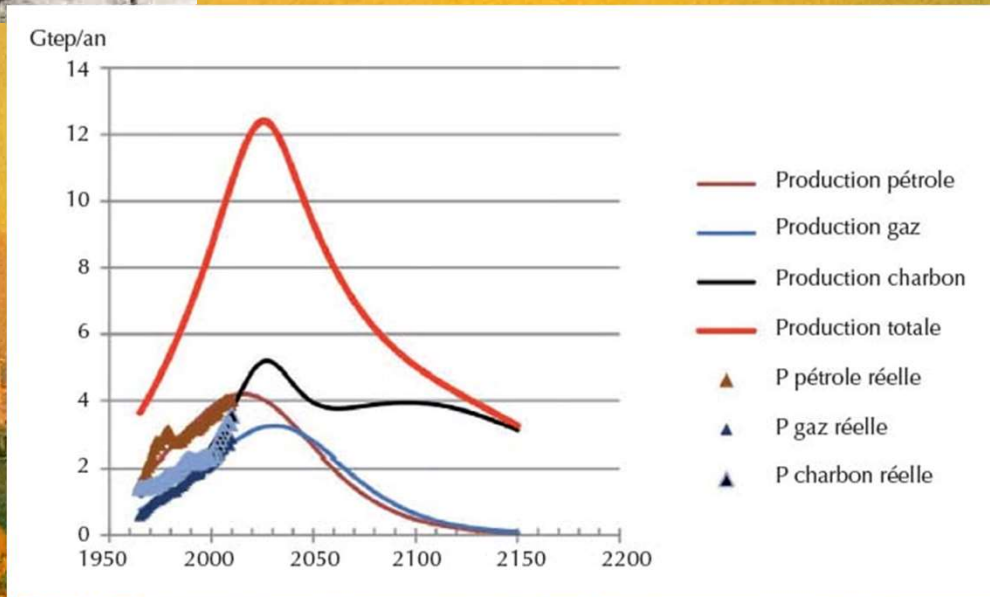


La double contrainte



Jacques Treiner
jtreiner@orange.fr
LIED, Université de Paris
et
The Shift Project

Un brin d'épistémologie

On peut avoir une opinion sur n'importe quel sujet, mais en science, il n'y a pas réponse à n'importe quelle question.

En science, il y a

les choses qu'on connaît bien,

les choses qu'on connaît moins bien,

les choses qu'on ignore

et les choses qu'on ignore ignorer.

Il y a donc de l'incertain, et c'est d'ailleurs pour déplacer cet incertain que la science progresse.

Sur le climat : l'effet anthropique est bien connu

la rétroaction du réchauffement climatique sur les nuages, donc sur le réchauffement, est moins bien connu

l'été 2022 : quel mécanisme explique le déplacement stable des masses d'air du Sahara vers l'Europe de l'Ouest ? Dédoublage du jet stream qui sépare la circulation circumpolaire et la cellule de Ferrel.

La science est incertaine, mais c'est une incertitude fiable.

Circulation atmosphérique à grande échelle

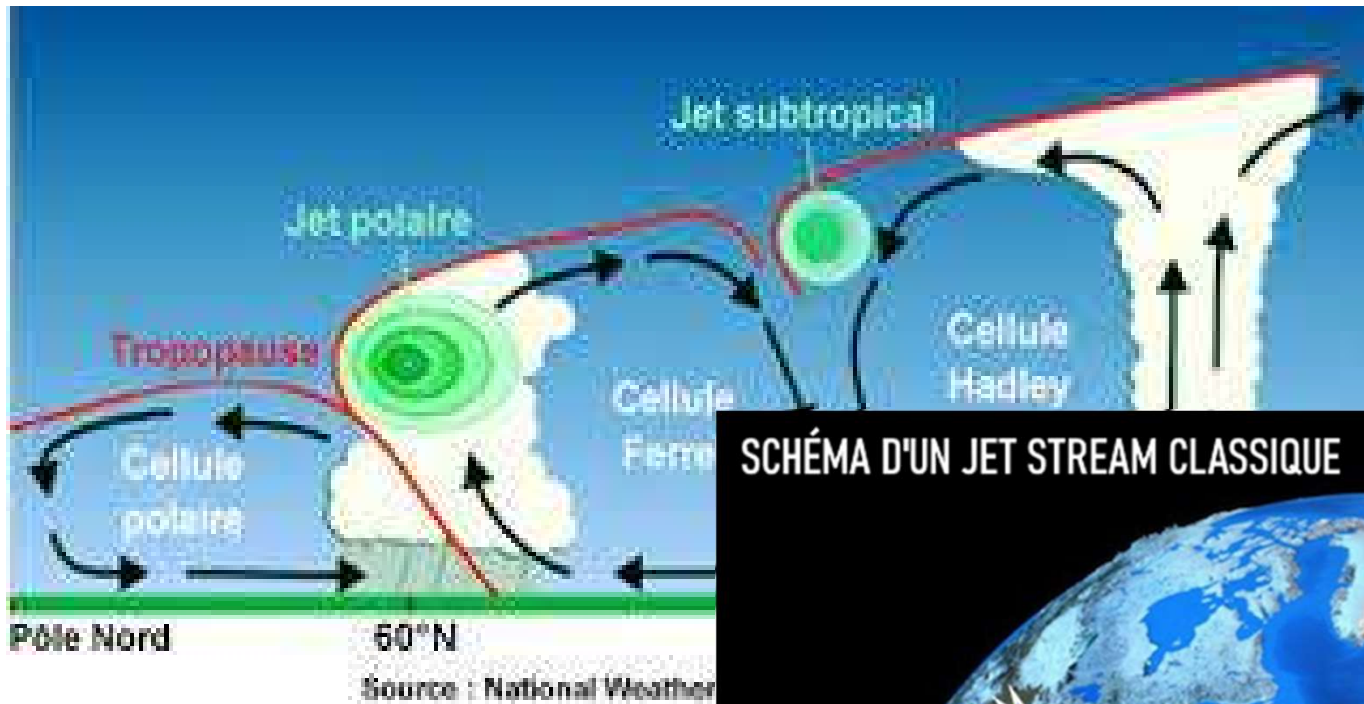
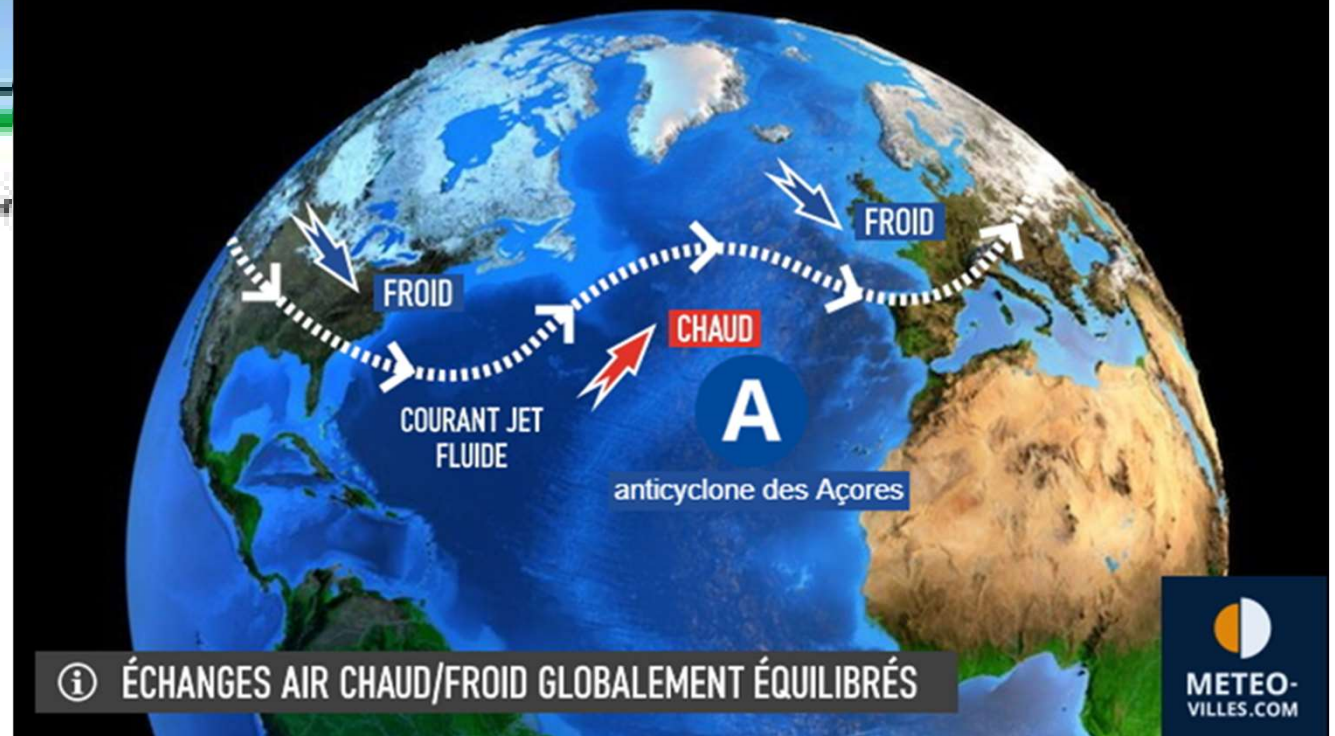
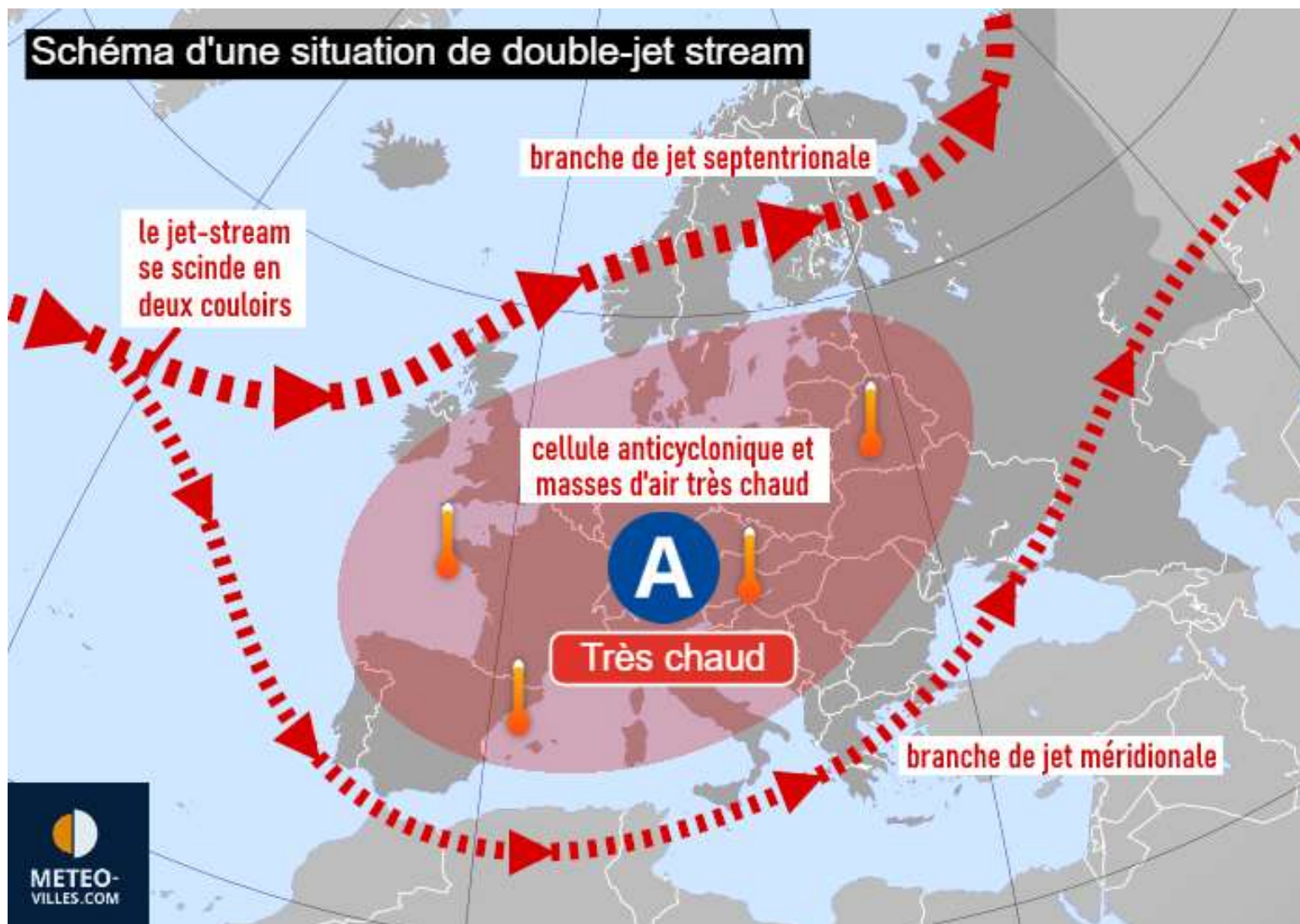


