

# Éléments de base sur l'énergie au 21<sup>è</sup> siècle



**Jean-Marc Jancovici - Mines ParisTech 2019**  
**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**

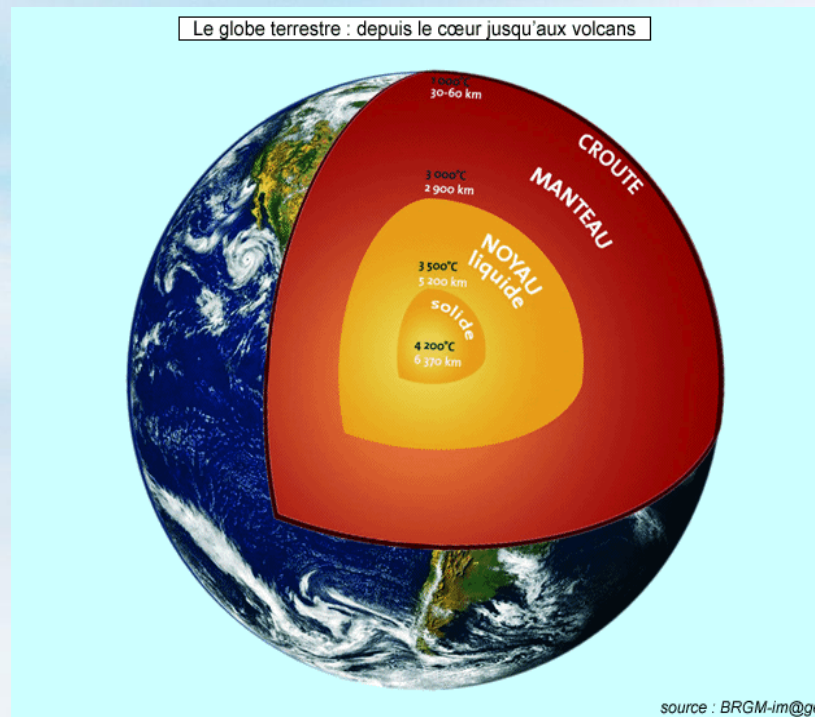
**Ces énergies ne sont équivalentes ni en potentiel, ni en rendement, ni en coût, ni en usages...**

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

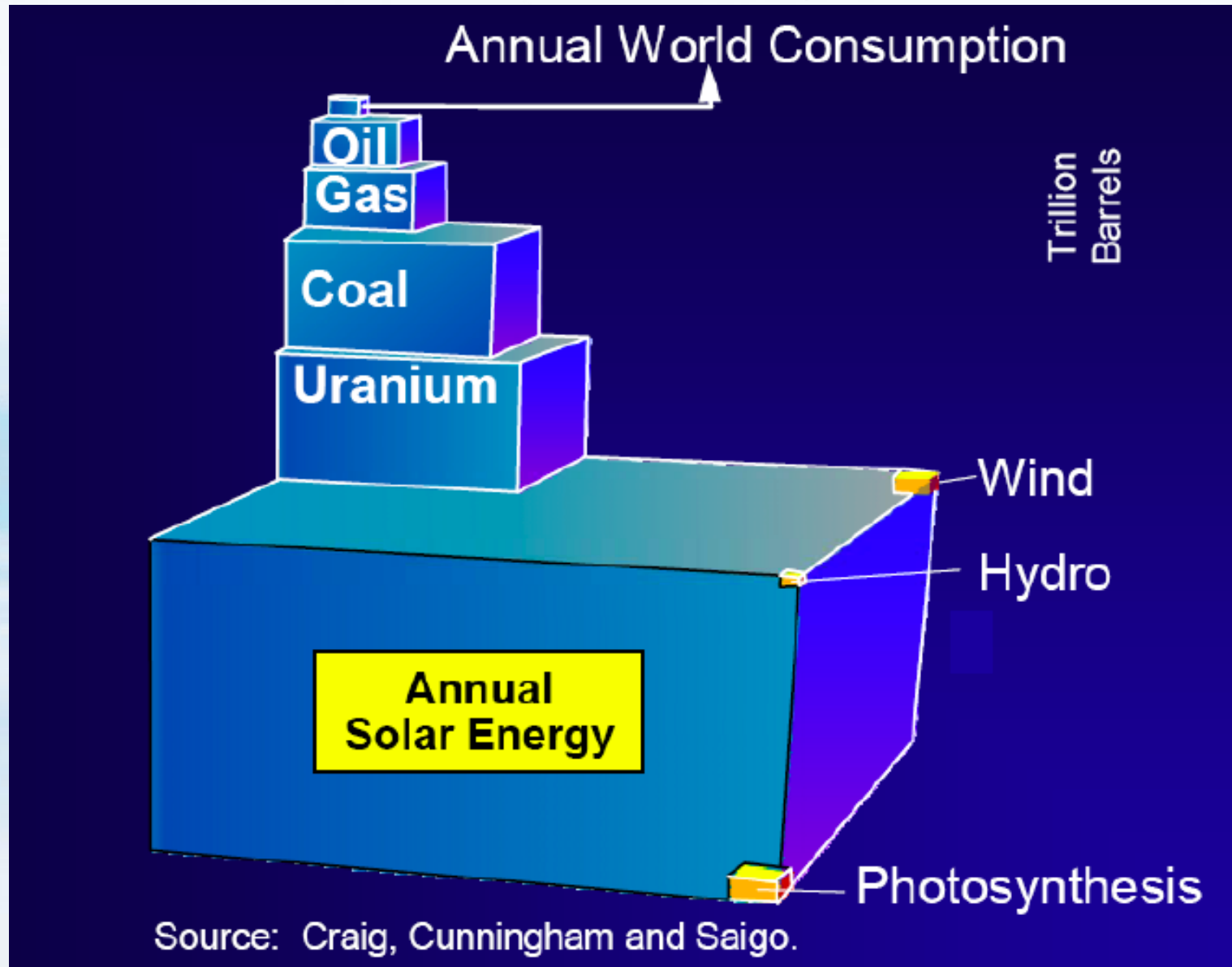
Il arrive que l'on mette dans les énergies renouvelables des « fausses renouvelables » :

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

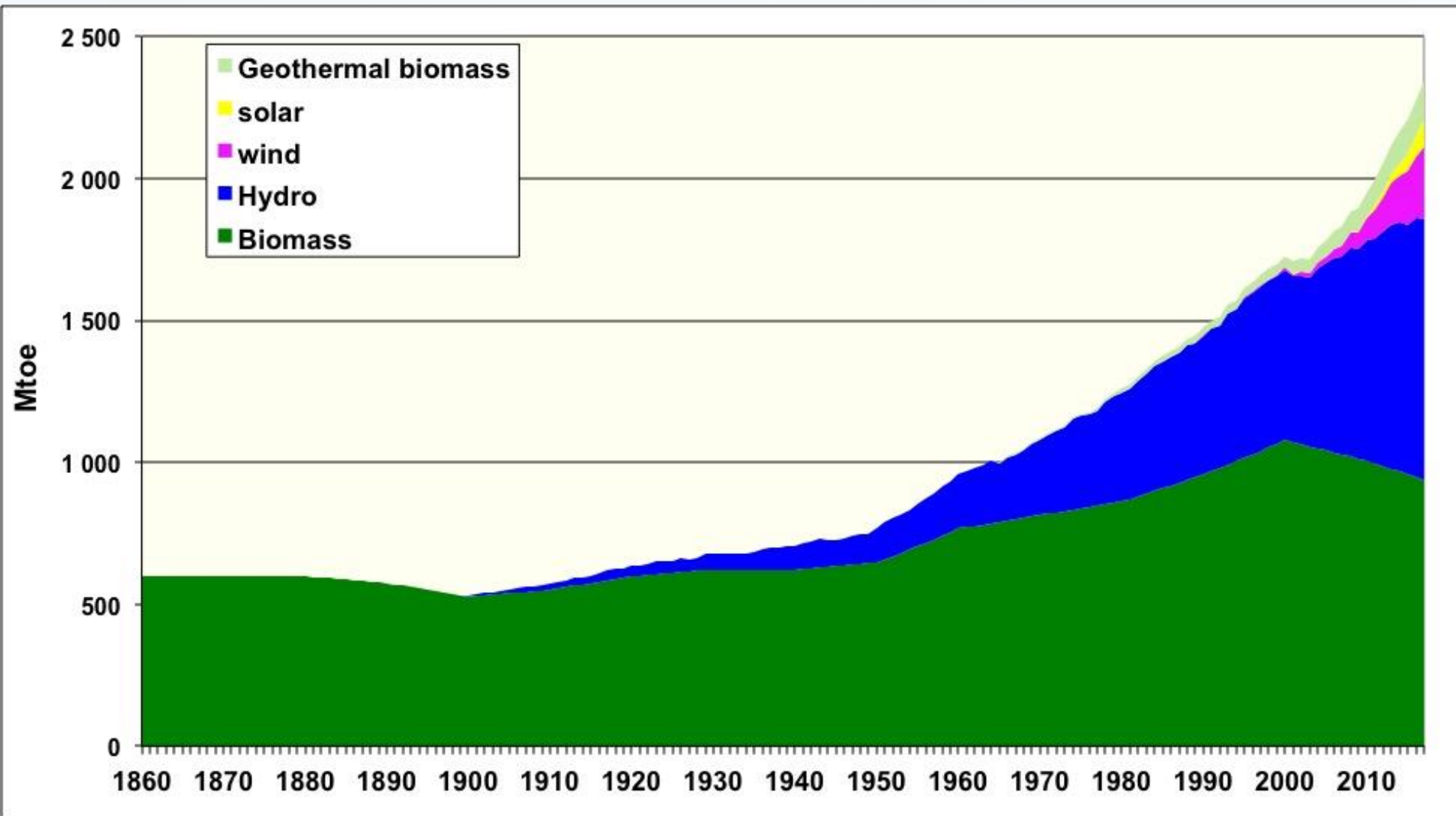
La géothermie, qui porte surtout sur l'exploitation du stock de chaleur accumulée (gigantesque) et non sur le flux annuel (très faible)



# Le verre à moitié plein : quelle abondance !



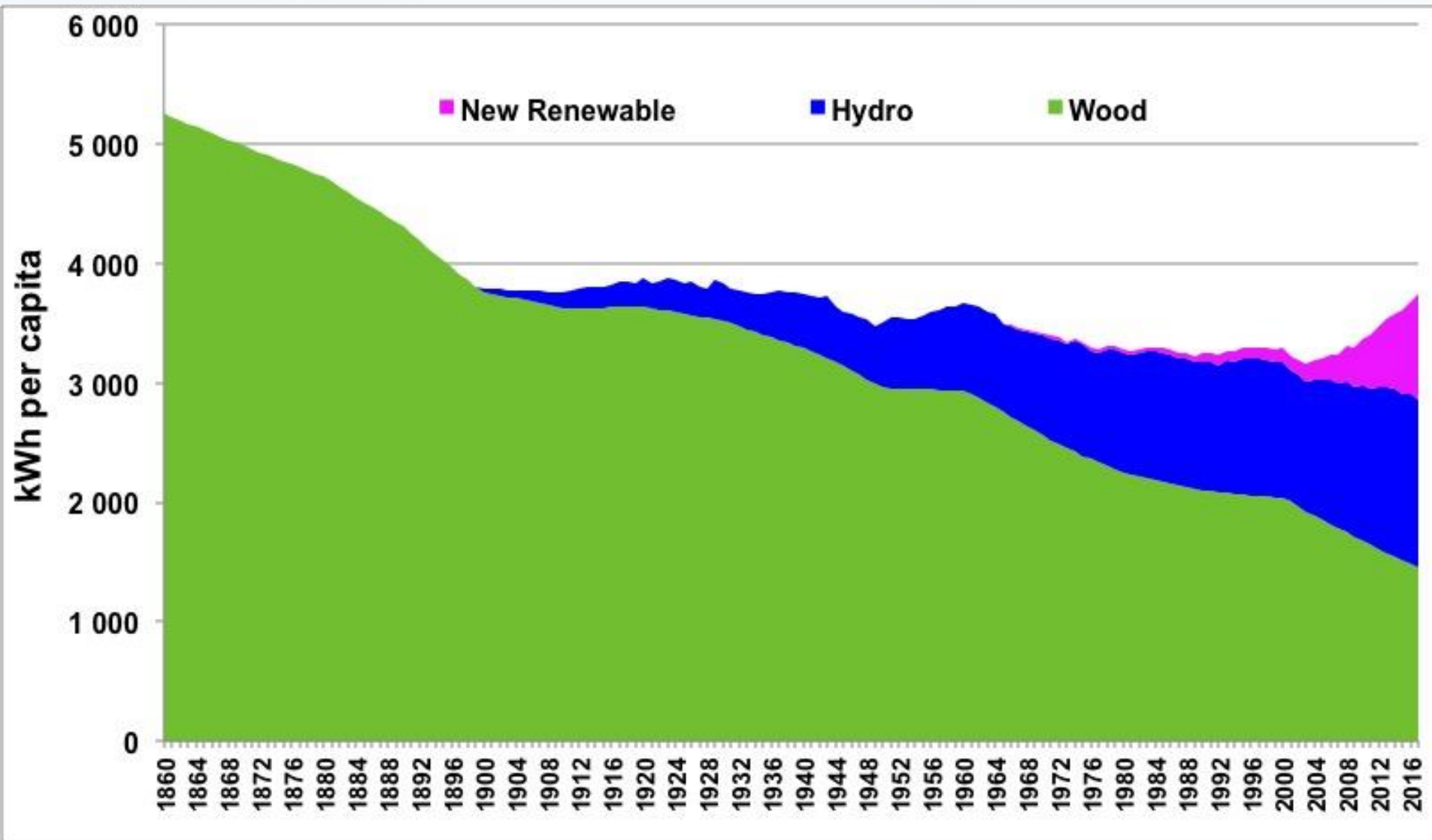
# De plus en plus d'énergie renouvelable



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

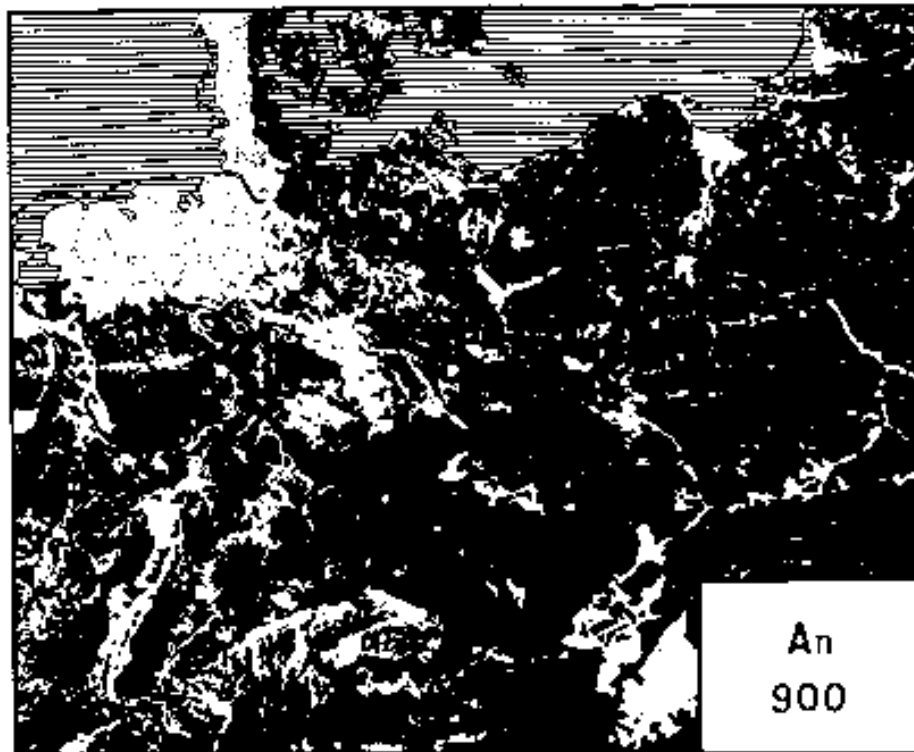


# Mais de moins en moins par personne...



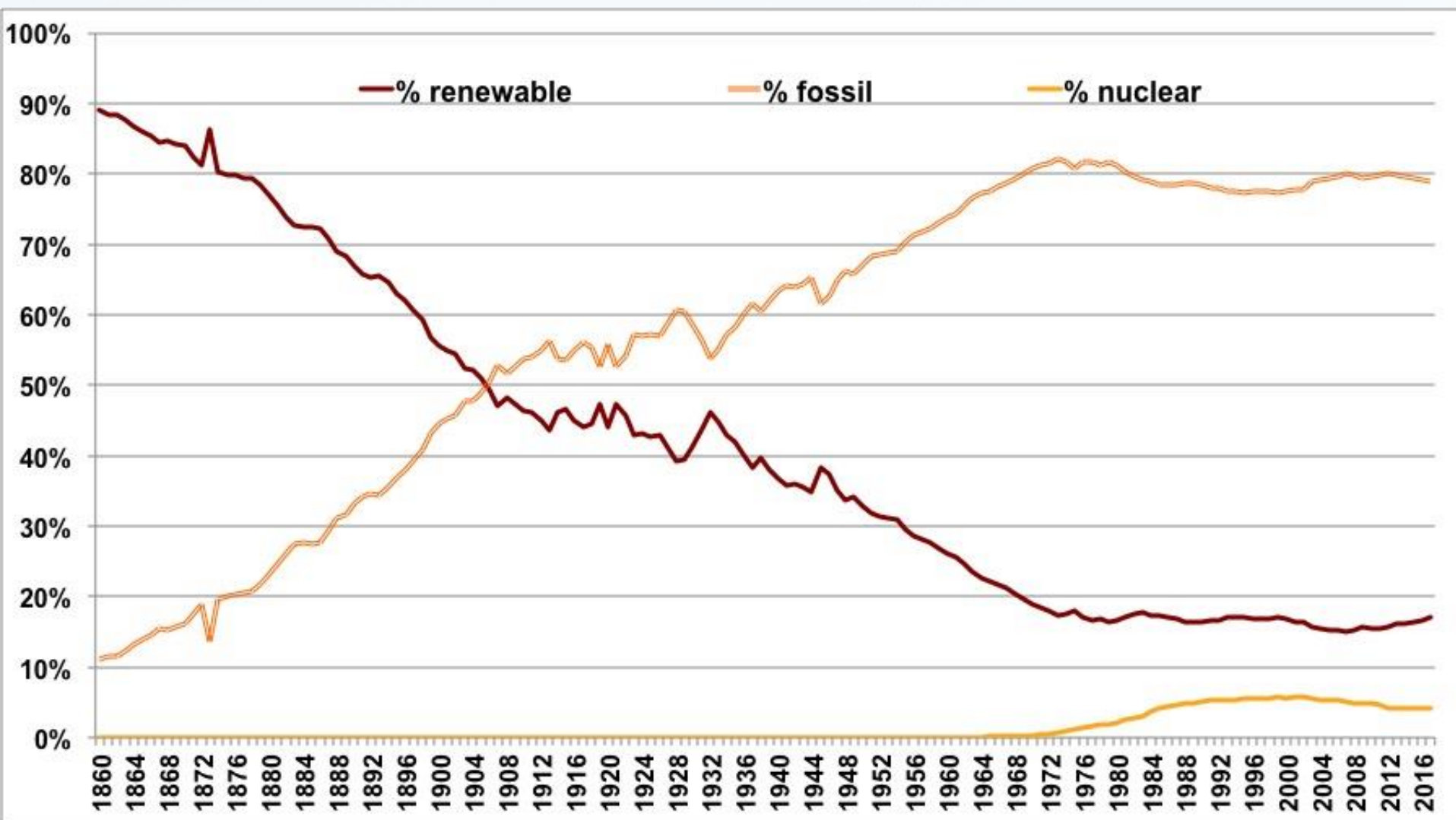
Approvisionnement renouvelable mondial depuis 1860. Sources Smil, Shilling et al, BP Statistical Review. Les nouvelles ENR sont en équivalent primaire

# Une énergie renouvelable peut ne pas se renouveler



Couverture forestière de l'Europe à différentes époques

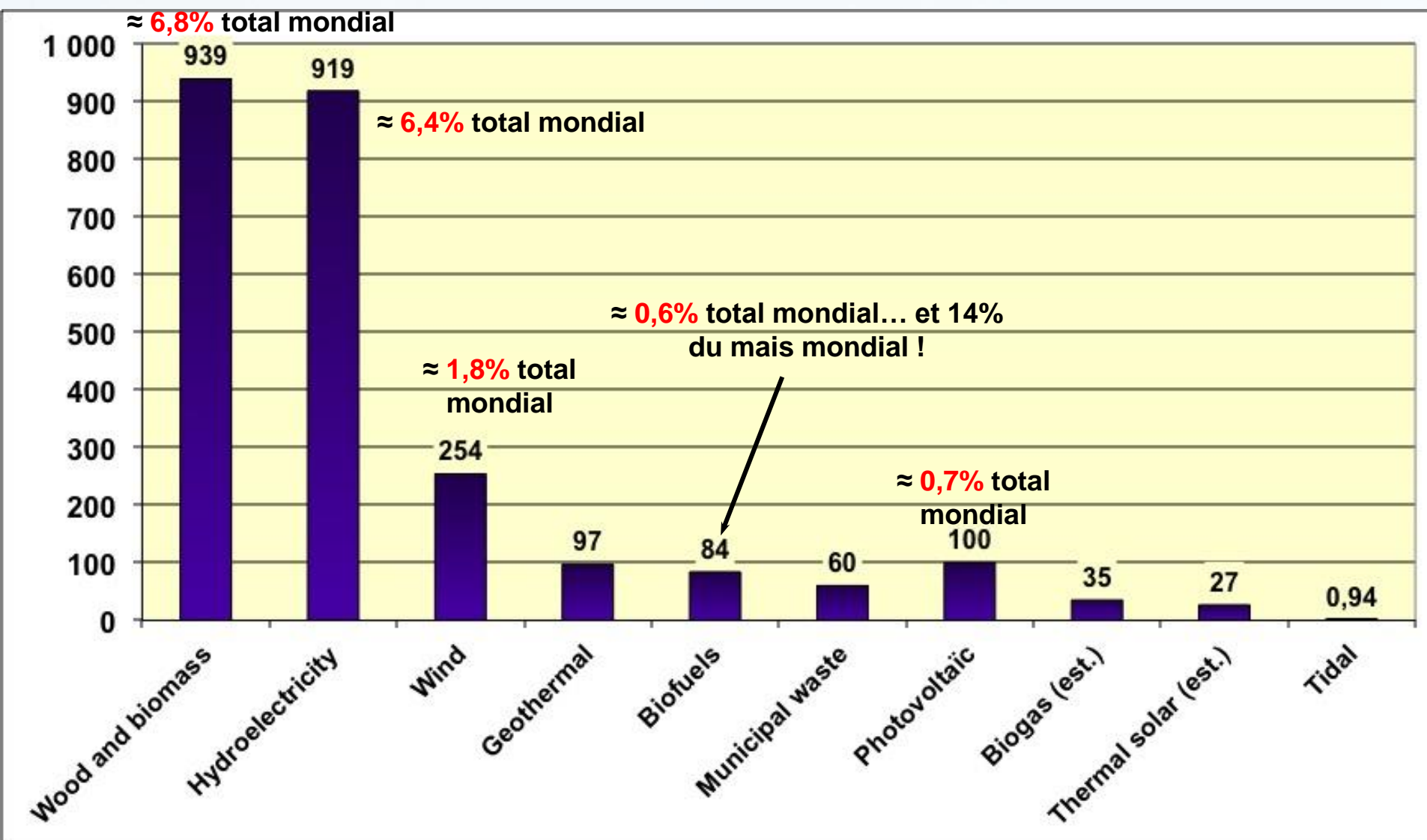
# Le verre à moitié vide : 16% de l'énergie primaire seulement



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

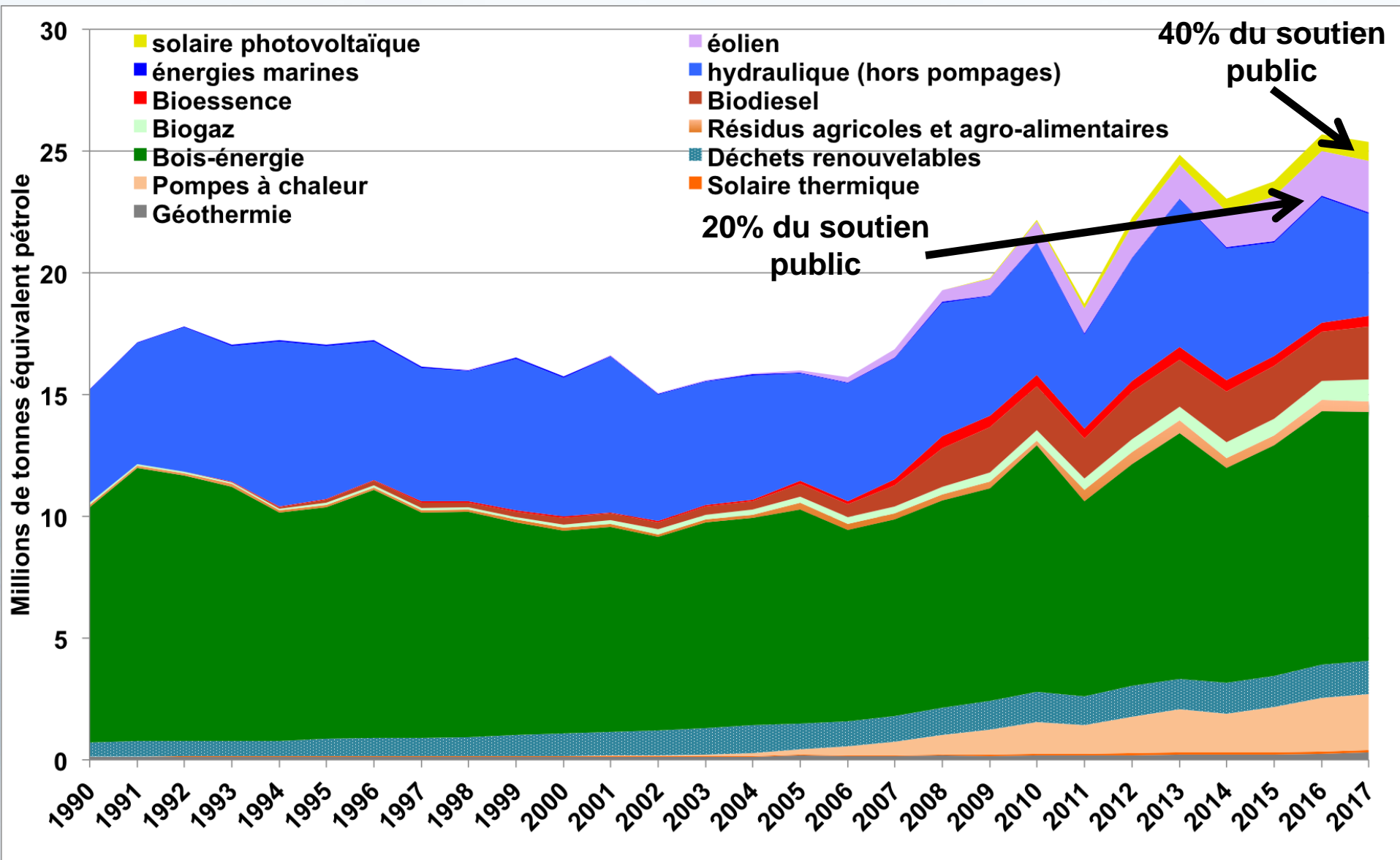


# Le verre à moitié vide : 16% de l'énergie primaire etc



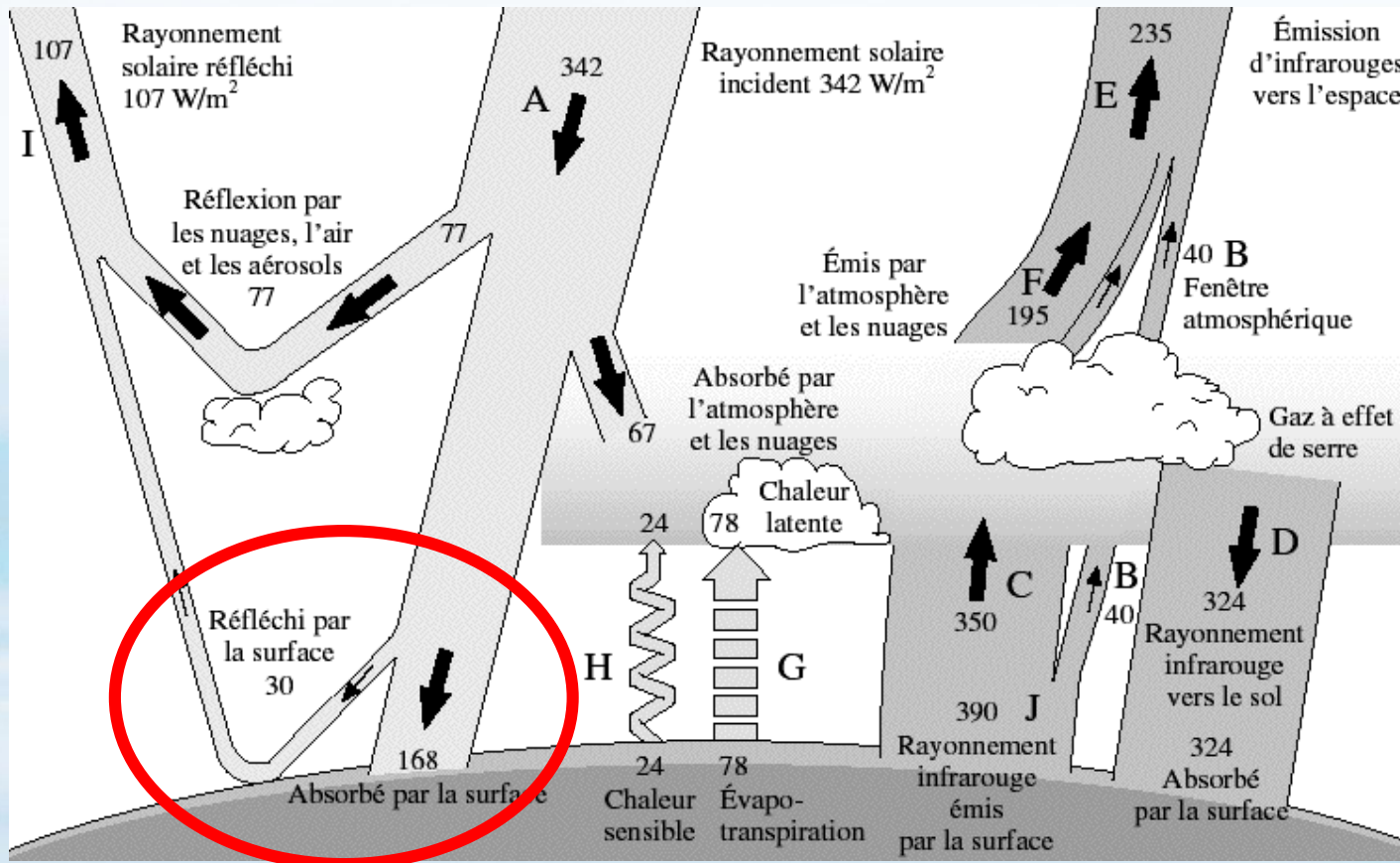
Contribution des énergies renouvelables en 2017. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Source BP Stat & divers

