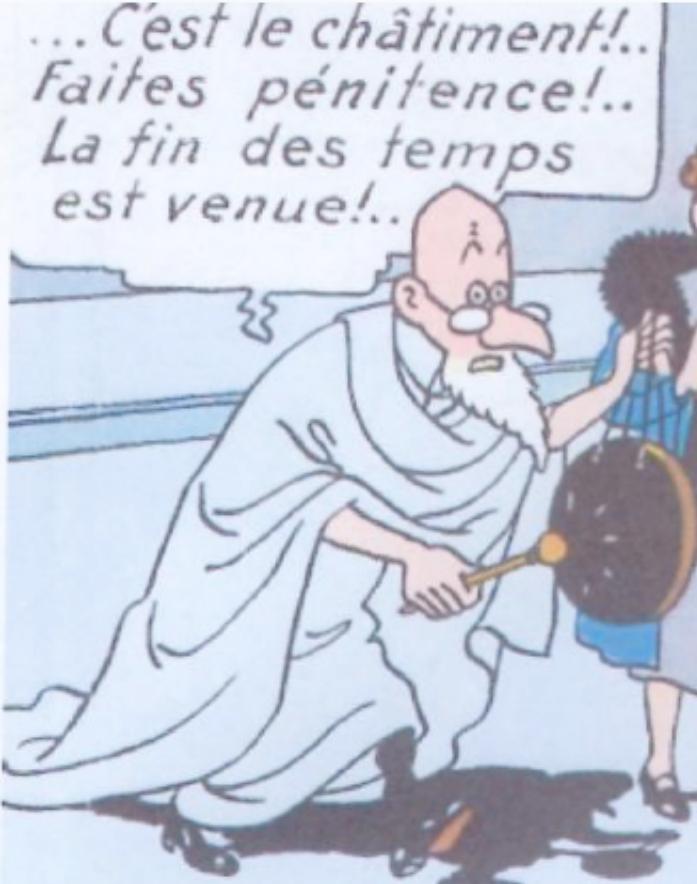


# Eléments de base sur l'énergie au 21<sup>e</sup> siècle



Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2020  
Partie 7 - Eole, au secours ?

# **Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ?**

**Une énergie renouvelable est tout simplement... une source d'énergie qui se renouvelle plus vite, ou aussi vite, que son utilisation par notre espèce :**

**La biomasse, et tous ses dérivés (agro-carburants, biogaz, etc), dans la limite de ce qui a poussé dans l'année**

**L'hydroélectricité, le cycle de l'eau se chargeant de remonter en altitude (précipitations & ruissellement) l'eau qui a été turbinée**

**Le rayonnement solaire, certes épuisable en 5 milliards d'années !**

**Le vent**

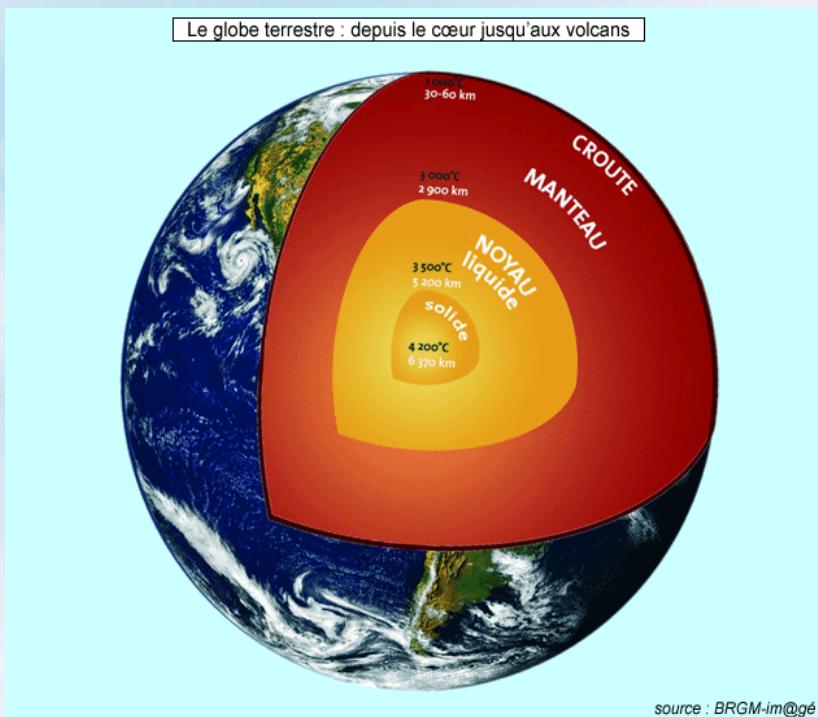
**Ces énergies ne sont équivalentes ni en potentiel, ni en rendement, ni en coût, ni en usages...**

# Qu'est-ce qu'une énergie renouvelable ? (bis)

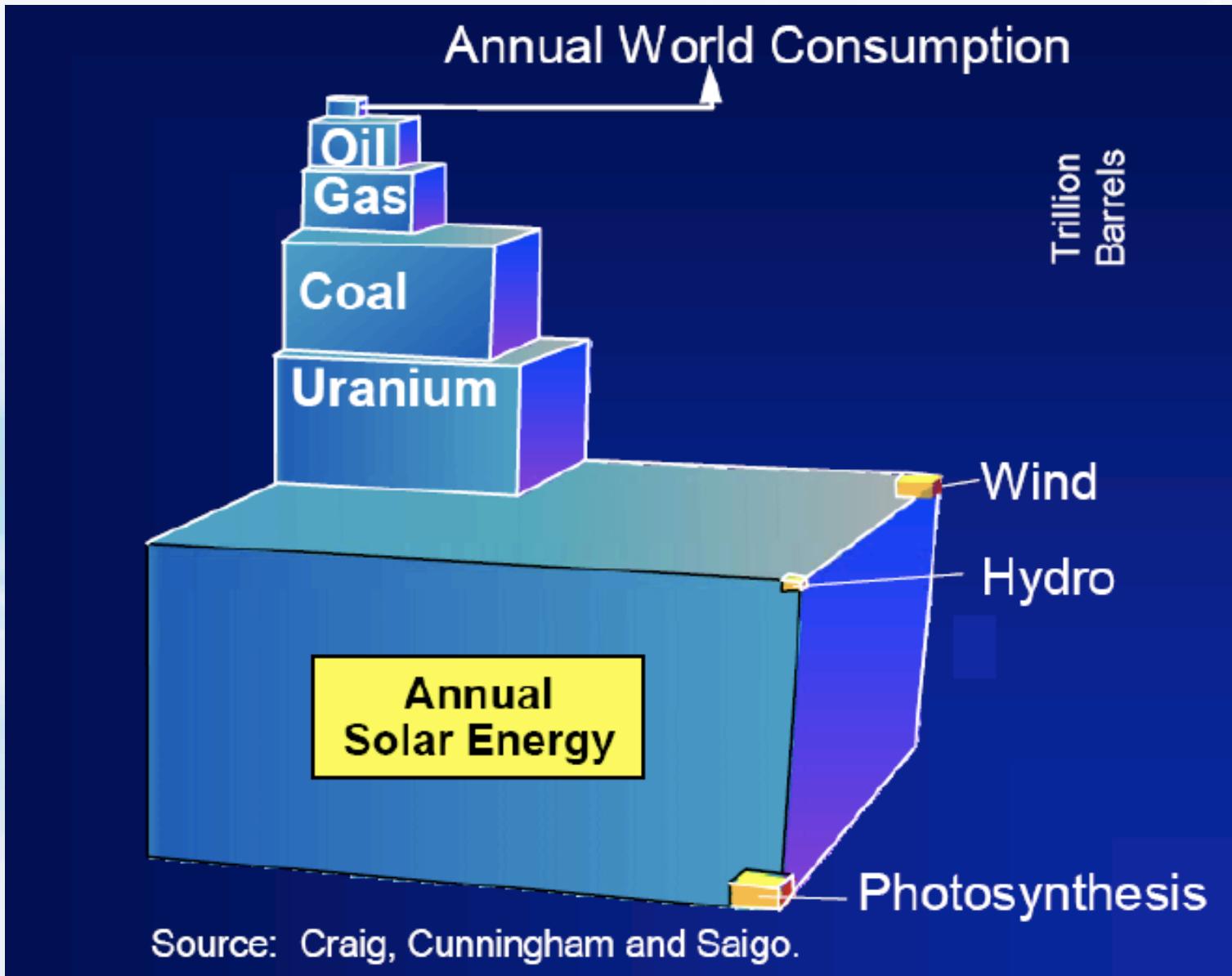
Il arrive que l'on mette dans les énergies renouvelables des « fausses renouvelables » :

L'exploitation thermique des déchets (mais le déchet est-il renouvelable ?)

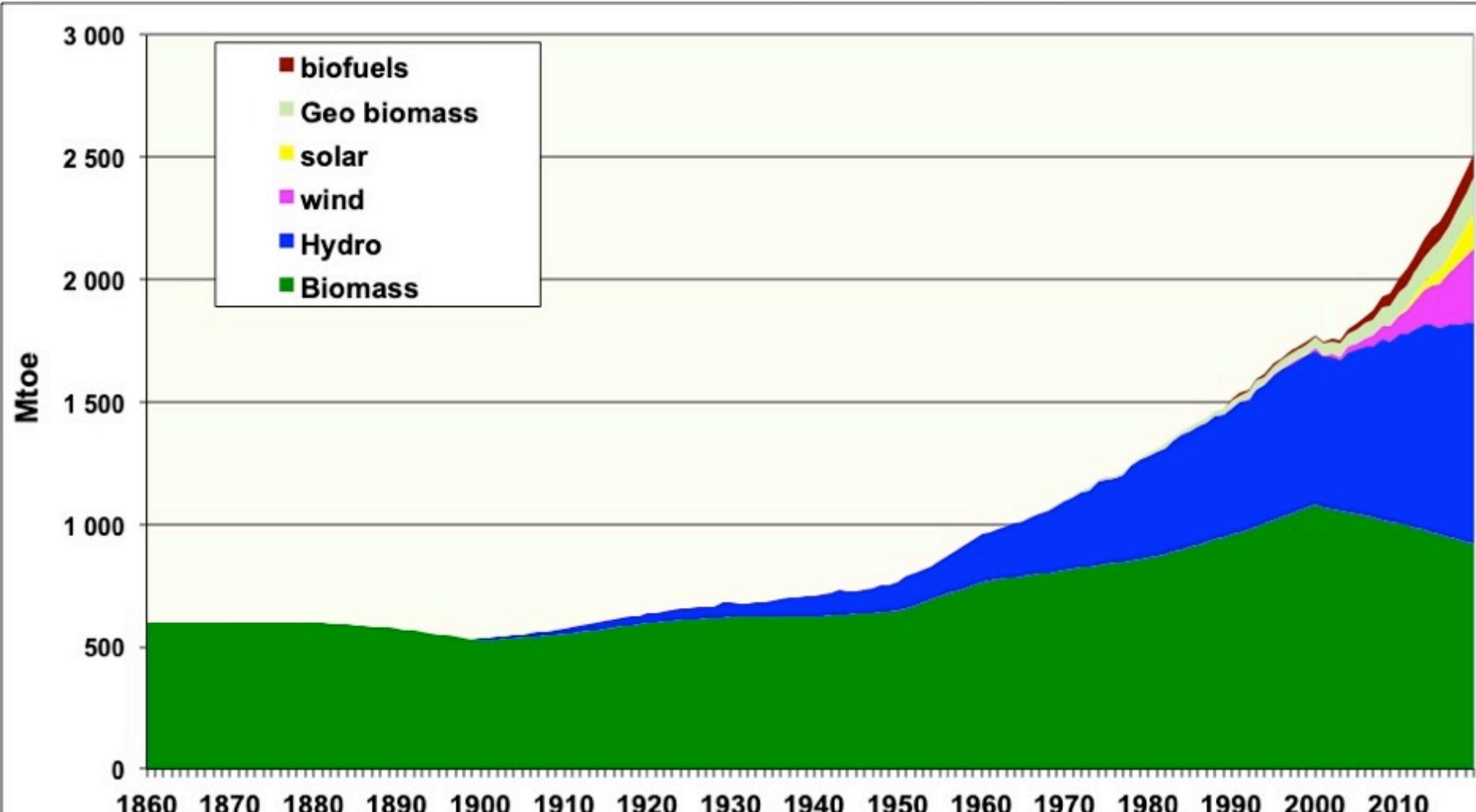
La géothermie, qui porte surtout sur l'exploitation du stock de chaleur accumulée (gigantesque) et non sur le flux annuel (très faible)



# Le verre à moitié plein : quelle abondance !

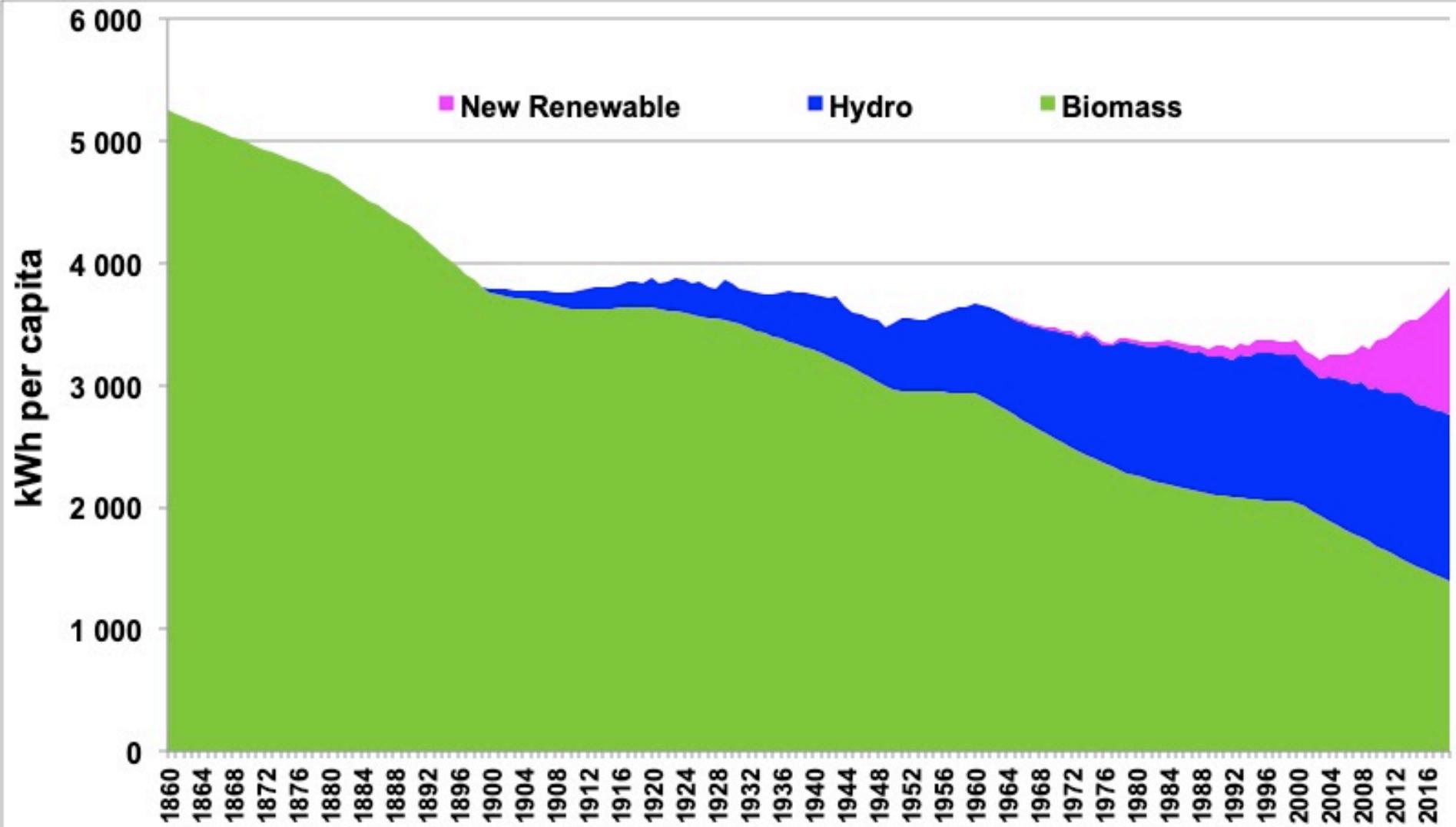


# De plus en plus d'énergie renouvelable



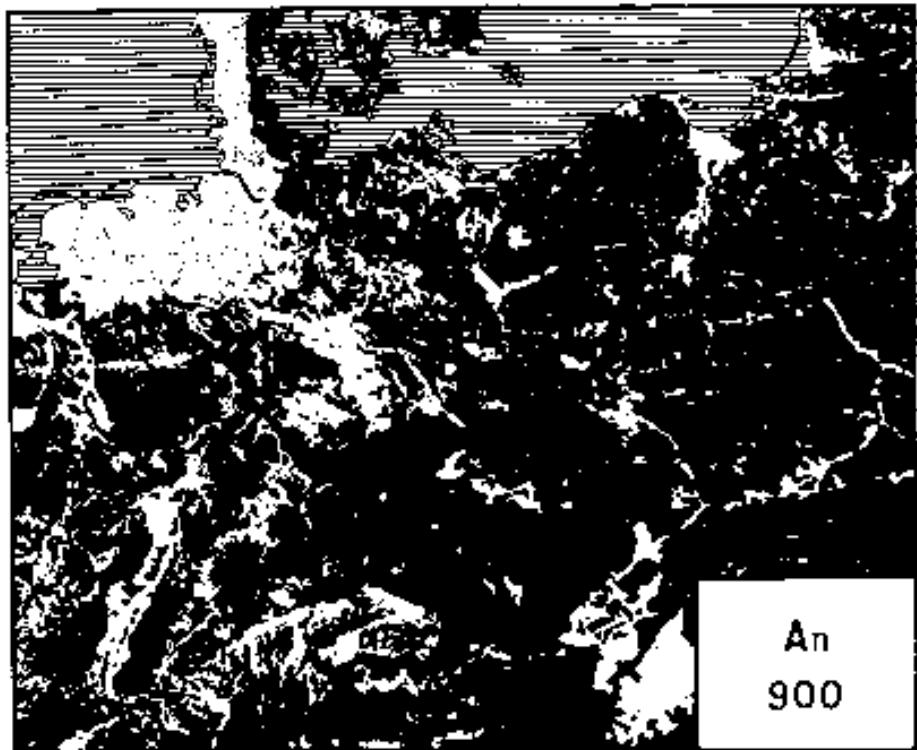
Approvisionnement renouvelable mondial depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

# Mais de moins en moins par personne...



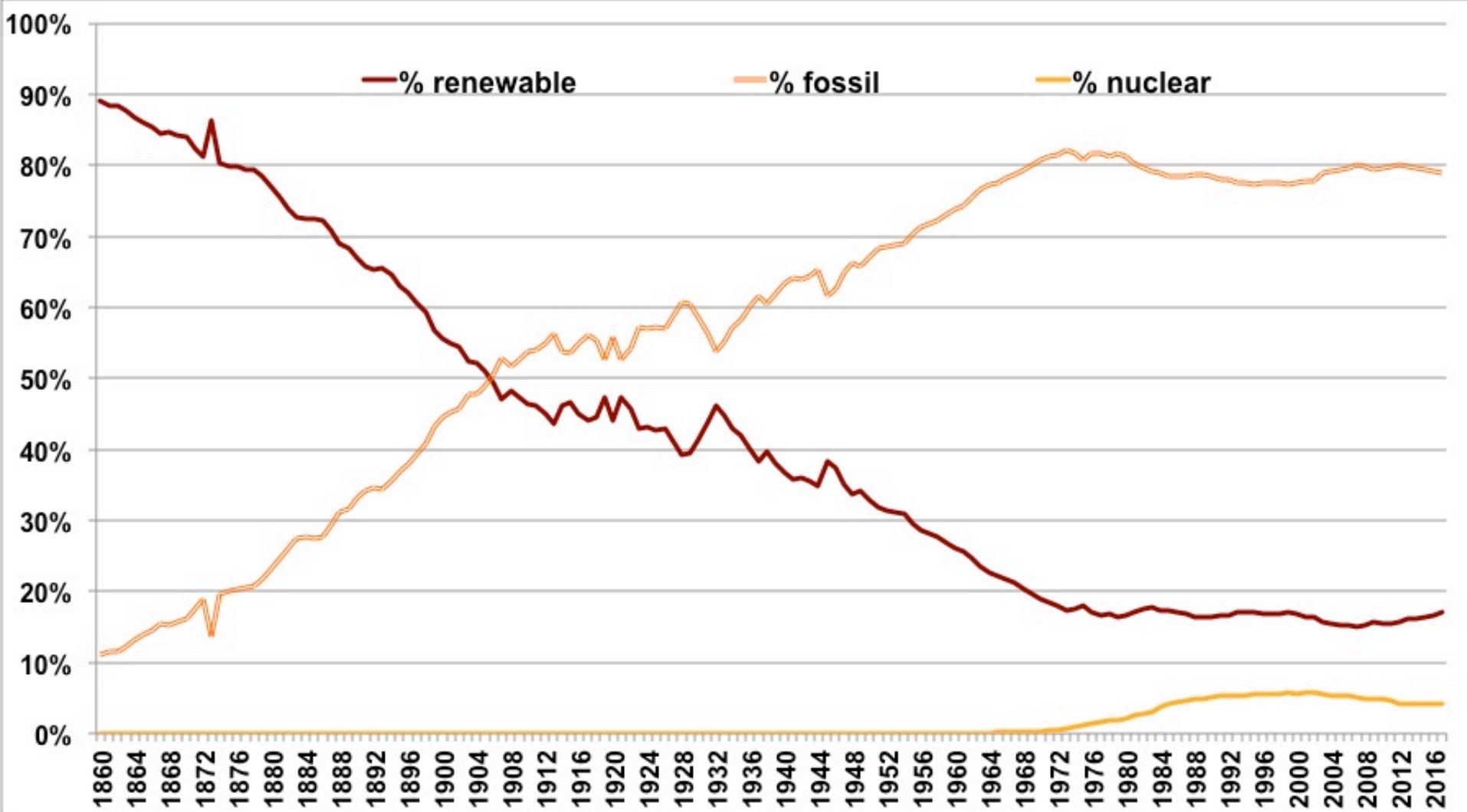
Approvisionnement renouvelable par personne (moyenne mondiale) depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

# Une énergie renouvelable peut ne pas se renouveler



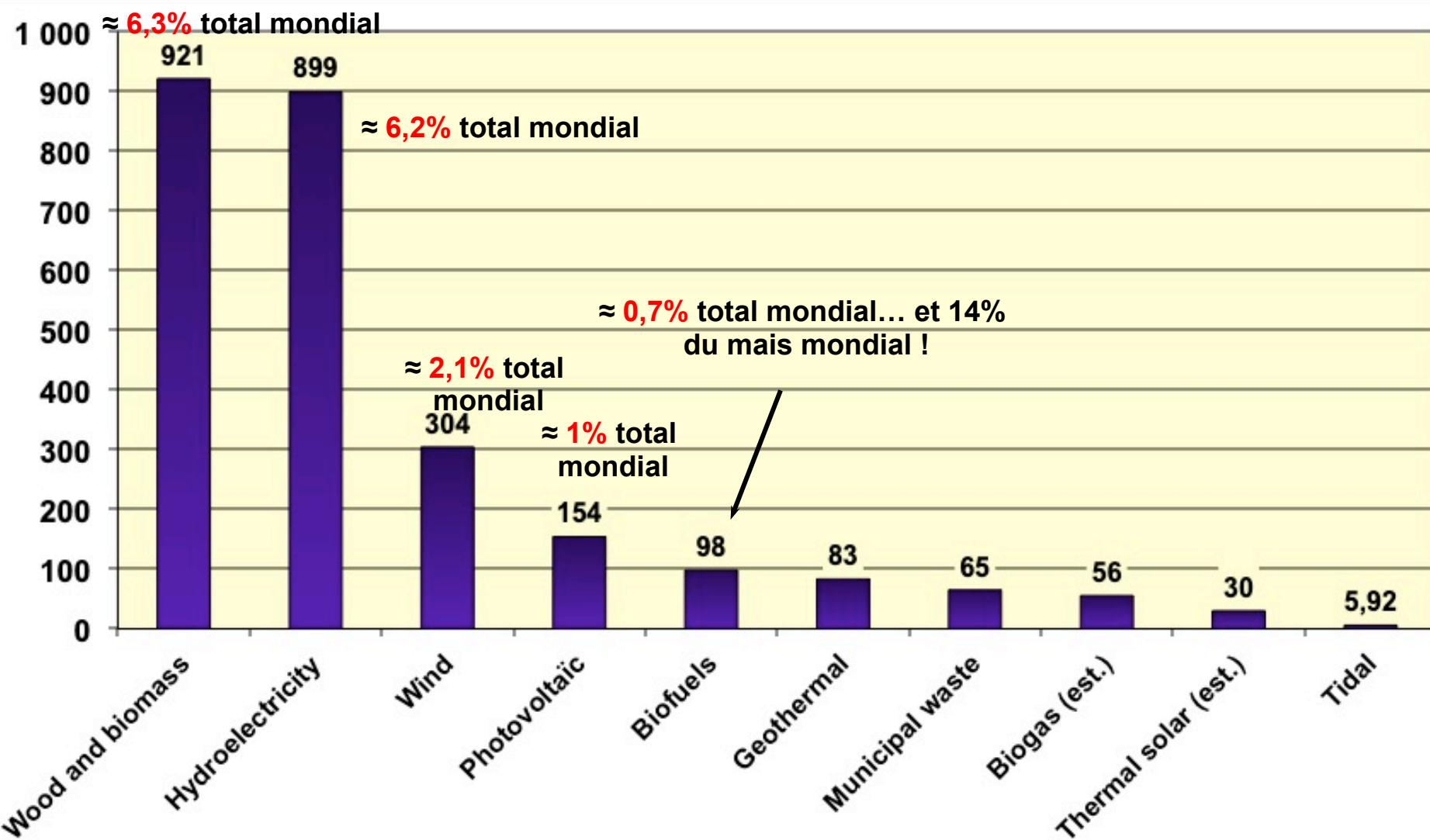
Couverture forestière de l'Europe à différentes époques