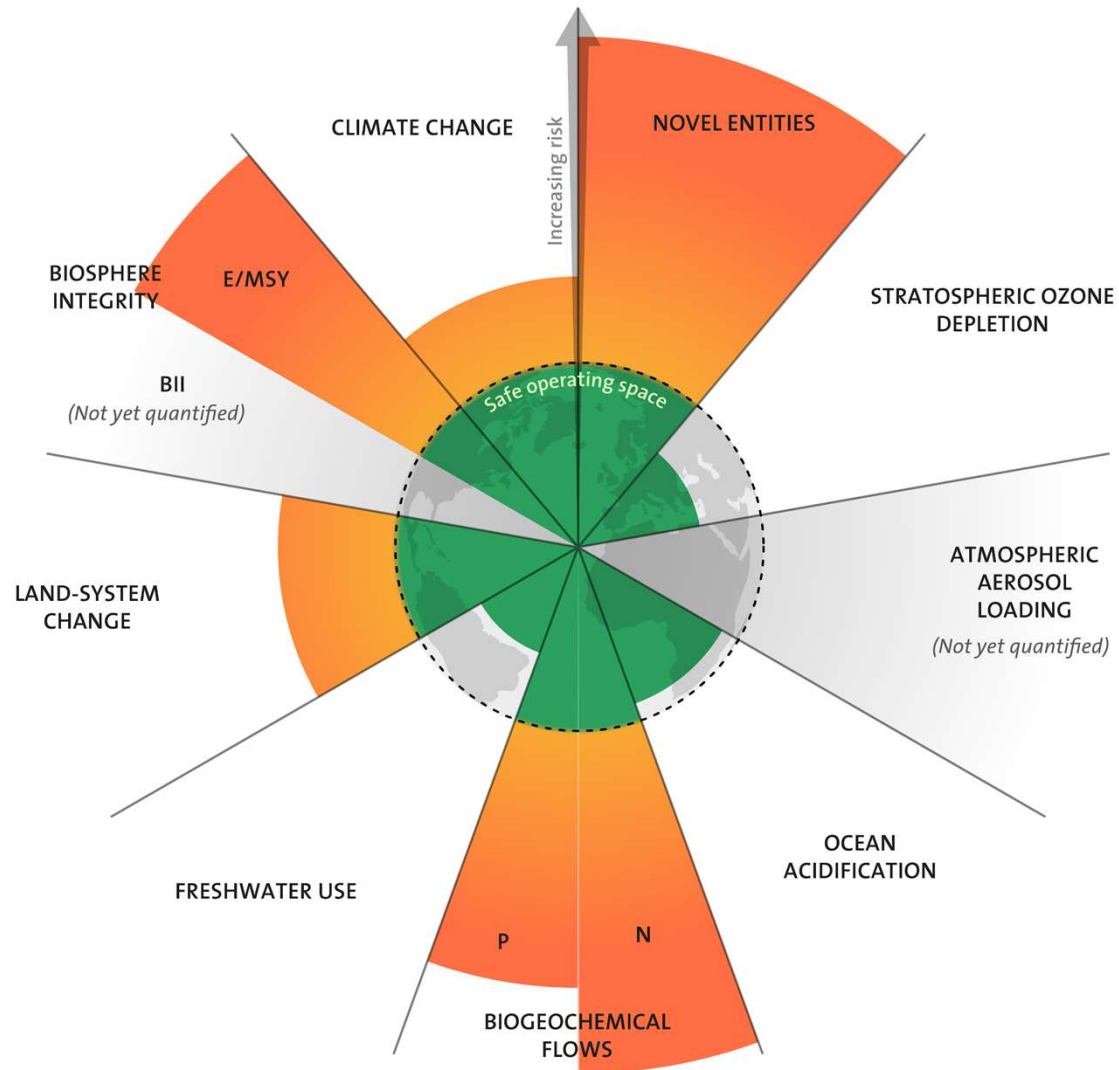
SCHÉMA D'UN JET STREAM CLASSIQUE



Eté 2022 ...

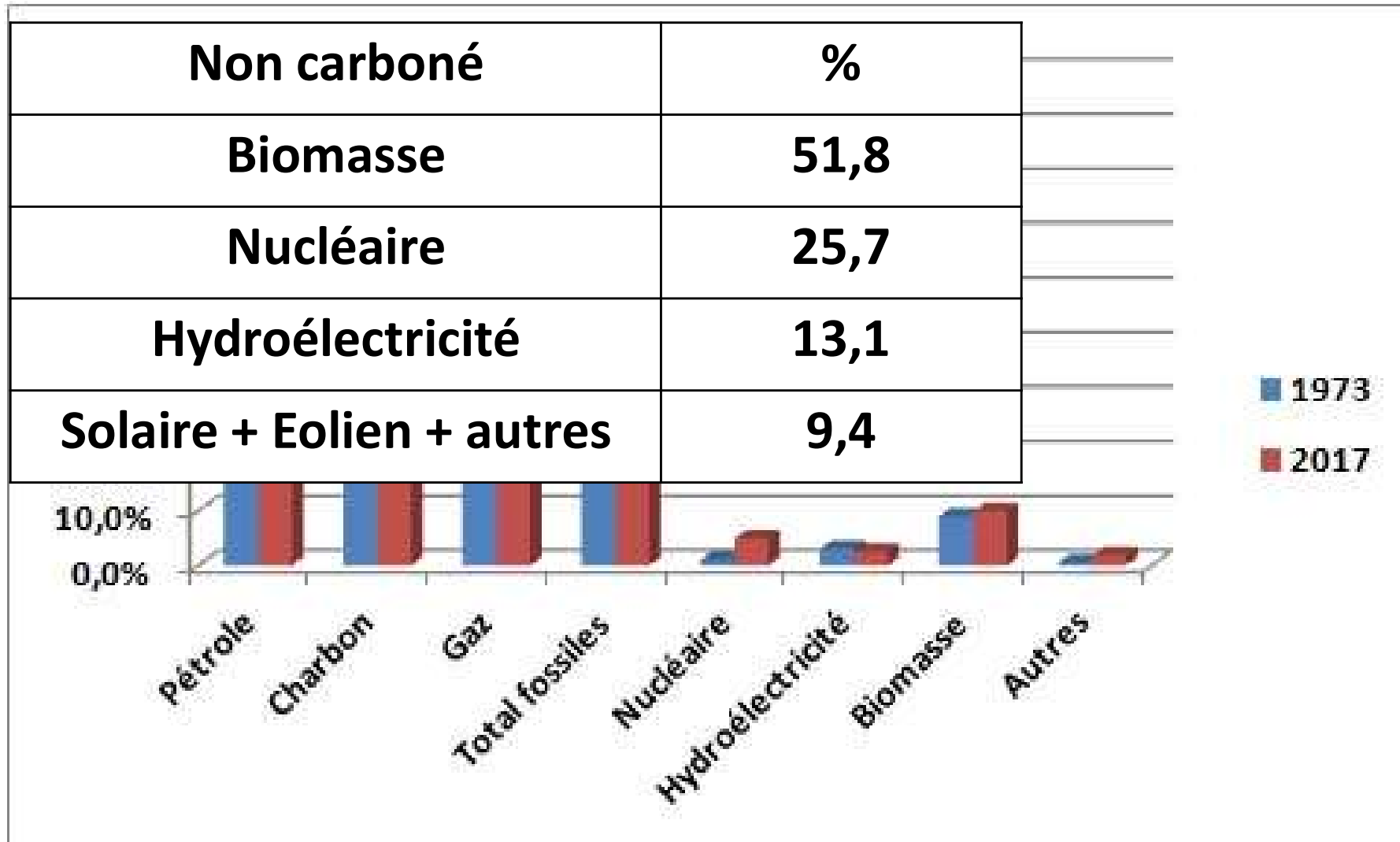


Entrée dans l'Anthropocène : perception des limites du système-Terre

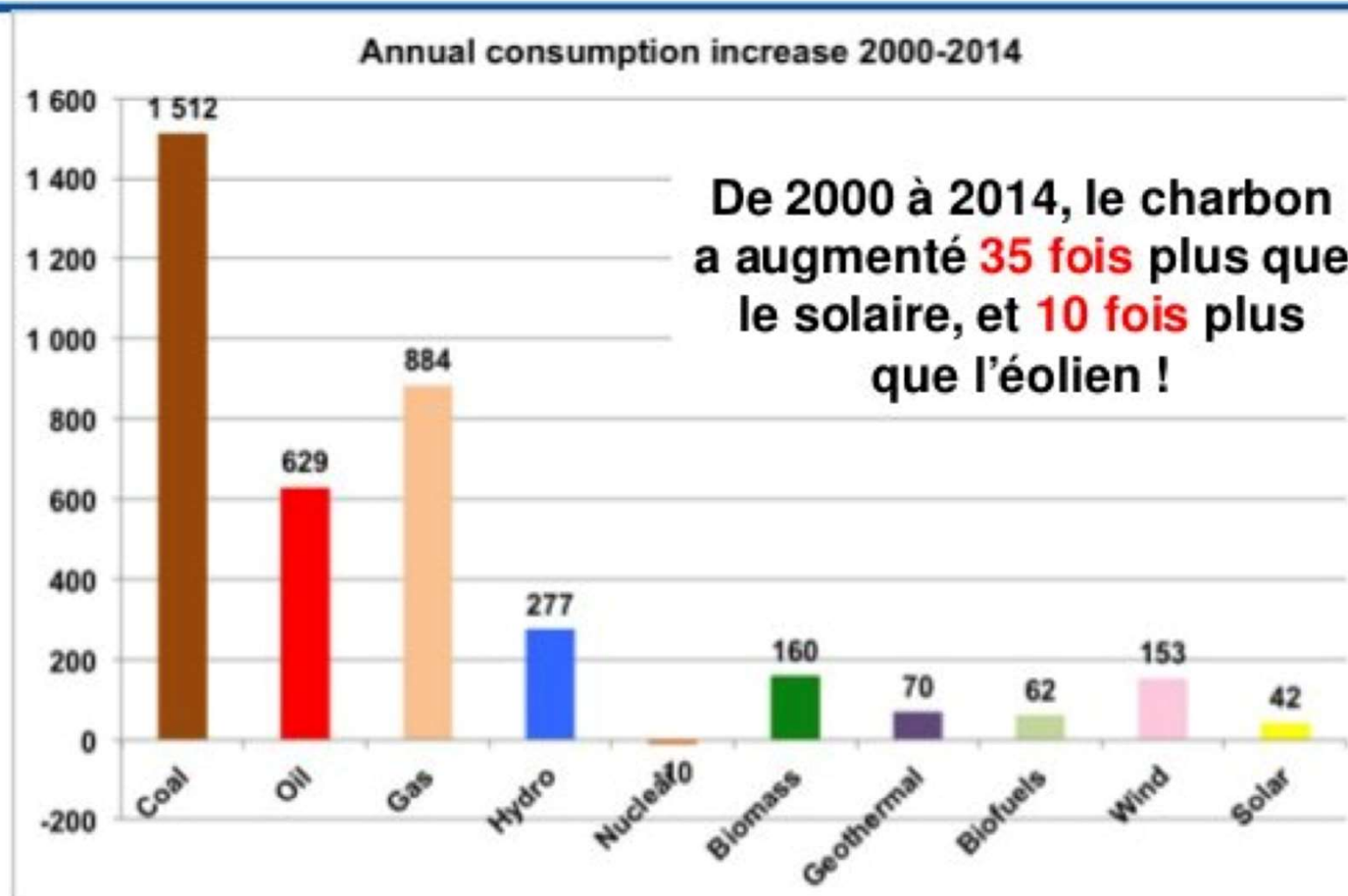


« Les richesses naturelles sont inépuisables, car sans cela nous ne les obtiendrions pas gratuitement. Ne pouvant être ni multipliées, ni épuisées, elles ne font pas l'objet des sciences économiques. »

Consommation mondiale d'énergie primaire



En route vers le tout renouvelable !