# Quid de notre chauvinisme renouvelable ?



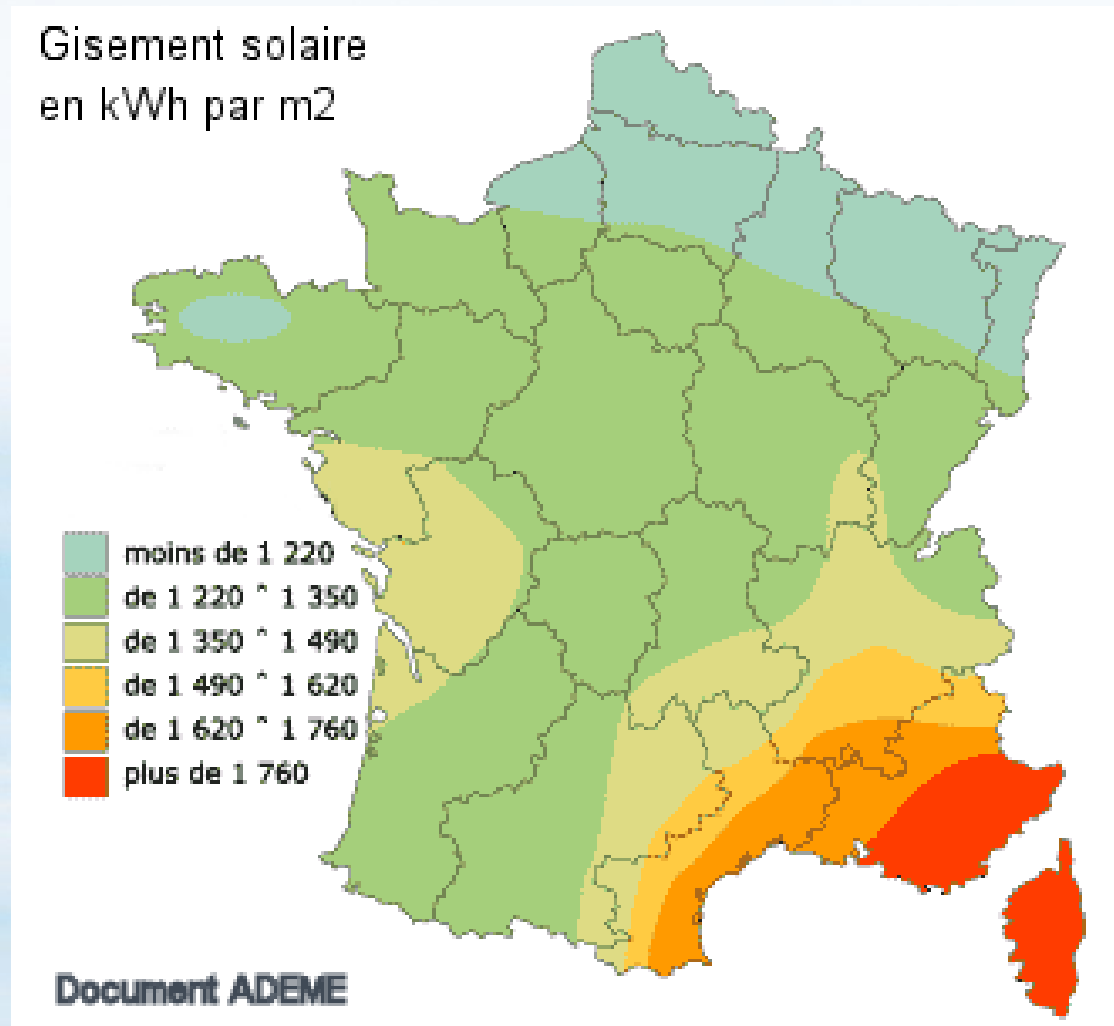
Production d'énergie renouvelable en France depuis 1970, en Mtep (conso nationale = 240 Mtep). Source : chiffres clé de l'énergie, CGDD, 2019

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



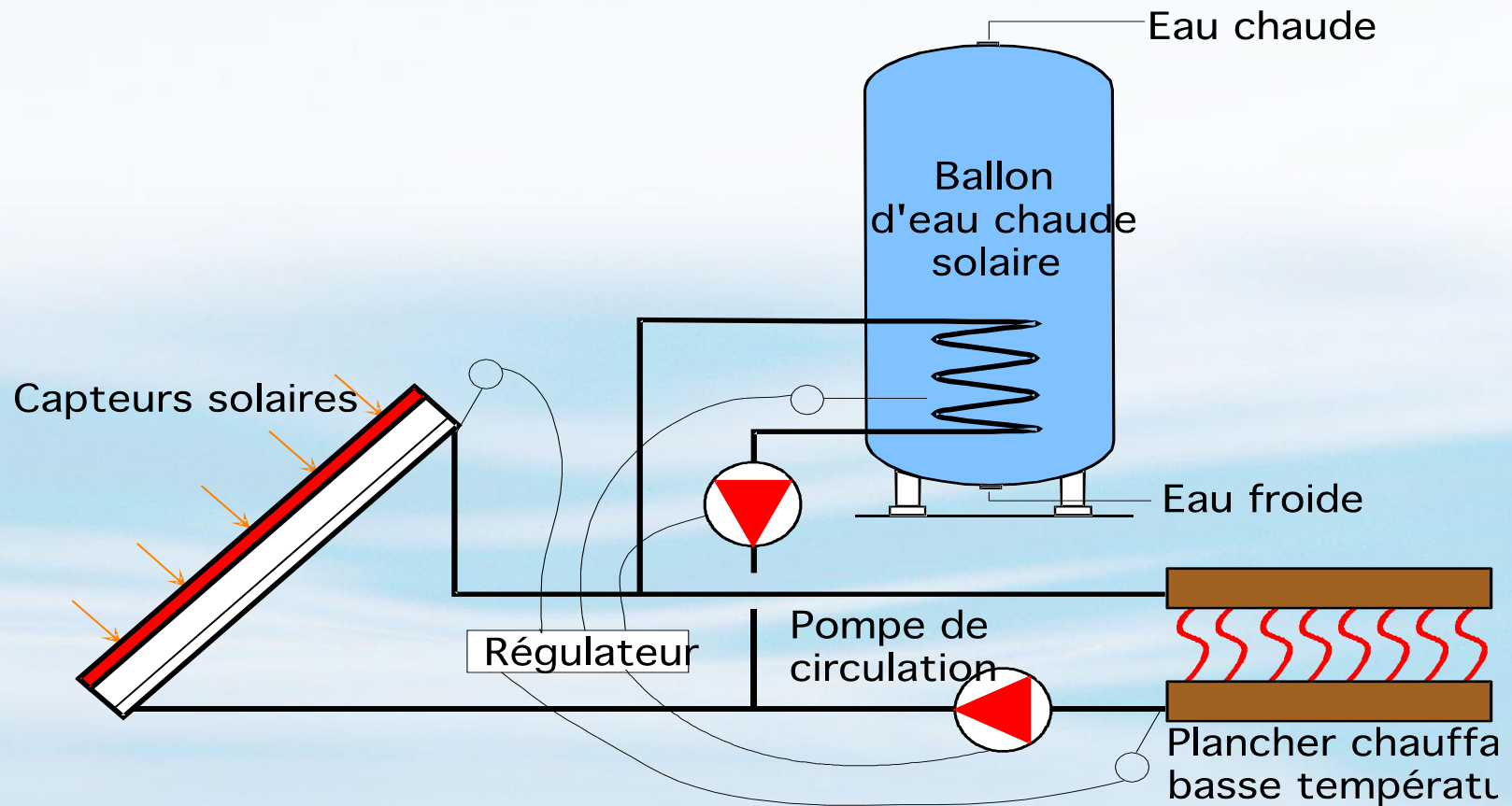
Environ 200 Watts par  $\text{m}^2$  en moyenne annuelle et géographique au niveau du sol : le flux solaire « exploitable » représente environ  $3,2 \cdot 10^{24}$  joules par an, soit 7.000 fois l'énergie consommée par l'humanité ! (11 Gtep/an)

# 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.**

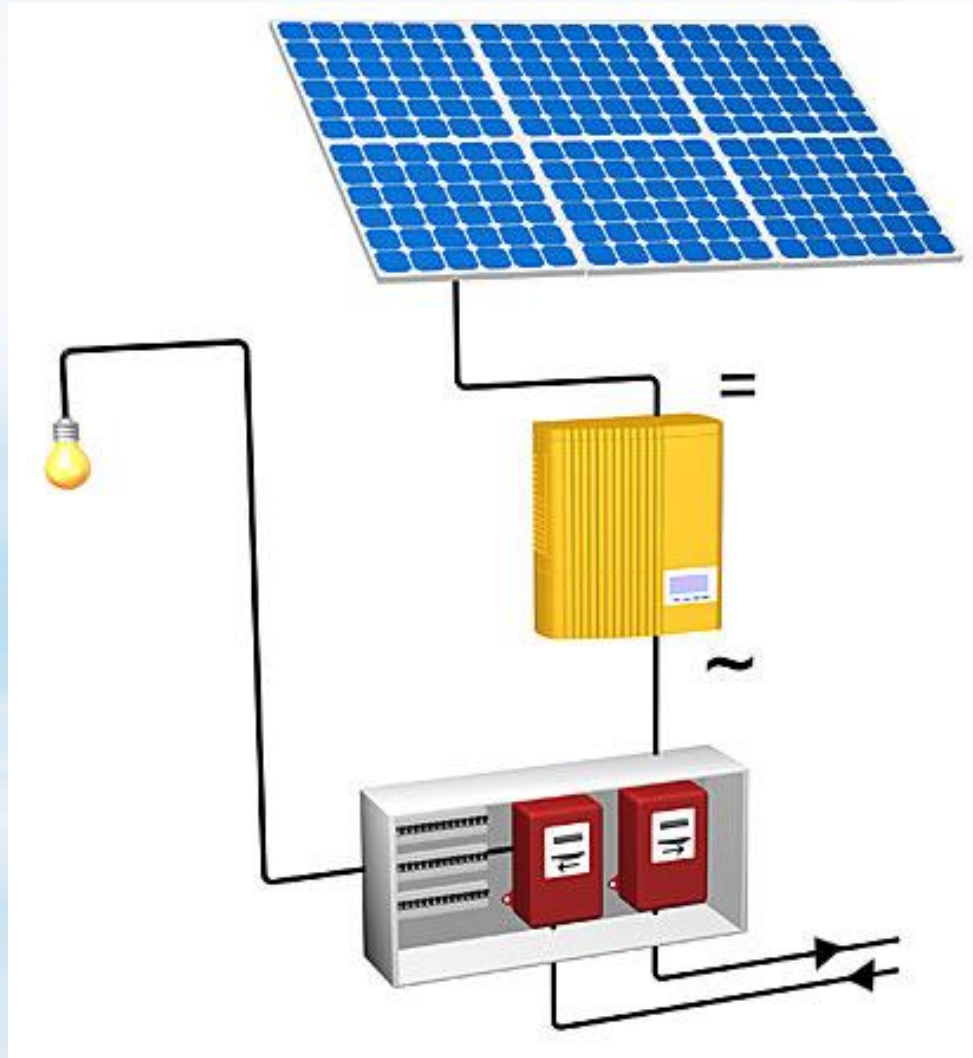
# Exploitation N° 1 : douches, bains et radiateurs



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

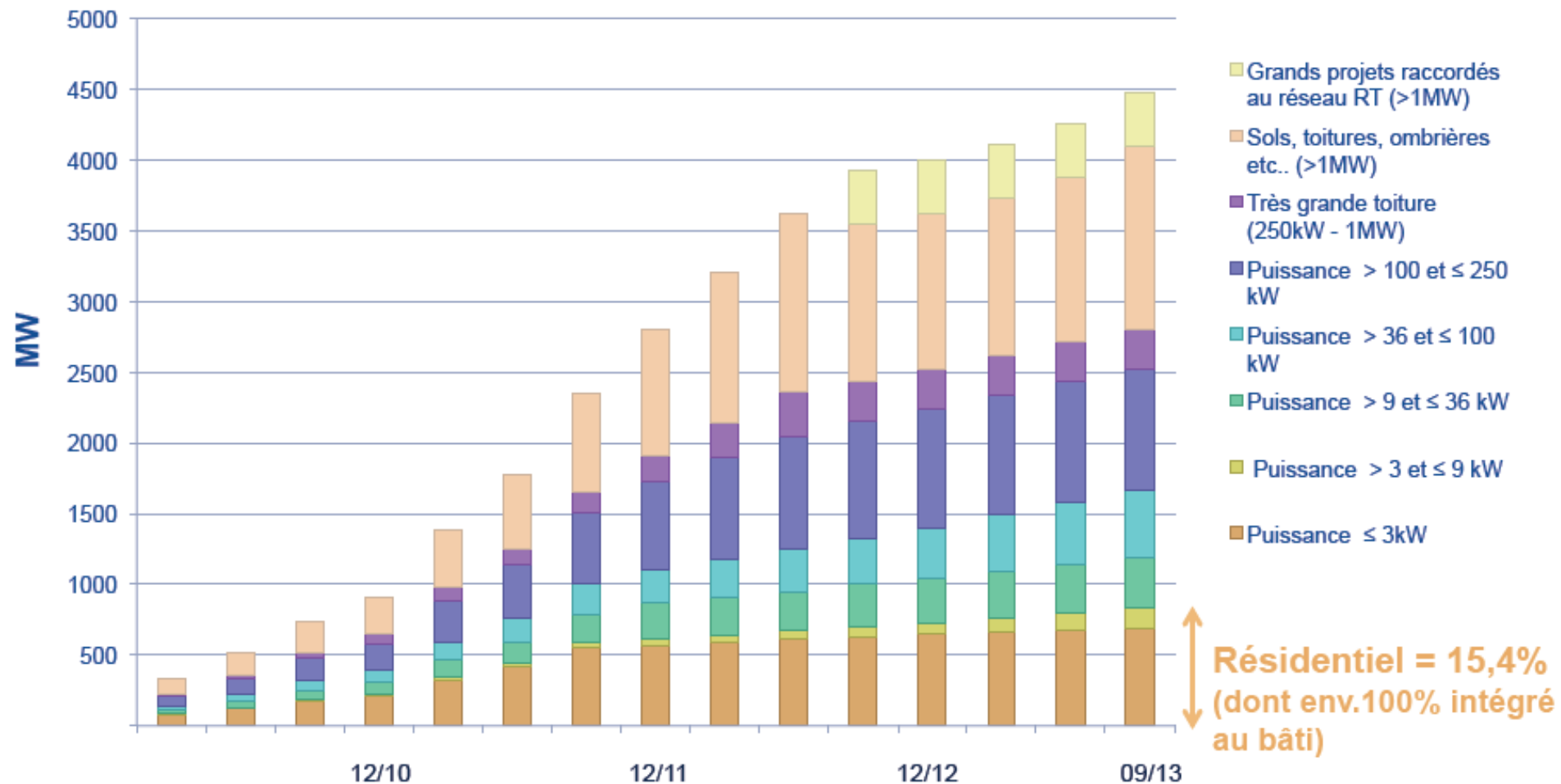


# Exploitation N° 2 : néons et télévisions



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

# Le solaire PV, une énergie plus « centralisée » qu'il n'y paraît



Evolution des puissances installées en solaire depuis début 2010.

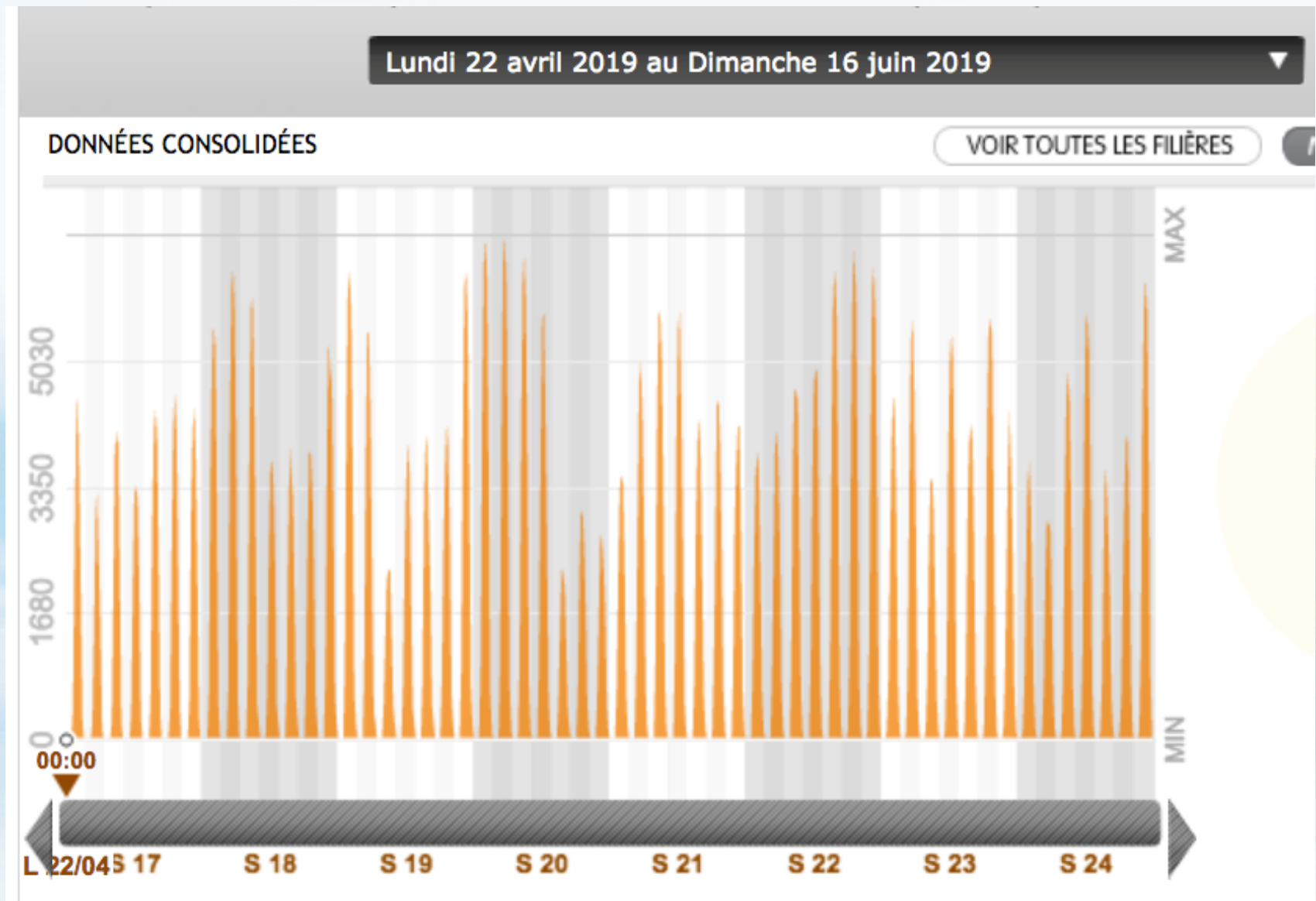
Source : Carbone 4, 2014

# En fait le PV ressemble désormais plus à ça



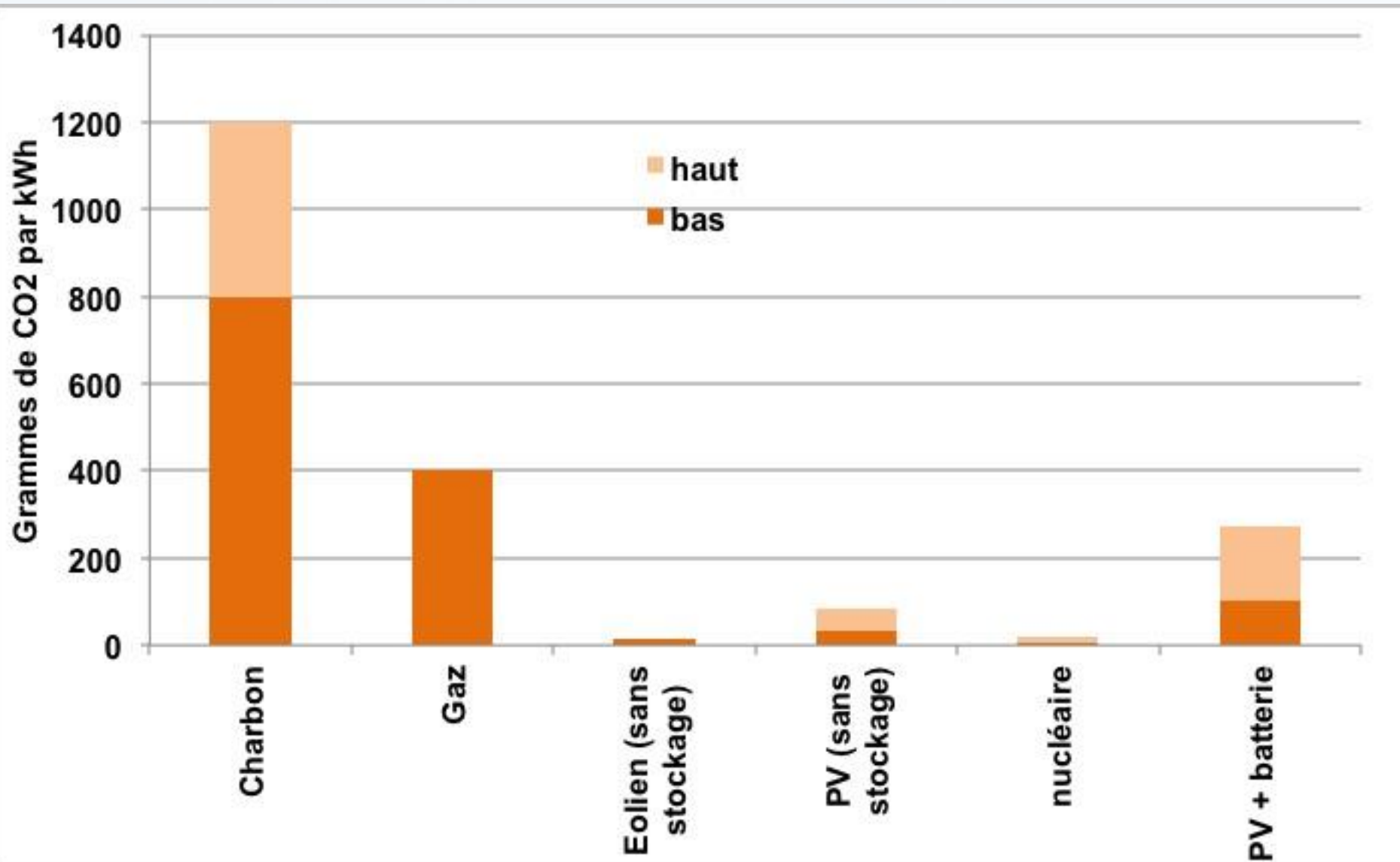
**Grande installation PV au sol. 1 hectare par MW en gros**

# 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.



# On sait ce qui sort, moins ce qui rentre !

Factor	Typical Energy Invested Additions in a PV System	MEuros/ year (Equiv)	GWh Equiv/ year	Energy Invested in ER*X
a <sub>1</sub>	Module, inverters, trackers and metallic infrastructures (labor excluded)			0,120
a <sub>2</sub>	Accesses, foundations, canalizations and perimeter fences		148,0	0,028
a <sub>3</sub>	Transportations. From local manufacturers to		96,0	0,018
a <sub>4</sub>	Module Washing		10,7	0,002
a <sub>5</sub>	Self Consumption in Plants		26,8	0,005
a <sub>6</sub>	Operation and Maintenance Energy Costs	200	342,4	0,066
a <sub>7</sub>	Electrical Network/Power lines restructuring	45	77,0	0,015
a <sub>8</sub>	Security and Surveillance	68	116,4	0,022
a <sub>9</sub>	Communications and remote control and Management	5	8,6	0,002
a <sub>10</sub>	Faulty Modules, Inverters, trackers	10	17,1	0,003
a <sub>11</sub>	Fairs, Exhibitions, promotions, Conferences, etc.	40	68,5	0,013
a <sub>12</sub>	Circumstantial and Indirect Labor (not included in Direct labor activities) and Associated Economic/energy costs: Consultants, Notary Public, Public Register, , Civil Servants/Public Officers, etc.	5,7	19,3	0,004
a <sub>13</sub>	Cost of land rent or long term ownership	13	22,3	0,004
a <sub>14</sub>	Energy investments of Evacuation Lines and Rights of Way	3	5,1	0,001
a <sub>15</sub>	Pre-inscription, Inscription, Registration bonds and fees	0	0,0	0,000
a <sub>16</sub>	Associated Energy Costs to injection of intermittent loads: Pump up Costs and/or other massive storage systems, if applied		0	0
a <sub>17</sub>	Associated Energy Costs to injection of intermittent loads: Network Stabilization Associated Costs (Combined Cycles)	50	85,6	0,016
a <sub>18</sub>	Insurances	42	71,9	0,014
a <sub>19</sub>	Administration Expenses	32	54,8	0,011
a <sub>20</sub>	Equipment Stealing and vandalism	7	12,0	0,002
a <sub>21</sub>	Force Majeure Acts of God and others: Wind storms, Lighting, storms, flooding, hail		0	0
a <sub>22</sub>	Municipality Taxes, duties and levies (2-4% total project)	7	12,0	0,002
a <sub>23</sub>	Premature phase out of unamortized manufacturing and other equipment	30	51,4	0,010
a <sub>1</sub> to a <sub>23</sub>	Total Invested Energy Additions	558	1245,8	0,360

Derived from conventional Life Cycle Analysis studies . Bankier and Gale quoting several studies and authors with poli, mono thin film, etc.

**EROEI~8.3**

Some Balance Of System (BoS) energy expenses, ignored in some or many LCA's on solar PV. These expenses are calculated directly in energy form (Prieto-Hall in preparation)

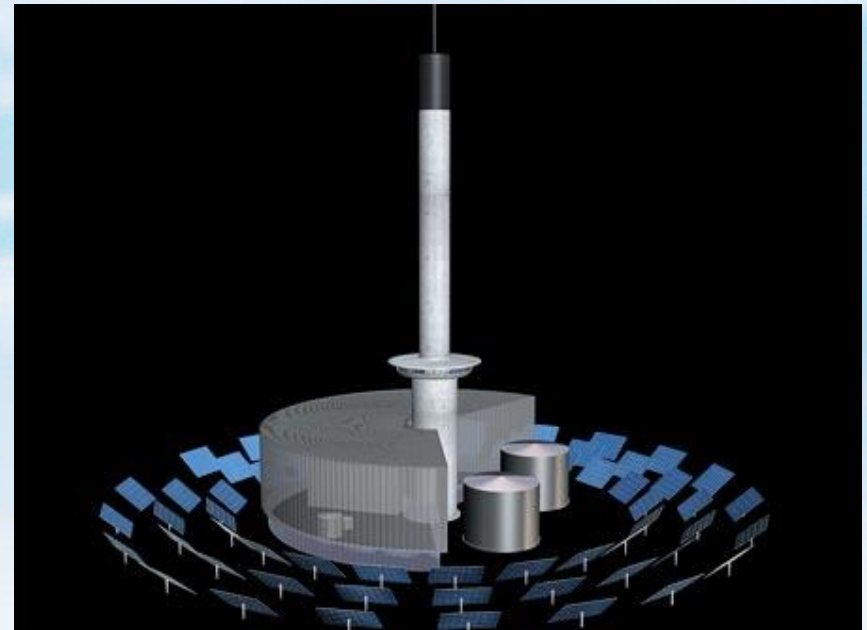
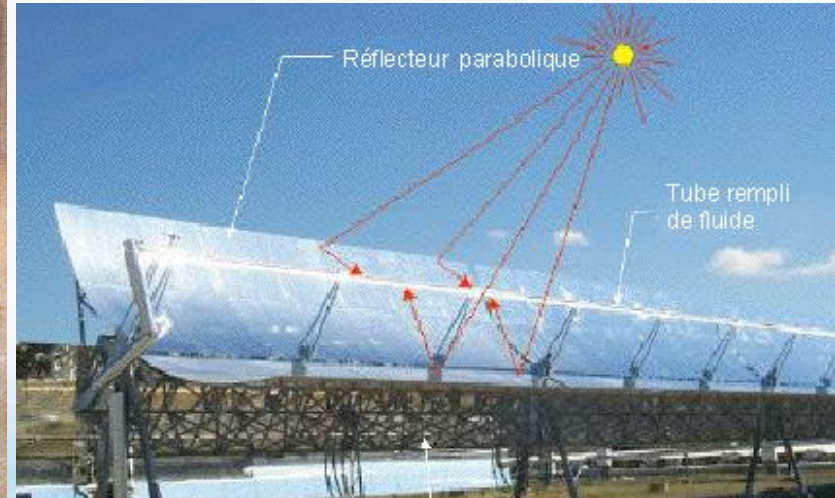
Other necessary energy inputs usually ignored in energy payback analyses for a Solar PV System in Spain. Most of them are derived from economic expenses translated into energy equivalences and distributed over a 25 year period  
(Some additional economic costs not included, such as Royal Decree tax for electricity producers or due payments to Agents representatives.

$$\text{Final EROEI} = \frac{1}{0.36} = 2.7$$

**kWh restitués par kWh utilisés pour le solaire selon Prieto & al.**

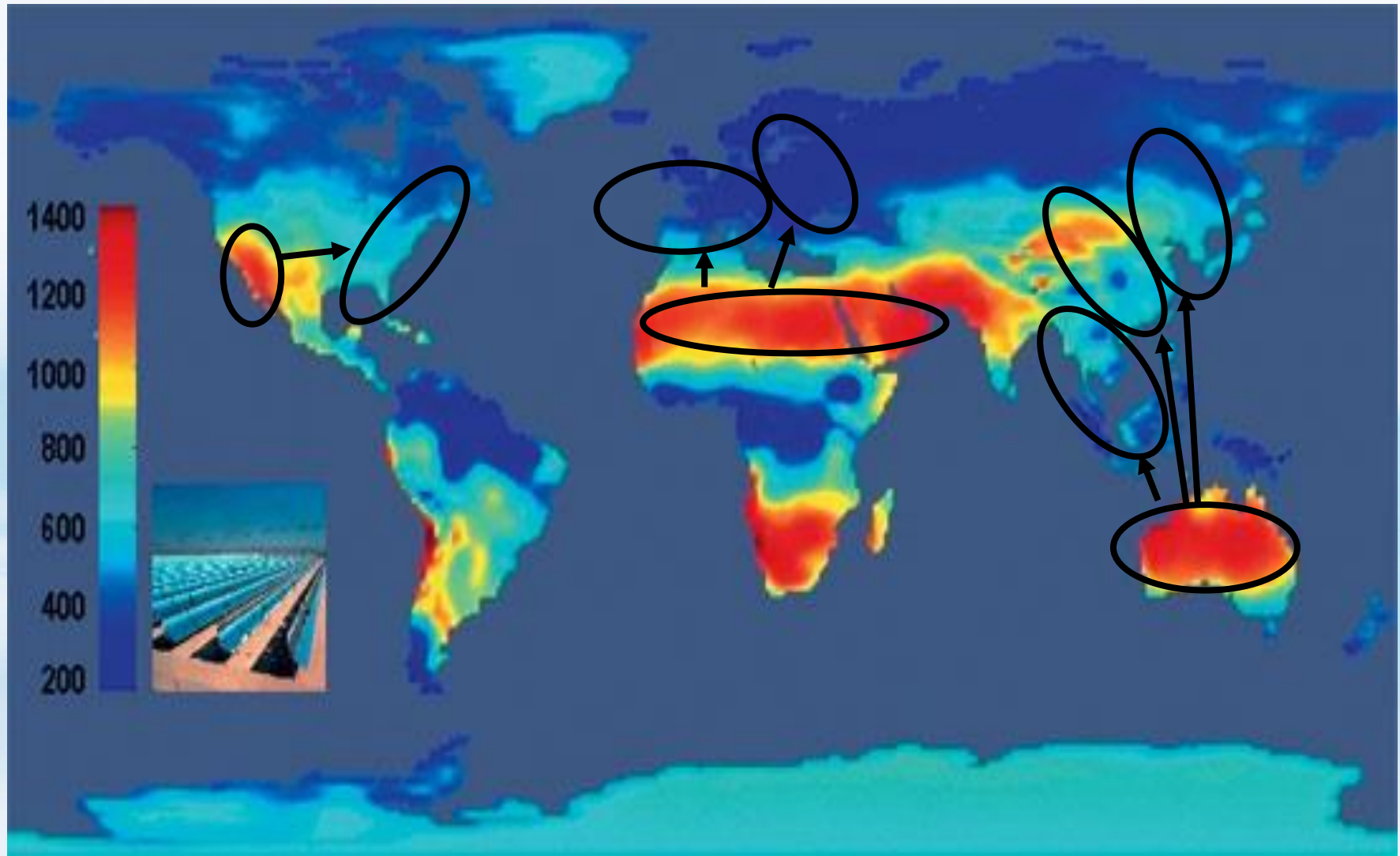


# Exploitation N° 3 : je concentre très fort



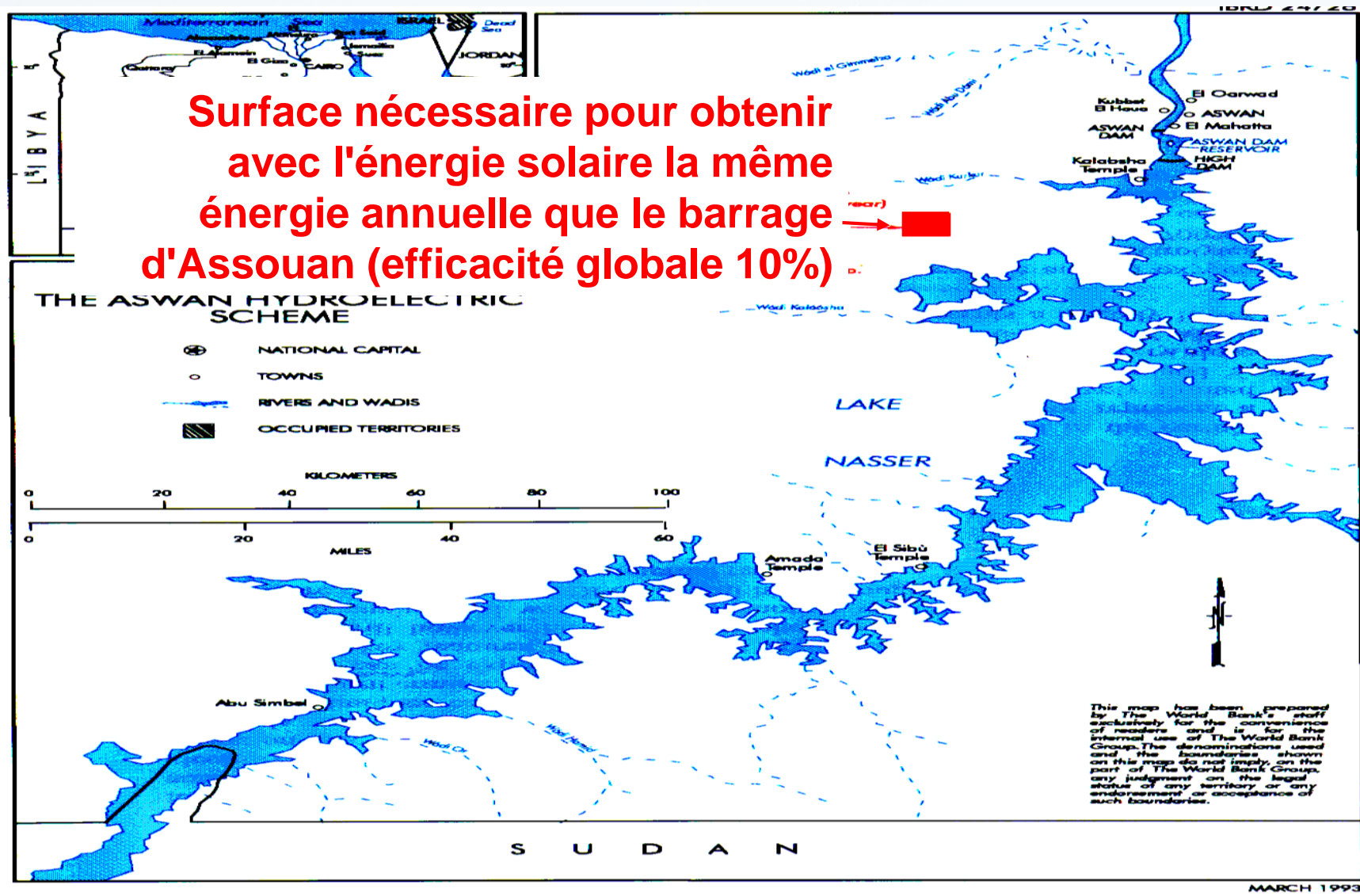
**Divers dessins de centrales solaires à concentration**

