

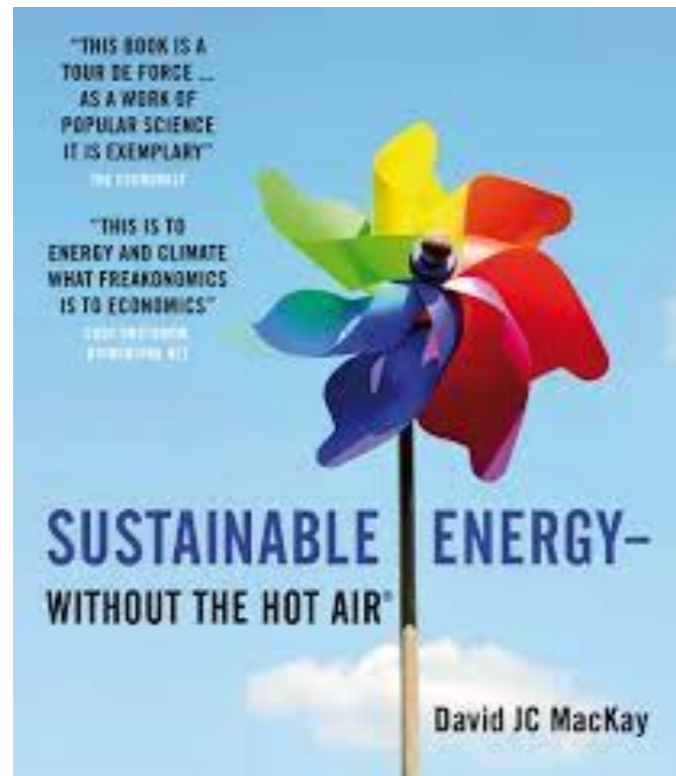
Energie



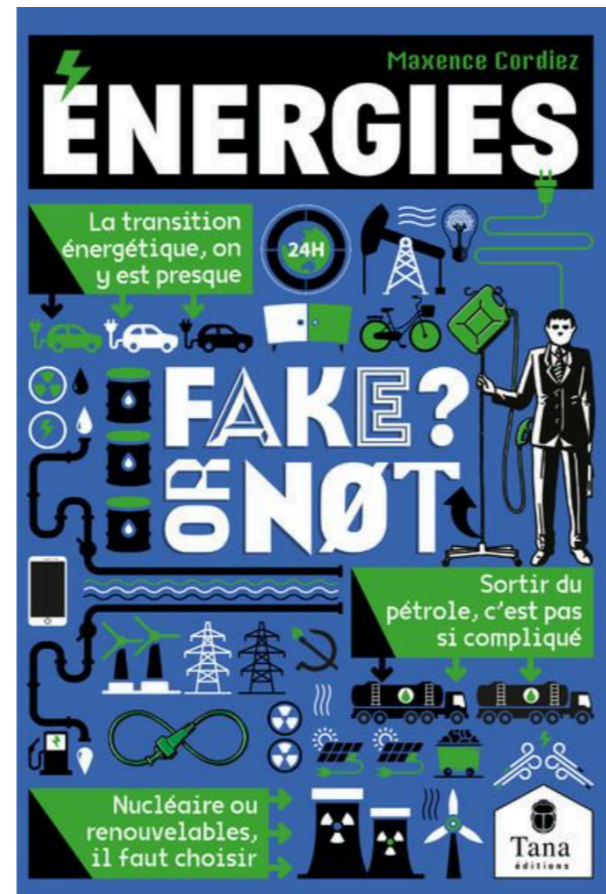
François Huveneers

Paris-Dauphine, L2, 2022-2023

Quelques sources



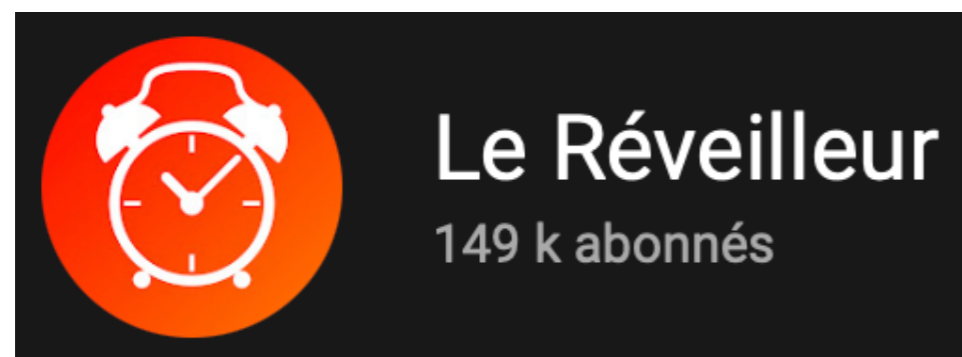
J.C. MacKay



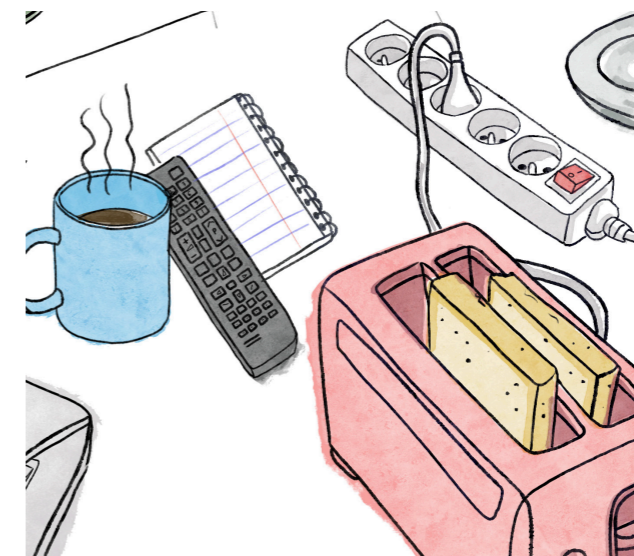
M. Cordiez



J.M. Jancovici



R. Meyer



G. De Temmerman

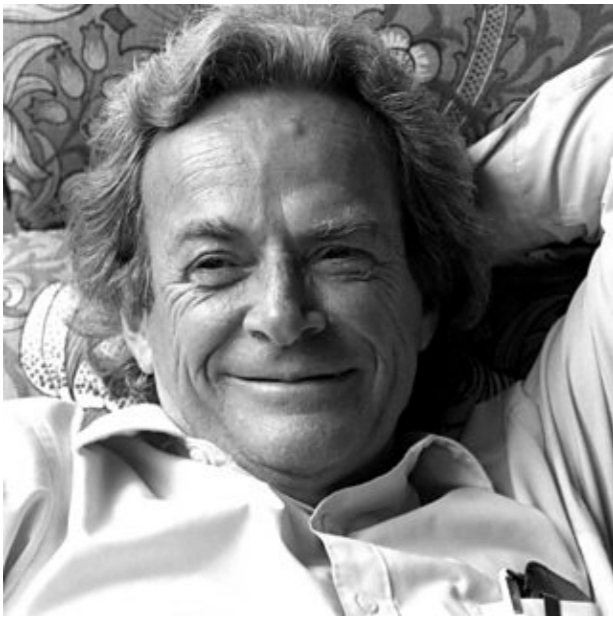
Plan de cette partie du cours

1. L'énergie : une grandeur physique
2. L'énergie dans le monde
3. Pourquoi une transition énergétique ?
4. Des solutions possibles

**L'énergie : une
grandeur physique**

Qu'est-ce que l'énergie ?

Il est important
de réaliser que dans la physique
d'aujourd'hui, nous n'avons aucune
connaissance de ce *qu'est* l'énergie.



R. P. Feynman, 1918-1988

Mais c'est un concept qu'on
peut définir précisément !

Qu'est-ce que l'énergie ?

Energie = Une quantité **conservée** globalement



$$\begin{aligned} E(t) &= E_{pot}(t) + E_{cin}(t) + Q(t) \\ &= E = \text{constante (ne dépend pas de } t) \end{aligned}$$

L'énergie change de forme

Changement

=

l'énergie est *convertie* d'une forme en une autre



nucléaire

électro-
magnétique



chimique



cinétique
+
thermique

Une même quantité = une même unité

- Joule (J) :

- ~ élever 100g d'un mètre

- ~ augmenter la température de 1g d'air sec de 1°C

- kilowatt-heure (kWh) :

$$1kWh = 10^3 \frac{J}{s} \times 1h = 10^3 \times 3600 \frac{J}{s} = 3,6 \times 10^6 J$$

- ~ 4h d'un ordinateur portable

- ~ 1 lessive

- ~ 1h de chauffage d'une pièce de 15m²

- ~ 6km en voiture électrique

valeurs
indicatives

- et bien d'autres...

Energie et puissance

Puissance ($W = J/s$) : Energie par unité de temps

- Une ampoule de 50 W dissipe 50 J chaque seconde sous forme de chaleur et lumière.
- Une éolienne d'une puissance **installée** de 10 MW peut produire (par vent fort) 10^7 J par seconde (électricité).
- Le barrage des Trois Gorges a une puissance **installée** d'environ 22 000 MW et une puissance annuelle **moyenne** d'environ 11 000 MW.



Pourquoi *consommons*-nous l'énergie ?

1. On ne peut convertir la chaleur en travail à une température unique
2. La chaleur ne circule pas d'elle-même du froid vers le chaud



S. Carnot, 1796-1832

Pourquoi *consommons-nous* l'énergie ?

Exemples :

- On ne peut pas faire avancer un bateau seulement en refroidissant l'eau de mer,
- on ne peut pas chauffer sa maison seulement en refroidissant l'air extérieur,
- la réaction $2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$ n'est pas spontanée,

On cherche donc des **sources** d'énergies exploitables :

animaux, bois, charbon, pétrole, gaz fossile, uranium,
vent, lumière du soleil, marées...

L'énergie dans le monde

L'énergie : une ressource spéciale

En vérité, le charbon ne se situe pas à côté, mais totalement au-dessus de toutes les autres matières premières. [...] Sans lui, nous voilà rejetés dans la pauvreté laborieuse des temps anciens.

W. S. Jevons, *The coal question*, 1865



Pourrait se dire de toute ressource énergétique

Le monde évolue



Evolution de la population, aménagement de notre environnement, transport, alimentation, objets...

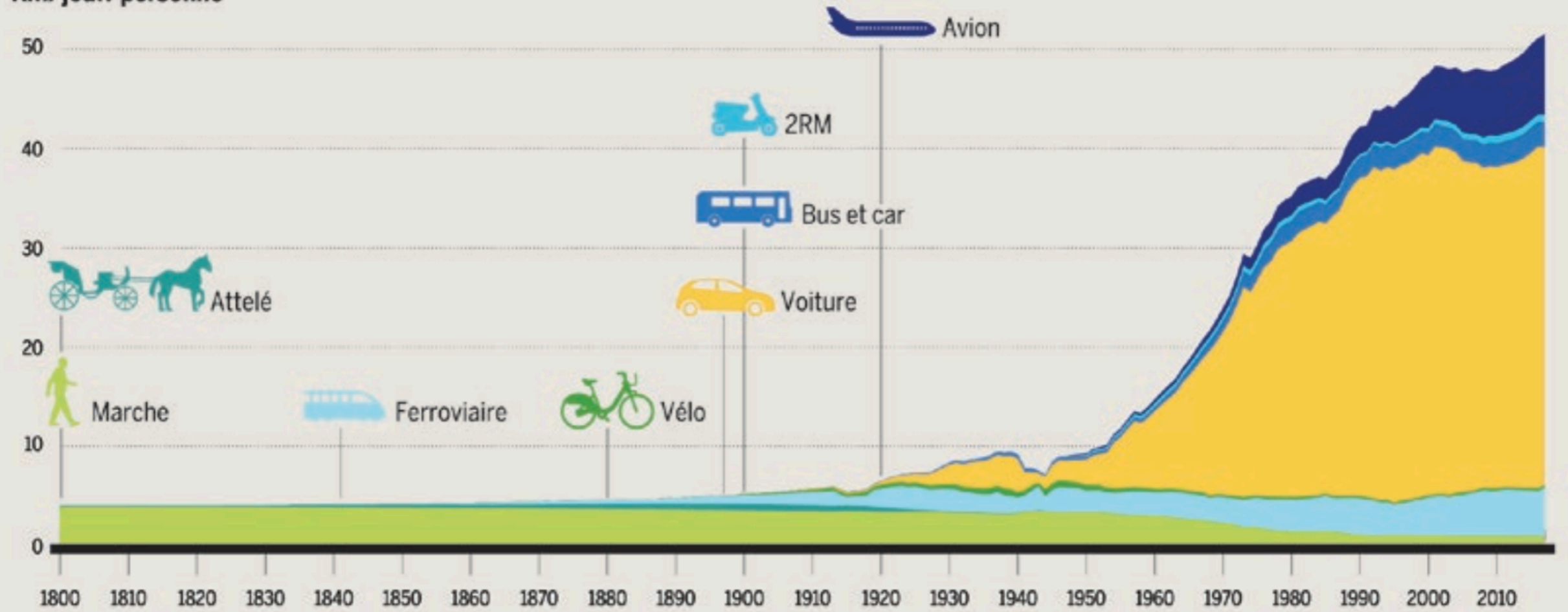
Ex : plus de mobilité

CHRONOLOGIE D'UNE ACCÉLÉRATION DE LA MOBILITÉ

© Atlas des Mobilités 2022

Estimation du nombre de kilomètres parcourus par jour et par personne et part des modes de transport dans le temps de déplacement en France, de 1800 à 2017

Km/jour/personne



Exercice : vivre comme au 16e siècle ?

L'énergie permet le développement démographique:

- invention de l'agriculture (il y a ~10 000 ans)
- énergies fossiles (~1800)

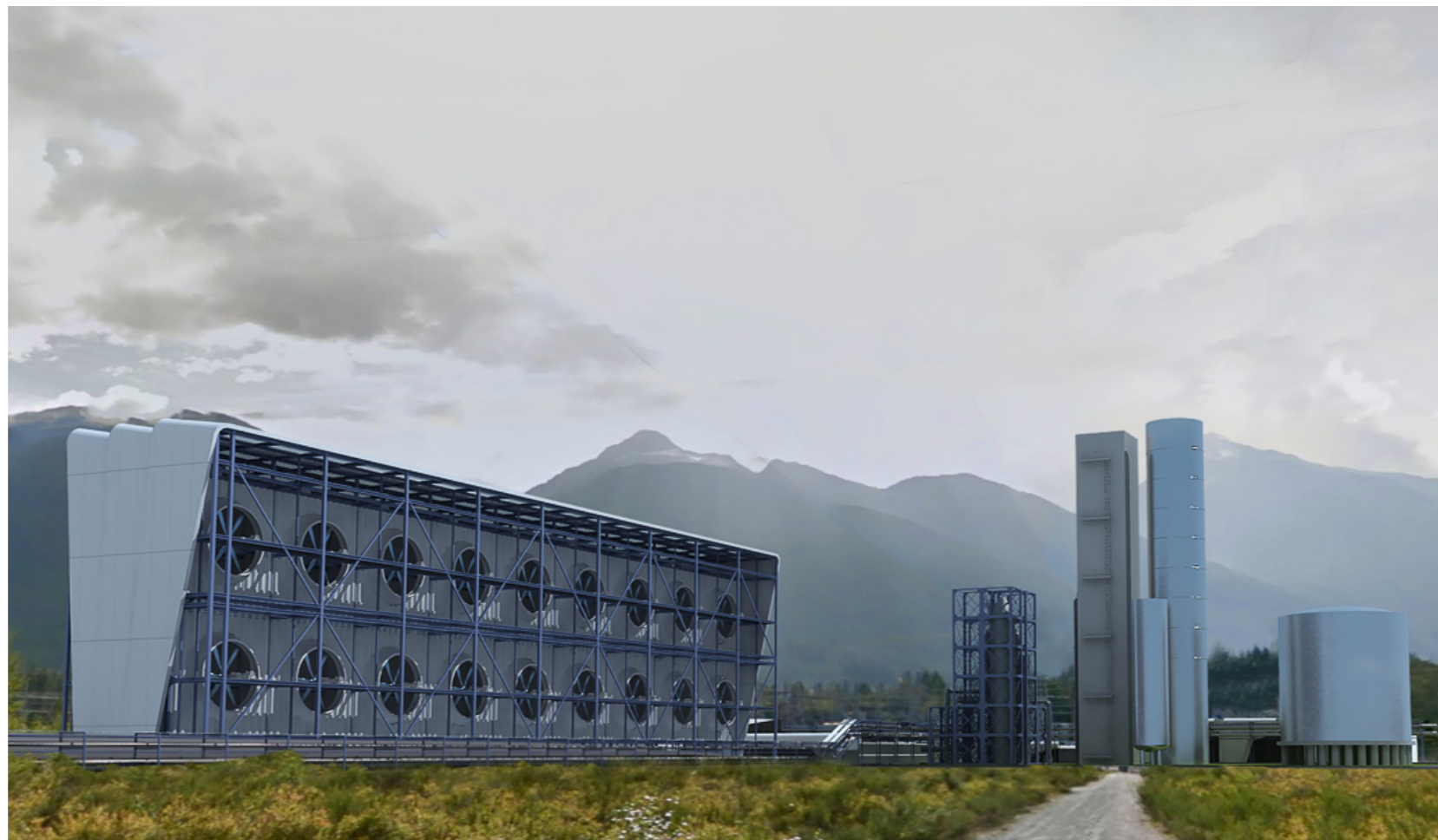


Pouvons-nous retourner à ce mode de vie ?

- densité actuelle de population en France : 105 hab/km²
- besoin énergétique d'une personne par jour (hors alimentation) au 16e siècle ~ 20 kWh
- rendement énergétique d'une forêt naturelle : 0,1 W/m²

Exercice : trop de CO₂ ? Pas de problème !

Quel est le coût énergétique pour revenir à une concentration pré-industrielle de CO₂ dans l'atmosphère ?
La réponse dépend (en partie) de la technique utilisée.



Direct Air Capture (DAC), ici par la firme *Carbon Engineering*

Exercice : trop de CO2 ? Pas de problème !

Technique :

- l'air est envoyée sur une solution hydroxyde qui capte le CO2. Besoin d'électricité (ventilateurs).
- la solution est chauffée ($T > 800^{\circ}\text{C}$) pour extraire le CO2 et être réutilisée. Besoin de chaleur.
- Le CO2 est par exemple transporté et stocké.

Données :

- densité historique de CO2 : 280 ppm
- densité actuelle de CO2 : 400 ppm
- 1ppm de CO2 : 7,81 Gt CO2
- coût énergétique : 3000 kWh/tonne CO2
- comparaison : énergie primaire consommée en 2020 : 170000 TWh

On obtient une *sous-estimation* :

CO2 ressort de l'océan, production de la solution, stockage...