# Le verre à moitié vide : 16% de l'énergie primaire seulement



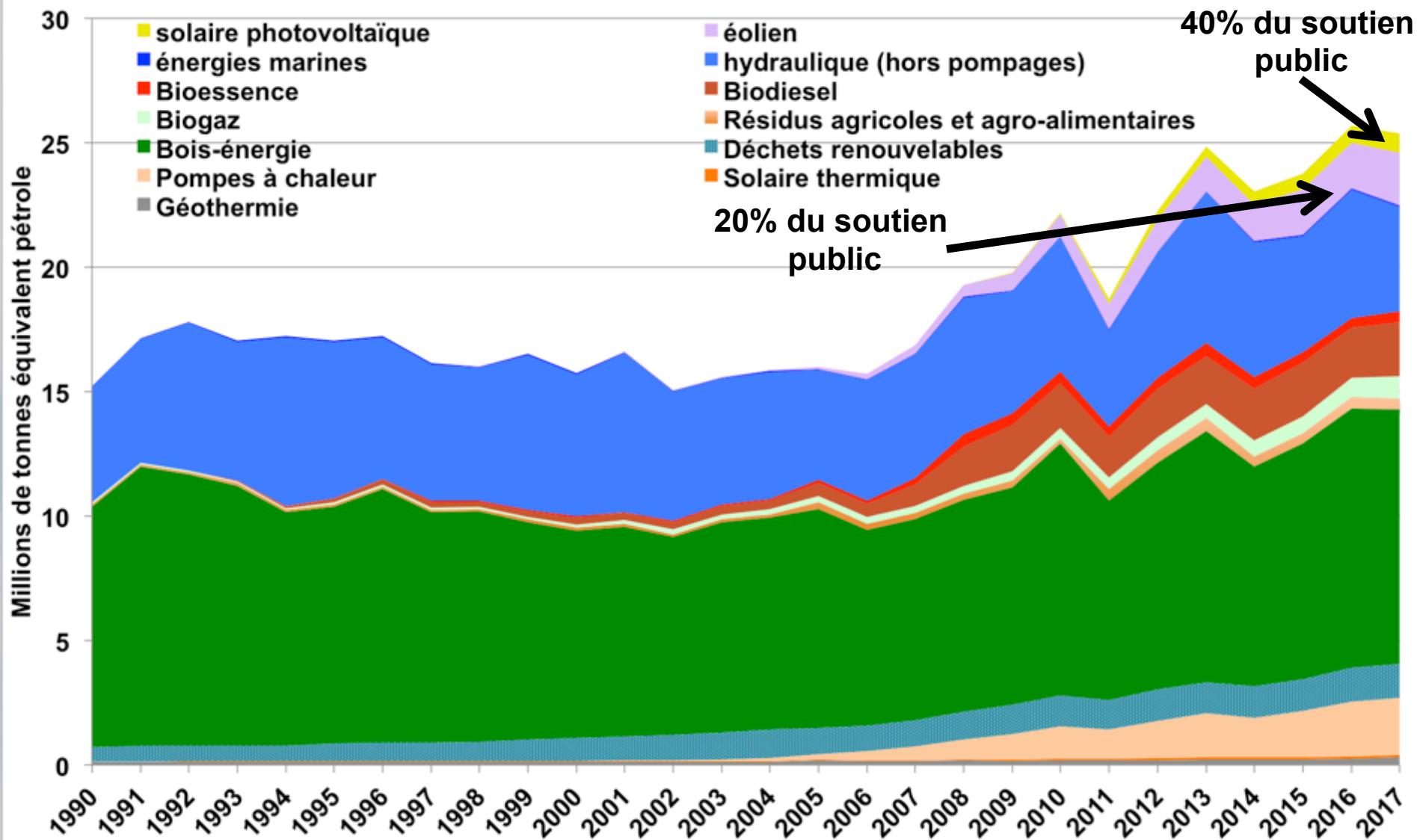
Part de chaque famille d'énergie depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

# Le verre à moitié vide : 18% de l'énergie primaire



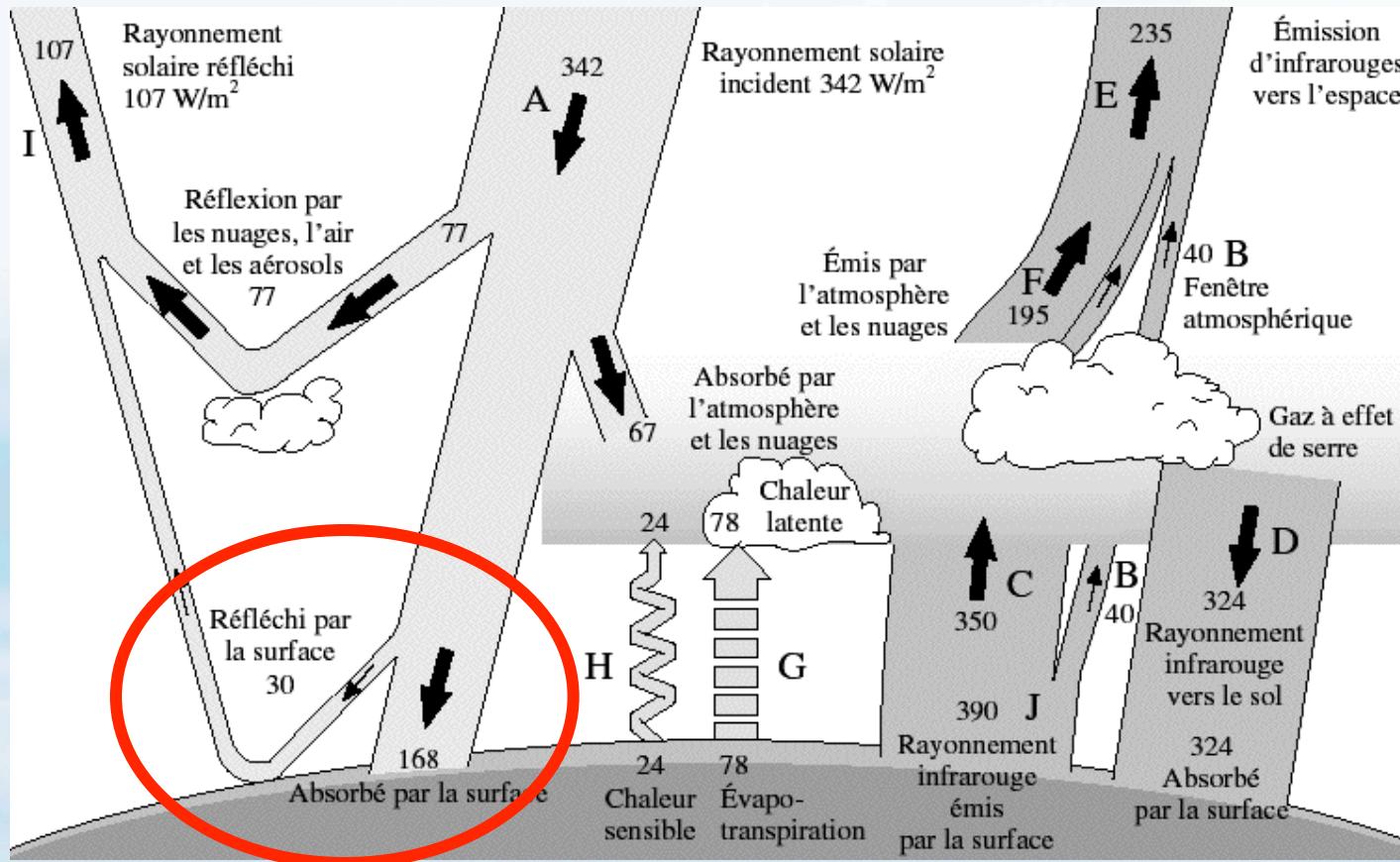
Contribution des énergies renouvelables en 2019. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Source BP Stat & divers

# Quid de notre chauvinisme renouvelable ?



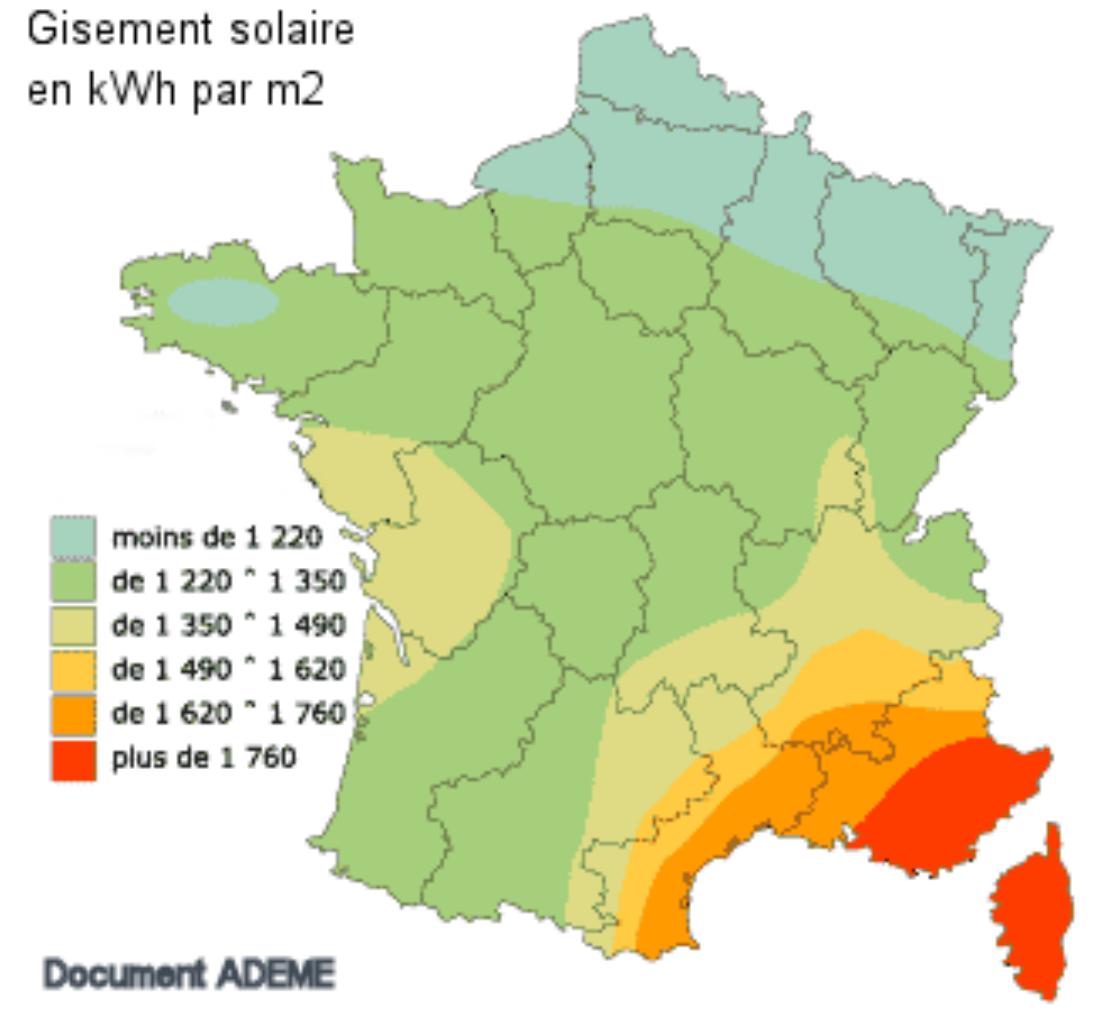
Production d'énergie renouvelable en France depuis 1970, en Mtep (consommation nationale = 240 Mtep). Source : chiffres clé de l'énergie, CGDD, 2019

# Le soleil en direct : un flux considérable... et très faible



Environ 200 Watts par  $\text{m}^2$  en moyenne annuelle et géographique au niveau du sol : le flux solaire « exploitable » représente environ  $3,2 \cdot 10^{24}$  joules par an, soit  $\approx 6.000$  fois l'énergie consommée par l'humanité ! (14 Gtep/an)

# Le soleil en direct : un flux considérable... et très faible (bis)



Energie incidente en France en kWh/m<sup>2</sup>.an. Avec un rendement de 30%, une installation bien placée de 1 m<sup>2</sup> = 400 à 500 kWh/m<sup>2</sup>.an, soit 1% de l'énergie consommée par an et par Français.

# Exploitation N° 1 : douches, bains et radiateurs

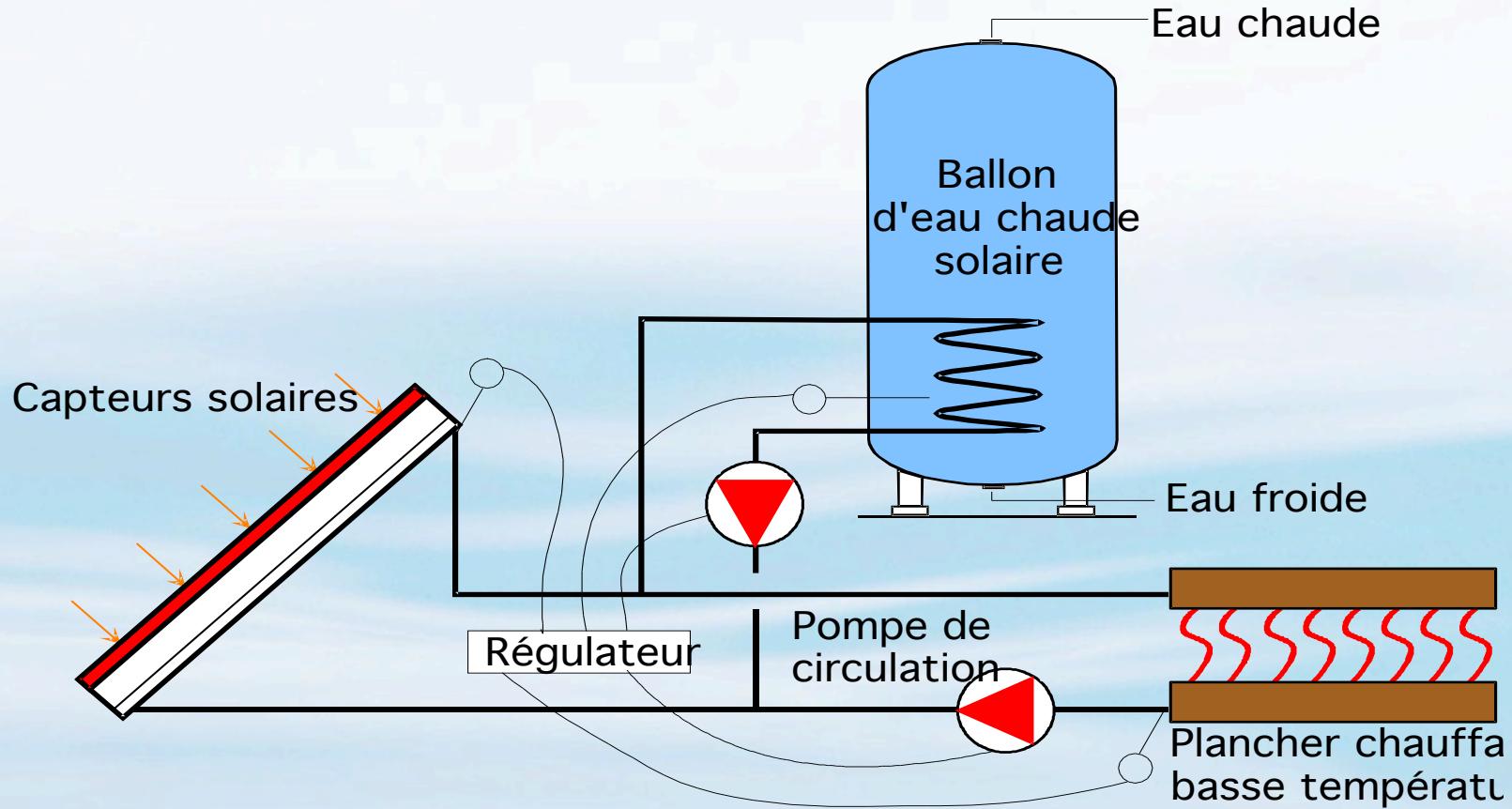


Schéma de principe d'une installation pour capter l'énergie sous forme thermique. Rendements >30%

## Exploitation N° 2 : néons et télévisions

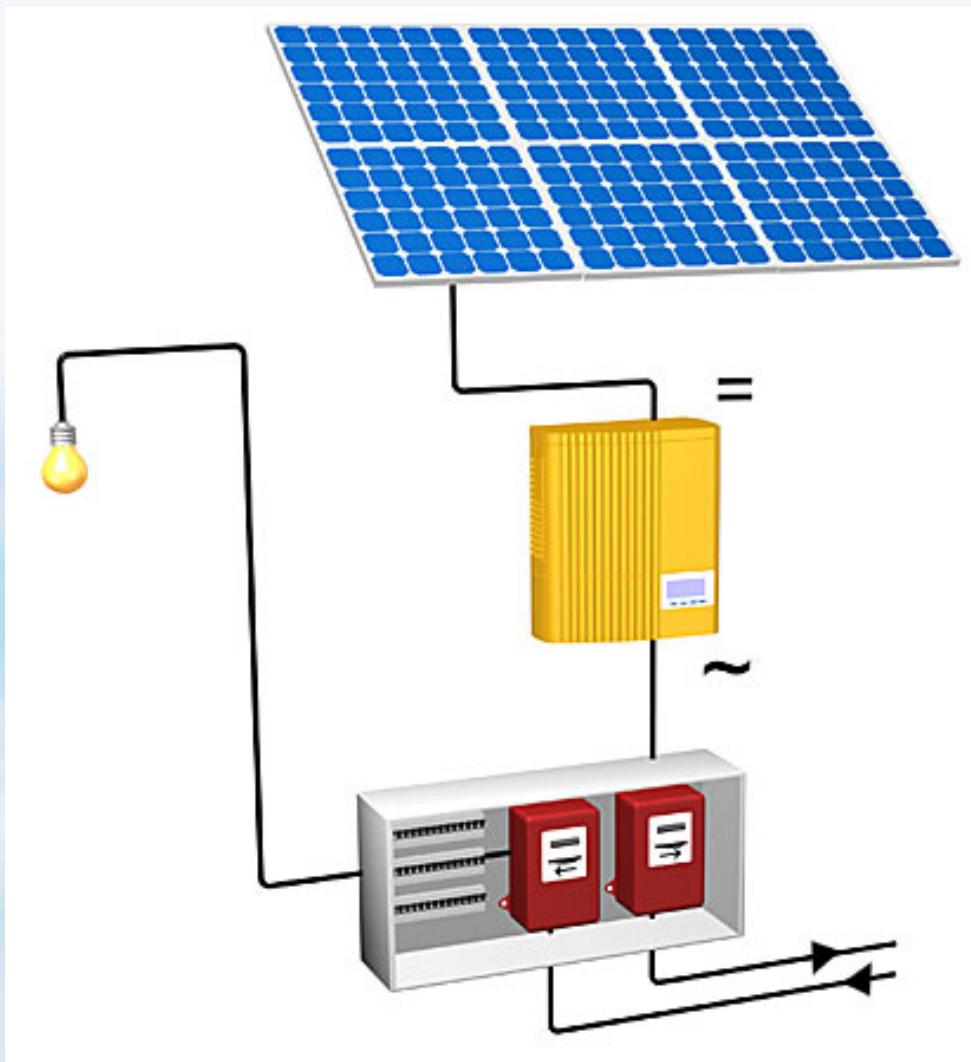


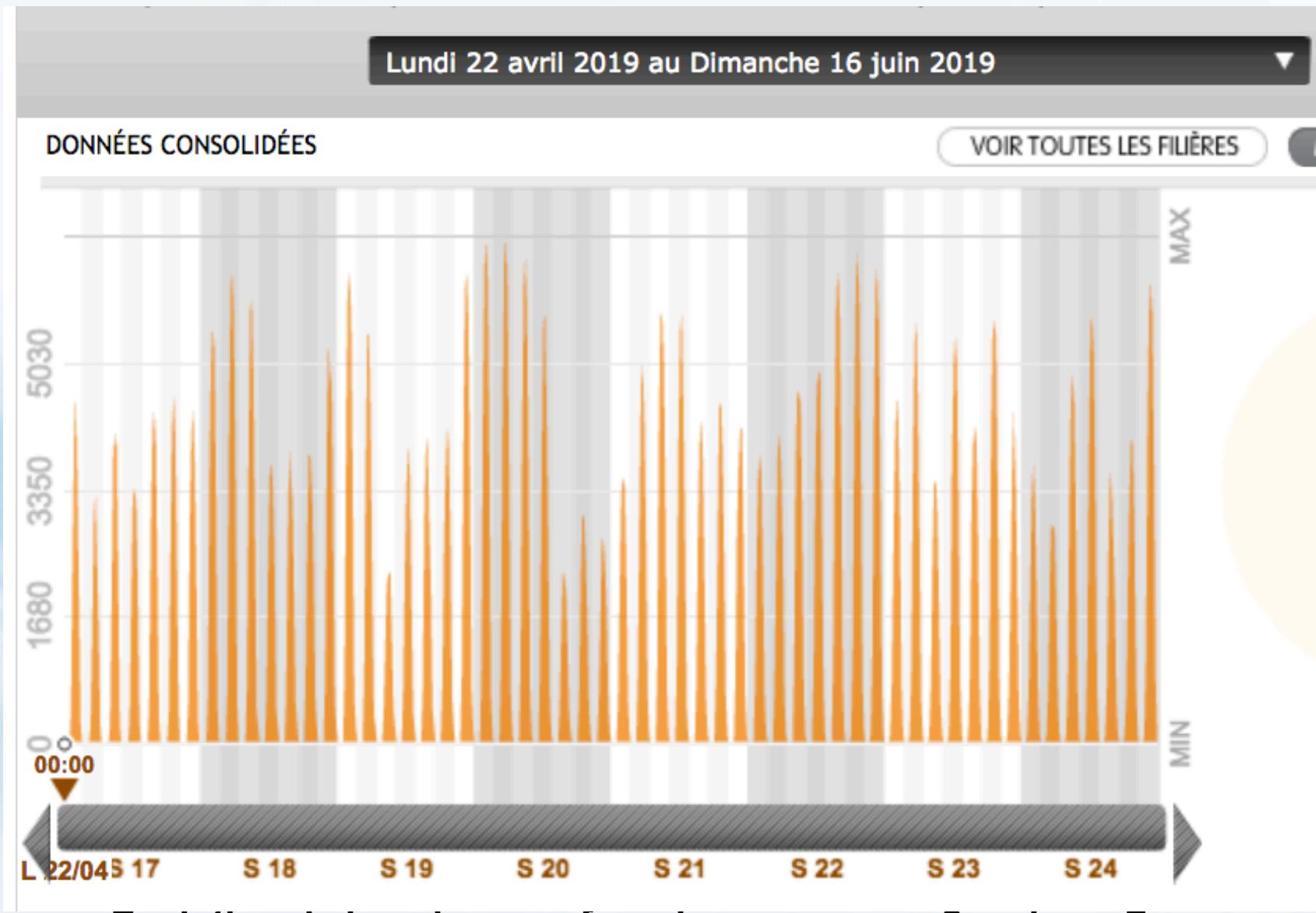
Schéma de principe d'une installation pour capter l'énergie sous forme électrique.  $1 \text{ m}^2$  de panneau = 100 à 150 kWh/m<sup>2</sup>.an

# Désormais le PV ressemble surtout à ça



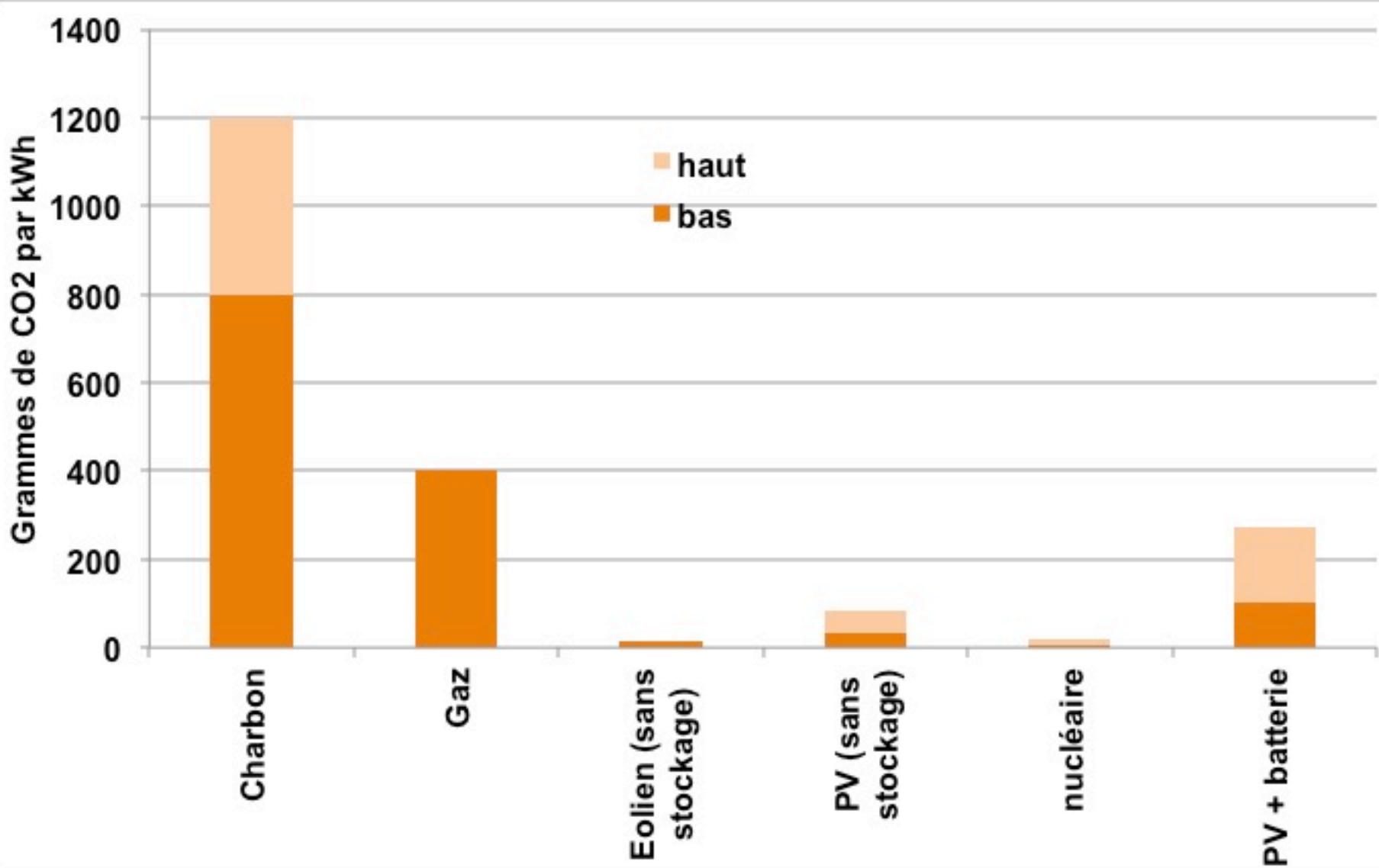
**Grande installation PV au sol. 1 hectare par MW en gros**