# Le solaire à concentration, avenir des échanges ?





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

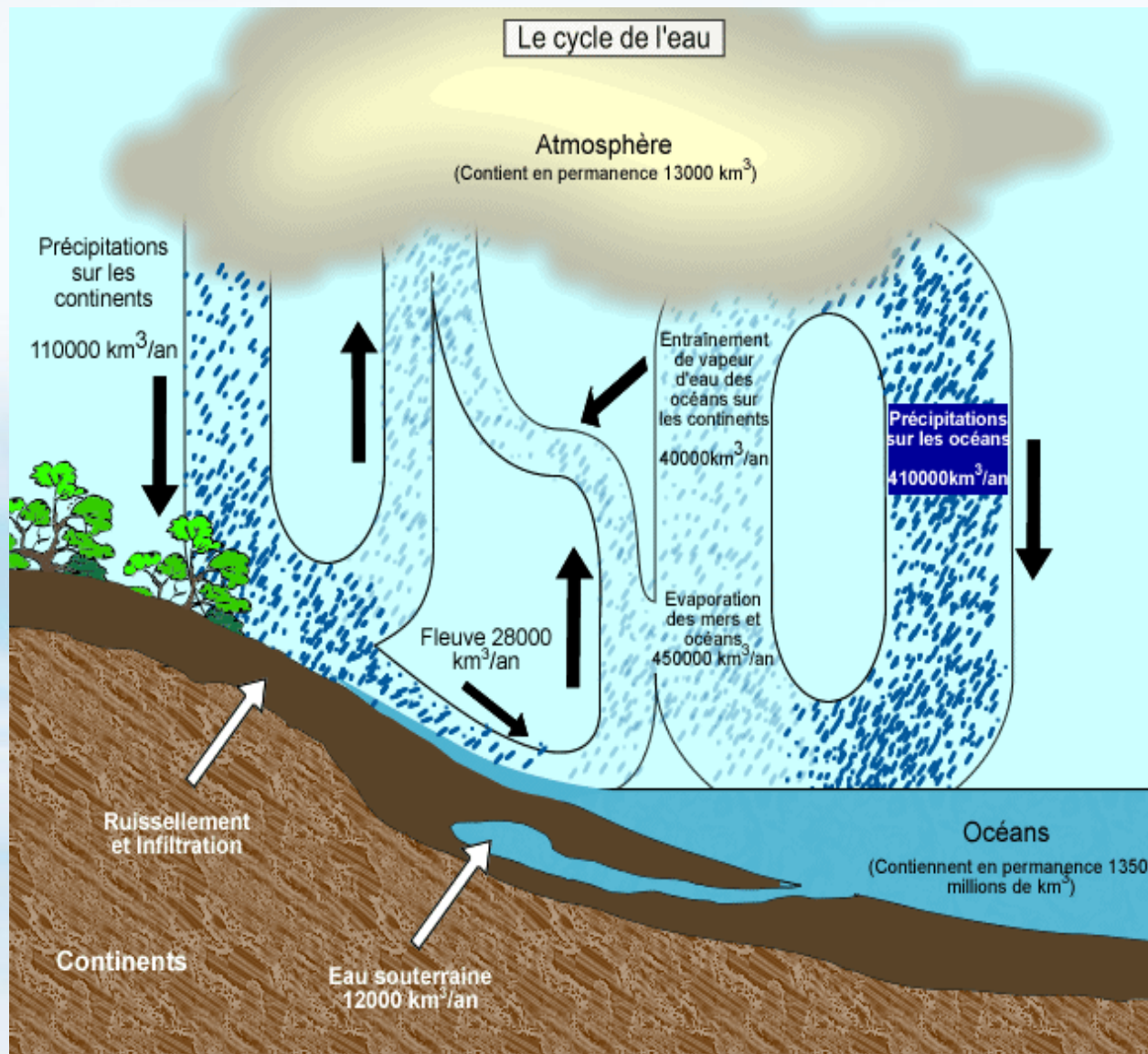


**Photovoltaïque = production en bout de réseau <-> concentration = production en tête de réseau**

**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  $\approx 2000$  fois la consommation de l'humanité.**

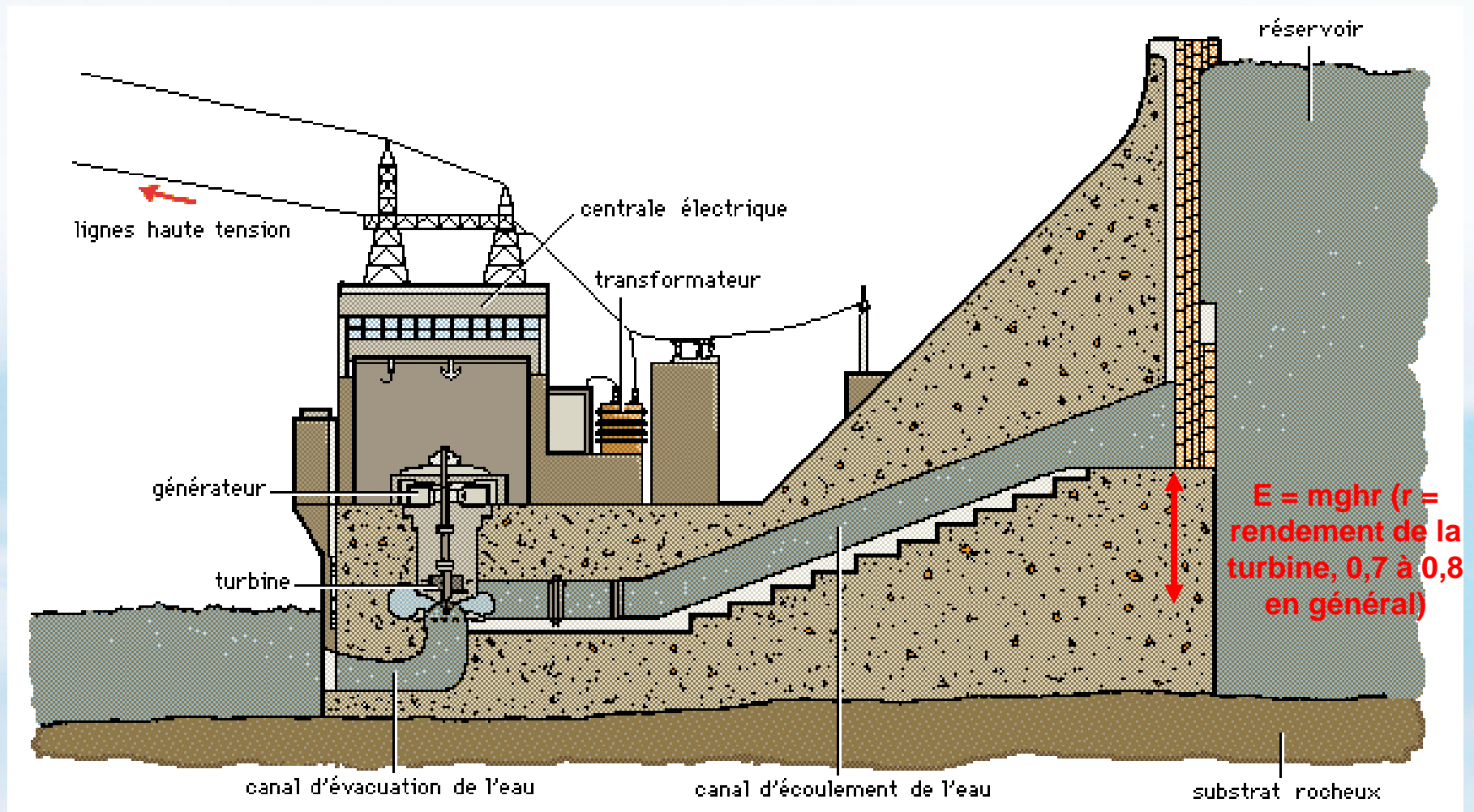


Schéma de principe d'une production à partir d'un lac de retenue.

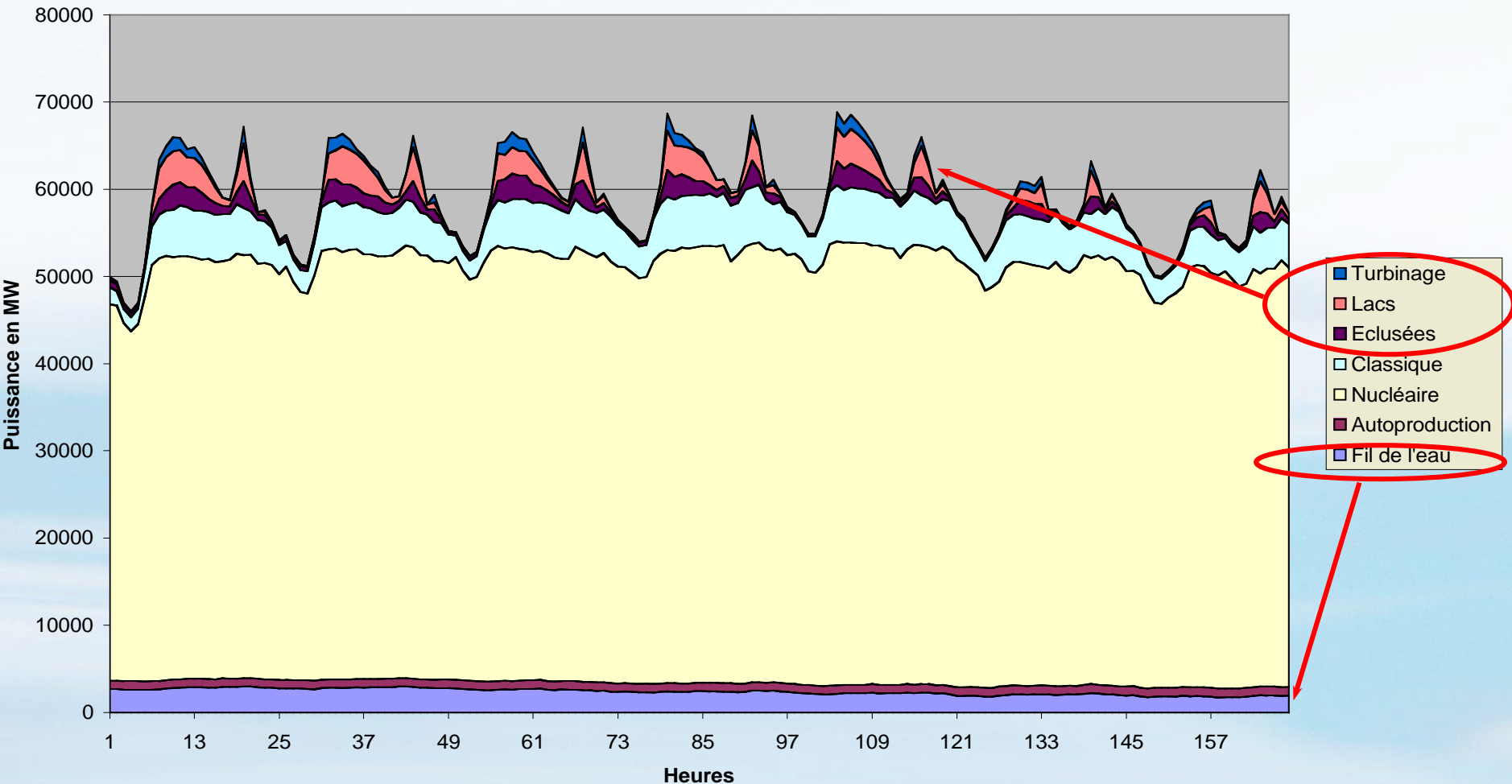
Massif	Superficie km2	précipitations annuelles (mm)	Hauteur moyenne de chute (mètres)	Energie potentielle max TWh	Energie electrique max TWh
Rhone Alpes	44 000	1 000	1 500	180	144
Reste Massif Central	20 000	1 200	1 000	65	52
Suisse	41 000	800	2 000	179	143
Pyrénées	50 000	1 000	1 000	136	109
Autriche	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

$E = mgh$

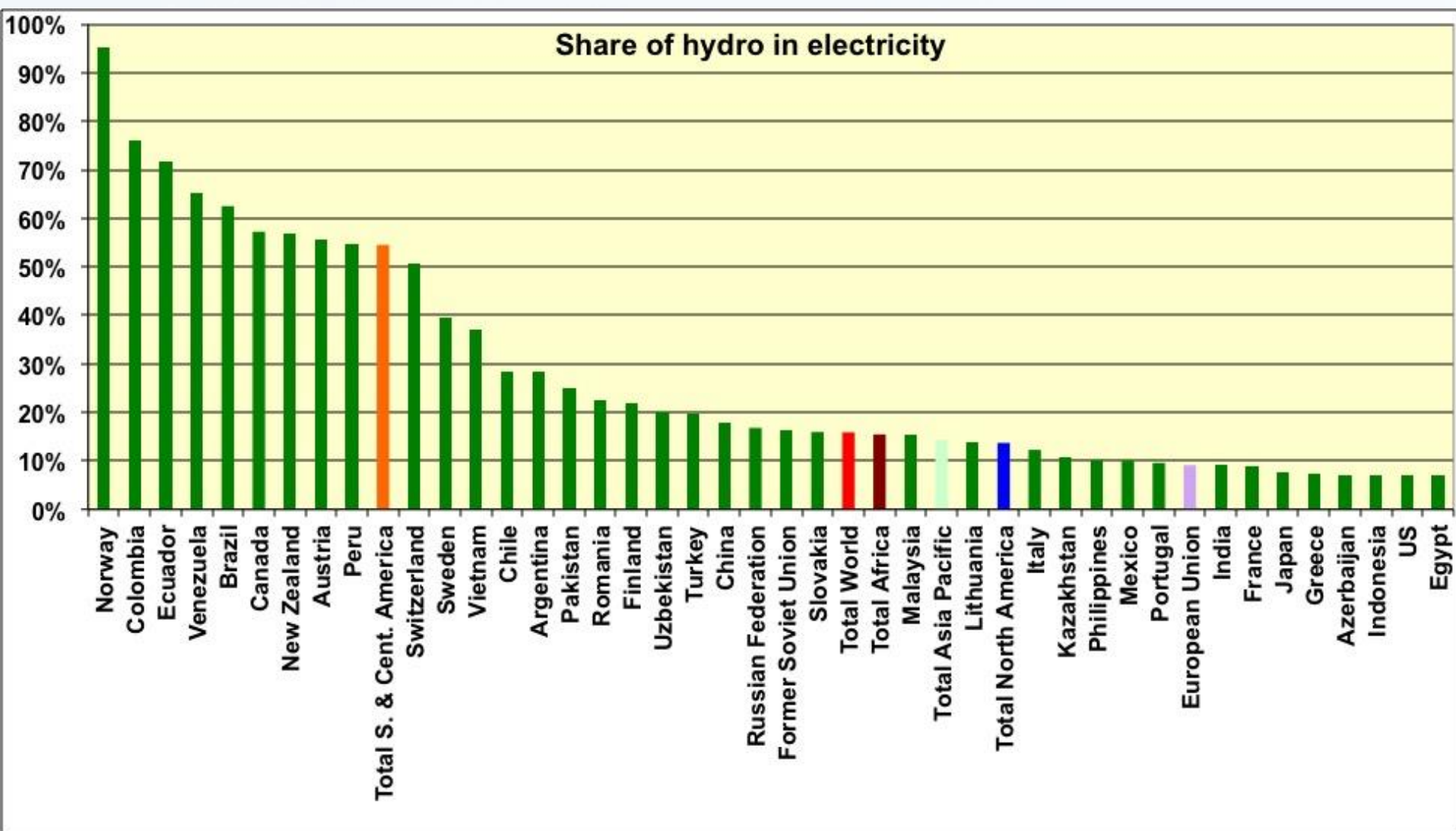
$E = mghr$



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

**Source : EDF**

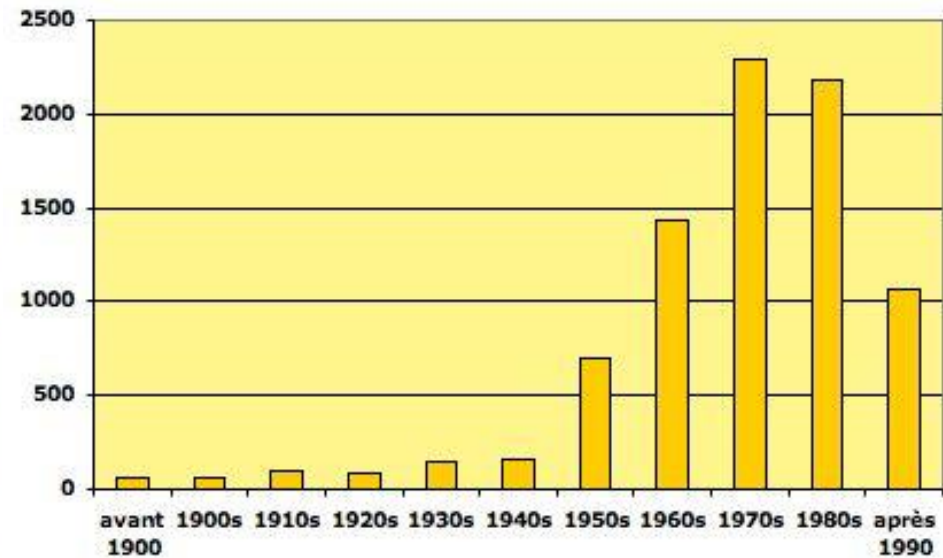
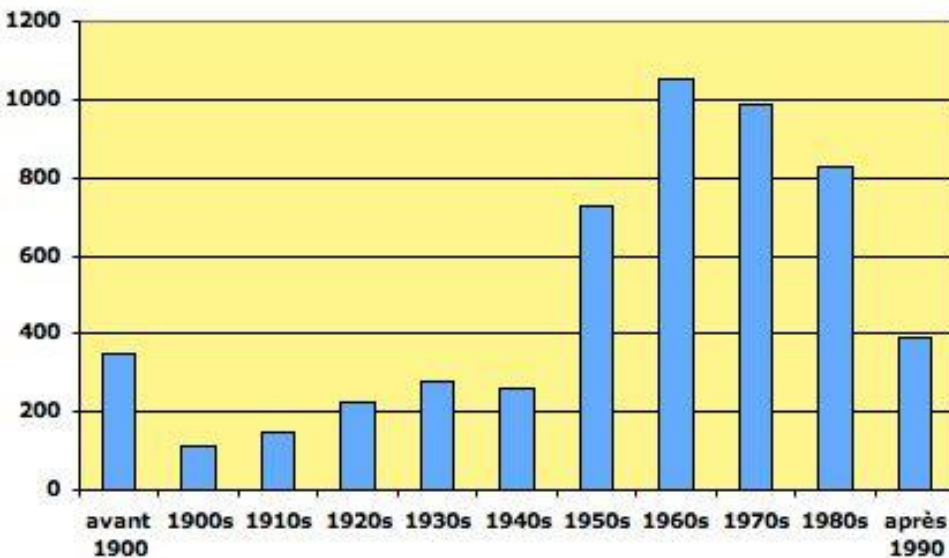
# Hydroélectricité = montagnes, ou à peu près



Part de l'hydroélectricité dans la production électrique par pays en 2017.

Source des données : BP Statistical Review

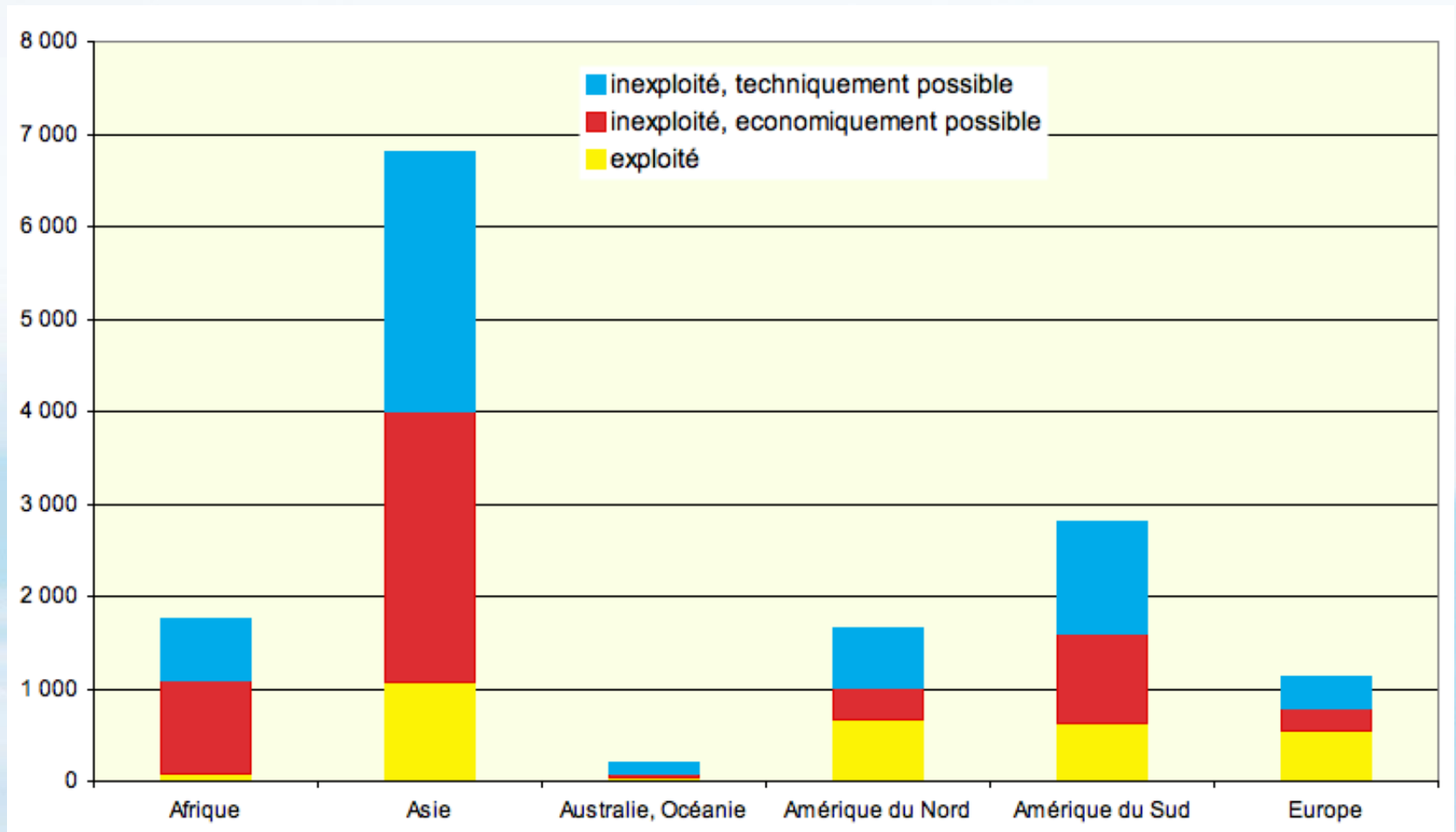




**Nombre de barrages construits par décennie, Europe (à gauche) et Asie (à droite).**

**Source : World Commission on Dams, 2000**

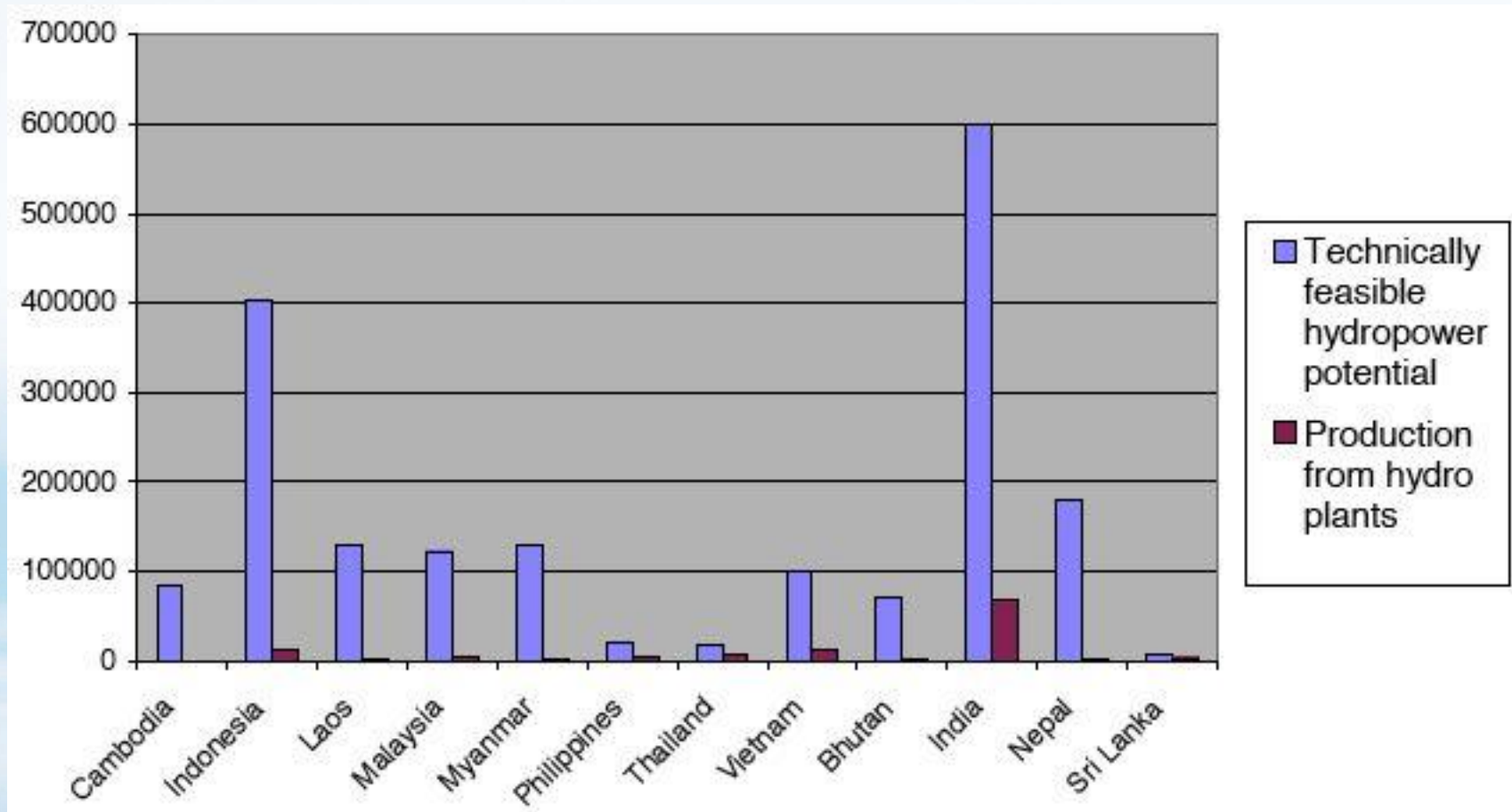
# En faire encore plus n'est pas aussi facile partout



**Potentiel hydroélectrique et production des barrages déjà installés par zone.**

**Source : Aqua Media International, 2007**

# Qui peut avoir du rab ?



**Potentiel hydroélectrique dans les pays d'Asie (hors Chine) et barrages déjà installés.**

**Source : World Commission on Dams, 2000**

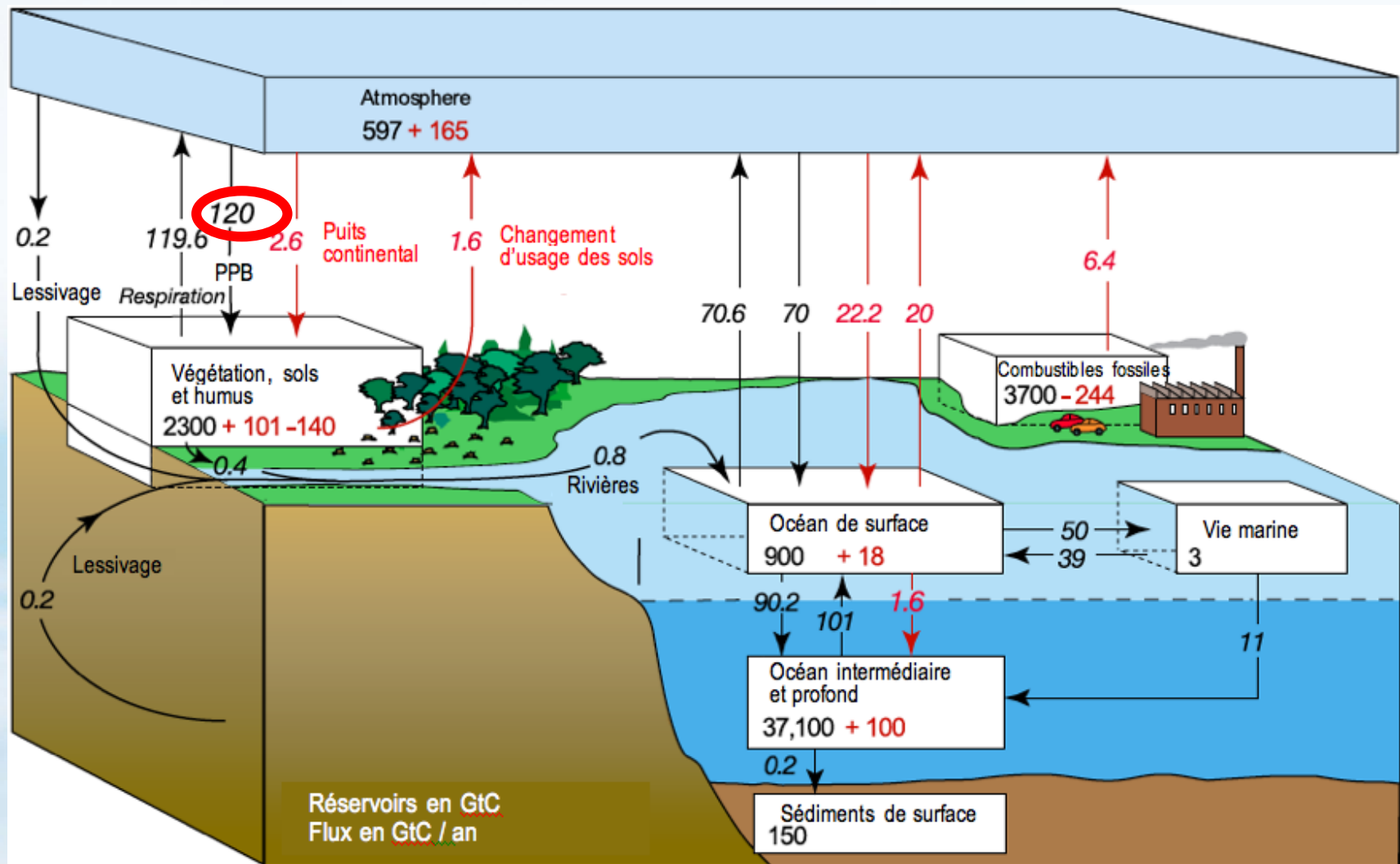
**C'est renouvelable, pas toujours inoffensif**