Exercice : nous consommons *beaucoup* d'énergie

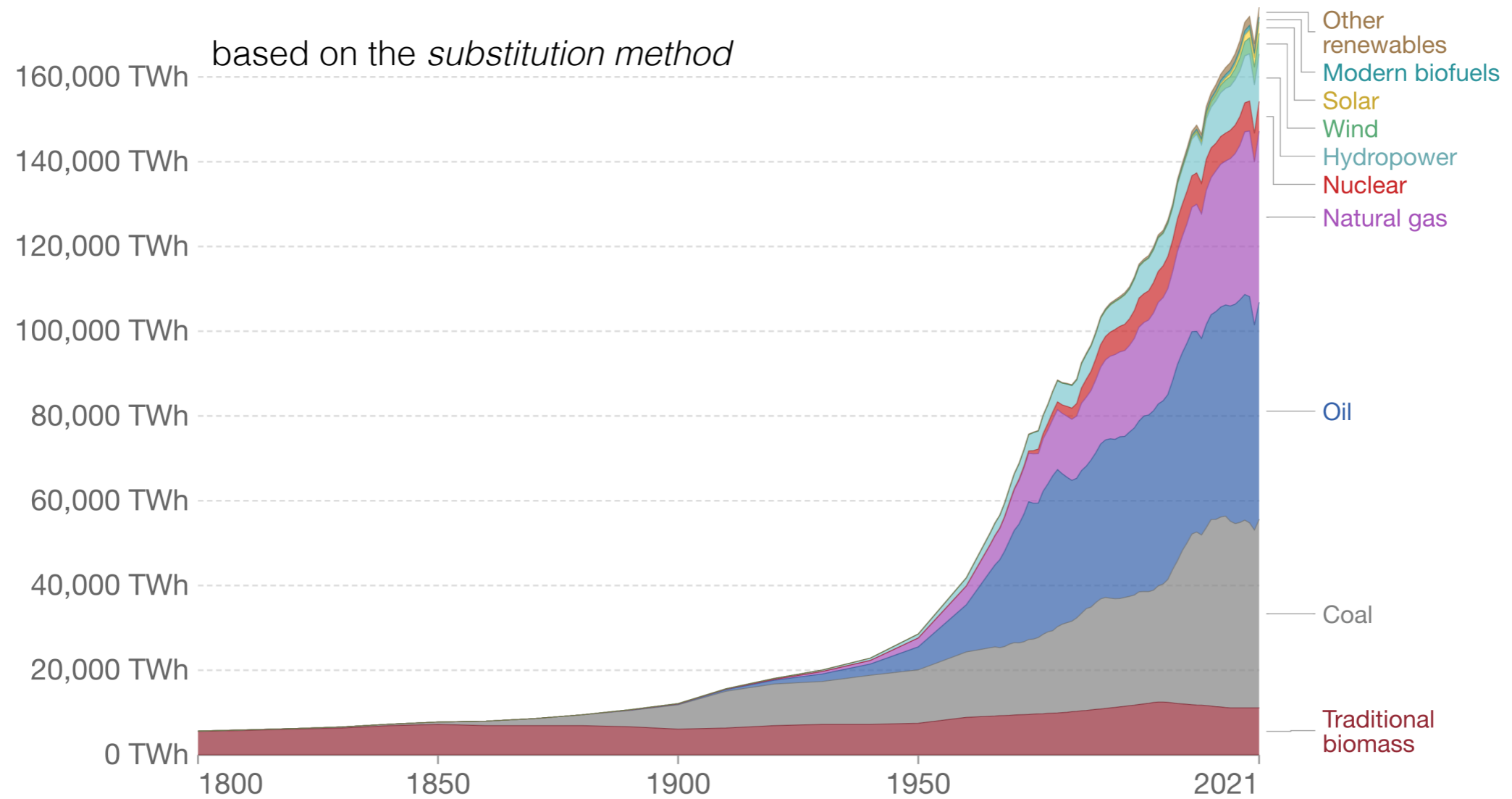
Comparer l'énergie finale consommée actuellement à l'énergie finale minimale (alimentation)



Apport nutritionnels journaliers d'une personne ~ 10000 kJ ≈ 3 kWh

Consommation d'énergie finale mondiale $\sim (2/3)$ énergie primaire $\sim 115\,000$ TWh

Energie primaire dans le monde



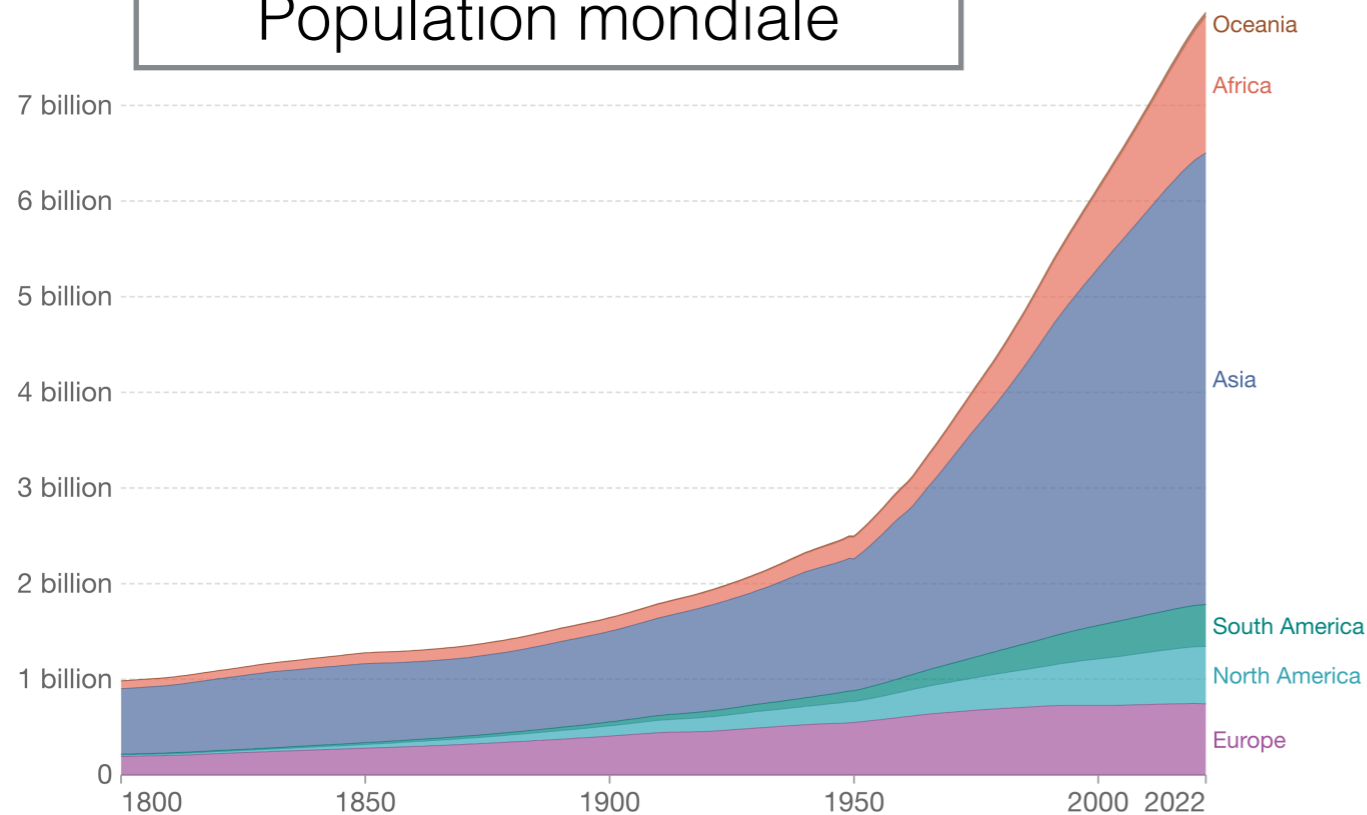
Source: Our World in Data based on Vaclav Smil (2017) and BP Statistical Review of World Energy

OurWorldInData.org/energy • CC BY

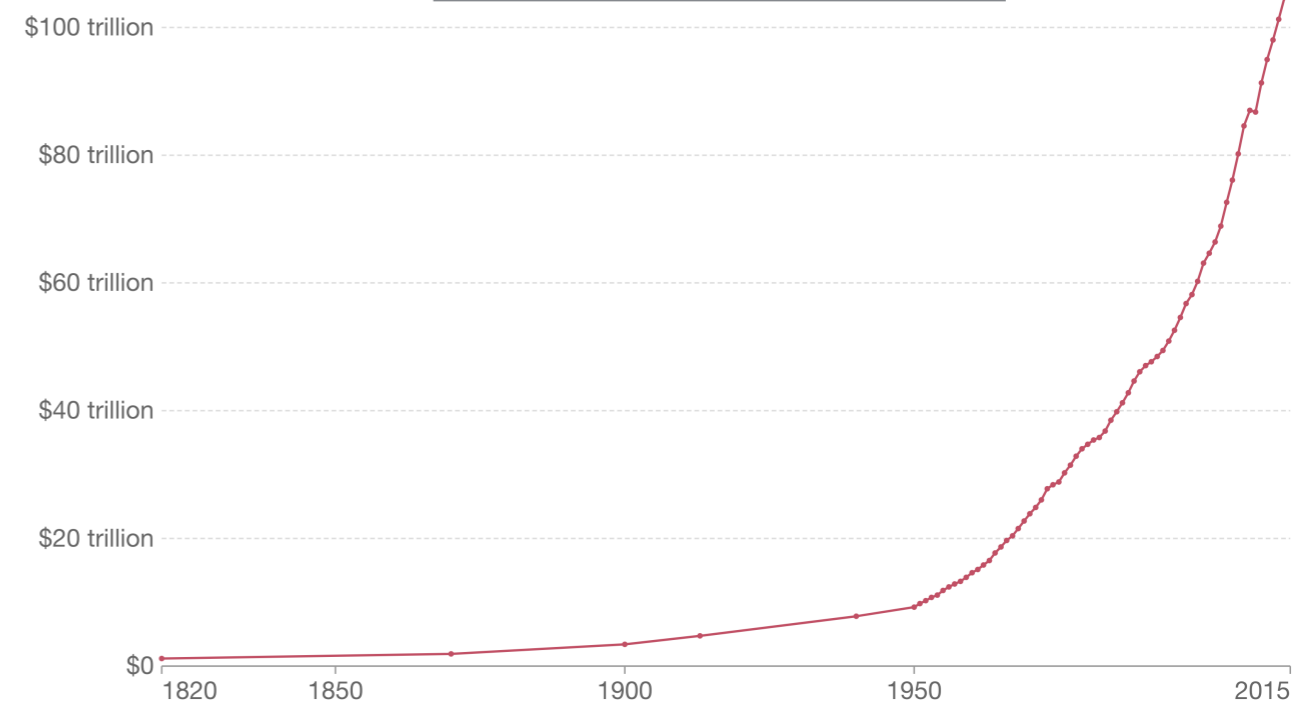
Deux facteurs principaux :

Le nombre d'habitants et leur niveau de vie

Population mondiale



PIB mondial

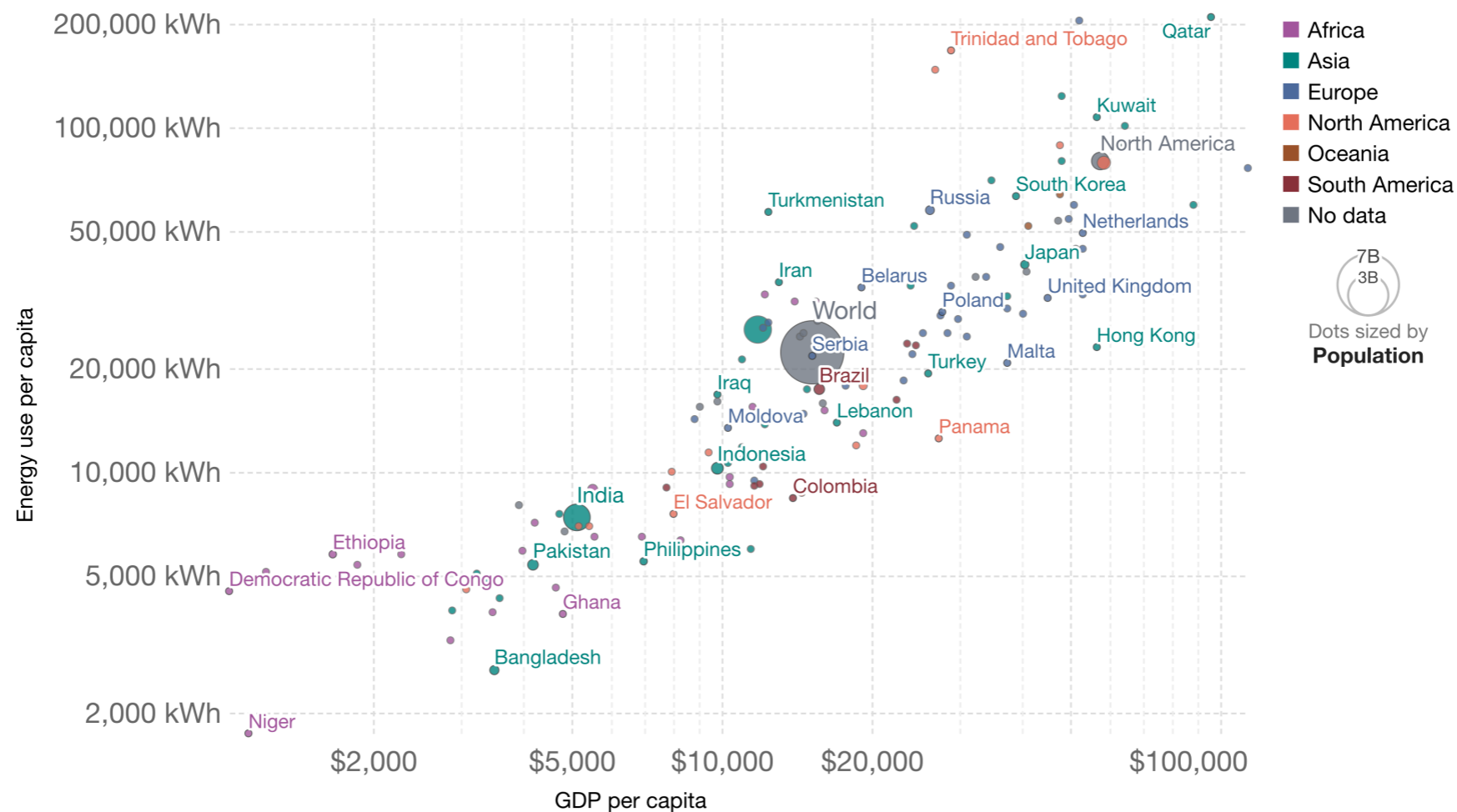


Source : Our World in Data

Attention aux données globales :
18% de la population vit dans les pays de l'OCDE, et
consomme 40% de l'énergie primaire

Energie et niveau de vie

Le développement économique d'un pays passe par une augmentation de l'usage de l'énergie



Source: Data compiled from multiple sources by World Bank

OurWorldInData.org/energy • CC BY

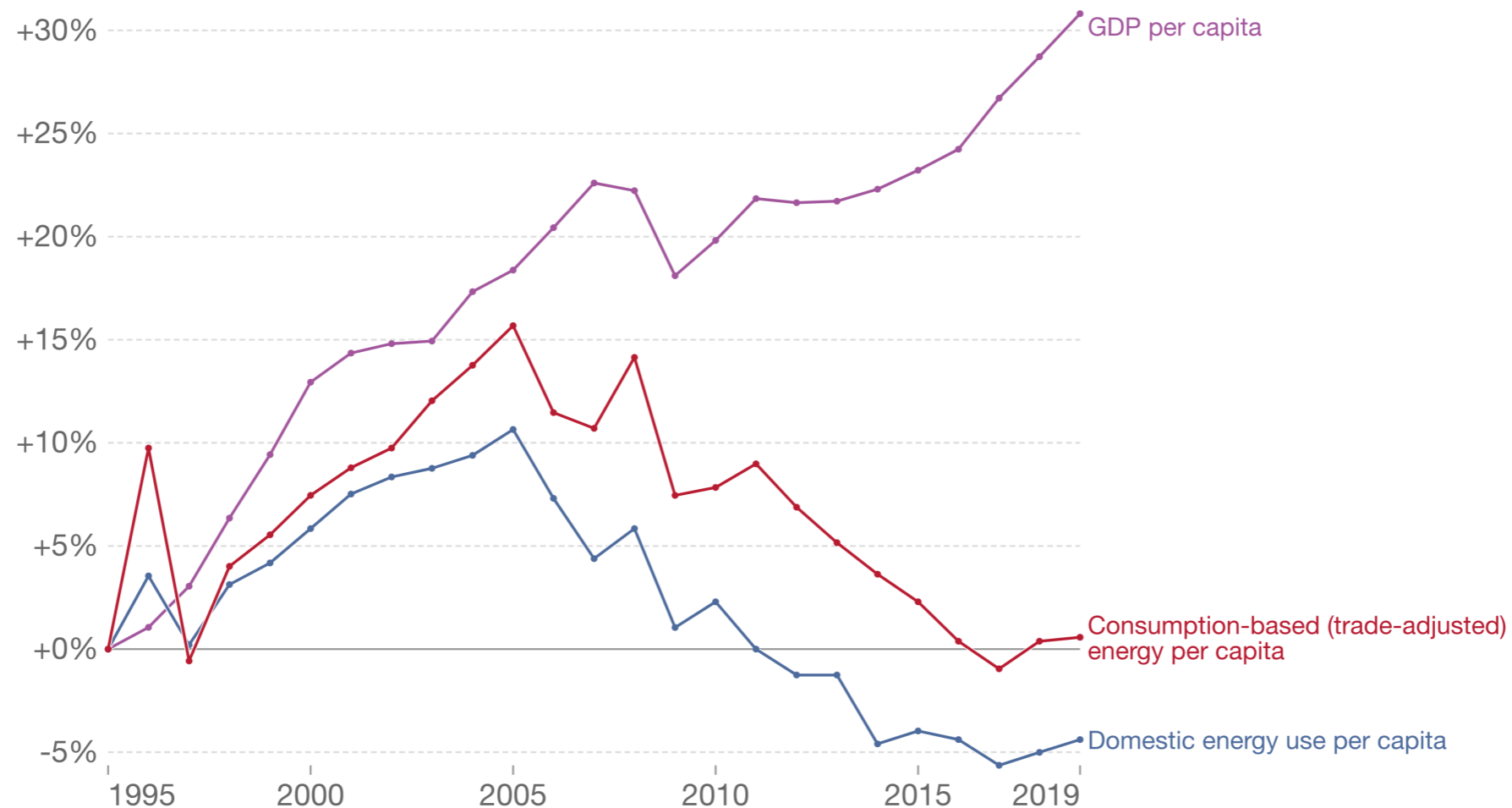
Cette corrélation est aussi vraie pour d'autres produits (acier, ciment, plastique, engrais...)