# Le solaire PV, il y en a plus en journée !



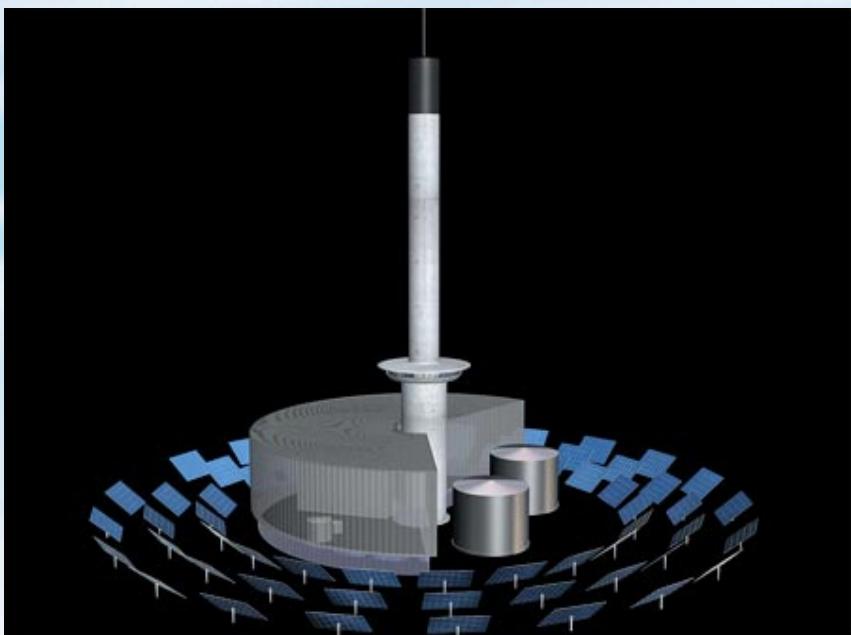
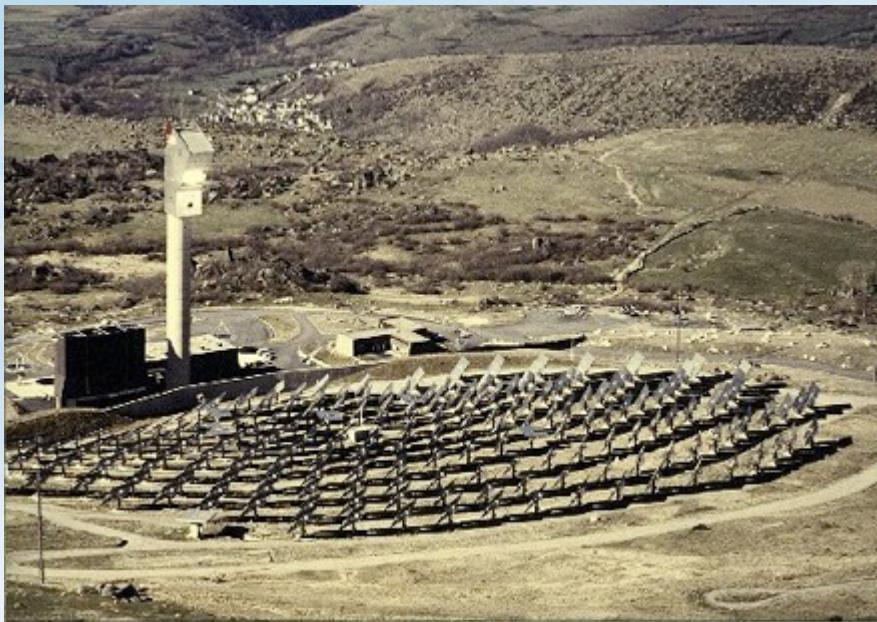
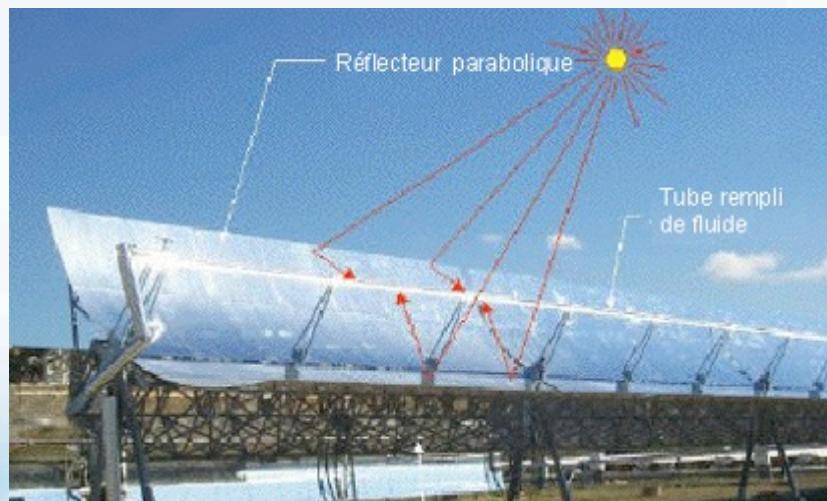
Evolution de la puissance fournie sur presque 2 mois en France

Source : RTE, 2019



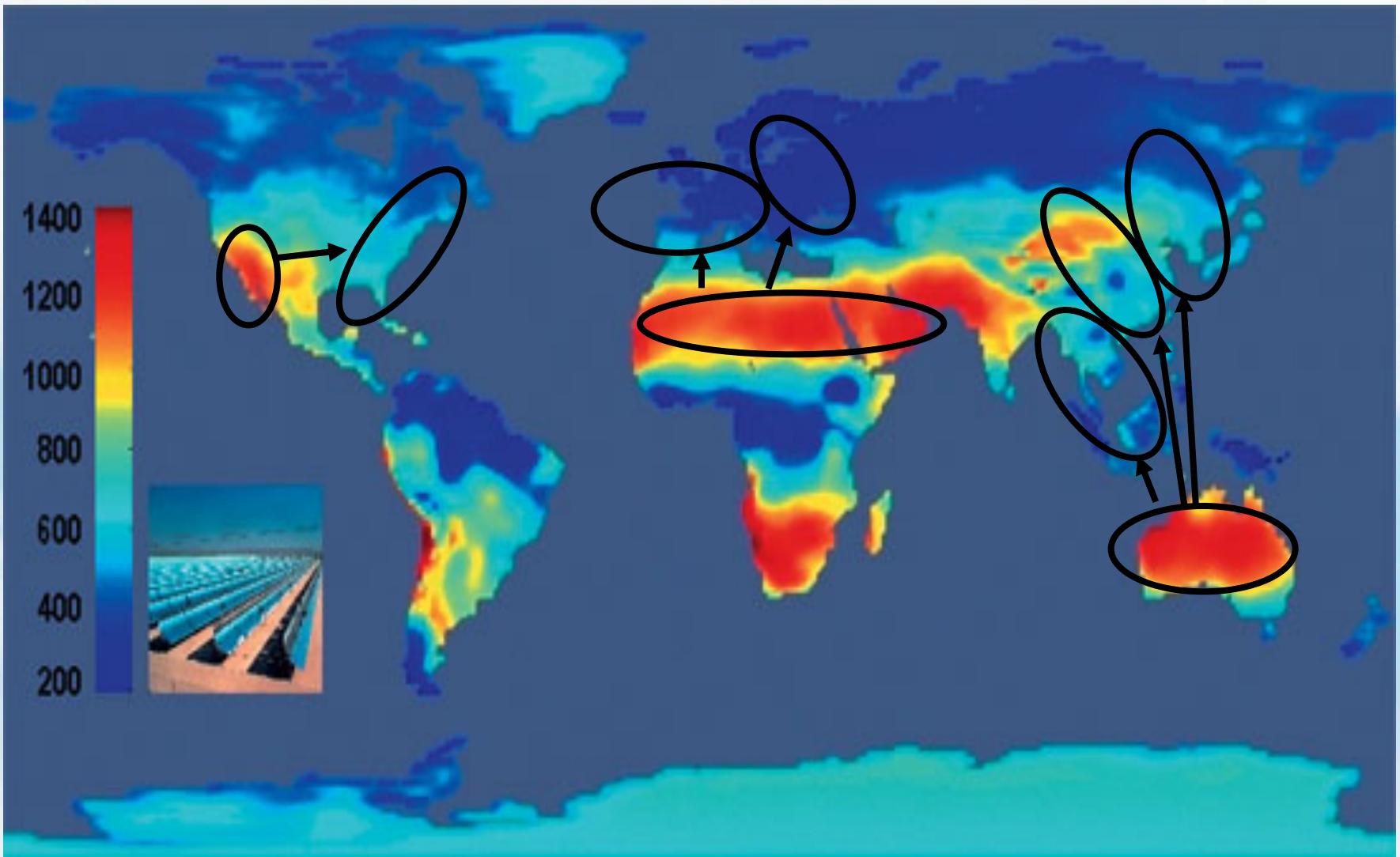
Émissions de CO<sub>2</sub> par kWh électrique selon le mode de production.

# Exploitation N° 3 : je concentre très fort

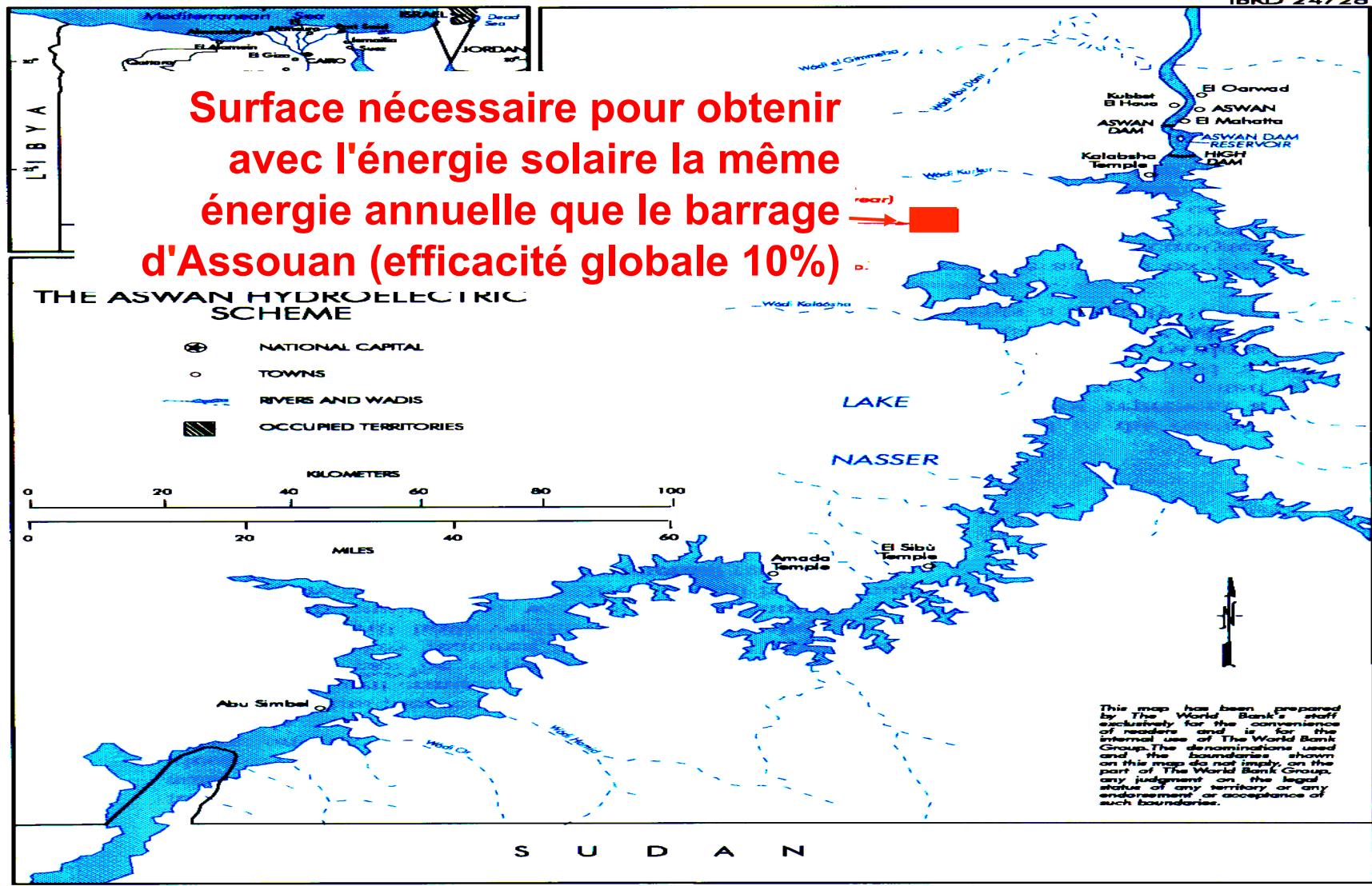


Divers dessins de centrales solaires à concentration

# Le solaire à concentration, avenir des échanges ?



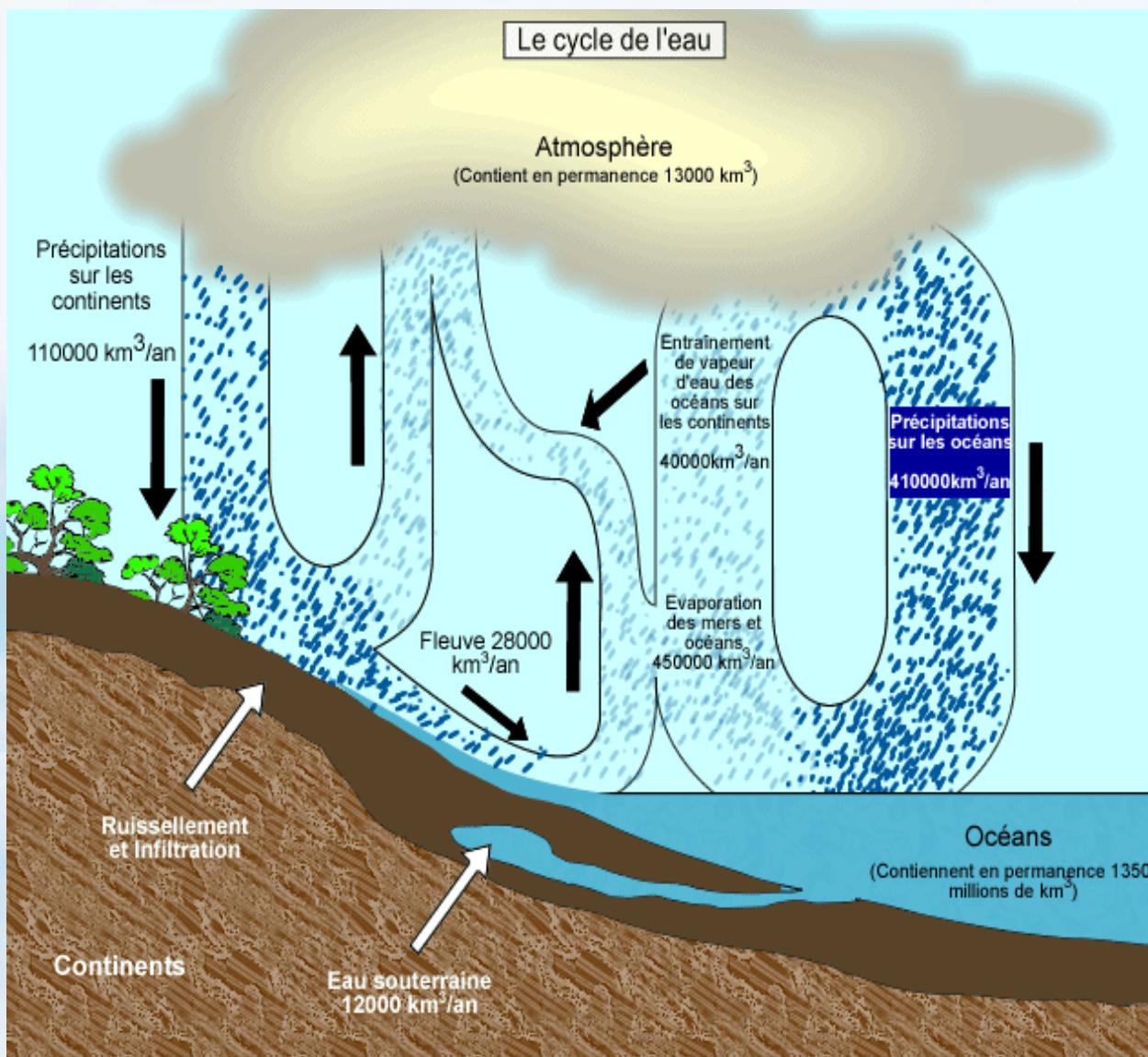
# Concentrer le solaire, plus fort que concentrer l'eau



**Photovoltaïque = production en bout de réseau <-> concentration = production en tête de réseau**

**Se passer de réseau ?  $\sum$  pointes locales = 5 fois pointe globale + il faut stocker localement (c'est beaucoup plus cher)**

# L'hydroélectricité commence par cela...



Cycle de l'eau et principales grandeurs. Energie mise en œuvre ≈ 2000 fois la consommation de l'humanité.

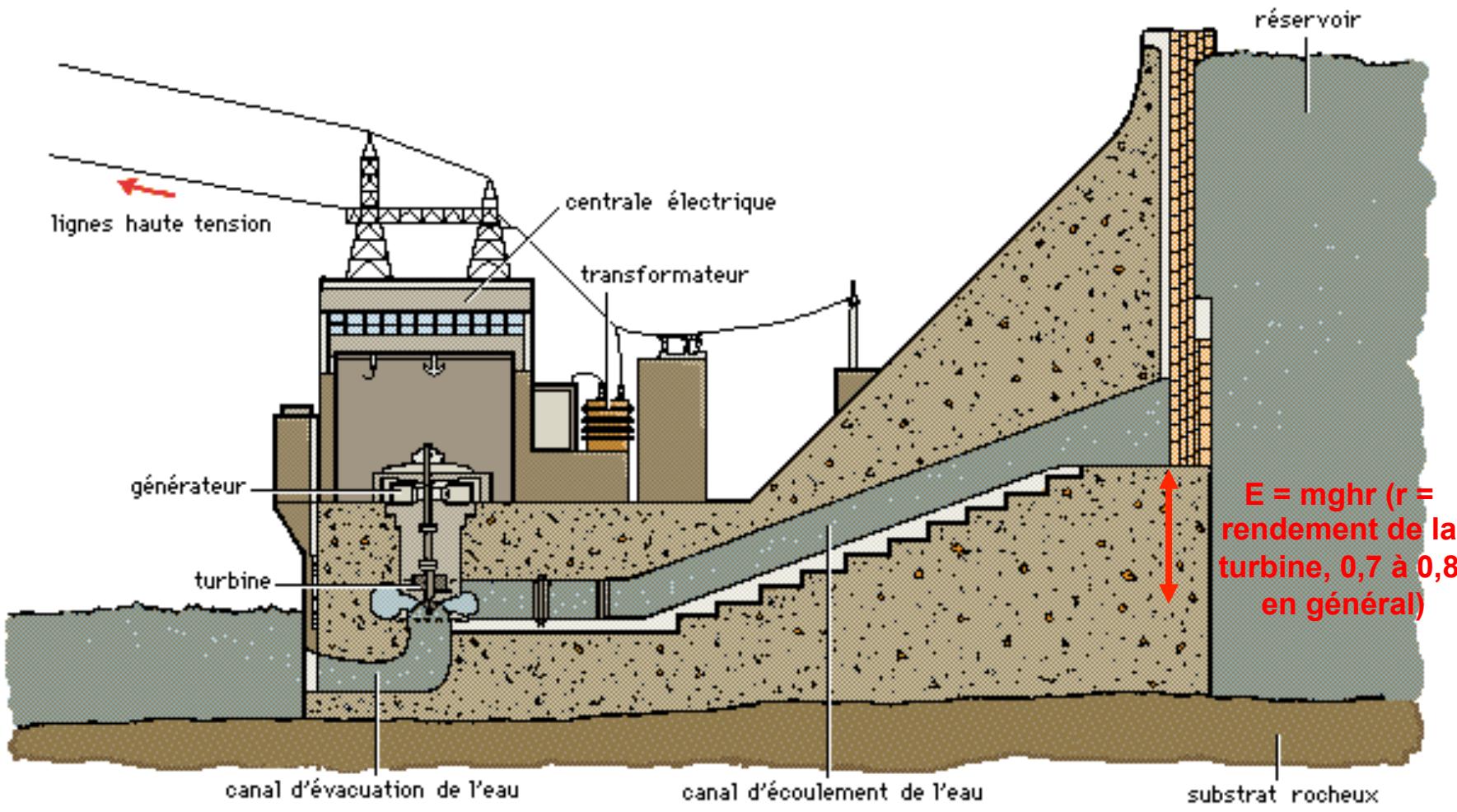


Schéma de principe d'une production à partir d'un lac de retenue.

# Le calcul « théorique »

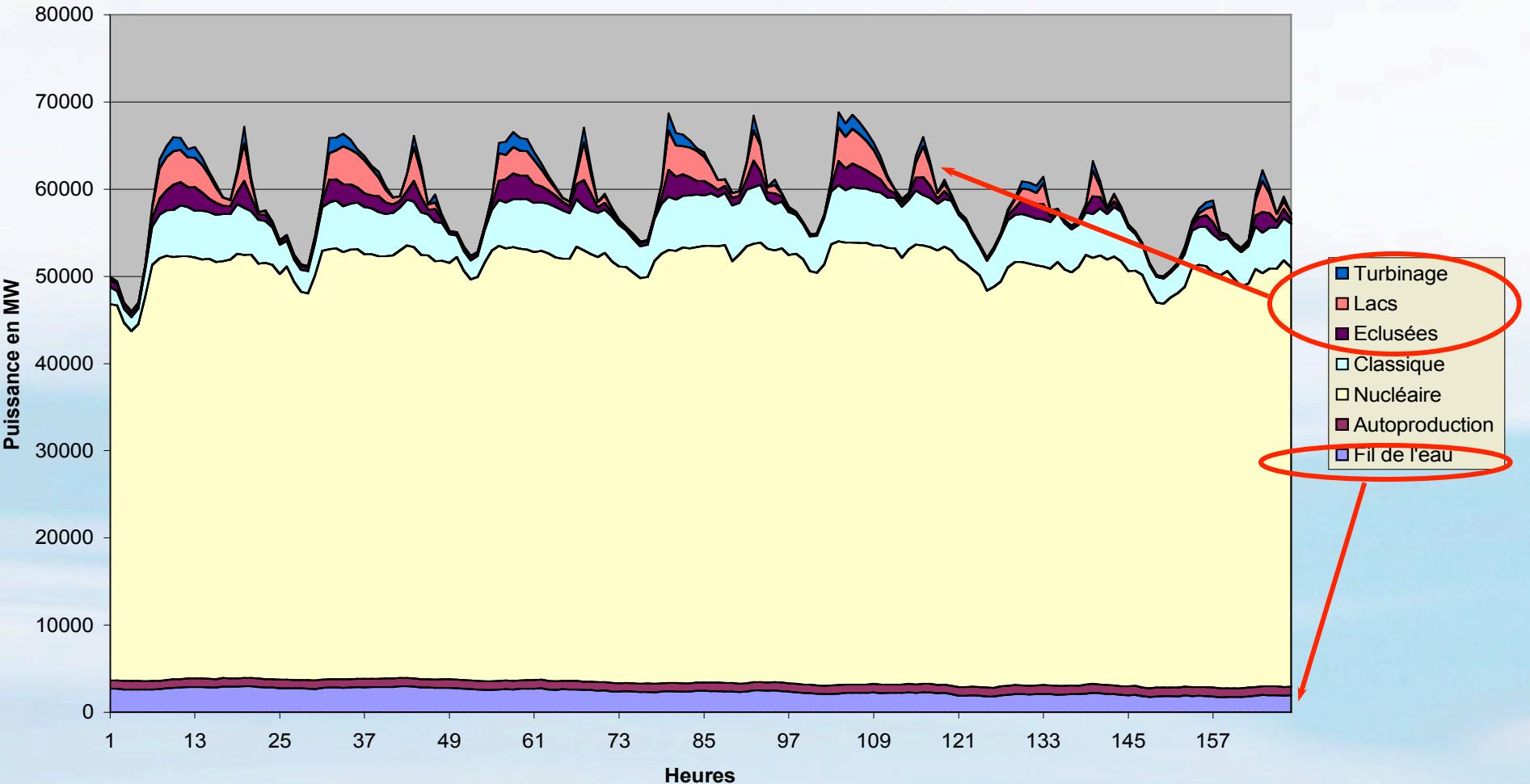
Massif	Superficie km <sup>2</sup>	précipitations annuelles (mm)	Hauteur moyenne de chute (mètres)	Energie potentielle max TWh	Energie électrique max TWh
Rhone Alpes	44 000	1 000	1 500	180	144
Reste Massif Central	20 000	1 200	1 000	65	52
Suisse	41 000	800	2 000	179	143
Pyrénées	50 000	1 000	1 000	136	109
Autriche	84 000	1 000	1 500	343	275
Norvège	100 000	500	1 000	136	109
Suède	100 000	500	1 000	136	109
Italie	80 000	600	1 000	131	105
Reste de l'Europe	100 000	800	1 000	218	174
<b>Total</b>				<b>1 525</b>	<b>1 220</b>