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

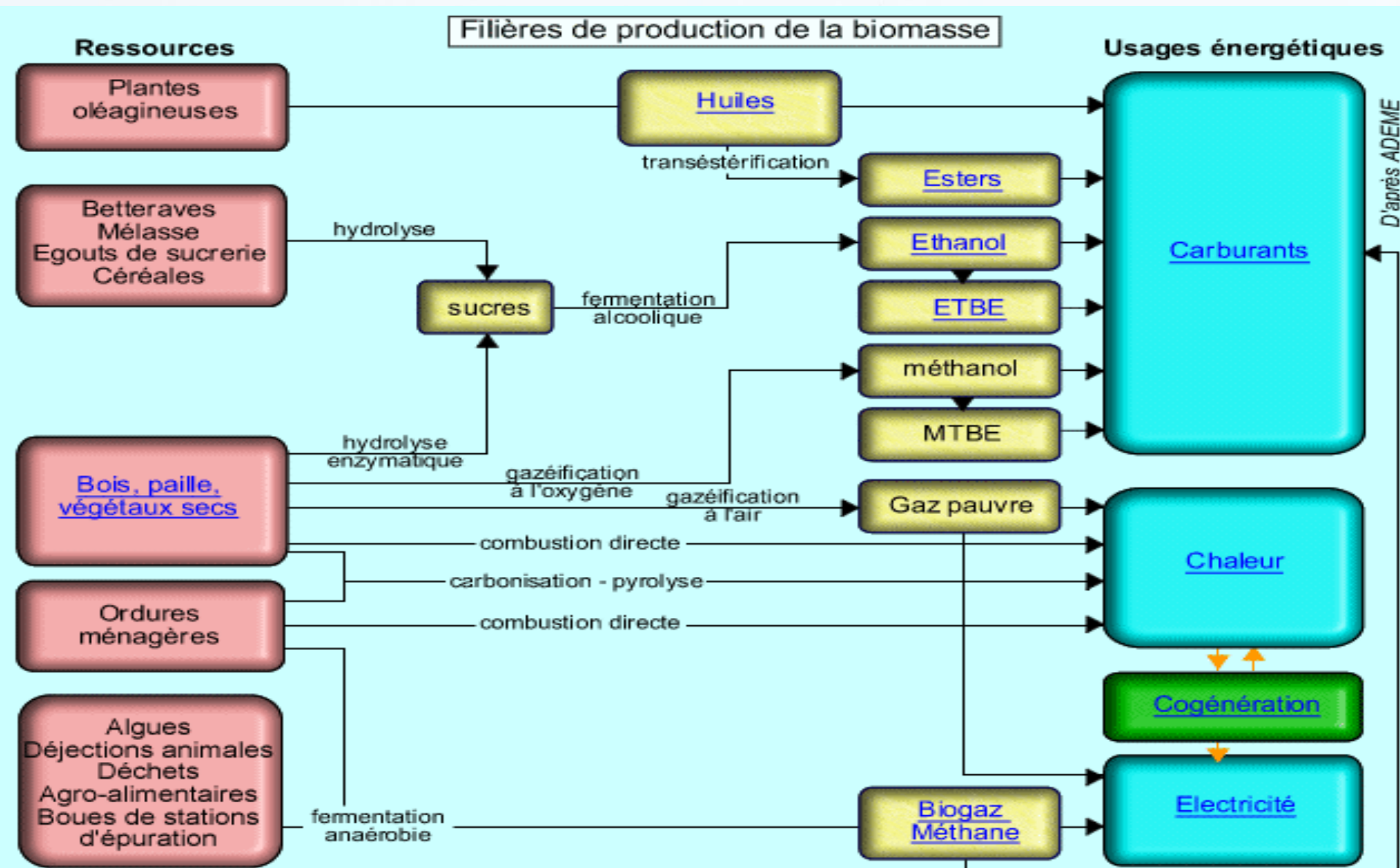


# La photosynthèse, seule manière de réduire le carbone oxydé



**Photosynthèse : 120 GtC brut, 60 net, soit ~50 Gtep d'énergie (≈ 5 fois la consommation d'énergie de l'humanité). -> Rendement de 0,5% environ.**

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



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

Energie finale  $\approx 8,6$  Mtep en 2004 (9,1 en 2015)

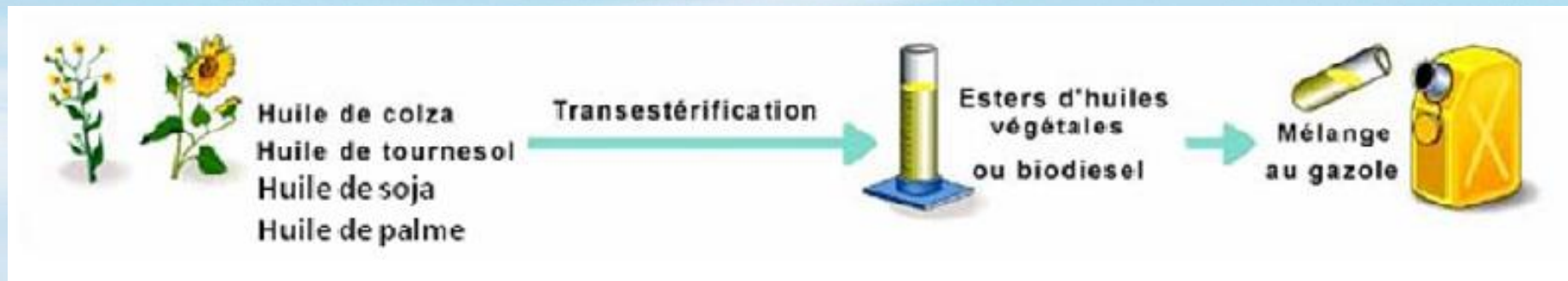
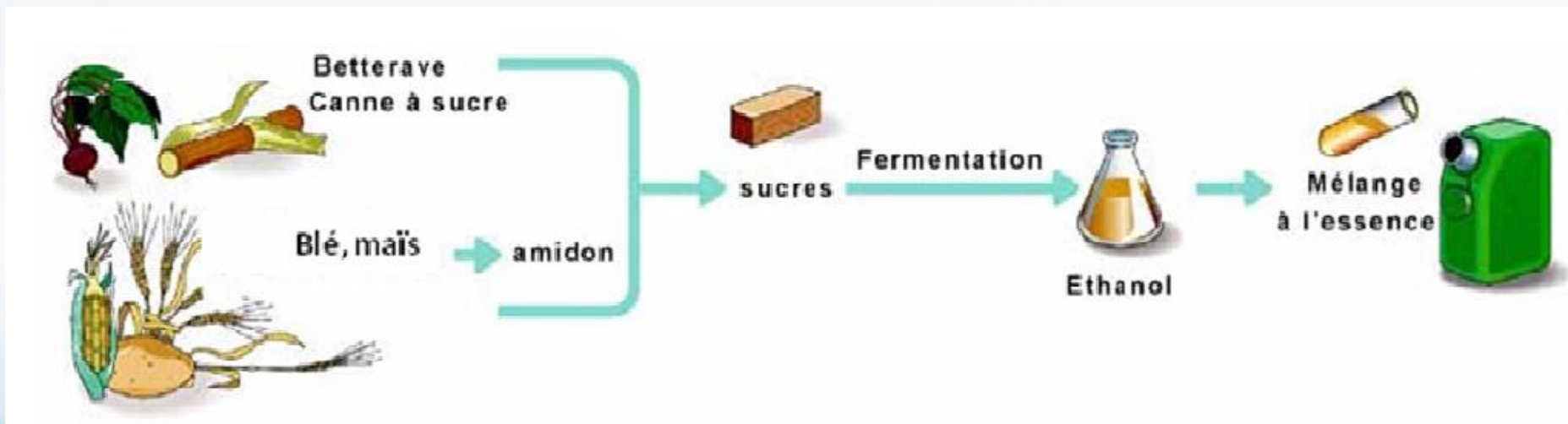
85 % chaleur maisons  
individuelles principales  
(7,3Mtep)

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

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



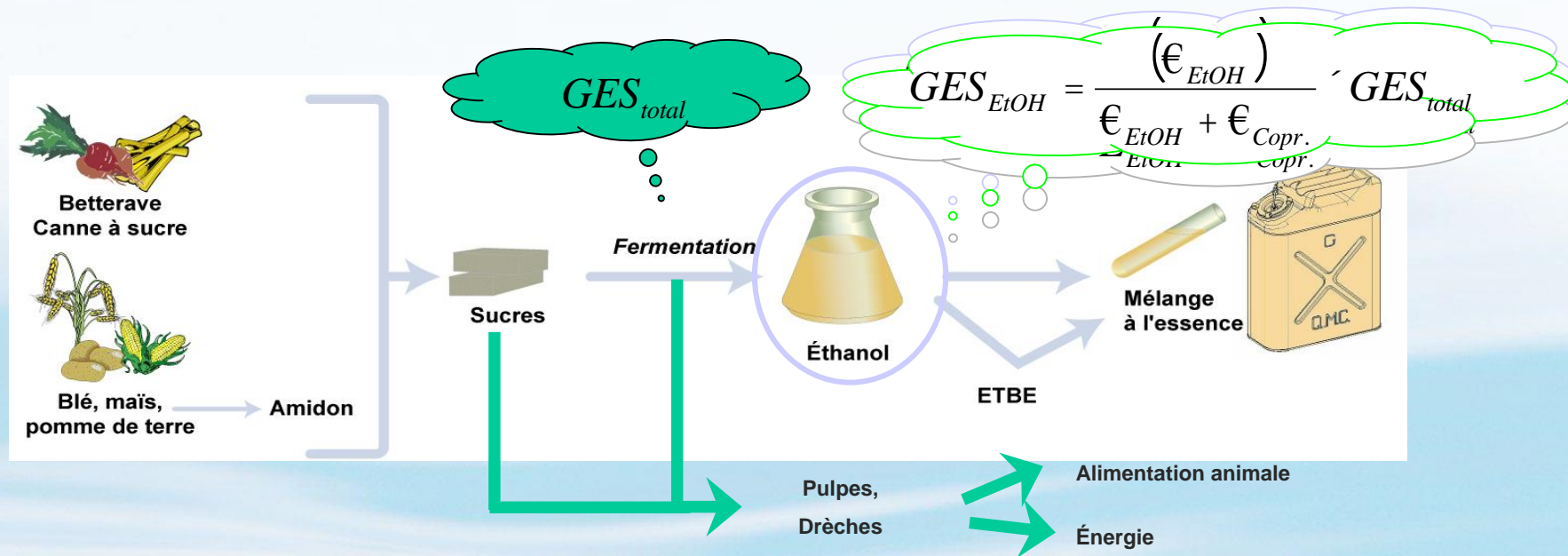
# Ah, sainte voiture, comment te conserver ?



**Les deux grandes filières d'agrocarburants de première génération**

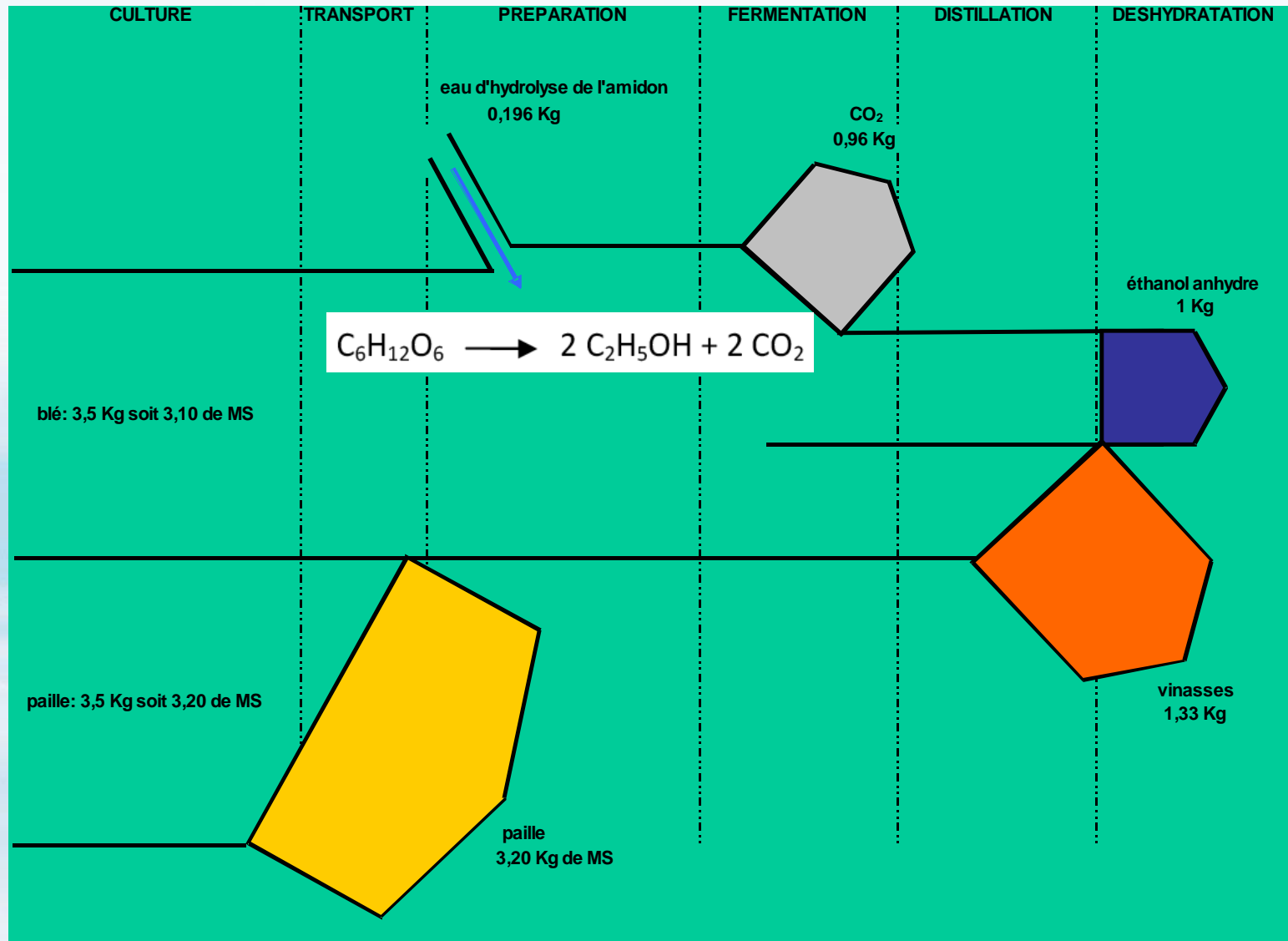


# Comptons les économies, donc, mais comment ?



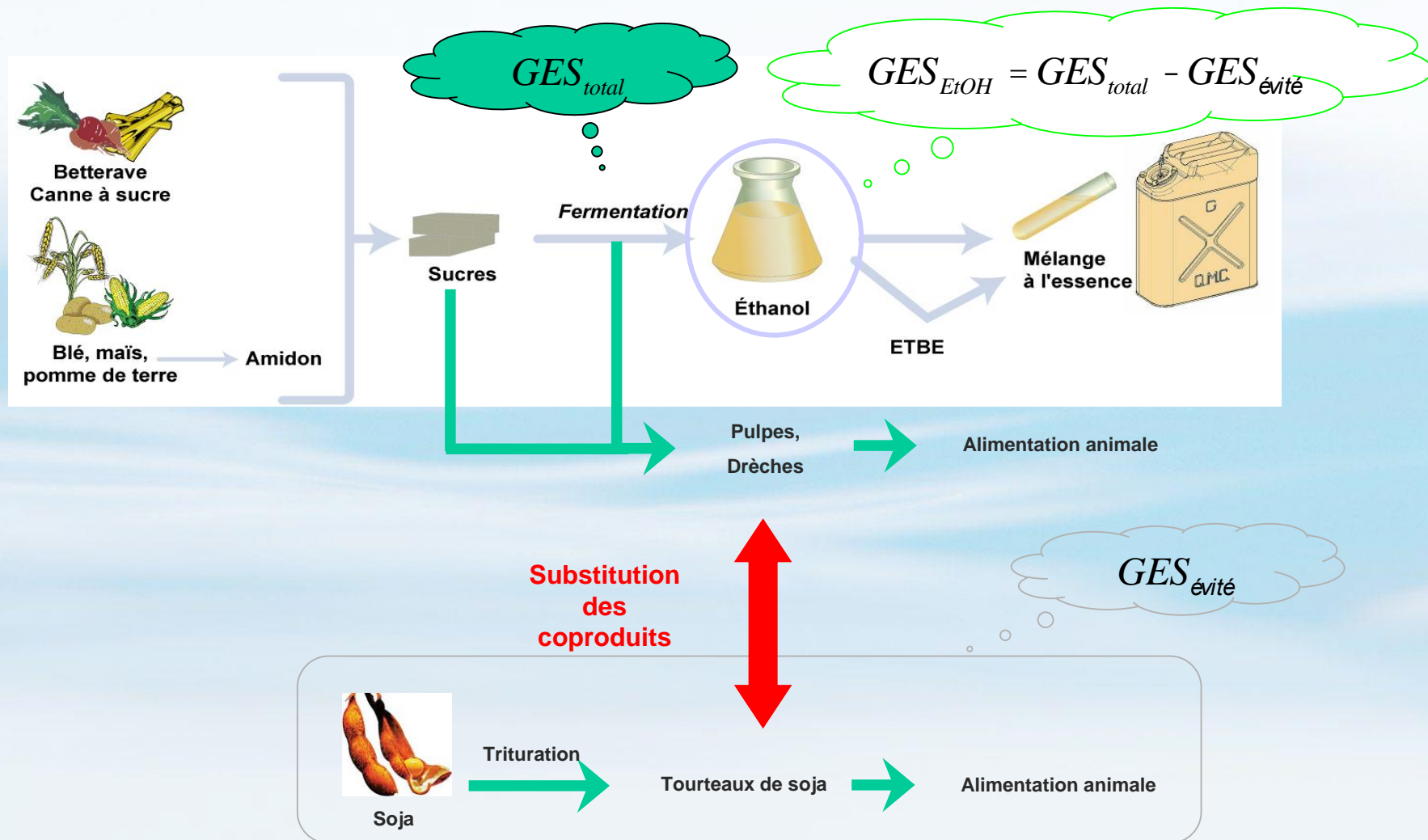
- **Prorata massique** : affectation selon la masse des produits
- **Prorata énergétique** : affectation selon le contenu énergétique des produits
- **Prorata économique** : affectation selon la valeur économique des produits (e.g. le prix auquel le producteur peut les vendre)

# En masse, on a surtout autre chose que de l'éthanol

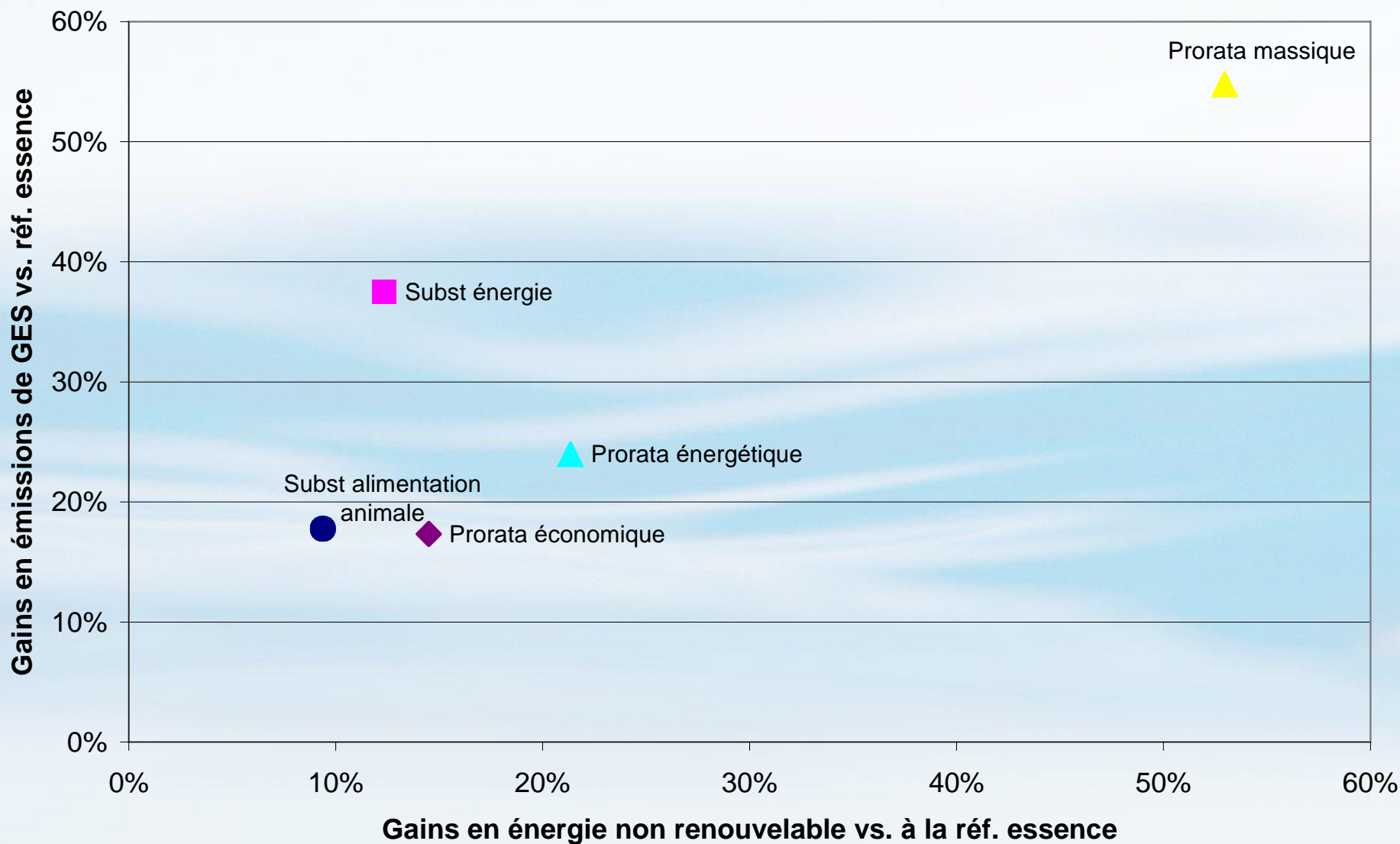


Vue d'ensemble du bilan de masse de la production d'éthanol de blé. Source Patrick Sadones, EDEN

# Plus facile en comptant les gains ?



# Là comme ailleurs, le résultat dépend de la méthode...



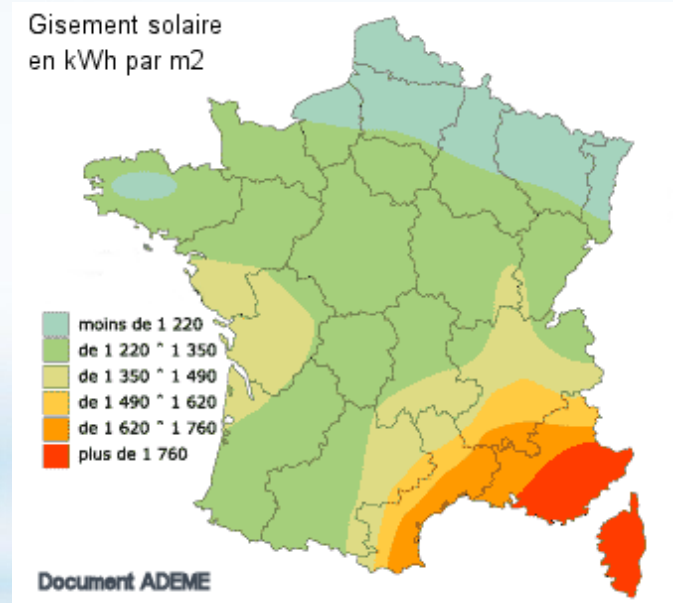


# A l'origine, toujours la même histoire : la photosynthèse

**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).**

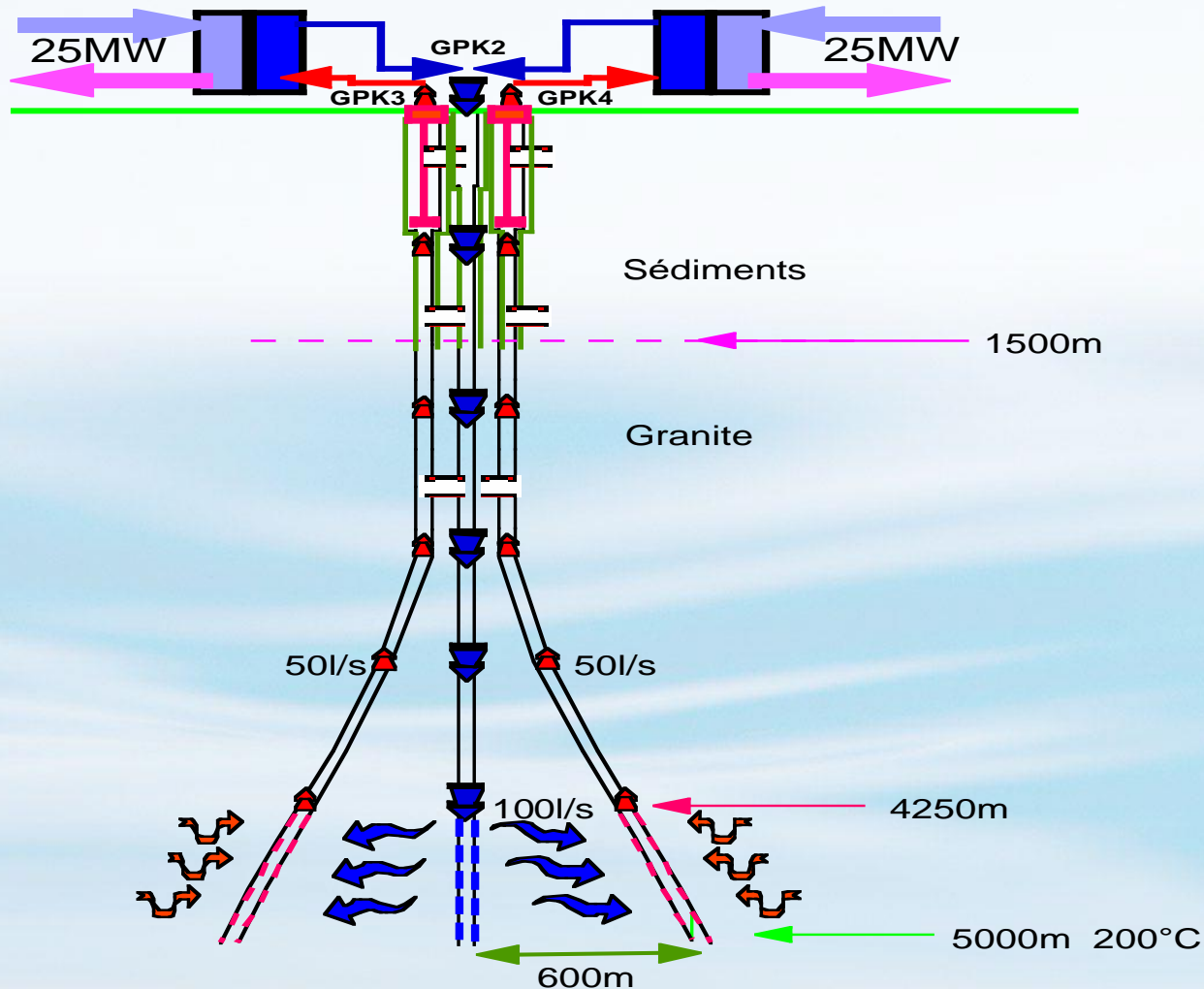


**En substitut au chauffage : 3 à 4 tep net**

**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.**

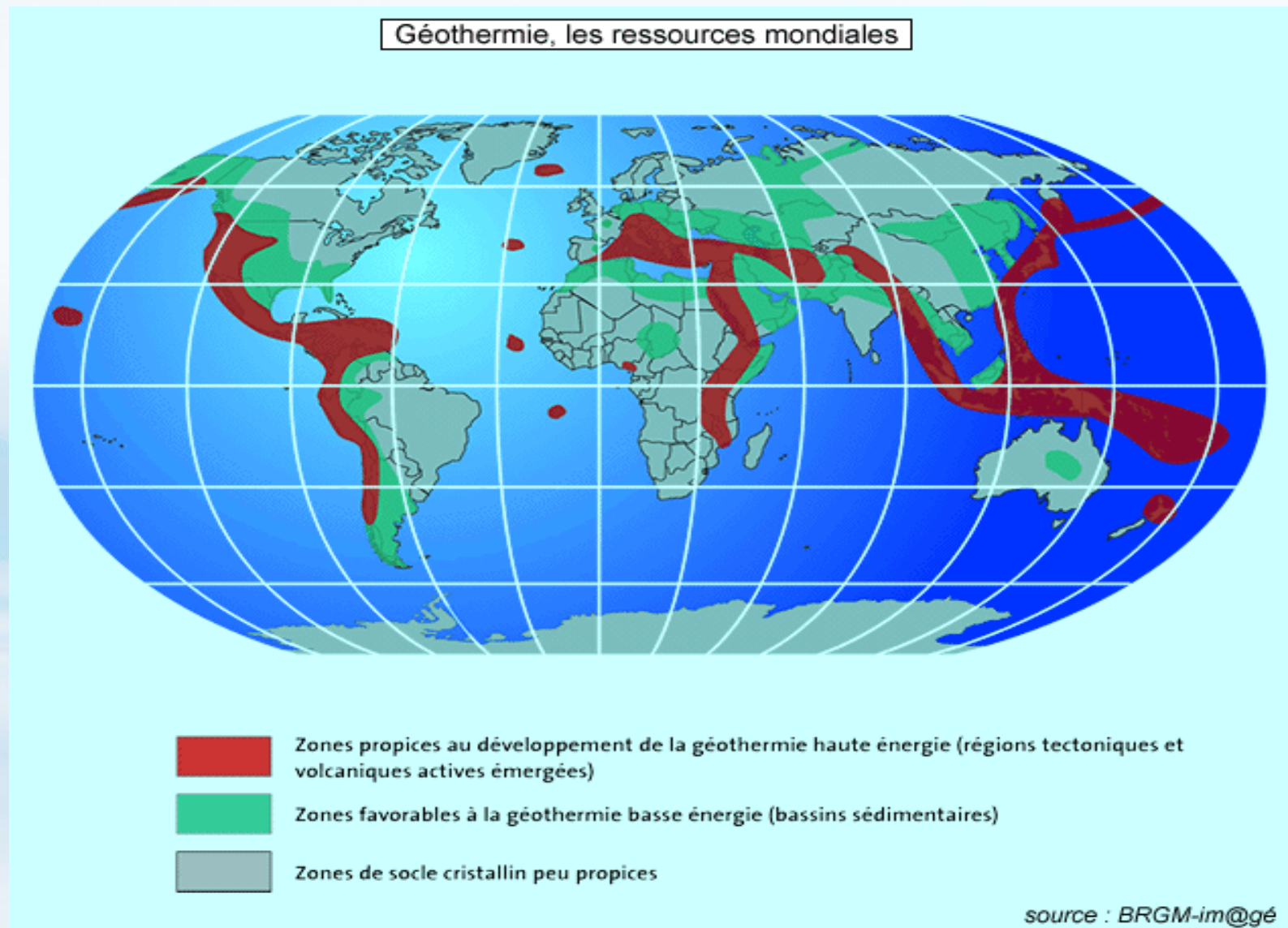
**La France = 50 M d'ha de surface métropolitaine ; consomme 70 Mt de pétrole...**

