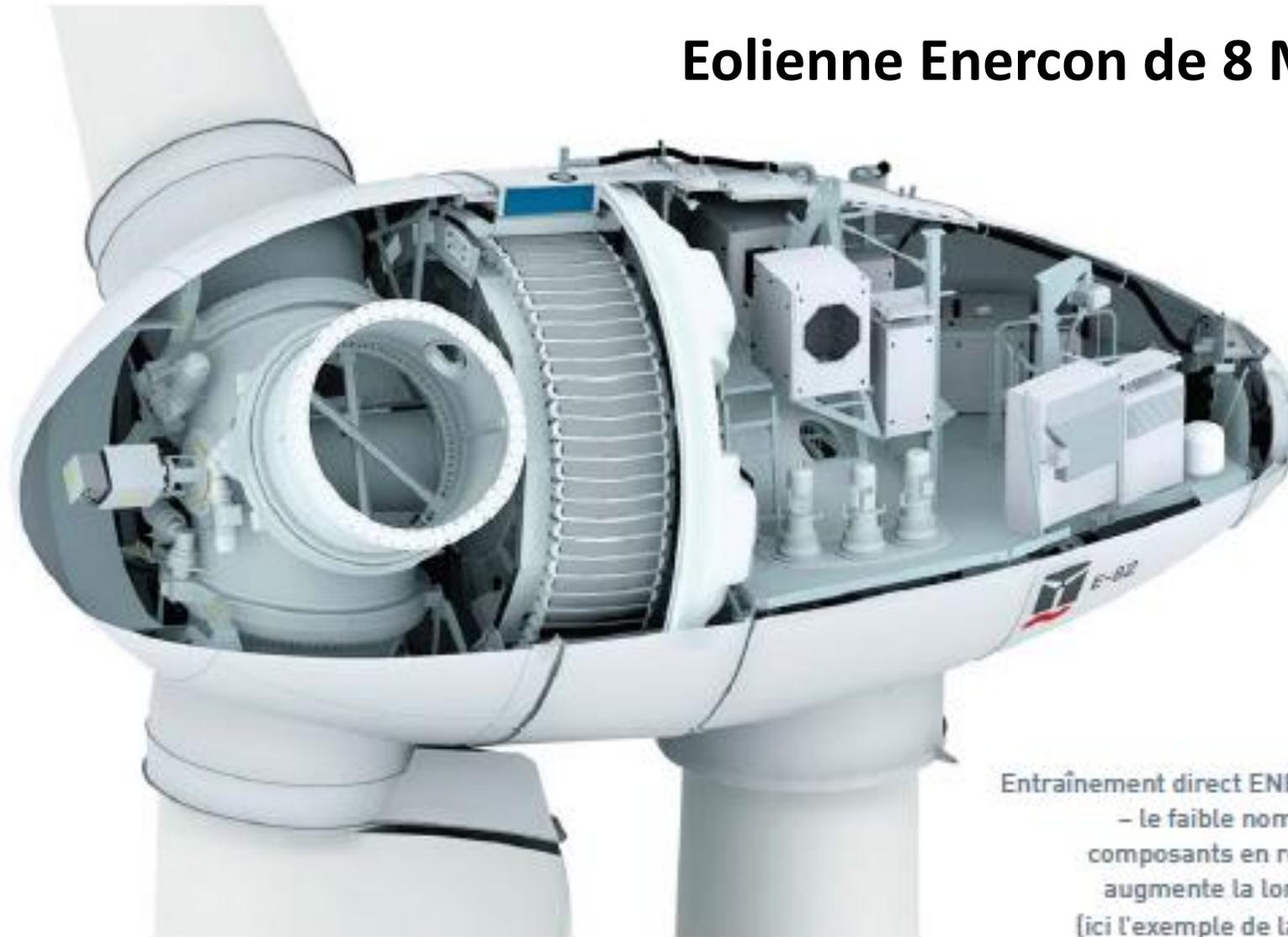




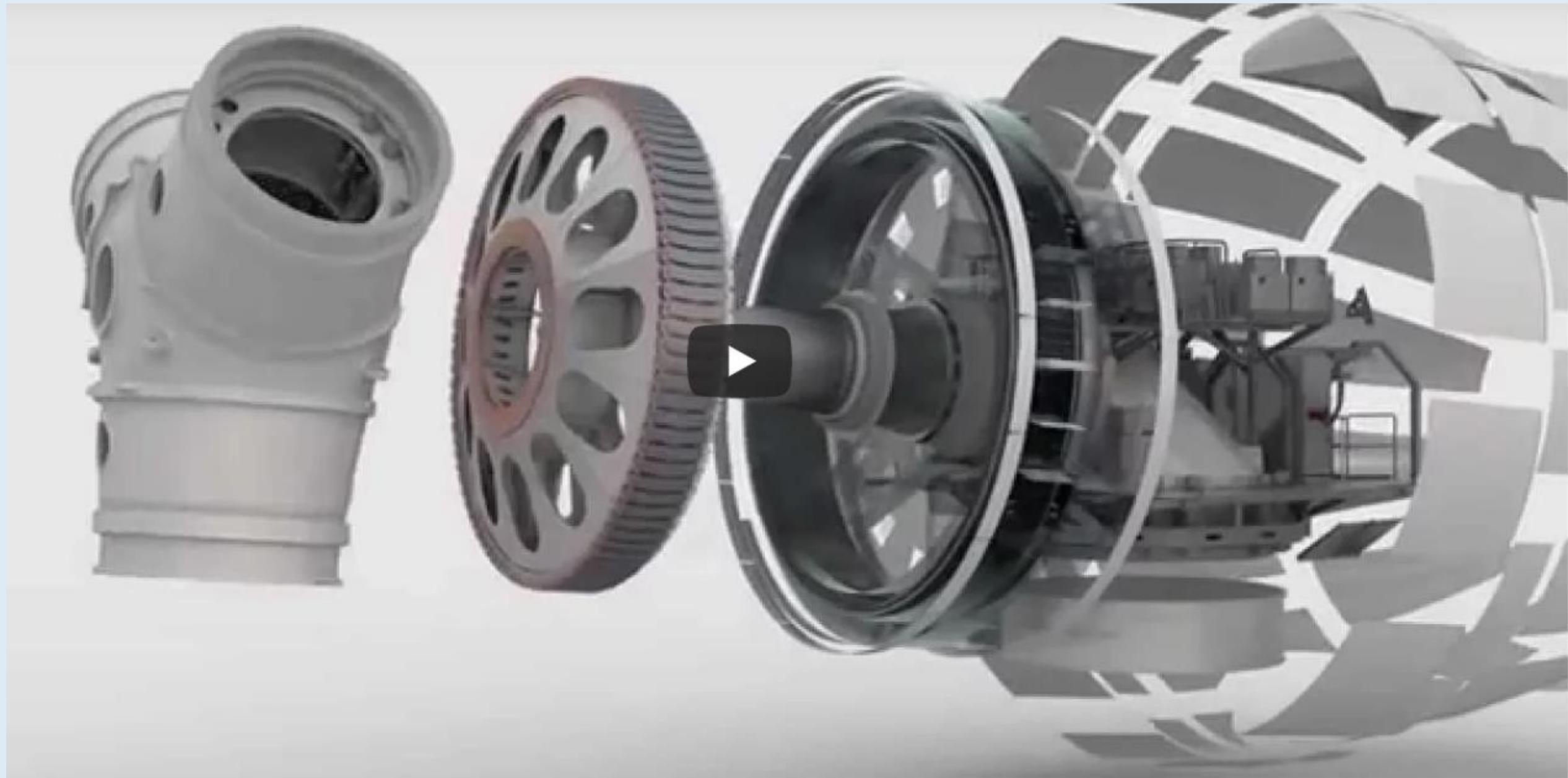
Aperçu des données techniques

Puissance nominale	4.650 kW
Diamètre du rotor	136 m
Hauteur du moyeu en mètres	109 / 120 / 132
Classe de vent (IEC)	IEC IA
Concept d'éolienne	sans boîte de vitesse, régime de rotation variable, convertisseur intégral

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]

