

Anthropocène : perception des limites du système Terre



*J. Treiner Université Paris-Cité et Shift
Project*

jtreiner@orange.fr

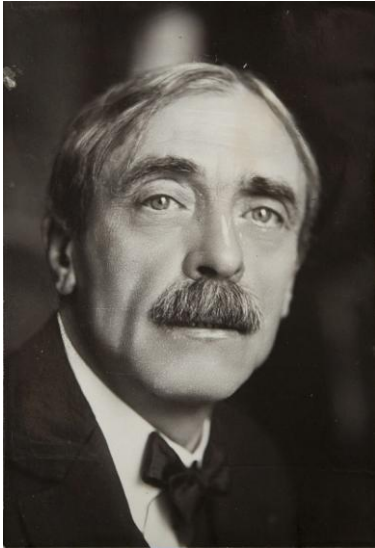
Jean-Baptiste Say

Traité d'économie politique (1803)

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

Prélude

Paul Valéry, Regards sur le monde actuel (1931)



*Toute la terre habitable a été de nos jours reconnue, relevée, partagée entre des nations. L'ère des terrains vagues, des territoires libres, des lieux qui ne sont à personne, donc l'ère de libre expansion, est close. Plus de roc qui ne porte un drapeau ; plus de vides sur la carte ; plus de région hors des douanes et hors des lois ; plus une tribu dont les affaires n'engendrent quelque dossier et ne dépendent, par les maléfices de l'écriture, de divers humanistes lointains dans leurs bureaux. **Le temps du monde fini commence.***



...et la recherche de micrométéorites dans la haute atmosphère : concurrence avec les poussières de peinture !



Published: 03 January 2002

Geology of mankind

Paul J. Crutzen

Nature 415, 23(2002) | [Cite this article](#)

38k Accesses | 1750 Citations | 421 Altmetric | [Metrics](#)

For the past three centuries, the effects of humans on the global environment have escalated. Because of these anthropogenic emissions of carbon dioxide, global climate may depart significantly from natural behaviour for many millennia to come. It seems appropriate to assign the term

'Anthropocene' to the present, in many ways human-dominated, geological epoch, supplementing the Holocene –

the warm period of the past 10–12 millennia. The Anthropocene could be said to have started in the latter part of the eighteenth century, when analyses of air trapped in polar ice showed the beginning of growing global concentrations of carbon dioxide and methane.

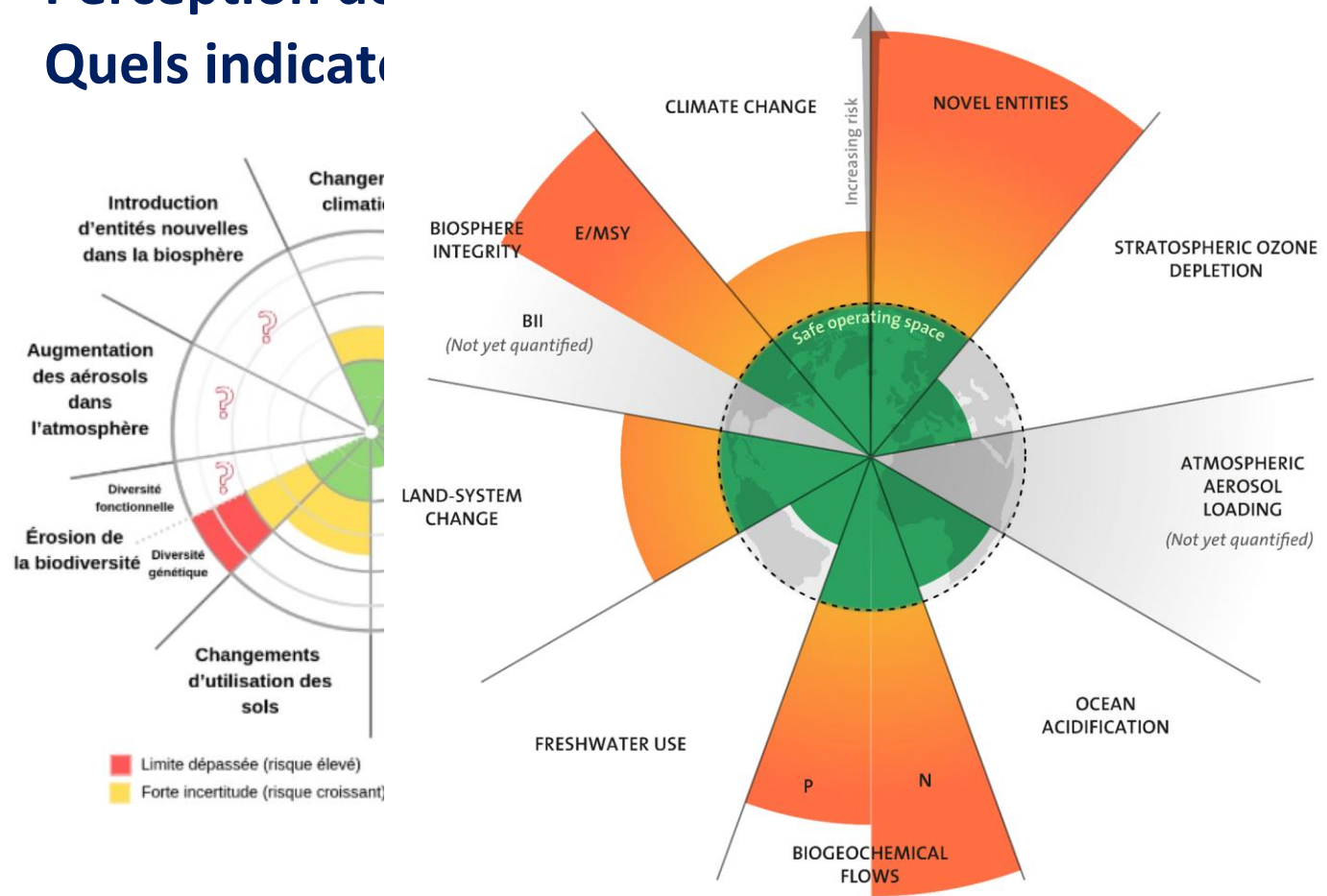
This date also happens to coincide with James Watt's design of the steam engine in 1784.

Many toxic substances are released into the environment, even some that are not toxic at all but nevertheless have severely damaging effects, for example the chlorofluorocarbons that caused the Antarctic 'ozone hole' (and which are now regulated). Things could have become much worse: the ozone-destroying properties of the halogens have been studied since the mid-1970s. If it had turned out that chlorine behaved chemically like bromine, the ozone hole would by then have been a global, year-round phenomenon, not just an event of the Antarctic spring. More by luck than by wisdom, this catastrophic situation did not develop.

The Anthropocene

The Anthropocene could be said to have started in the late eighteenth century when analyses of air trapped in polar ice showed the beginning of growing global concentrations of carbon dioxide and methane.

Perception des limites du système-Terre · Quels indicateurs



*Comment savons-nous
ce que nous savons ?*

*Qu'est-ce que
« comprendre » ?*

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.

Deux (jolies) citations

Henri Poincaré : *On fait la science avec des faits comme on fait une maison avec des pierres, mais une accumulation de faits n'est pas pus de la science qu'un tas de pierres n'est une maison.*

Albert Einstein : *Ce qui est incompréhensible, c'est que le monde soit compréhensible.*

NATIONAL CONSERVATISM



Department of Energy Issues Report Evaluating Impact of Greenhouse Gasses on U.S. Climate, Invites Public Comment

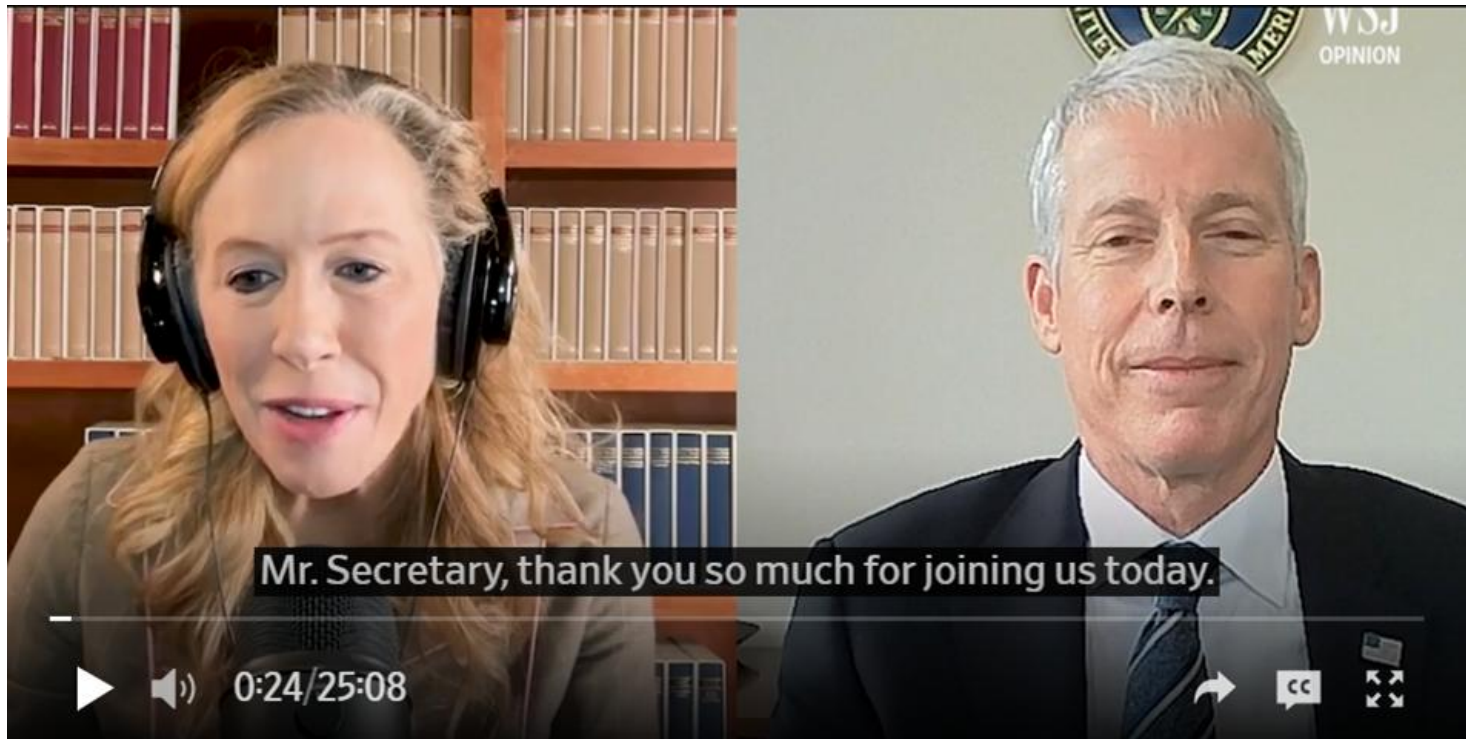
The U.S. Department of Energy today released a new report evaluating existing peer-reviewed literature and government data on climate impacts of Greenhouse Gas Emissions and providing a critical assessment of the conventional narrative on climate change.