# La géothermie profonde, comment ça marche ?



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

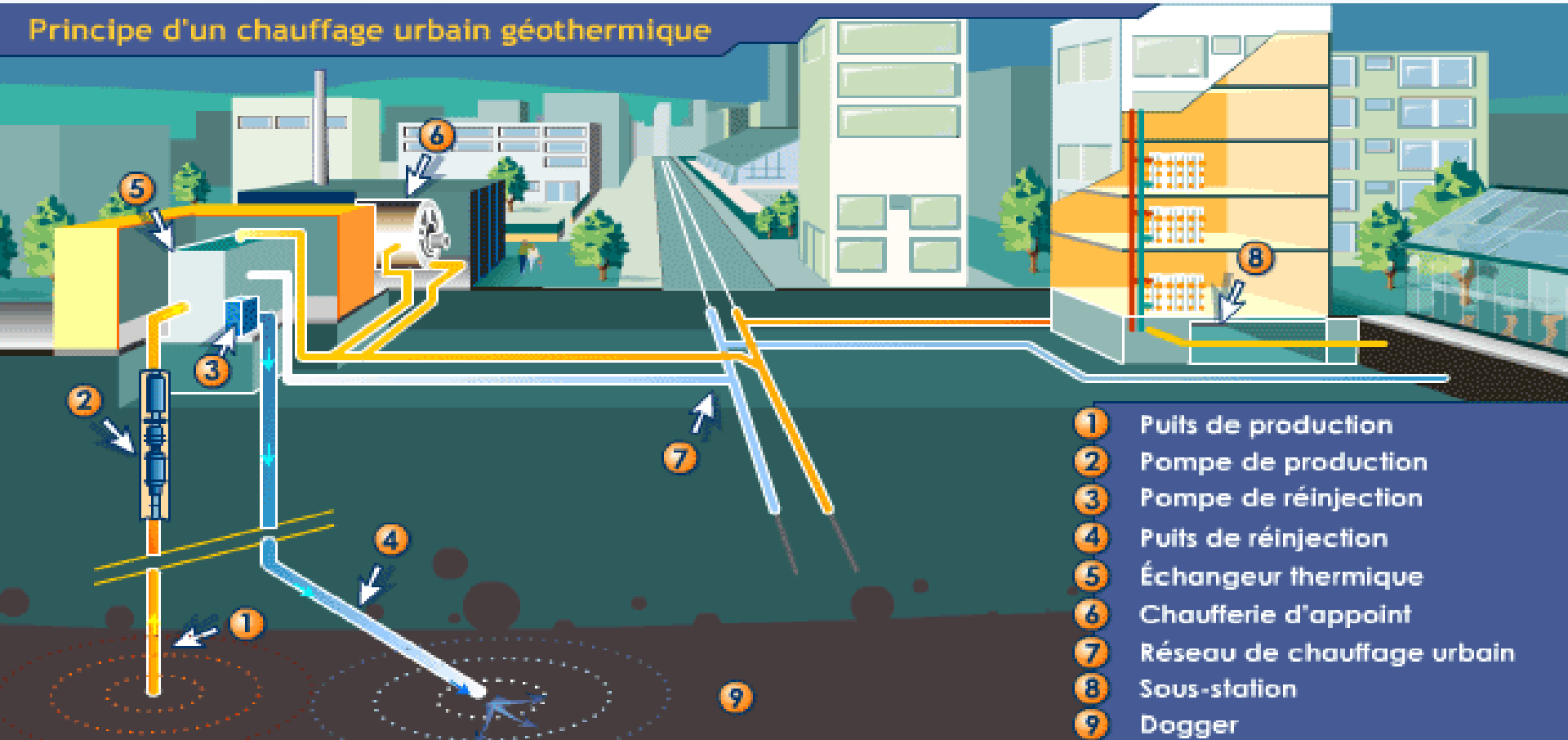
# Le chauffage par le sol, en somme



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

# La géothermie moins profonde, comment ça marche ?

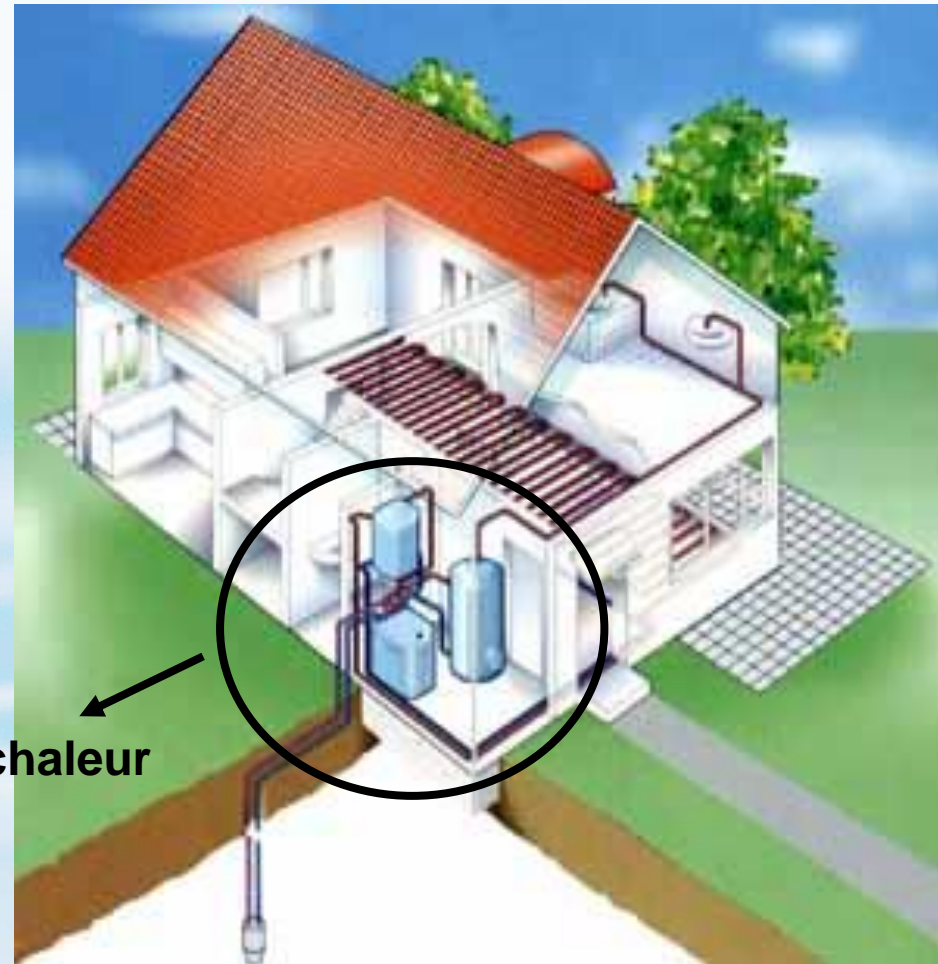
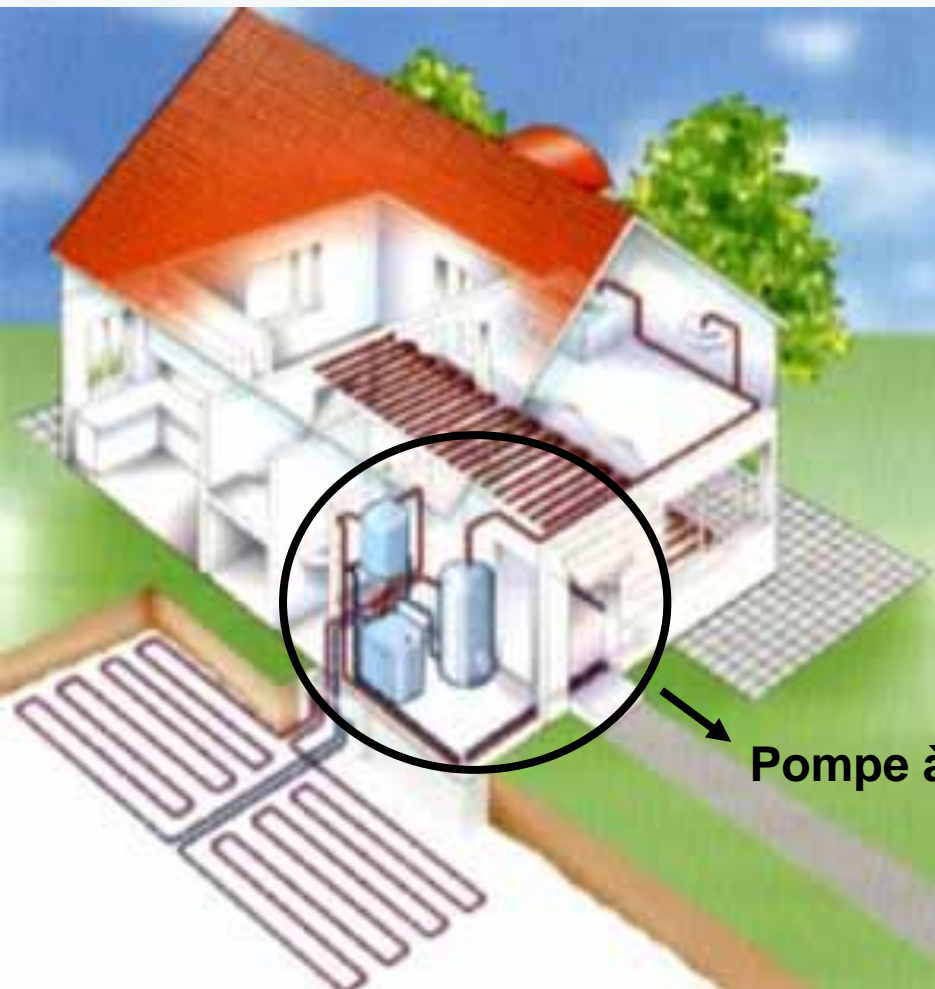
## Principe d'un chauffage urbain géothermique



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



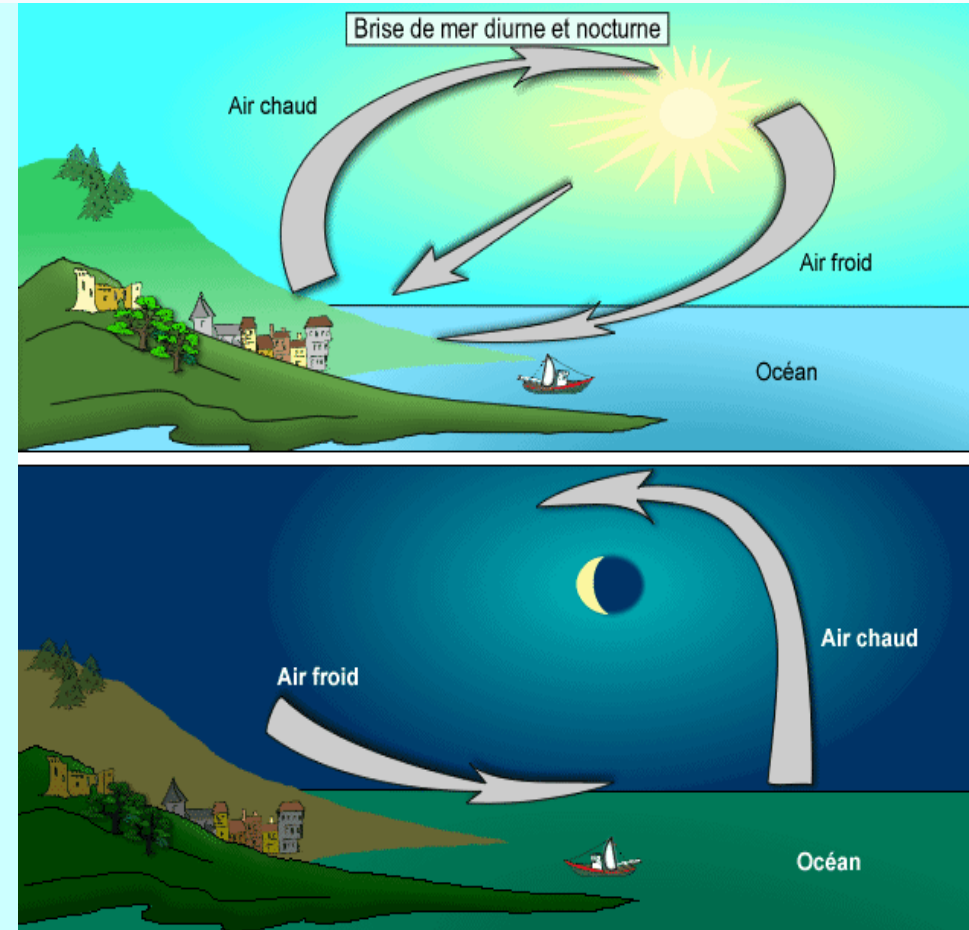
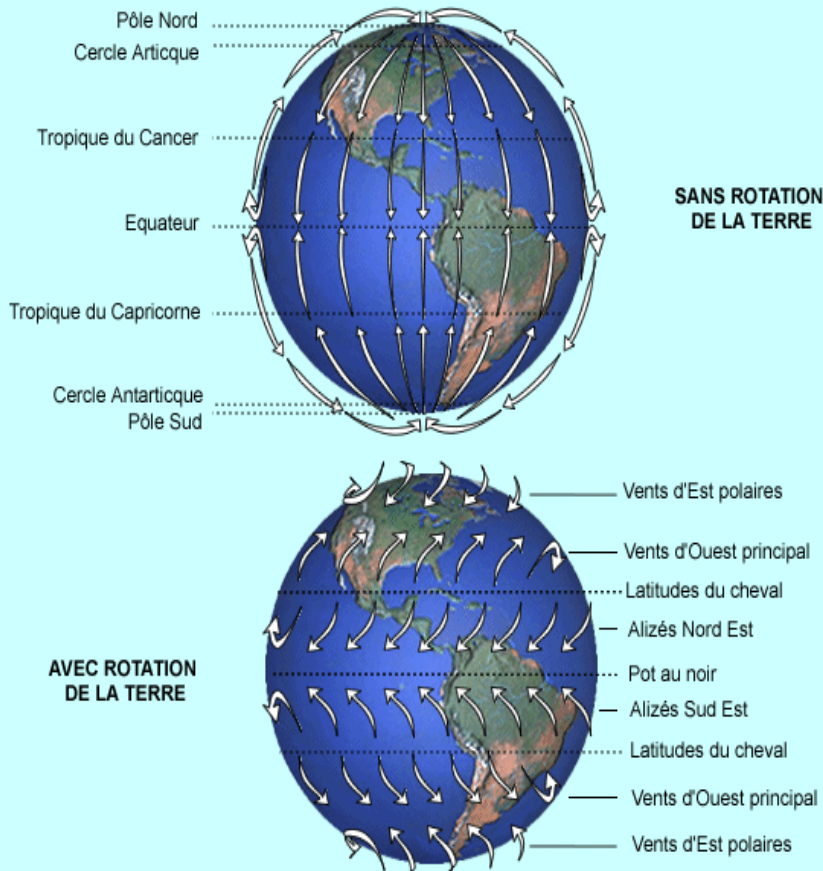
# La géothermie pas profonde du tout, comment ça marche ?



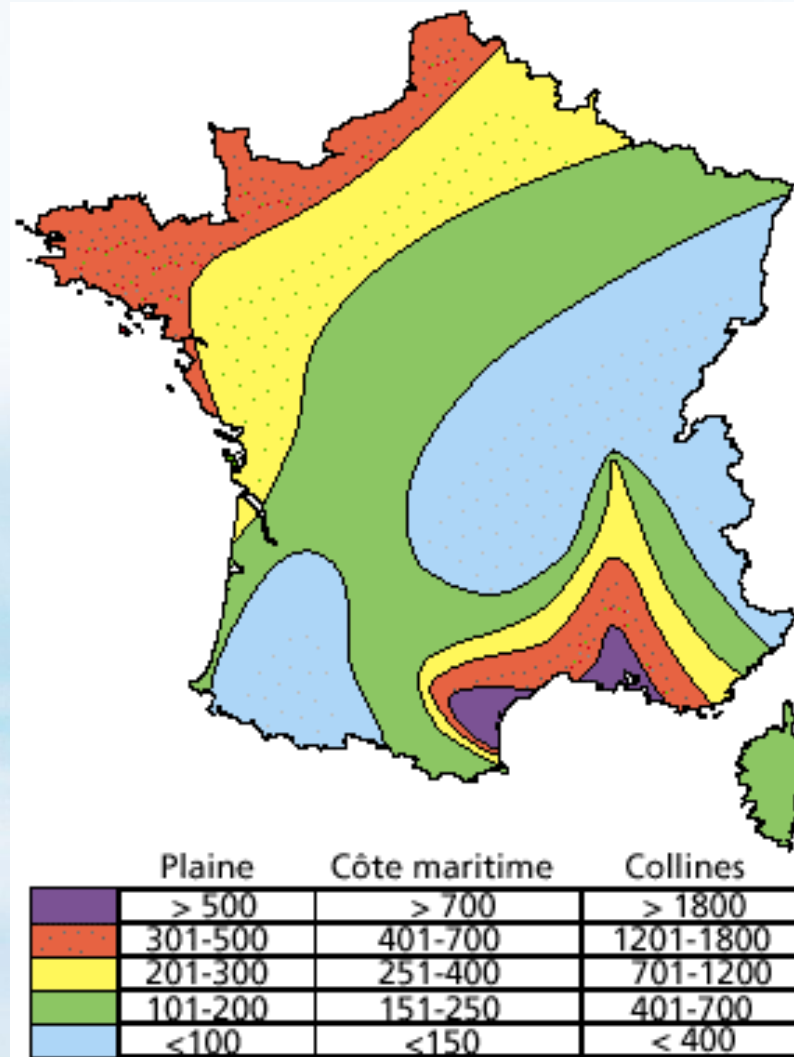
**Schéma de principe d'une installation destinée à exploiter de la chaleur pour le chauffage individuel**

# L'éolien commence par cela...

Vents théoriques sans et avec rotation de la terre



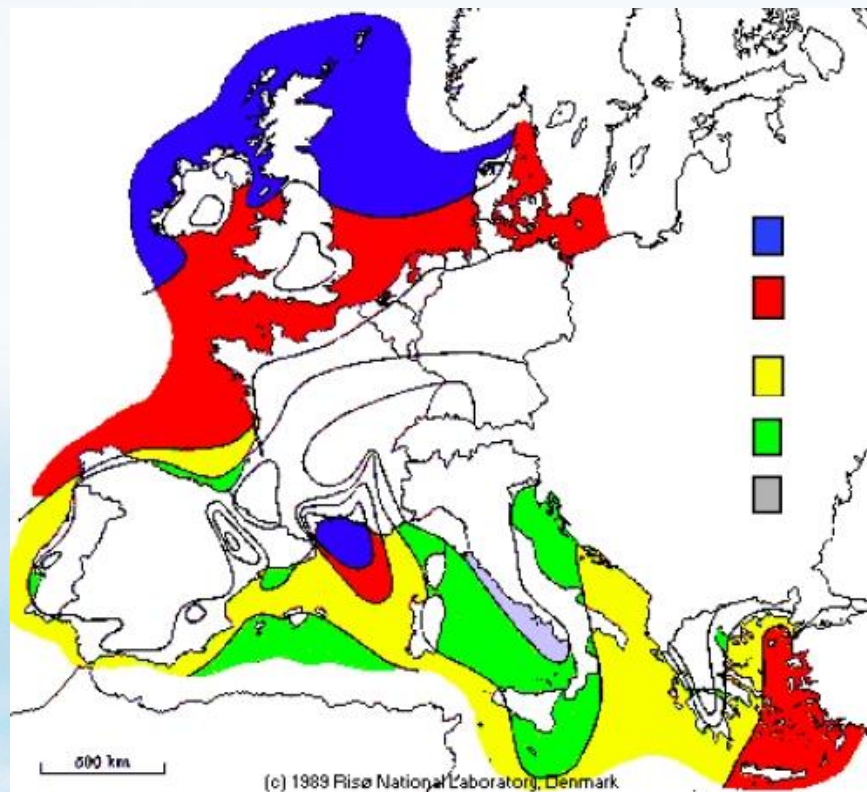
**Principales circulations atmosphériques. Energie des vents & des courants  $\approx$  25 à 30 fois la consommation d'énergie de l'humanité.**



**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**

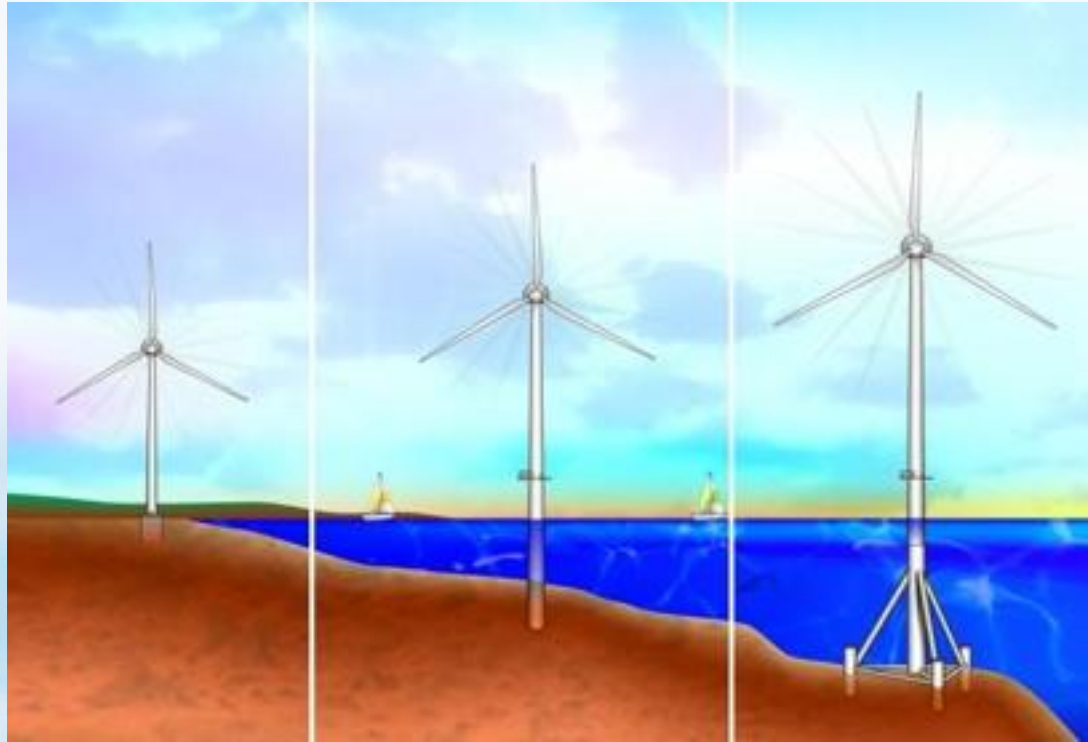


# Le vent, un caprice plus ou moins fréquent



	10 m		25 m		50 m		100 m		200 m	
	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
■	> 8	> 600	> 8,5	> 700	> 9	> 800	> 10	> 1100	> 11	> 1500
■	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
■	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
■	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
■	< 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 kW    P = 1500 kW    P = 4000 kW

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

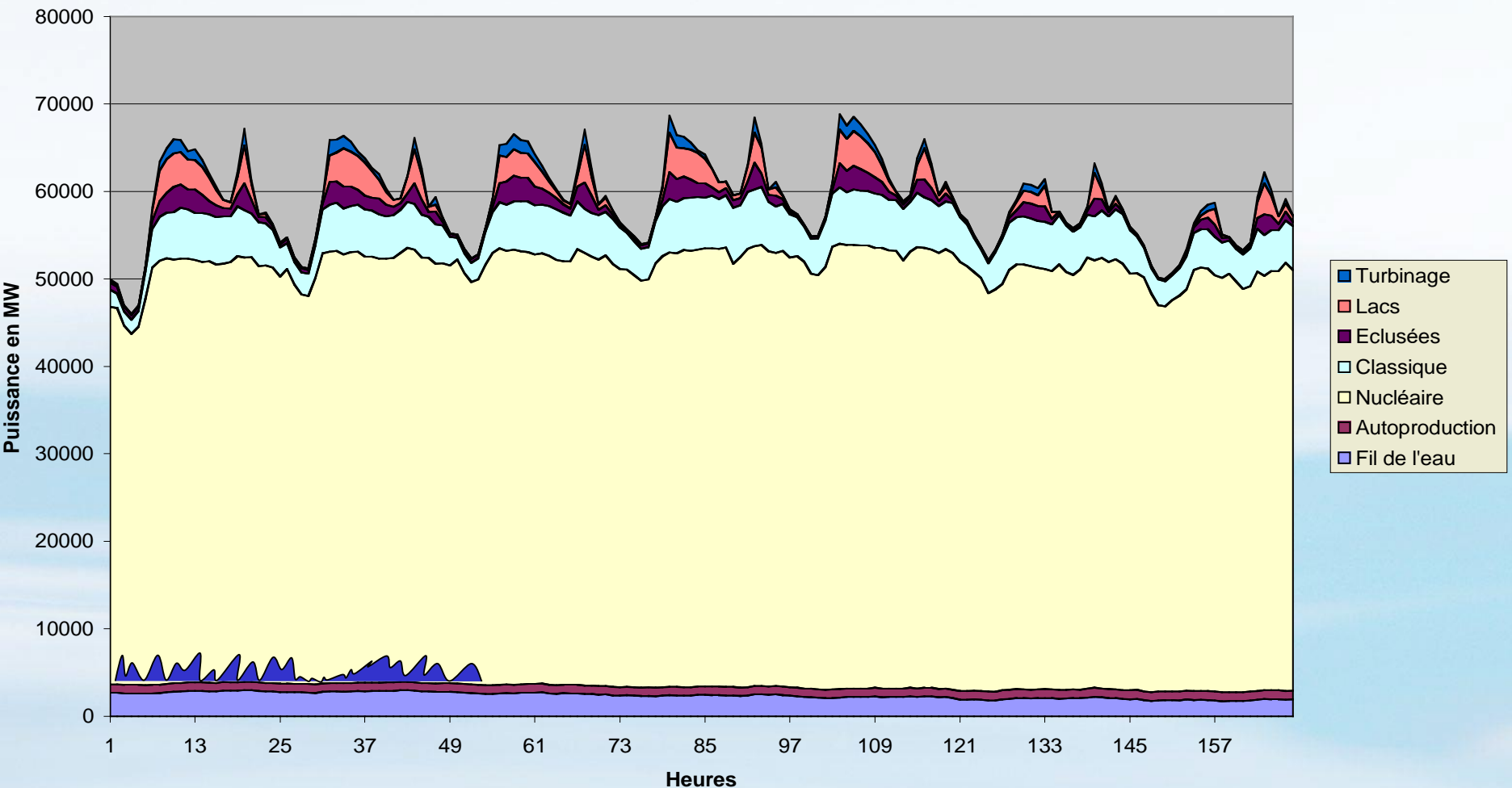
$$P = \frac{1}{2} \cdot \text{masse} \cdot \text{vitesse}^2 \div \text{temps}$$

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

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



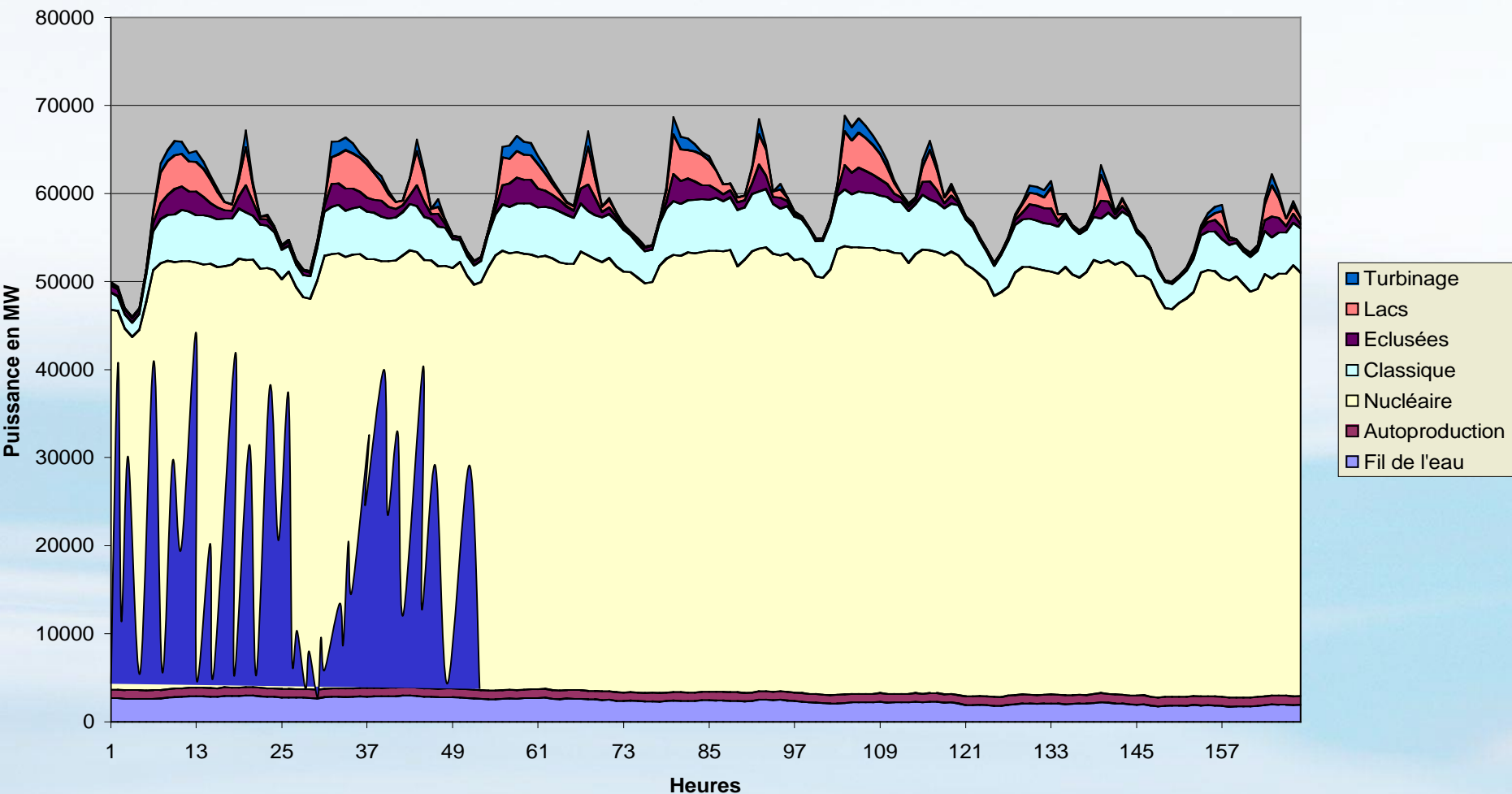
# Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



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

**Source : EDF**

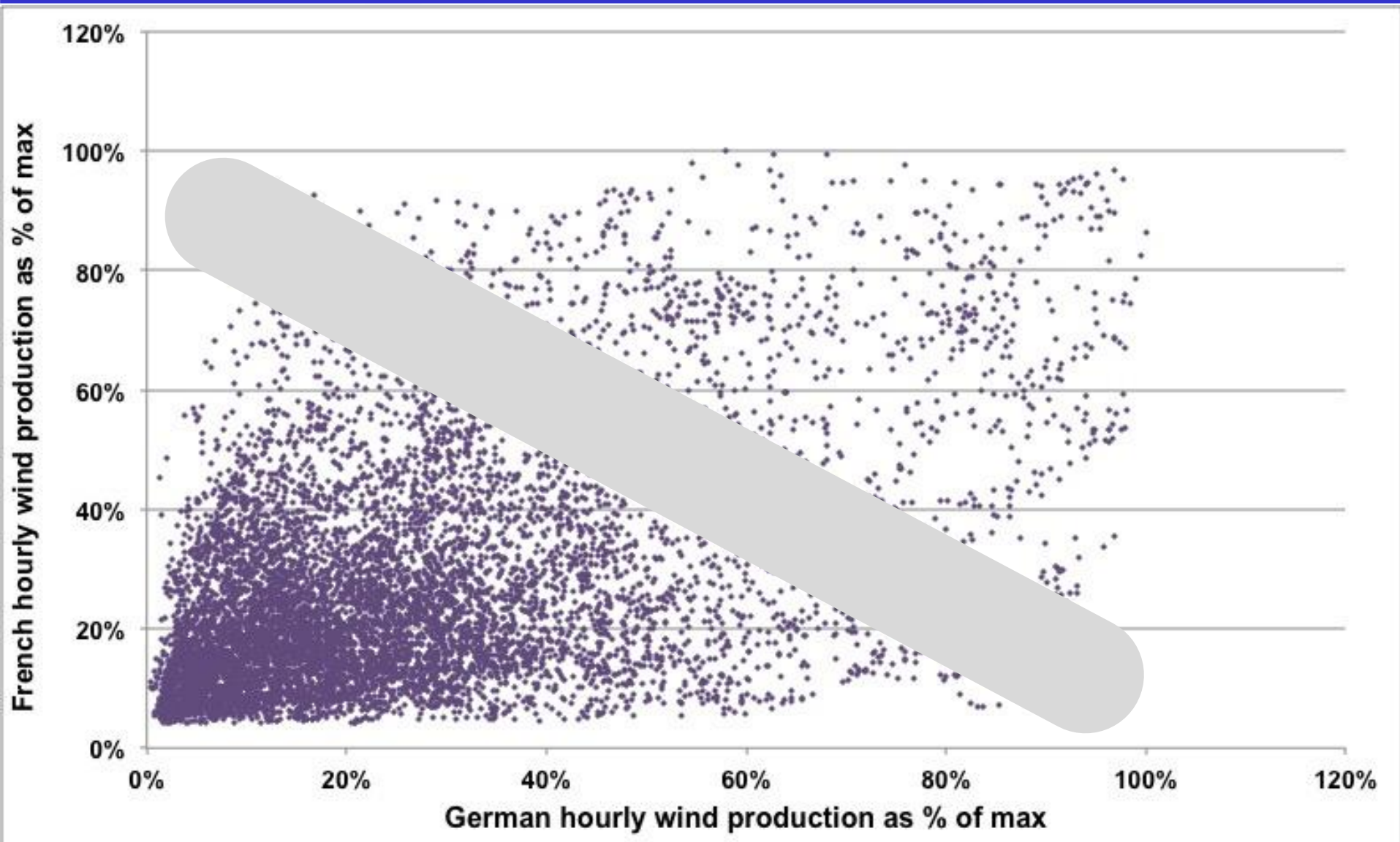
# Plus d'éolien = plus de pointe = plus de fossiles ?