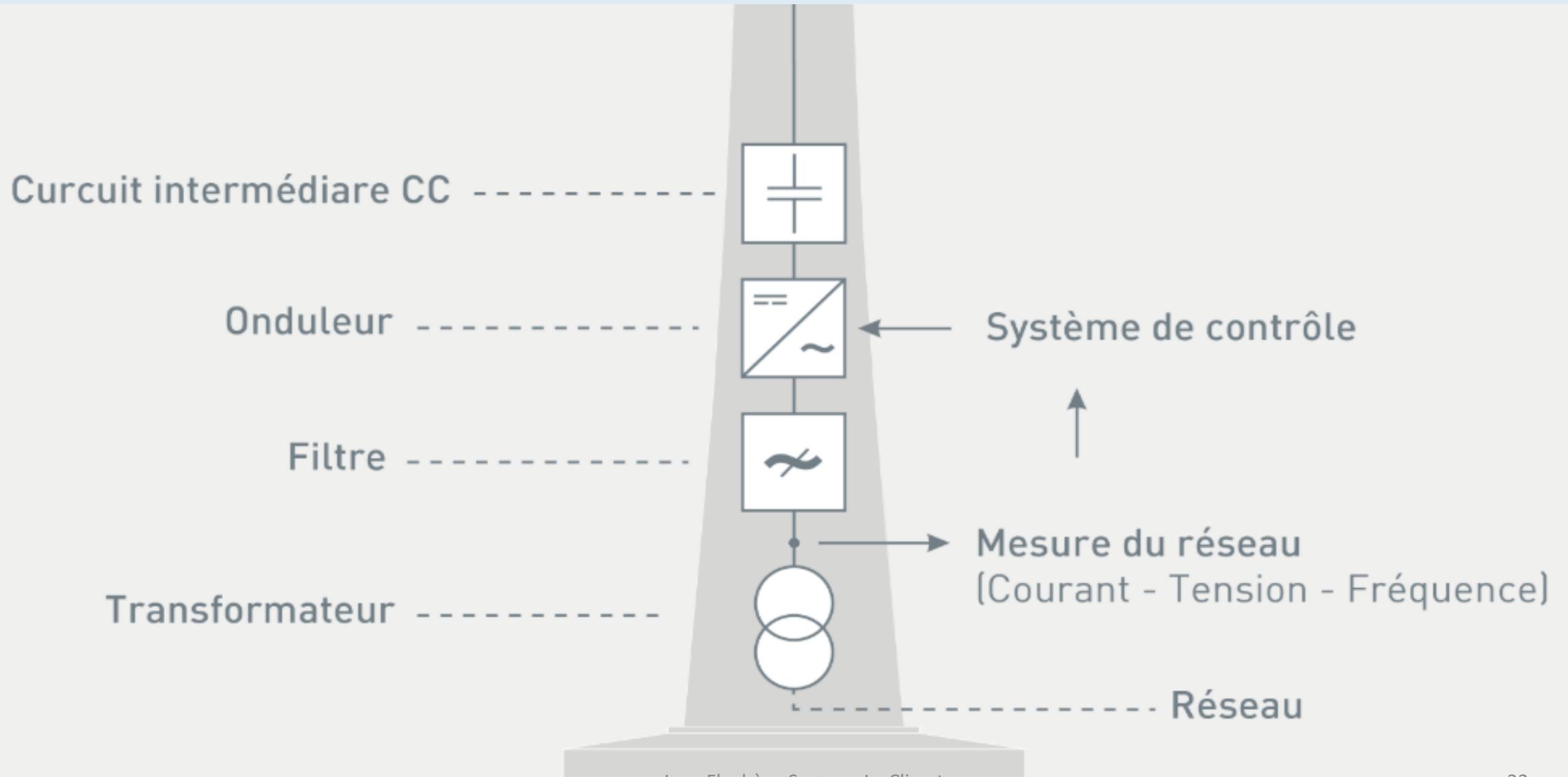


Redresseur



Générateur annulaire

Commande d'excitation





➤ **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 parfois 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 (23 % à terre), elles immobilisent entre 10 à 15 fois plus de cuivre qu'un alternateur hydraulique au fil de l'eau de même puissance. 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 dont 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.

Les aimants permanents des éoliennes consomment 20 % des terres rares notamment : Néodyme, Dysprosium, Praséodyme, Terbium



© Red Door News

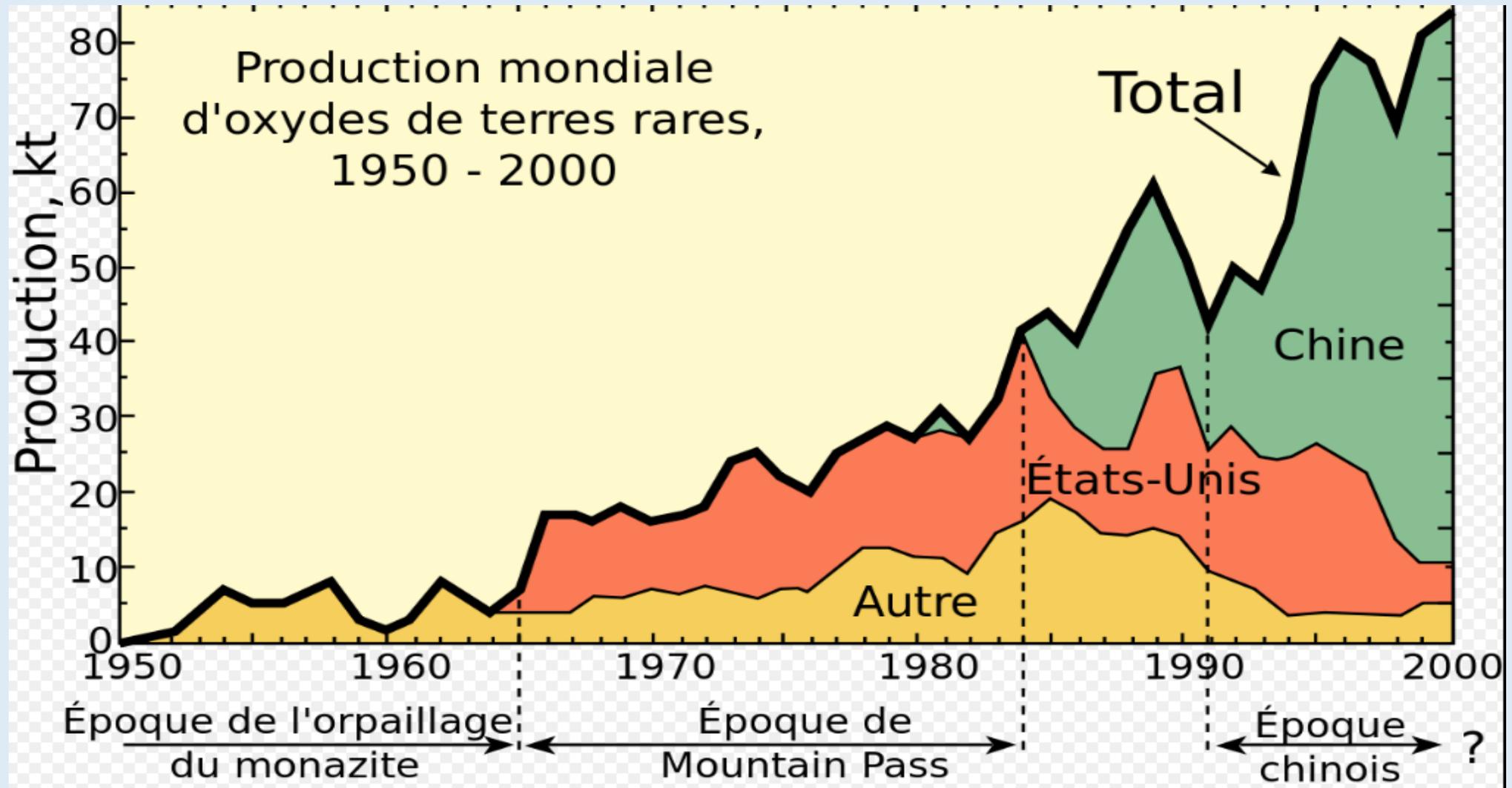
The lake of toxic waste at Baotou, China, which as been dumped by the rare earth processing plants in the background