[Energy.gov](#)

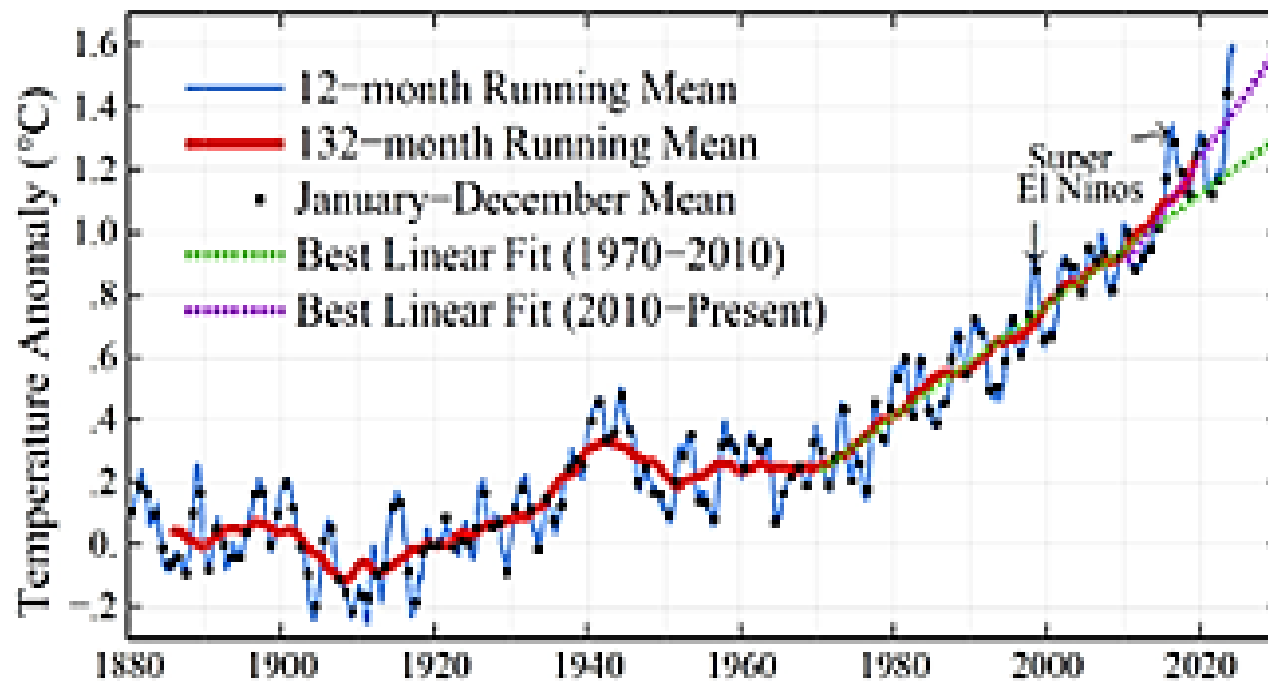
July 29, 2025

 6 min

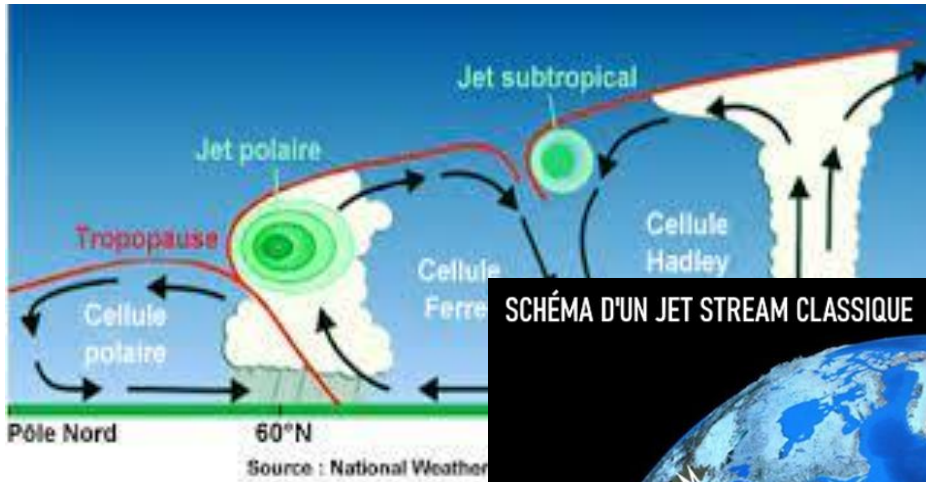
Chris Wright chez Kim Strasser, WSJ



Anomalie de température



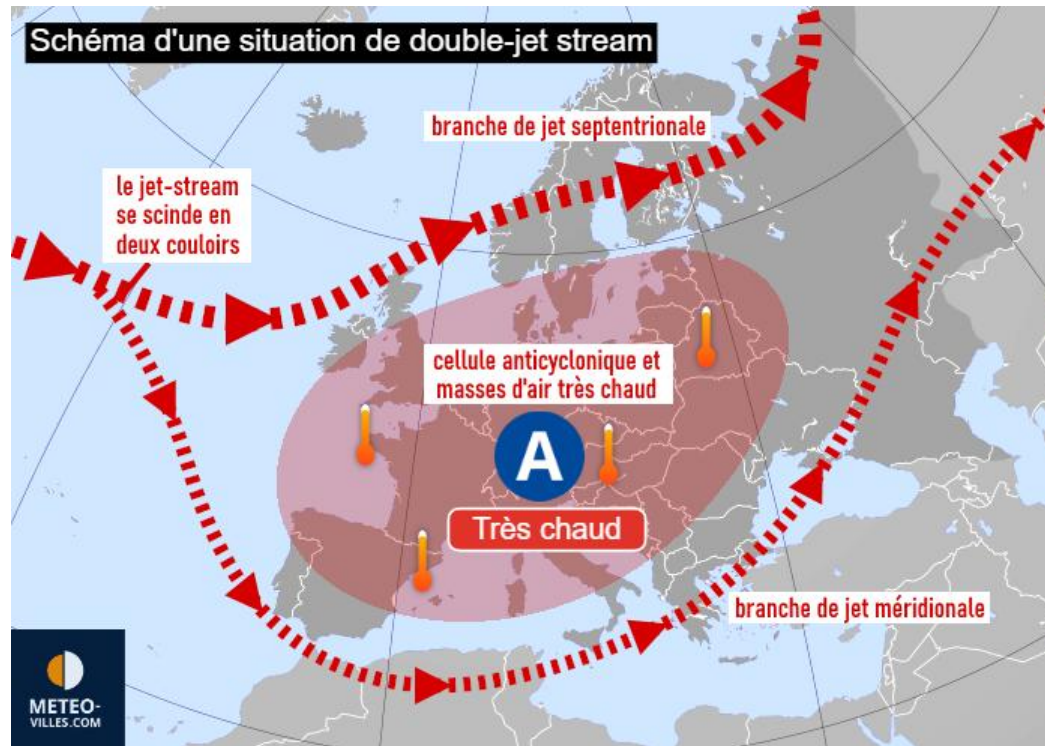
Circulation atmosphérique à grande échelle



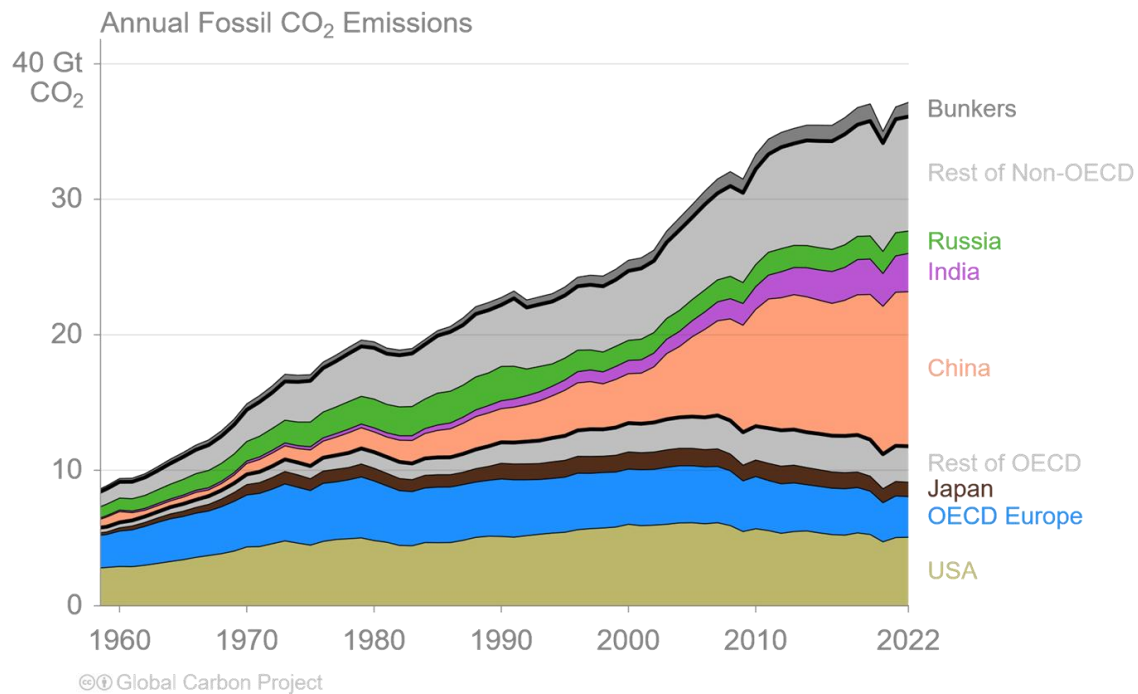
SCHEMA D'UN JET STREAM CLASSIQUE



Eté 2022 ...

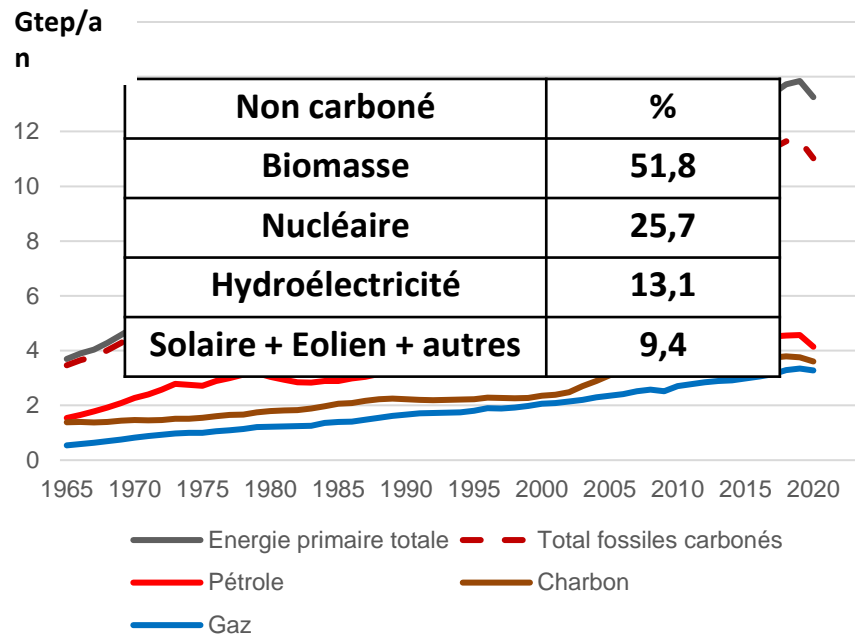


Breakdown of global fossil CO₂ emissions by country

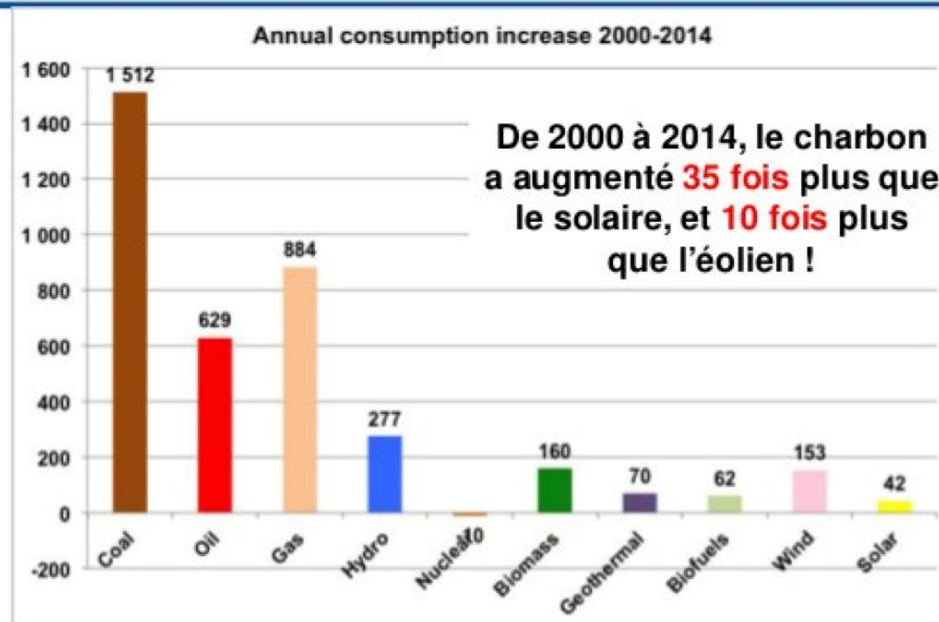


Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

Consommation mondiale d'énergie primaire



En route vers le tout renouvelable !