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

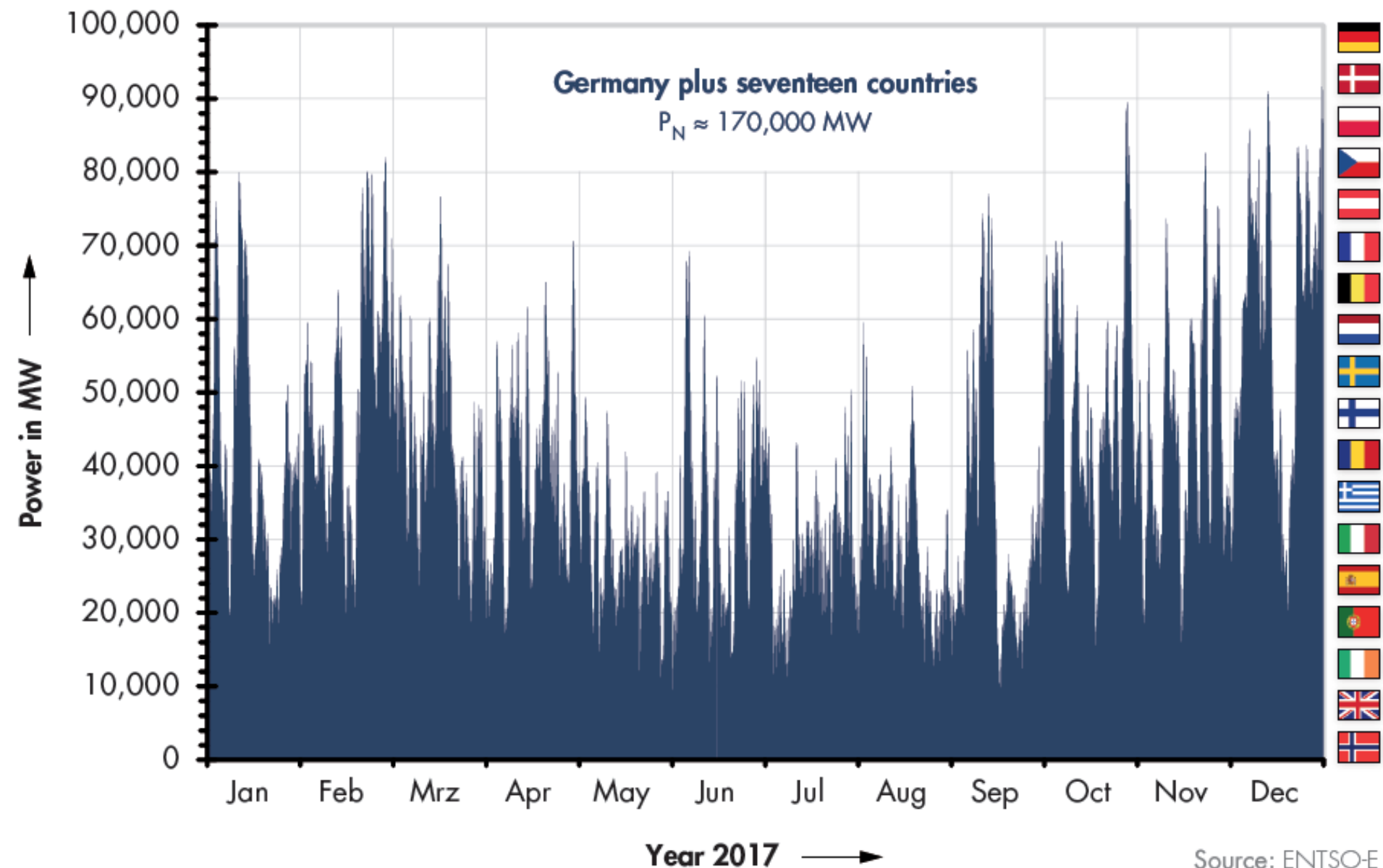
**Source : EDF**

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



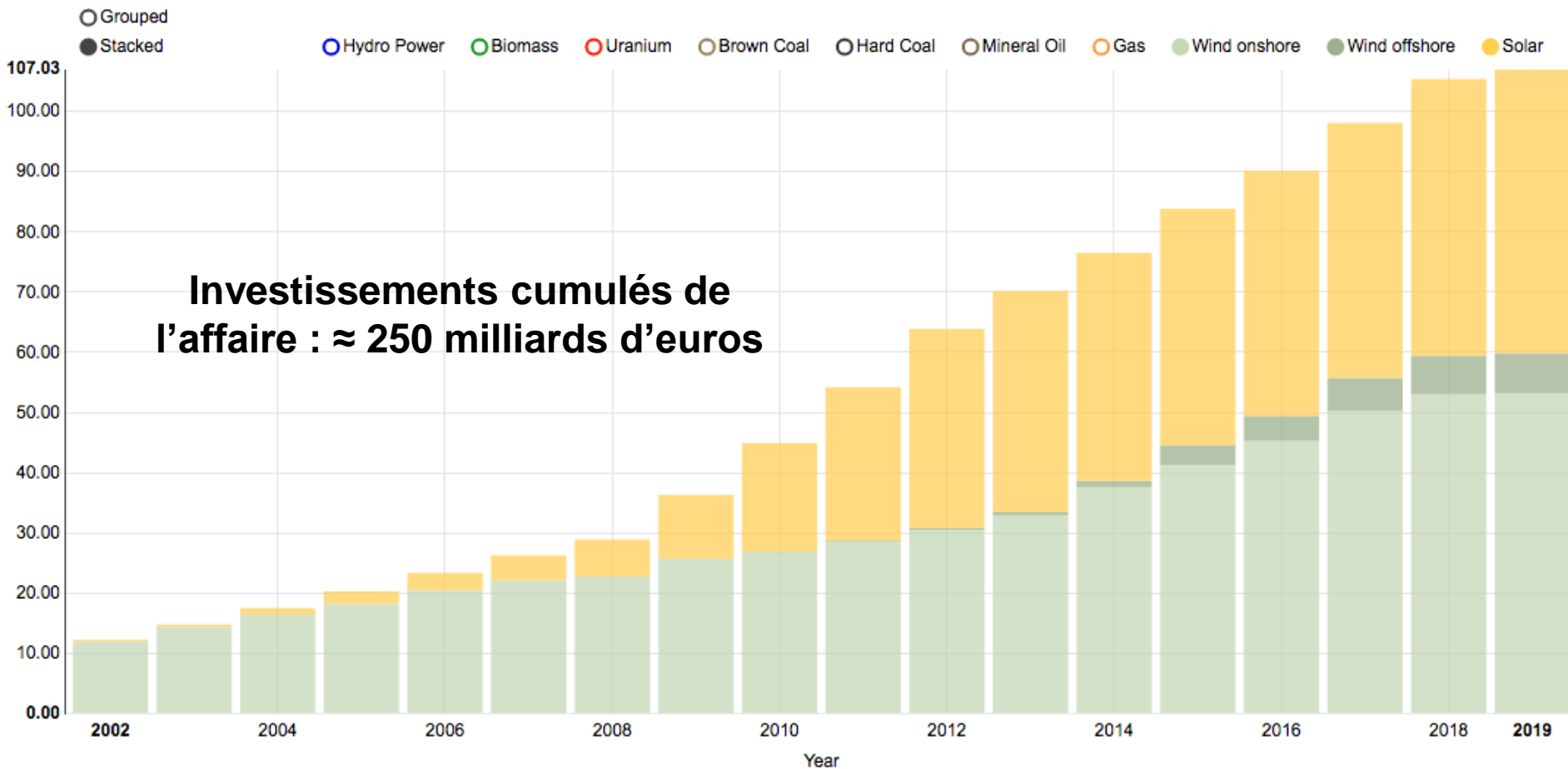
**Production éolienne en France vs production éolienne en Allemagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk**

# 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...

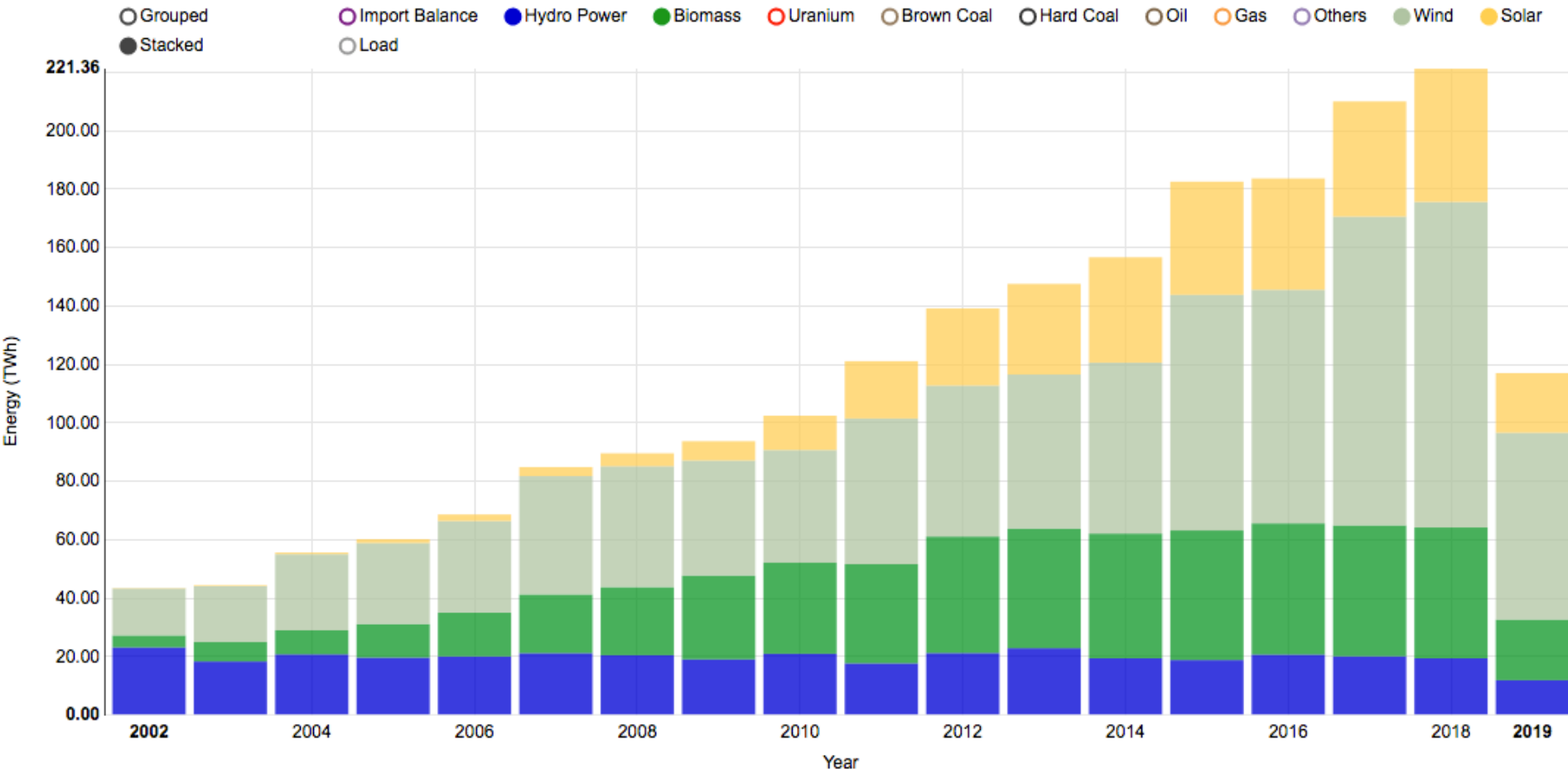


Datasource: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur

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

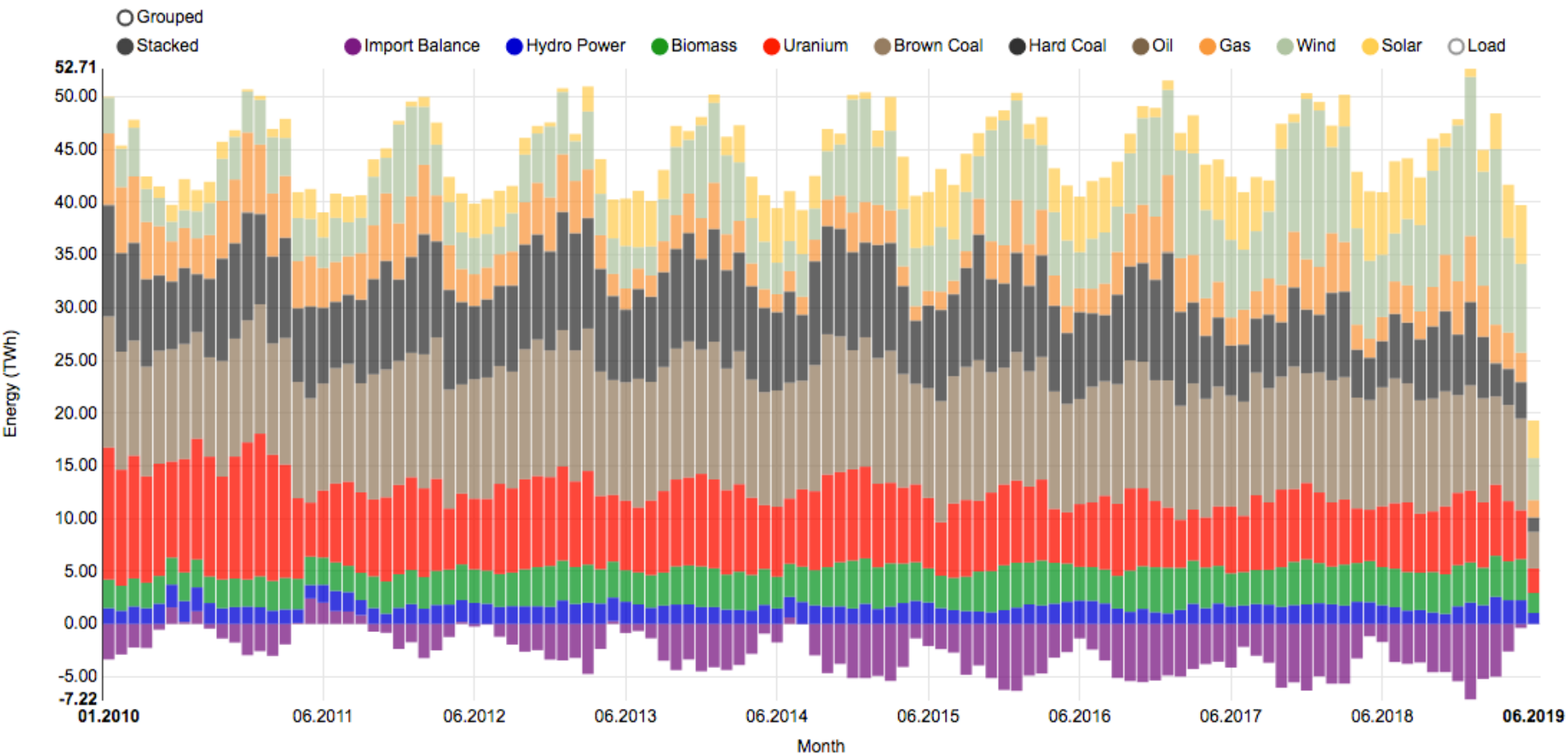


# La production aussi...



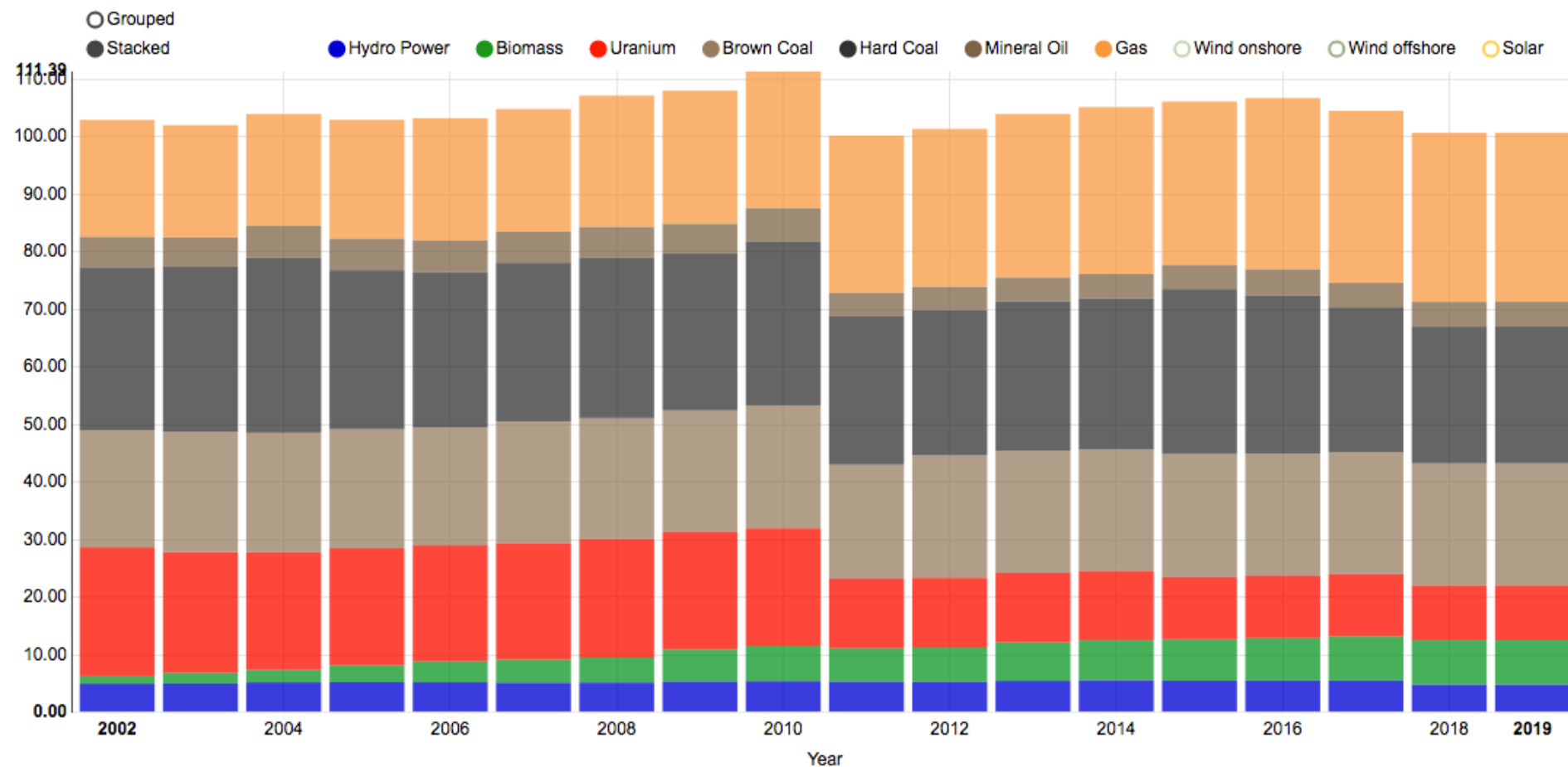
**Evolution de la production électrique renouvelable depuis 2002, en TWh**  
**Source 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX, 2019,**  
**via <https://www.energy-charts.de>**

# 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>**

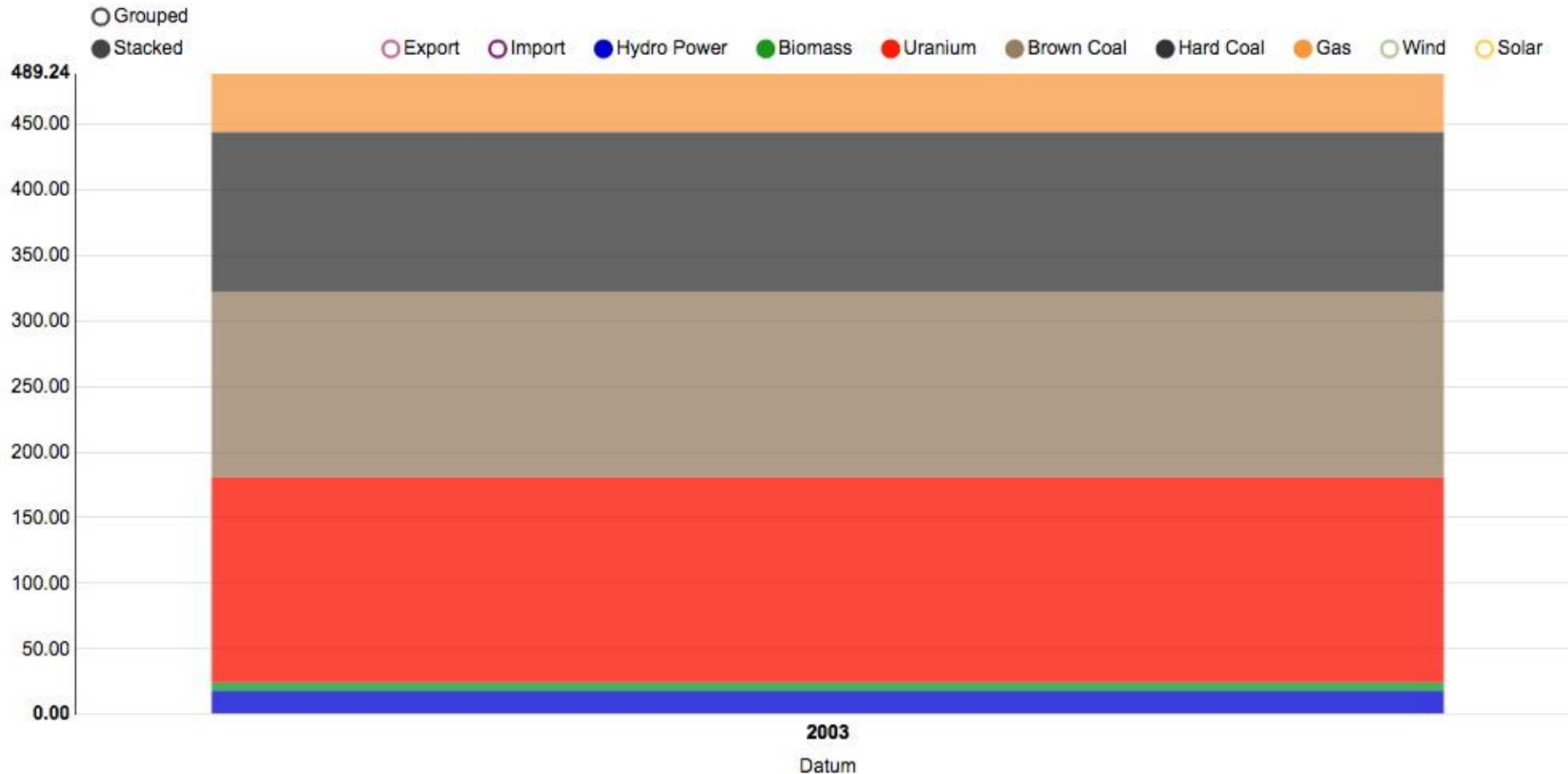
# Et donc la puissance installée en « pas ENR » baisse ?



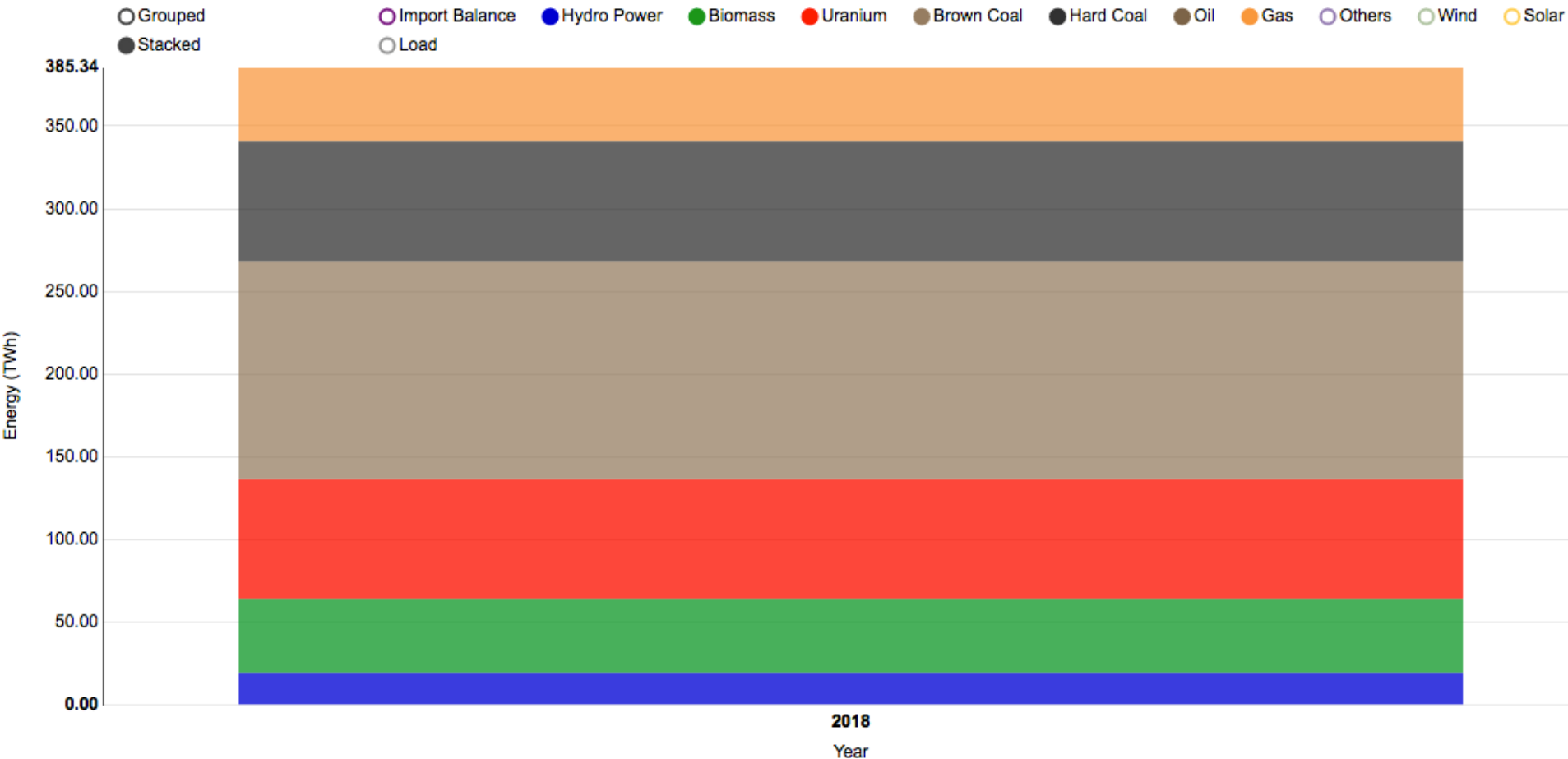
Datasource: AGEE, BMWi, Bundesnetzagentur

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

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



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



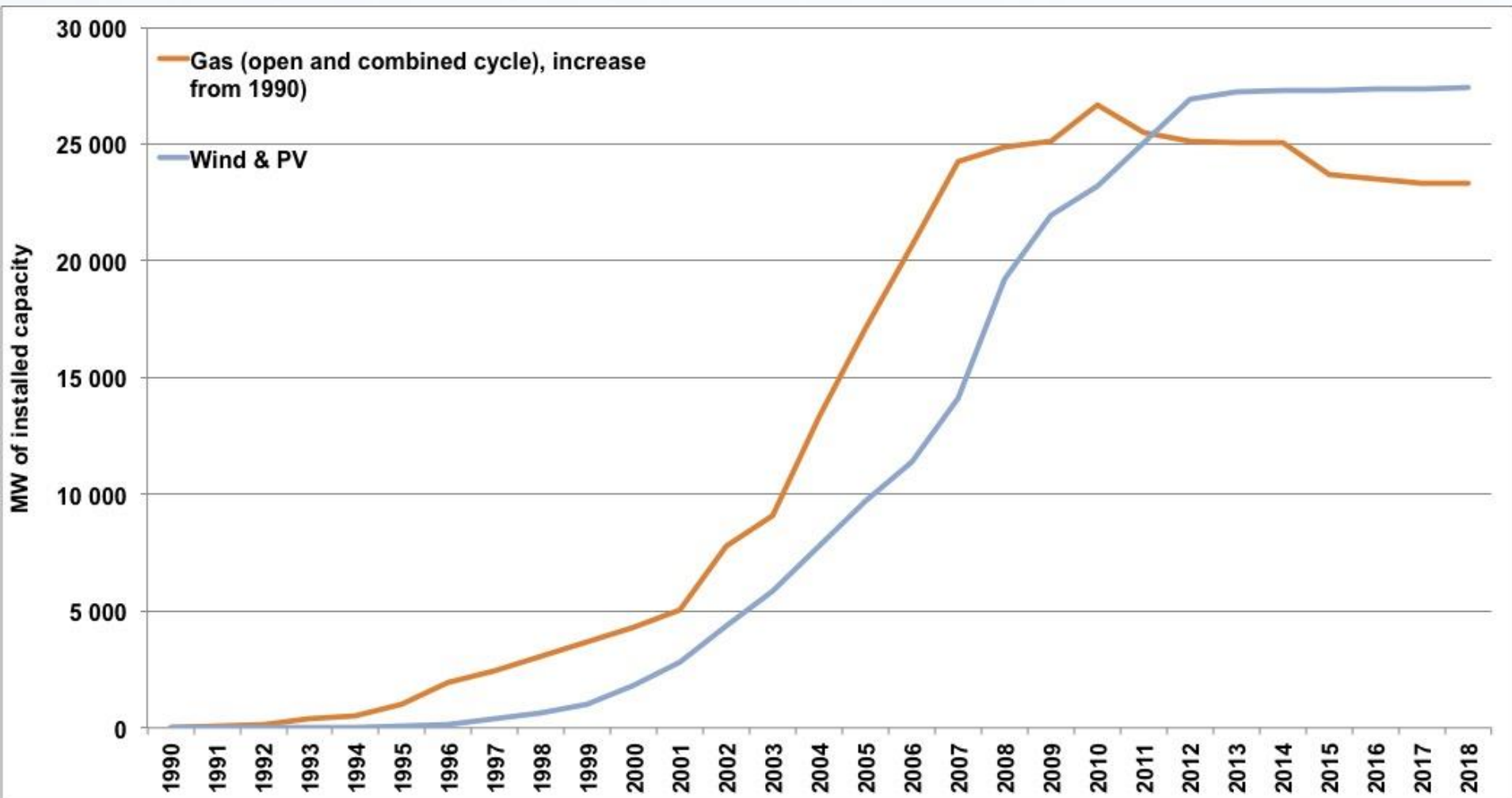
Net generation of power plants for public power supply.