© Richard Jones

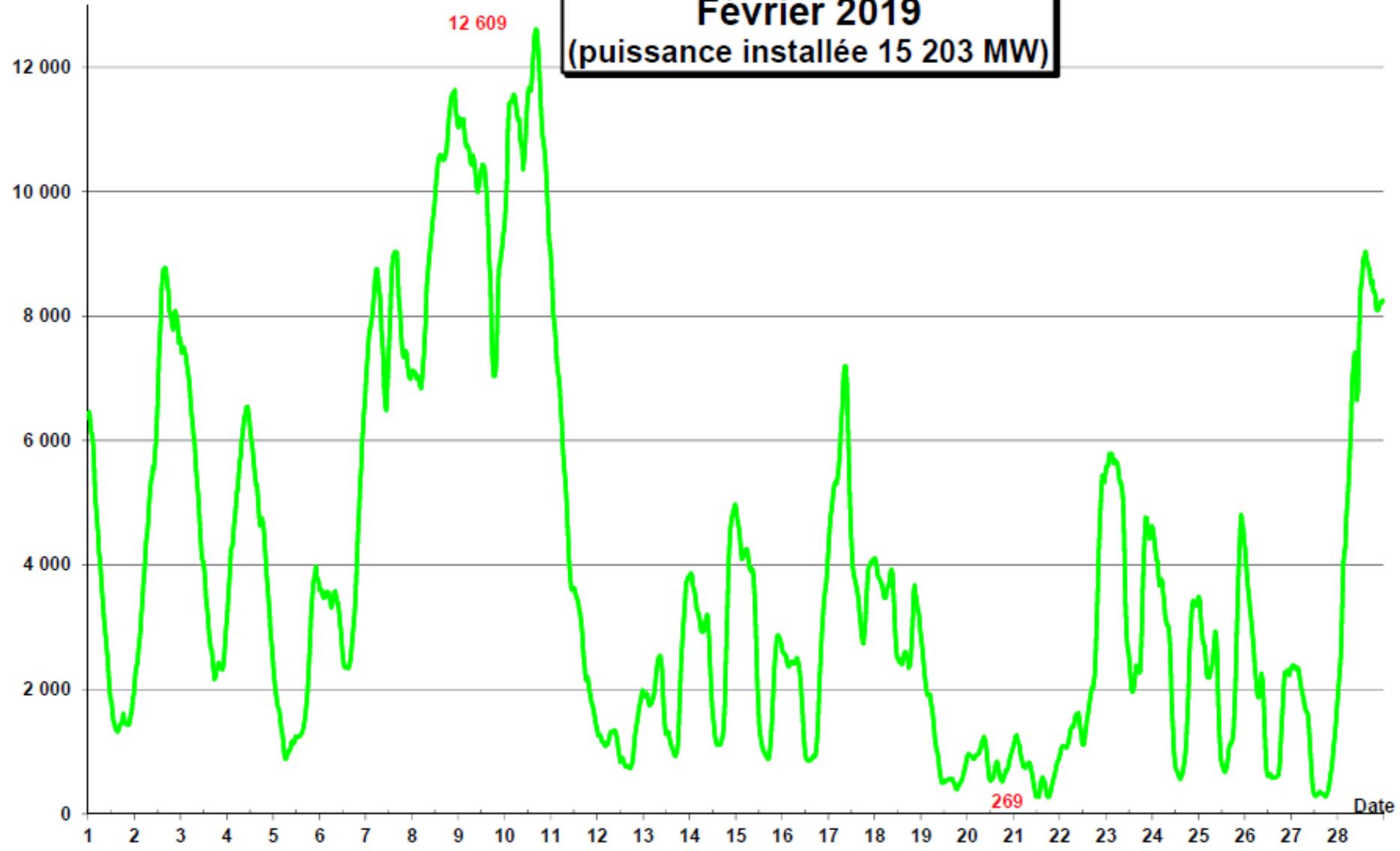
oming business: Explosives tear down yet more rock in the vast Baiyun Obo mine

LES RÉSERVES MONDIALES DE TERRES RARES

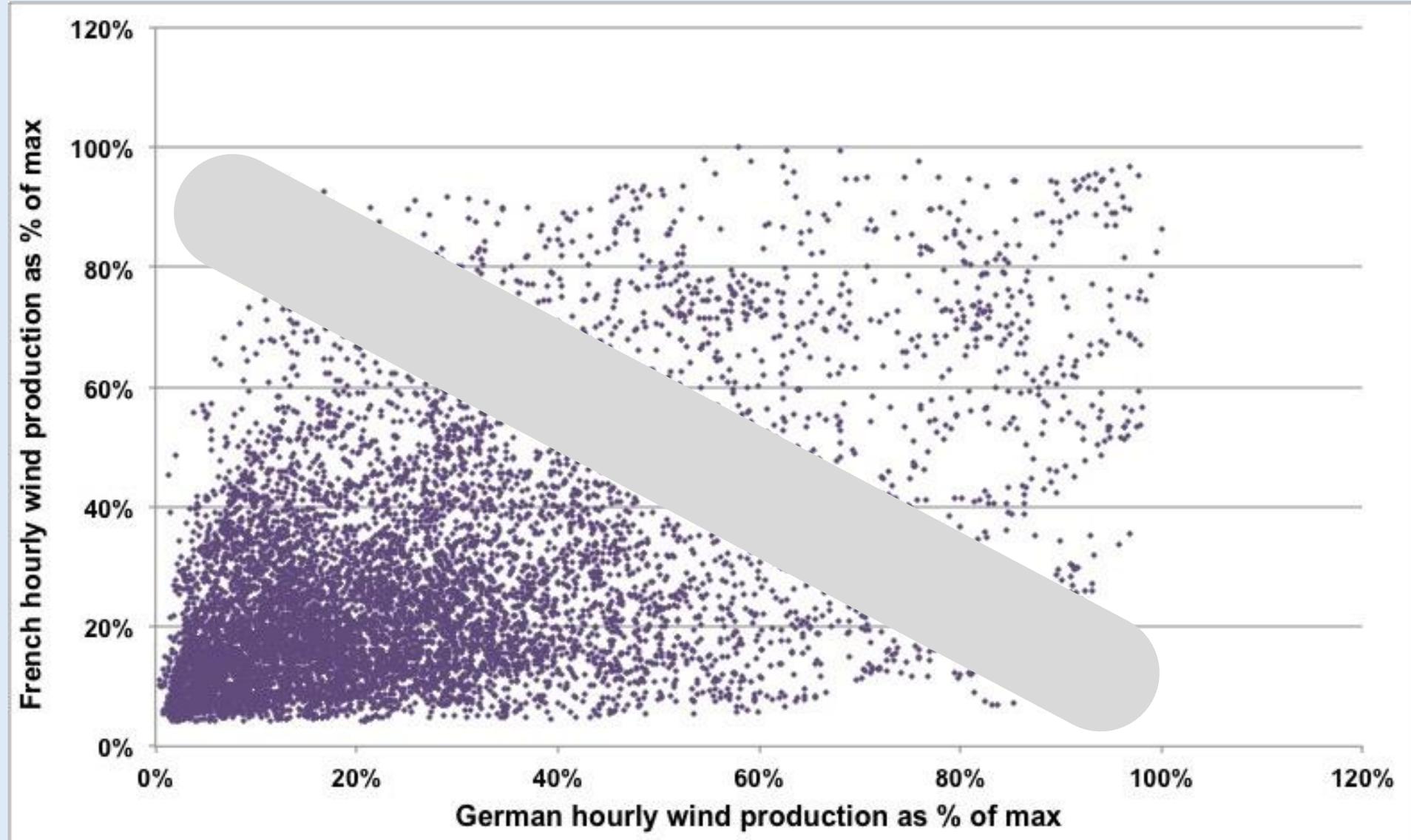


Puissance moyenne 30' (MW)