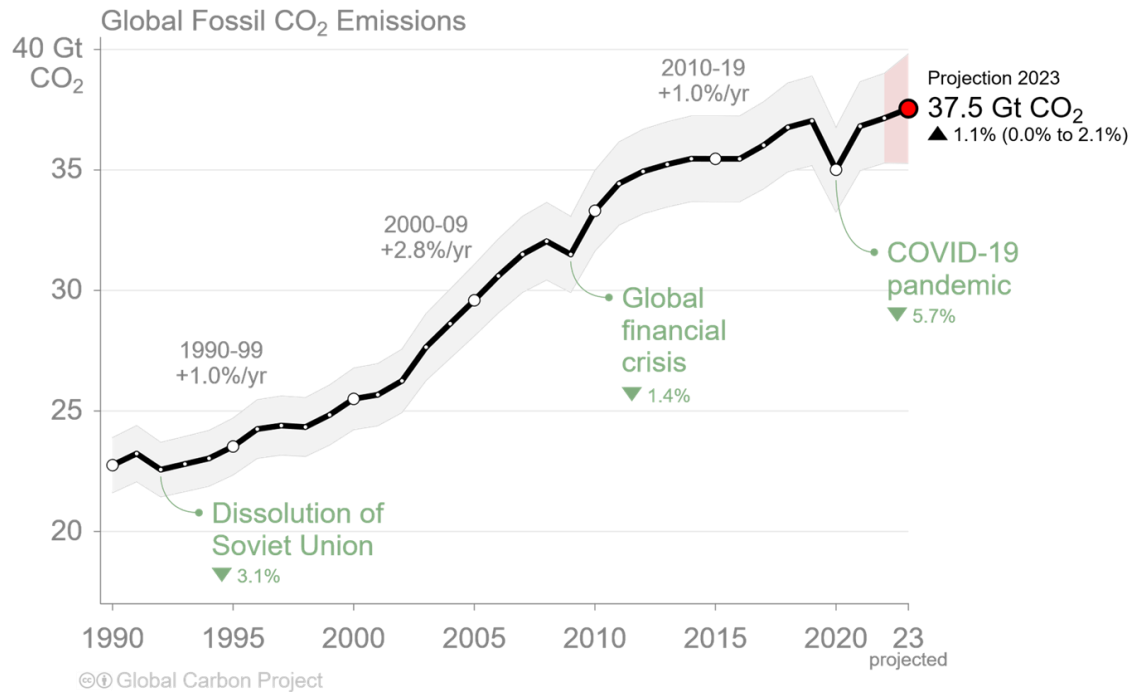


Surplus de consommation mondiale par énergie entre 2000 et 2014. Jancovici, sur données BP Statistical Review 2015 & divers

Global Fossil CO₂ Emissions

Global fossil CO₂ emissions: 37.1 ± 2 GtCO₂ in 2022, 63% over 1990

- Projection for 2023: 37.5 ± 2 GtCO₂, 1.1% [0.0% to +2.1%] higher than 2022



Uncertainty is ±5% for one standard deviation (IPCC “likely” range)

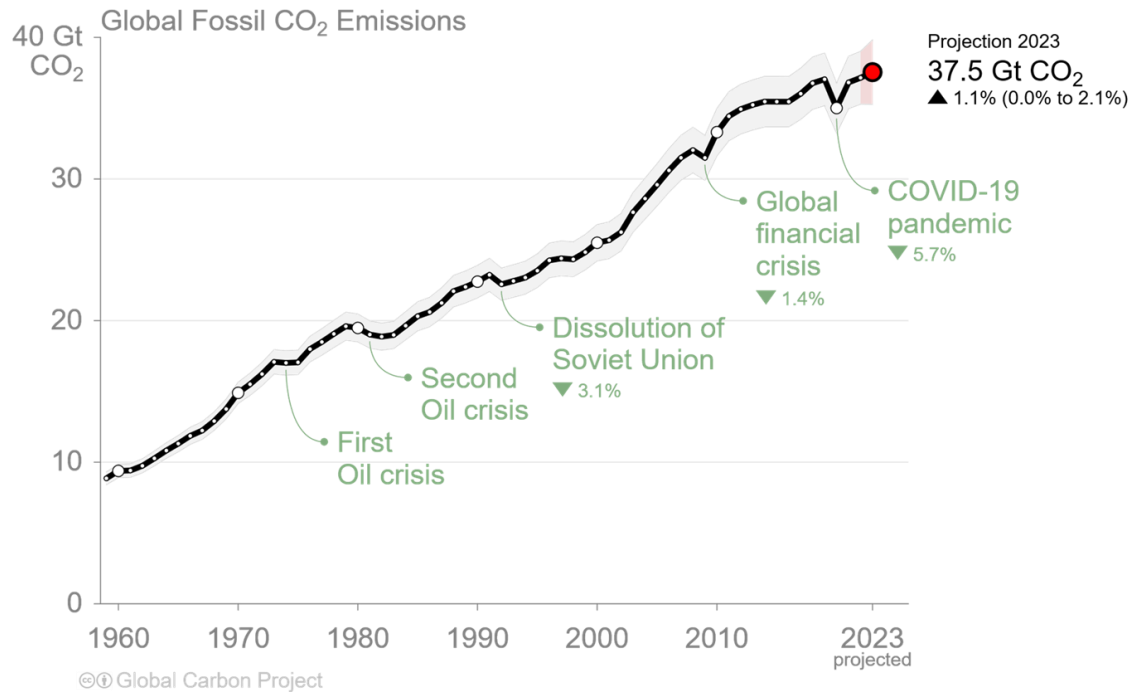
When including cement carbonation, the 2022 and 2023 estimates amount to 36.4 ± 2 GtCO₂ and 36.8 ± 2 GtCO₂ respectively

The 2023 projection is based on preliminary data and modelling.

Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

Global fossil CO₂ emissions

Global fossil CO₂ emissions have risen steadily over the last decades. Emissions are set to grow again in 2023.



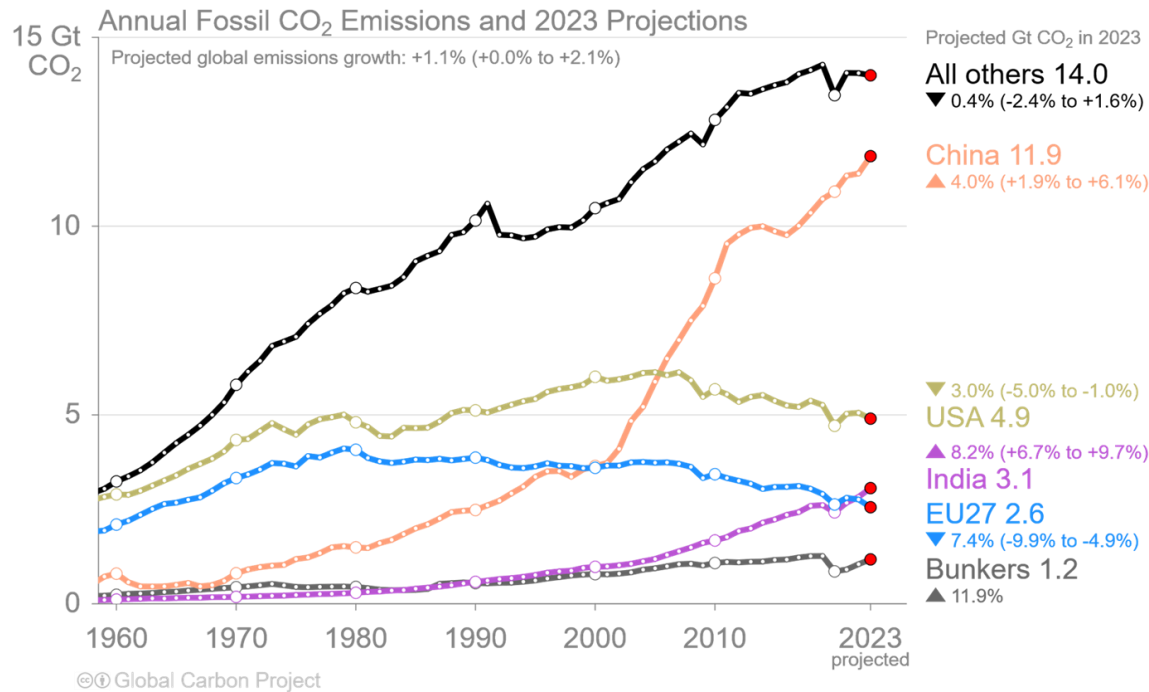
When including cement carbonation, the 2023 estimate is 36.8 ± 2 GtCO₂.

The 2023 projection is based on preliminary data and modelling.

Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

Emissions Projections for 2023

There are sharp contrasts between the projected emissions changes for the top emitters



The 2023 projections are based on preliminary data and modelling.
 'Bunkers' are fossil fuels (oil) used for shipping and aviation in international territory

Source: [Friedlingstein et al 2023](#); [Global Carbon Project 2023](#)

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

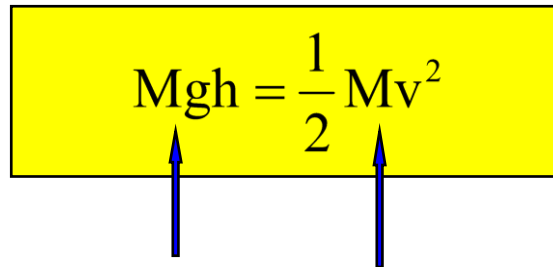
Les mots et les choses

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

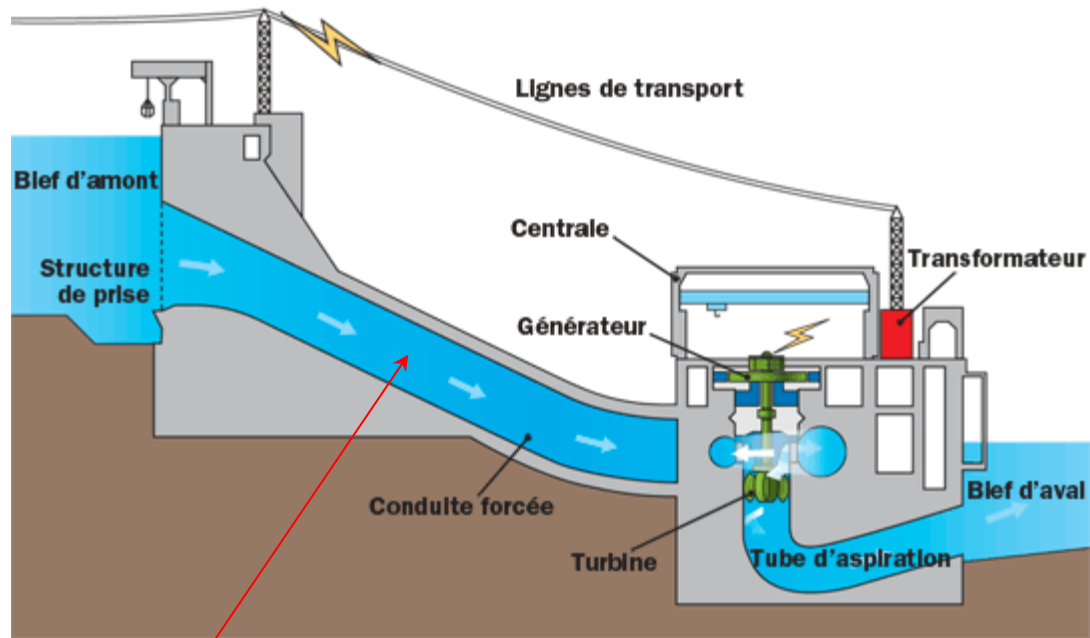
Un corps tombe : il perd de l'altitude, il gagne de la vitesse
Question : y a-t-il un rapport entre cette perte et ce gain ?

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


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

Relation PIB/énergie

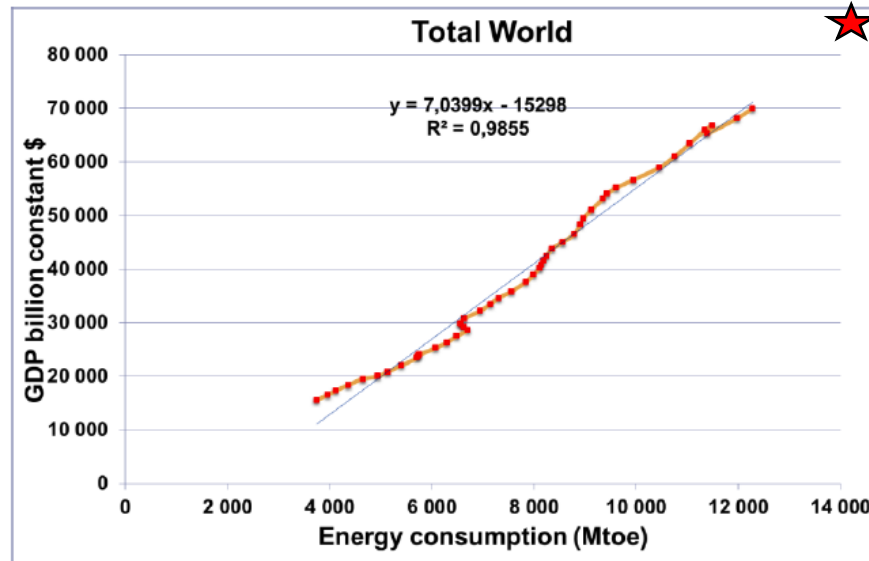
Nous vivons de transformer la matière pour produire des biens et des services.