Energie et niveau de vie

Changes in energy use vs. changes in GDP per capita, France

Our World
in Data

Consumption-based (trade-adjusted) energy use measures domestic energy use minus energy used to produce exported goods, plus energy used to produce imported goods.



Source: Our World in Data based on BP; Shift Energy; UN Population & The World Bank

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Note: Energy refers to primary energy, the energy input before the transformation to forms of energy for end-use (such as electricity or petrol for transport).

Le rôle de l'énergie pour le développement/la croissance de pays déjà développés est moins évident

80% d'énergie fossile

Pétrole



31%

Mobilité
Pétrochimie

Charbon



27%

Production
électrique

Gaz



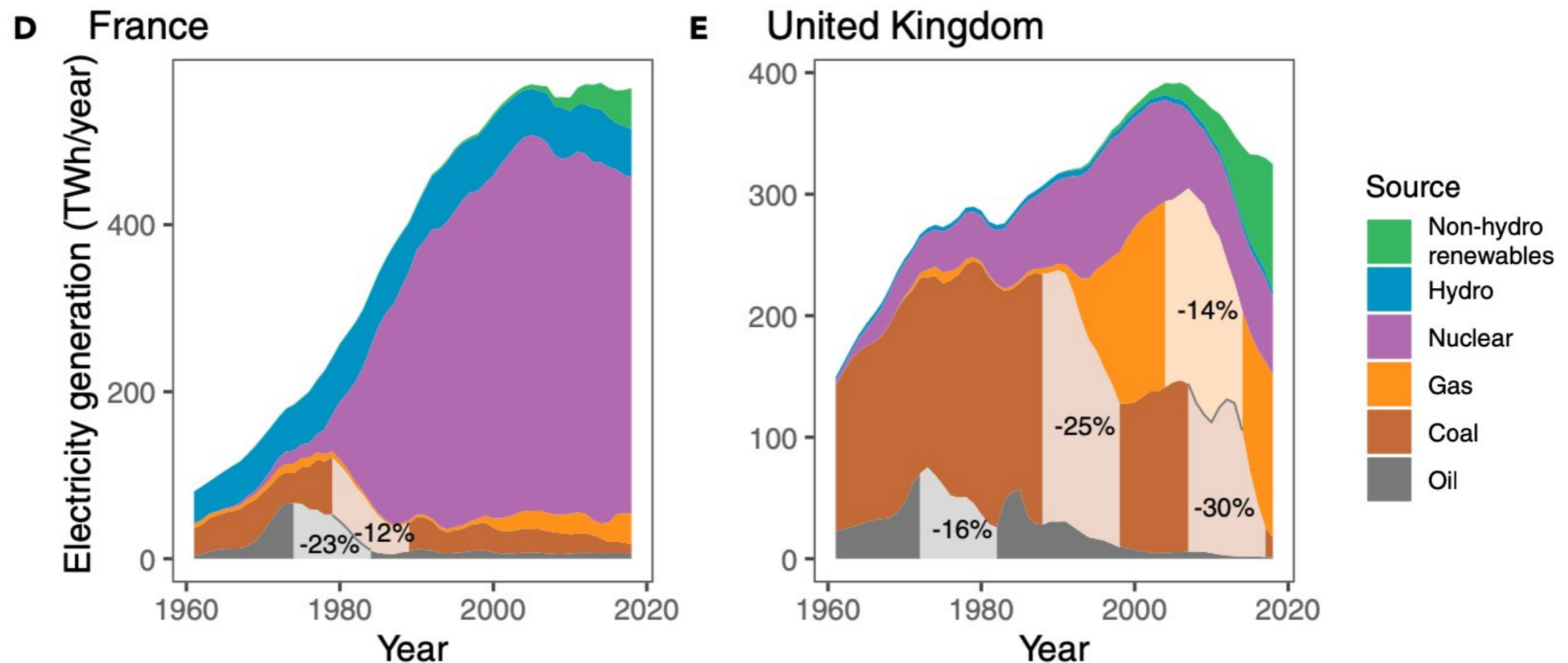
23%

Chauffage
Industrie

« Le monde n'a jamais connu de transition »

Au niveau mondial, les sources d'énergie ne se *substituent* pas, elles s'*additionnent*.

Pas toujours vrai au niveau local :



Source :
Vinichenko et al.,
One earth 4 (2021)

Attention : ces graphes ne concernent que la *production électrique*

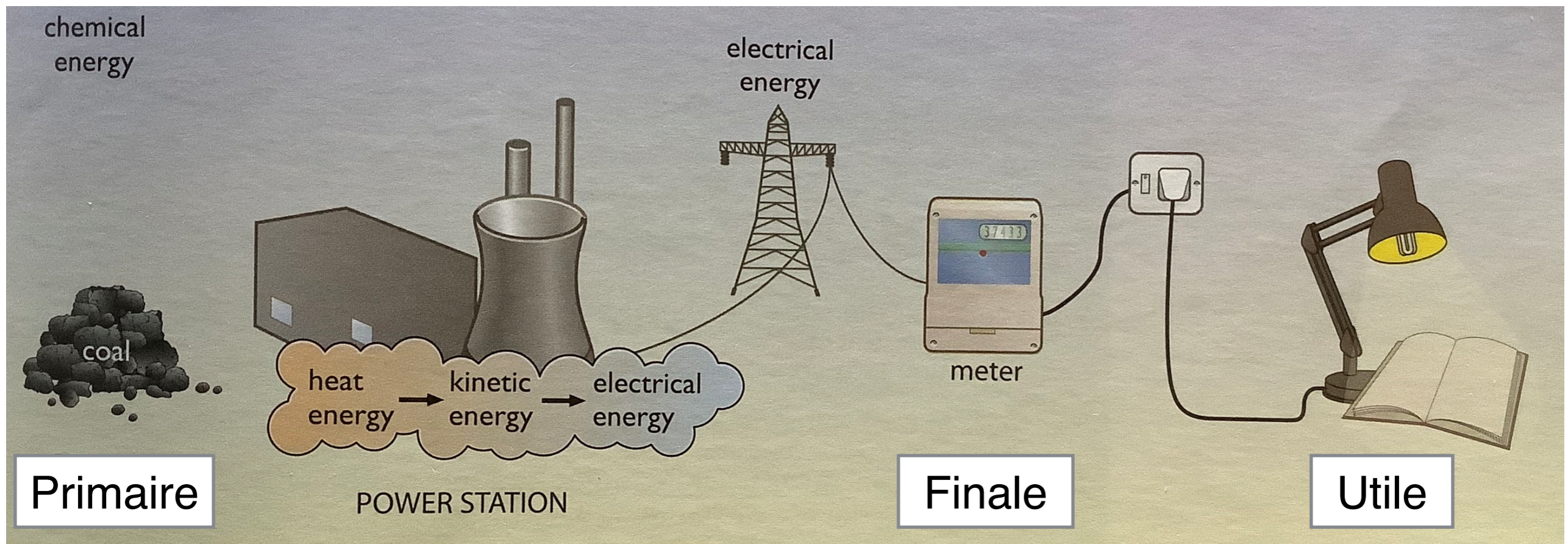
Energie primaire - finale - utile

Exemple de l'éclairage :

35%

90%

5-20%



Source : B. Everett et al., 2012

Energie primaire et finale

Energie primaire : énergie directement issue de la nature.

Ex : charbon, pétrole brut, gaz fossile, bois, énergie solaire, éolienne, hydraulique...

Energie finale : énergie disponible pour l'usage.

Ex : électricité domestique, électricité à l'usine pour fabrication d'objets, essence à la pompe, gaz de ville...

L'énergie primaire est en partie **conventionnelle** pour les énergies **non fossiles**. Ex :

- Le bois est une énergie primaire ; on ne compte pas l'énergie solaire nécessaire à faire pousser la forêt.
- L'électricité d'une éolienne est une énergie primaire ; on ne compte pas toute l'énergie du vent.

Energie primaire et finale

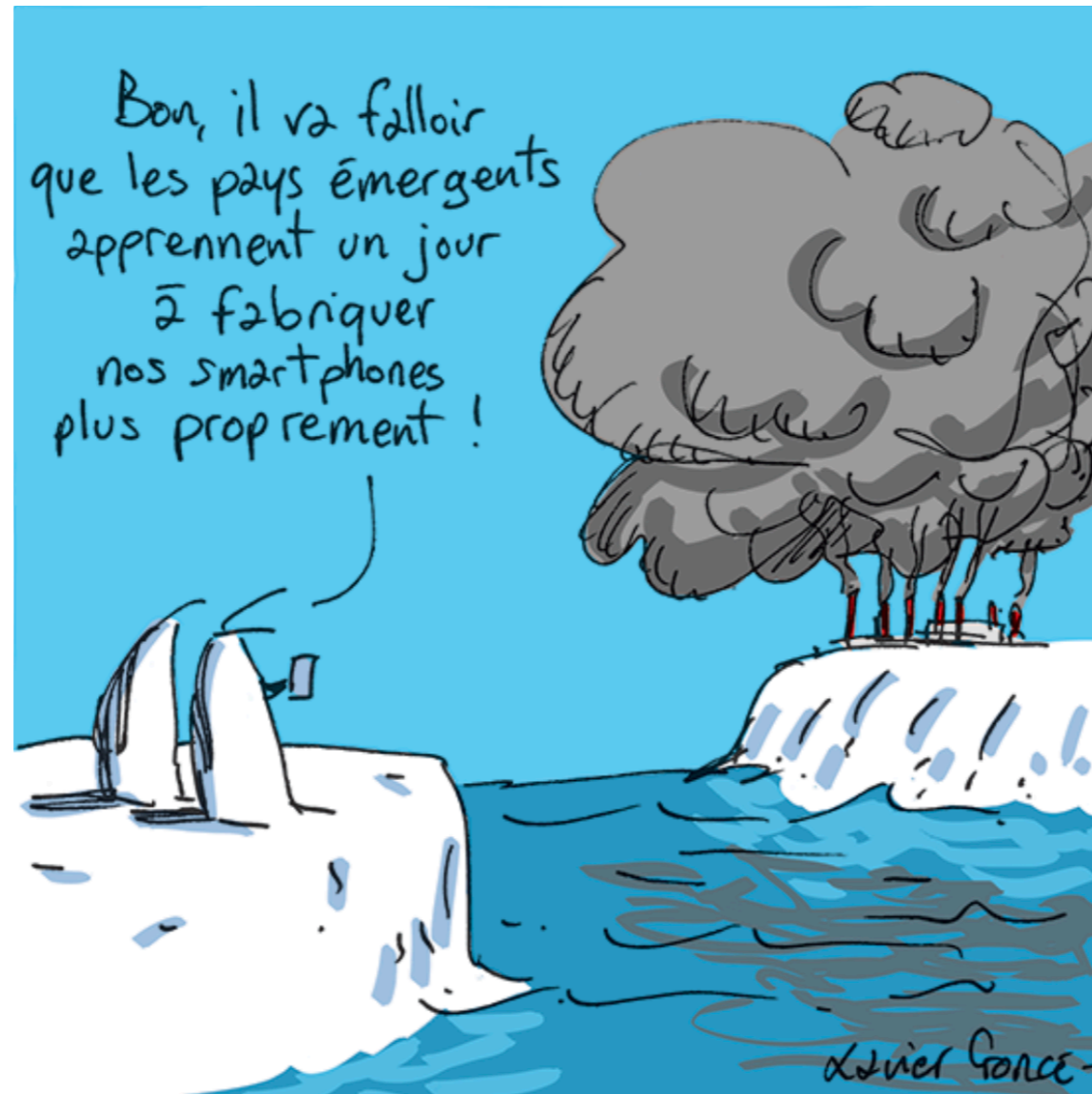
Méthode de substitution (utilisée sur le graphique plus haut)

Exemple :

- 1000 TWh d'électricité produite à partir d'énergie solaire en 2021.
- Rendement typique d'une central thermique : 37%
- Il aurait donc fallu 2700 TWh (thermique) de charbon pour produire cette électricité
- Le graphique attribue une valeur de 2700 TWh à la production d'énergie solaire

Au niveau national

Distinguer empreinte / inventaire national

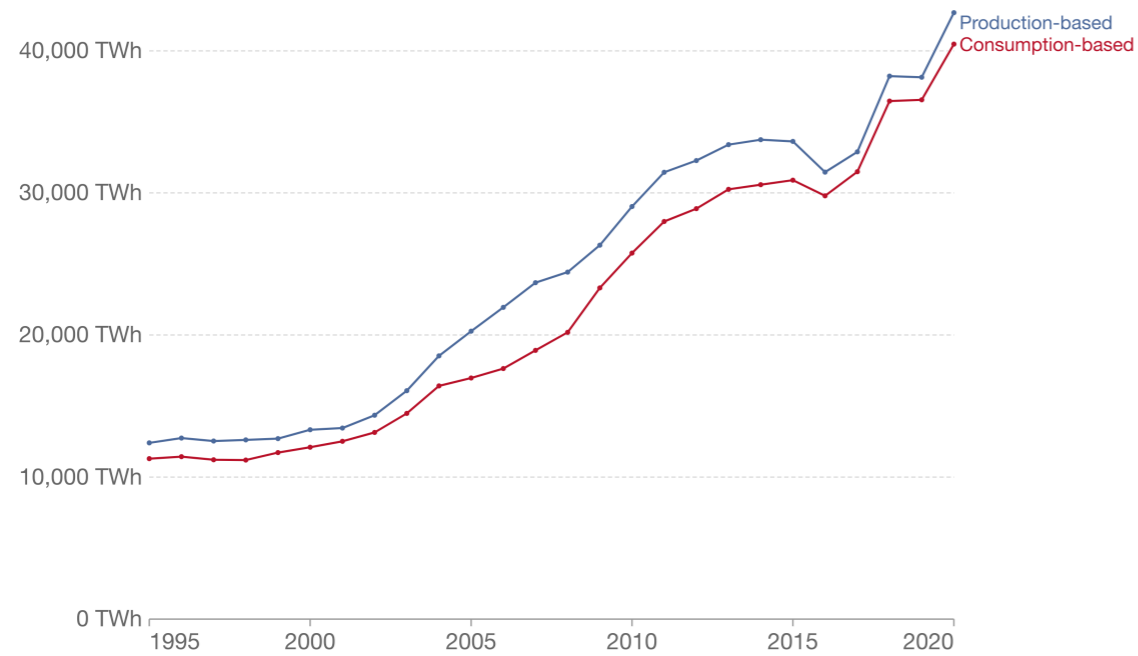


Energie grise (*embedded energy*) :
énergie qui entre dans la fabrication d'objets

Exemples :

Production-based vs. consumption-based energy use, China

Consumption-based (trade-adjusted) energy use measures domestic energy use minus energy used to produce exported goods, plus energy used to produce imported goods.



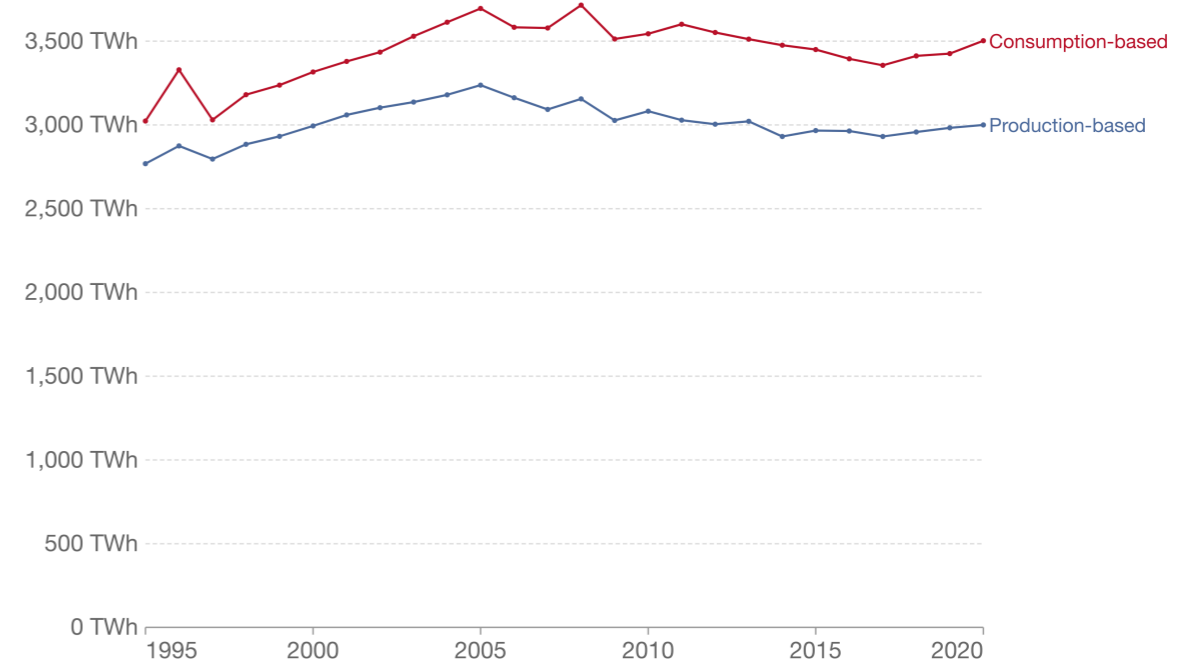
Source: Calculated by Viktoras Kulionis, based on the EXIOBASE v3.8.2 database

OurWorldInData.org/energy • CC BY

Chine

Production-based vs. consumption-based energy use, France

Consumption-based (trade-adjusted) energy use measures domestic energy use minus energy used to produce exported goods, plus energy used to produce imported goods.