**Production éolienne
Février 2019
(puissance installée 15 203 MW)**

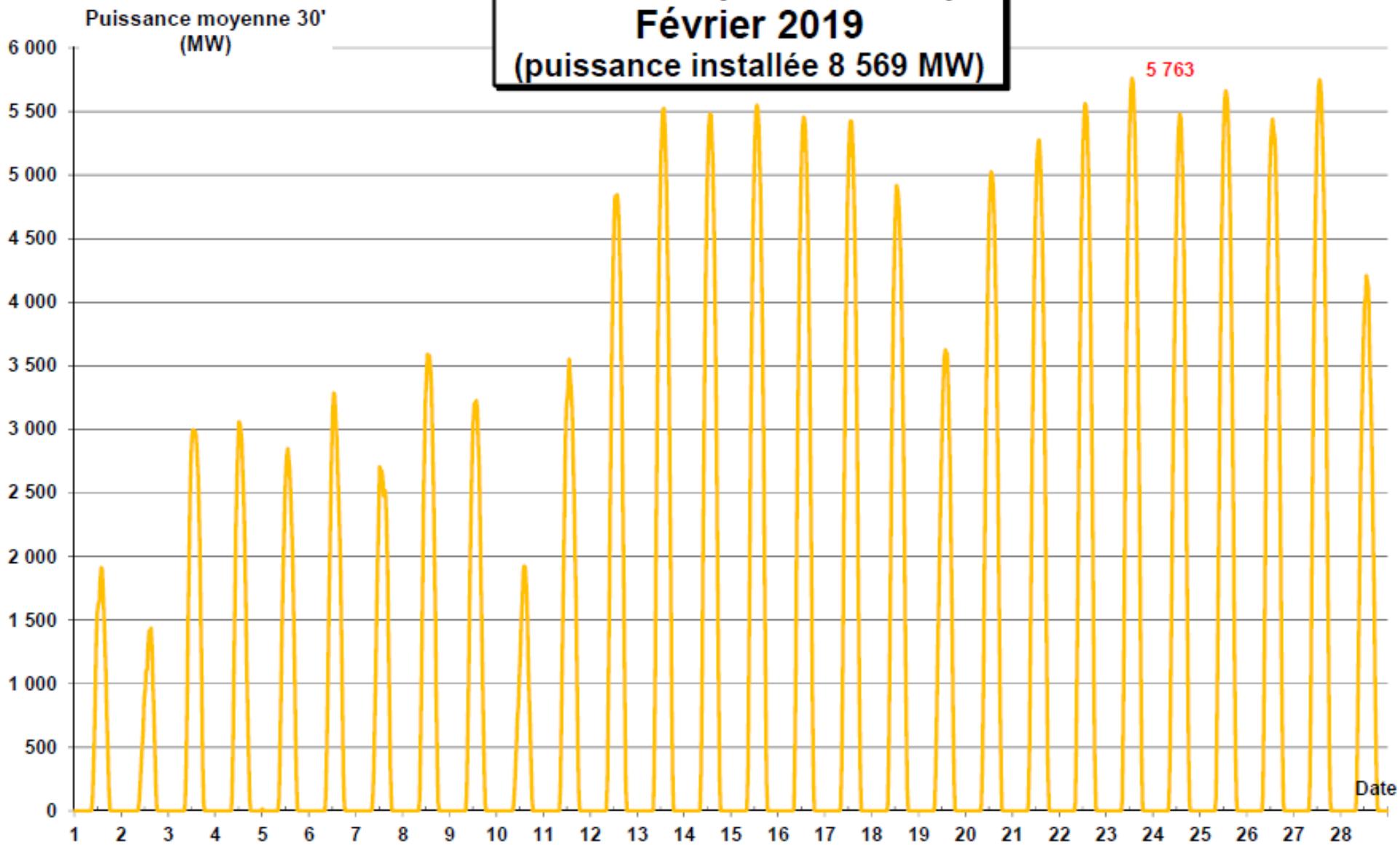


Du vent chez les voisins quand on en manque ? La farce du foisonnement

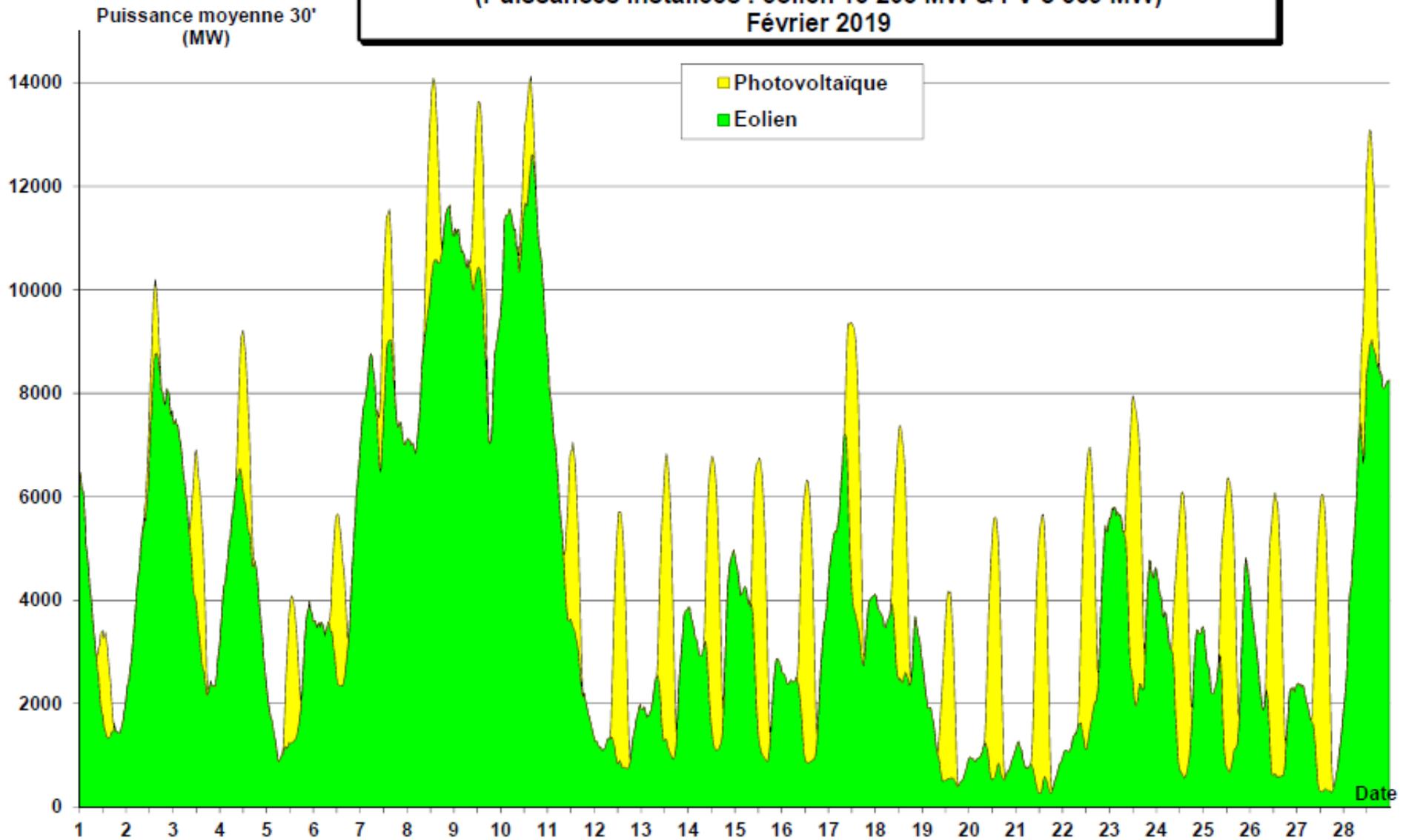


Production éolienne en France vs production éolienne en Allemagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk

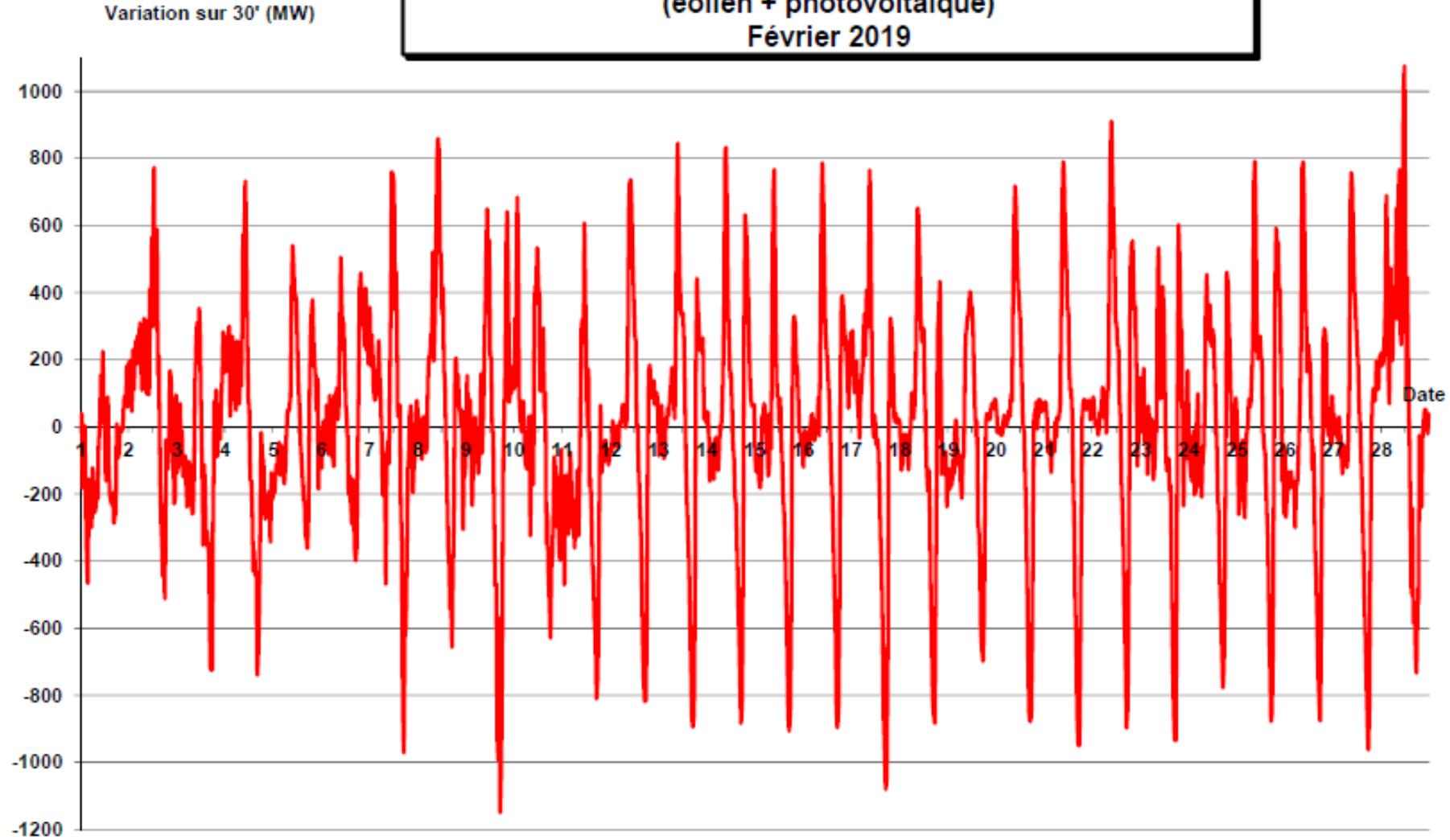
Production photovoltaïque Février 2019 (puissance installée 8 569 MW)



**Production cumulée électricité origine énergies renouvelables intermittentes
(Puissances installées : éolien 15 203 MW & PV 8 569 MW)
Février 2019**



Variation de la production cumulée des énergies intermittentes
(éolien + photovoltaïque)
Février 2019