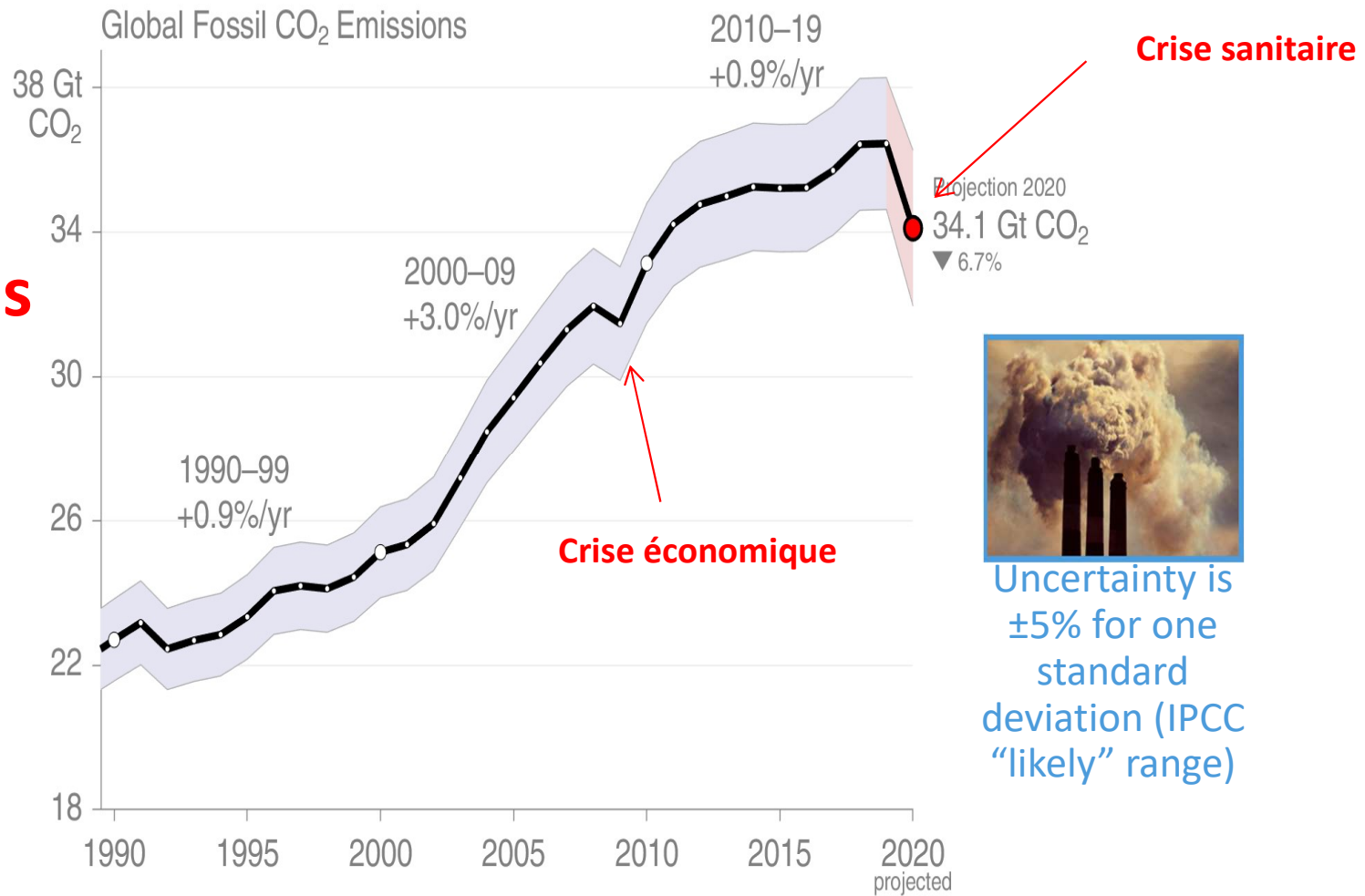
Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2014. Jancovici, sur données BP Statistical Review 2015 & divers

Global Fossil CO₂ Emissions

Global fossil CO₂ emissions: 36.4 ± 2 GtCO₂ in 2019, 61% over 1990

Projection for 2020: 34.1 ± 2 GtCO₂, about 7% lower than 2019

Les émissions sont insensibles au calendrier des COP

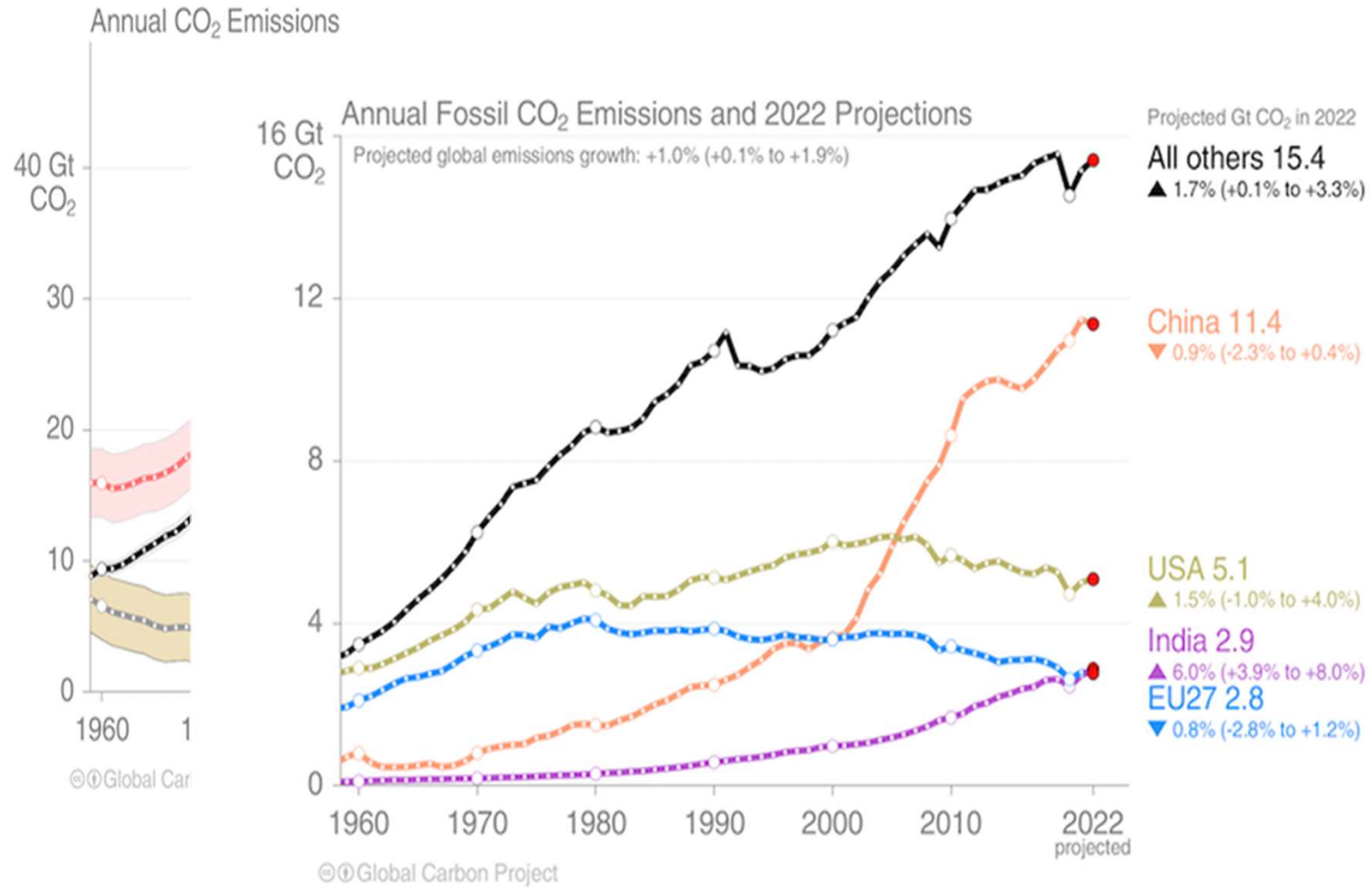


© Global Carbon Project • Data: CDIAC/GCP/BP/USGS

The 2020 projection is based on preliminary data and modelling, and is the median of the four studies.

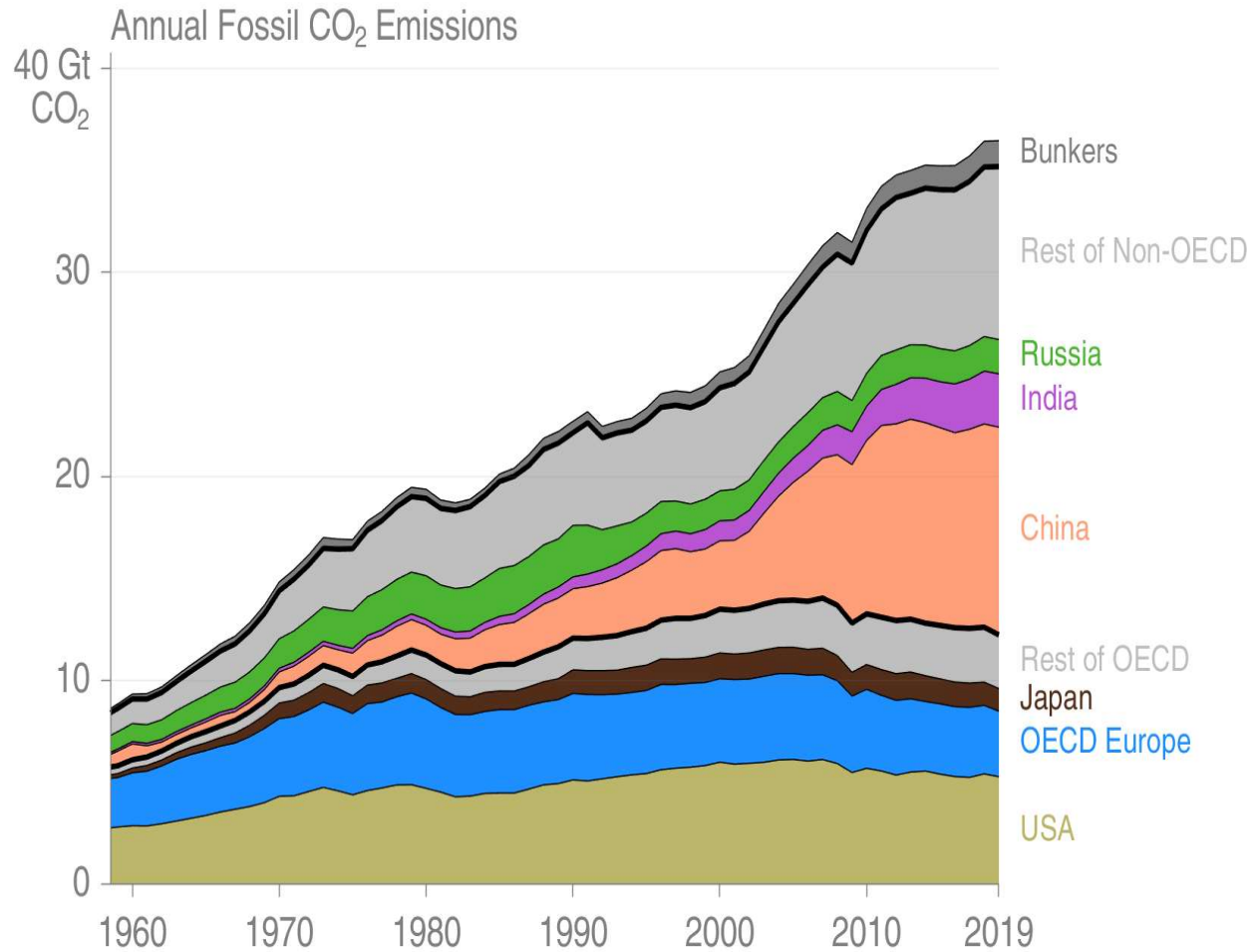
Source: [CDIAC](#); [Friedlingstein et al 2020](#); [Global Carbon Budget 2020](#)

Un an passe ...



Emissions de CO₂ par pays

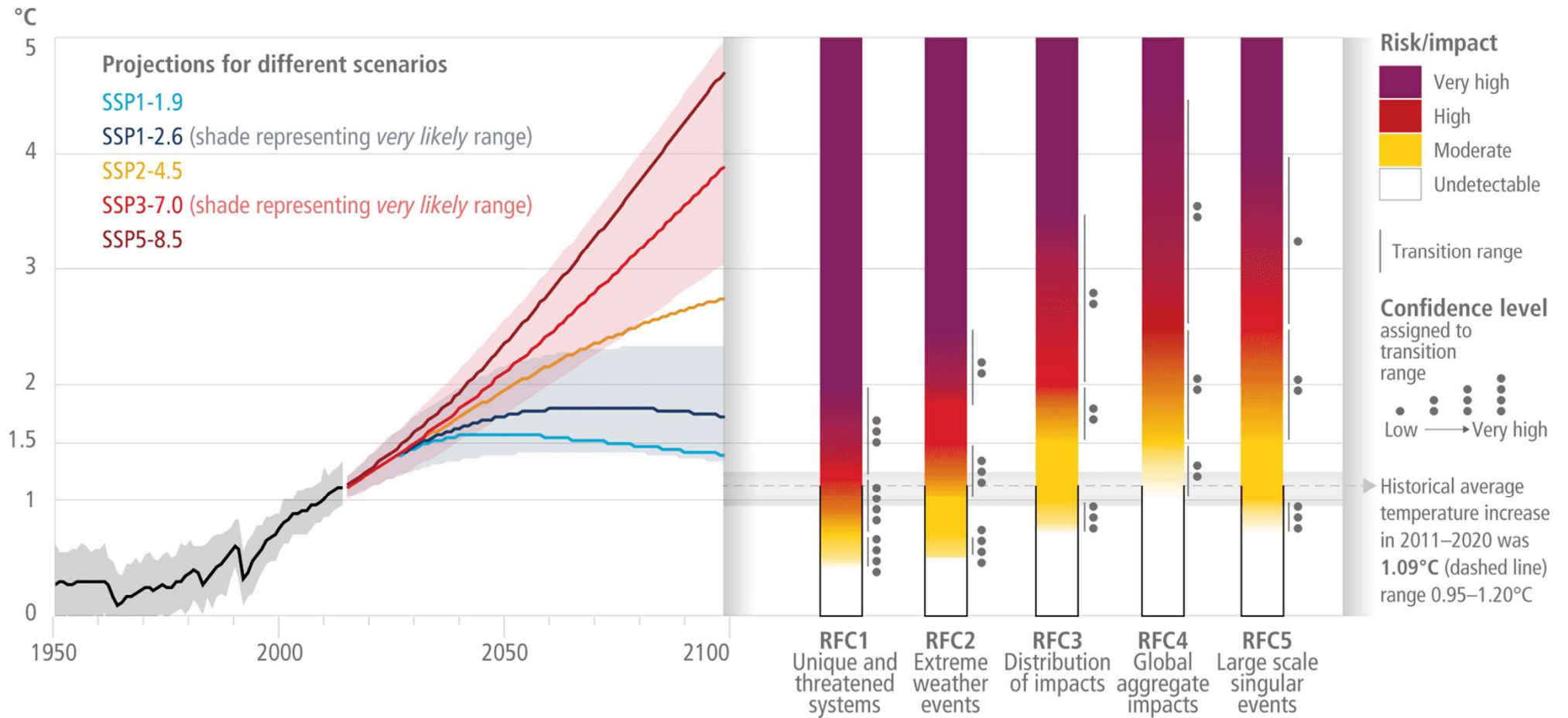
Emissions in OECD countries have increased by 1% since 1990, despite declining 13% from their maximum in 2007
Emissions in non-OECD countries have more than doubled since 1990