Source: Calculated by Viktoras Kulionis, based on the EXIOBASE v3.8.2 database

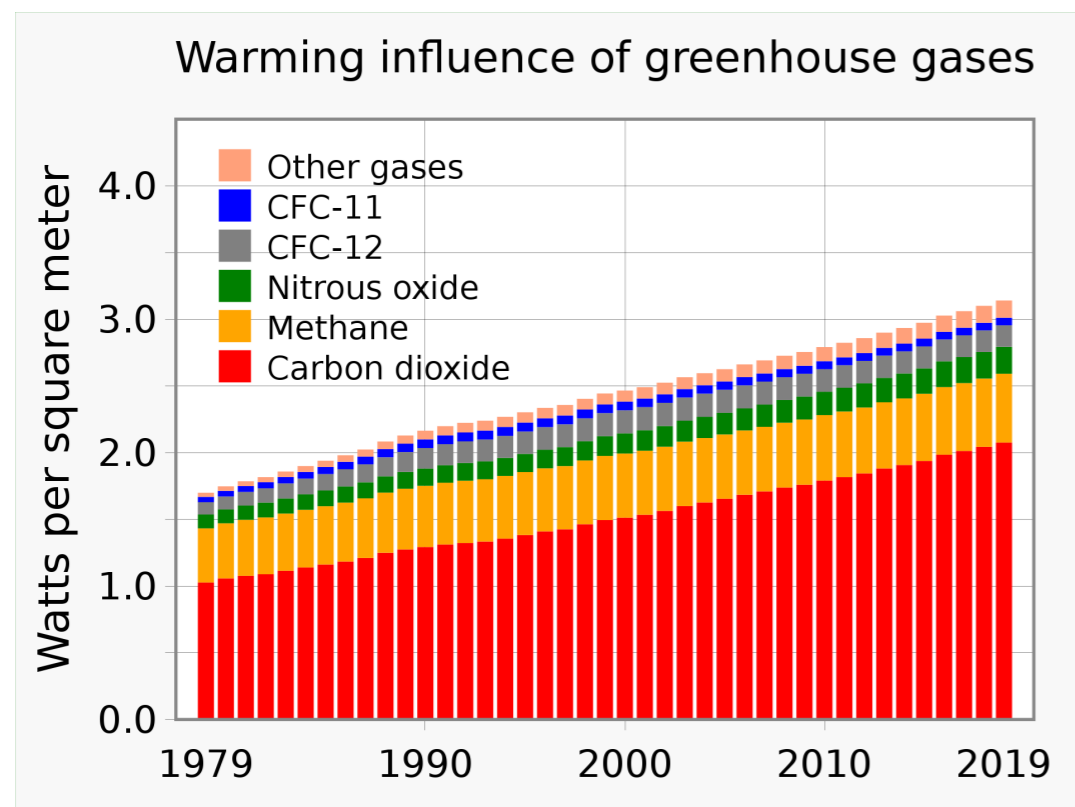
OurWorldInData.org/energy • CC BY

France

Exercice : chaleur fatale et réchauffement

Toute énergie consommée est finalement dissipée en chaleur et en rayonnement infra-rouge. L'activité humaine participe-t-elle au réchauffement global de cette façon ?

Comparer le forçage radiatif dû à la chaleur produite directement par l'homme à celui des GES.



Donnée : surface terrestre : $510 \times 10^6 \text{ km}^2$

**Pourquoi une
transition
énergétique ?**

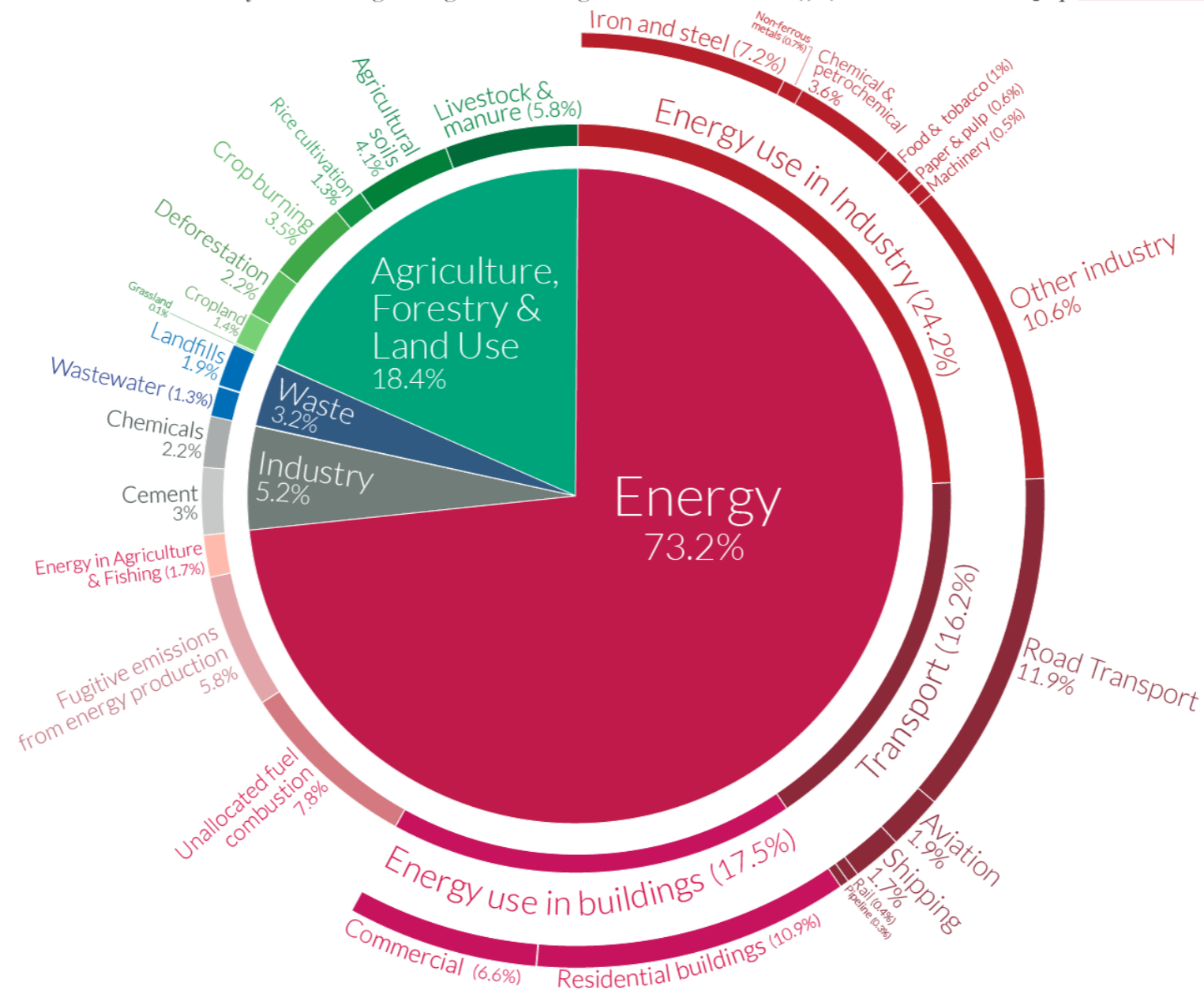
Pour trois raisons

Les énergies fossiles posent notamment trois problèmes :

- **Environnement**
Emissions de CO₂ + impact des extractions
- **Indépendance énergétique**
L'Europe est massivement importatrice
- **Epuisement/raréfaction des ressources**
La quantité de charbon/pétrole/gaz est finie

1. Environnement : émission de GES

Global greenhouse gas emissions by sector Our World in Data
 This is shown for the year 2016 – global greenhouse gas emissions were 49.4 billion tonnes CO₂eq.



1. objets

3. transport

2. bâtiments (chauffage, éclairage)

OurWorldinData.org – Research and data to make progress against the world’s largest problems.
 Source: Climate Watch, the World Resources Institute (2020). Licensed under CC-BY by the author Hannah Ritchie. (2020).

1. Environnement : Extraction



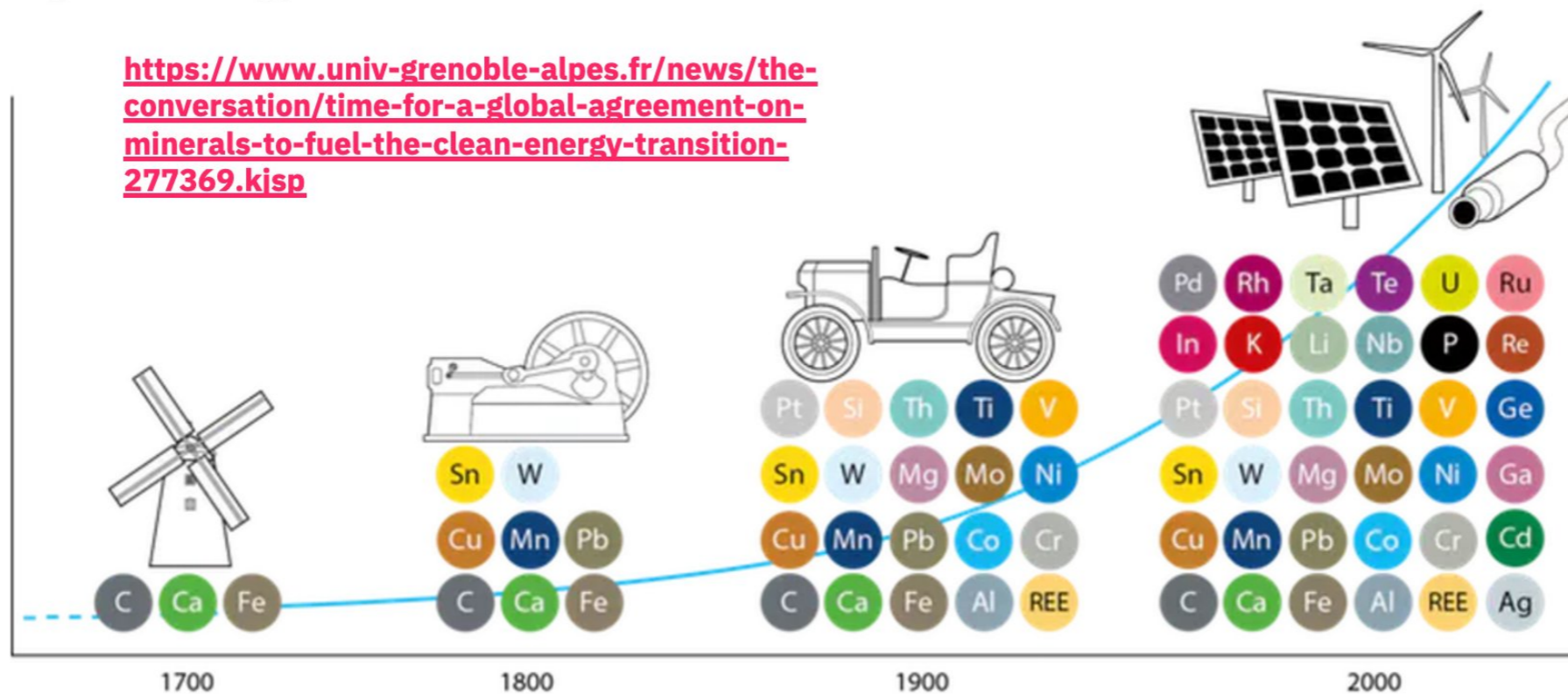
Ex : le bassin permien (USA : Texas et Nouveau-Mexique), actuellement le plus important site d'extraction au monde

La transition déplace-t-elle le problème ?

De nouveaux besoins apparaissent :

Ages of Energy

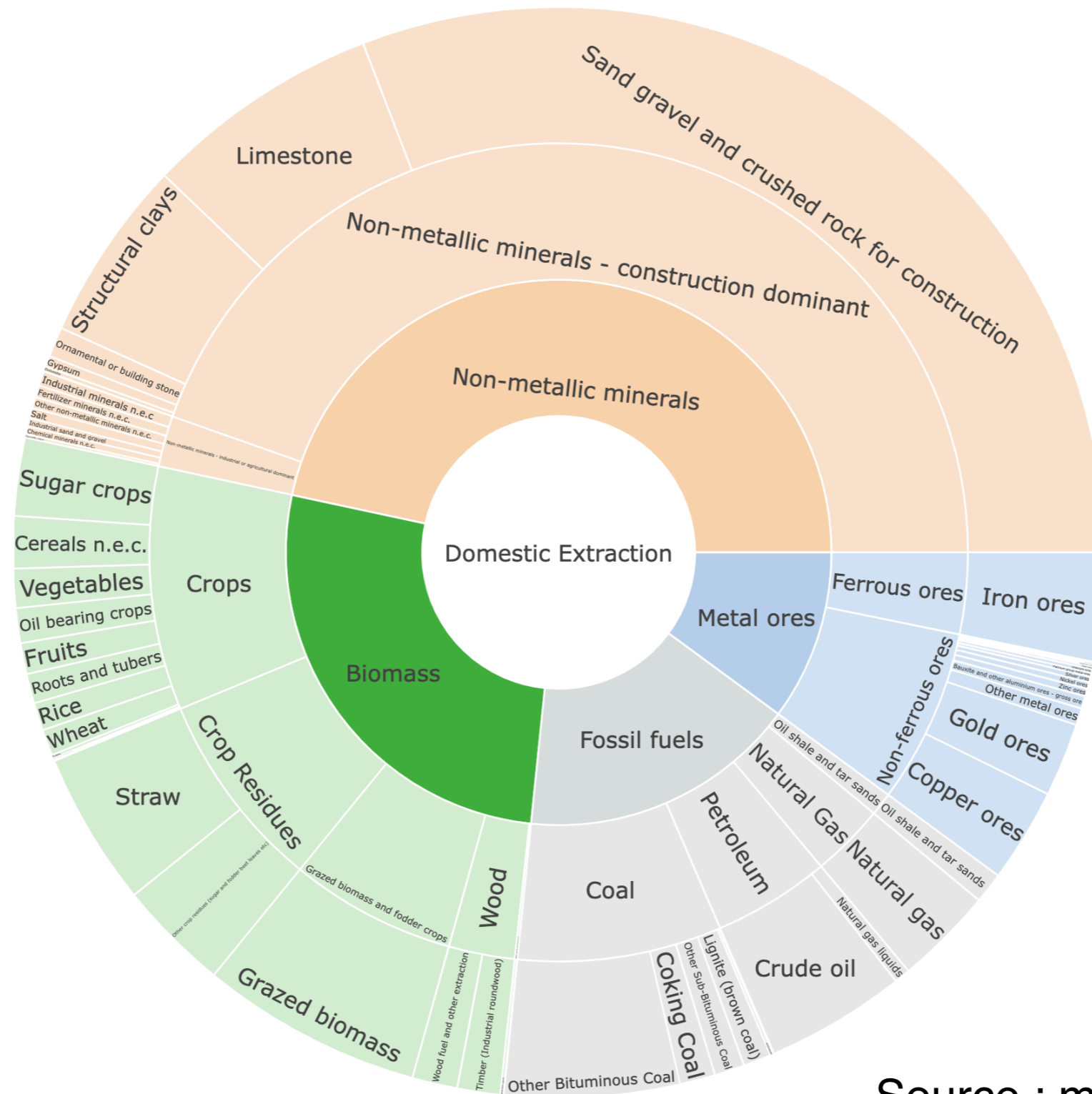
<https://www.univ-grenoble-alpes.fr/news/the-conversation/time-for-a-global-agreement-on-minerals-to-fuel-the-clean-energy-transition-277369.kjsp>



Elements widely used in Energy Pathways

Lithium (batteries), silicium (panneaux photovoltaïques), cuivre (réseau électrique, véhicules électriques), uranium...

Masse extraite/bougée (monde, 2019)

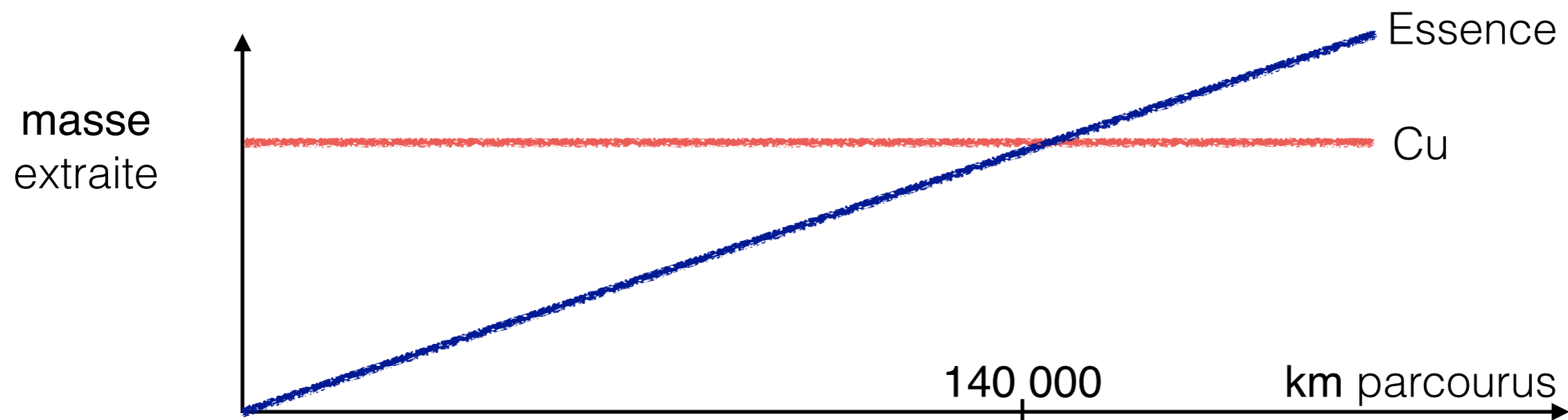


Source : materialflows.net

Exemple : cuivre pour VE

- Quantité de Cu additionnel : 70kg (VE et réseau)
- Teneur en Cu du minerai : 1%
- Donc, quantité de matière extraite : 7000 kg
- Voiture à essence : 6,5 l/100km ~5 kg/100km

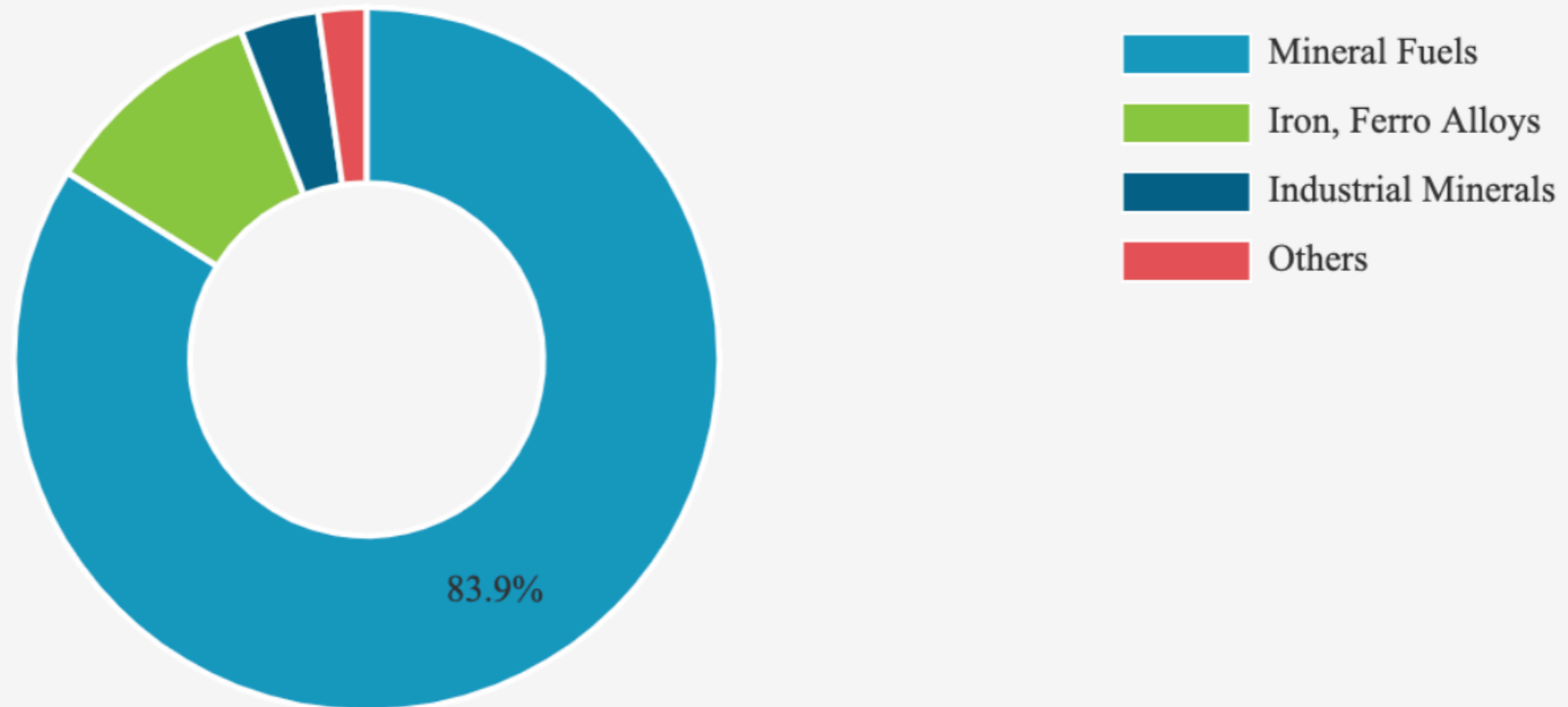
(données très grossières !)