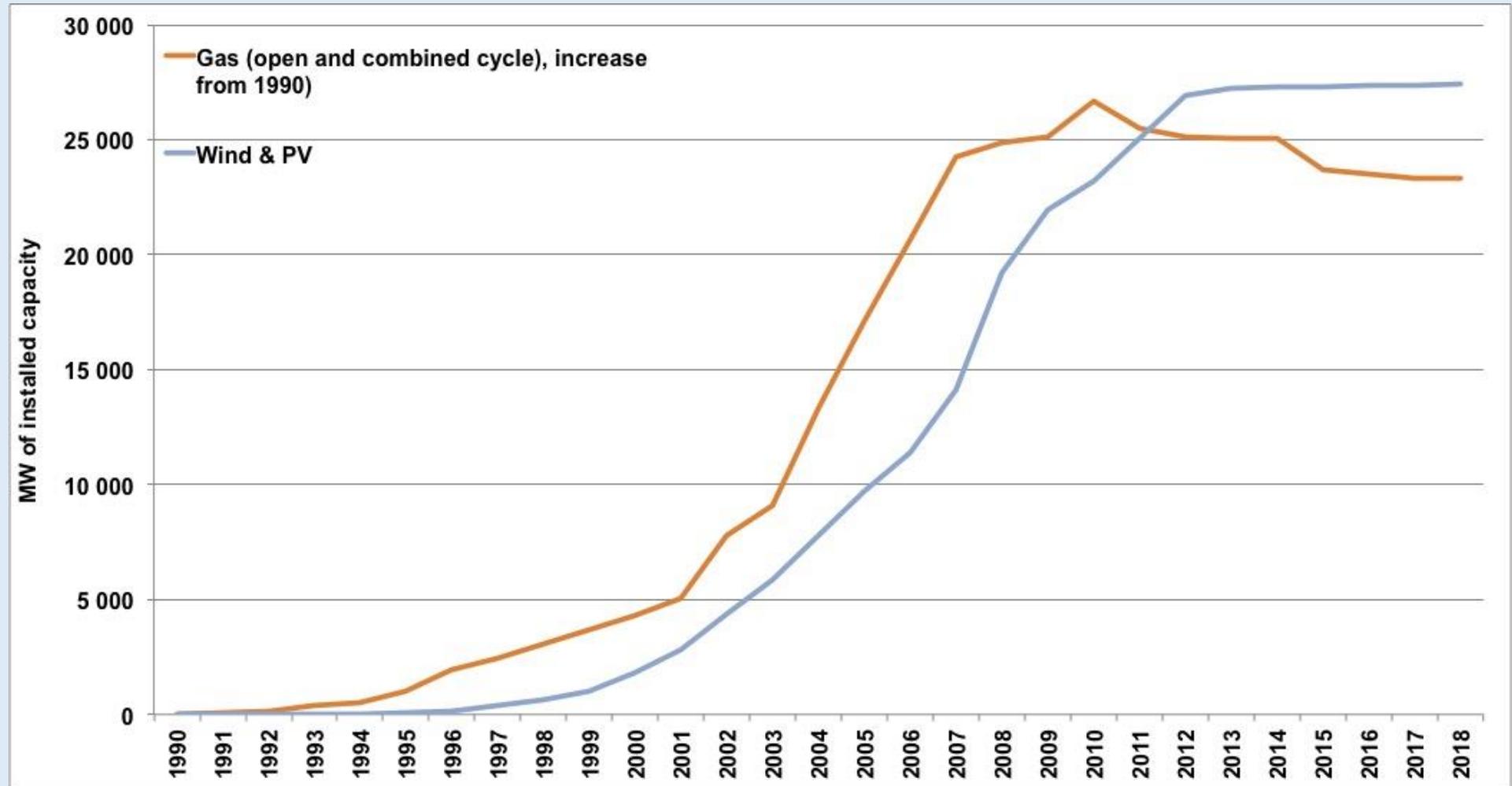


GRADIENTS DE PUISSANCE ET SOUTIEN

- **1 - 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 et sont loin de l'être: délestage ou déversement et prix de marché négatif!**
- **La solution ne passe que par un recours à des productions pilotables à variations de puissance rapides. Nécessité d'accroître la « *réserve tournante* ».**
- **Pour l'instant en France, nous compensons par un recours à l'hydro-électricité 8 mois par an et par un recours supplémentaire aux centrales à gaz au moins 4 mois par an d'où émissions de CO2.**
- **2 - 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.

Et les espagnols ?

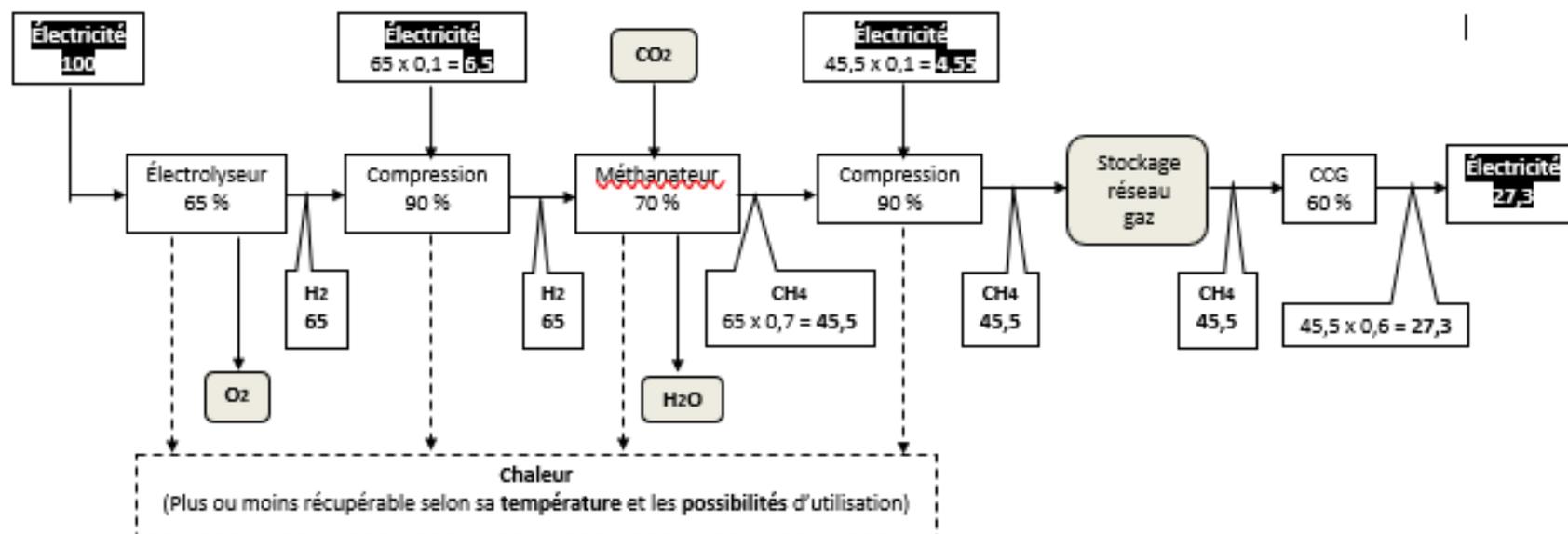


Puissance installée en Espagne en éolien et en gaz. Données RES Electrica.

Pertes énergétiques du schéma "Power to gas + Gas to power"

Approximations :

- L'énergie chimique de l'O₂ pur produit par électrolyse n'est pas prise en compte positivement,
- L'énergie d'extraction et d'éventuelle compression du CO₂ utilisé dans la méthanation n'est pas prise en compte négativement,
- Les énergies chimiques des gaz comprimés sont supposées identiques à celles des mêmes gaz non comprimés.



* Électricité consommée : $100 + 6,5 + 4,55 = 111$

* Électricité récupérée : 27,3

* Rendement global en électricité = $27,3 / 111 = 24,6\%$

ENR DE FORTE PUISSANCE 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.

Photovoltaïque.

La production de puissance est un peu plus prévisible. **Elle est 4 fois supérieure en été qu'en hiver. Alors que la consommation est 2 fois supérieure en hiver qu'en été. 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) ...
- **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 déséquilibre complètement le marché et ruine 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