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

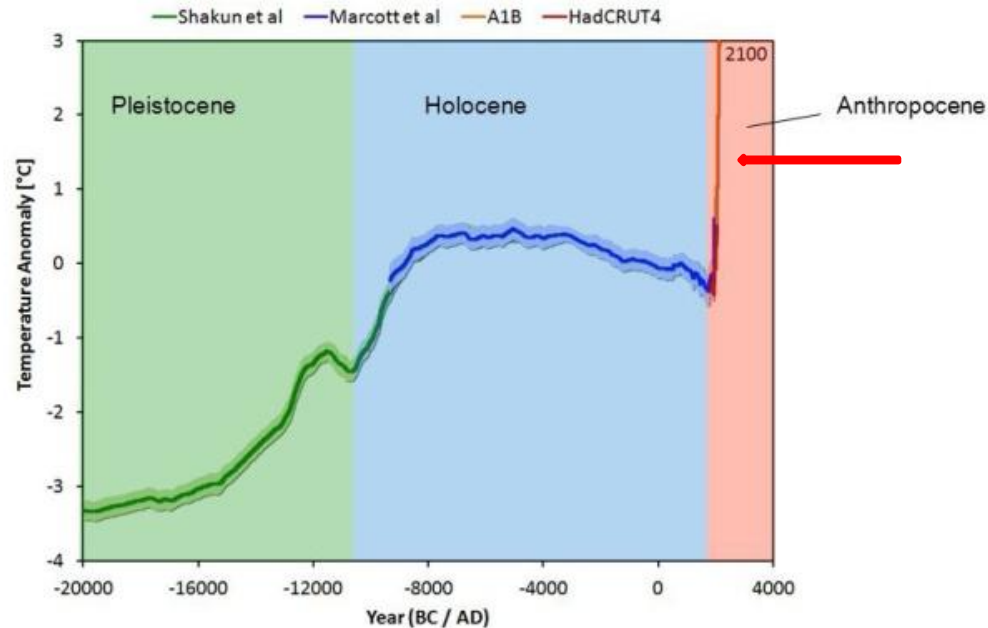
Relation PIB/énergie : un simple changement d'unité !



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

En moyenne 1,56 kWh correspond à 1 \$ de PIB

Une ère, vraiment ?



Global temperature variation since the last ice age 20,000 years ago, extended until 2100 for a medium emissions scenario with about 3 degrees of global warming. Graph: Jos Hagelaars, via RealClimate: <http://www.realclimate.org/index.php/archives/2013/09/paleoclimate-the-end-of-the-holocene/>

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

Energie et puissance, exemples et comparaisons

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,

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

Promenade en montagne : 70 kg, 8 heures, 300 mètres de dénivelé à l'heure

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

0,5 kWh d'énergie ou 62,5 W de puissance

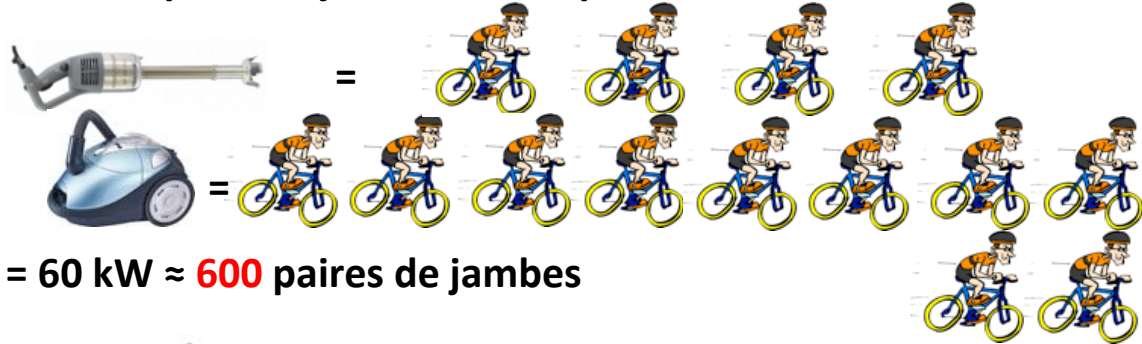
Avec un peu d'entraînement, disons **100 W** (**10 W** avec les bras)

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 !

Stocks/flux

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

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

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

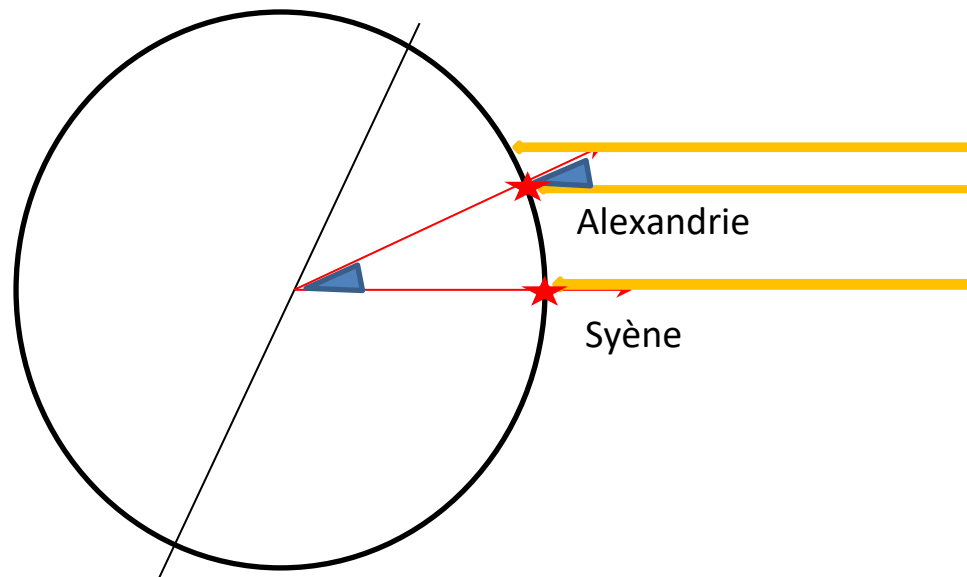
Energies de flux : flux non pilotables, quantifier les flux et leurs fluctuations

Dans les deux cas, besoin en **matériaux** ?

Comprendre ?

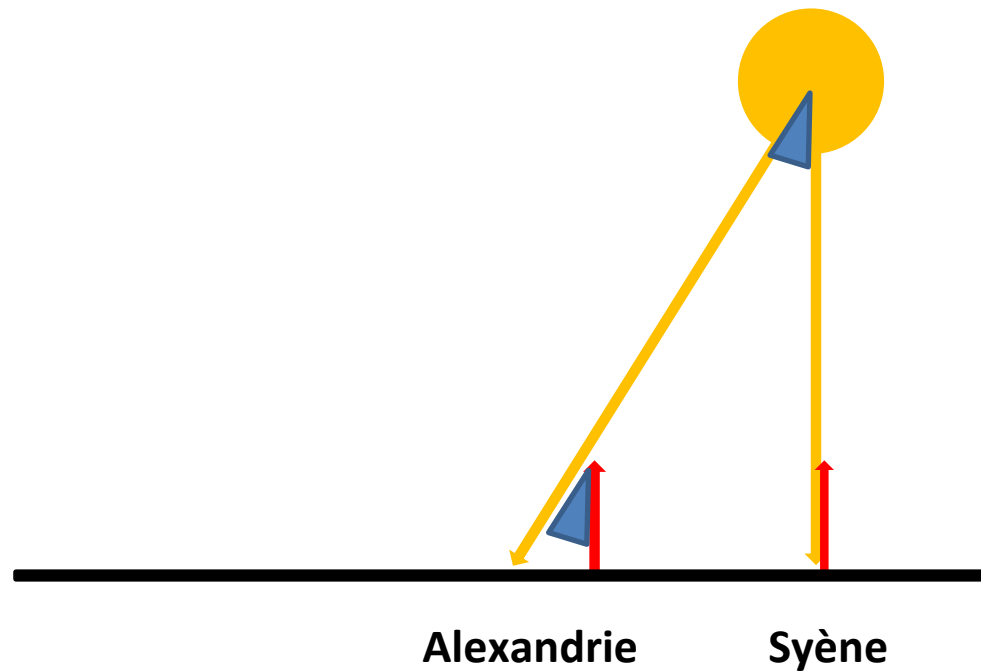
**Comprendre, c'est reconstruire le réel par la pensée,
c'est imaginer ce qu'on voit**

Première détermination du rayon de la Terre, Eratosthène (3^{ème} siècle AJC)



**Rayon de la Terre = 8 fois la
distance Syène-Alexandrie**

Mais ... reconstruction alternative !



**C'est maintenant la distance Terre-Soleil
qui vaut 8 fois la distance Syène-Alexandrie !**

Modèle de Hubbert pour l'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

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

Quelle relation entre P et Q ?

Un modèle simple pour évaluer un pic de production

Au début de l'exploitation, on s'attend à ce que P soit proportionnel à Q : plus on en a extrait, plus on est capable d'en extraire, d'où $P = \alpha Q$

Mais 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 calculer une courbe de production ?

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

De là, on peut calculer :

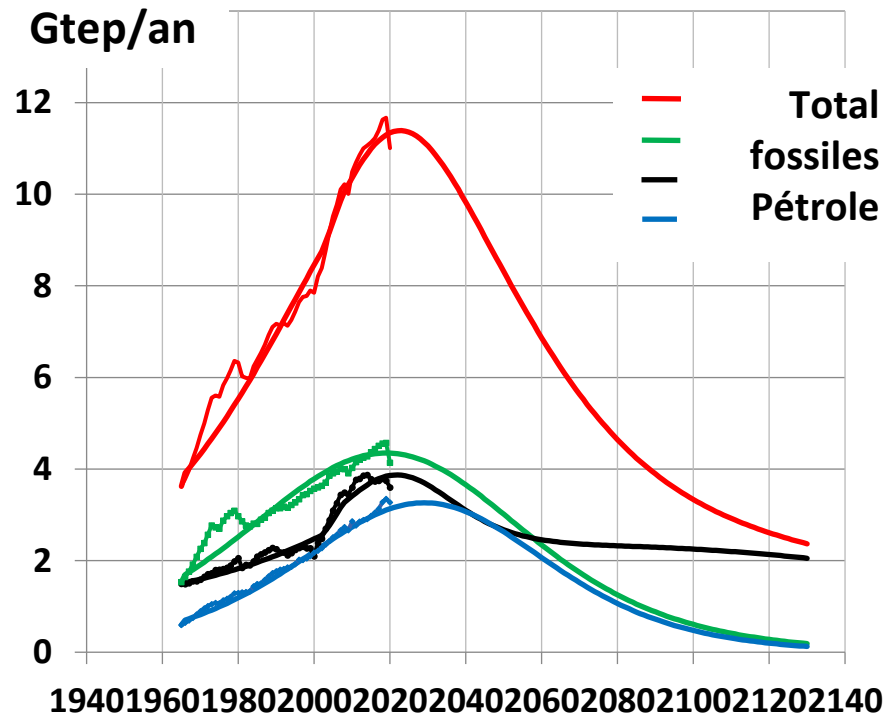
- la production l'année suivante $P(n+1) = \alpha Q(n)[1-Q(n)/Q_{\max}]$
- ce qu'on aura extrait au total $Q(n+1) = Q(n) + P(n+1)$

Et on continue.

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

Production annuelle de fossiles, données réelles et modèle d'Hubbert

Qmax : 650 Gtep charbon, 490 Gtep pétrole, 330 Gtep gaz
(Durand 2018)



Energies de flux : 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

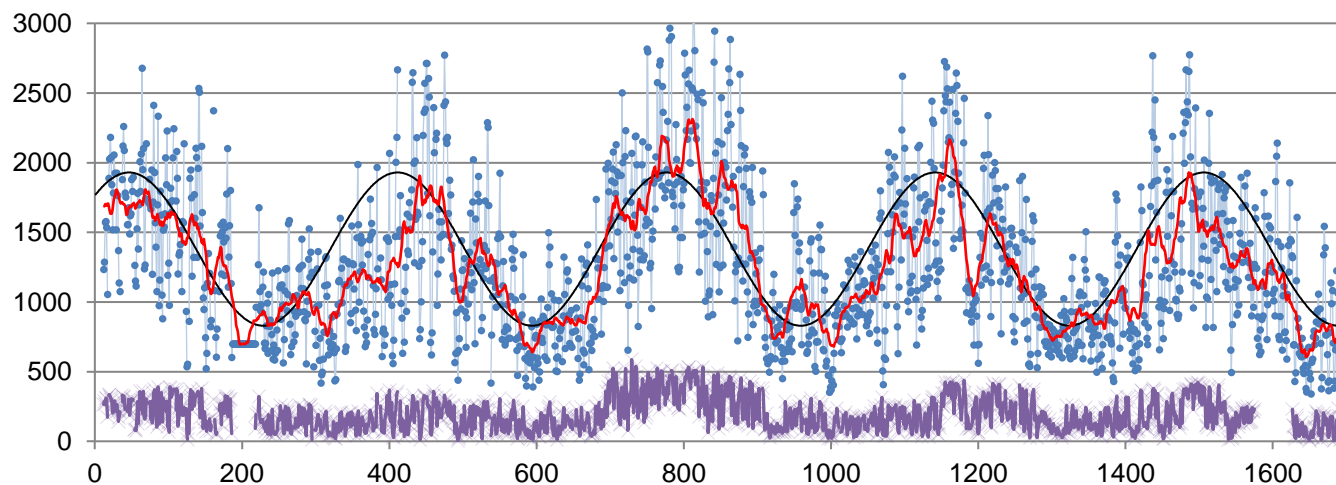
Puissance moyenne = énergie totale produite dans l'année, divisée par le nombre d'heures dans une année (8760)

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 4 dernières années

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

Production journalière (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 steack, 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

1000 éoliennes de 5 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.