Remarque : La comparaison en masse extraite n'a qu'une valeur limitée. Ex : le Cu pourra être réutilisé ensuite. Analyse similaire possible pour CO2 émis

Point de vue plus économique

Global Mining Waste Management Market Share, By Commodity, 2020



www.fortunebusinessinsights.com

Mineral Fuels : charbon, gaz, pétrole, uranium

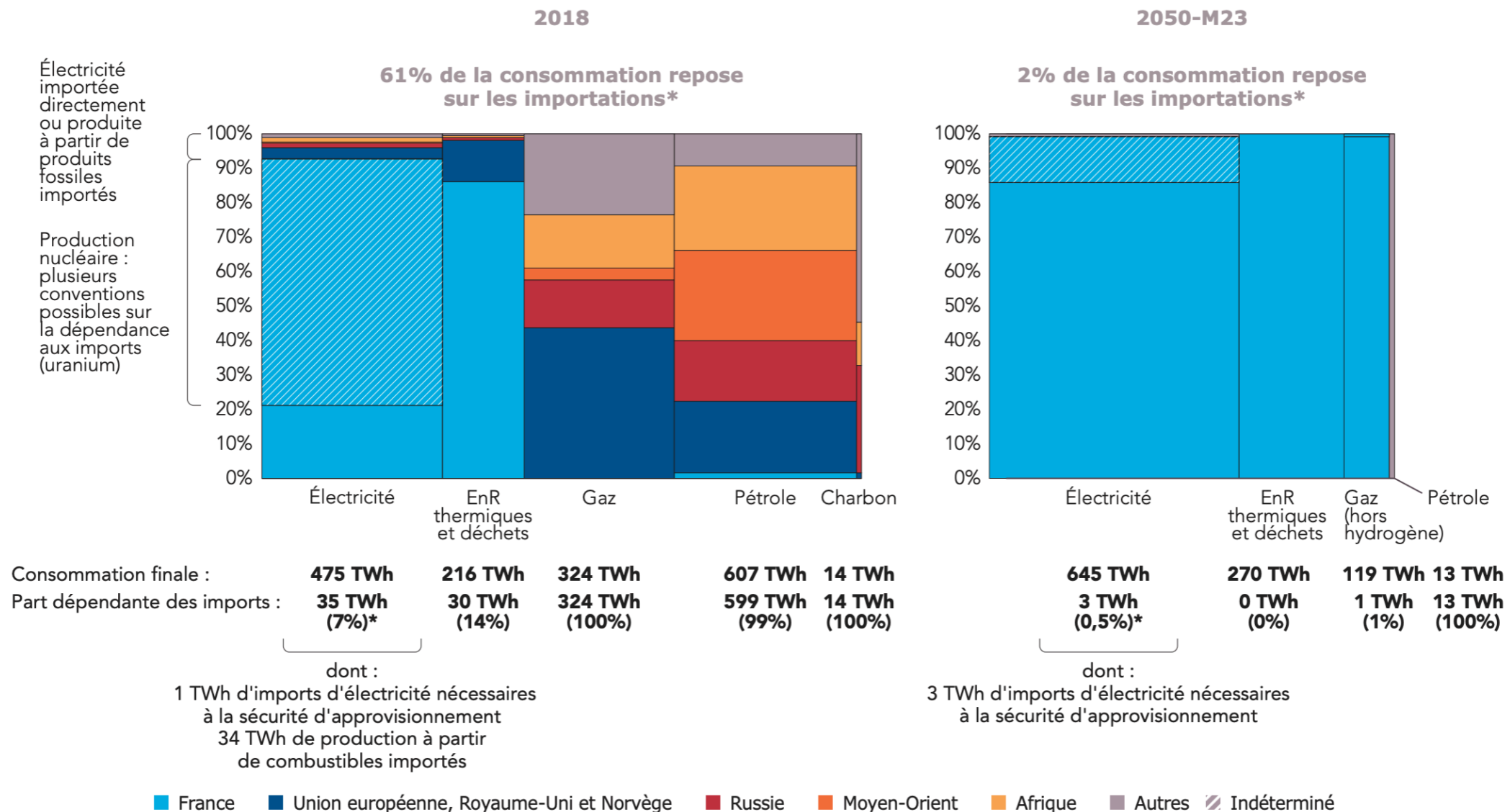
Transport du charbon, pétrole et gaz



Source :
Bill McKibben (2022)

Environ 40% du trafic maritime mondial

2. Indépendance énergétique



RTE, Futurs énergétiques 2050. Scénario M23 : forte part de renouvelables en 2050 (pas de nouveau nucléaire mais prolongation de centrales existantes)

Remarque : « l'électricité est comptée comme importée si elle est produite à partir de combustible importé ou si elle est importée dans les moments où ces imports sont strictement nécessaires. »

indépendance ≠ autarcie

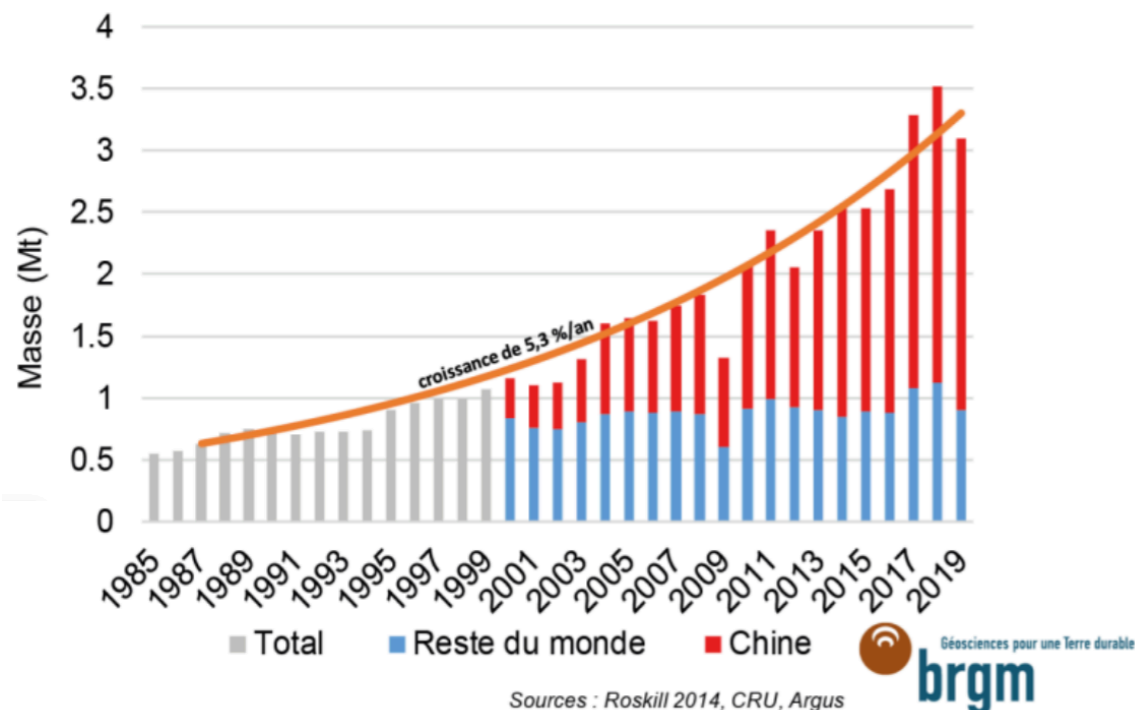
1. Nucléaire (compté comme local ci-dessus) :
 - Le minerai n'est pas extrait en France
 - Conversion, enrichissement, fabrication en France
 - Important stock d'uranium en France (10 ans vs 100 jours pour le pétrole)
 - Très faible dépendance du coût de production au coût de l'uranium

indépendance ≠ autarcie

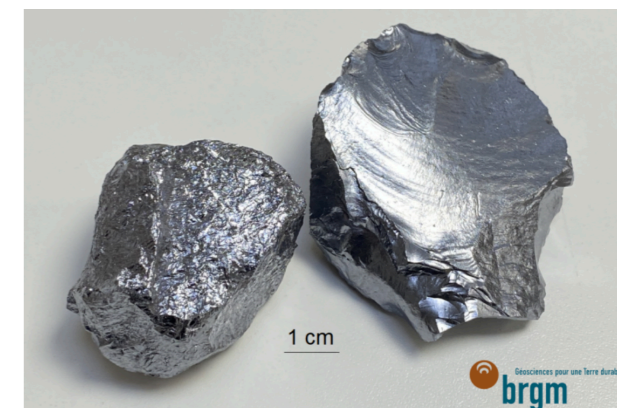
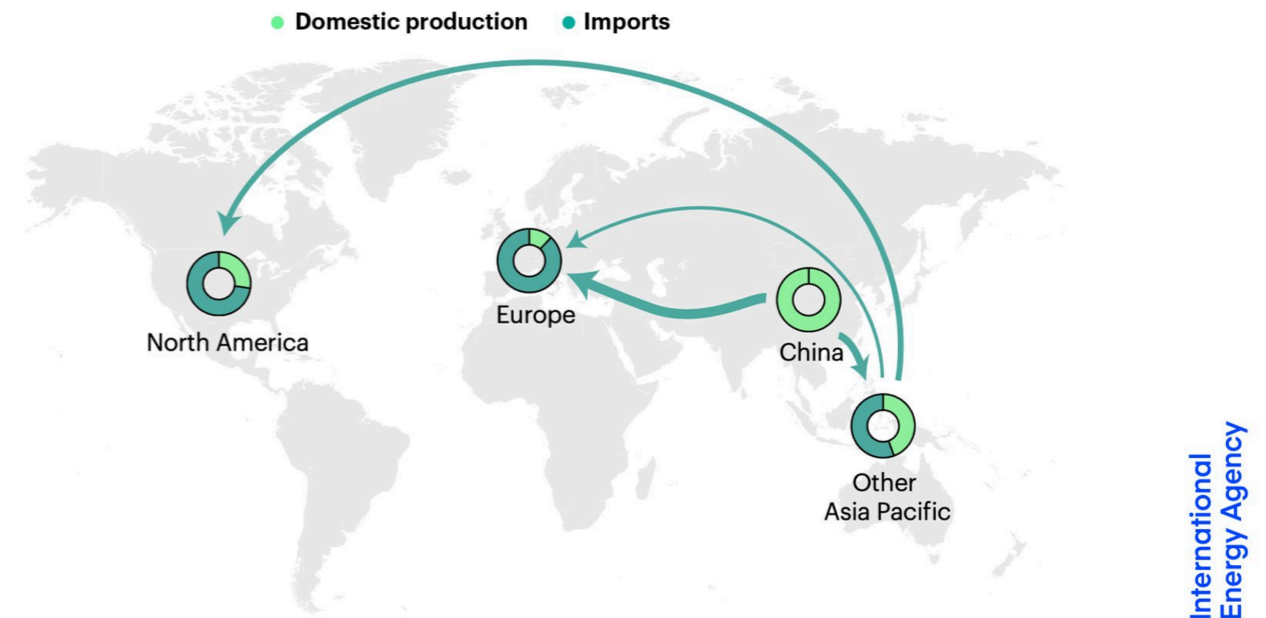
2. Tout système technologique implique des dépendances.

Ex : production du polysilicium et des panneaux PV

Evolution de la production mondiale de Si métal entre 1985 et 2019

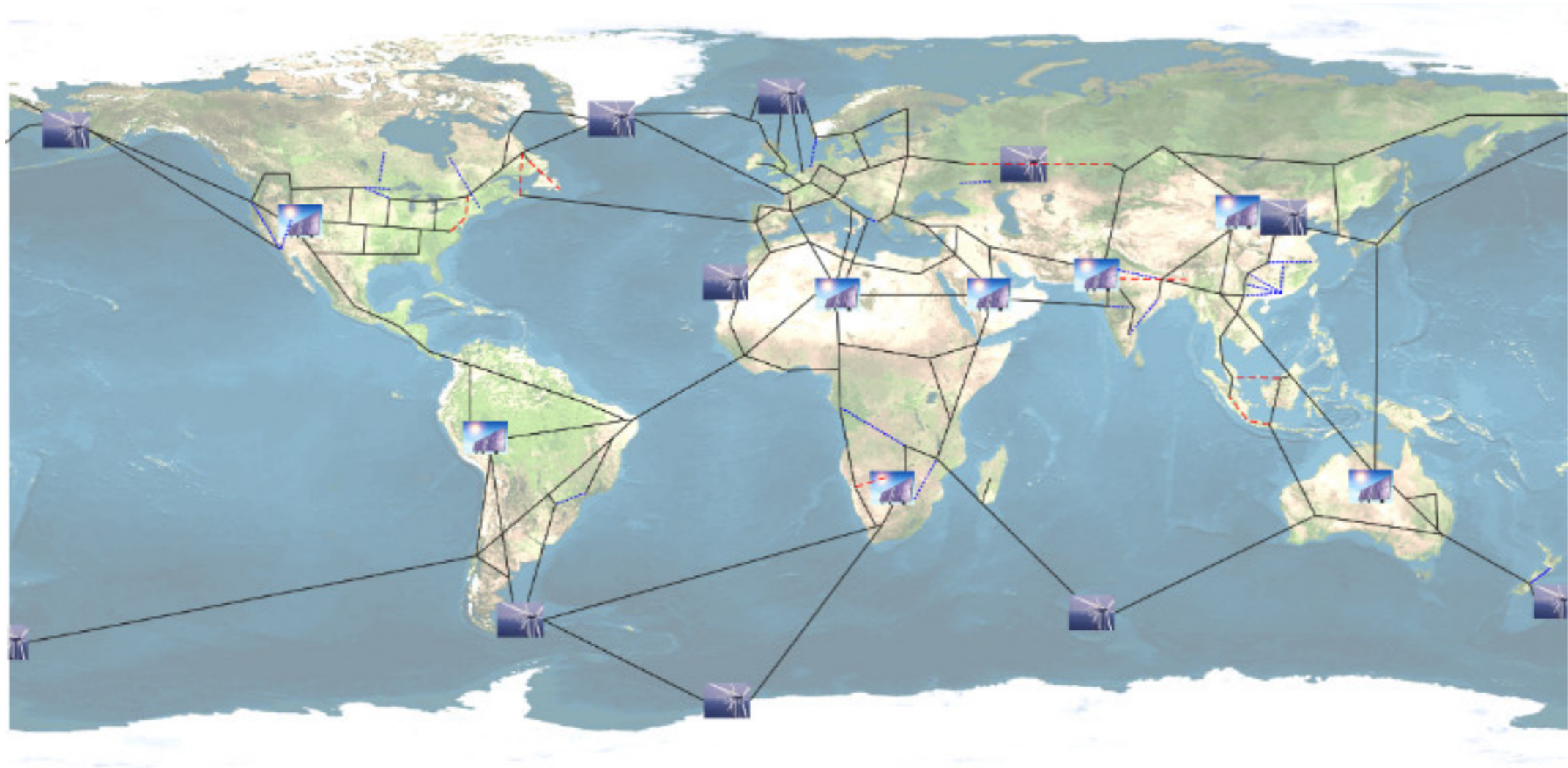


Main net trade flows for solar PV modules, 2021
Energy Technology Perspectives 2023



indépendance \neq autarcie

3. Interconnexions (intermittence des renouvelables)



Exemples de projets en cours :
Maroc-UK, Danemark-Belgique

3. Epuisement des ressources

Temps restant à consommation et réserves actuelles :