reliefs

Volumes d'eau  
retenus max

$$E = mgh$$

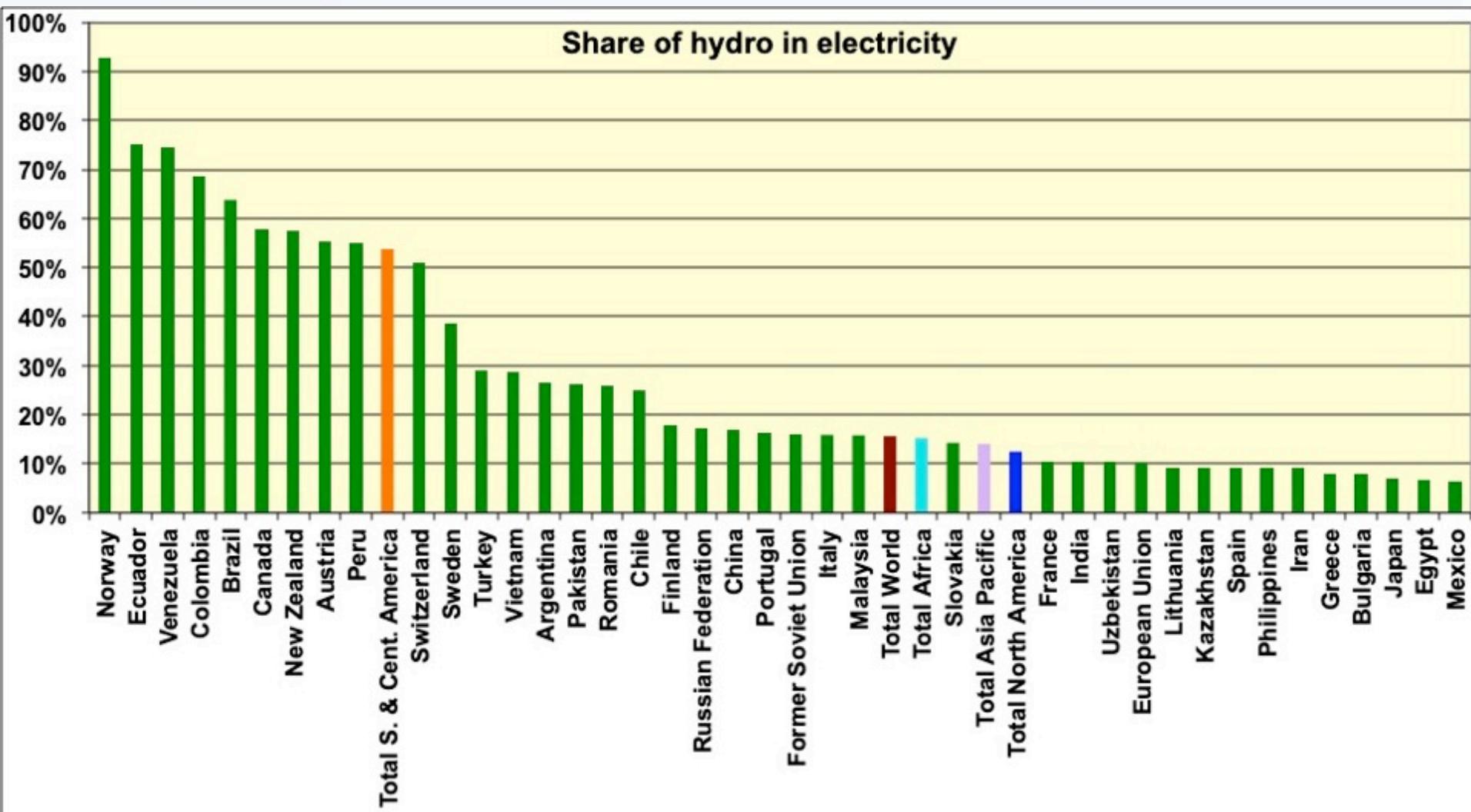
$$E = mghr$$



**Contribution de chaque moyen de production à l'alimentation du réseau en France sur une semaine d'hiver.**

Source : EDF

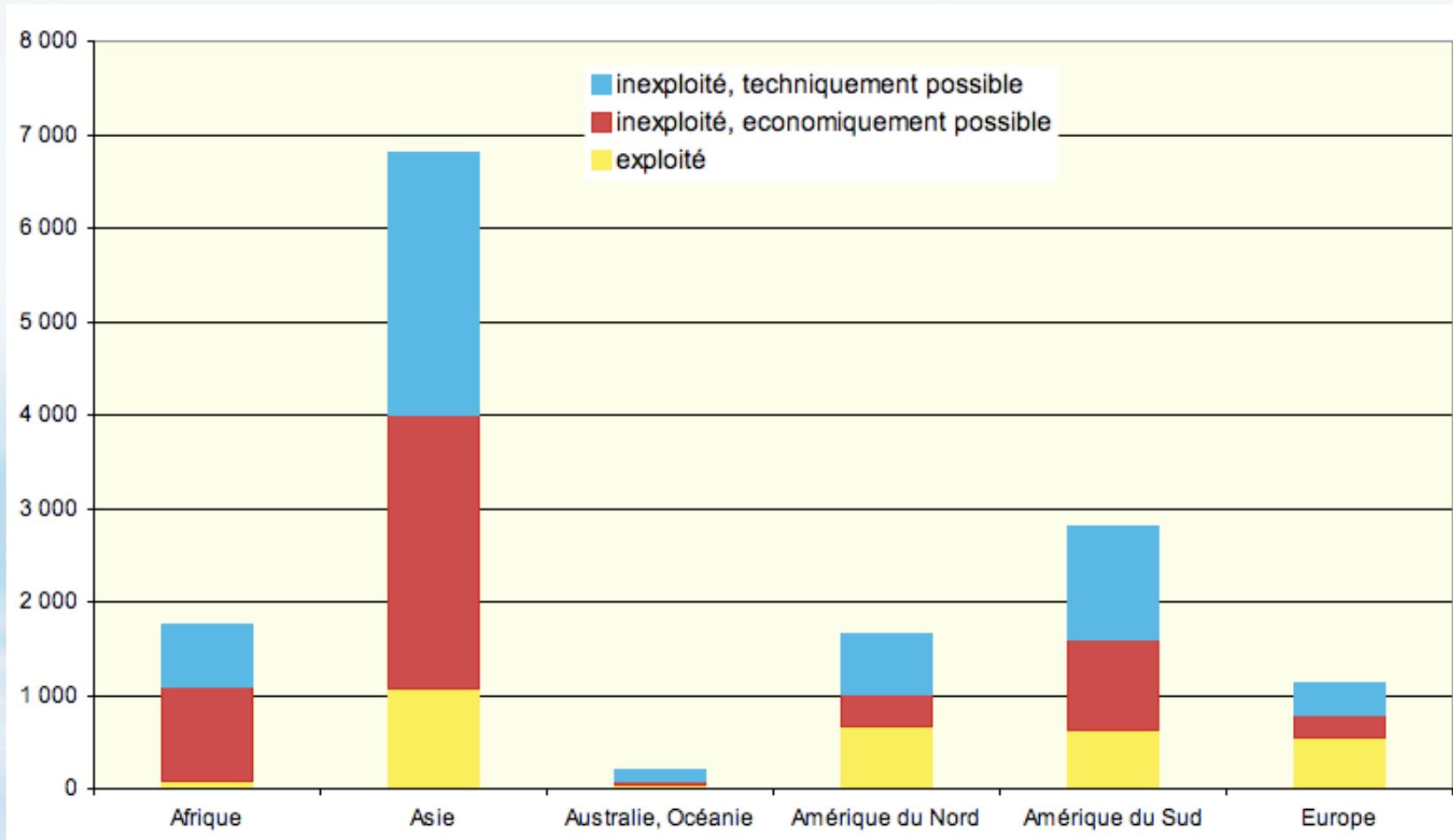
# Hydroélectricité = montagnes, ou à peu près



Part de l'hydroélectricité dans la production électrique par pays en 2019.

Source des données : BP Statistical Review

# En faire encore plus n'est pas aussi facile partout



Potentiel hydroélectrique et production des barrages déjà installés par zone.

Source : Aqua Media International, 2007

# C'est renouvelable, pas toujours inoffensif



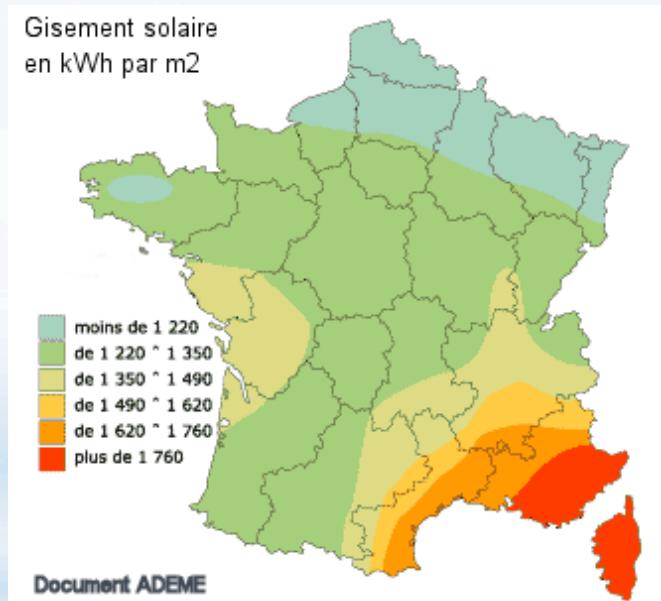
**Photo du lac de barrage de Vajont (Italie), après le glissement de terrain (plus de 2000 morts à l'aval)**

# A l'origine, toujours la même histoire : la photosynthèse

Insolation moyenne en France : 1200 à 1700 kWh/m<sup>2</sup>.an

0,5% de rendement là-dessus

Photosynthèse = 1 500 (kWh/m<sup>2</sup>.an) x 10 000 (m<sup>2</sup> par ha) x 0,5% (rendement) ÷ 11 600 (kWh par tep) = 6,5 tep brut (soit environ 13 à 15 t de matière sèche par hectare et par an).

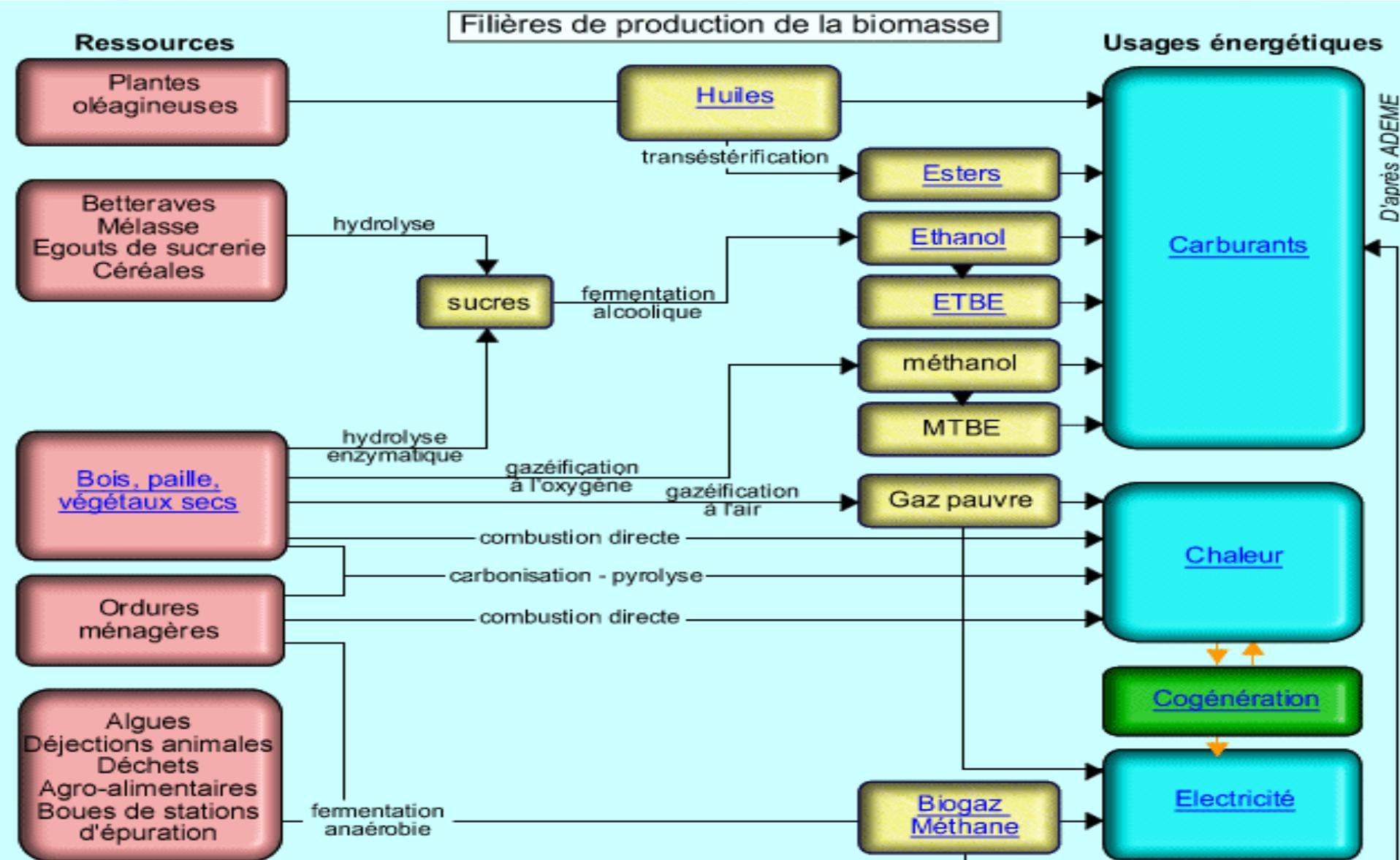


En substitut au chauffage : 3 à 4 tep net

En substitut aux carburants : 1 tep net dans les bons cas de figure (en France), 0 dans les mauvais ; 3 tep net au Brésil... si pas de déforestation.

La France = 50 M d'ha de surface métropolitaine ; consomme 70 Mt de pétrole...

# Ensuite, il y a N manières de s'en servir



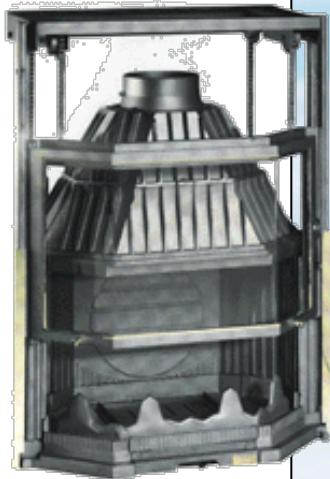
# Le plus simple : brûler ce que l'on trouve

Energie finale ≈ 8,6 Mtep en 2004 (9,1 en 2015)

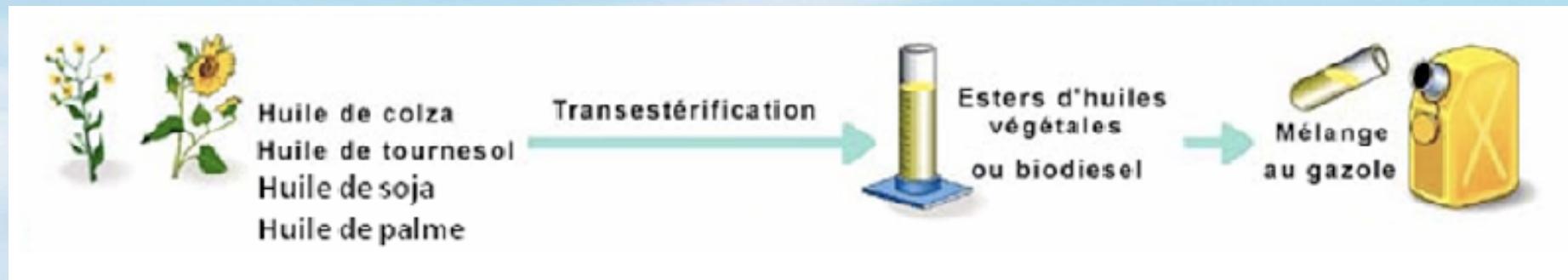
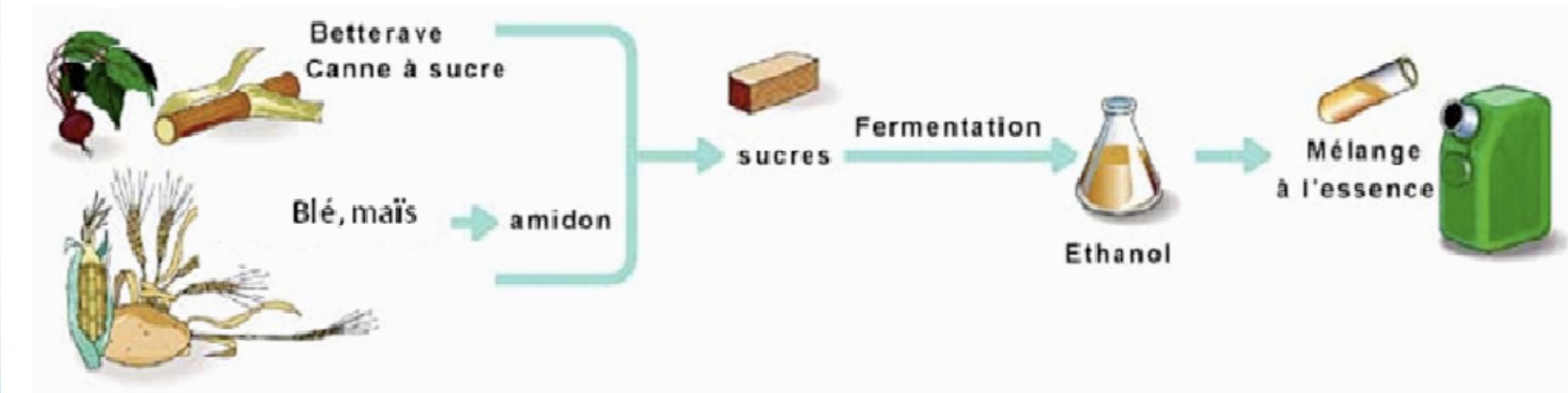
**85 % chaleur maisons individuelles principales (7,3Mtep)**

**13% chaleur dans l'industrie bois/papier (1,17Mtep)**

**2 % chaleur dans le collectif/tertiaire avec ou sans réseau de chaleur (0,17Mtep)**



# Ah, sainte voiture, comment te conserver ?



Les deux grandes filières d'agrocarburants de première génération

# La géothermie profonde, comment ça marche ?

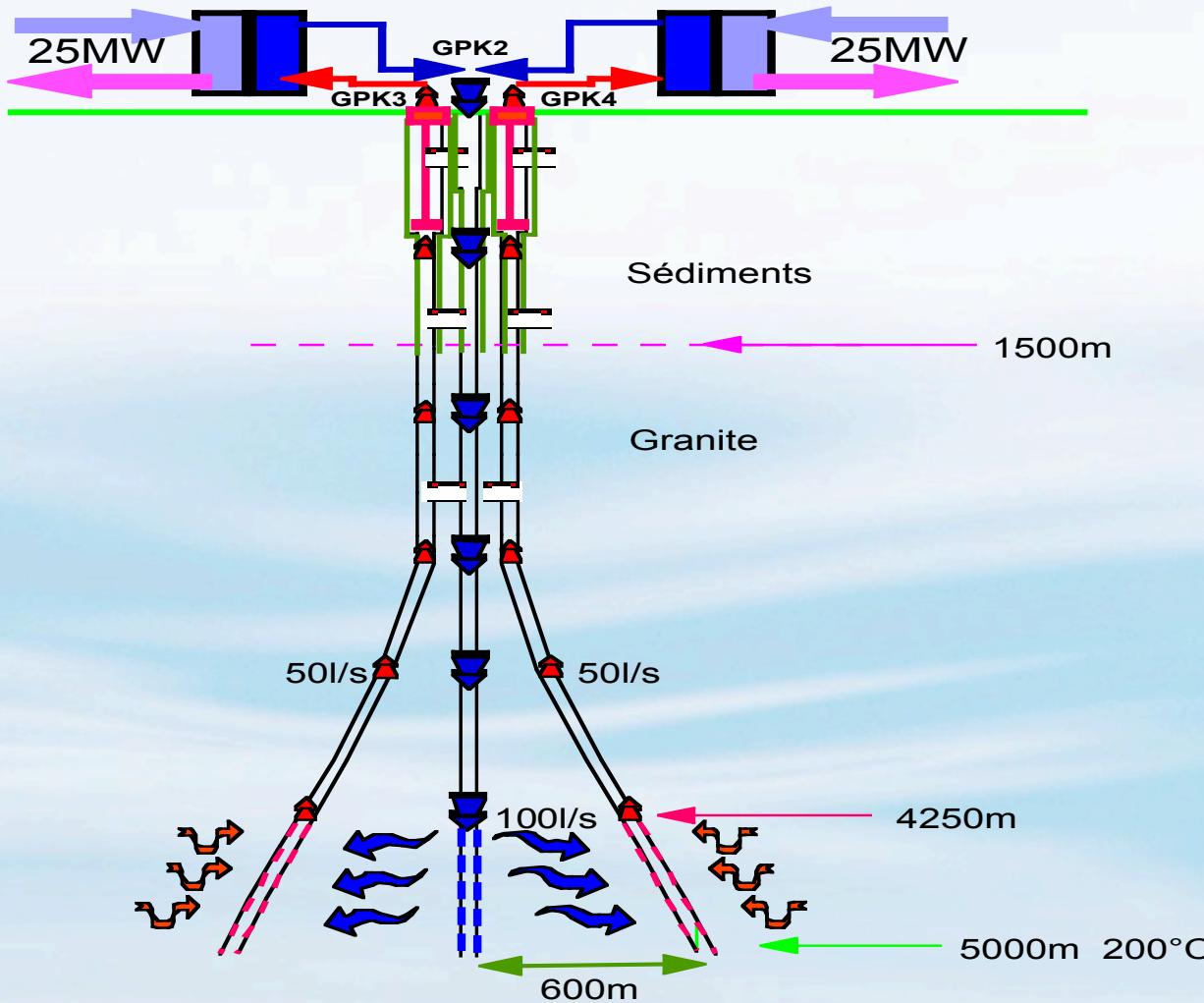
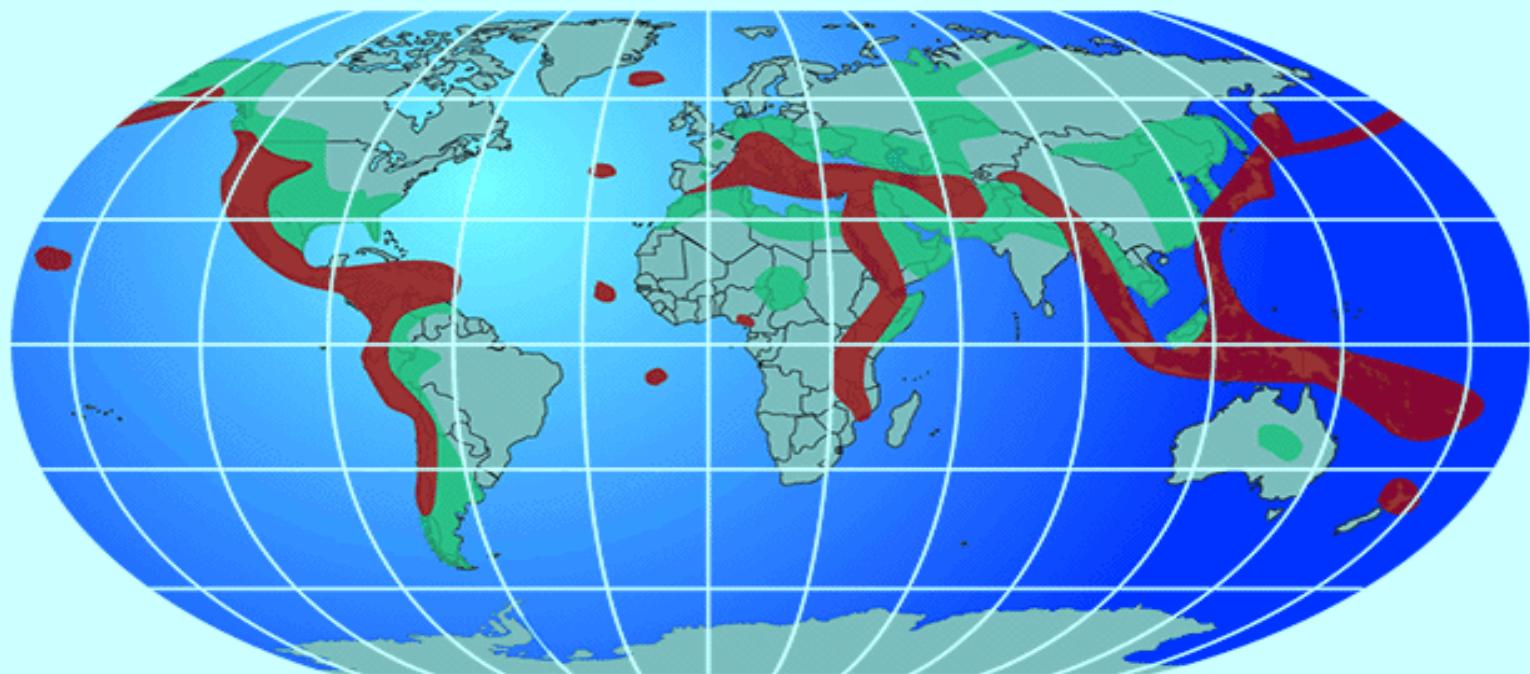


Schéma de principe d'une installation destinée à produire de l'électricité avec des roches chaudes fracturées

# Le chauffage par le sol, en somme

Géothermie, les ressources mondiales



- Zones propices au développement de la géothermie haute énergie (régions tectoniques et volcaniques actives émergées)
- Zones favorables à la géothermie basse énergie (bassins sédimentaires)
- Zones de socle cristallin peu propices

source : BRGM-im@gé

**Zones plus ou moins propices à la géothermie profonde. Flux géothermique annuel ≈ 2 fois la consommation de l'humanité.**