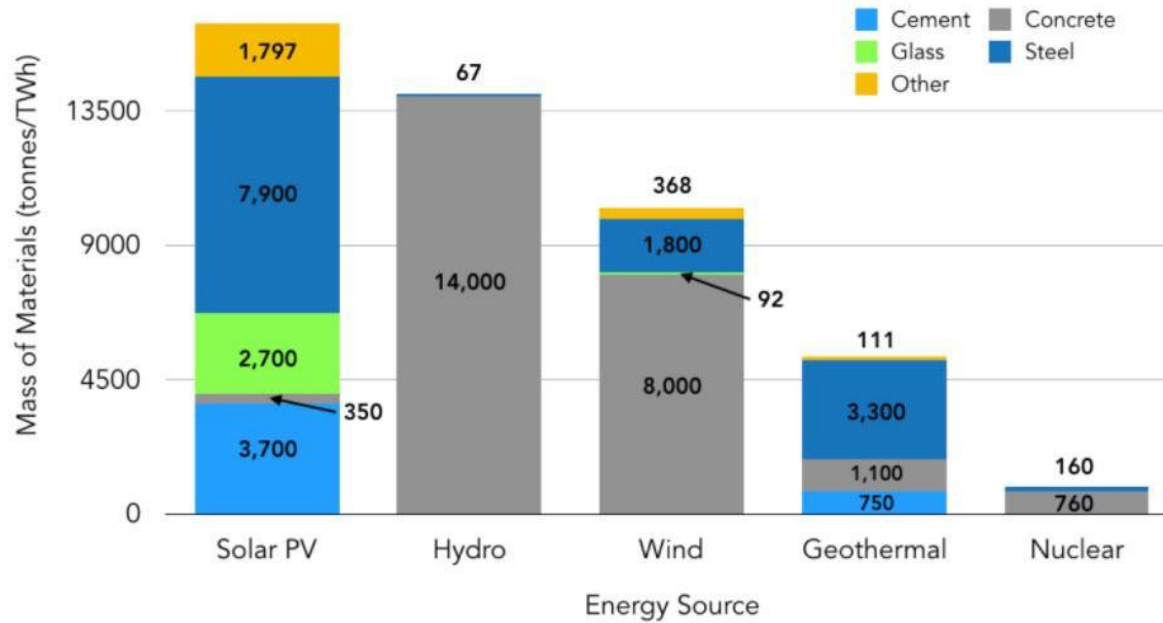
Emissions de CO₂ : construction 1 million de tonnes.

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]



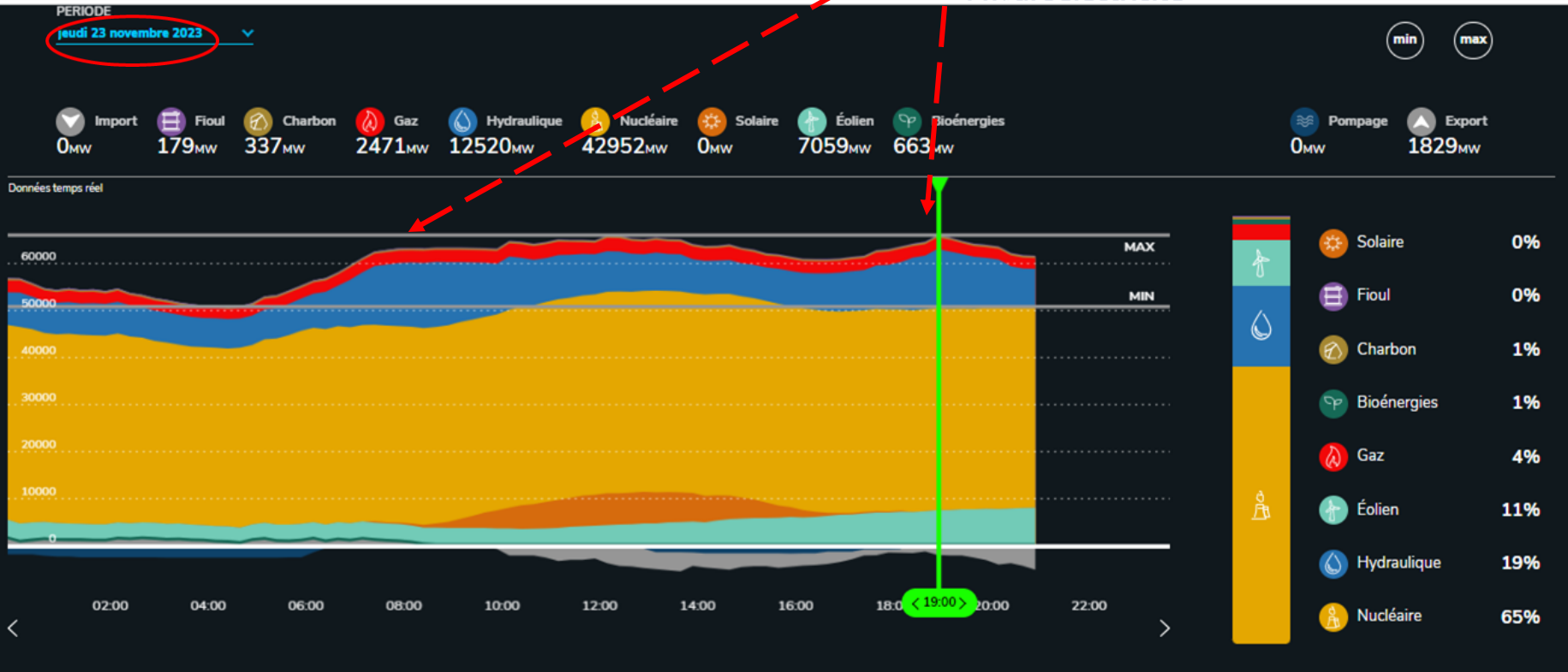
"Quadrennial Technology Review: An Assessment of Energy Technologies and Research Opportunities," Table 10. September 2015. United States Department of Energy. Nuclear and hydro require 10 tonnes/TWh and 1 tonne/TWh of other materials, respectively, but are unable to be labeled on the graph.

Réseaux électriques : gestion des fluctuations

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

Fluctuations de la demande d'électricité sur une journée : environ 5% de la puissance installée

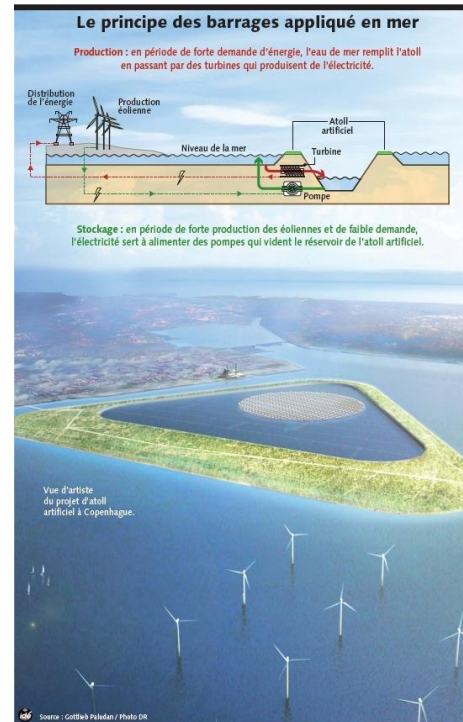
Pics du matin et de 19h :
gérés par
l'hydroélectricité



Stockage de l'énergie : 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), E=5 TWh**

**L=5000 km de côtes, barrage de 20m de haut avec chute
d'eau de h=10m, quelle largeur λ ?**

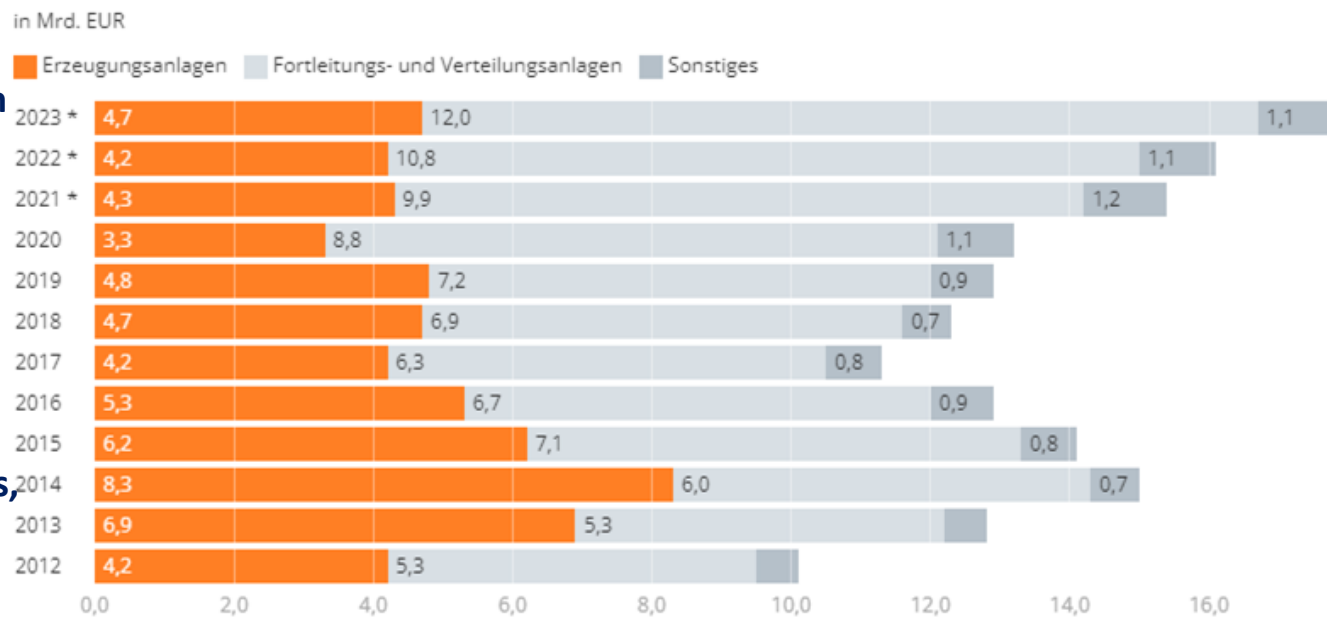
$L \cdot \lambda \cdot H \cdot \rho \cdot g \cdot h = E$, d'où $\lambda = 1,8$ km ...