© Global Carbon Project • Data: CDIAC/UNFCCC/BP/USGS

**Les trajectoires du pire sont-elles
réalistes ?**

6^{ème} rapport d'évaluation



Exploitation d'une ressource en quantité finie

Réserves : Q_{\max} , exprimé par exemple en Gtep (c'est donc une énergie)

Les « 3 P » : prouvées (90%), probables (50%), possibles (10%)

Exploitation : Q : quantité cumulée extraite à ce jour (énergie)

P : quantité extraite chaque année, exprimé en Gtep/an (c'est donc une puissance)

**Quelle relation entre la production annuelle et la
quantité cumulée extraite à ce jour ?**

Quelle relation entre P et Q ?

Production annuelle décroissante

Lorsque Q est loin de Q_{max} , on a $P = \alpha Q$

La production annuelle doit s'annuler lorsque $Q = Q_{max}$ c'est-à-dire lorsque

$$\frac{Q}{Q_{max}} = 1$$

On peut alors essayer (modèle de Hubbert) :

$$P = \alpha Q \left(1 - \frac{Q}{Q_{max}} \right)$$

Comment anticiper une courbe de production ?

On suppose connue la quantité extraite jusqu'à l'année n , $Q(n)$.

De là, on peut calculer :

- la production l'année suivante $P(n+1) = \alpha Q(n)[1-Q(n)/Q_{\max}]$
- ce qu'on aura extrait au total $Q(n+1) = Q(n) + P(n+1)$

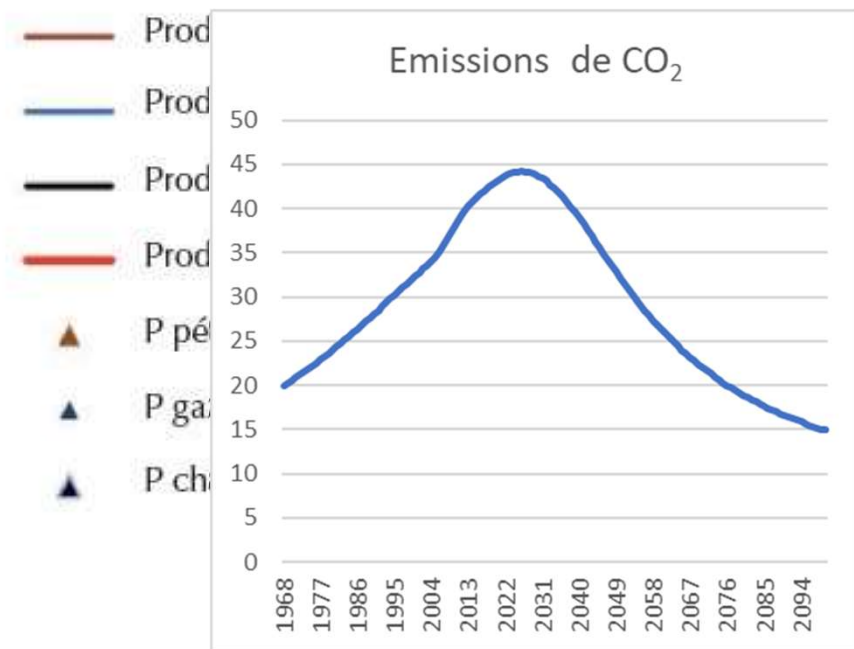
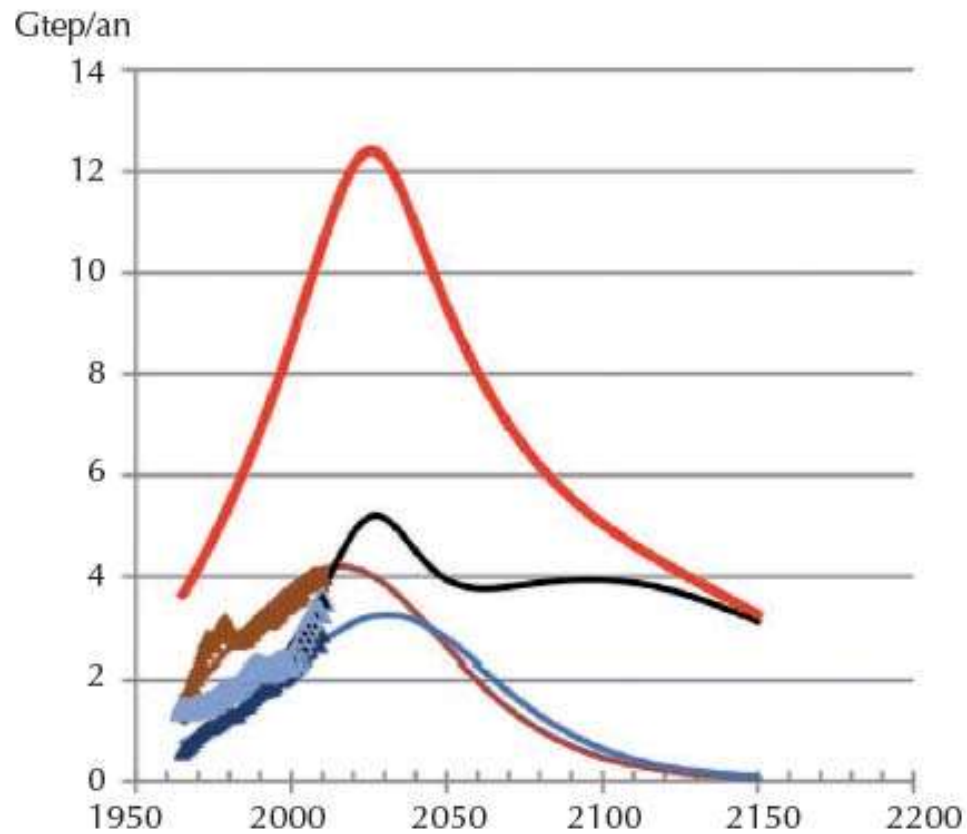
Et on continue.

Pour commencer l'itération, il faut partir d'une année de référence 0, pour laquelle on connaît la quantité extraite $Q(0)$.

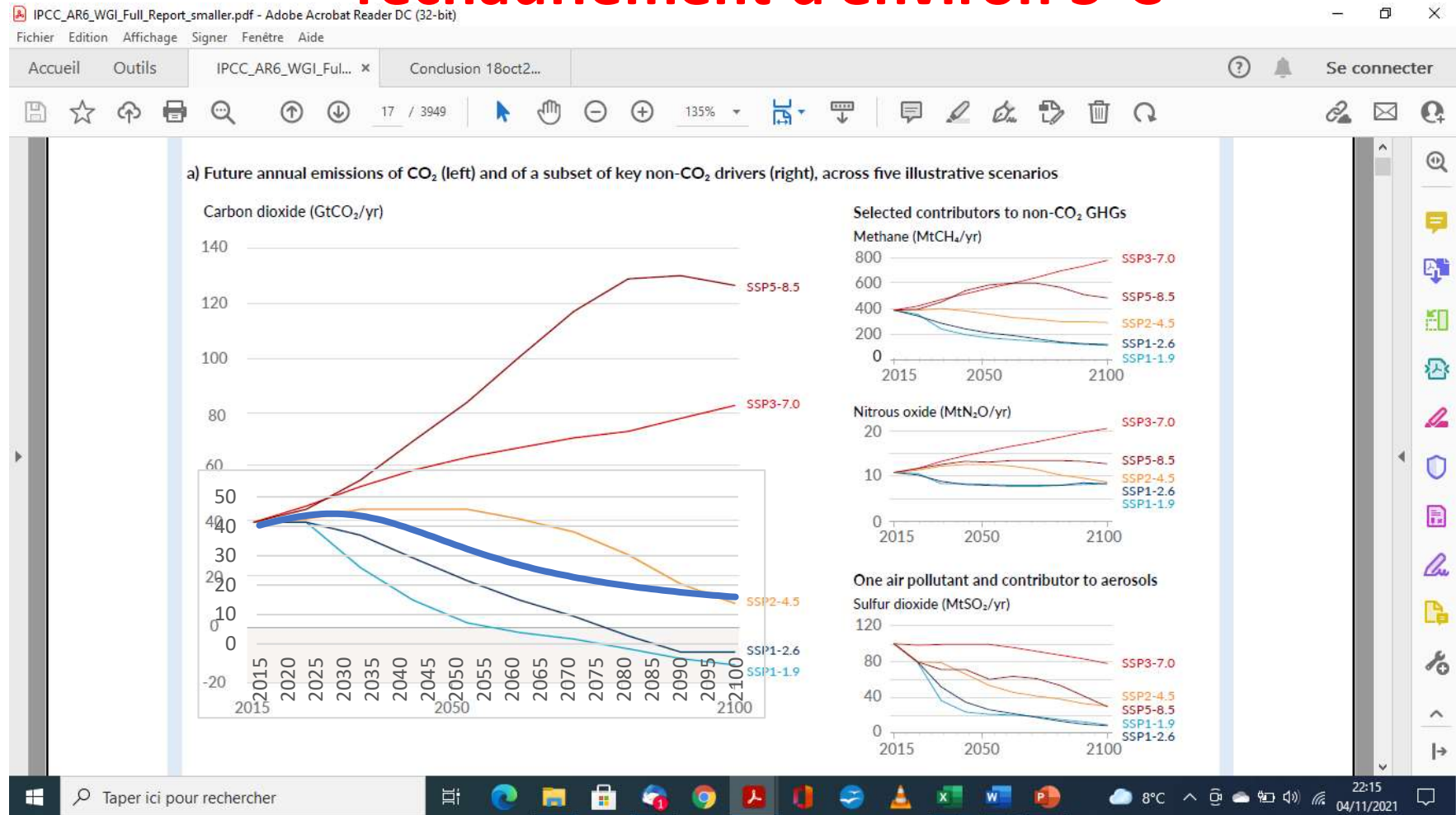
Emissions de CO₂ associées aux réserves estimées (modèle d'Hubbert)

900 Gtep charbon, 400 Gtep pétrole, 300 Gtep gaz

Charbon : 4,1 tCO₂/tep Pétrole : 3,1 tCO₂/tep Gaz : 2,4 tCO₂/tep



Comparaison avec les trajectoires SSP : Le business-as-usual engage vers un réchauffement d'environ 3°C