# La géothermie moins profonde, comment ça marche ?



Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage urbain

# La géothermie pas profonde du tout, comment ça marche ?

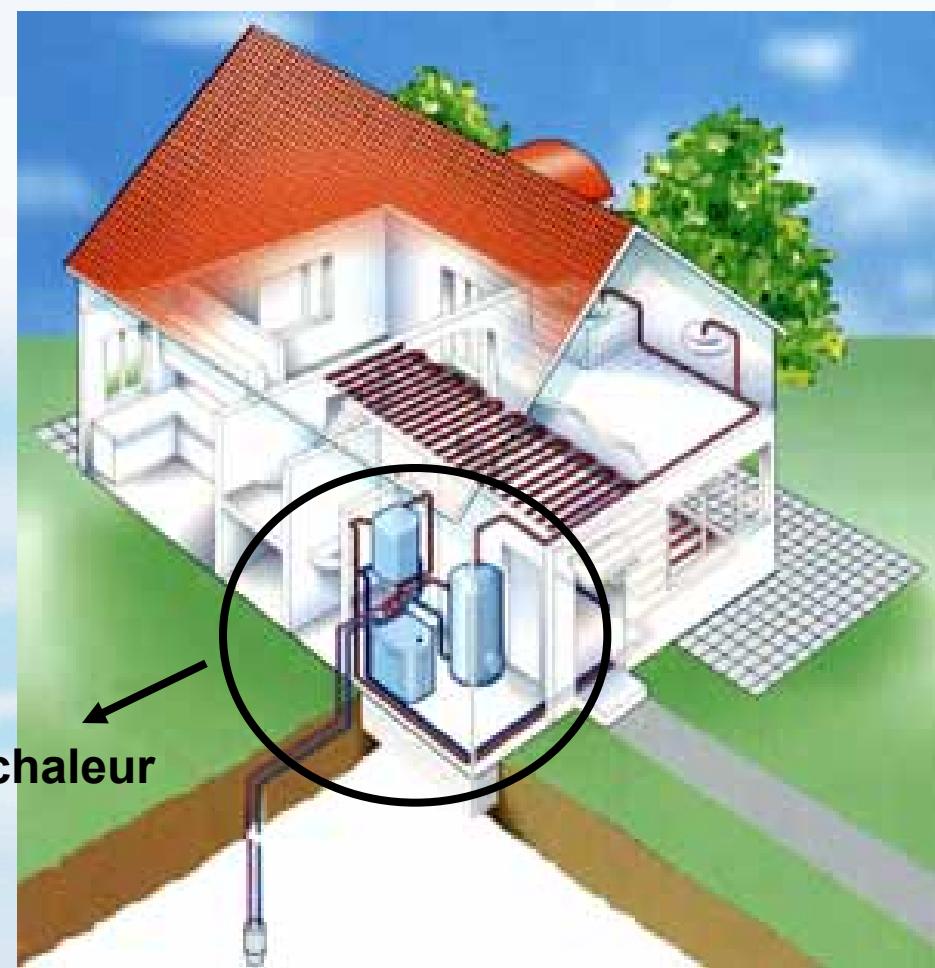
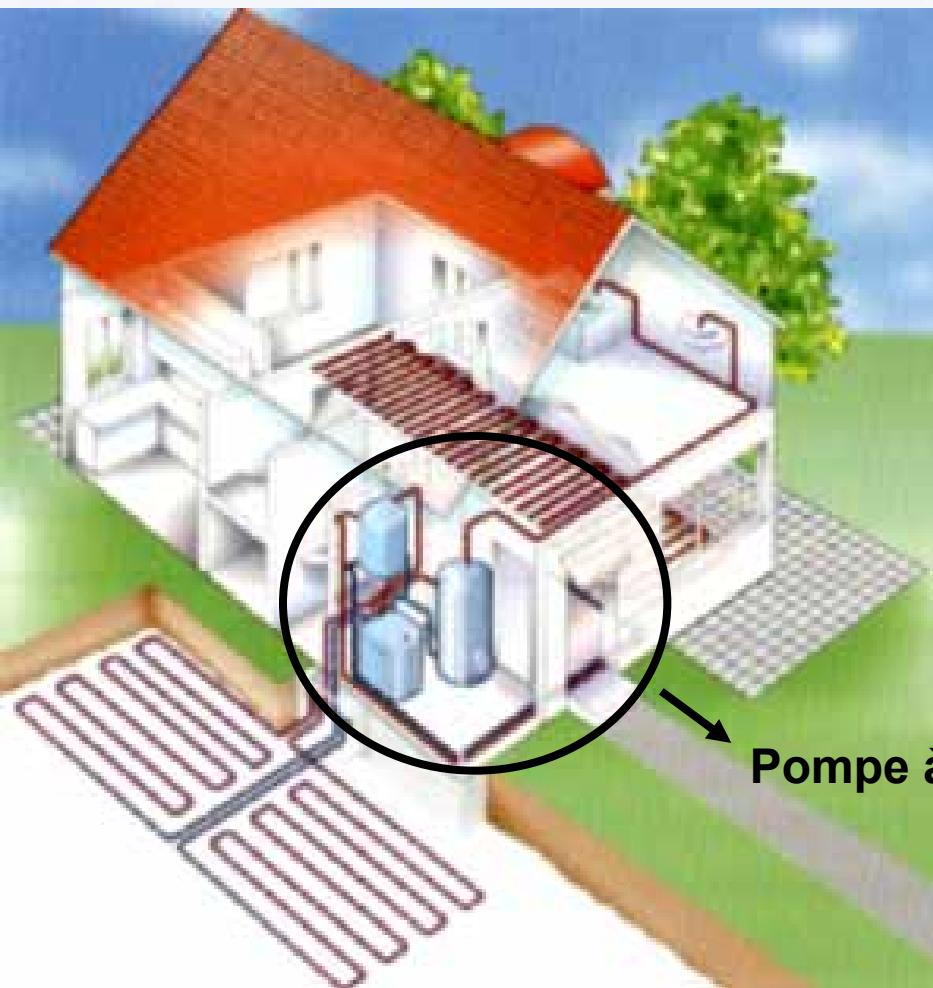
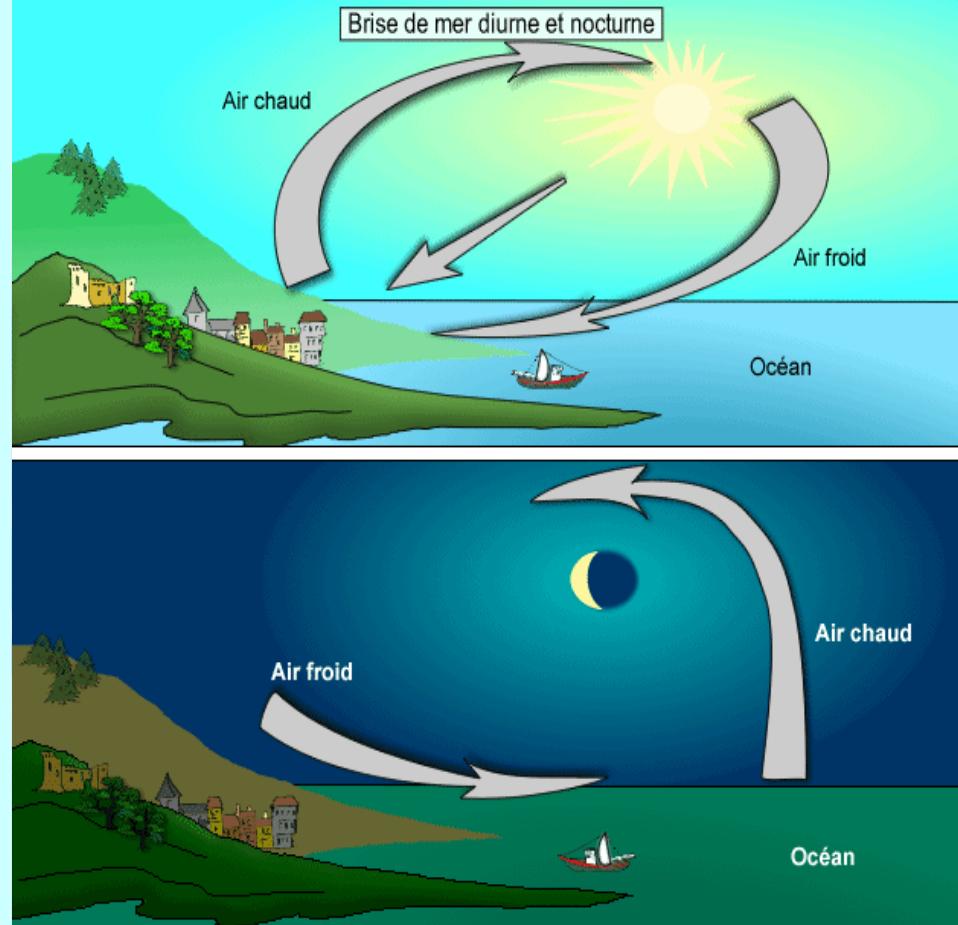
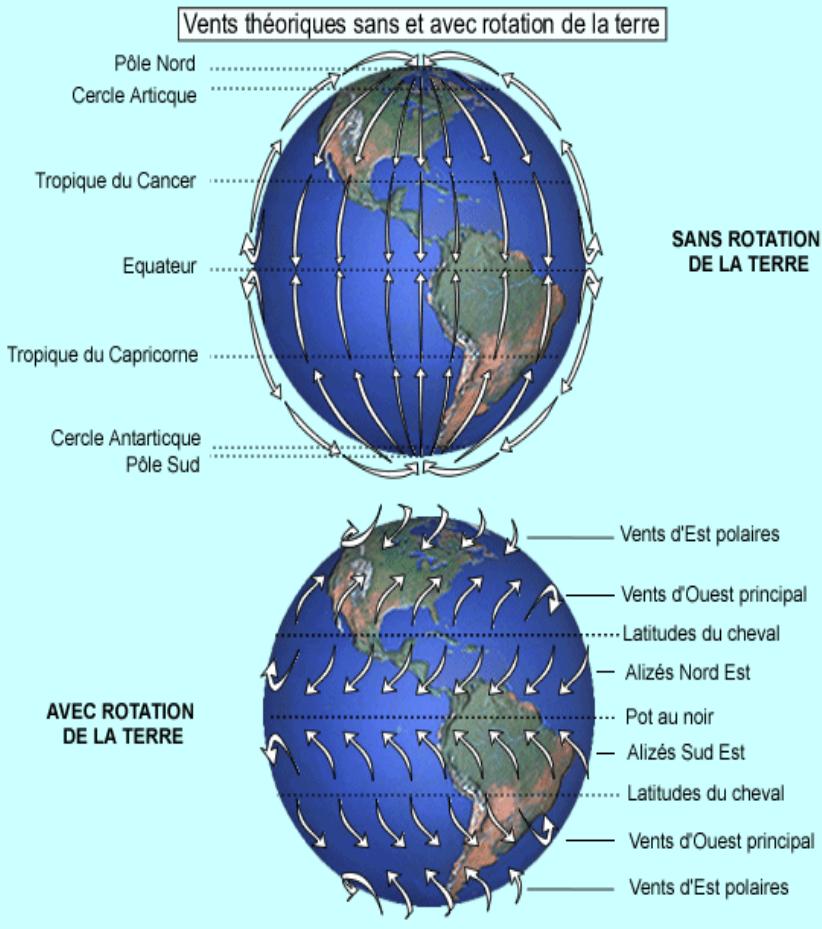
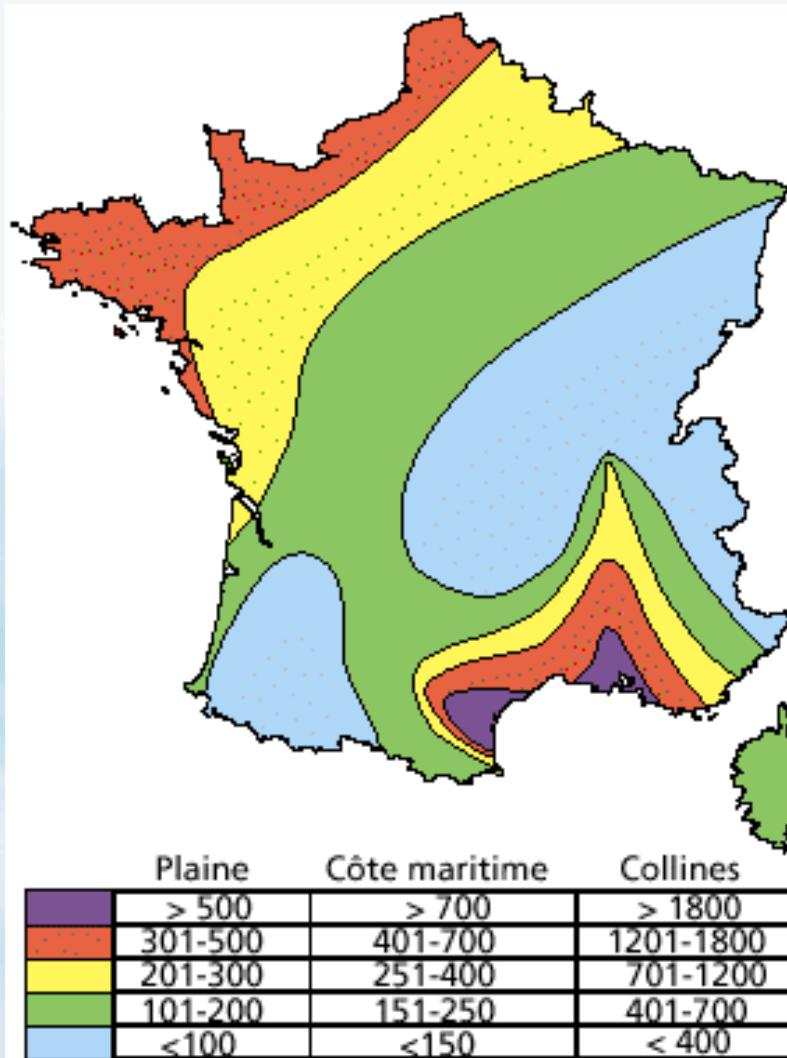


Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage individuel

# L'éolien commence par cela...

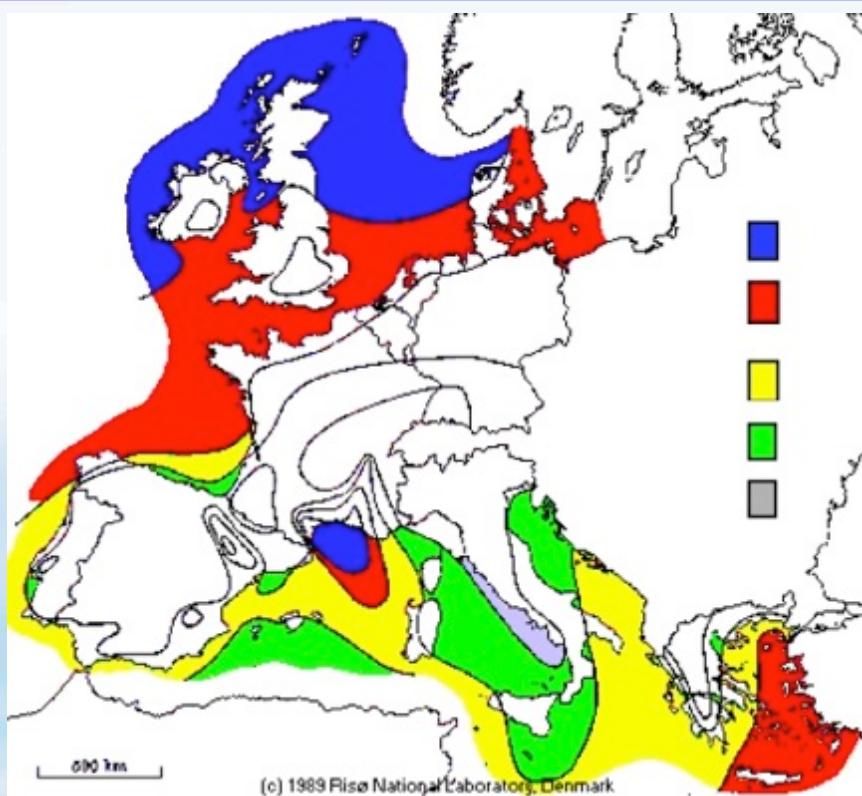


**Principales circulations atmosphériques. Energie des vents & des courants ≈ 25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité.**



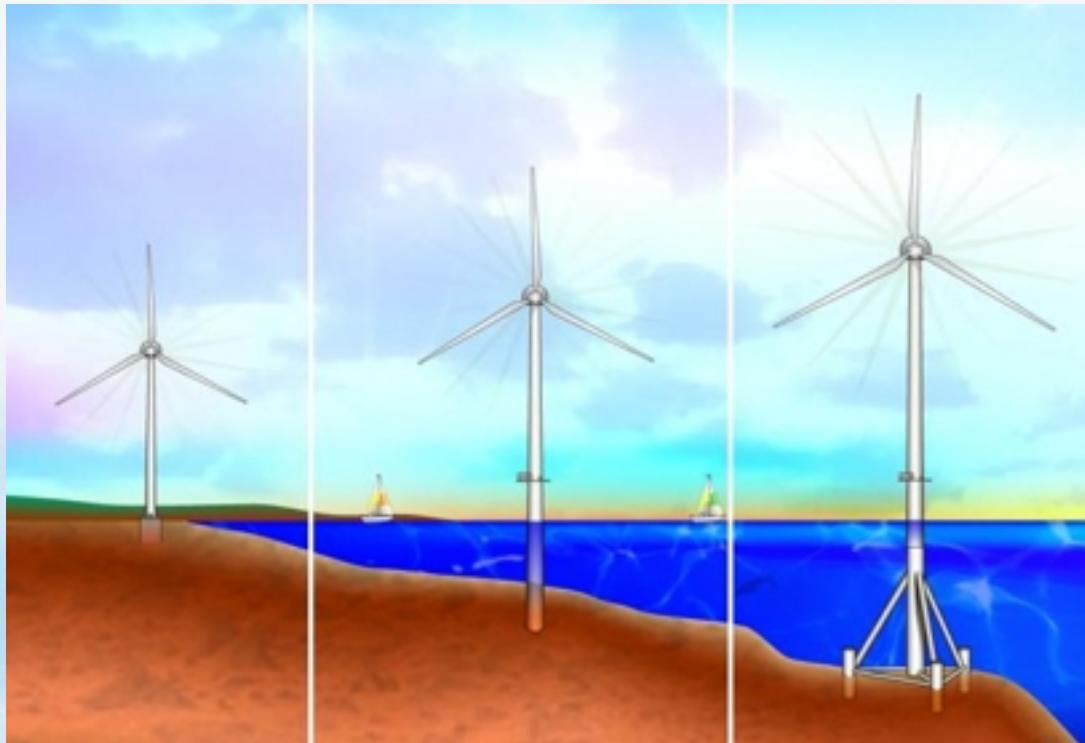
**Puissance moyenne du vent selon les zones, en W pour un m<sup>2</sup> de section verticale prise à 50 m du sol (perpendiculairement au sens du vent). Source ADEME**

# Le vent, un caprice plus ou moins fréquent



	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	m/s	W/m²	m/s	W/m²	m/s	W/m²	m/s	W/m²	m/s	W/m²
Blue	> 8	> 600	> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 10	> 1100	> 11	> 1500
Red	7 à 8	350 à 600	7,5 à 8,5	450 à 700	8 à 9	600 à 800	8,5 à 10	650 à 1100	9,5 à 11	900 à 1500
Yellow	6.0 à 7.0	250 à 300	6.5 à 7.5	300 à 450	7.0 à 8.0	400 à 600	7.5 à 8.5	450 à 650	8.0 à 9.5	600 à 900
Green	4.5 à 6.0	100 à 250	5.0 à 6.5	150 à 300	5.5 à 7.0	200 à 400	6.0 à 7.5	250 à 450	6.5 à 8.0	300 à 600
Grey	< 4.5	< 100	< 5.0	< 150	< 5.5	< 200	< 6.0	< 250	< 6.5	< 300

**Puissance moyenne du vent selon les zones, en W pour un m<sup>2</sup> de section verticale (perpendiculairement au sens du vent). Source ADEME**



1985 : Ø 15 m   1995 : Ø 70 m   2005 : Ø 110 m  
 $P = 50 \text{ kW}$     $P = 1500 \text{ kW}$     $P = 4000 \text{ kW}$

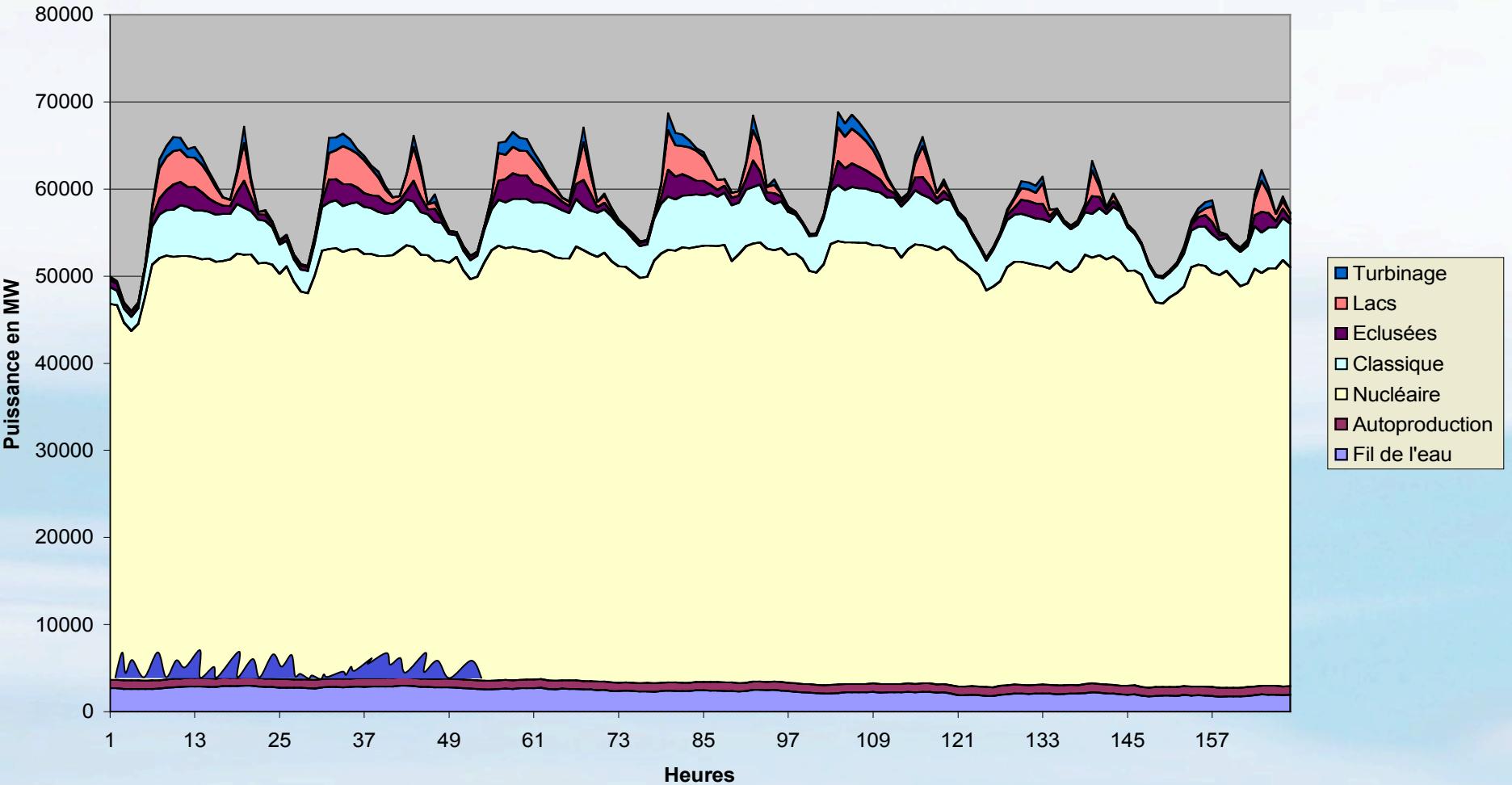
**Puissance qui varie comme le cube de la vitesse**

$$P = 1/2 * \text{masse} * \text{vitesse}^2 / \text{temps}$$

$$\text{masse} = \text{volume} * \text{densité}$$

$$\text{volume} = \text{section} * \text{vitesse} * \text{temps}$$

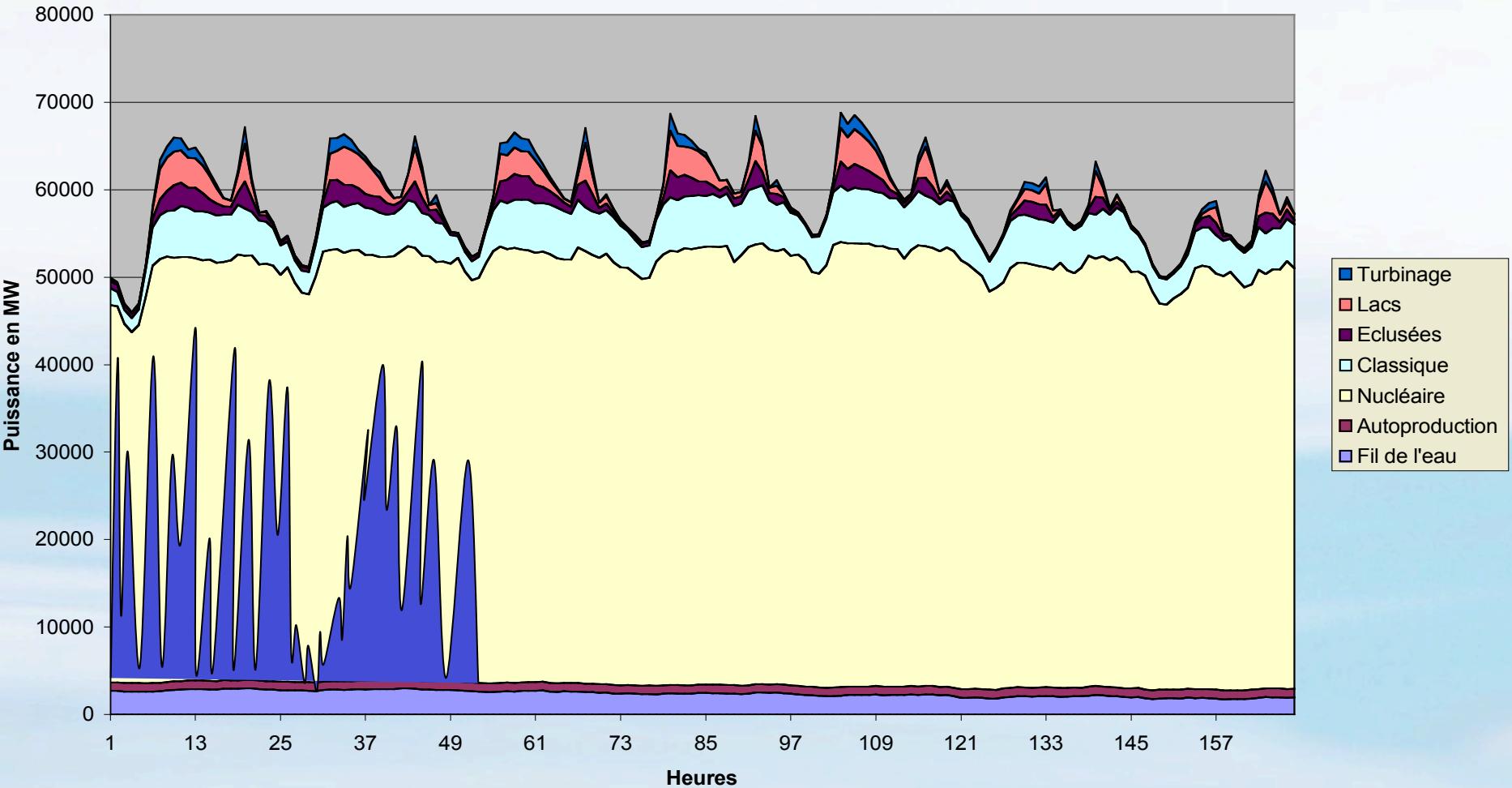
# Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



**Contribution de chaque moyen de production à l'alimentation du réseau en France sur une semaine d'hiver.**

Source : EDF

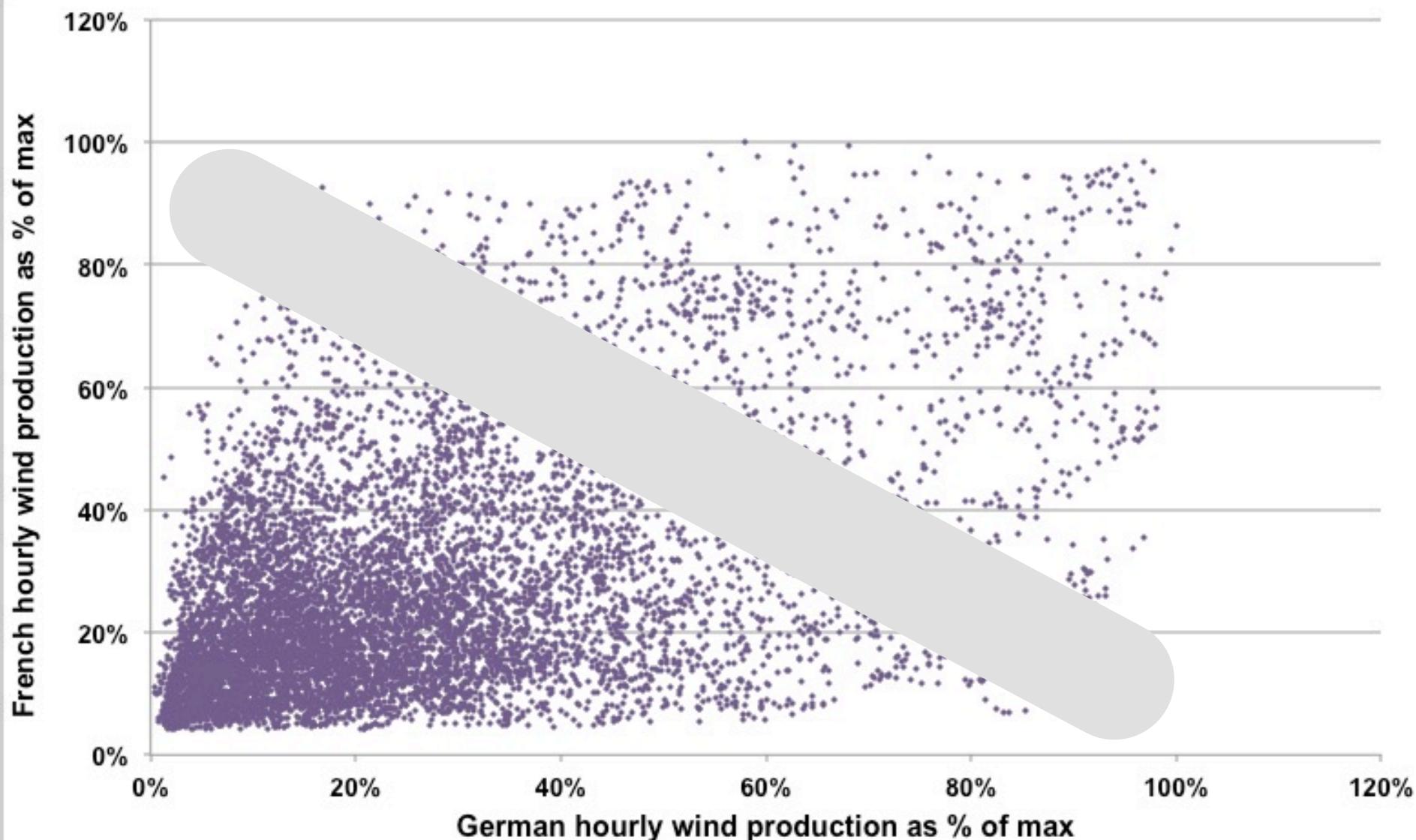
# Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



Contribution de chaque moyen de production à l'alimentation du réseau en France sur une semaine d'hiver.