Datasource: 50 Hertz, Amprion, Tennet, TransnetBW, Destatis, EEX

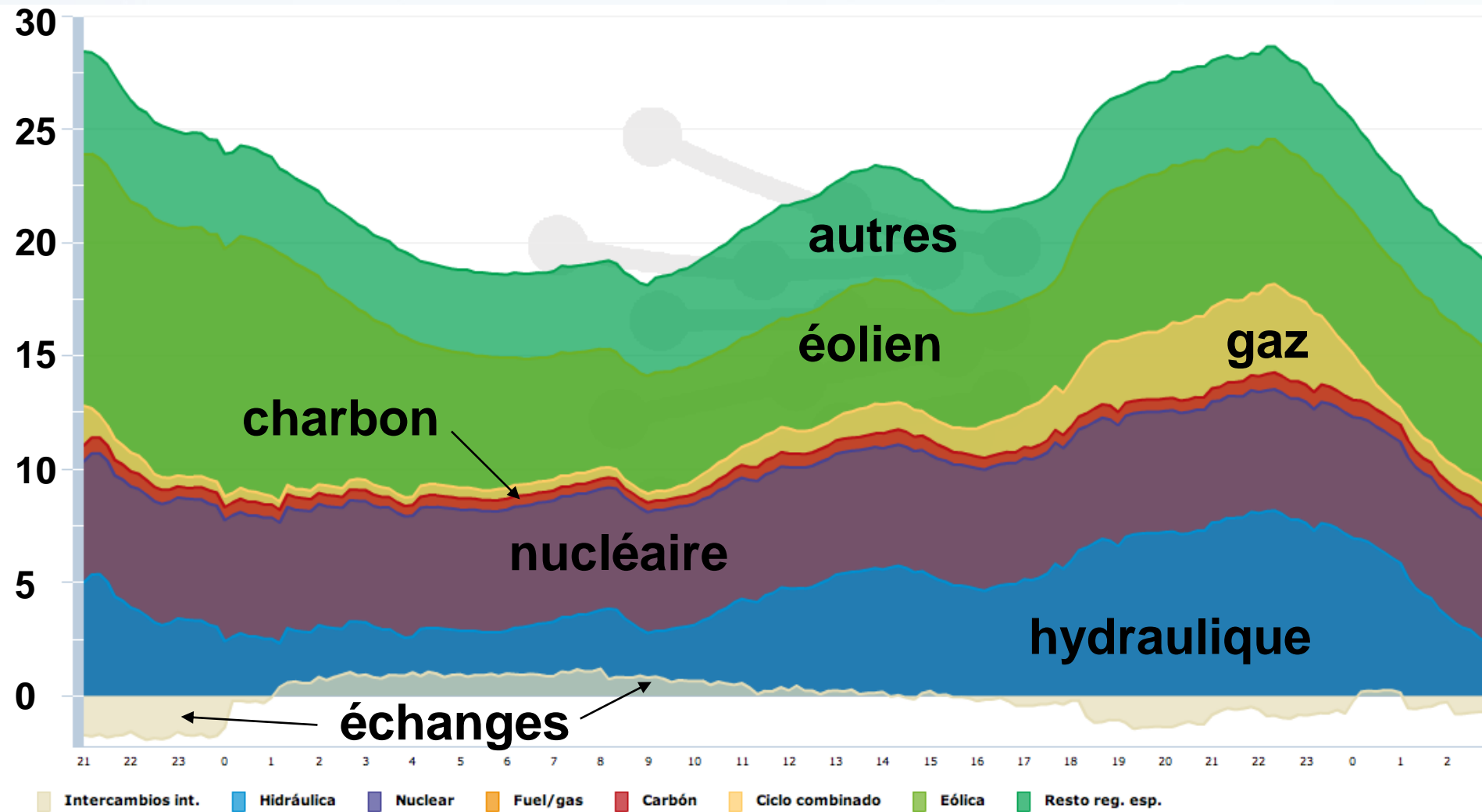
Last update: 13 Mar 2019 11:44

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

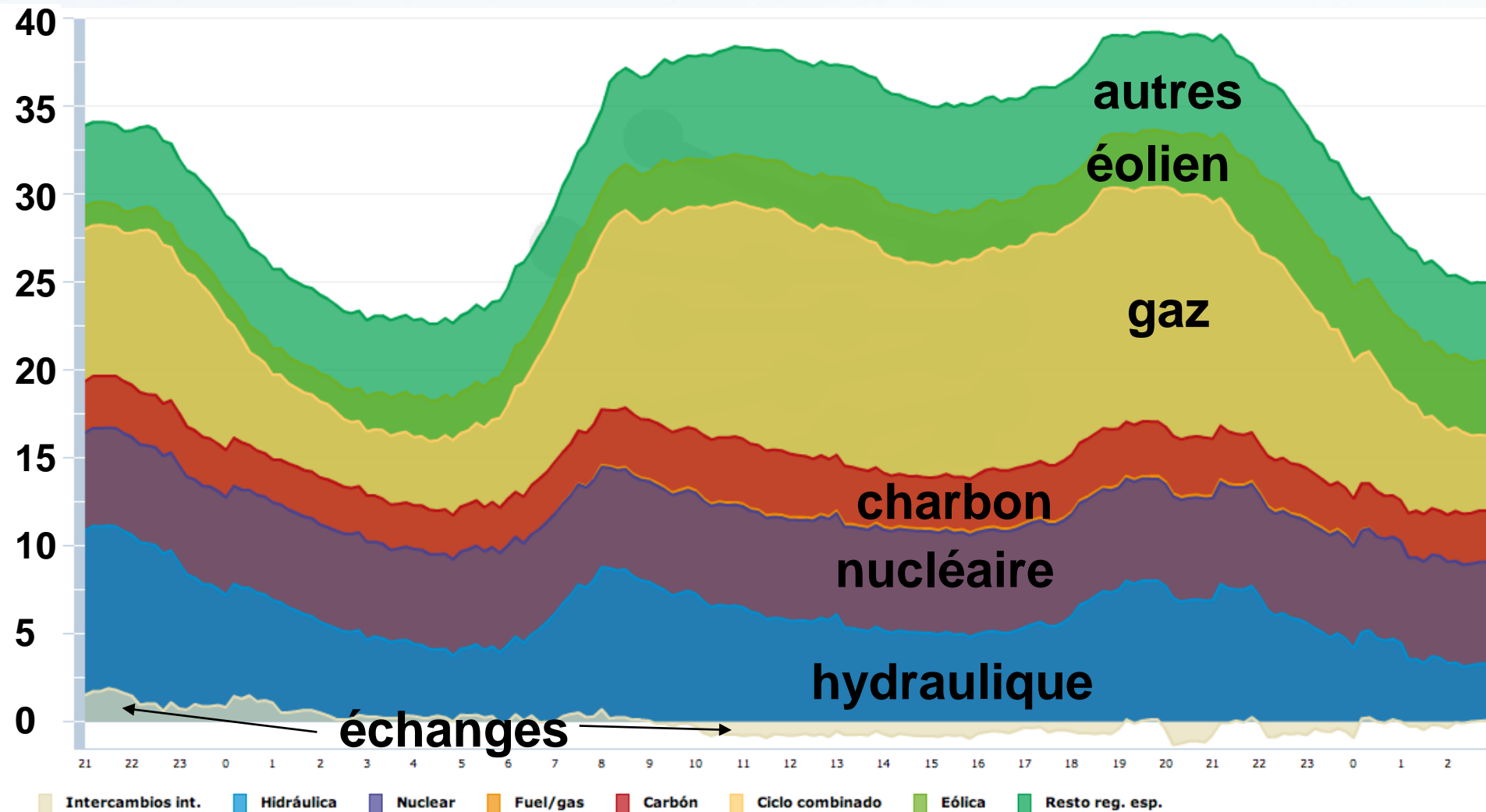




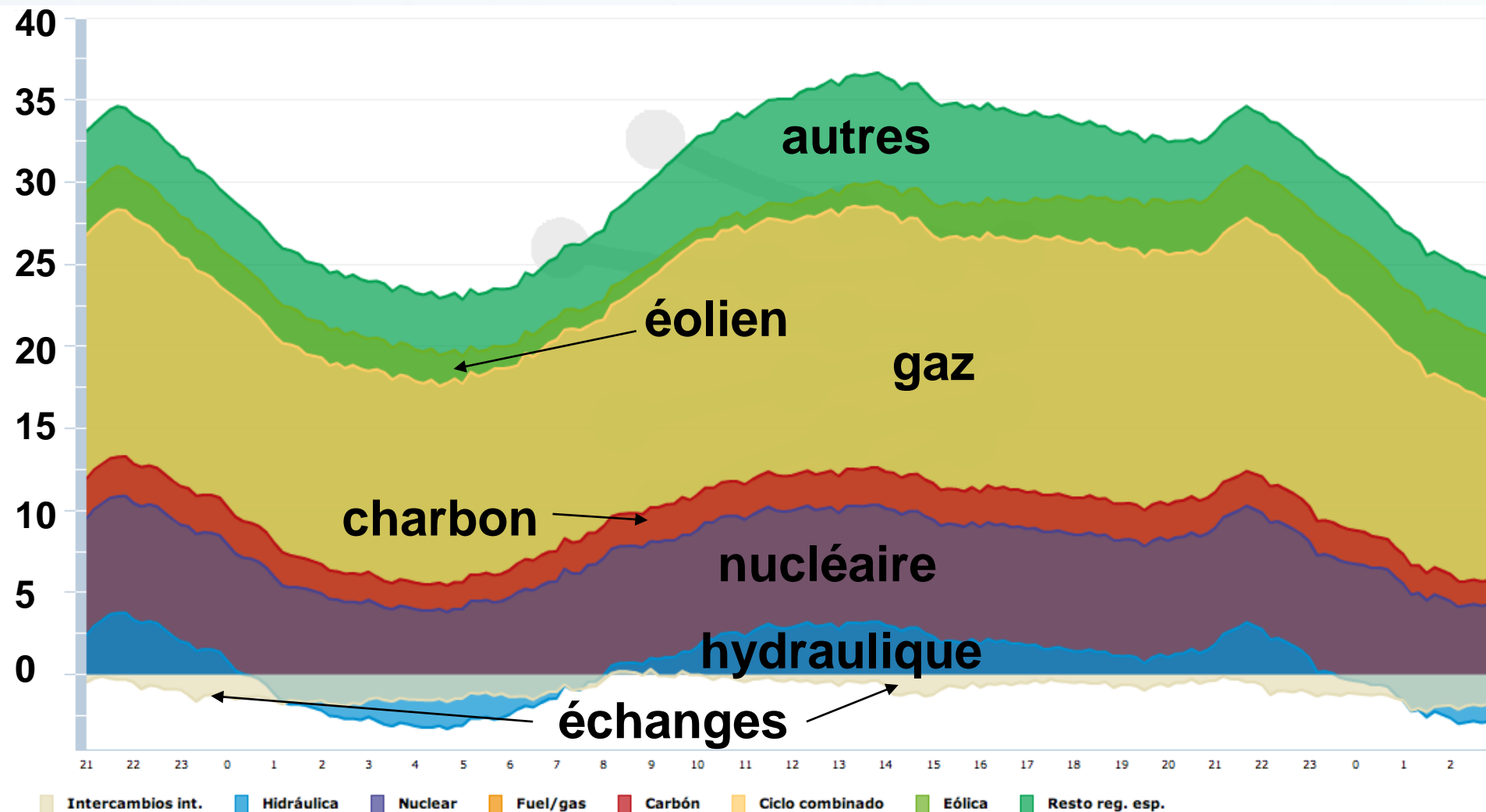
**Puissance installée en Espagne en éolien et en gaz. Données RES Electrica.**



**Production espagnole le 01 janvier 2010 (avec communiqué de presse !) -  
source [https://demanda.ree.es/generacion\\_acumulada.html](https://demanda.ree.es/generacion_acumulada.html)**

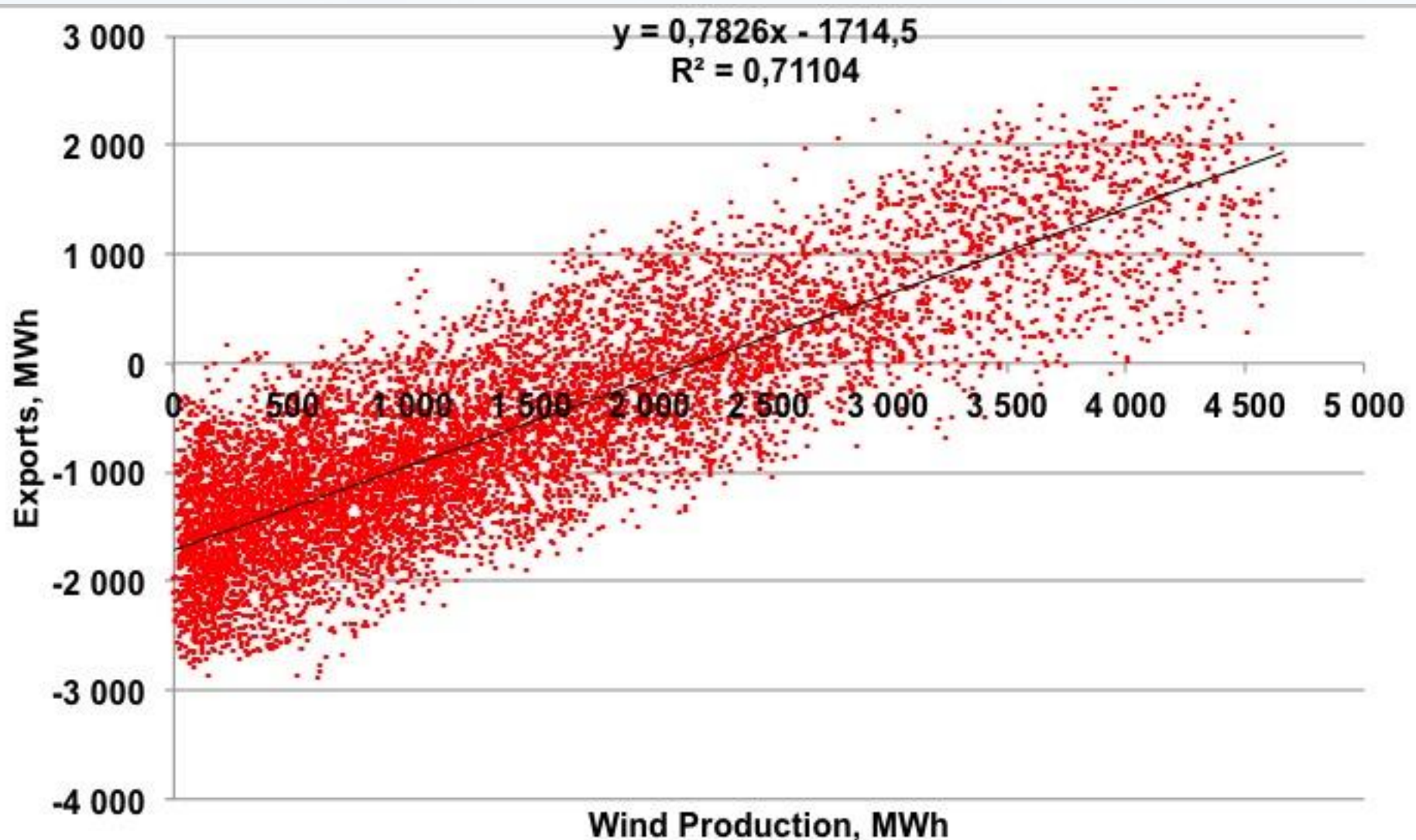


Production espagnole le 18 janvier 2010 (sans communiqué de presse...) -  
source [https://demanda.ree.es/generacion\\_acumulada.html](https://demanda.ree.es/generacion_acumulada.html)



Production espagnole le 19 août 2009 - source  
[https://demanda.ree.es/generacion\\_acumulada.html](https://demanda.ree.es/generacion_acumulada.html)

# Et avec ça, que donne le résultat ?

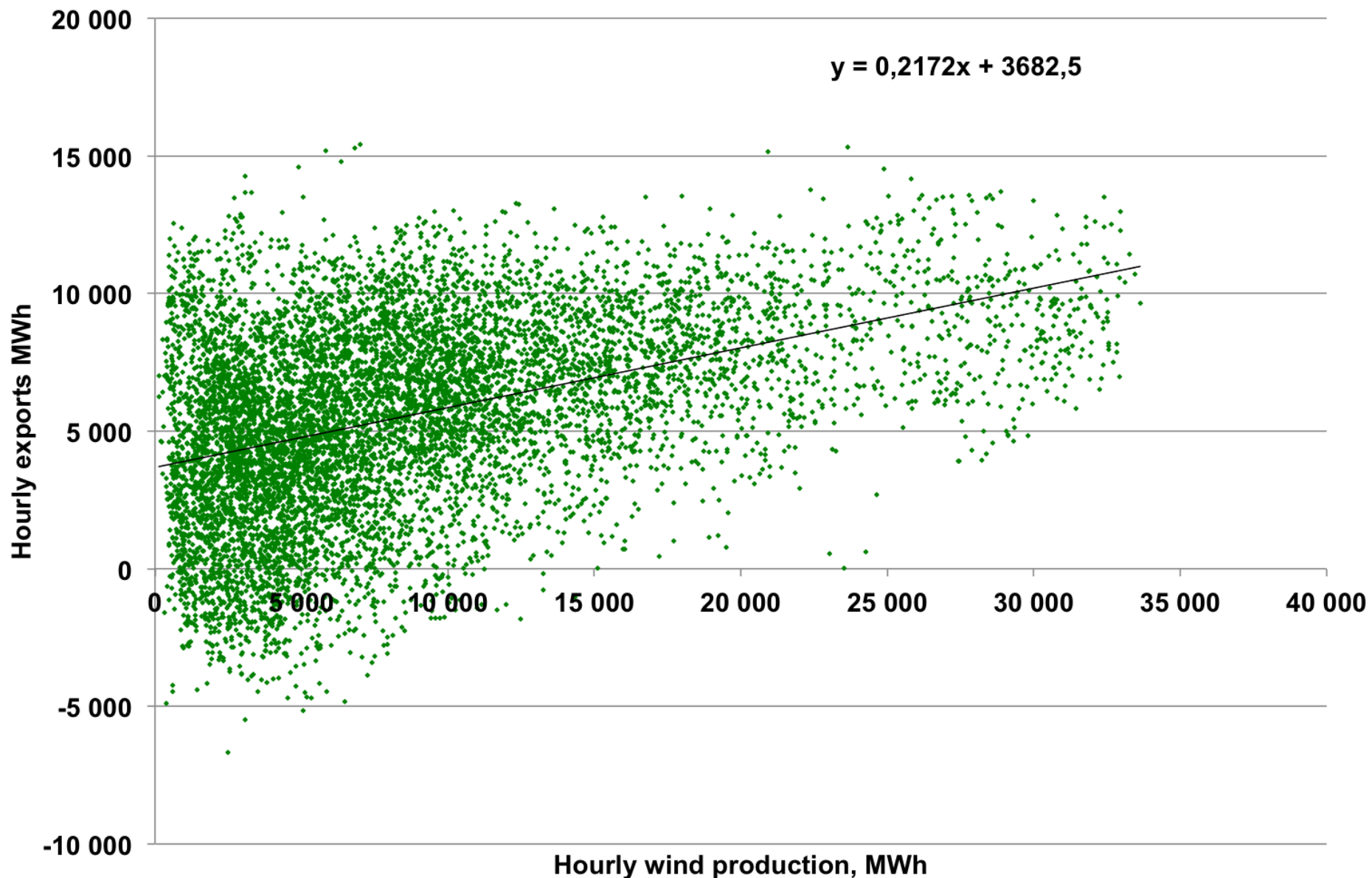


**Production éolienne horaire vs exportations horaires au Danemark en 2016.**

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

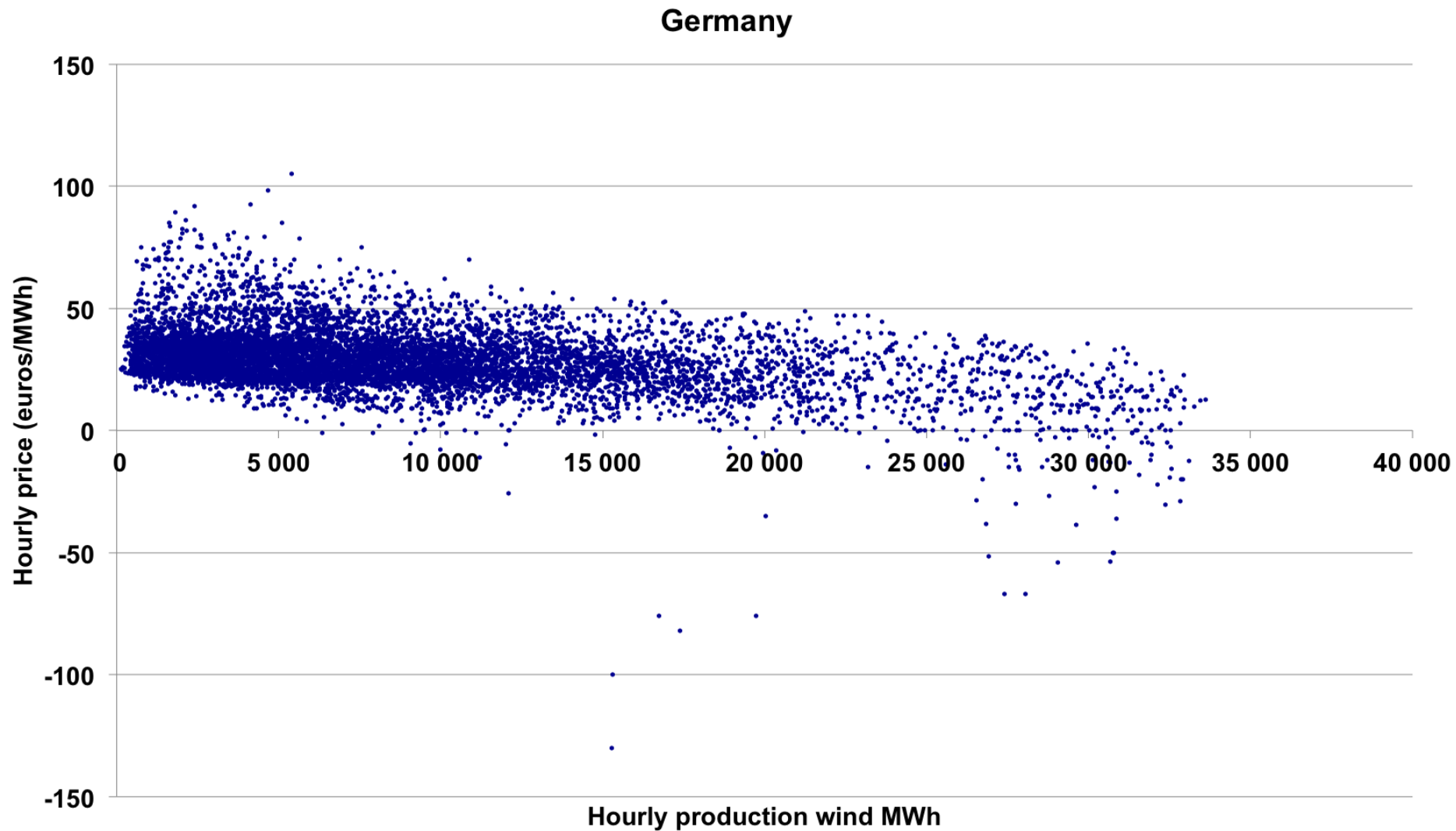


# Qui consomme vraiment les électrons éoliens allemands ?



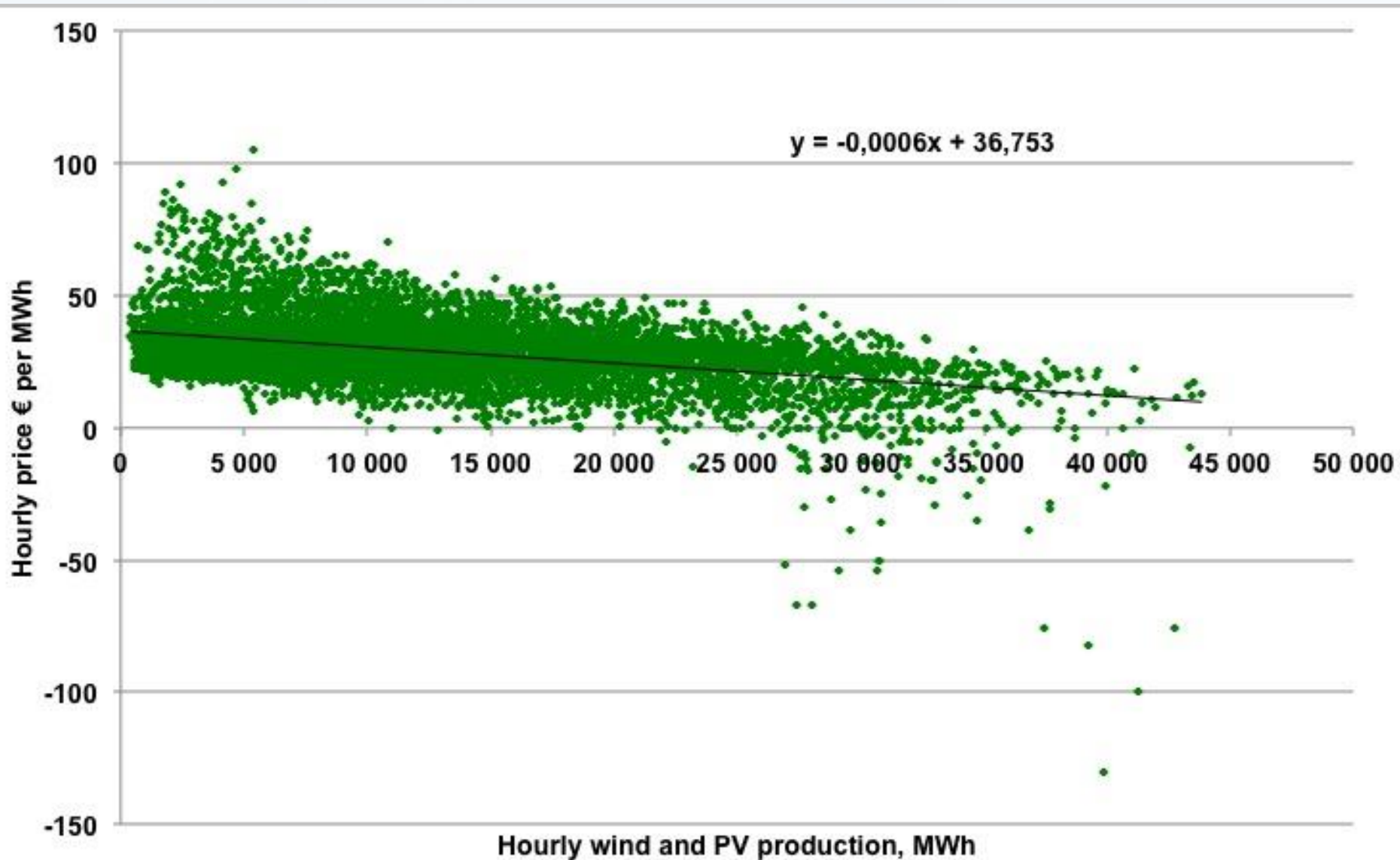
**Production éolienne horaire vs exportations horaires en Allemagne. Données ENTSOE**

# Le prix de marché ? Il dépend... du sens du vent !



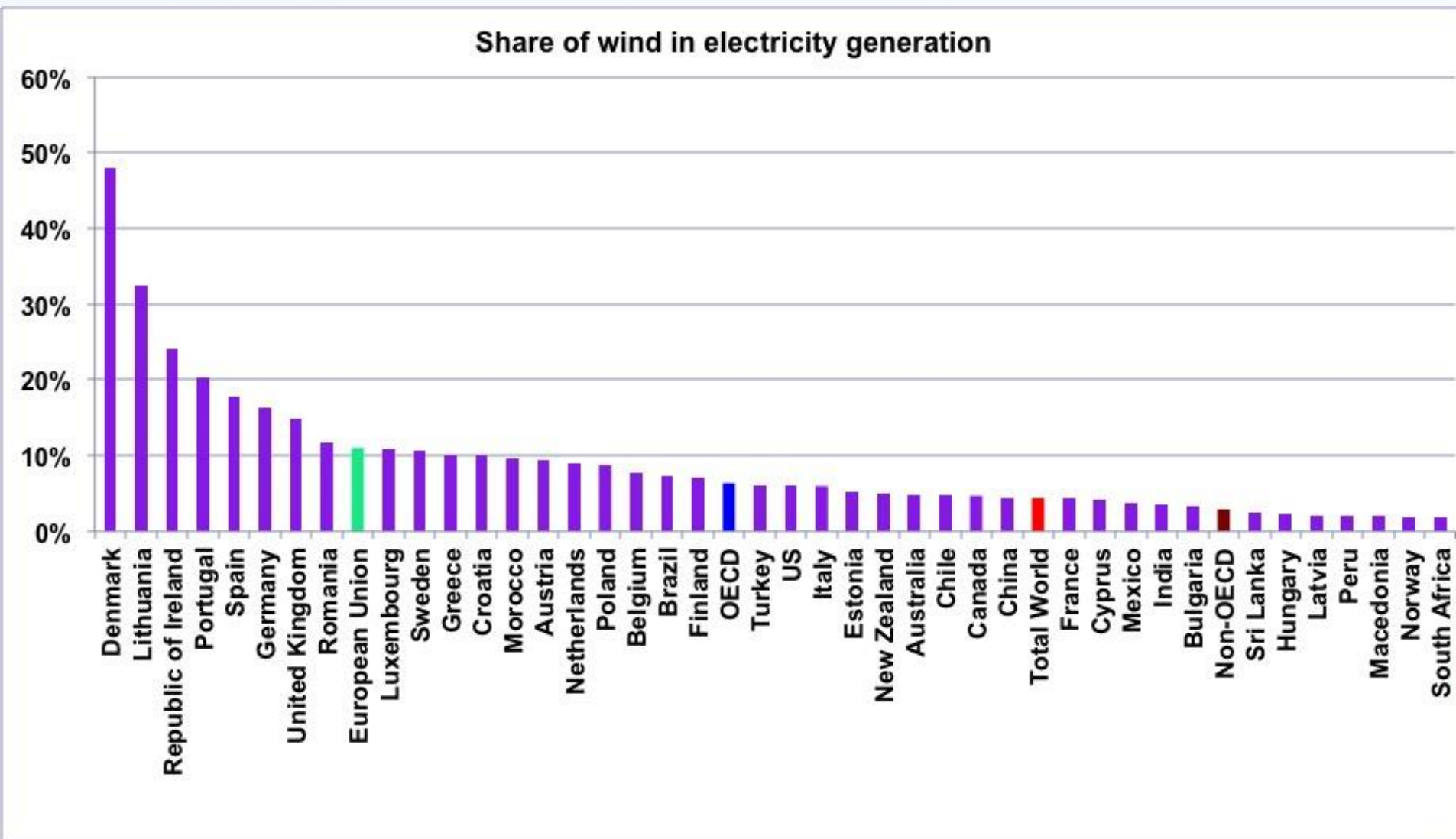
**Production éolienne vs prix de marché en Allemagne en 2016, heure par heure.  
Donnes ENTSOE via pfbach.dk**

# Le prix de marché ? Il dépend... du sens du vent !



**Production éolienne + solaire vs prix de marché en Allemagne en 2016, heure par heure. Données ENTSOE via pfbach.dk**

# Et avec ça, que donne le résultat ?



Part de l'éolien dans la production électrique par pays en 2017

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 minerais 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