Relation PIB/énergie

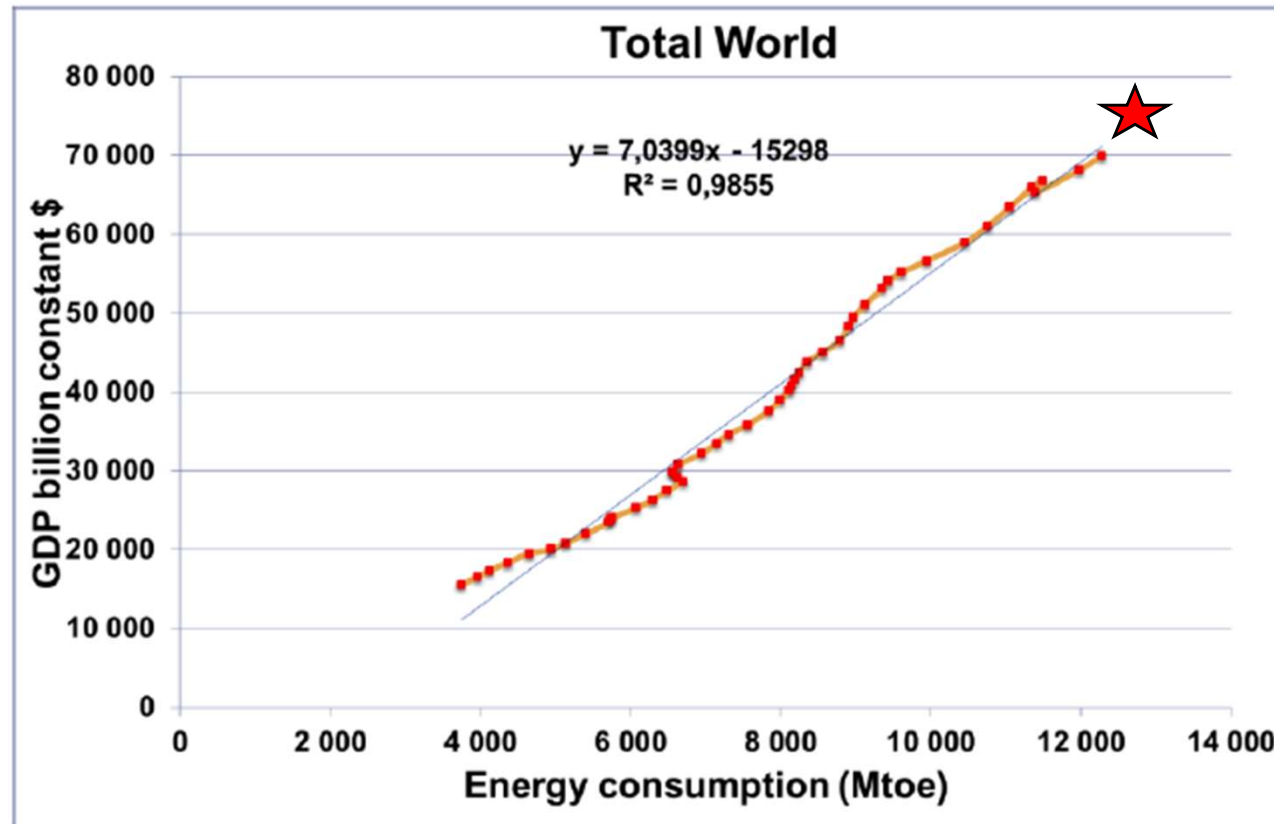
Nous vivons de transformer la matière pour produire des biens et des services.

Toute transformation donne naissance à un double comptabilité :

- l'une, en termes énergétiques**
- l'autre, en termes monétaires**

-Le passage de l'une à l'autre s'apparente à un **changement d'unité : d'où une relation affine entre les deux mesures**

Relation PIB/énergie : un simple changement d'unité !



Source : BP statistical review, 2012, Shilling et al. 1977, EIA, 2012, et Banque Mondiale (PIB), 2012.

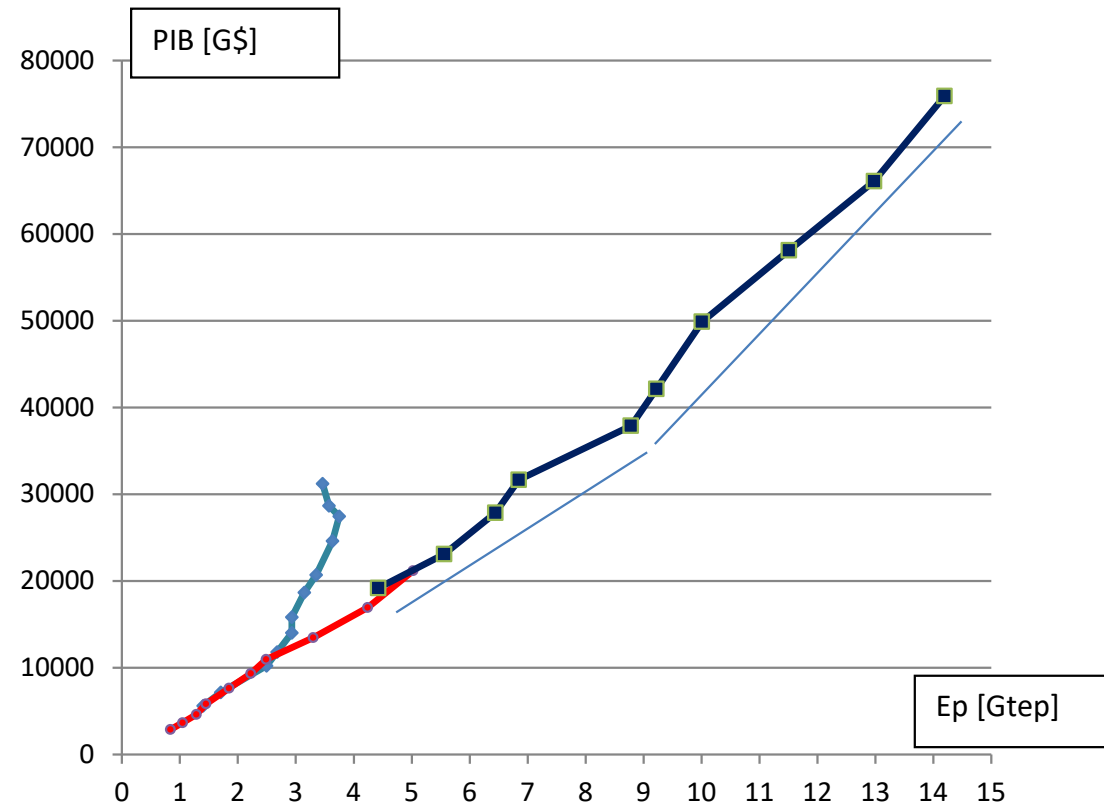
En moyenne, il faut 1,6 kWh pour produire 1 \$ de PIB

Quelques diables dans les détails ...

En bleu : PIB/E pour les pays riches

En orange : PIB/E pour l'Asie de l'Est

En noir : PIB/E mondial



Découplage ...?
Délocalisation !

Comment caractériser les systèmes énergétiques ?

EROI : Energy return on (energy) invested

Energie et puissance

Stocks et flux

Source concentrée/source diluée

Source pilotable/source intermittente

Stockage de l'énergie

Bilan des énergies de flux (Gtep/an)

	Hydro	Biomasse		Solaire			Géoth	Eolien	Total
		biocarb.	Bois	thermique	PV	Conc.			
2016	0,9	0,03	0,9	-	0,07	-	0,02	0,2	2,3
2050	2	0,5	2	0,5	1	0,6	0,3	2	8,9
transport		X							
chaleur HT			X			X	X		
chaleur BT			X	X		X	X		
électricité	X	X	X		X	X	X	X	

Potentiel total des énergies de flux en 2050 : < 10 Gtep/an

Comment obtenir 20 Gtep sans les fossiles ni le nucléaire ??

Back to basics : qu'est-ce que l'énergie ?

Les mots et les choses

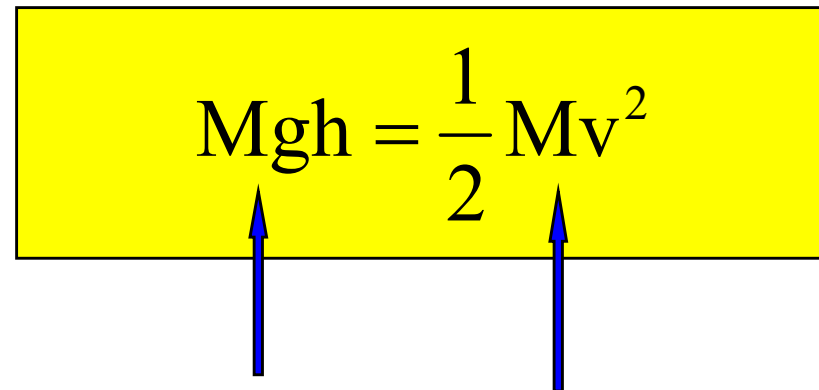
Nous ne vivons pas d'énergie, **nous vivons de transformer la matière** autour de nous, quels que soient les usages : résidentiel/tertiaire, industrie/agriculture, transport, électricité.

L'énergie n'est pas une chose, **c'est une unité de compte des transformations de la matière.**

L'énergie, unité de compte des transformations de la matière

Un corps tombe : il perd de l'altitude, il gagne de la vitesse

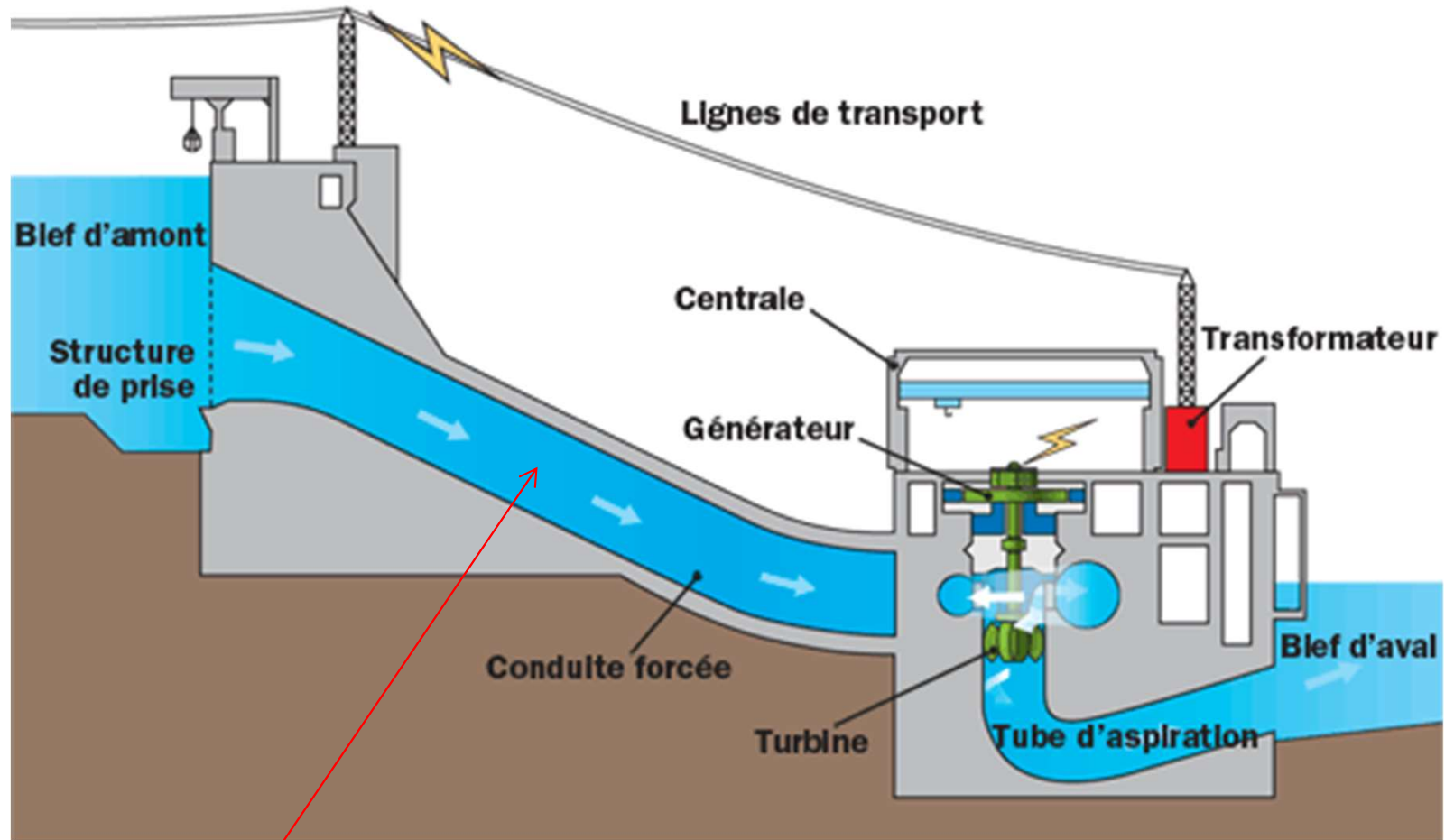
Question : y a-t-il un rapport entre cette perte et ce gain ?


$$Mgh = \frac{1}{2} Mv^2$$

Énergie associée à la position relative de l'objet et de la Terre : énergie potentielle

Énergie associée au mouvement : énergie cinétique

Hydroélectricité



L'eau perd de l'altitude et gagne de la vitesse, elle perd de l'énergie potentielle et gagne de l'énergie cinétique

Performances du corps humain

Promenade en montagne : 70 kg, 8 heures, 300 m/h

Energie : $8 \times 70 \times 9,8 \times 300 = 1646400$ J, soit 0,457 kWh,

0,5 kWh d'énergie

ou 62,5 W de puissance

Avec un peu d'entraînement, disons **100 W** (**10 W** avec les bras)

Métabolisme de base : 2700 kcal/jour, soit environ 130 W

L'homme produit avec la machine, ou la machine produit avec l'homme ?



= 100 W pour les jambes, 10 W pour les bras



=



=



= 60 kW \approx **600** paires de jambes



= 100 kW \approx **10.000** paires de bras



= 400 kW \approx **4.000** paires de jambes



= 100 MW \approx **10.000.000** paires de bras !