$$\text{static range} = \frac{\text{Réserves}}{\text{Consommation annuelle}}$$

110 ans

charbon

50 ans

pétrole

60 ans

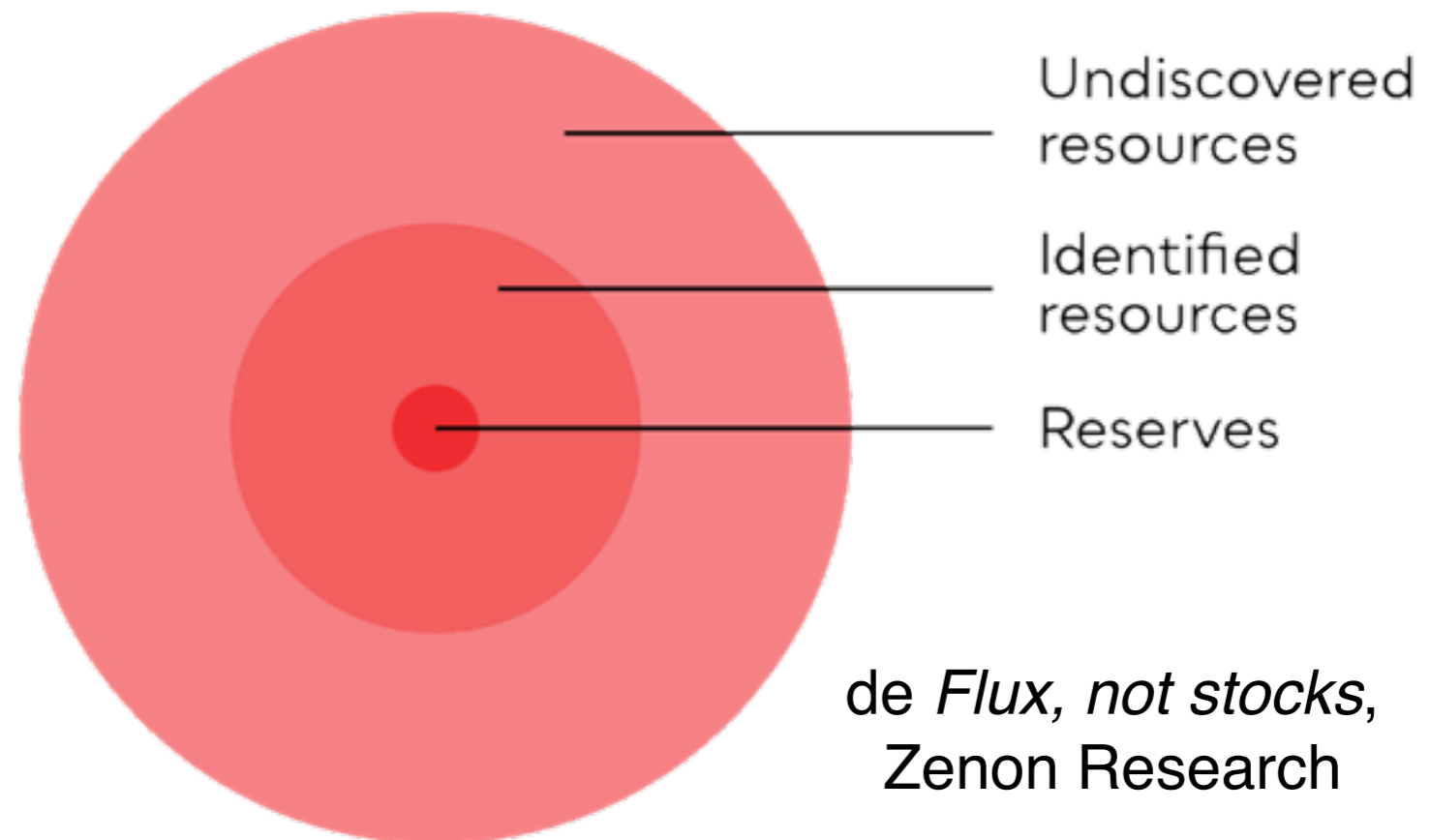
gaz

Attention, le *static range* peut être trompeur !

Ressources et réserves

Ressource : quantité présente sous terre dont on pourrait envisager l'extraction

Réserve : quantité qui pourra très probablement être extraite de façon rentable aux conditions techniques et économiques actuelles.



Flux des uns vers les autres :

- nouvelles découvertes,
- changement des conditions économiques,
- amélioration de techniques d'extraction

Exercice : un calcul de Jevons (UK 1865)

Objectif : estimer la durée d'utilisation du charbon (UK)

Hypothèse principale :

- la demande n'est pas constante
- taux de croissance constant : $\sim 3,5\%$ par an

Données :

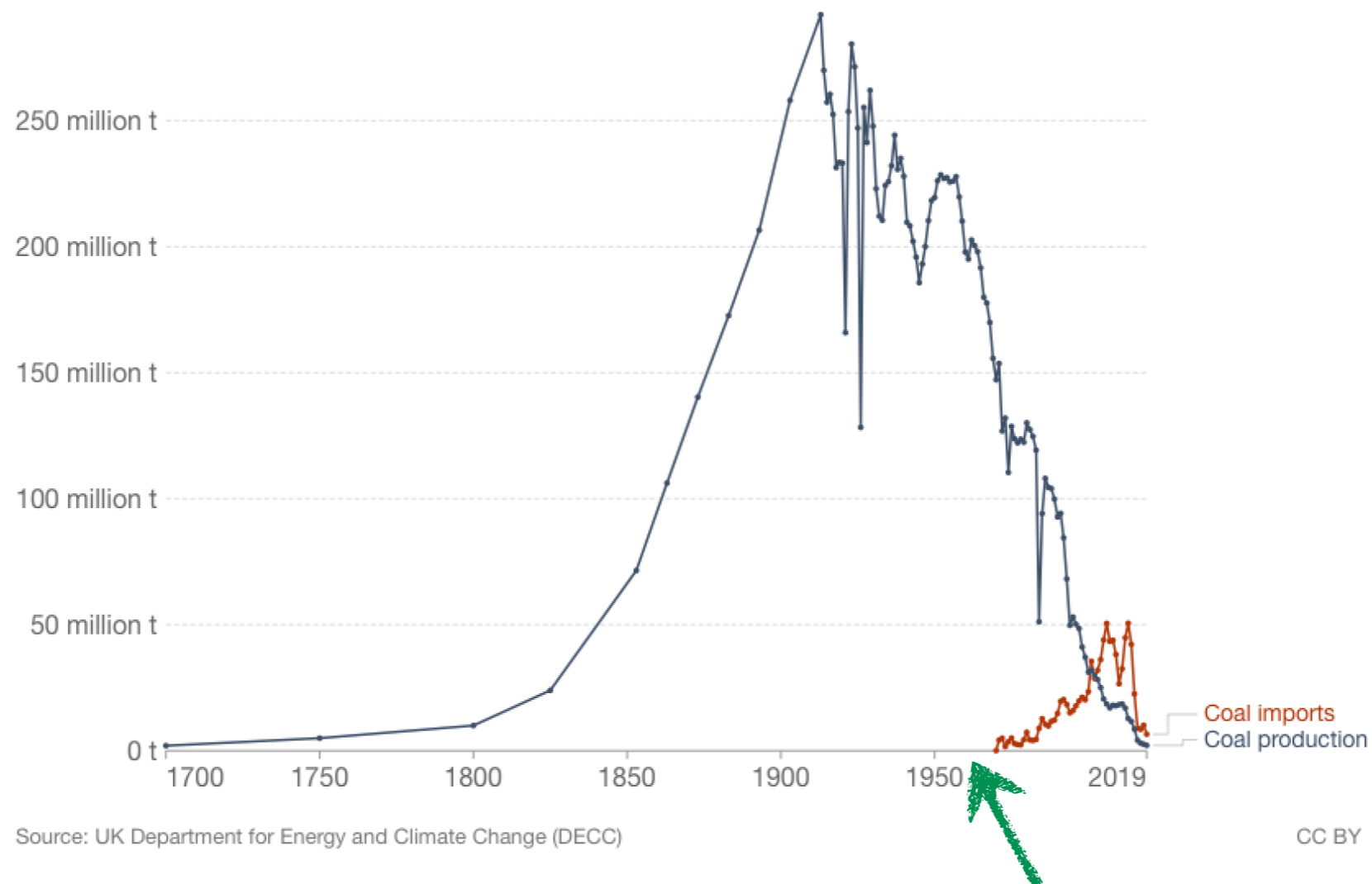
Réserve estimée (1859) : 90×10^9 tonnes

Consommation (1859) : 82×10^6 tonnes

Donc *static range* ~ 1000 ans

Jevons et le charbon au UK

Il ne restait que de l'ordre de 100 ans !



Prédiction de Jevons de la fin des extractions

Mais dans le monde...

... King Coal reste bien vivant !



Convoi de camions amenant du charbon de Mongolie, blog de M. Auzanneau

Le modèle de Hubbert pour le pétrole

$$P(t) = \text{production annuelle}$$

$$Q(t) = \int_{t_0}^t P(s) ds = \text{production totale}$$

Rappel des hypothèses de Jevons (charbon) :

$$\frac{\Delta P(t)}{P(t)} = r = \text{constante}$$

$$Q(t) \leq U = \text{stock total}$$

où on suppose U et r connus.

Le modèle de M. K. Hubbert

On redit ça de façon plus lisse. D'abord

$$\frac{\Delta P}{P} = r \rightsquigarrow \frac{dP}{dt} = rP \rightsquigarrow \frac{dQ}{dt} = rQ$$

Ensuite, on incorpore la contrainte $Q \leq U$:

$$\frac{dQ}{dt} = rQ \left(1 - \frac{Q}{U} \right)$$

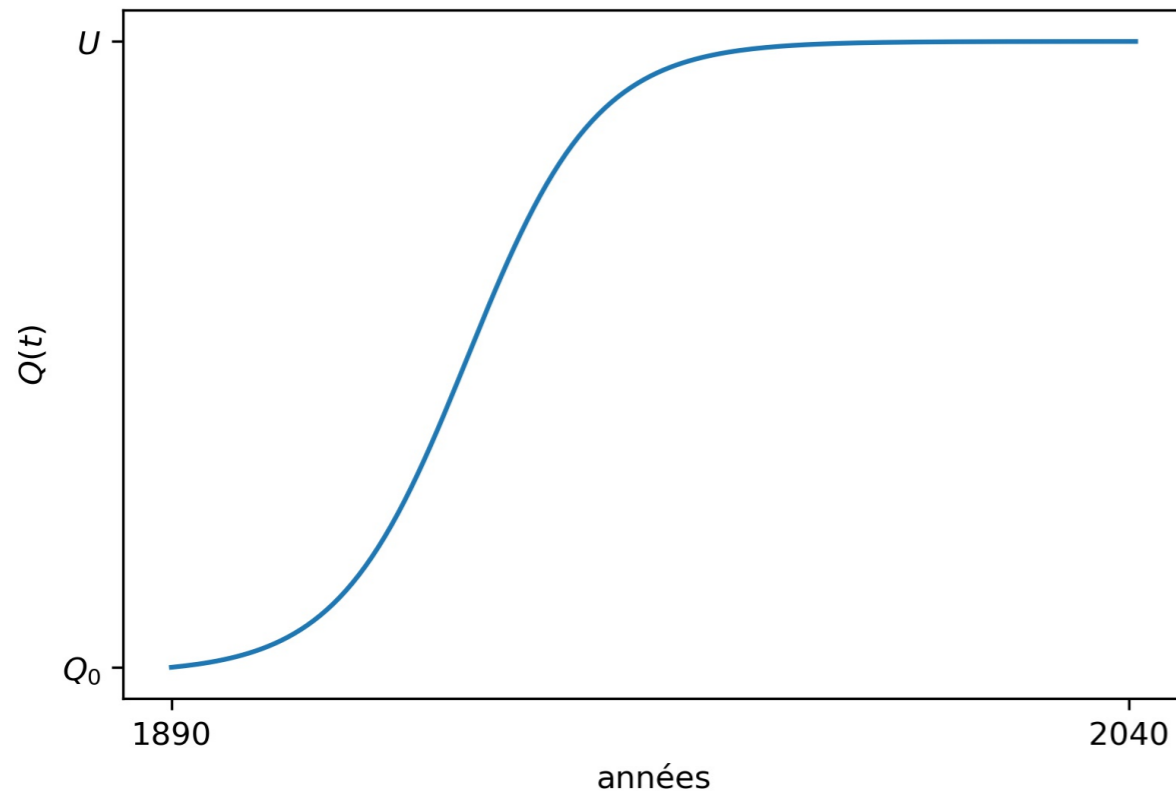
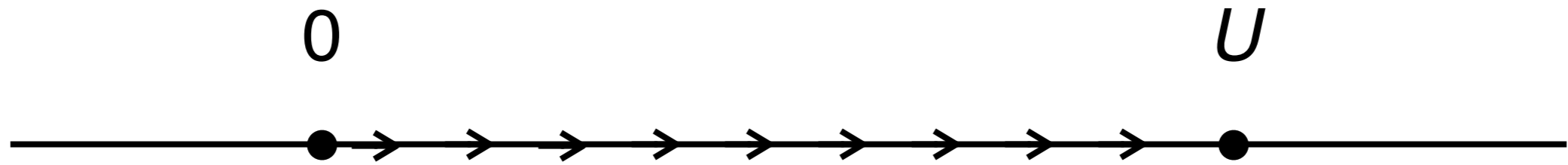
Equation logistique. Résolution explicite si sont connus :

U : stock,

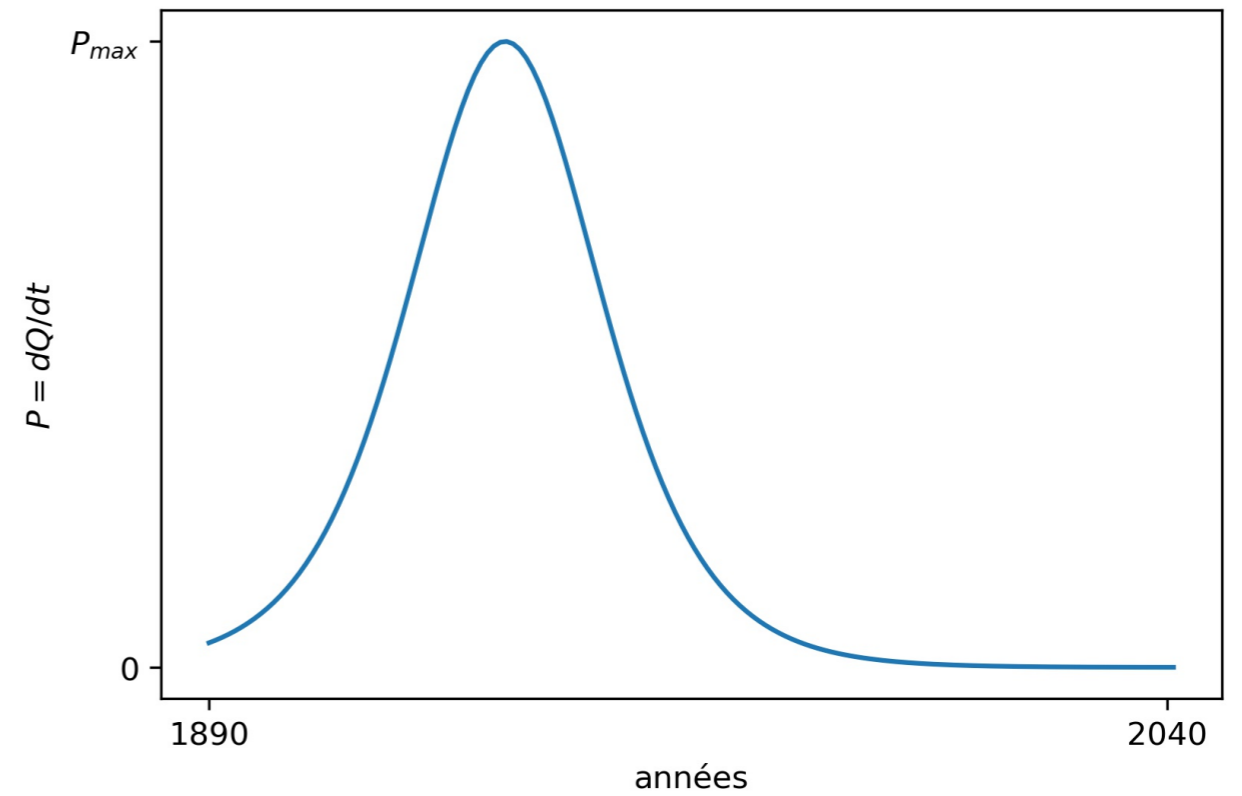
r : taux de croissance dans la période initiale,

$Q(t_0)$: quantité de départ.