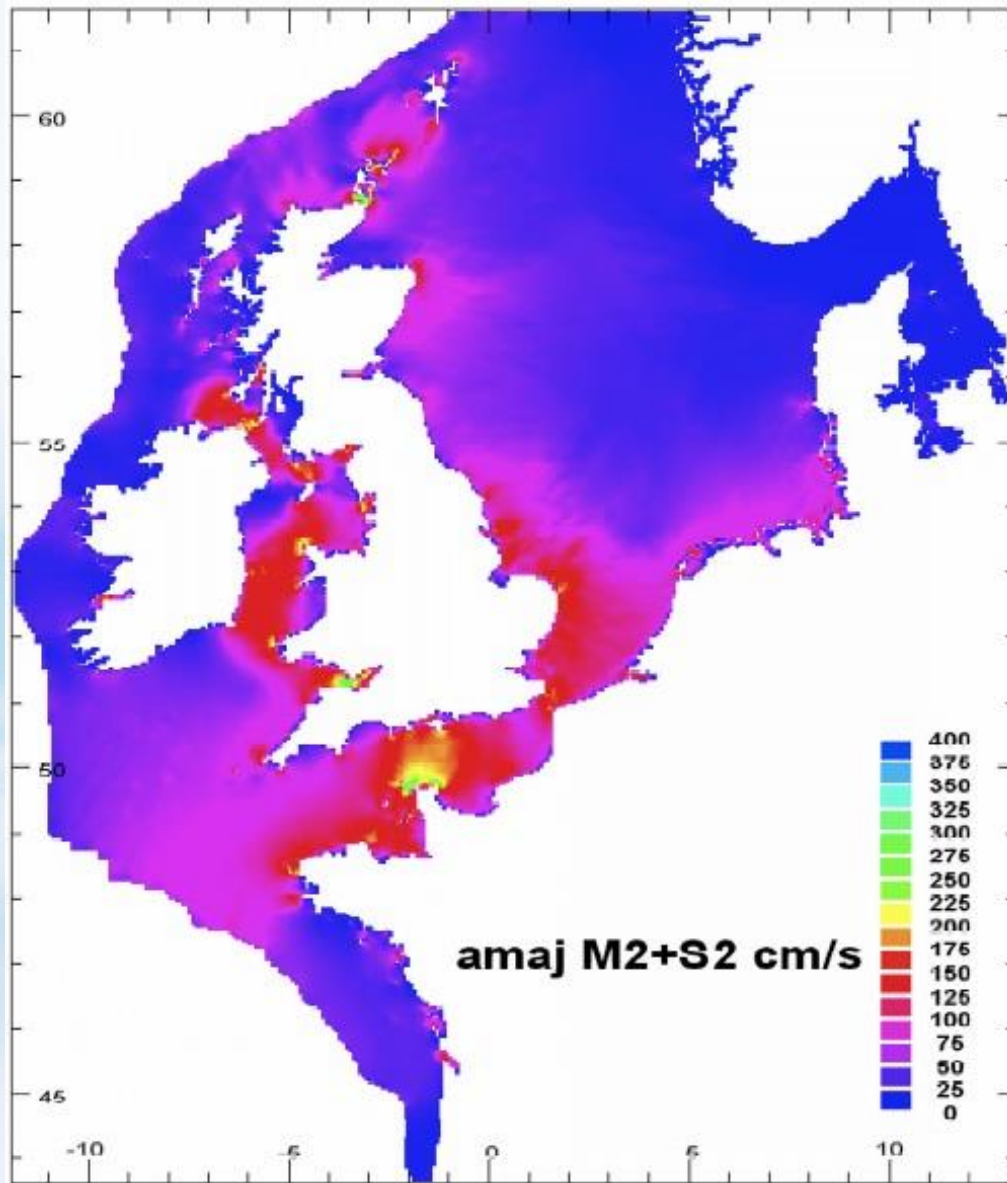
## 100% Eolien

Facteur de charge	≈ 70%	$\xrightarrow{\times 3-4}$	≈ 20%
Durée de vie	60 ans	$\xrightarrow{\times 2-3}$	20 à 30 ans
Réseau	≈ 0	$\xrightarrow{\times 1,5-2}$	≈ 0,5 à 1 fois cout éolienne
Stockage intersaisonnier	10%	$\xrightarrow{\times 2}$	50%-60%
Cout au kW installé	3-5.000 €	$\xrightarrow{\div 2-3}$	1.500 € (sauf offshore)
Total invest./kWh		≈ $\times 10-20$	



**Un exemple d'hydrolienne**

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

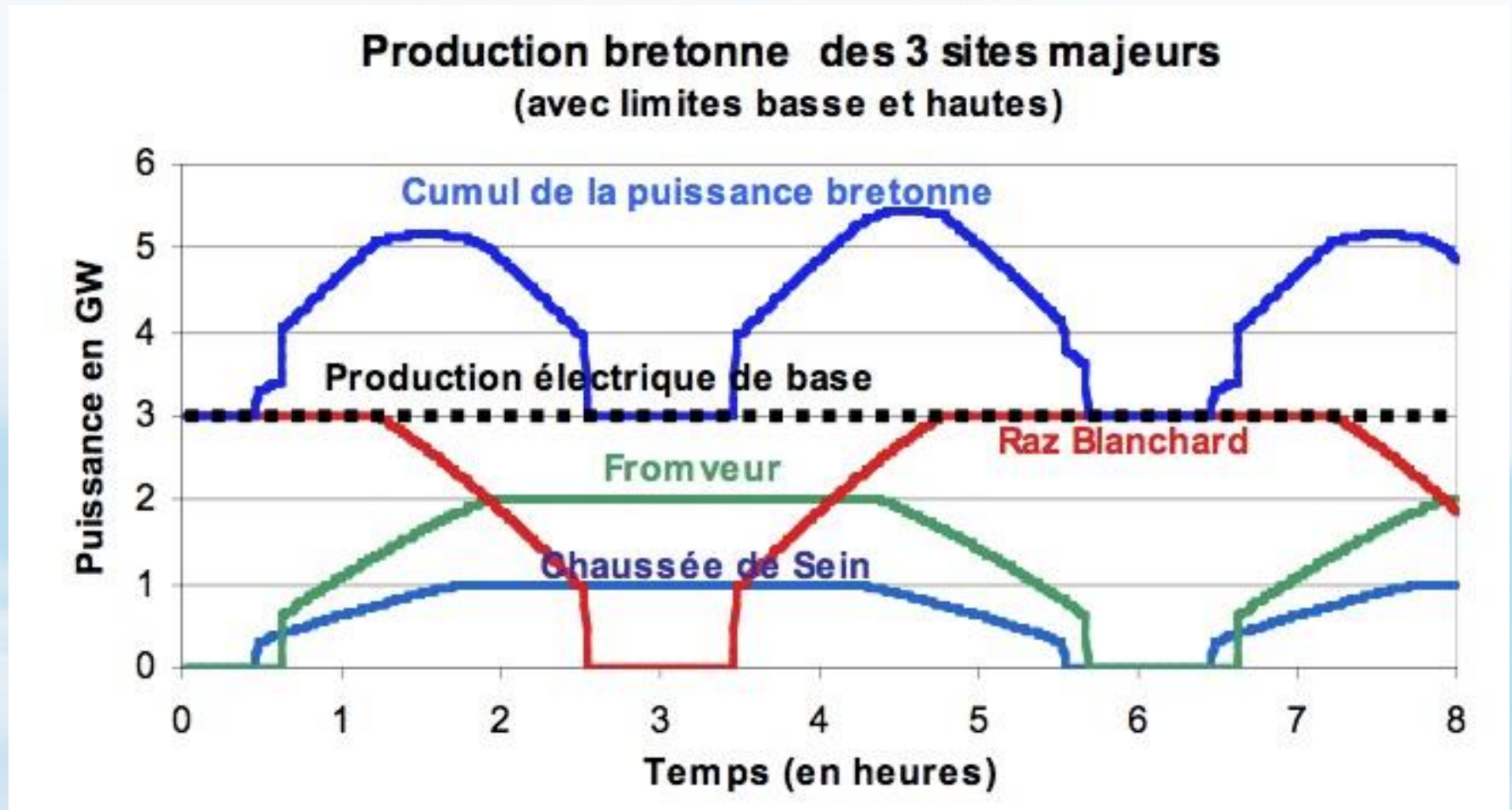


Carte de la ressource hydrolienne en Europe (Vitesse maximale du courant en cm/s). Rappelons que la "puissance" du courant est proportionnel au cube de la vitesse.

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'hydrolien**

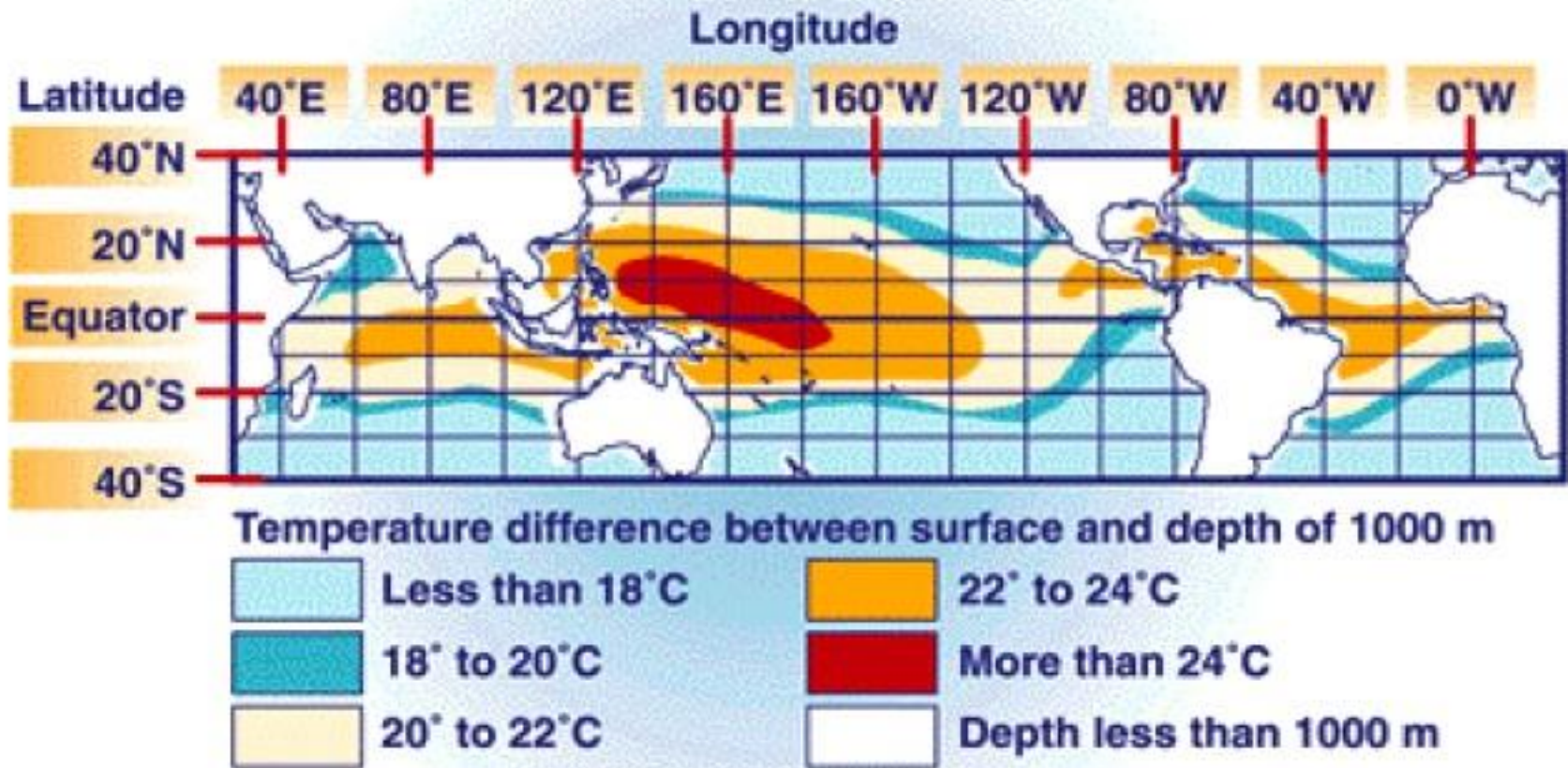


# Passons de sous l'eau à juste la surface



**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)**

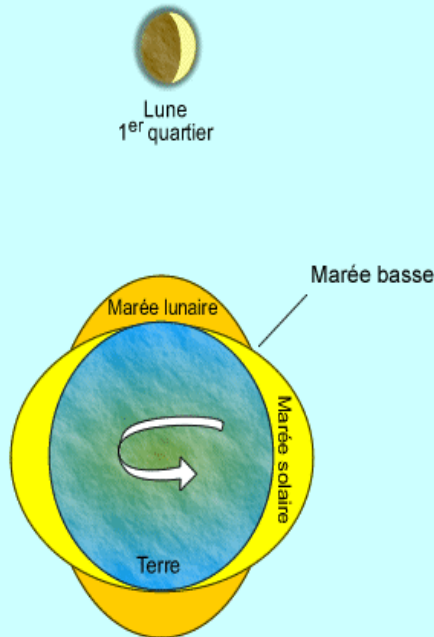
**Photovoltaïque ~2 à 20 centimes par kWh hors cout intermittence**

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

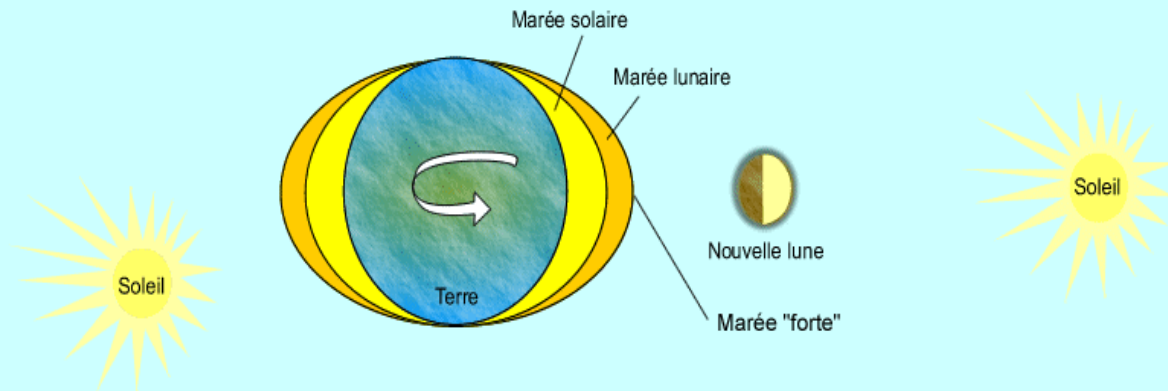
**Une taxe carbone à 200 € t CO<sub>2</sub> : +20 centimes par kWh électrique pour le charbon, +10 pour le gaz**

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

Exemple de marée basse



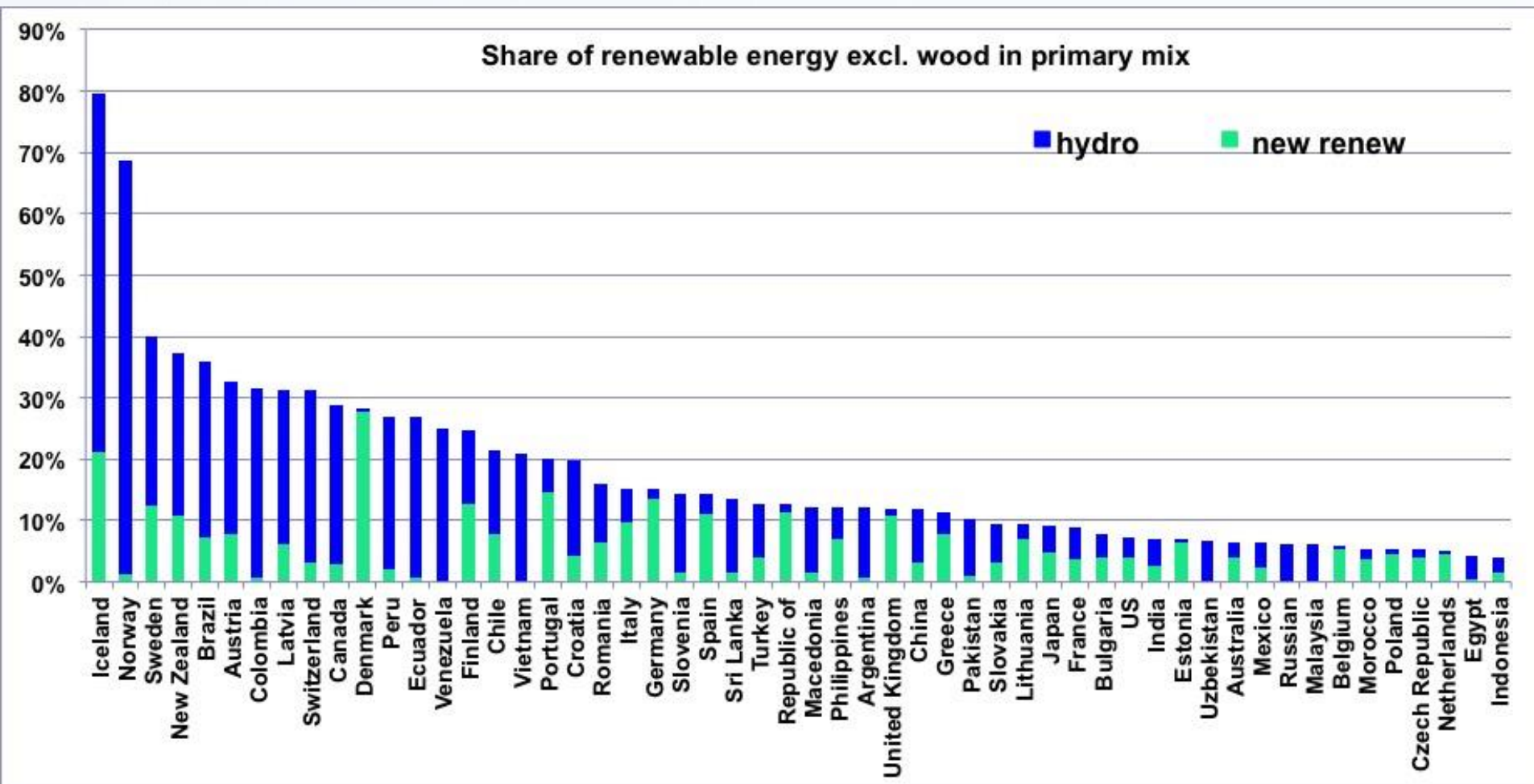
Exemple de marée haute



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



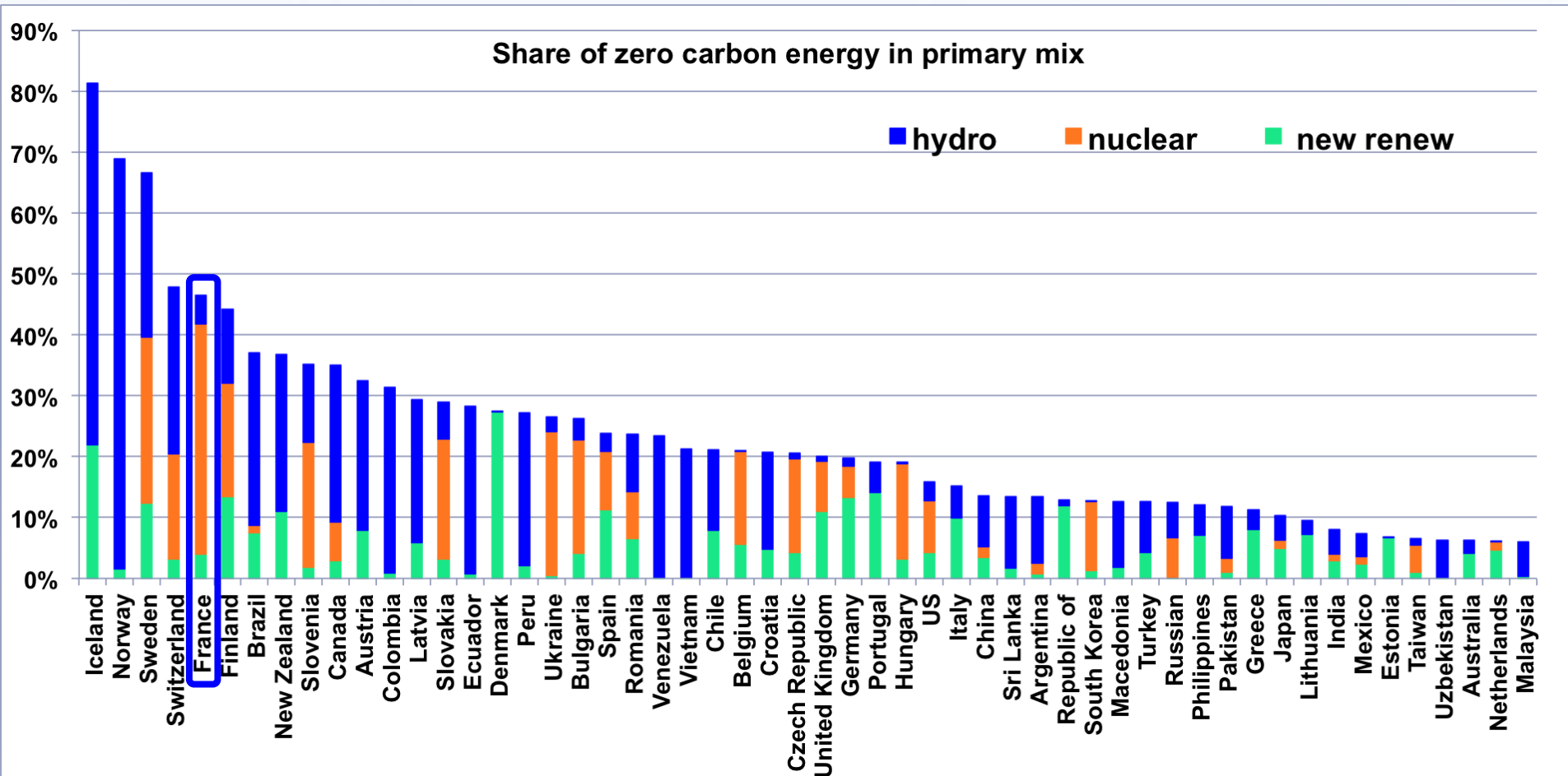
# Alors, utilise-t-on des énergies renouvelables ?



Part des énergies renouvelables dans l'énergie primaire par pays en 2017. Source BP Statistical Review

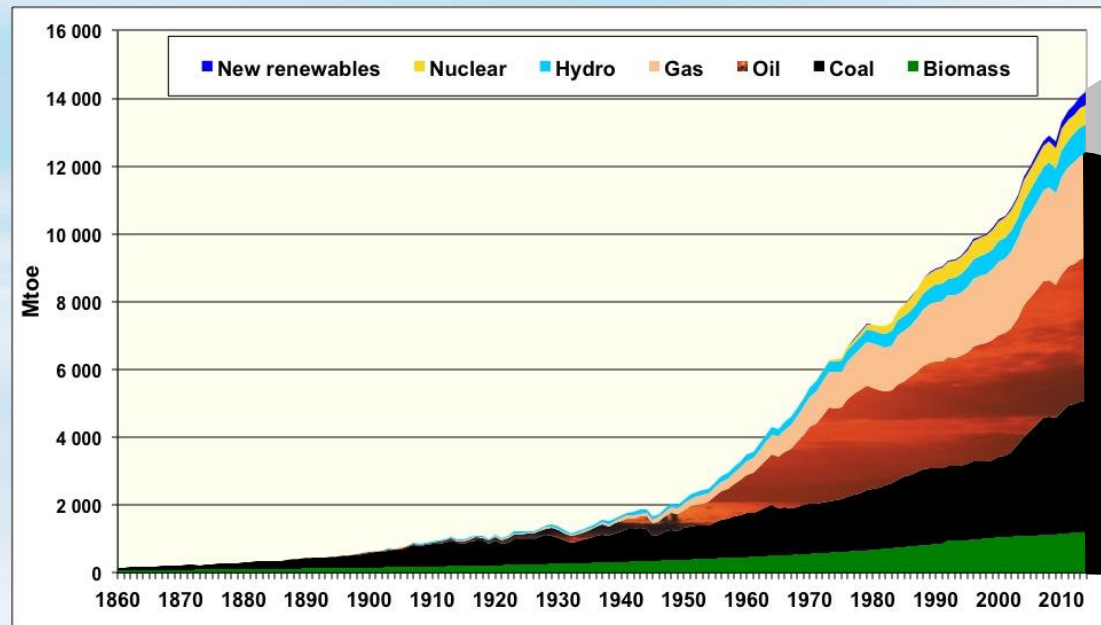


# En retard, la France, vraiment ?



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)**

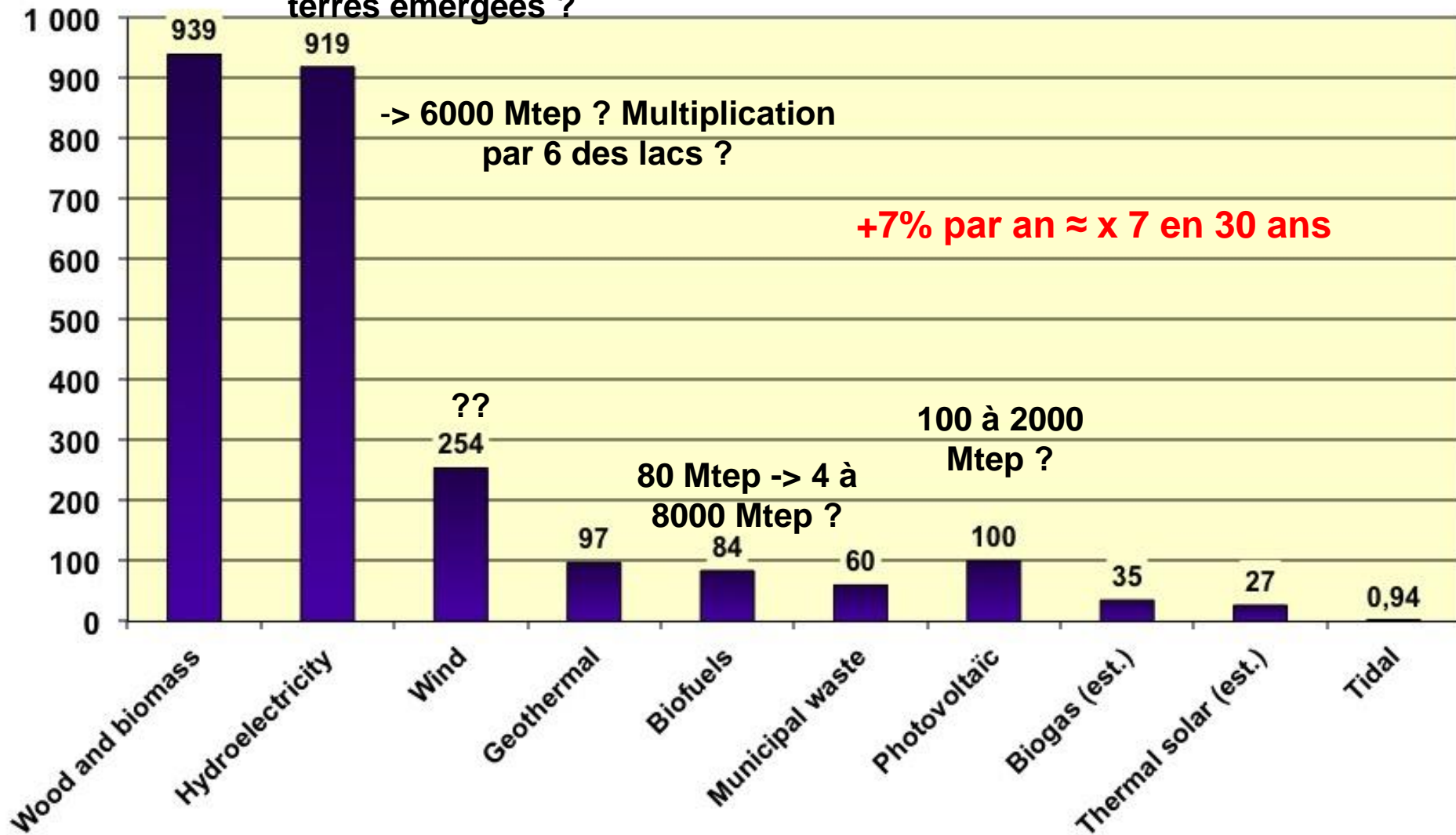
**-3,1% par an**

# Alors, qu'espérer des ENR ?

-> 7000 Mtep ??  $\approx$  20% des terres émergées ?

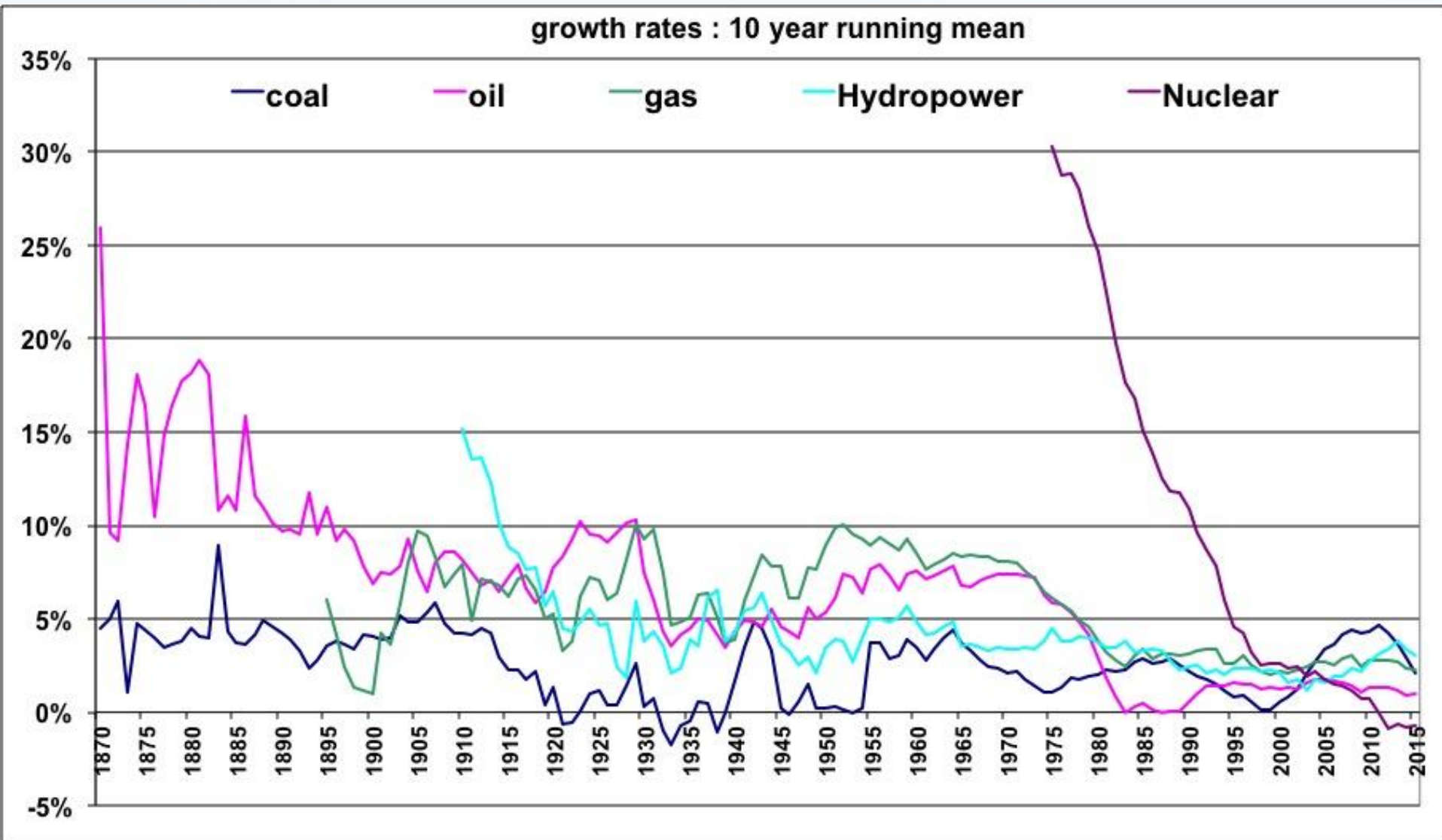
-> 6000 Mtep ? Multiplication par 6 des lacs ?

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



Contribution des énergies renouvelables en 2017. Toutes les sources purement électriques sont en équivalent primaire. Source BP Stat & divers

# +30% par an, combien de temps ?



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