VULNÉRABILITÉ DU SYSTÈME ÉLECTRIQUE

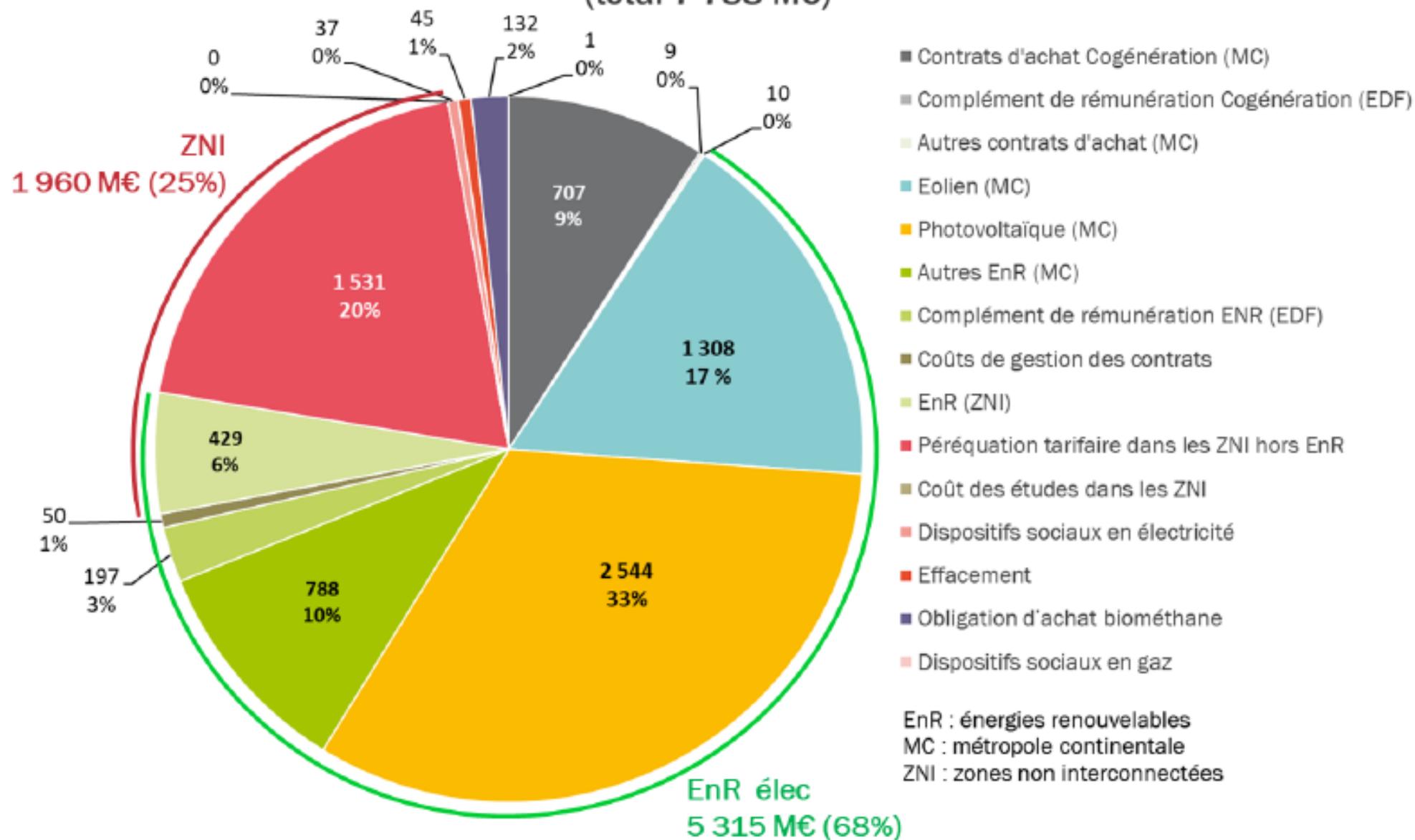


BLACK-OUT ITALIEN NUIT BLANCHE 28-09-2003



SUPPLEMENTS SI BESOIN

Charges de service public de l'énergie prévisionnelles au titre de 2019 (total 7 788 M€)



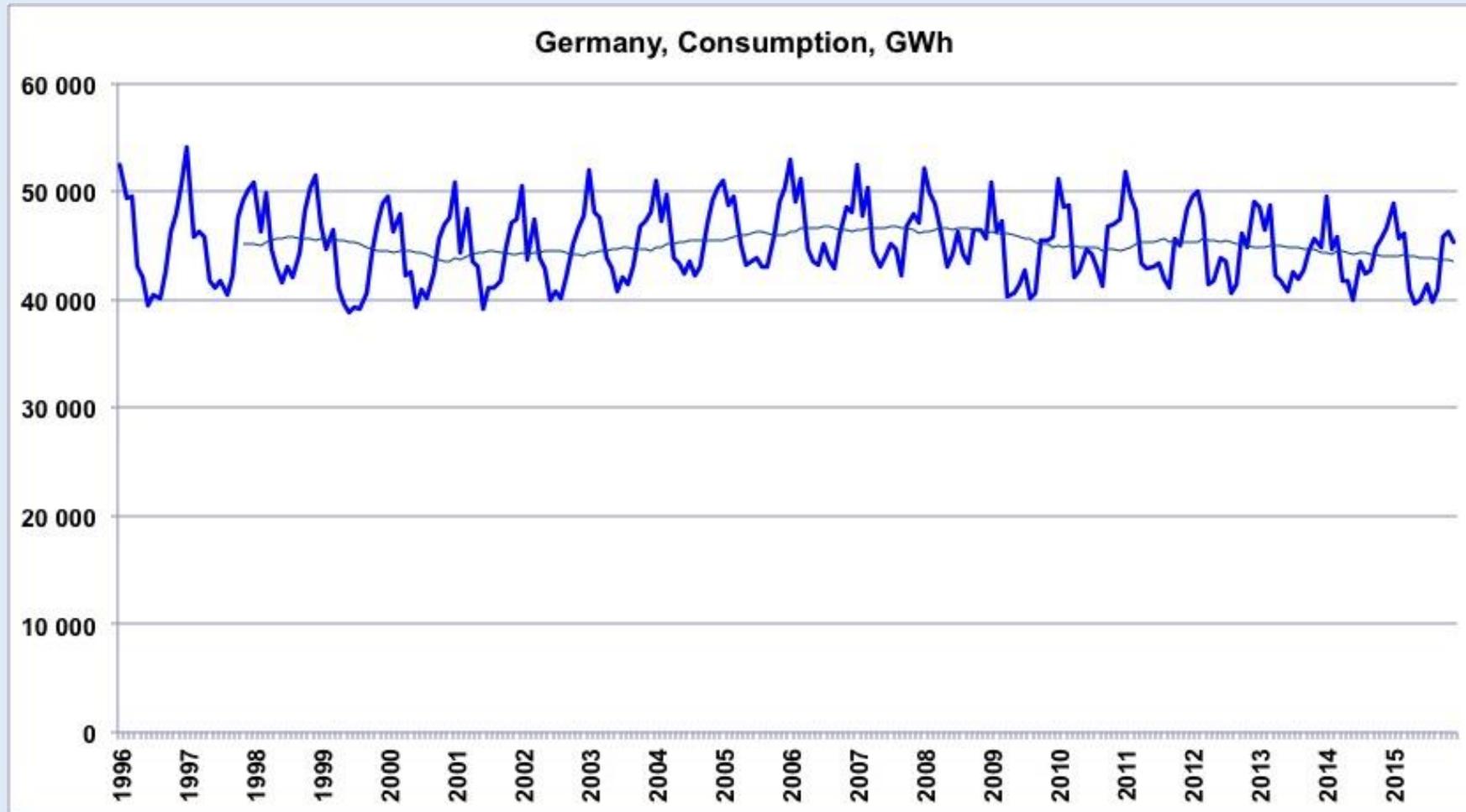
100% ENR pour pas plus cher ?

100% Nucléaire

100% Eolien

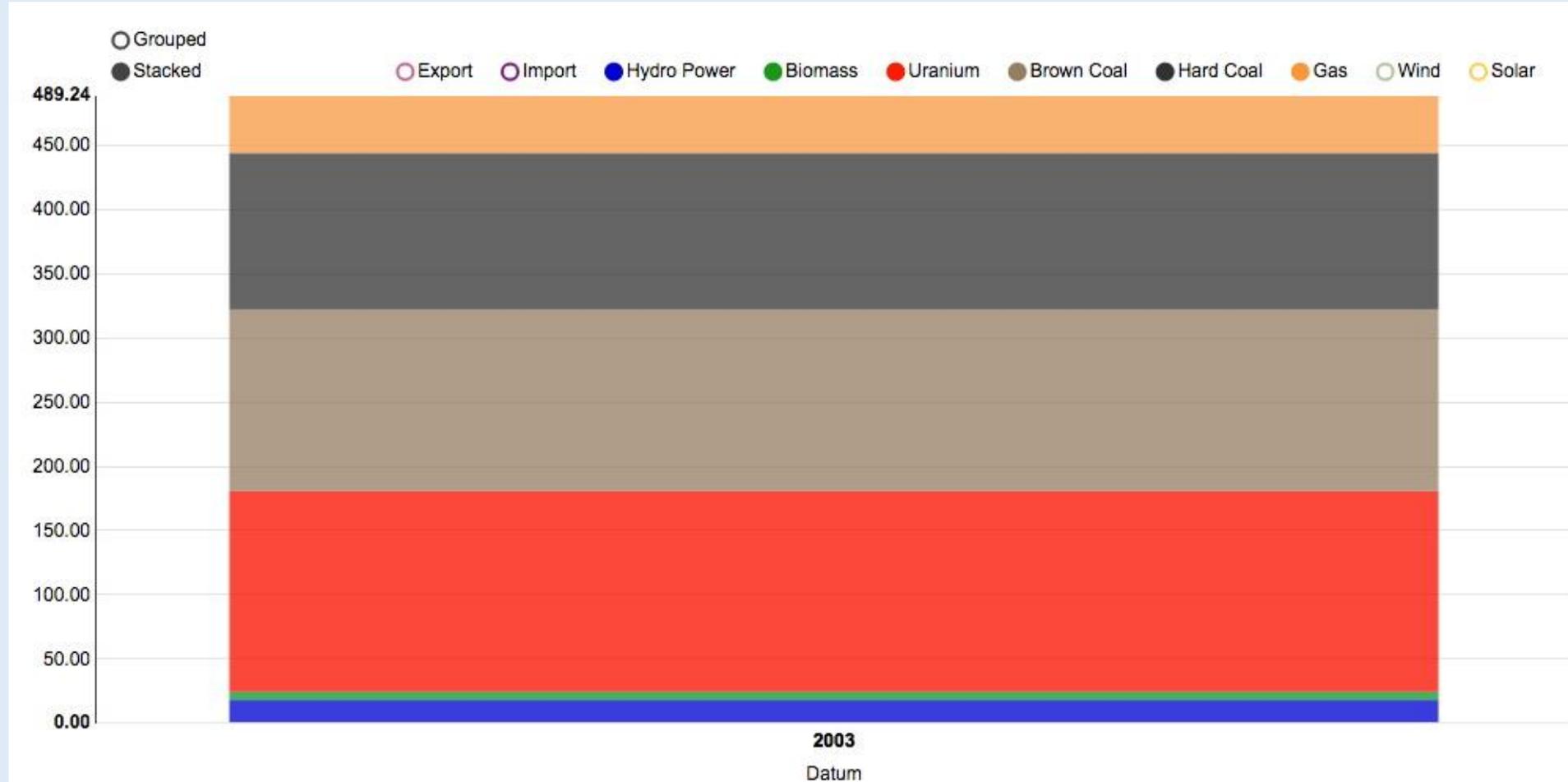
Facteur de charge	70%-80%	$\xrightarrow{\times 3-4}$	$\approx 20\%$
Durée de vie	60-80 ans	$\xrightarrow{\times 2-3}$	20 à 30 ans
Réseau	≈ 0	$\xrightarrow{\times 1,5}$	$\approx 0,5$ fois cout éolienne
Stockage	10%	$\xrightarrow{\times 2-4}$	50%-60%
Cout au kW	3-5.000 €	$\xrightarrow{\div 2-}$	1.000 - 1500 €
Total capex/kWh		$\approx \frac{4}{\times} 5-30$	