EROI

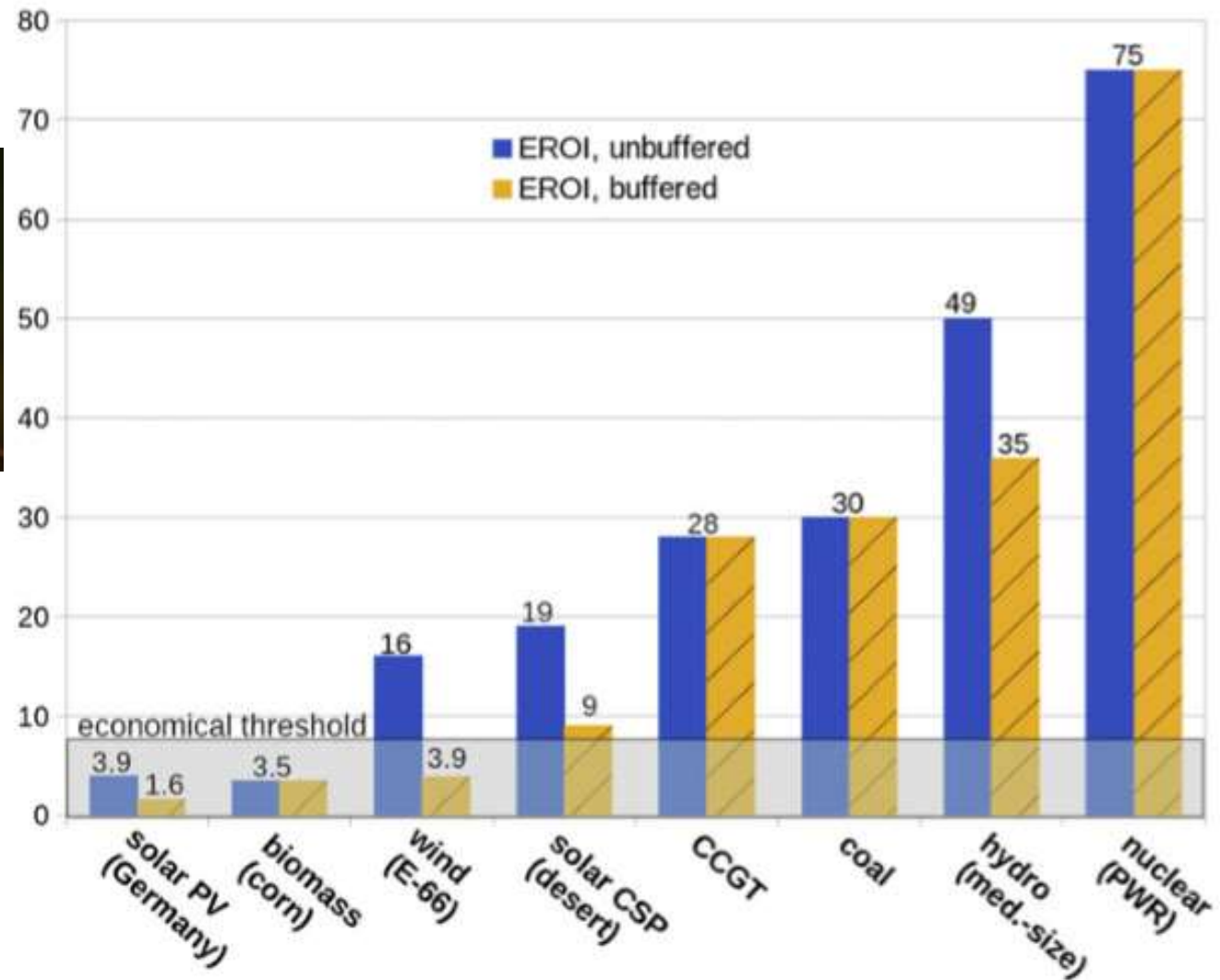


Fig. 3. EROIs of all energy techniques with economic “threshold”. *Biomass*: Maize, 55 t/ha per year harvested (wet). *Wind*: Location is Northern Schleswig Holstein (2000 full-load hours). *Coal*: Transportation not included. *Nuclear*: Enrichment 83% centrifuge, 17% diffusion. *PV*: Roof installation. *Solar CSP*: Grid connection to Europe not included.

Energie et puissance, exemples

Métabolisme de base d'un individu

Energie : 2500 kcal par jour, soit 10 millions de J (1 cal = 4,18 J)

Puissance : 86400 secondes dans une journée,

$$P = 120 \text{ W} \quad (=10000000/86400)$$

Travail fourni par le corps humain : $8 \cdot 70 \cdot 10 \cdot 300 = 1680000/3600000 = 0,5 \text{ kWh}$

Energie contenue dans 1 litre d'essence : 10 kWh, pour 1,5 € !

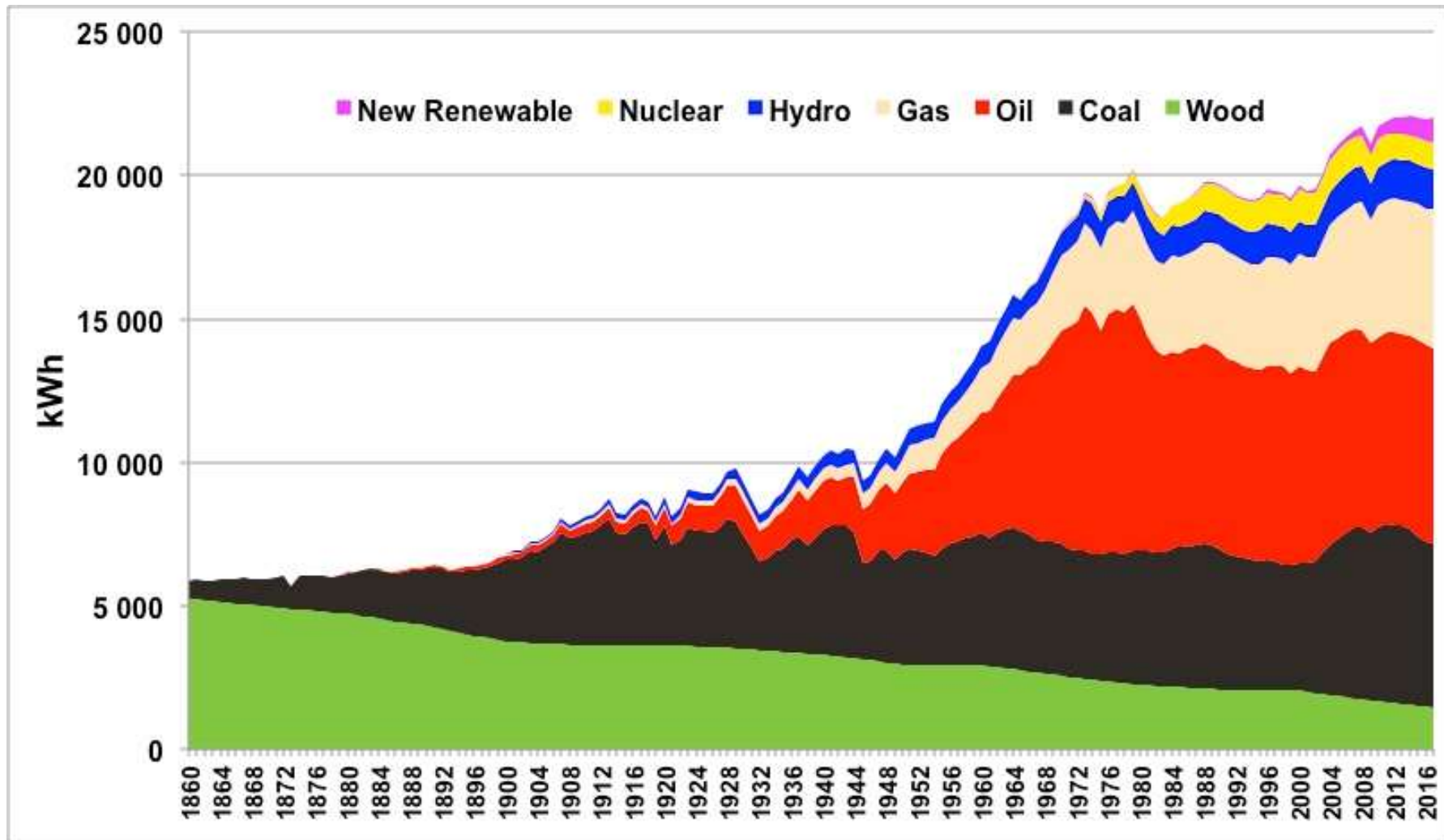
Une voiture consommant 5 l/100 km, roulant à 100 km/h pendant 8 heures, consomme une énergie de 400 kWh, soit l'énergie que peut fournir 8000 personnes pendant le même temps, et cela pour un coût total de 60 € !

Remarque : comme le rendement d'un moteur n'est que de 25%, le travail extractible de cette essence est l'équivalent de 2000 personnes ... seulement.

Agrocarburants ? En moyenne, l'humanité consomme une puissance de 2,4 kW dont le quart, soit 600 W pour le transport.

Agrocarburants à la place du pétrole ? Cinq fois la superficie consacrée à l'agriculture, cinq fois la quantité d'intrants, d'eau ...!

Energie primaire par habitant



Stocks/flux

Energies de stock (épuisables) : pétrole, gaz, charbon, nucléaire

Energies de flux : solaire, éolien, hydraulique, géothermie, biomasse, marine

Energie de stock : évaluation des réserves/ressources, échelles de temps de leur épuisement, taux d'extraction annuel, nuances (?) entre géologues et politiques/économistes

Energie de flux : quel flux annuel peut-on mettre en œuvre, techniquement et économiquement ? Est-ce vraiment renouvelable ?

Puissance installée, puissance moyenne, puissance instantanée

Un réseau électrique fonctionne en assurant, pour tout x et tout t :

$$P(x,t) = D(x,t)$$

Puissance installée : puissance théorique, lorsque l'installation fonctionne dans les conditions optimales

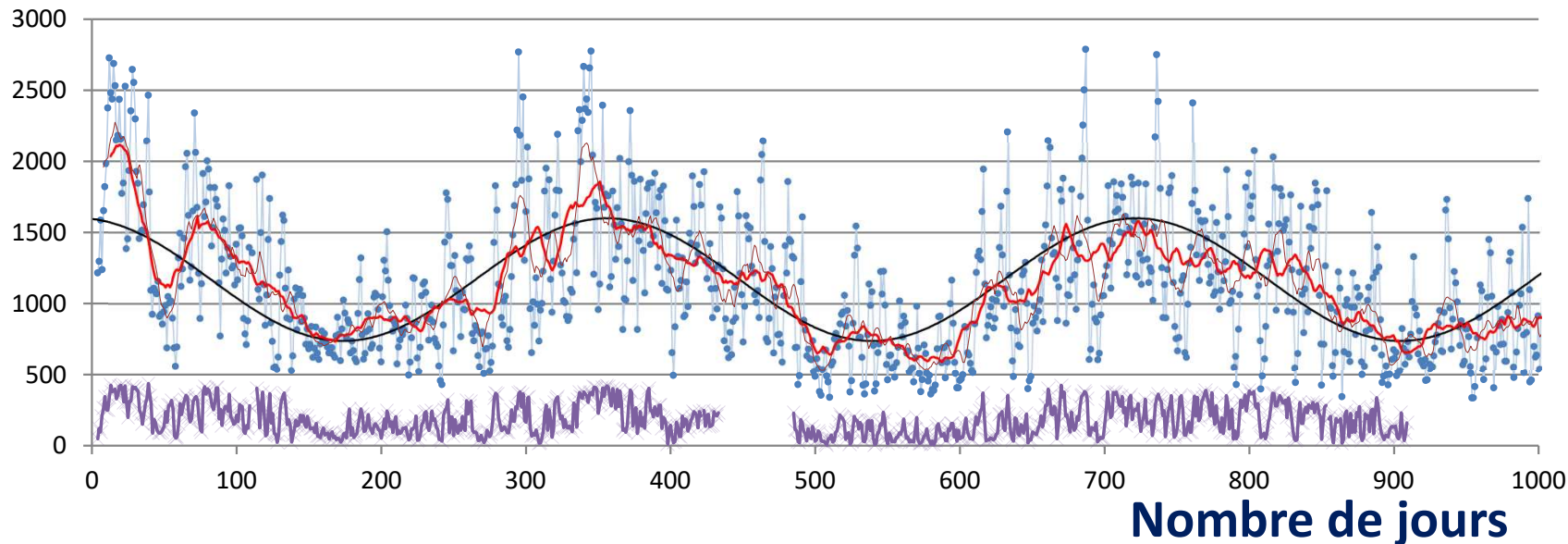
Puissance moyenne = énergie totale produite dans l'année, divisée par le nombre d'heures dans une année (8760)

Puissance instantanée = énergie produite pendant un court intervalle de temps, divisée par cet intervalle de temps (p.ex. $\frac{1}{4}$ d'heure)