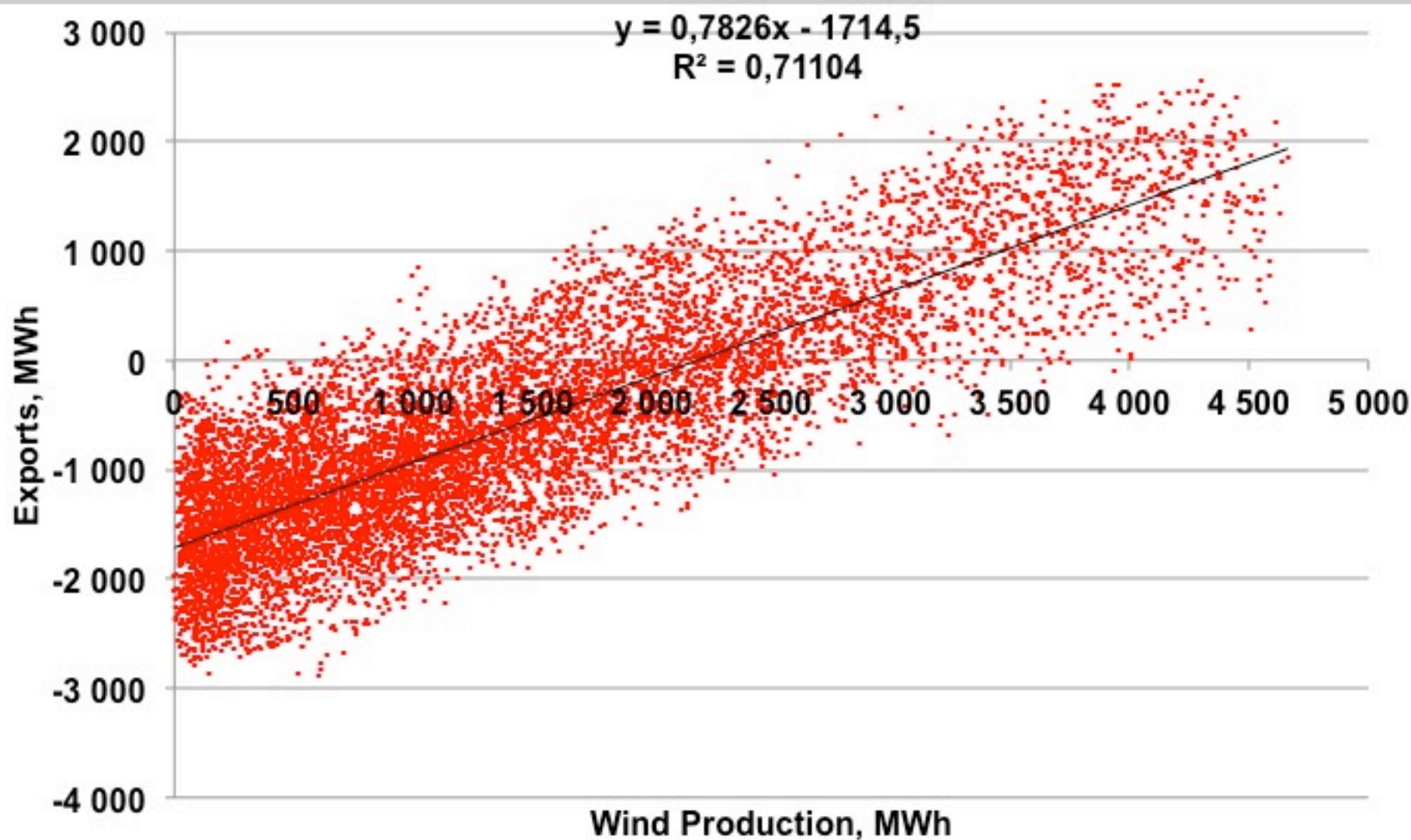
Source : EDF

# Du vent chez les voisins quand on en manque chez nous ?



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

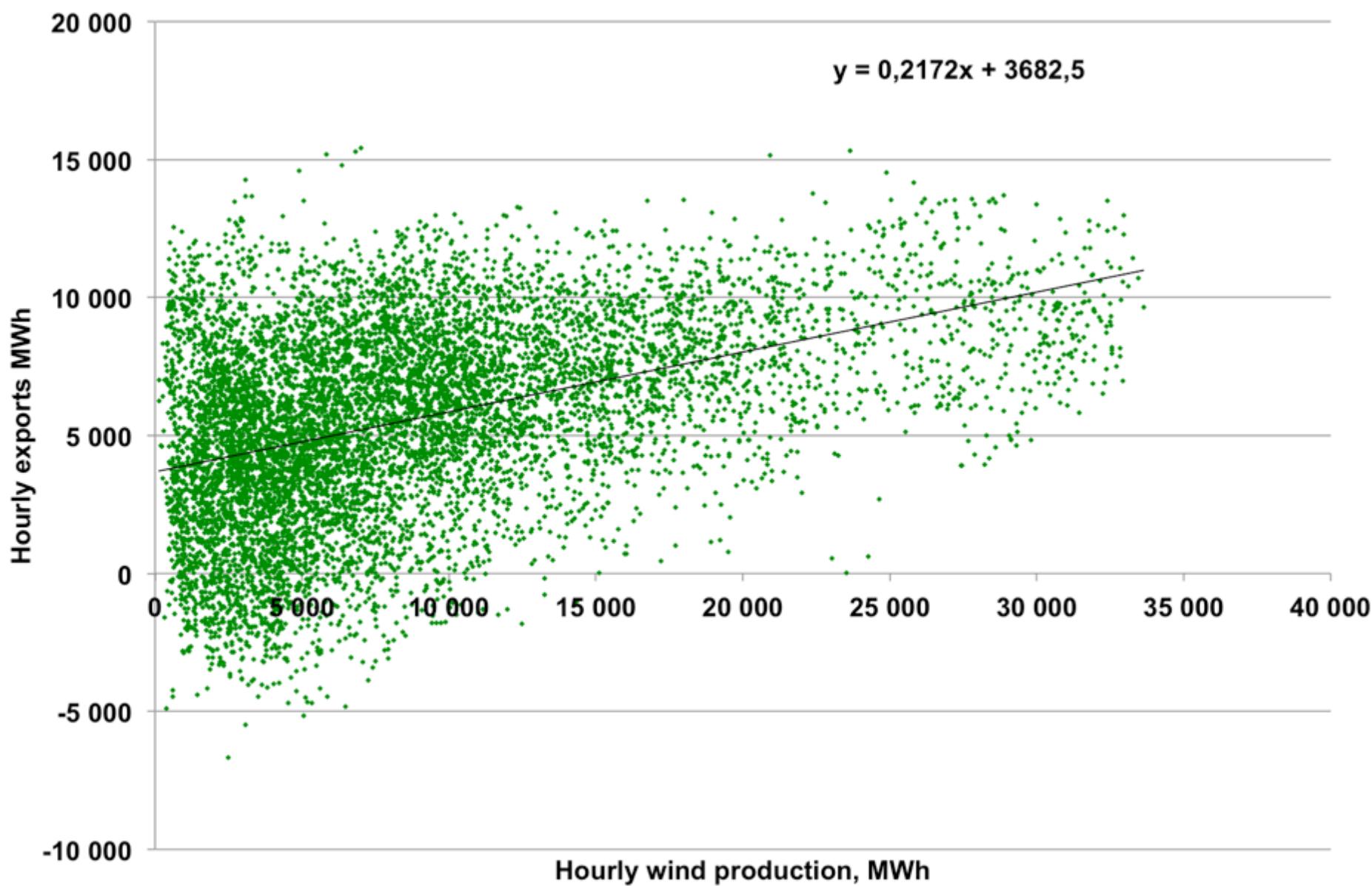
# Et avec ça, que donne le résultat ?



Production éolienne horaire vs exportations horaires au Danemark en 2016.

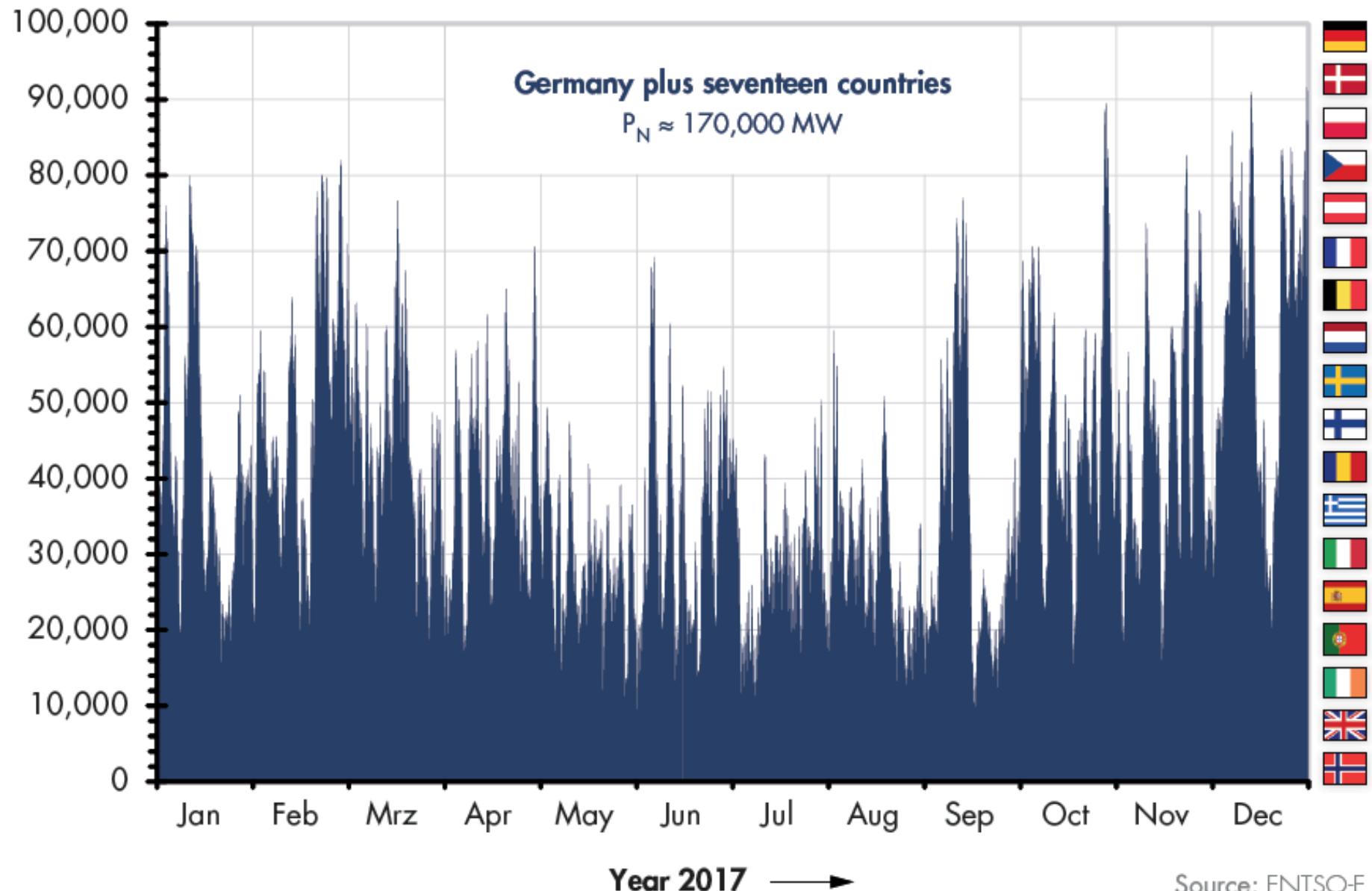
Source des données : Paul-Frederik Bach ; <http://www.pfbach.dk/>

# Qui consomme vraiment les électrons éoliens allemands ?



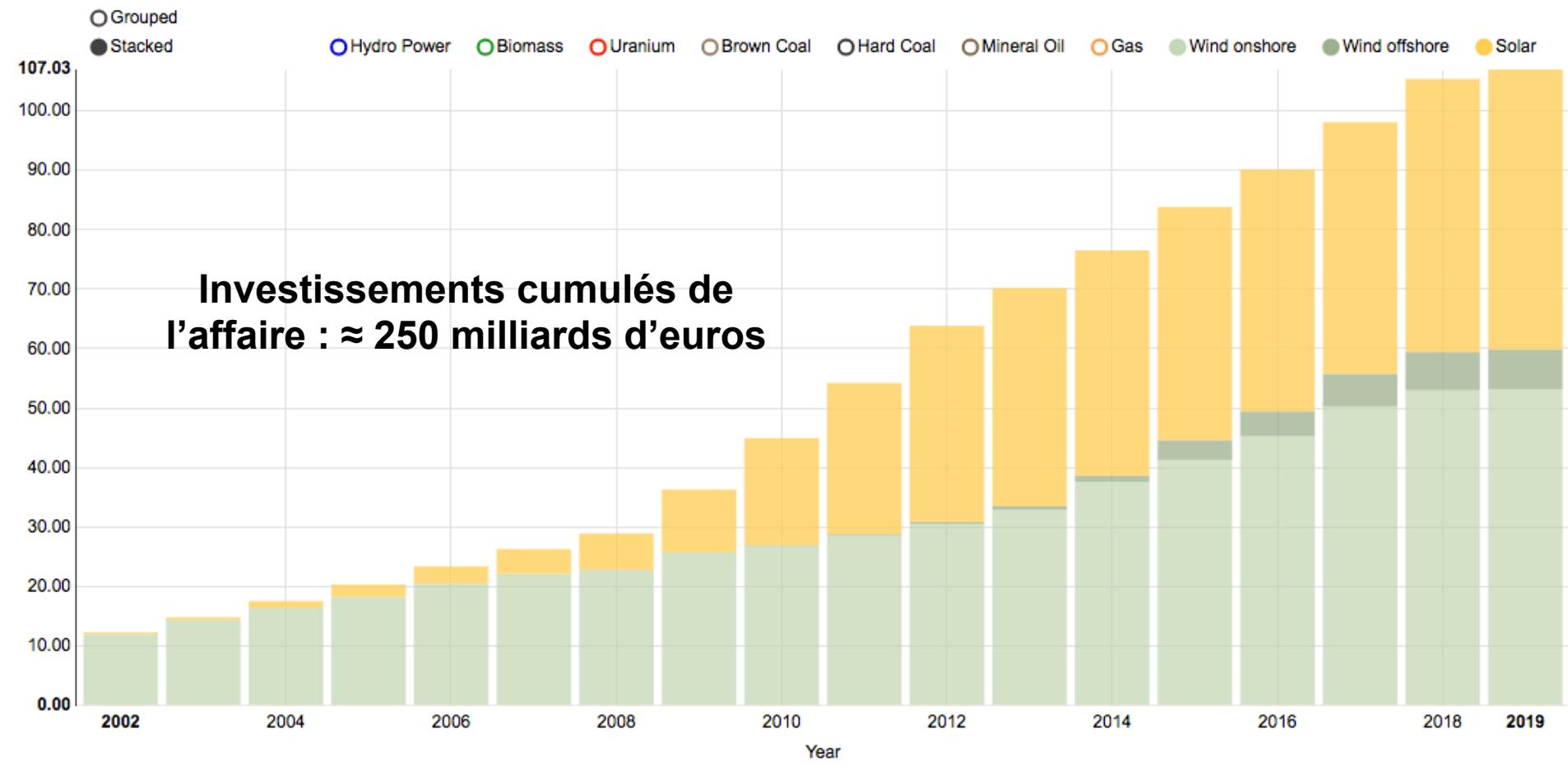
Production éolienne horaire vs exportations horaires en Allemagne. Données ENTSOE

# Encore plus variable que les cours de la bourse



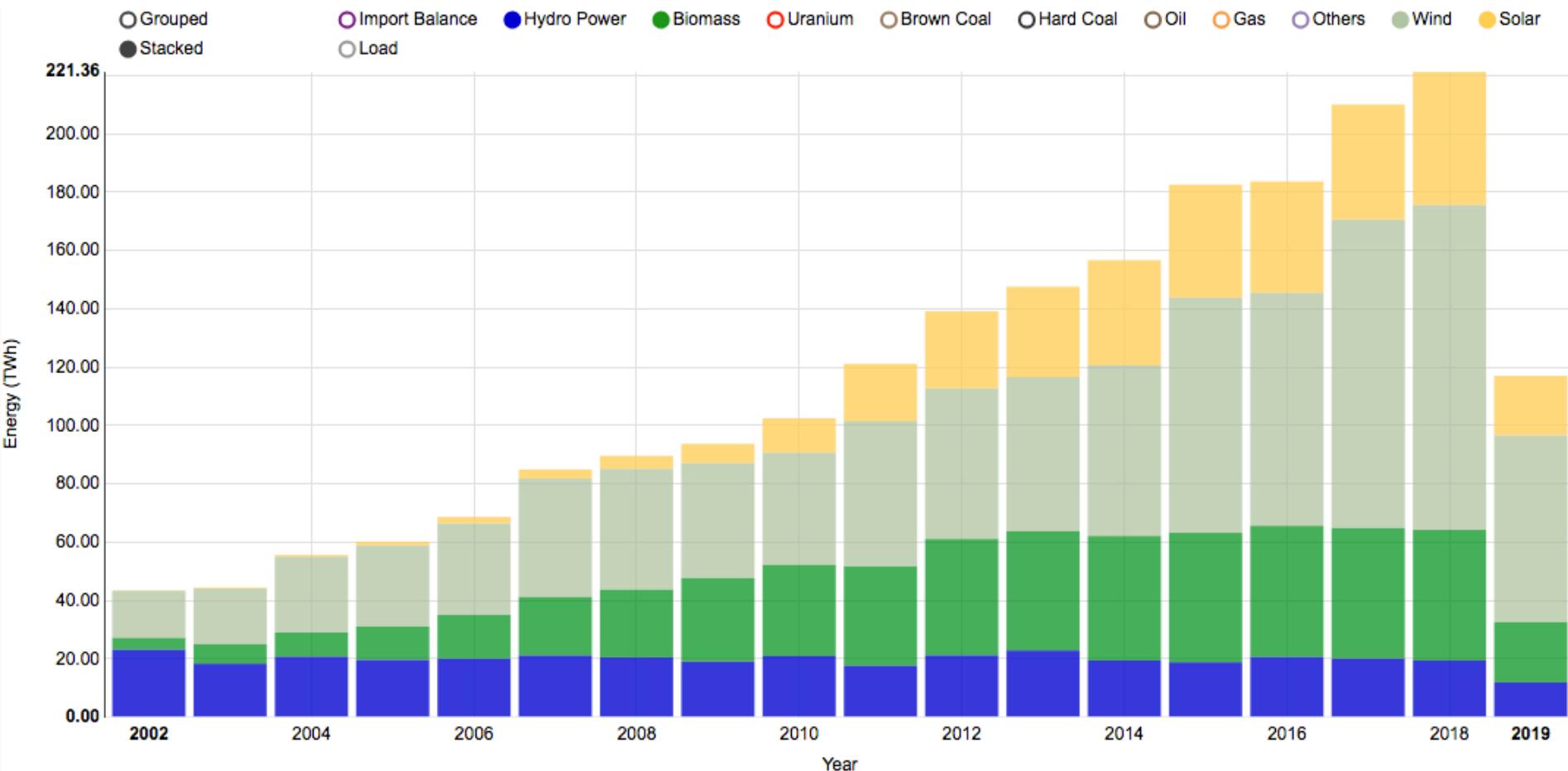
Puissance totale injectée sur le réseau européen en 2017 (puissance installée 170 GW)

# Les GW renouvelables augmentent...



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

# La production aussi...

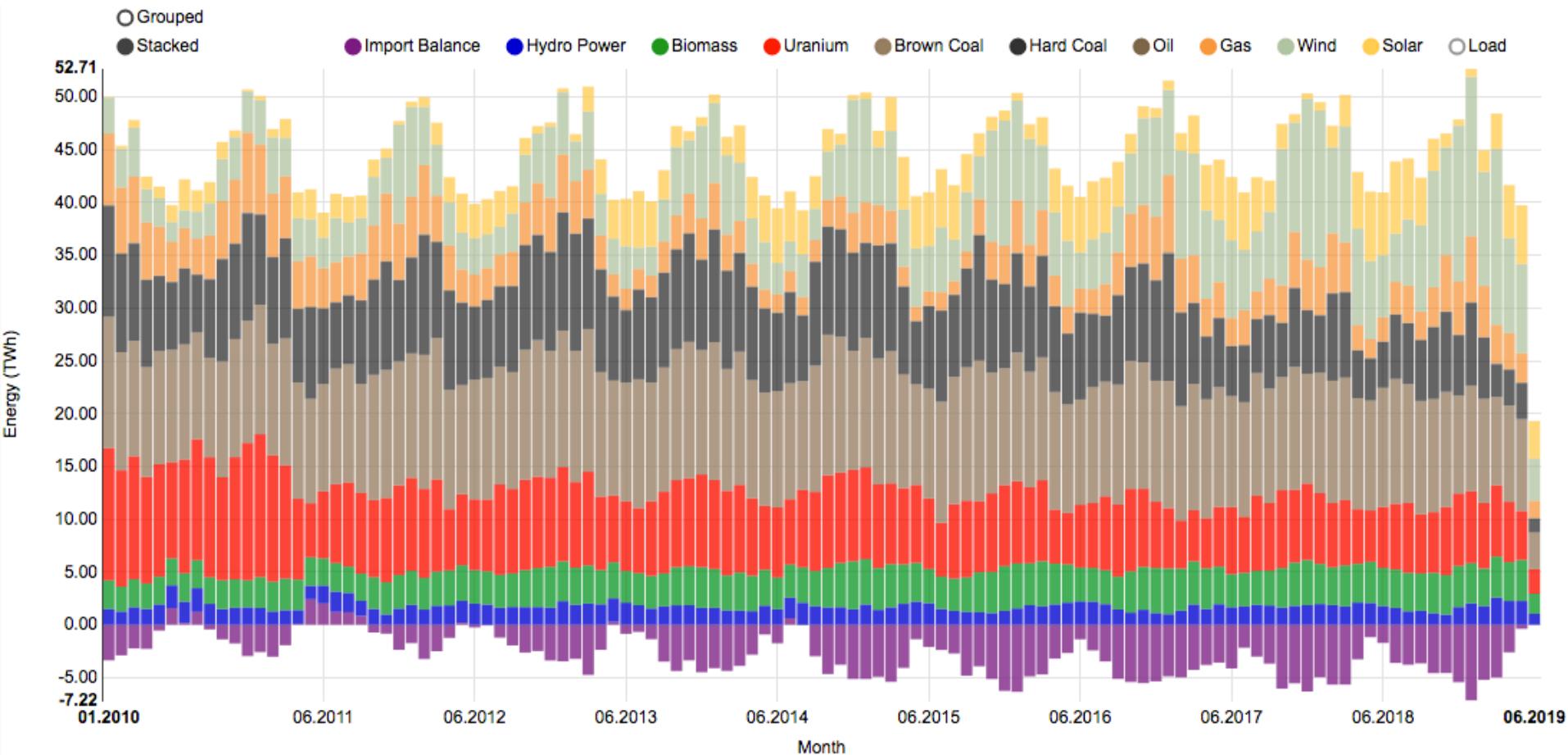


Evolution de la production électrique renouvelable depuis 2002, en TWh

Source 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019,

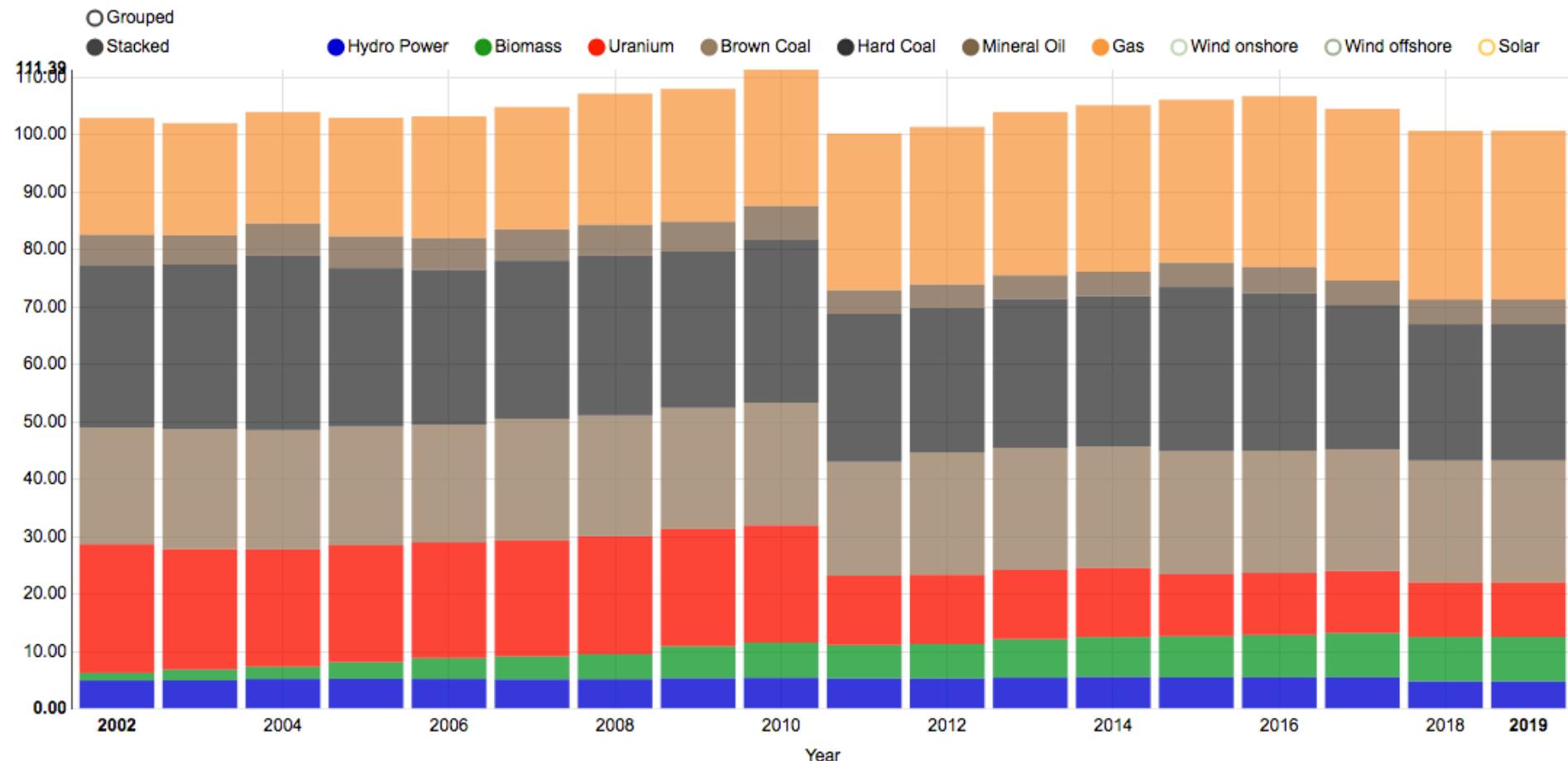
via <https://www.energy-charts.de>

# La consommation électrique est constante...



Consommation électrique mensuelle en Allemagne de 2010 à 2019. Données 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019 via <https://www.energy-charts.de>