Est-ce la consommation qui augmente ?



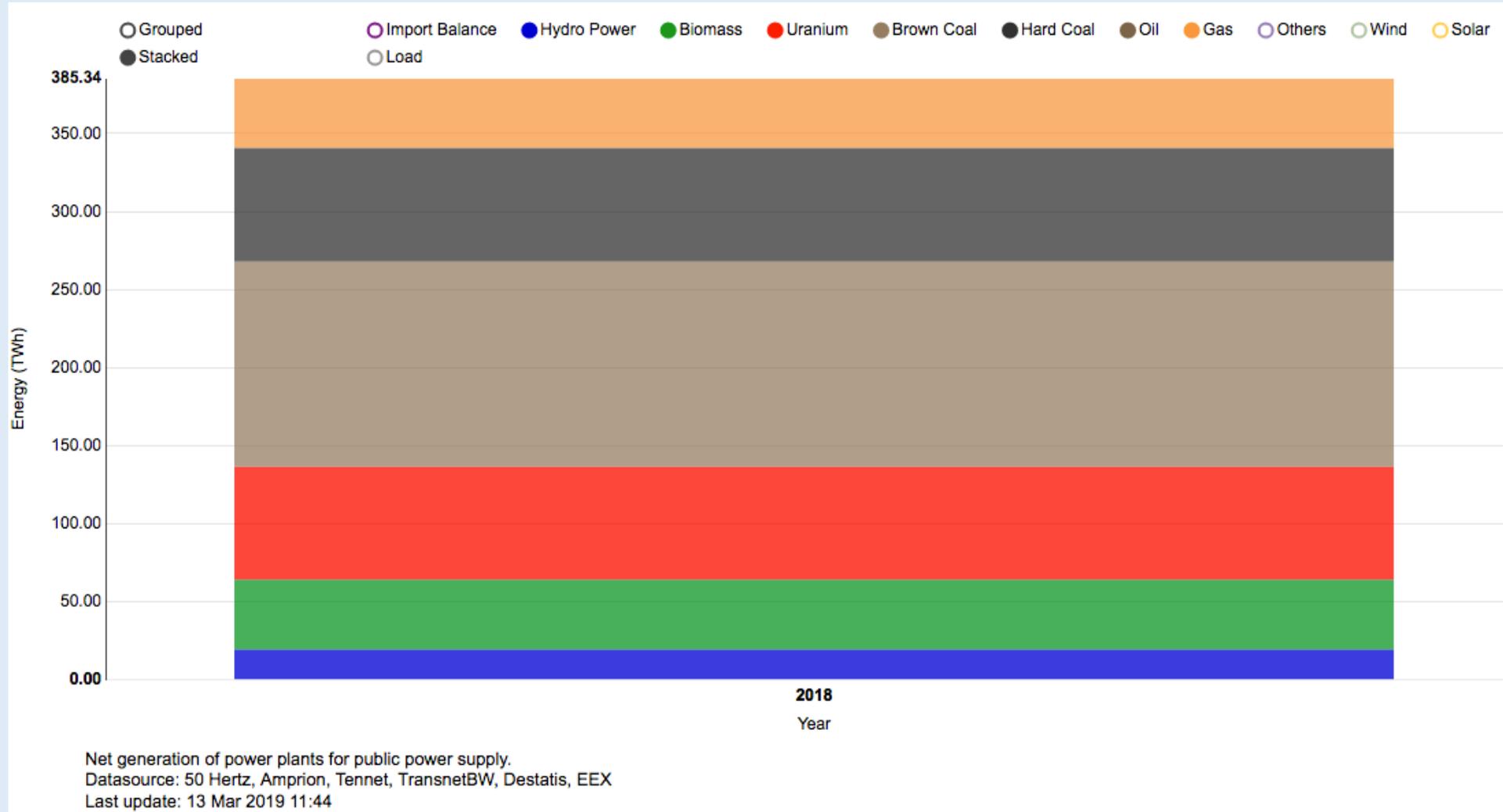
Consommation électrique mensuelle en Allemagne de 1996 à 2015. Données ENTSOE, 2016

Passer d'un facteur de charge élevé...



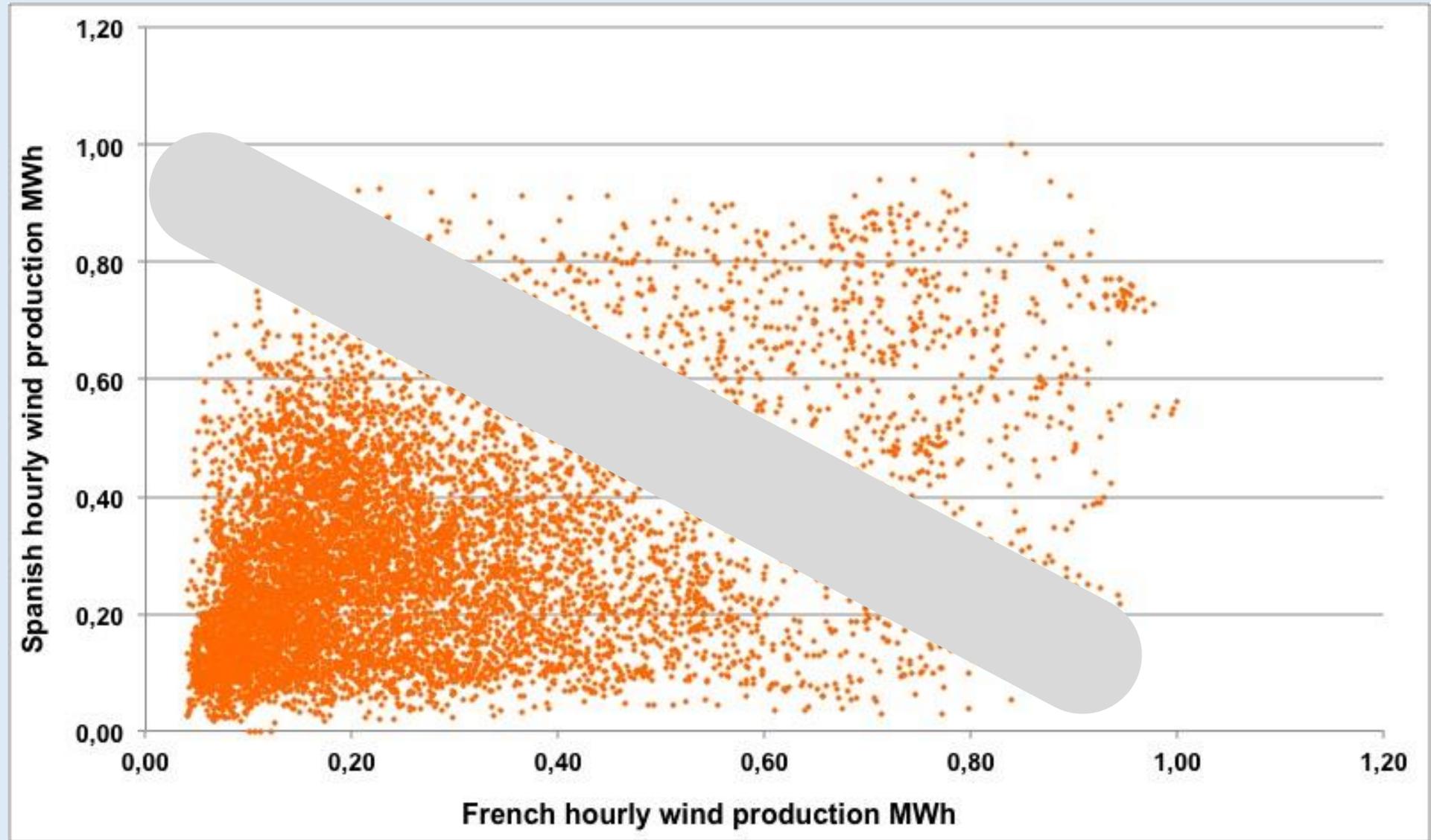
Production des capacités pilotables en Allemagne en 2003. Données Fraunhofer Institute, 2017

...à un qui l'est moins !