Allure des solutions

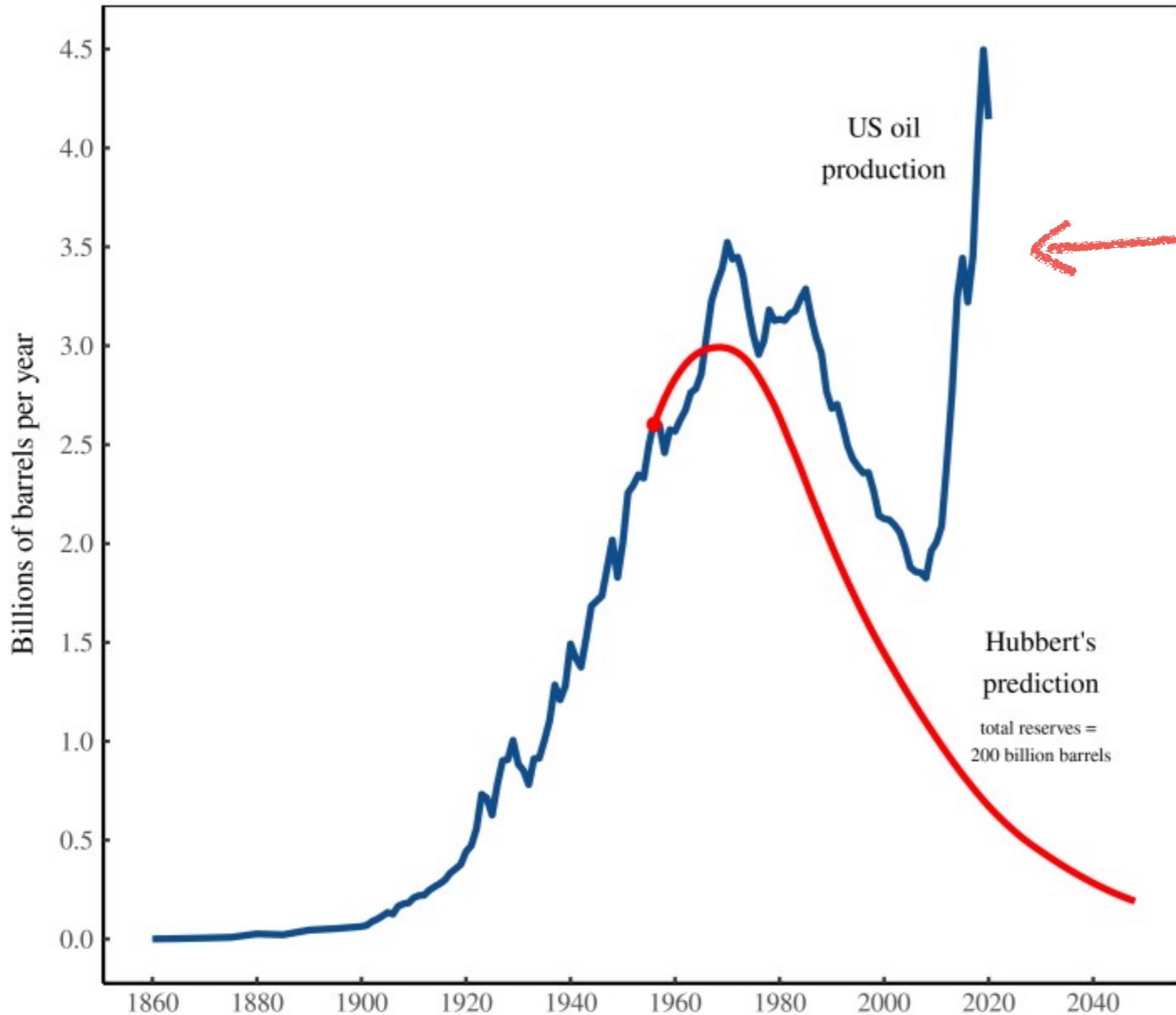


production cumulée
courbe en S



production annuelle

Les USA



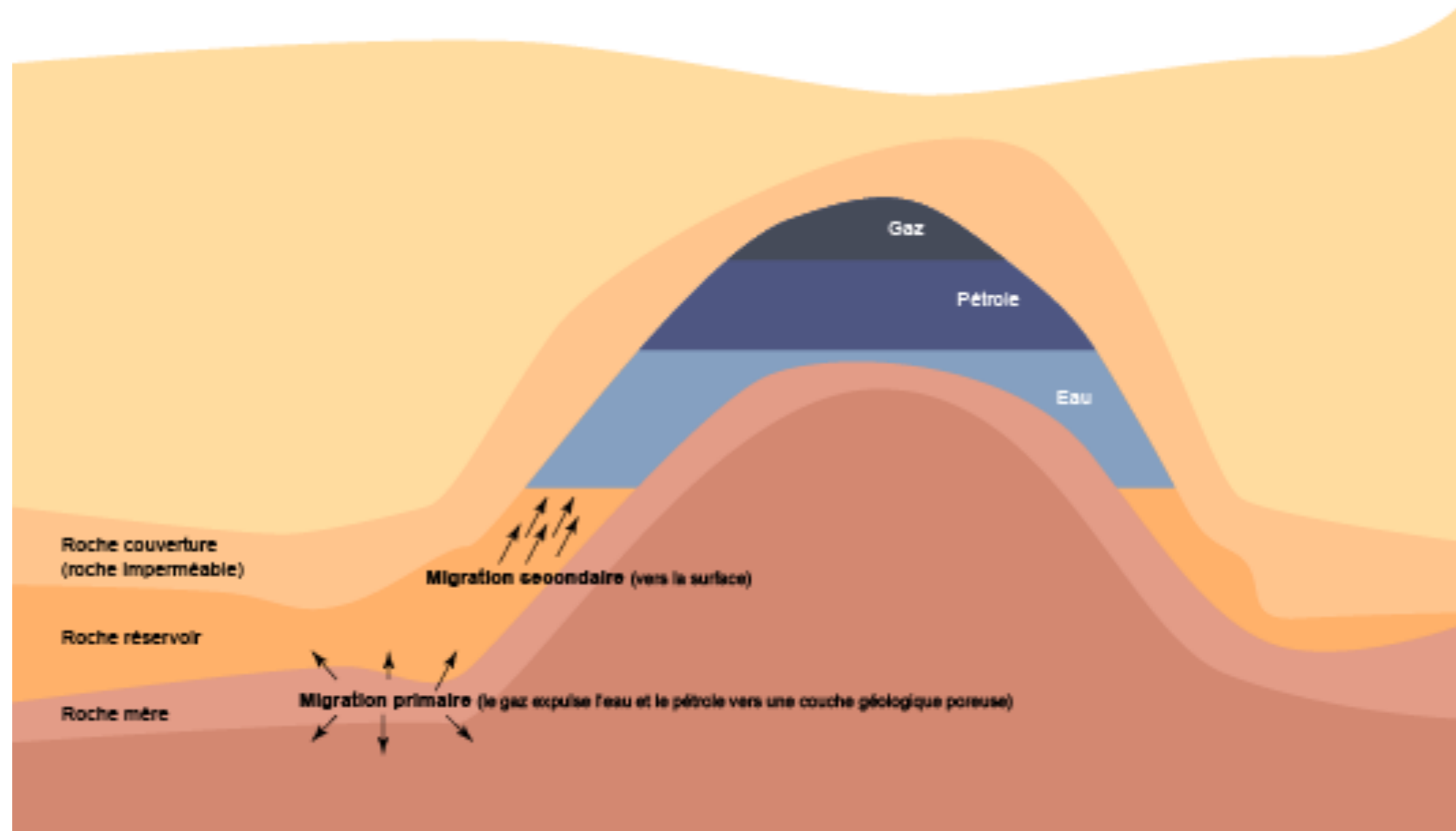
1956 : prédiction
1971 : pic prédit \approx pic observé
2008 : changement brusque !

source : Blair Fix

Remarque : l'évaluation des réserves était stable depuis 30-40 ans en 1956

Gisement de pétrole conventionnel

Le pétrole et le gaz sont extraits par forage et pompage

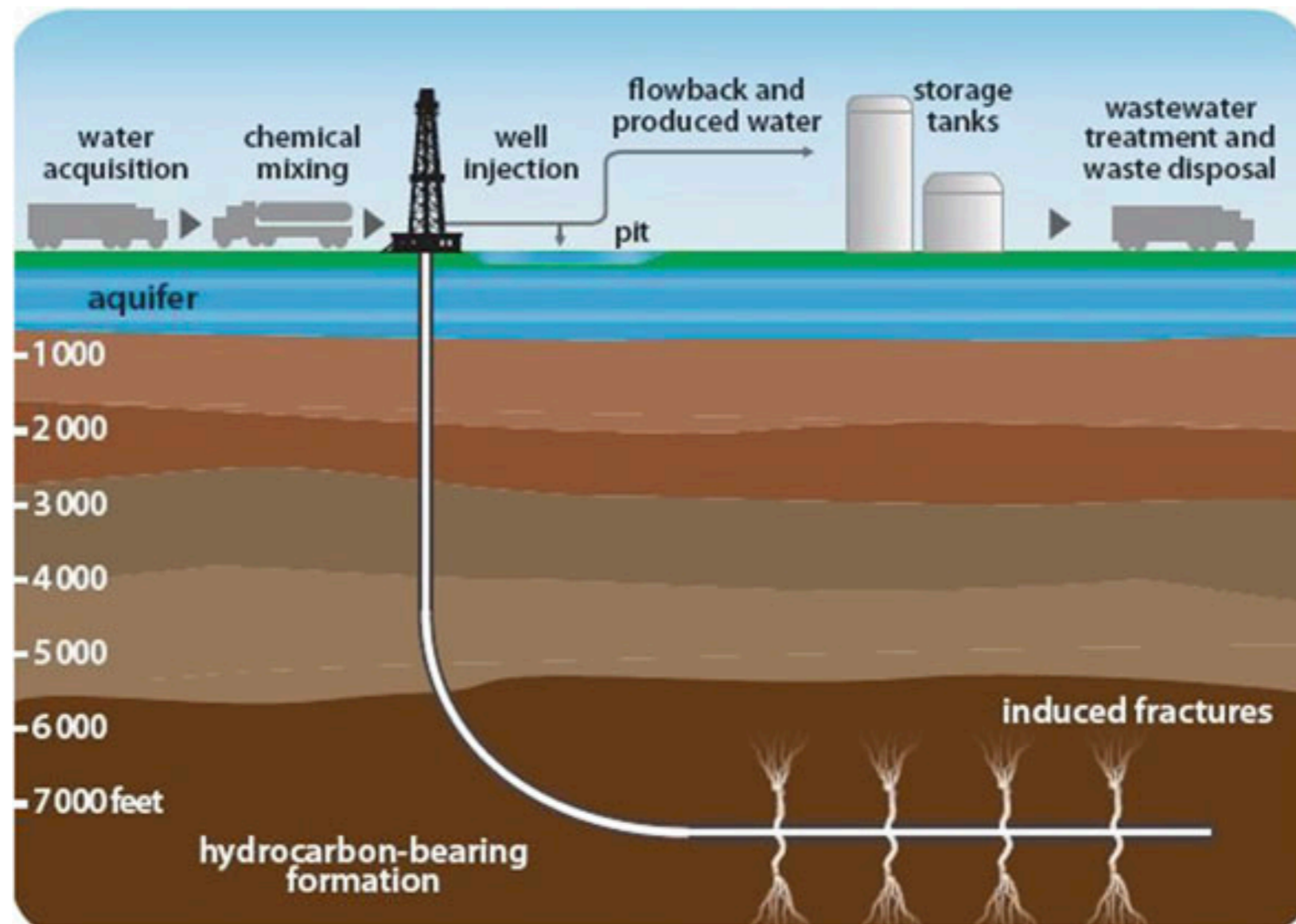


Source :
Connaissance
des énergies

Seules les réserves de pétrole conventionnel prises en compte par M.K. Hubbert

pétrole non conventionnel

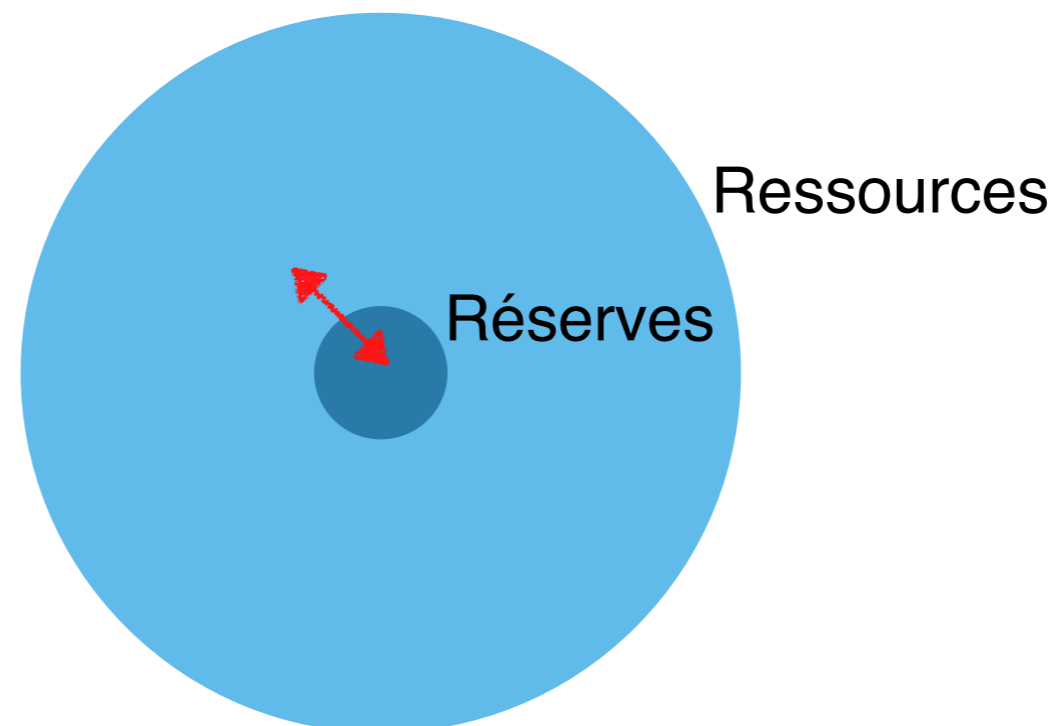
Plusieurs types. Ex : pétrole et gaz de schiste, restés dans la roche mère, et extraits par fracturation hydraulique



source : C. Hall

Réserves et ressources

- Le pétrole non conventionnel explique la très forte croissance de production aux USA à partir de 2008.
- USA : 1er producteur mondial de pétrole actuellement.
- M. K. Hubbert connaissait cette ressource mais l'avait jugée trop peu rentable pour être exploitée !

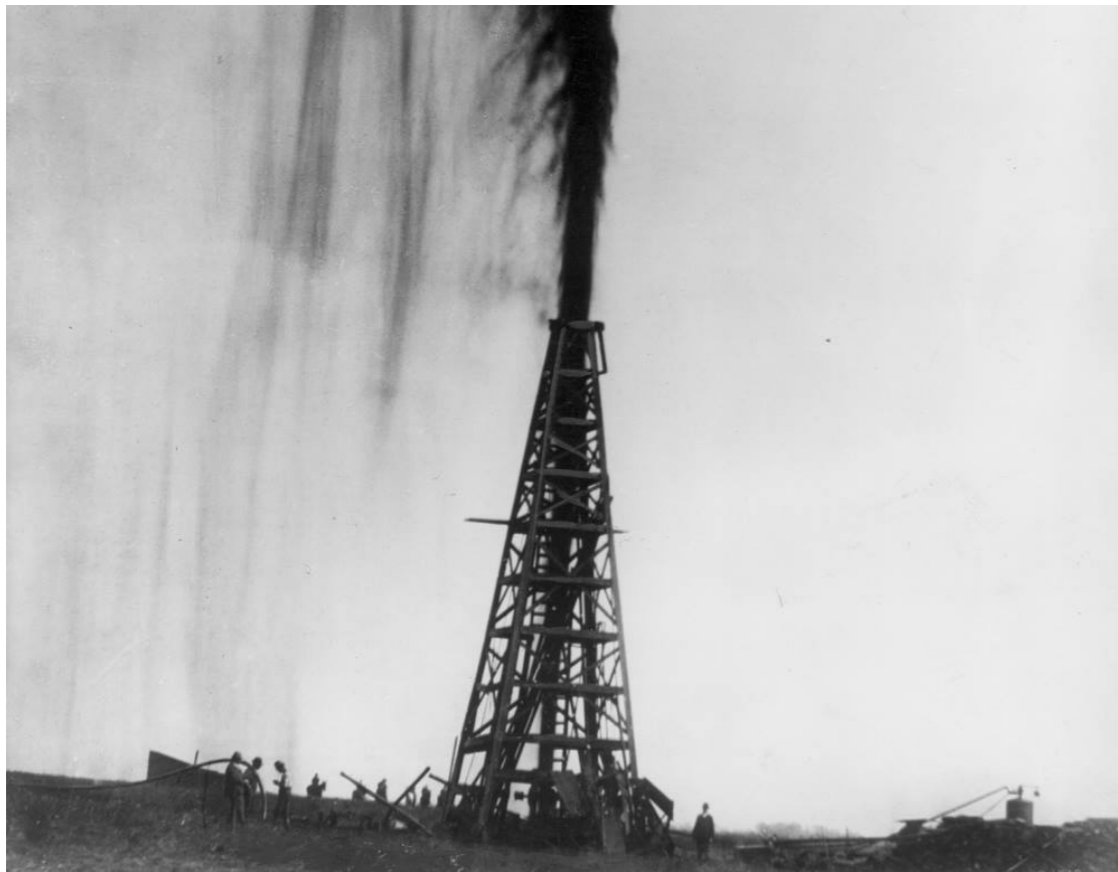


EROI

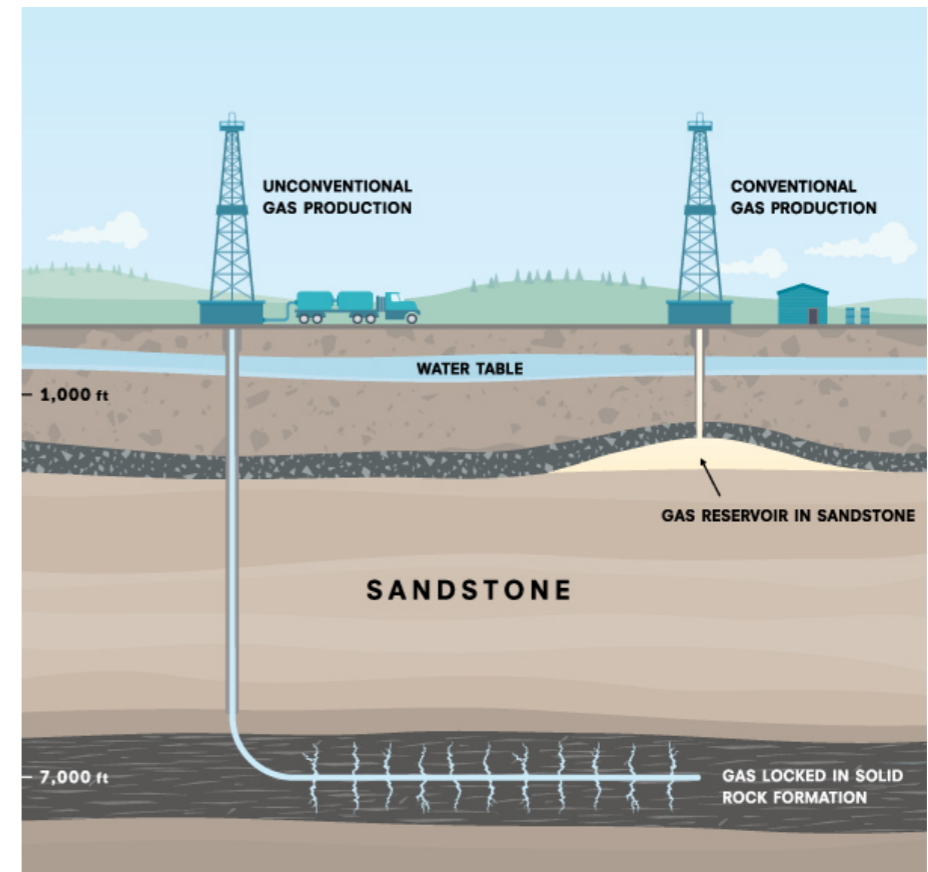
EROI = Energy Return On Investment

énergie produite

= $\frac{\text{énergie produite}}{\text{énergie utilisée pour la production d'énergie}}$