Production éolienne européenne des deux dernières années

Production stable : 3200 TWh/an, de 175 à 220 GW éoliens installés, 4200 à 5280 GWh/j

Prod. jour GWh



Fluctuations : hiver, environ 1700 GWh, soit 65 GW moyens
été, environ 500 GWh, soit 20 GW moyens

Exercice

Imaginons qu'on ait besoin d'une puissance moyenne de 100 GW
Avec de l'éolien, il faut installer 400 GW (facteur de charge de 25%)

Puissance instantanée minimale : 5% de 400 = 20 GW

Puissance instantanée maximale : 60% de 400 = 240 GW

Déficit maximal : 80 GW

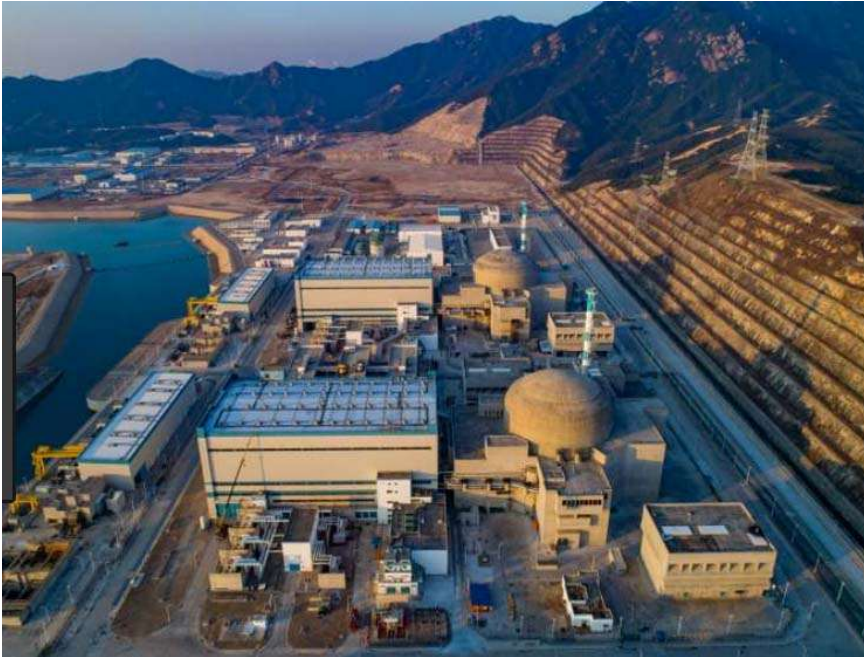
Excédent maximal : 140 GW

Nécessité de puissance de back-up, de l'ordre des 2/3 de la puissance moyenne

Nécessité de pouvoir exporter de grandes quantités d'électricité excédentaire

L'arbre, la vache et l'éolienne : un arbre n'est pas une planche, une vache n'est pas un steak, une éolienne ne délivre pas de puissance garantie...

Source concentrée/source diluée



**EPR de Taishan : entré en service
le 14/12/2018
24 TWh/an (8 G€)**



**Barrage des Trois Gorges, 1993-2009
80 TWh/an (40 G€)
640 km x 3 km : 15 villes, 115 villages
1,8 millions de personnes déplacées
Risque aval pour 75 millions de personnes**

Concentration de l'énergie, suite

Pour disposer d'une puissance de 1 Gwe pendant un an :

50 kg de tritium (si on y parvient !)

27 tonnes d'U

170 tonnes de fuel, 260 tonnes de charbon à l'heure

1200 tonnes d'eau par sec tombant de 100 m de hauteur

5000 éoliennes de 1 MW

30 km² de panneaux solaires

Concentration, fin

- Impact sur la biodiversité : proportionnel à la surface consacrée à la production.

Exemple pour 14 TWh par an, EPR 4 km²

Fossiles : 10 km², PV 200 km², Eolien 1200 km²,

Biomasse, 5000 km²

- Besoin en matériaux :

EPR, (1650 MWe) : 500.000 m³ de béton, 110.000 tonnes acier.

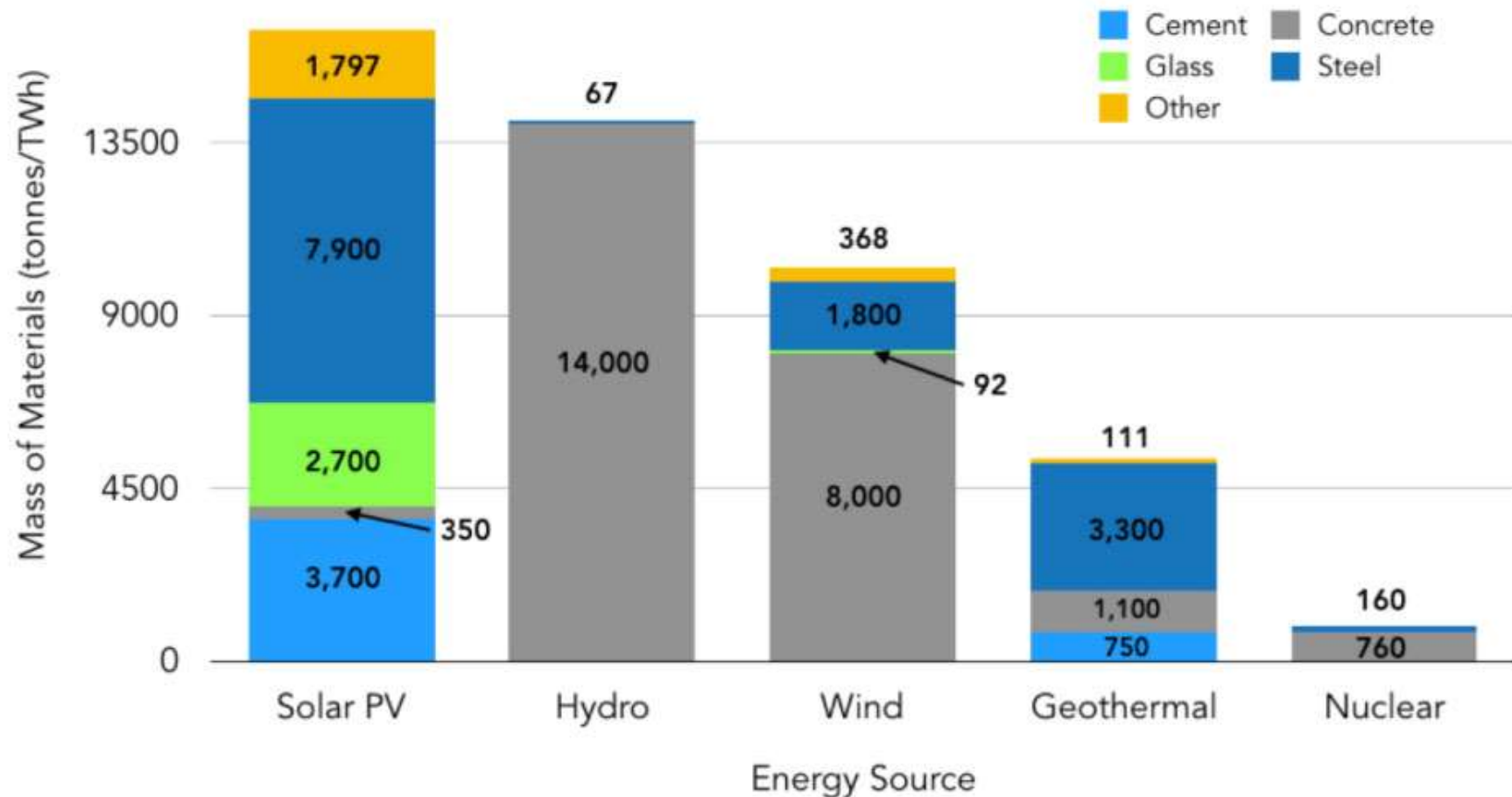
Emissions de CO₂ : construction 1 million de tonnes.

60 ans, 720 TWh : 0.5 g CO₂/kWh.

Eolien : 8 fois plus de béton, 12 fois plus d'acier, matériaux critiques.

Est-ce bien une source d'énergie renouvelable ?

Matériaux [tonnes/TWh]



"Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled on the graph.

Réseaux électriques : gestion des fluctuations

Comment assurer, en tout lieu et à tout instant :
 $\text{Production}(x,t) = \text{Demande}(x,t)$?

Stockage : le joker ?

Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)

Stockage électrochimique (batteries)

Hydrogène

*Cf. Article stockage dans
Techniques de l'Ingénieur*

Station de transfert d'énergie par pompage (STEP)



Barrage de Grand Maison, France



Une solution pour
l'intermittence de
l'éolien ?

STEP, suite

**Grand'Maison : 1,8 GW fournissant environ 1,4 TWh par an
(10% du potentiel)**

**140 millions de m³, débit de 200 m³/s : vide
en 1 semaine**

Garnir les côtes de STEP ?

**exemple : stocker 1% de la consommation de la France (3
jours), 5 TWh**

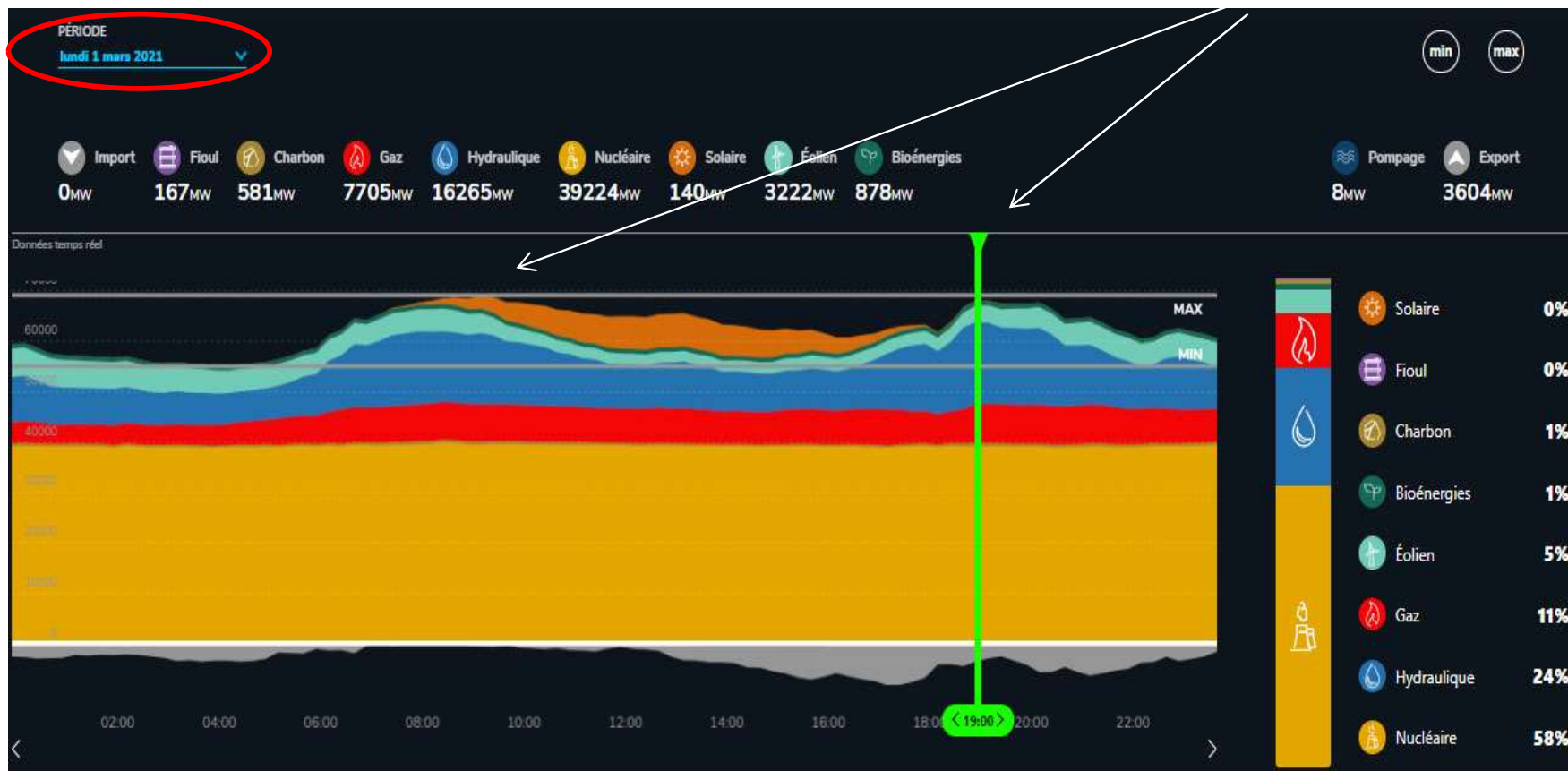
**5000 km de côtes, barrage de 20m de haut avec chute d'eau
de 10m : 1,8 km de large ...**

Comparaisons des fluctuations :