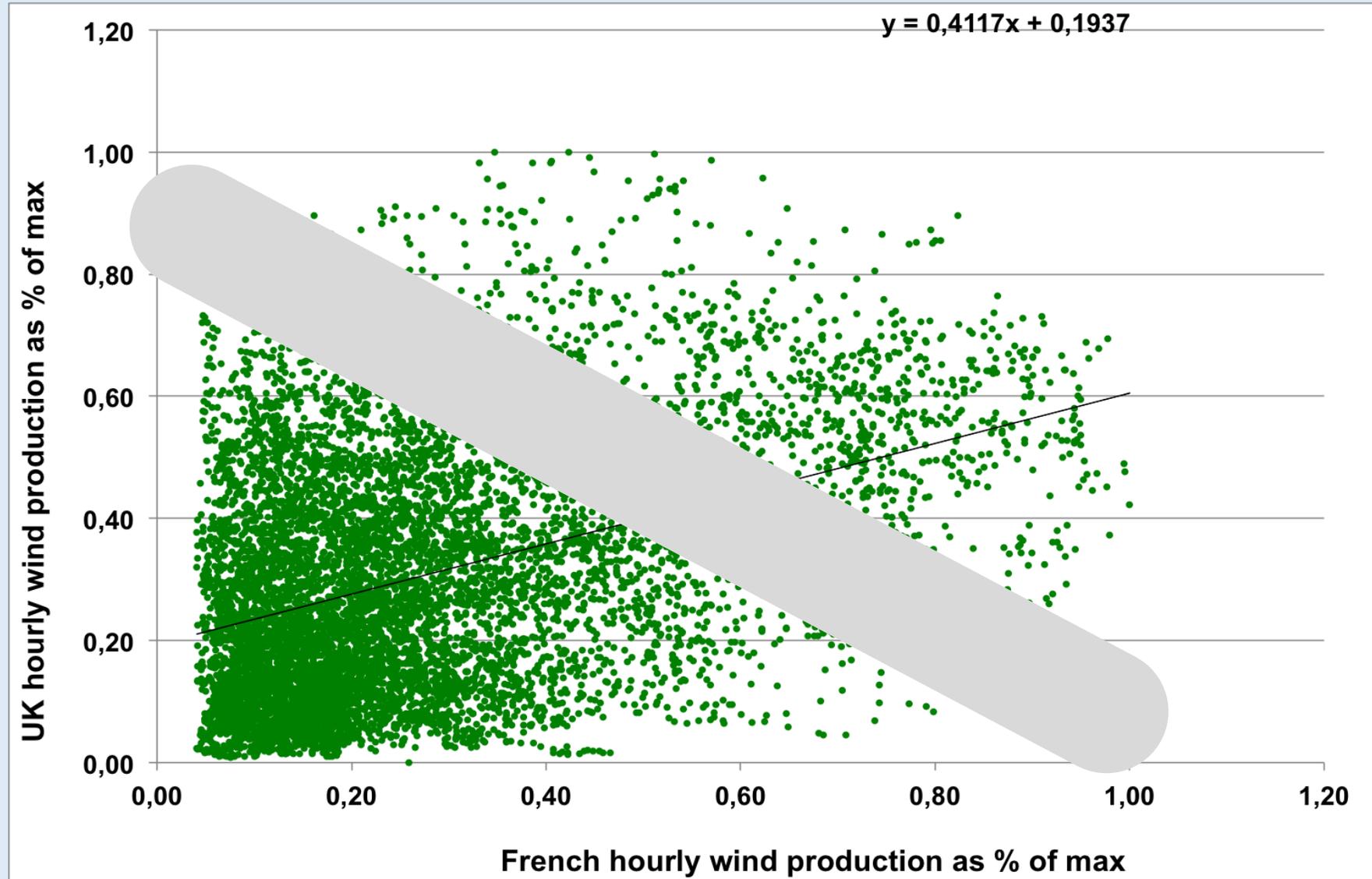
Production des capacités pilotables en Allemagne en 2018. Données Fraunhofer Institute, 2019

Du vent chez les voisins quand on en manque ?



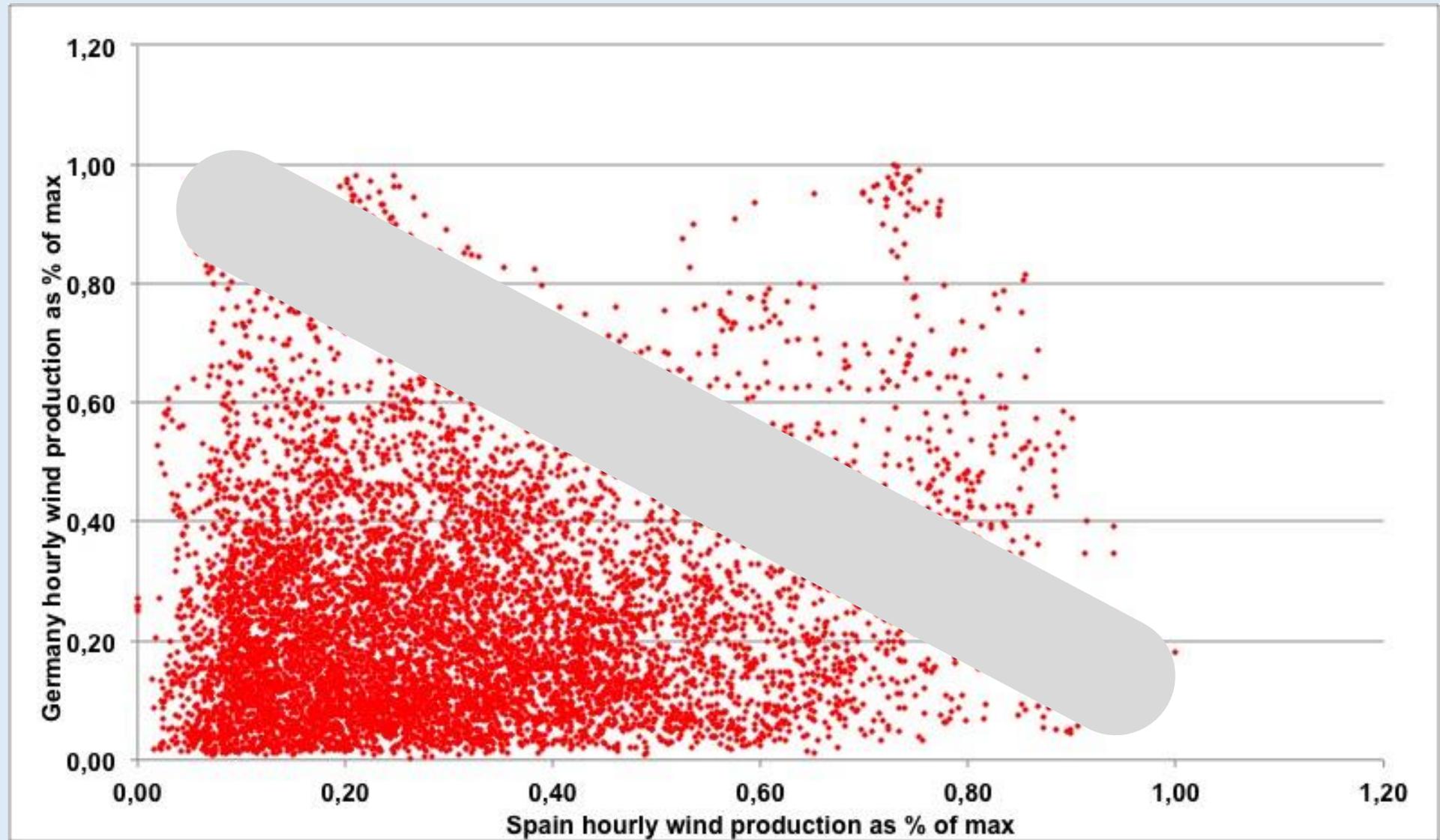
Production éolienne en France vs production éolienne en Espagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk

Du vent chez les voisins quand on en manque ?



Production éolienne en France vs production éolienne en Grande Bretagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk

Du nord au sud de l'Europe, ça reste corrélé



Production éolienne en Espagne vs production éolienne en Allemagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk

Jean Fluchère-Sauvons Le Climat