**Fluctuations d'une production
intermittente : l'Allemagne, un exemple
en vraie grandeur**

Investissements dans le solaire PV et l'éolien en Allemagne

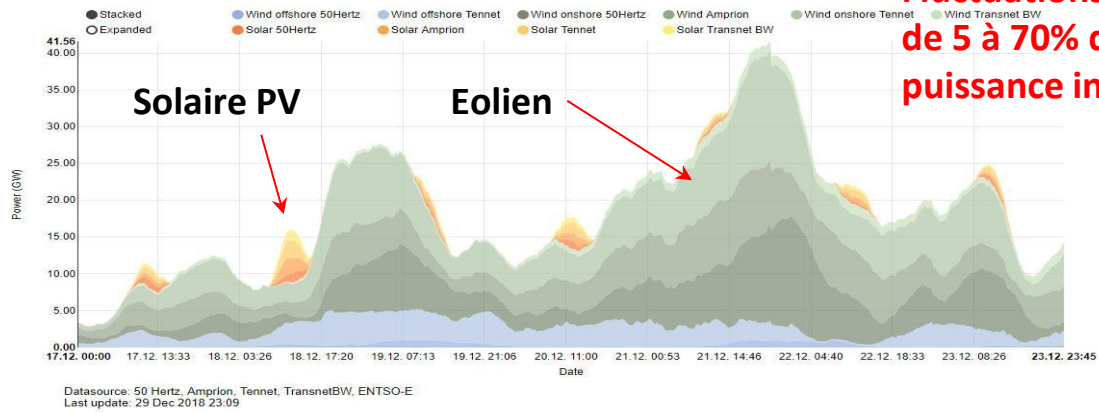
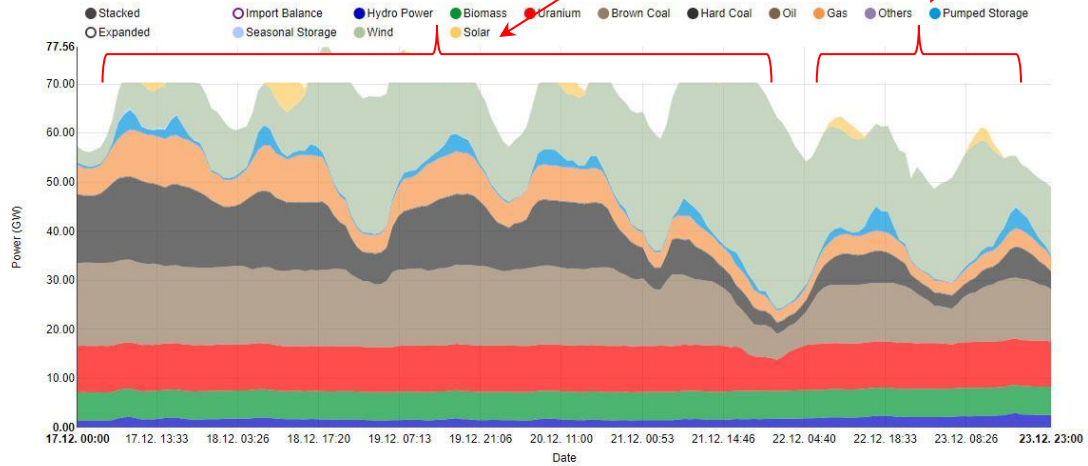
Depuis le début des années 2000 :

- 130 GW installés en éolien et solaire PV
- 340 G€
- moyenne 15 G€/an
- environ 30% de l'électricité
- prix du kWh presque double, pour les particuliers, du prix français

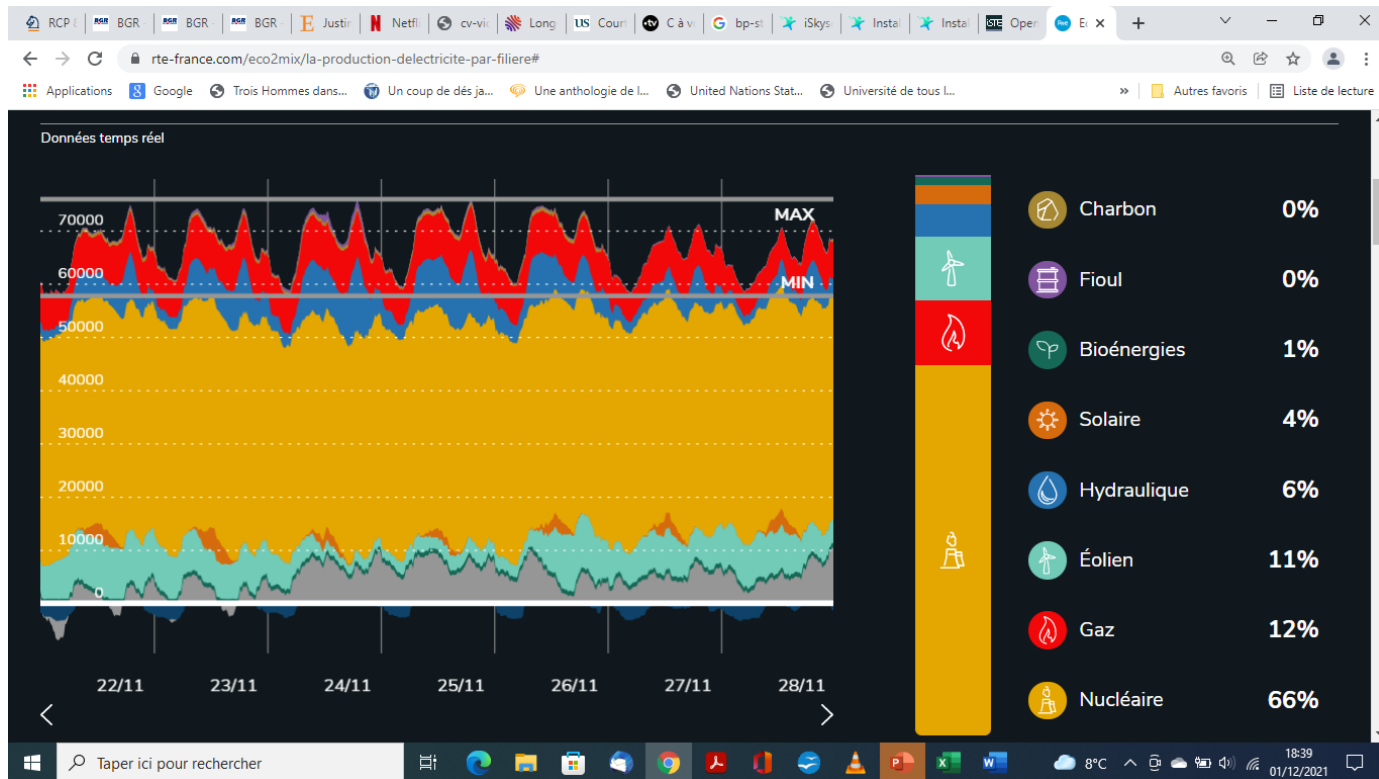


Source BDEW

Production sur une semaine : jours ouvrés week-end



Fluctuations de la production en France sur une semaine



Comparaison des fluctuations

Fluctuations de la **demande** : environ 5% de la puissance installée

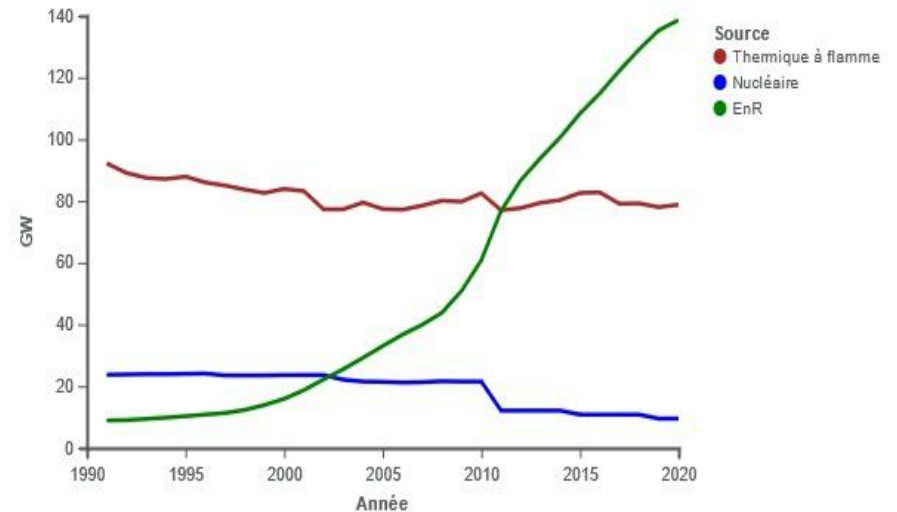
Fluctuations des **productions intermittentes** : environ 60-70% de la puissance installée

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 le gaz

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

Les émissions de CO₂, par kWh produit, sont de l'ordre de 10 fois celles de la France...



Une expérience en vraie grandeur

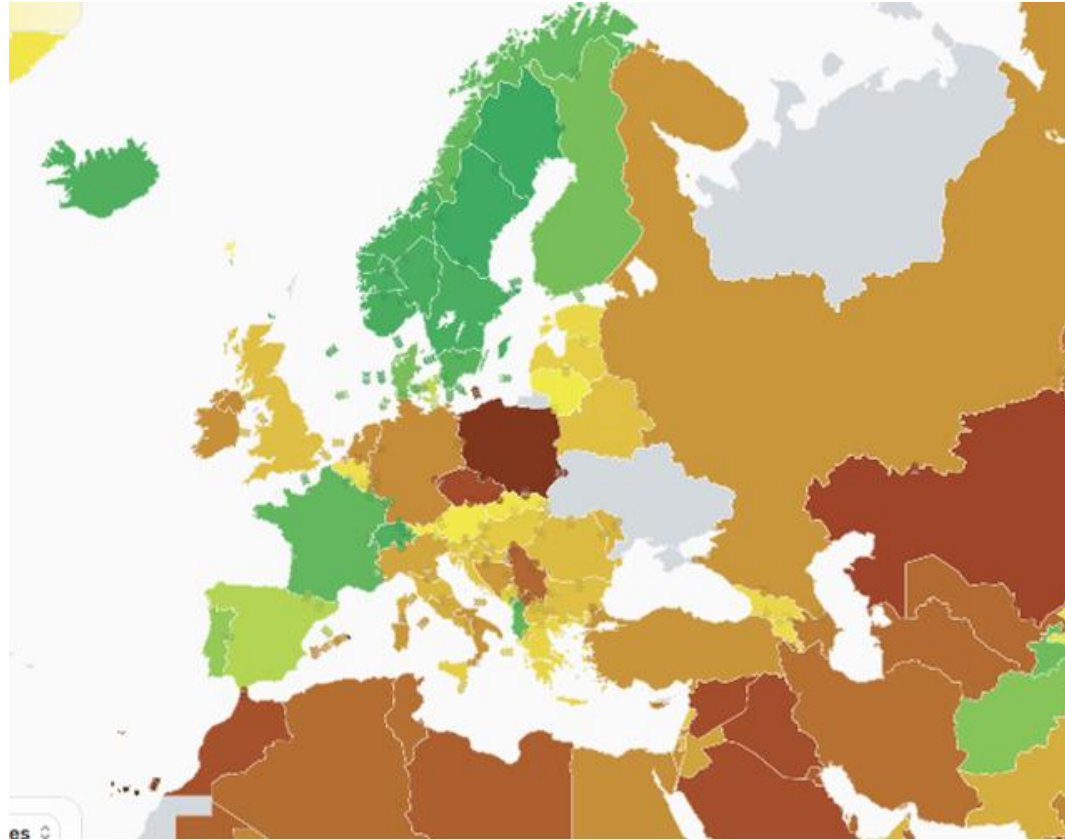
Ce matin à 9h41 :

France : 42 gCO₂/kWh

Allemagne : 400 gCO₂/kWh

Pologne : 649 gCO₂/kWh

Suède : 24 gCO₂/kWh



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 630 000 tH2, dont 400 000 t pour l'industrie et 230 000 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 pour la production d'hydrogène ! 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 : 8 milliards d'habitants, 14 Gtep/an
Toutes choses égales par ailleurs,
pour 10 milliards d'habitants : 17,5 Gtep/an

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

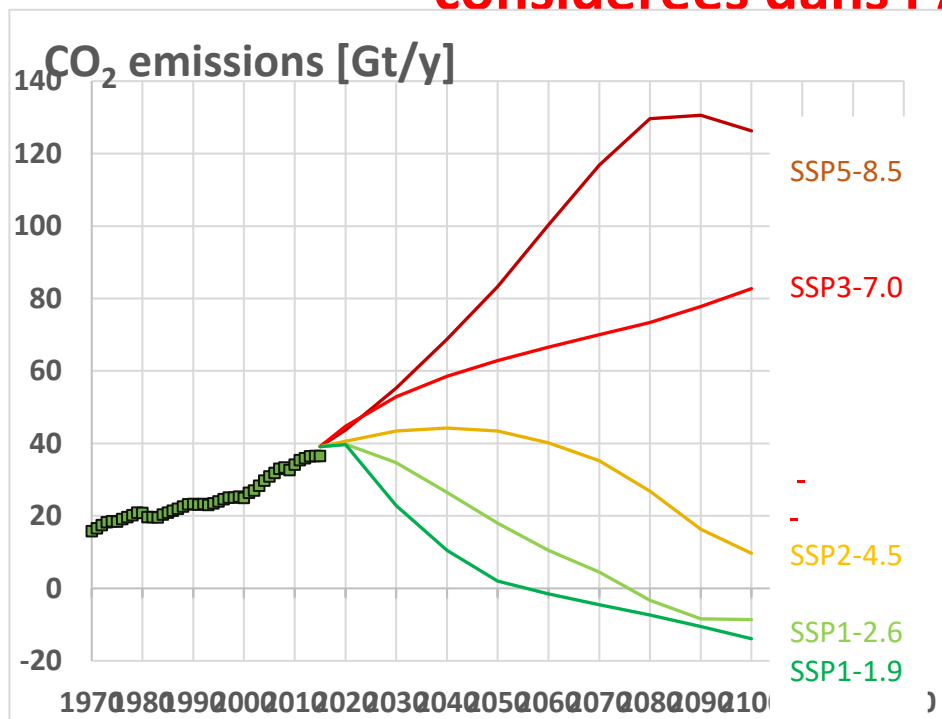
Bilan des énergies de flux (Gtep/an)

	Hydro	Biomasse		Solaire			Géoth	Eolien	Total
		biocarb.	Bois	thermique	PV	Conc.			
2020	0,9	0,03	0,9	-	0,2	-	0,02	0,4	2,45
2050	2	0,5	2	0,5	2	0,6	0,3	4	11,9
transport		X							
chaleur HT			X			X	X		
chaleur BT			X	X		X	X		
électricité	X	X	X		X	X	X	X	

Potentiel total en 2050 : 12 Gtep/an

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

Trajectoires d'émission considérées dans l'AR6 du GIEC



Réserves prouvées publiées par le
Statistical Review of World Energy
(BP2021):

505 Gtep de charbon 4,1
tCO₂/tep

244 Gtep de pétrole 3,1 tCO₂/tep

210 Gtep de gaz 2,4tCO₂/tep

La combustion de **TOUTES** les réserves
prouvées en 2100 conduit à un total de
3 331 GtCO₂ !