**fluctuations de la demande,
fluctuations de la production
intermittentes**

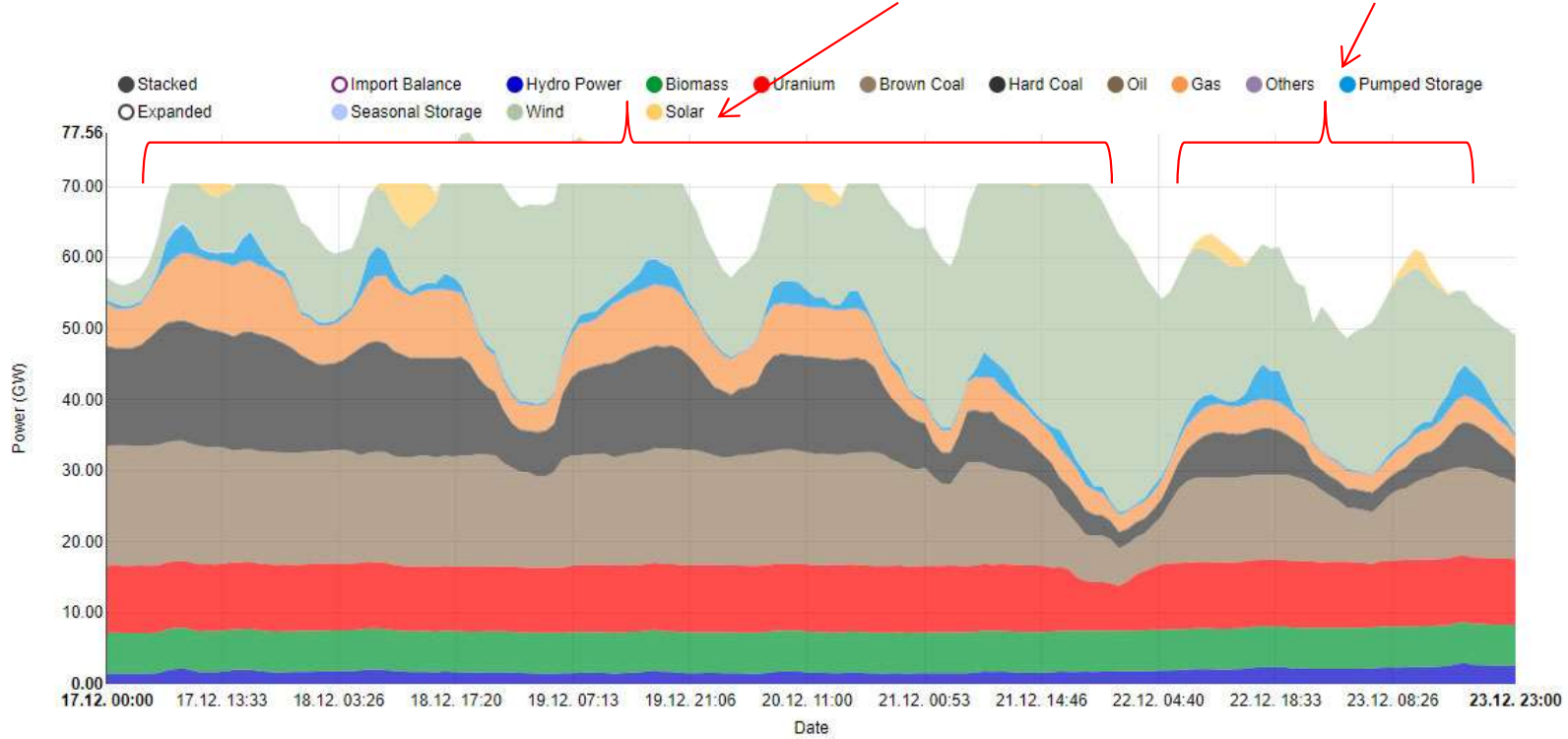
Fluctuations de la demande d'électricité sur une journée : de 10 à 15% de la puissance moyenne

Pics du matin et de 19h :
gérés par l'hydroélectricité

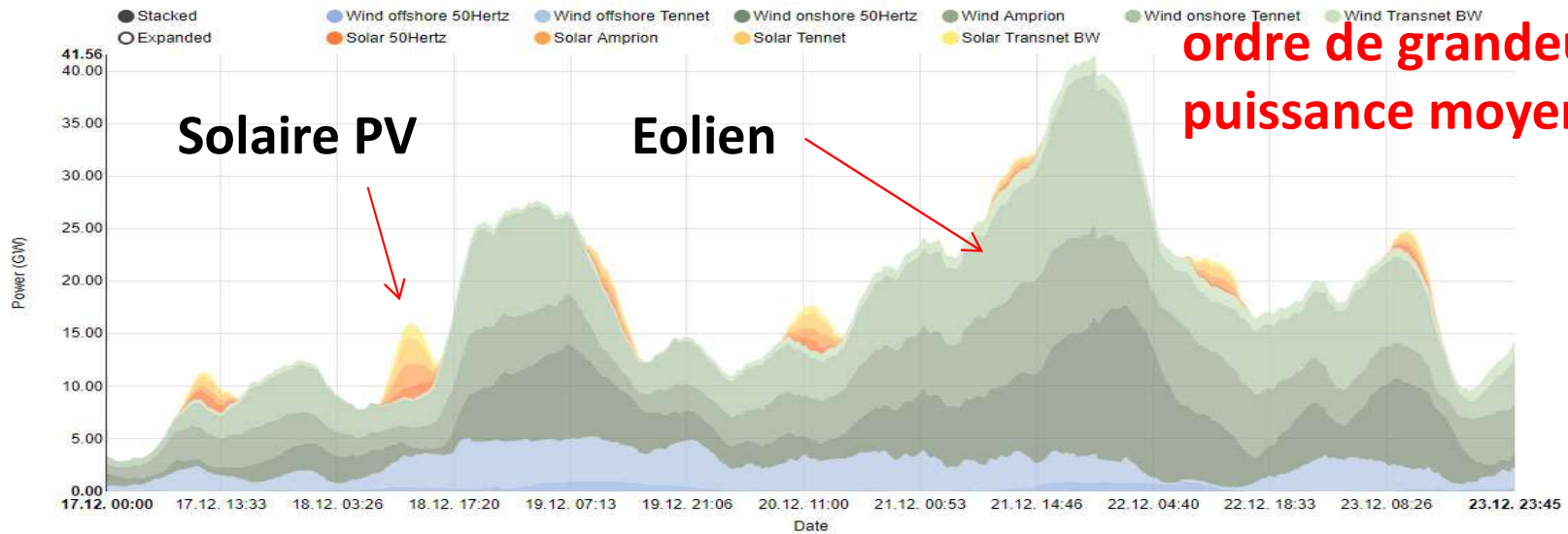


Production sur une semaine : jours ouvrés

week-end



Fluctuations du même ordre de grandeur que la puissance moyenne



Comparaison des fluctuations

Fluctuations de la **demande** : environ 10% de la puissance moyenne

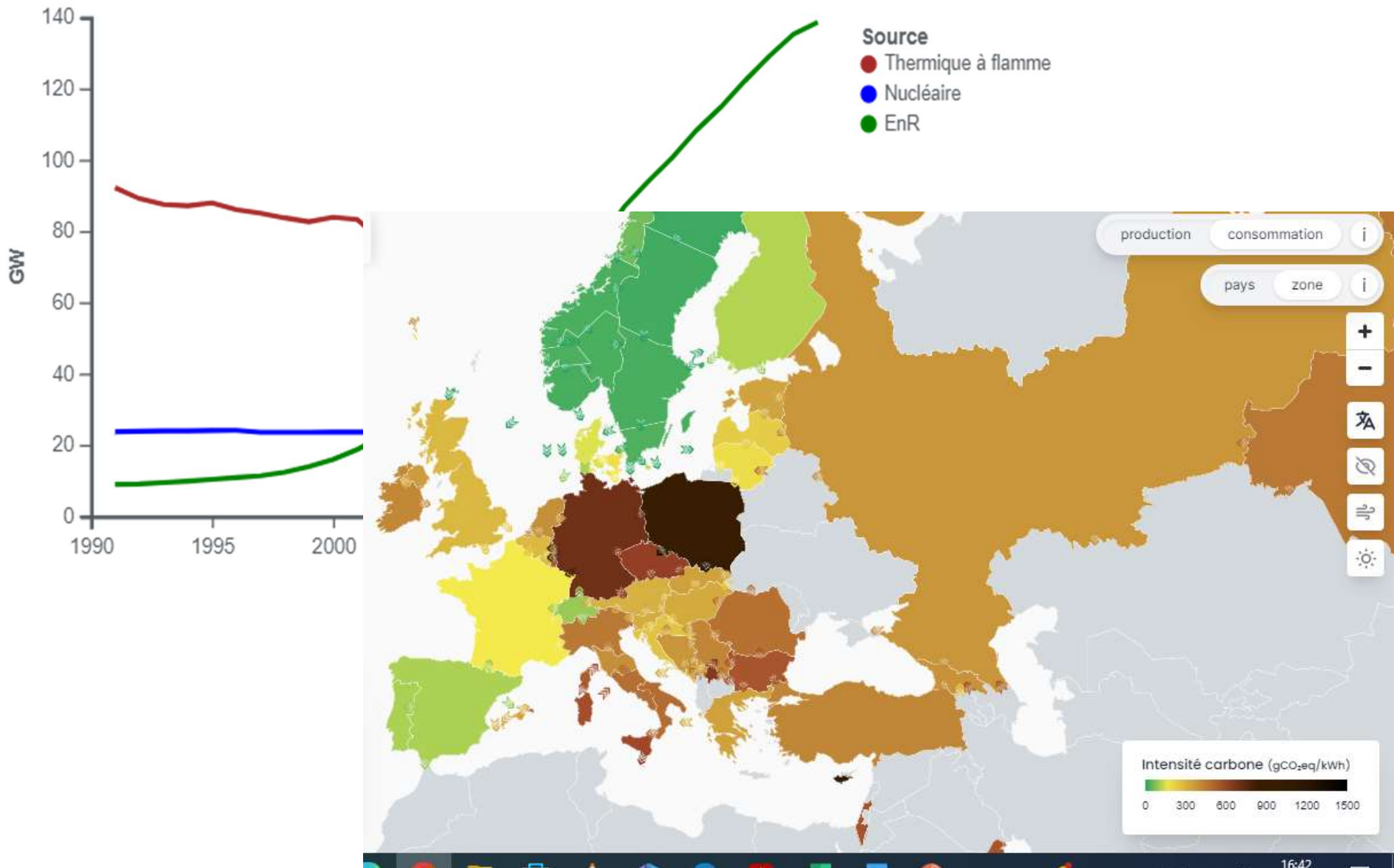
Fluctuations des **productions intermittentes** : du même ordre de grandeur que la puissance moyenne

D'où nécessité de stockage ou de back-up pour gérer les fluctuations de la production

En Allemagne : back-up fourni par le charbon, le lignite et de plus en plus le gaz

L'installation de 120 GW d'éolien et de PV **n'a pas permis de diminuer la puissance pilotable installée**

Une expérience en vraie grandeur



Stockage électrochimique

Ordre de grandeur de la densité d'énergie stockée : 1 eV par atome , soit $1,6 \cdot 10^{-19}$ J/at

Densité d'énergie de stockage : de quelques dizaines à quelques centaines de Wh/kg

Stocker 1% de la consommation d'électricité en France : 5 TWh

Energie de toutes les batteries du monde : environ 1 TWh ...

Hydrogène

En France : 1 Mt/an (chimie, engrais, raffinage du pétrole)

Produit à 95% à partir de fossiles (par vaporeformage du méthane et gazéification du charbon), 3% de nos émissions de CO₂.

Production par électrolyse (pas d'émissions de CO₂ avec électricité décarbonée) :

1 kg H₂ requiert 50 kWh d'énergie et produit (centrale à gaz) 35 kWh

1 Mt H₂ requiert 50 TWh (10% de la consommation d'électricité) et permet de fournir 3 Mtep

Plan français 2035 : produire 630000 tH₂, dont 400000 t pour l'industrie et 230000 t à usage énergétique (réseau de chaleur et transport, R&D électrolyseurs), utiliser l'électricité nucléaire (piloteable, peu chère)

Limite d'usages énergétiques : exemple, consommation d'énergie finale totale France 150 Mtep, dont 30% pour les transports, soit 50 Mtep.

Il faudrait dédier environ 800 TWh ! Ca ne se fera que pour des transports collectifs (bus, remplacement de locomotives diesel)

Gestion des fluctuations si 100% EnR intermittentes ?

Déstocker 1% de la consommation d'électricité (3 jours d'hiver sans vent), soit 5 TWh ?
Consommer 140 000 tH₂ en 3 jours dans 70 centrales à gaz : inadapté !

Comment anticiper la demande d'énergie au cours du siècle ?

Aujourd'hui : 7,5 milliards d'habitants, 13,7 Gtep/an
Toutes choses égales par ailleurs,
pour 10 milliards d'habitants : 18,2 Gtep/an

Développement des pays émergents et des pays pauvres :
la demande énergétique sera sans doute dans la
fourchette 20-25 Gtep.

Du global au local, et retour Un exemple ?