# Et donc la puissance installée en « pas ENR » baisse ?



Datasource: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur

Puissance pilotable installée en Allemagne. Données AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur via <https://www.energy-charts.de>

# Passer d'un facteur de charge élevé...

Grouped

Stacked

Export

Import

Hydro Power

Biomass

Uranium

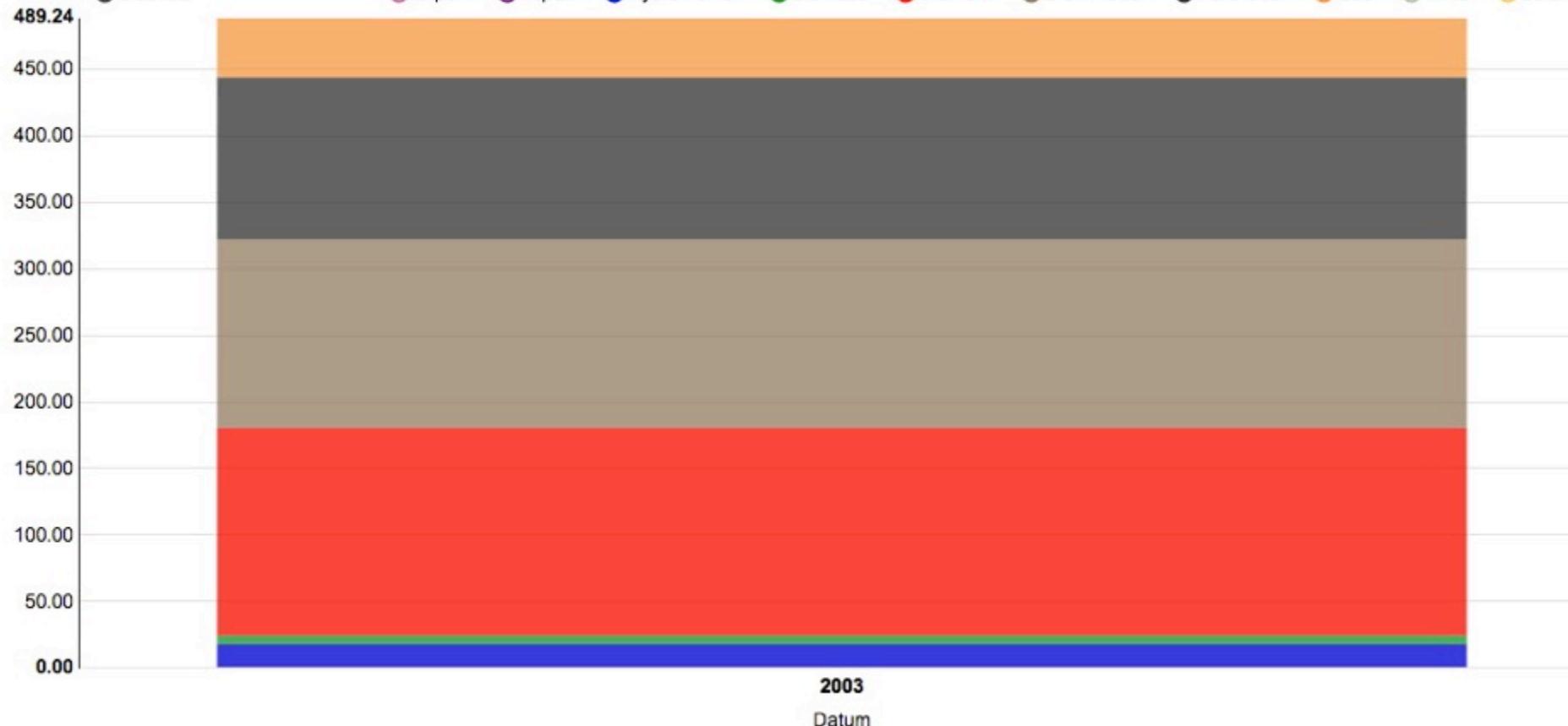
Brown Coal

Hard Coal

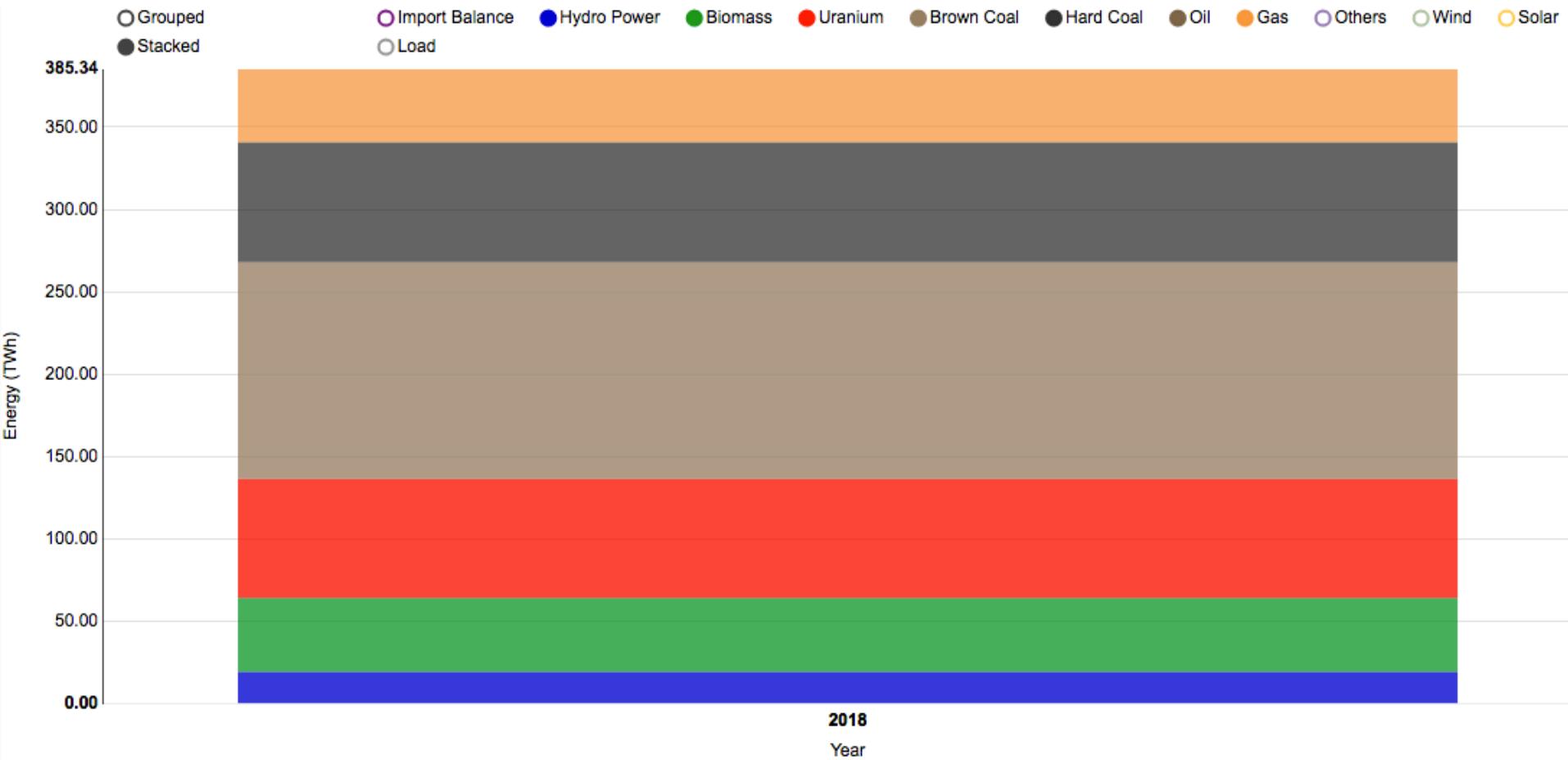
Gas

Wind

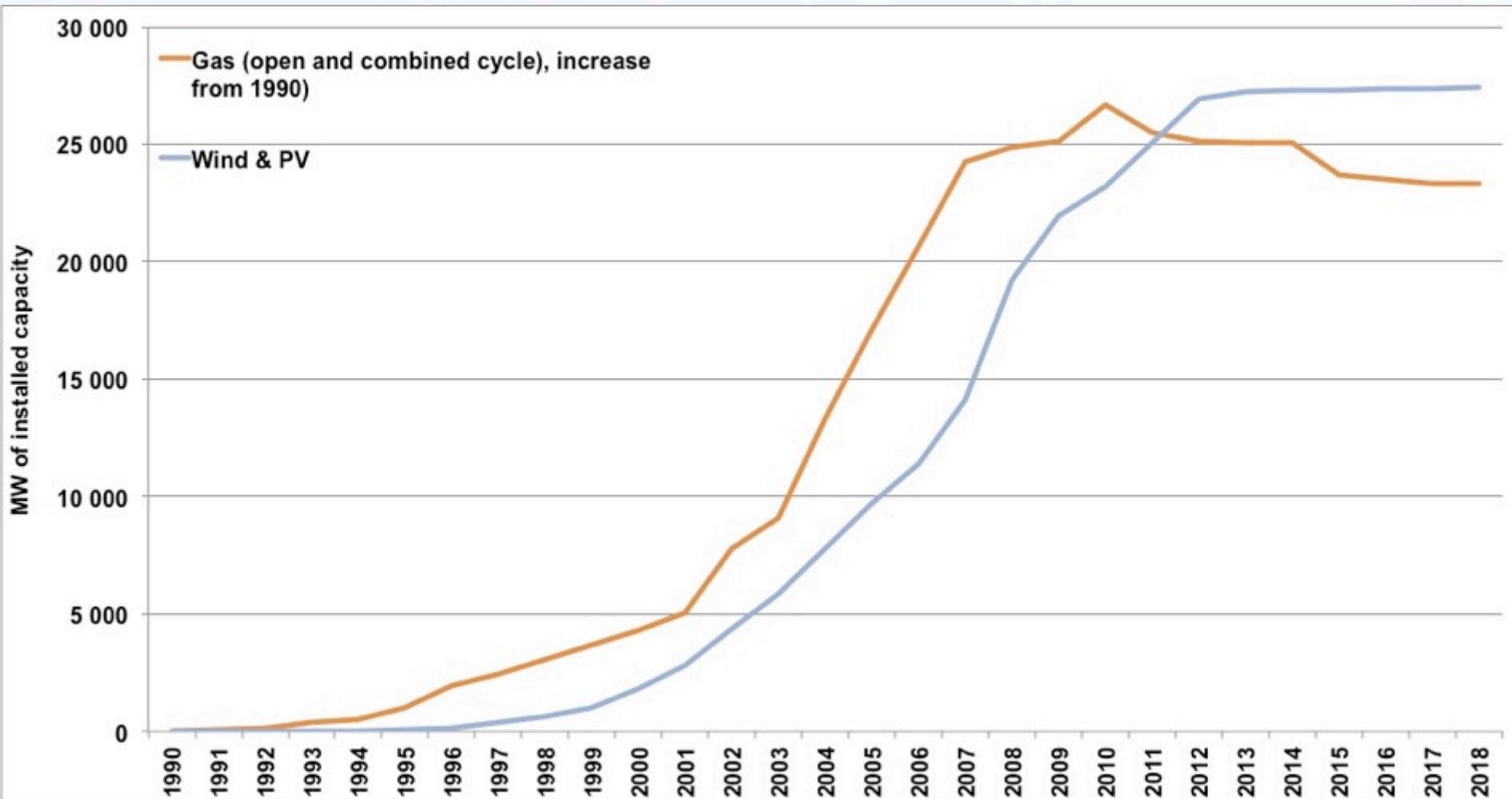
Solar



Production des capacités pilotables en Allemagne en 2003. Données <https://www.energy-charts.de>



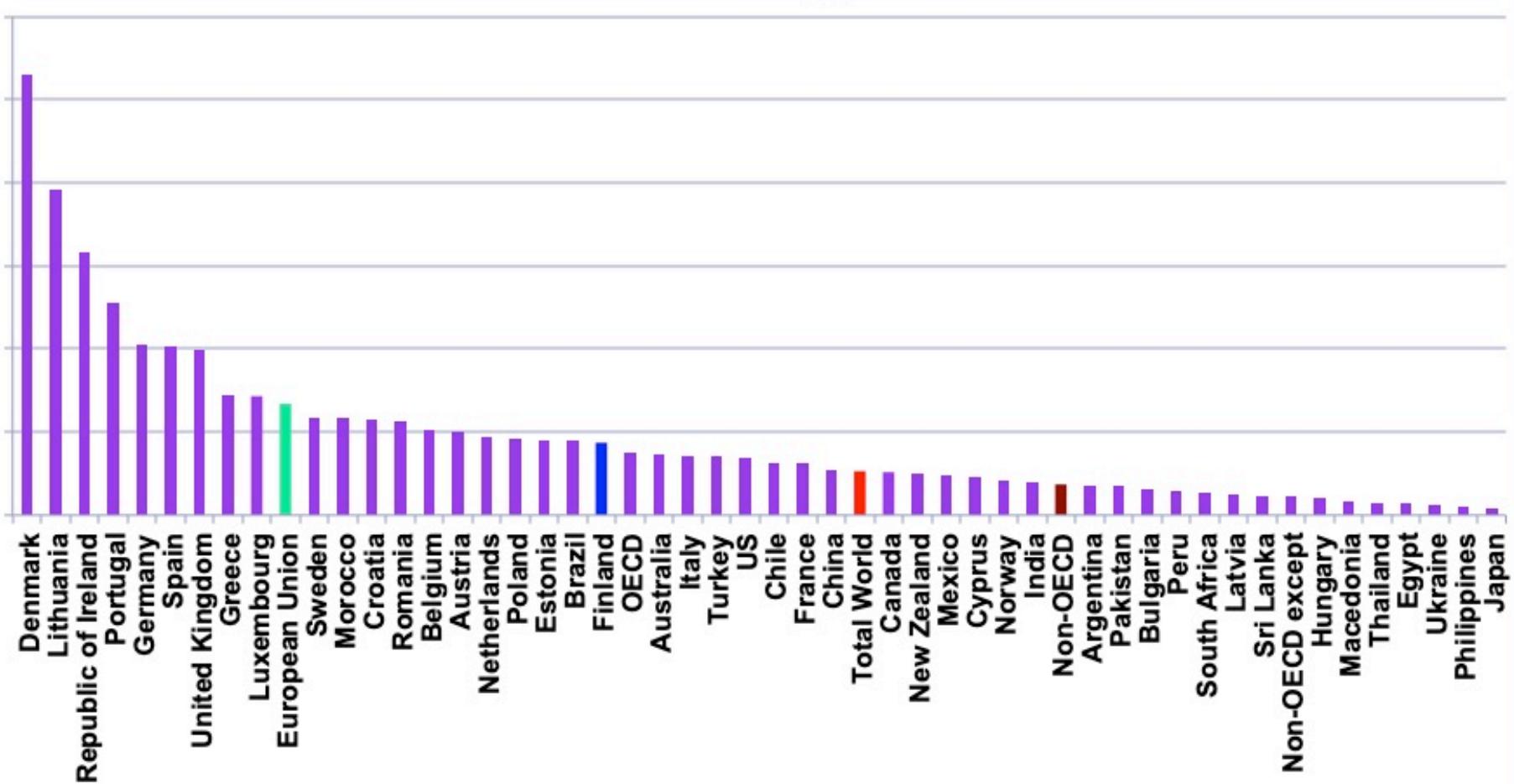
**Production des capacités pilotables en Allemagne en 2018. Données**  
<https://www.energy-charts.de>



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

# Et avec ça, que donne le résultat ?

Share of wind in electricity generation



Part de l'éolien dans la production électrique par pays en 2019

Source des données : BP Statistical Review

**Table 10.4** Range of materials requirements (fuel excluded) for various electricity generation technologies<sup>52</sup>

Materials (ton/TWh)	Generator only				Upstream energy collection plus generator			
	Coal	NGCC	Nuclear PWR	Biomass	Hydro	Wind	Solar PV (silicon)	Geothermal HT binary
Aluminum	3	1	0	6	0	35	680	100
Cement	0	0	0	0	0	0	3,700	750
Concrete	870	400	760	760	14,000	8,000	350	1,100
Copper	1	0	3	0	1	23	850	2
Glass	0	0	0	0	0	92	2,700	0
Iron	1	1	5	4	0	120	0	9
Lead	0	0	2	0	0	0	0	0
Plastic	0	0	0	0	0	190	210	0
Silicon	0	0	0	0	0	0	57	0
Steel	310	170	160	310	67	1,800	7,900	3,300

Key: NGCC = natural gas combined cycle; PWR = pressurized water reactor; PV = photovoltaic; HT = high temperature

**Consommation de métal ou minérais par MWh pour divers modes**  
**Source des données : Quadrennial Technology Review, Concepts in Integrated**  
**Analysis, September 2015**

Dès lors qu'un mode non pilotable (éolien, solaire) ne permet pas de diminuer la puissance pilotable mais juste de s'en servir moins quand il y a du vent ou du soleil, il y a deux manières de comparer les couts :

On peut comparer le cout complet du mode non pilotable avec le cout du combustible évité du mode pilotable

Ou ajouter le cout du stockage au mode non pilotable pour le rendre à nouveau pilotable. Attention : stocker engendre des pertes et donc il faut produire plus de 1 kWh bruts pour avoir 1 kWh piloté.

**100% Nucléaire**

Facteur de charge ≈ 70%

→ x 3-4

≈ 20%

Durée de vie 60 ans

→ x 2-3

20 à 30 ans

Réseau ≈ 0

→ x 1,5-2

≈ 0,5 à 1 fois  
cout éolienneStockage  
intersaisonnier 10%

→ x 2

50%-60%

Cout au kW  
installé 3-5.000 €

→ ÷ 2-3

1.500 € (sauf  
offshore)

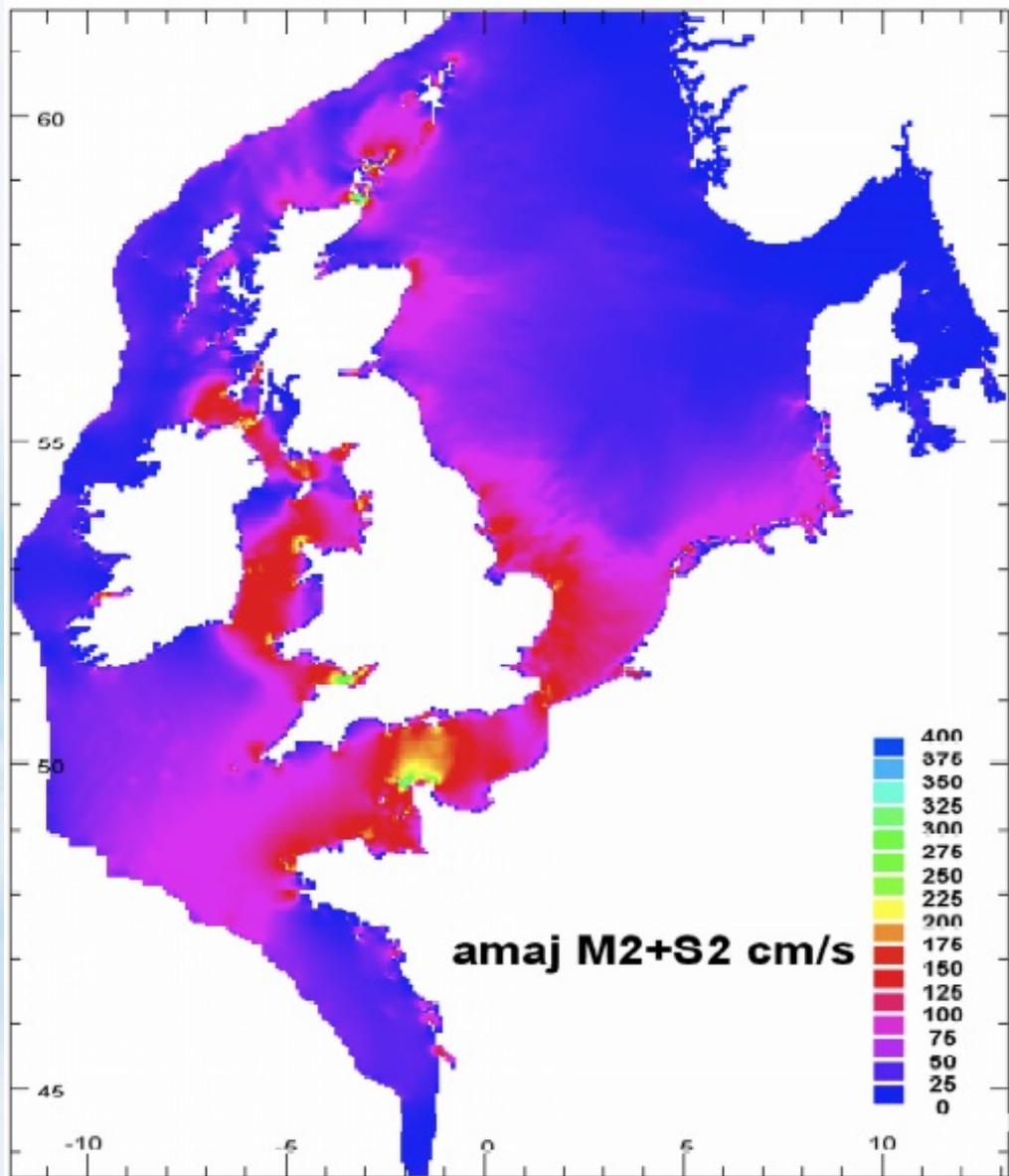
Total invest./kWh ≈ x 10-20

**100% Eolien**



Un exemple d'hydroturbine

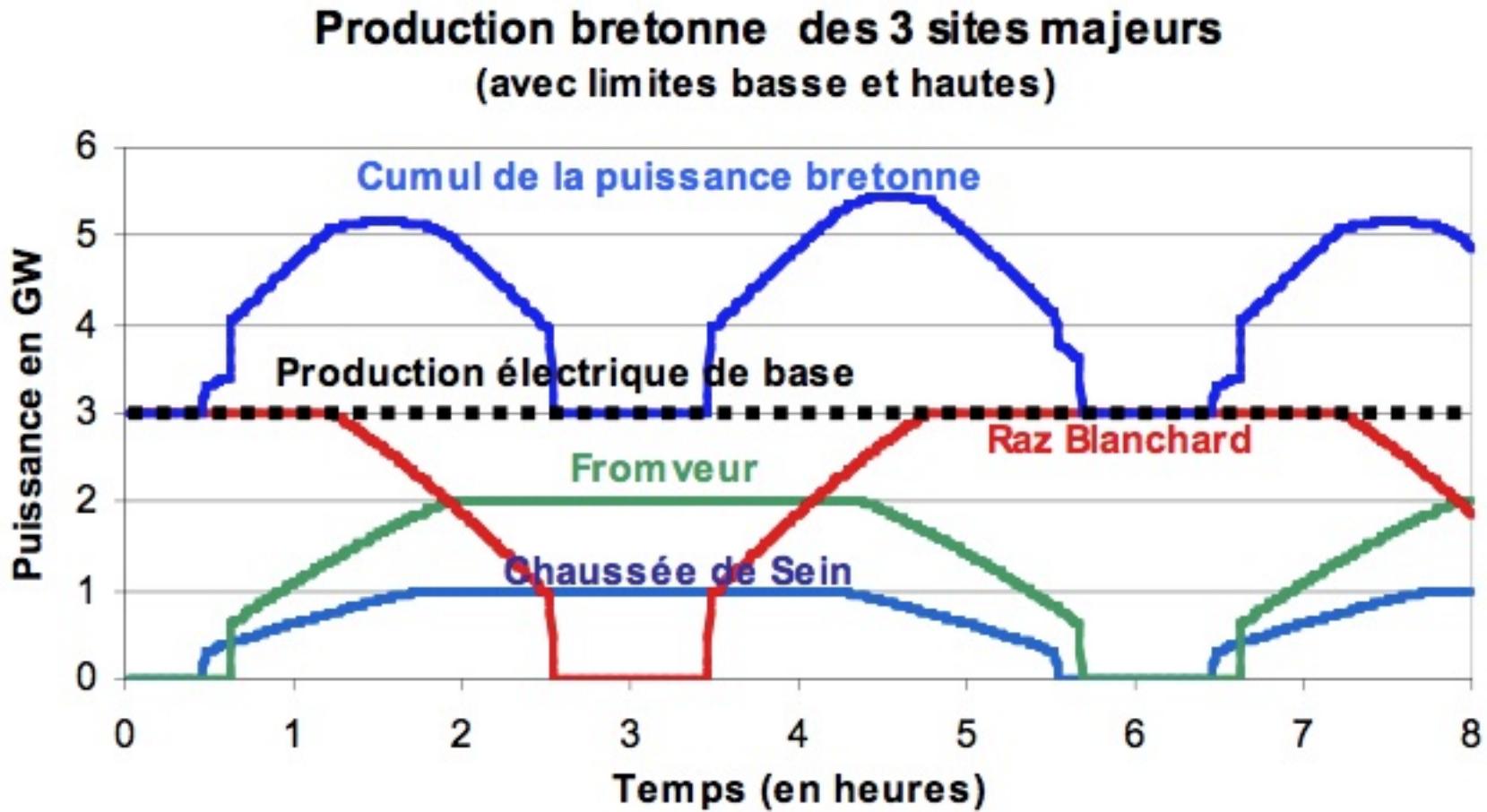
# Passons de sur l'eau à sous l'eau (bis)



Carte de la ressource hydrolienne en Europe (Vitesse maximale du courant en cm/s). Rappelons que la "puissance" du courant est proportionnel au cube de la vitesse.