SSP : shared socio-economics pathway

émissions totales

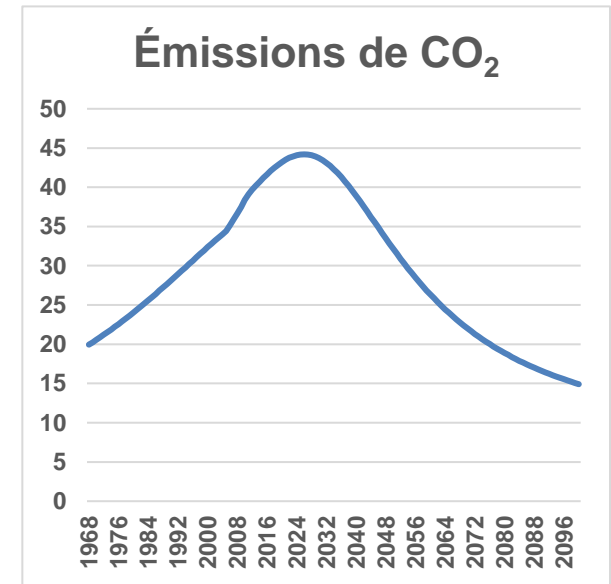
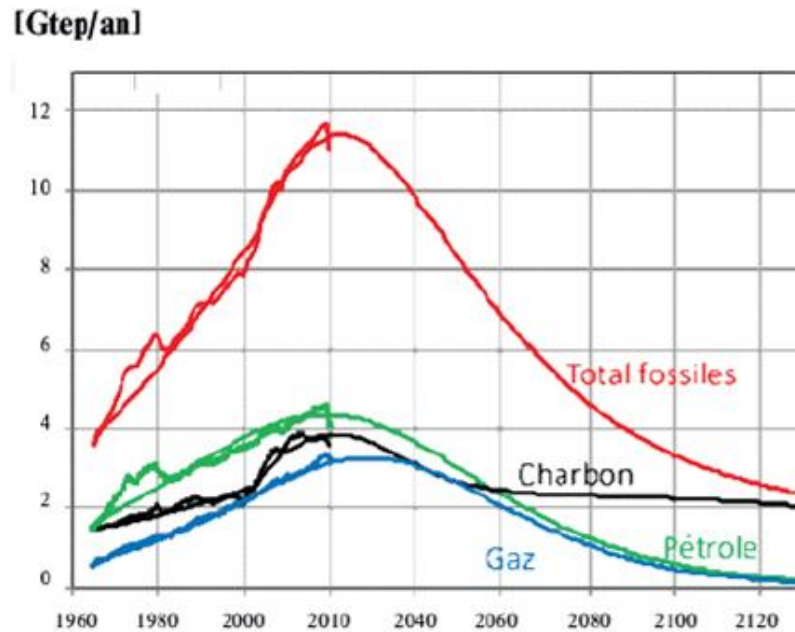
GtCO₂

SSP5-8.5 : 7800 GtCO₂

SSP3-7 : 5300

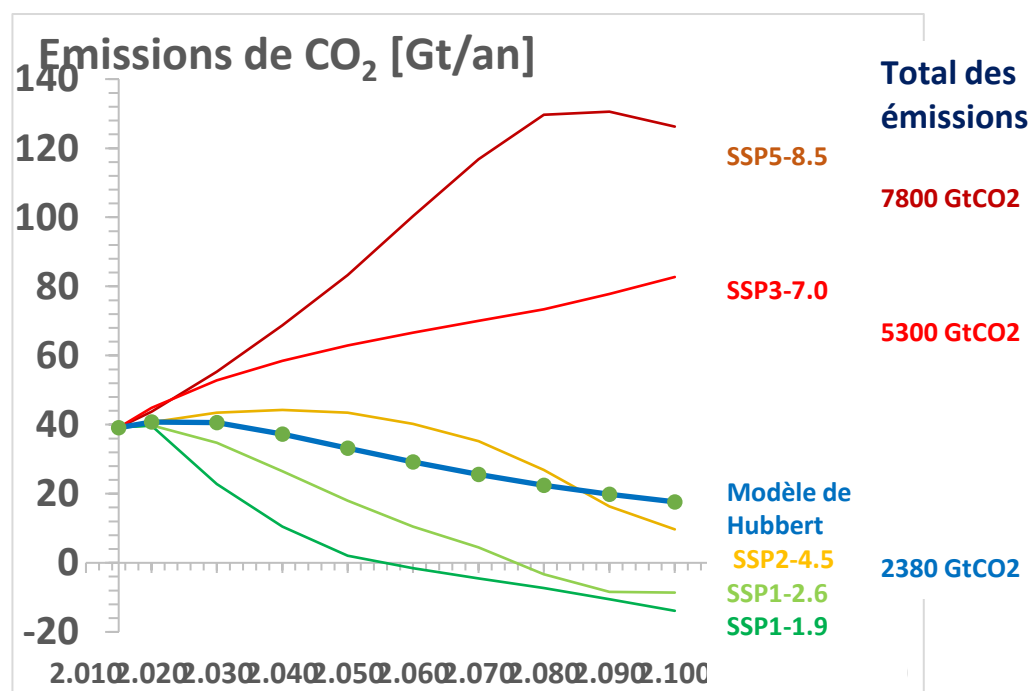
Production annuelle de combustibles fossiles, données réelles et projections à la Hubbert

650 Gtep de charbon, 490 Gtep de pétrole, 330 Gtep de gaz

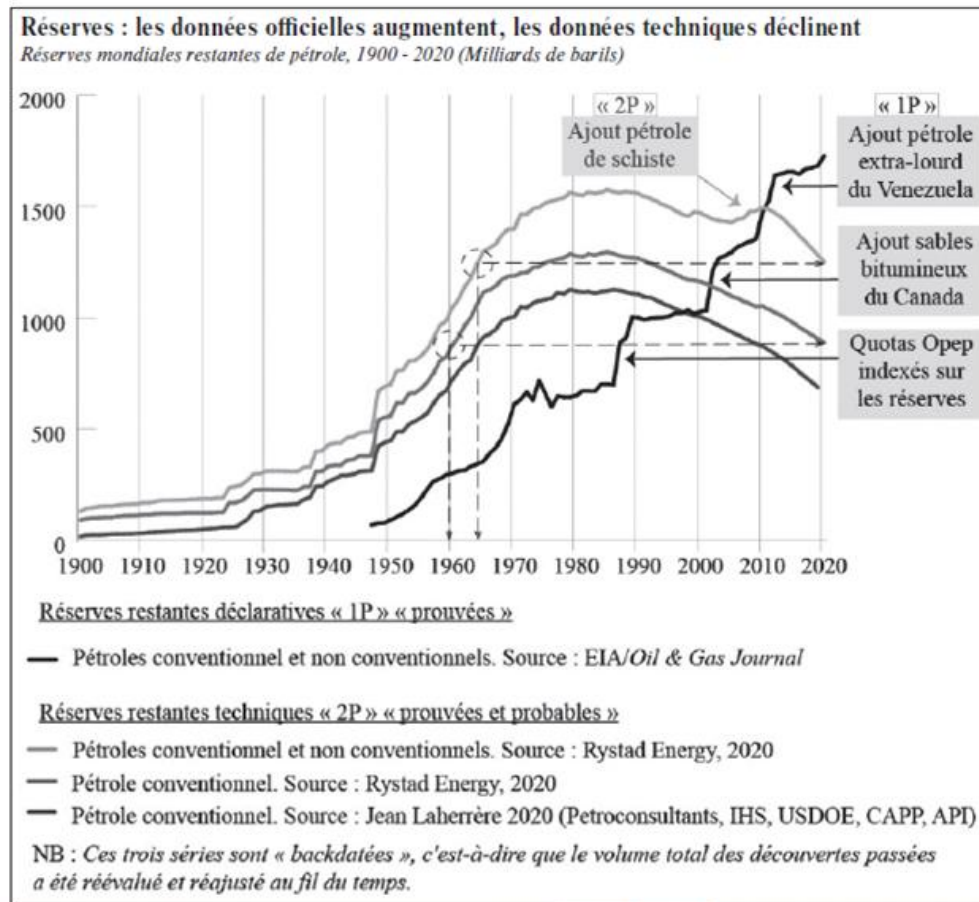


Le pic est 3 fois moins élevé que dans la trajectoire SSP5-8.5 !

Comparaison avec les trajectoires SSP



L'estimation des réserves est-elle fiable ?



Désaccord croissant entre production et nouvelles découvertes

Auzanneau et Chauvin, 2021.

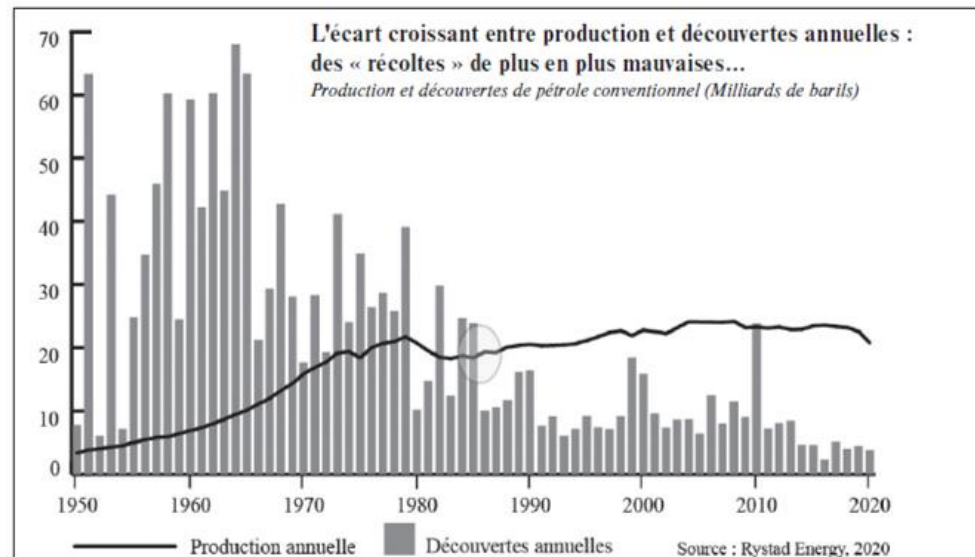


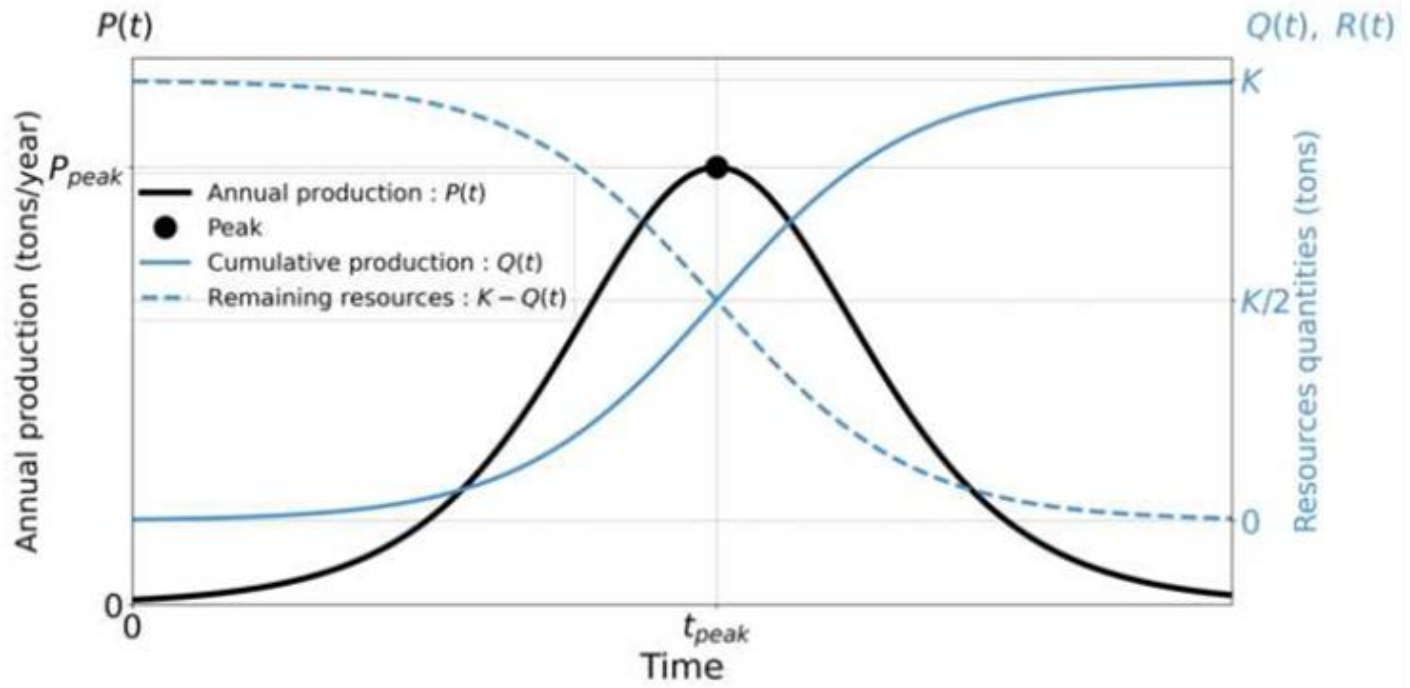
Figure A3. La consommation de pétrole est en 2020 environ six fois supérieure au volume des découvertes. Cela explique la décroissance des réserves 2P observée sur la figure A2. Source : Auzanneau et Chauvin, 2021.

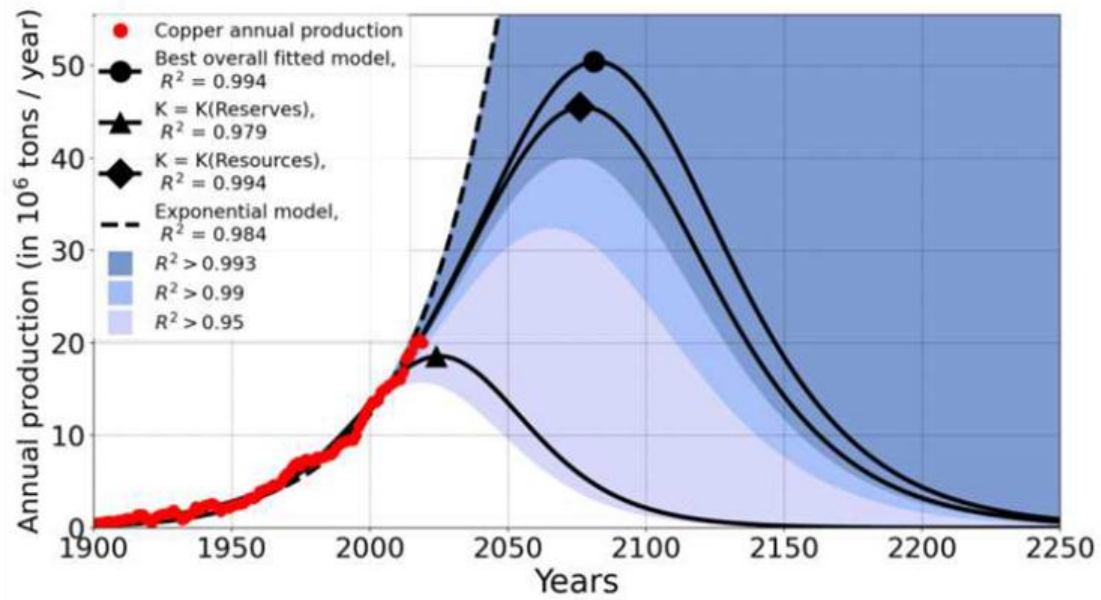
Conclusion : la double contrainte carbone

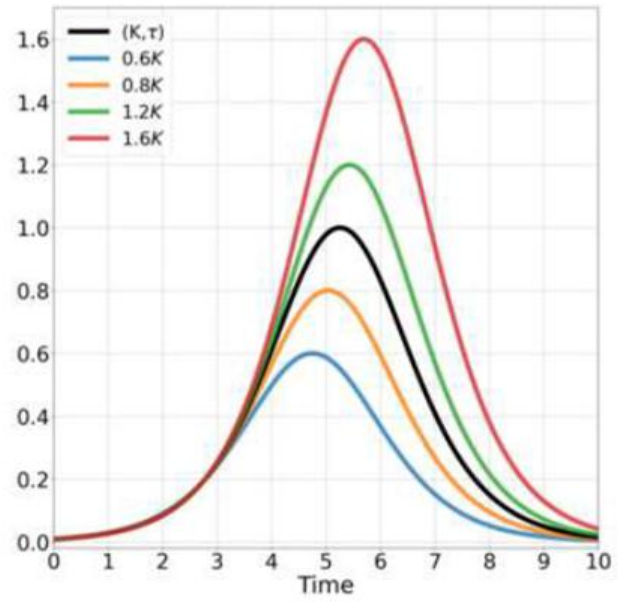
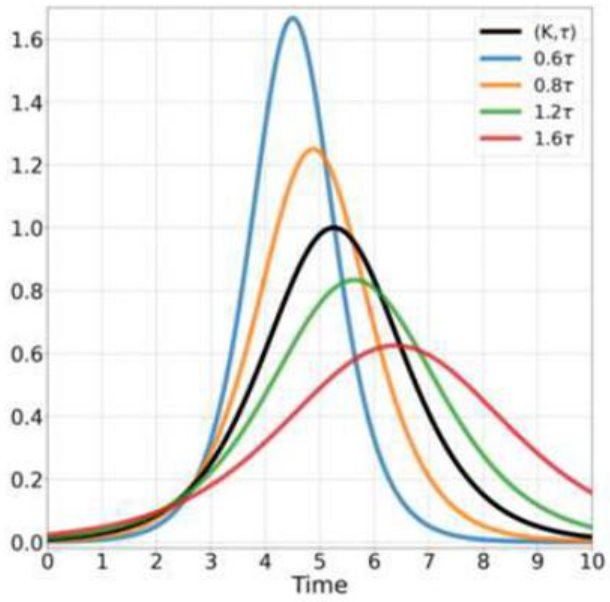
Il y a assez de fossiles pour dérégler le climat (3 à 3,5°C), mais nous pourrions de moins en moins compter sur ces ressources pour nous adapter au changement climatique déjà joué, et mettre en place des ressources énergétiques décarbonées.

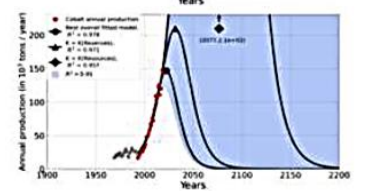
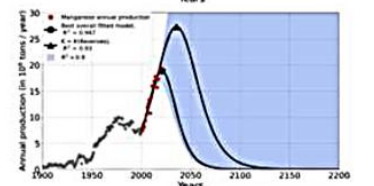
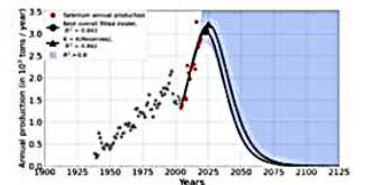
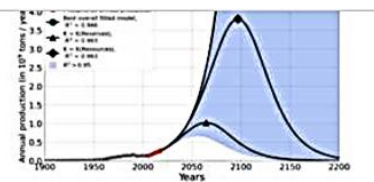
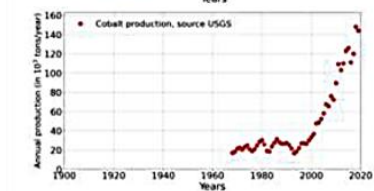
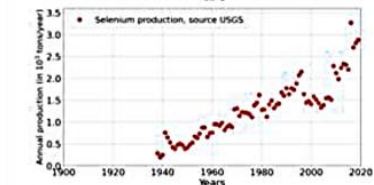
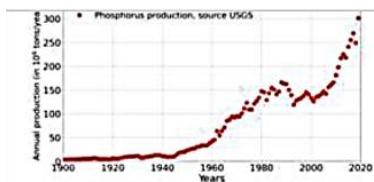
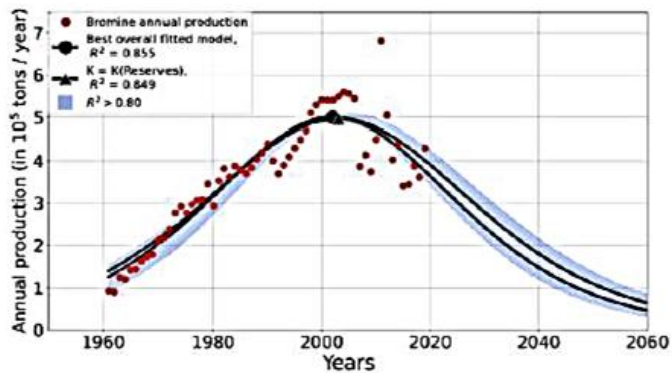
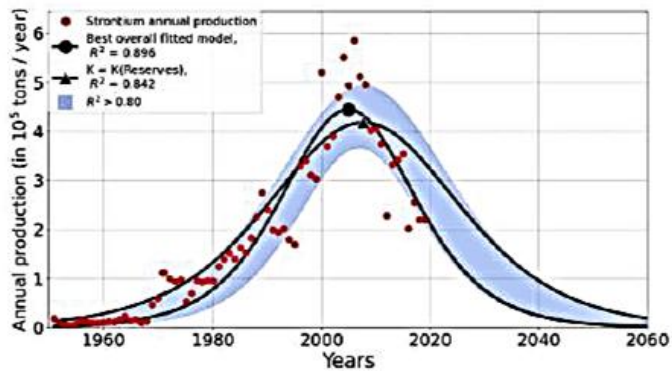
À la **contrainte climatique** s'ajoute ainsi une **contrainte géologique** concernant le resserrement des ressources énergétiques.

Soyons attentifs à la façon dont le Groupe 3 du GIEC traitera cette question dans le prochain rapport (COP30, Bélem 10-21 novembre 2025)

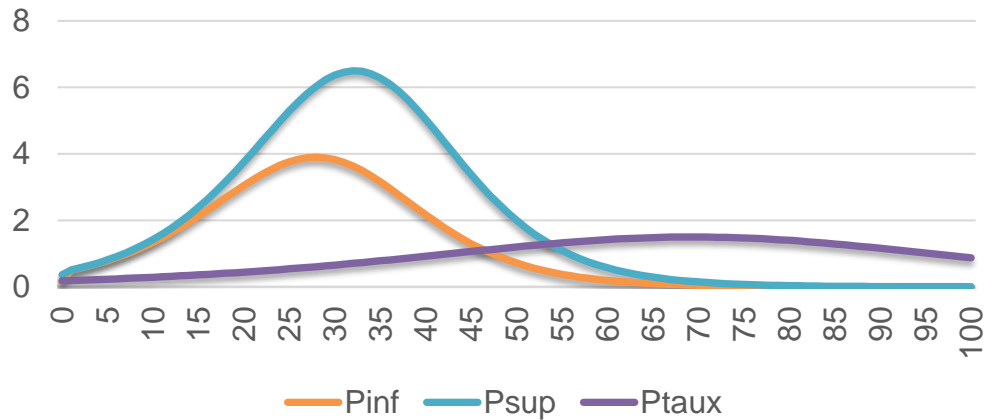








Production annuelle de terres rares, en Mt



Production annuelle pour 3 jeux de paramètres.

En bleu et rouge : taux de croissance de 13% et valeurs des réserves de 129 Mt et 200 Mt respectivement.

En gris : taux de croissance réduit à 5% et réserves de 120 Mt