Source : Groupe de Travail Énergies Alternatives d'ECRIN

# Passons de sur l'eau à sous l'eau (ter)



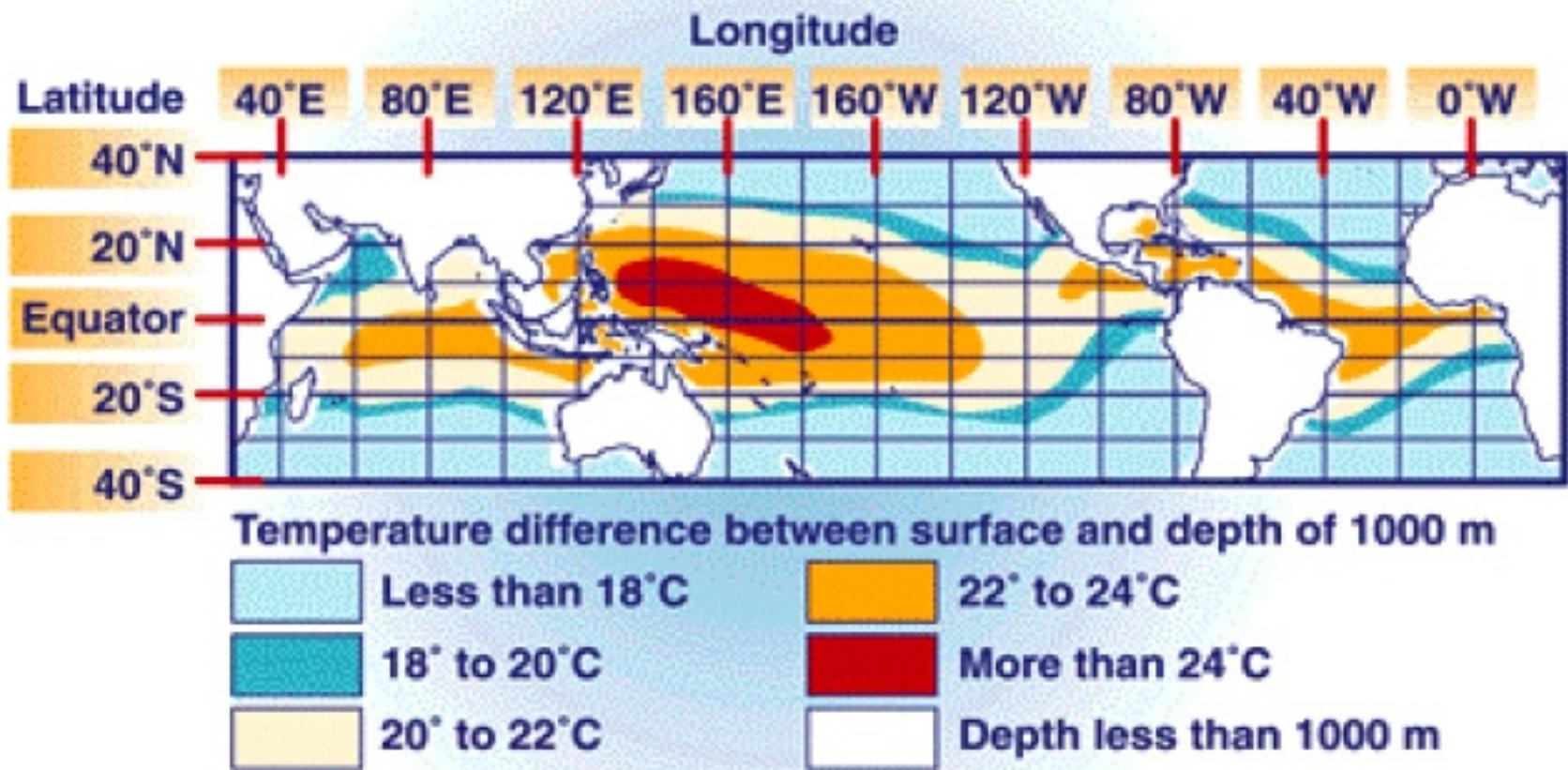
**Illustration de l'effet de « foisonnement » sur l'hydraulien**

# Passons de sous l'eau à juste la surface



**Un exemple de dispositif d'exploitation de l'énergie des vagues.  
Puissance = 750 kW, soit... 1/2000ème d'une grosse centrale  
électrique (et production fortement variable).**

# Passons de profond sous l'eau à la surface



Zones propices à l'exploitation thermique des océans.

Refroidir l'océan de 1°C = 100.000 Gtep environ

20 °C de différence -> rendement mécanique maximal de 6,7%

**Un baril de pétrole en sortie de puits à 10\$ (coût d'exploration compris) : 0,4 centime le kWh**

**~ 2 à 3 centimes par kWh pour le gaz sur le marché de gros**

**3 à 10 centimes le kWh électrique nucléaire**

**~ 4 centimes le kWh électrique pour le charbon (hors coût du CO<sub>2</sub>).**

**Et puis...**

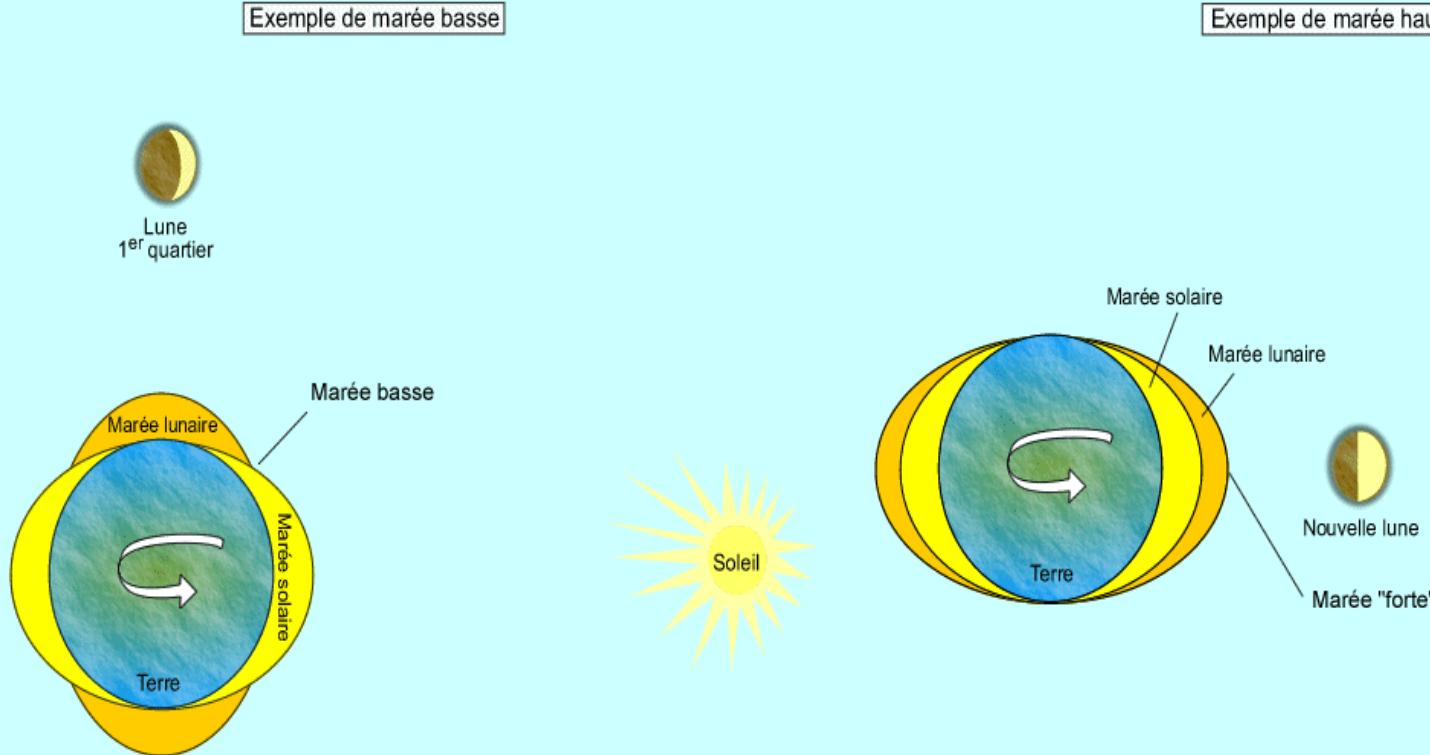
**Eolien 6 à 8 centimes par kWh (hors coût d'intermittence)**

**Photovoltaïque ~2 à 20 centimes par kWh hors cout intermittence**

**Solaire à concentration ~15 centimes par kWh**

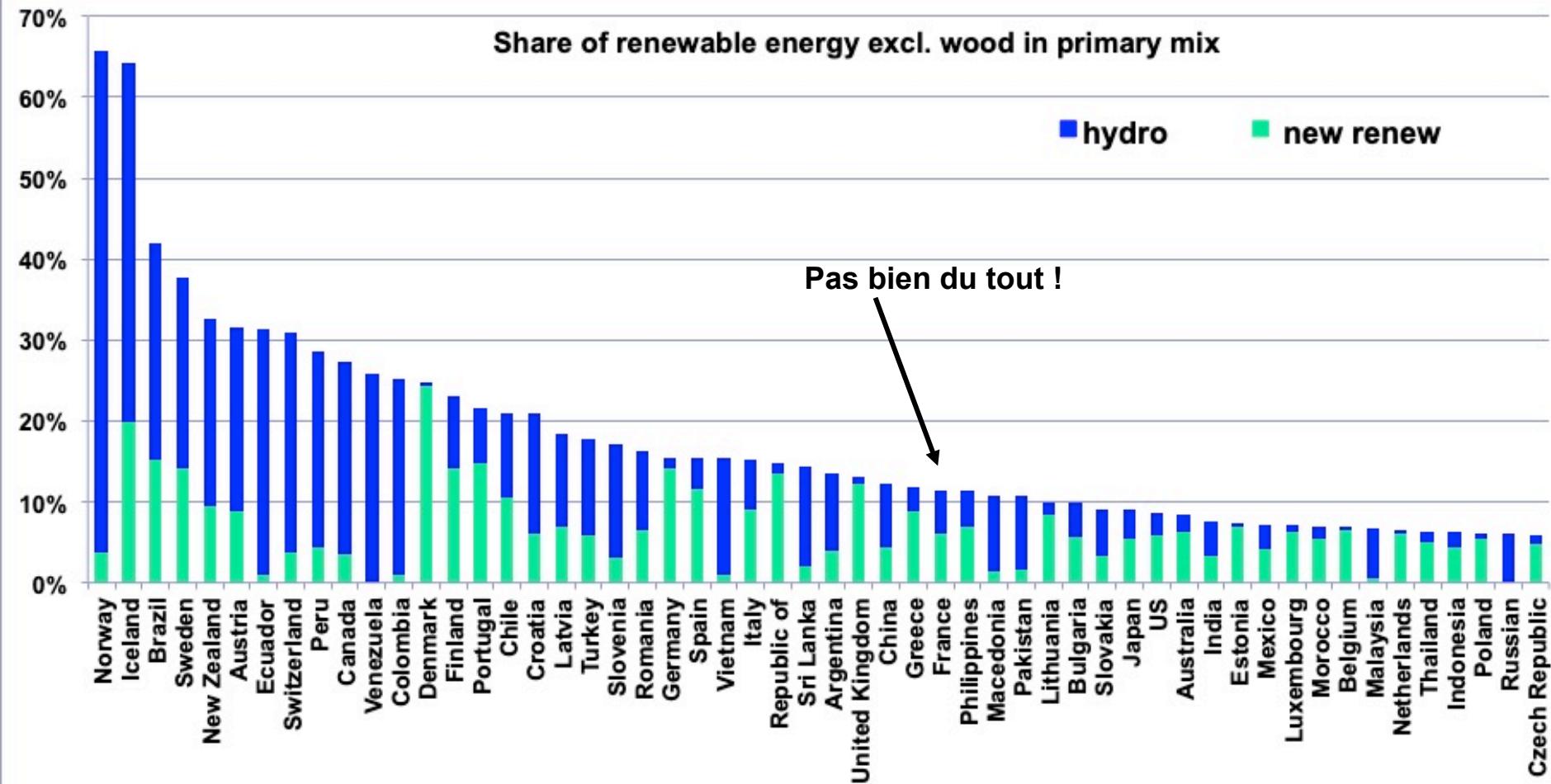
**Une taxe carbone à 200 € t CO<sub>2</sub> : +20 centimes par kWh électrique pour le charbon, +10 pour le gaz**

# Marée haute, marée basse, marée haute, marée basse...



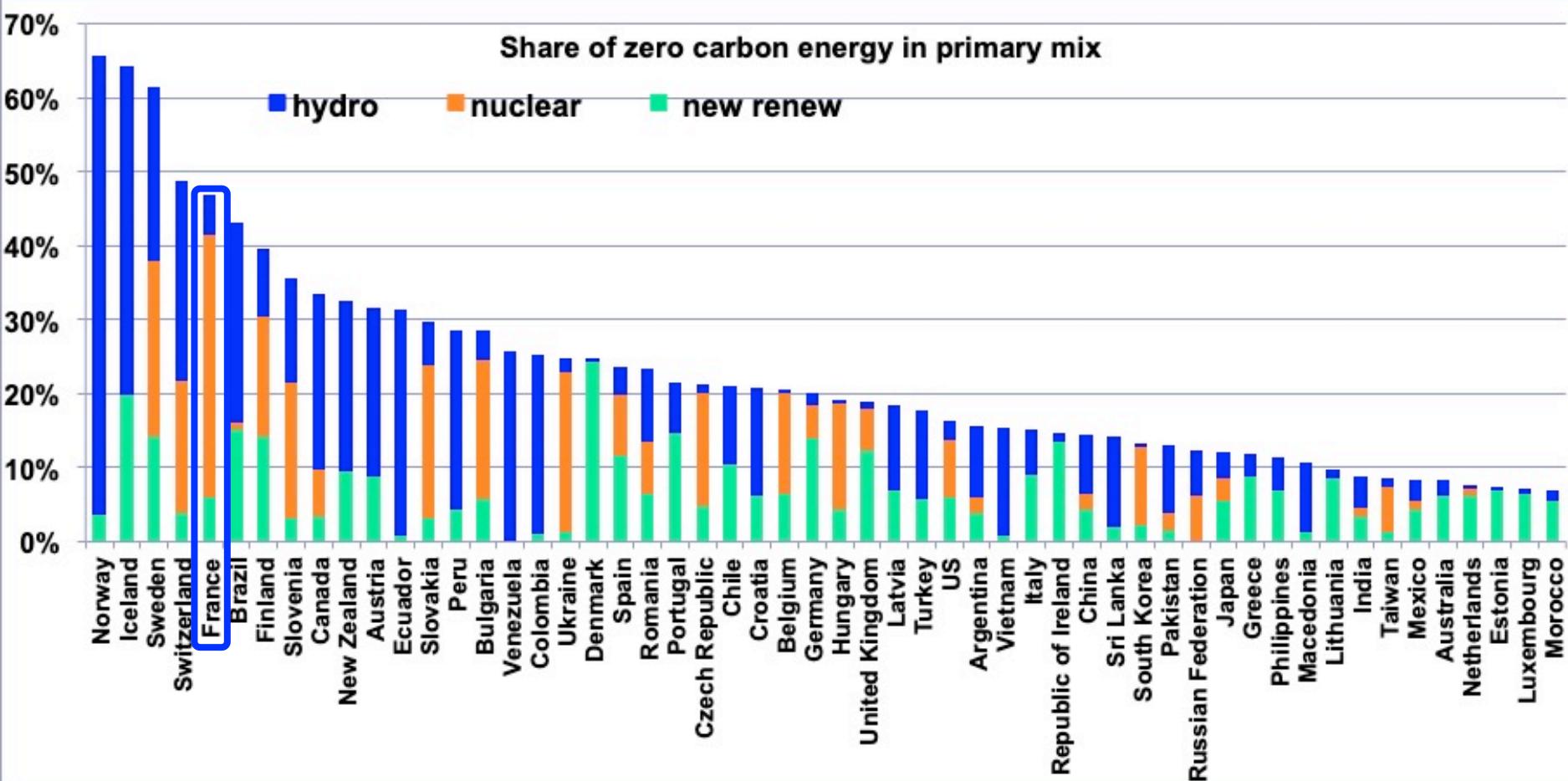
**Déplacement de l'onde de marée. Energie mise en œuvre  $\approx 0,2$  fois la consommation d'énergie de l'humanité.**

# Alors, utilise-t-on des énergies renouvelables ?



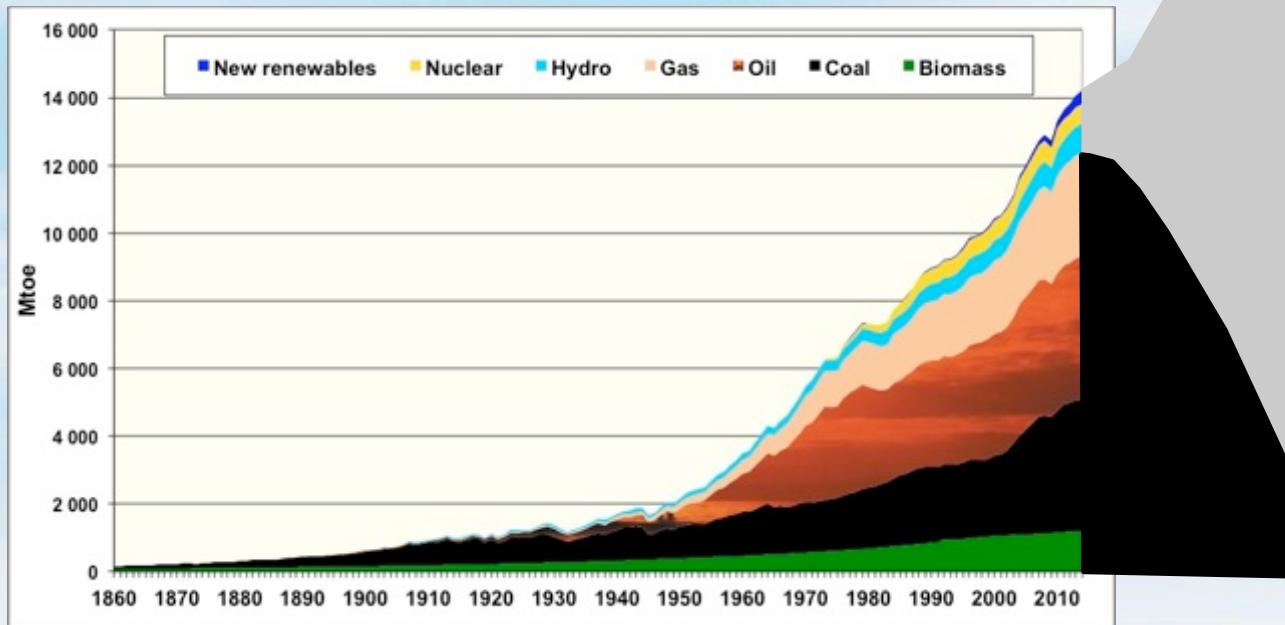
Part des énergies renouvelables dans l'énergie primaire par pays en 2019. Source BP Statistical Review

# En retard, la France, vraiment ?



Part de l'énergie primaire « bas carbone » par pays en 2017. Calculs Jancovici sur données BP Statistical Review

# Je vous rappelle le cahier des charges



+7% par an  
(incl. nucléaire)

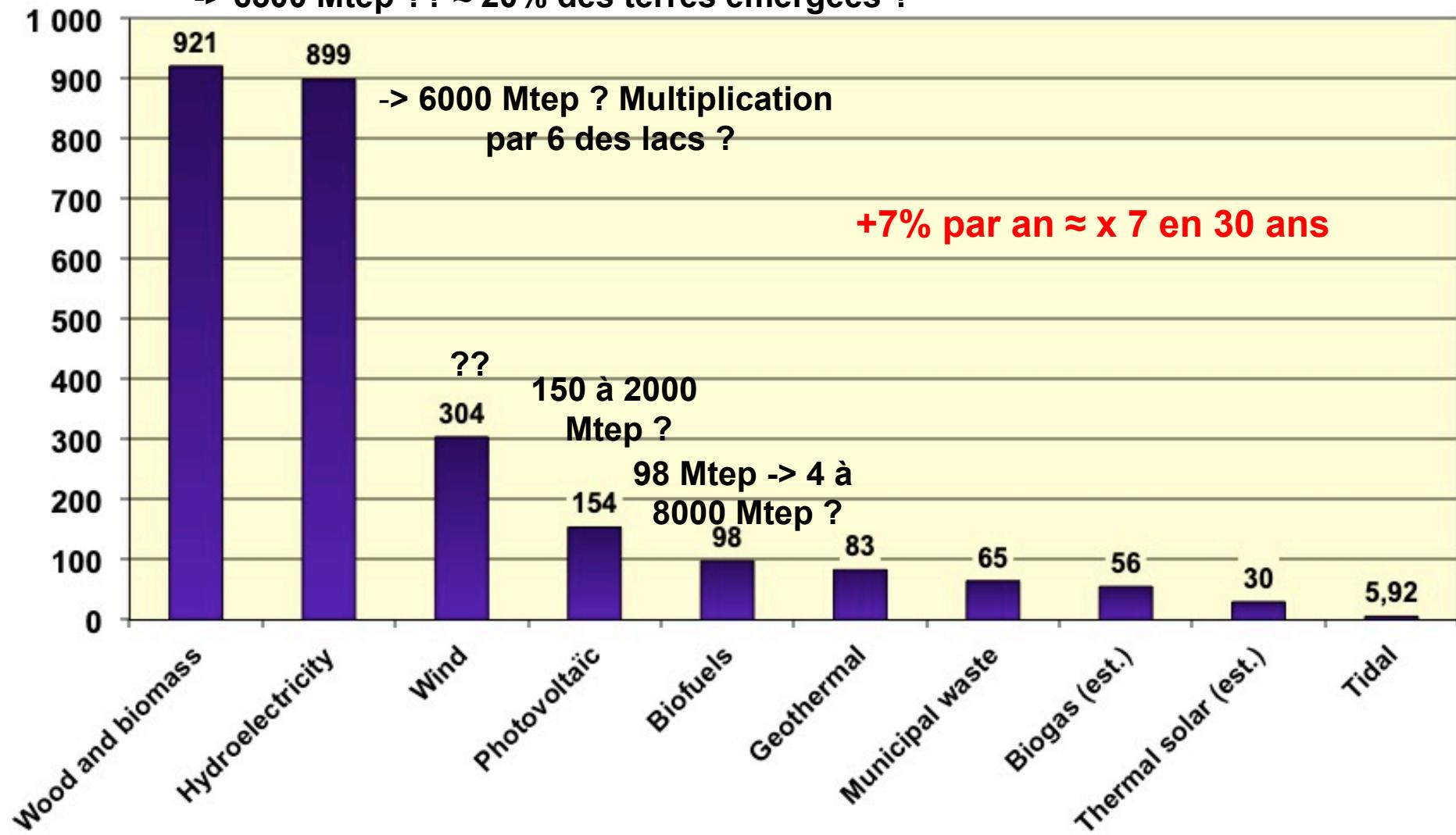
-3,1% par an

# Alors, qu'espérer des ENR ?

-> 6500 Mtep ??  $\approx 20\%$  des terres émergées ?

-> 6000 Mtep ? Multiplication par 6 des lacs ?

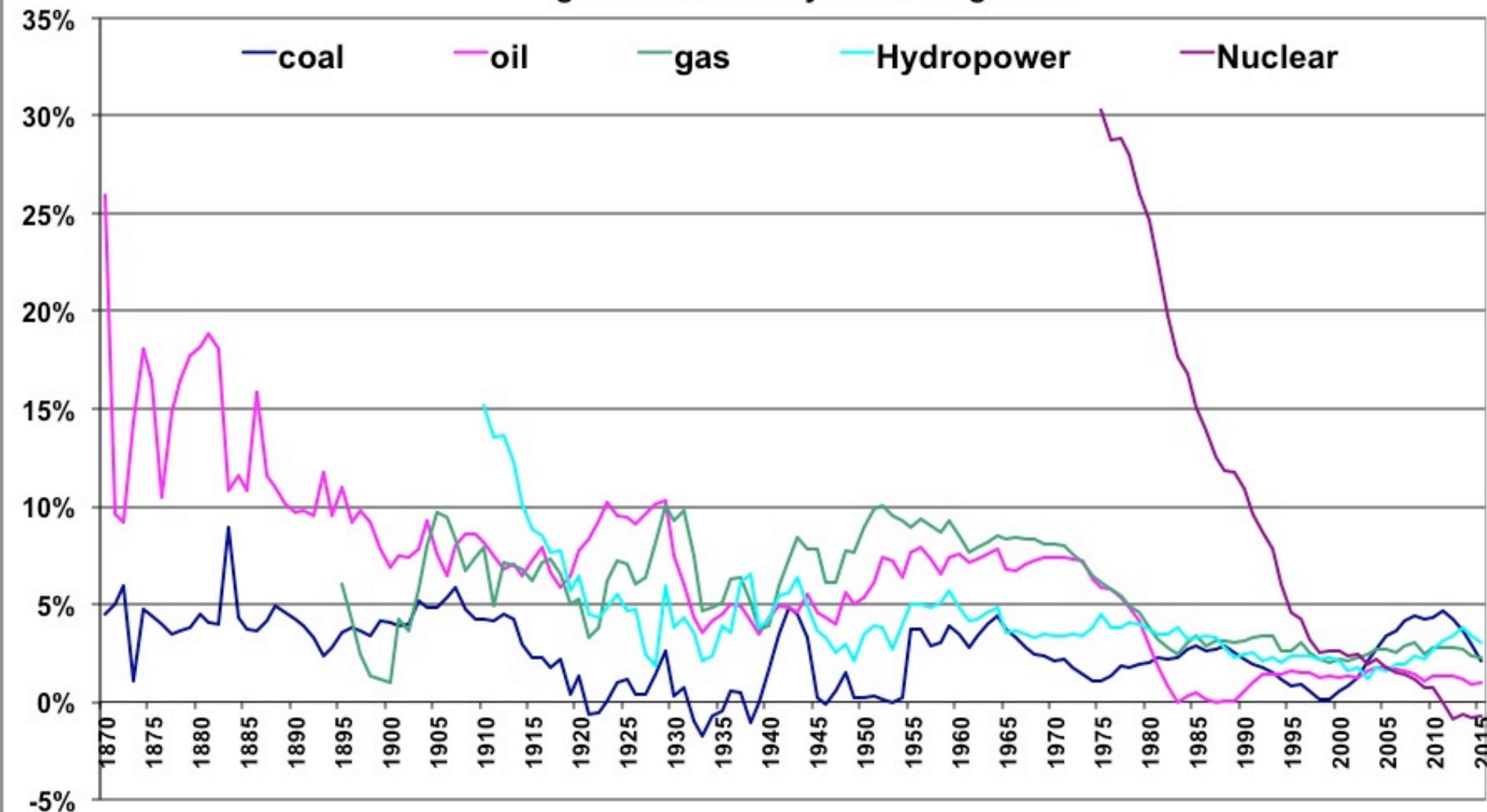
+7% par an  $\approx \times 7$  en 30 ans



Contribution des énergies renouvelables en 2019. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Source BP Stat & divers

# +30% par an, combien de temps ?

growth rates : 10 year running mean



Taux de croissance annuel moyen, lissé sur 10 ans, des différentes énergies dans le monde depuis 1870. Sources Schilling et al 1977 + BP Stat Review 2016