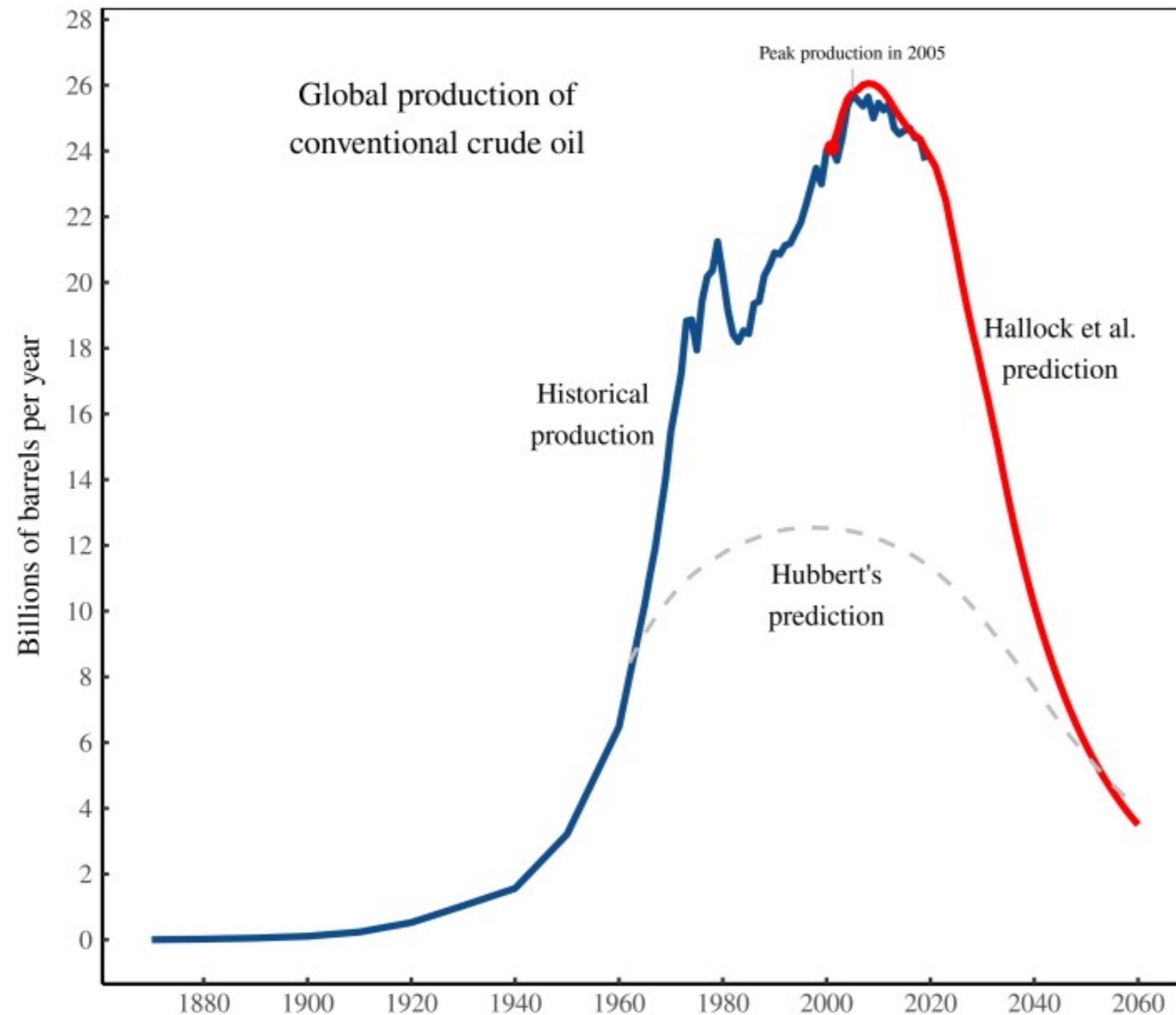
Un *gusher* : EROI élevé



non-conventionnel : EROI bas

Remarque : l'EROI peut être difficile à estimer précisément et n'est pas un indicateur direct de la rentabilité économique

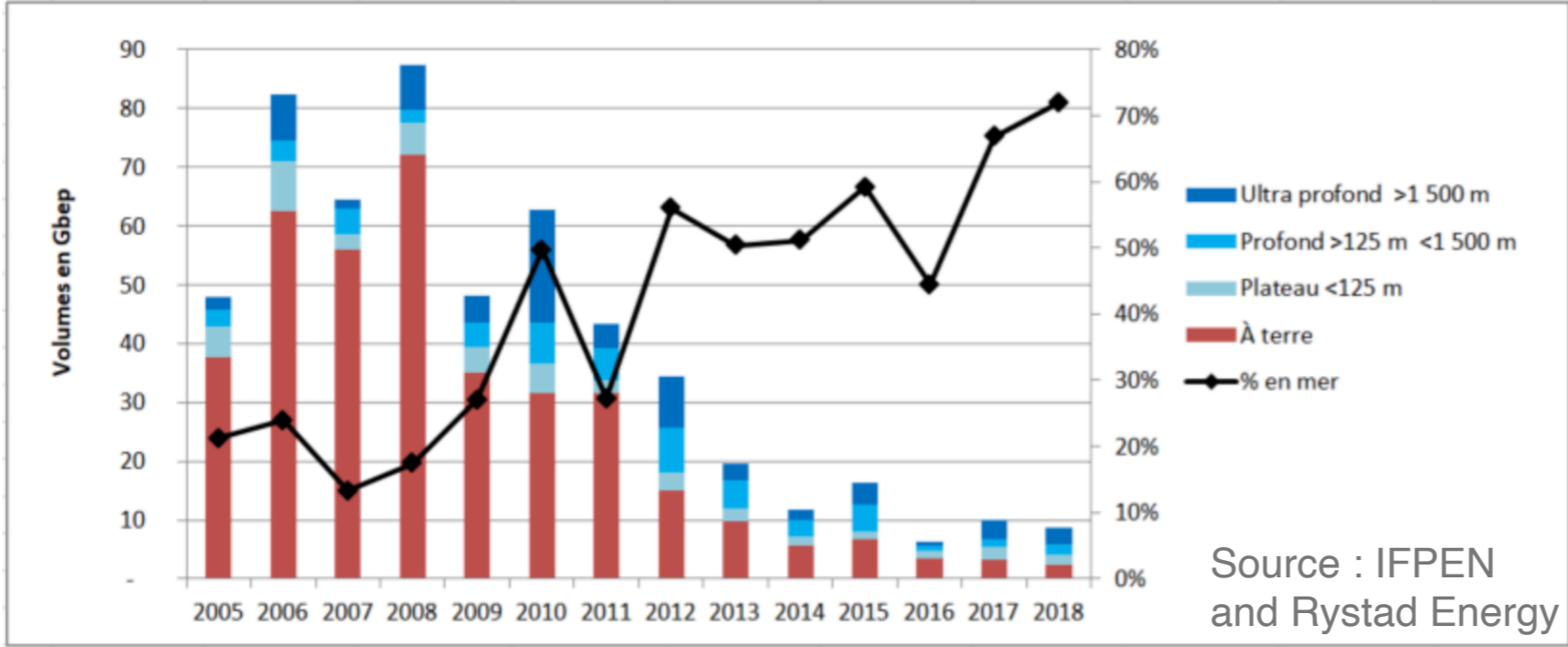
Le monde : pétrole conventionnel



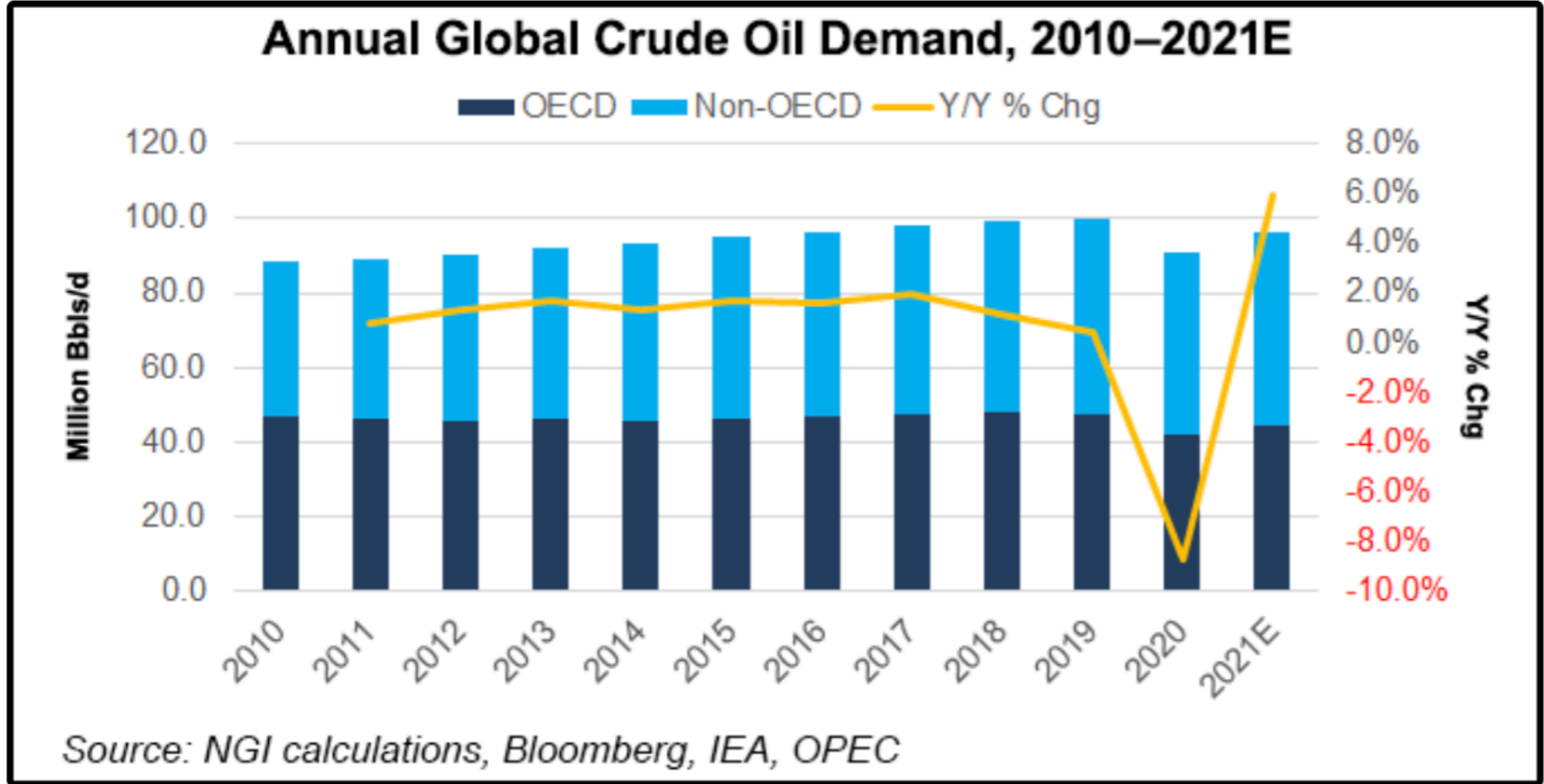
1. Pic d'extraction : 2005-2010
2. Prédiction de M. K. Hubbert :
Réserve sous-estimée mais exploitée plus vite que prévu.
D'où : pic prévu au bon moment mais sous-estimé.

source : Blair Fix

Pétrole et Gaz à moyen terme



Contraction de l'offre



Demande reste croissante

Et les autres matières ?

L'approvisionnement suffisant et au bon rythme de certains métaux est une grosse inconnue de la transition énergétique



Photo et montage : Dillon Marsh. Mine de cuivre en Afrique du Sud

Exercice : lithium et VE

- Le lithium est un composant des batteries Li-ion des voitures électriques
- Le lithium ne se recycle pas pour l'instant à qualité équivalente (pour fabrication de batterie)



Combien de générations de voitures électriques si tout le parc est électrifié ?

nombre de voitures dans le monde : 10^9

durée d'une batterie : 10 ans

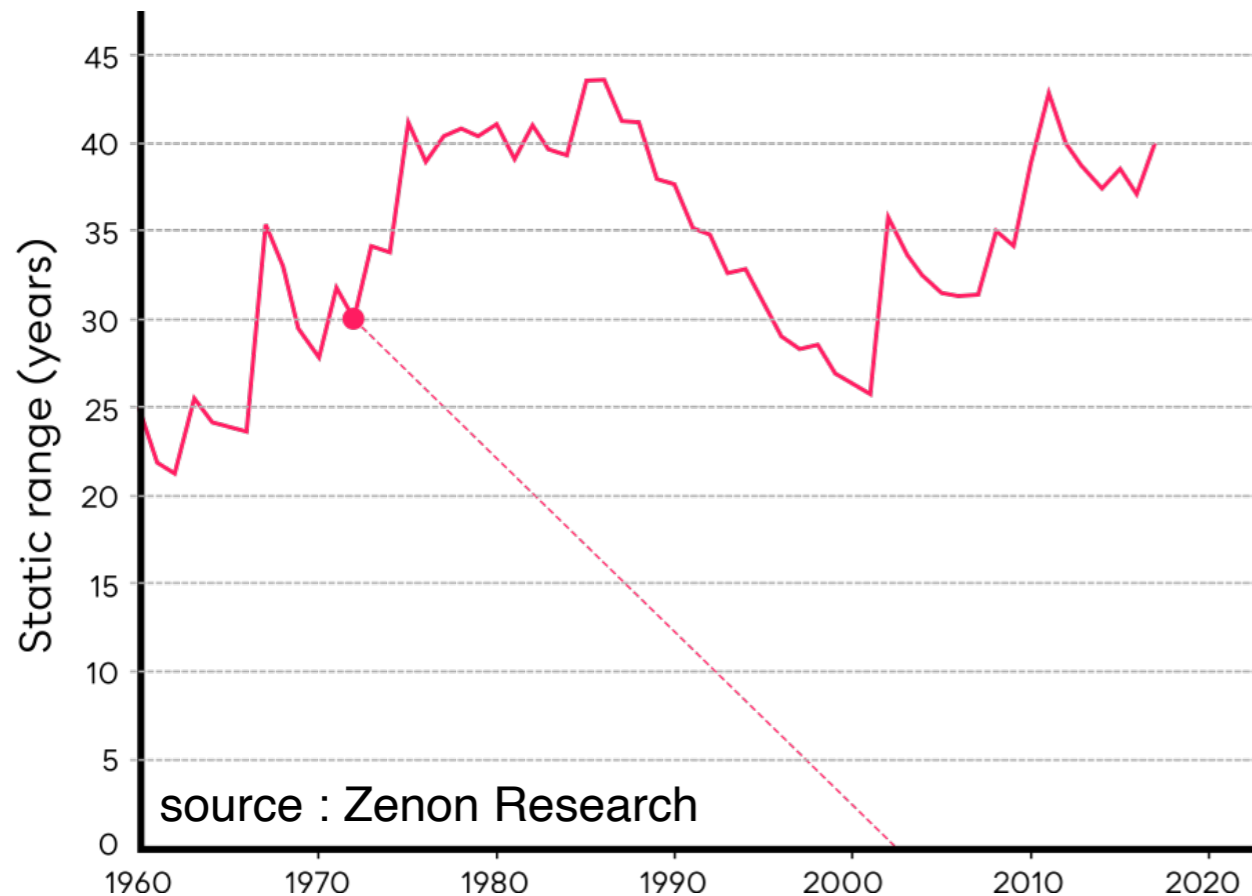
réserves de lithium : 20×10^6 tonnes

capacité de stockage du lithium : $0,15 - 0,3 \text{ kg/kWh}$

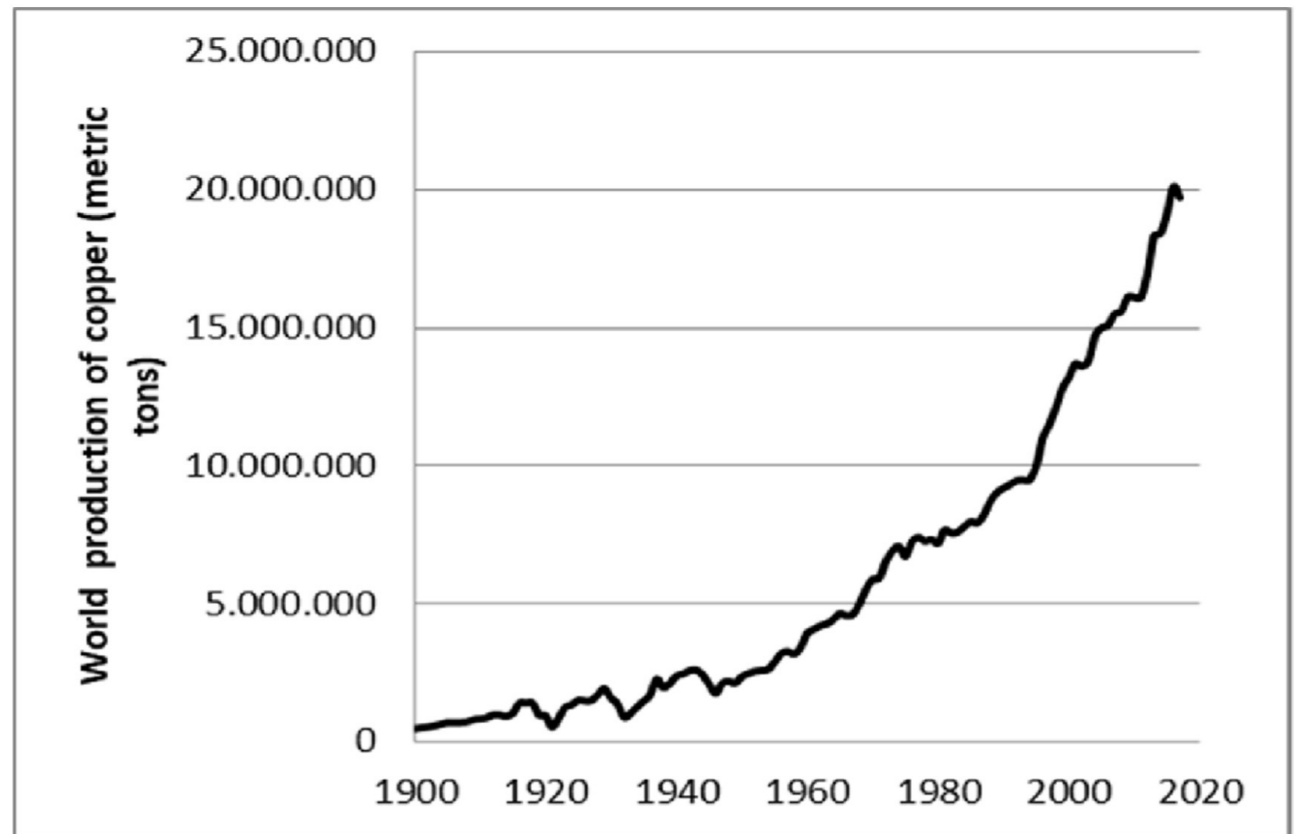
capacité d'une batterie (petite Tesla) : $> 50 \text{ kWh}$

Ex : Static range du cuivre

A titre de comparaison (vrai pour beaucoup d'autres métaux) :



Static range



Production annuelle

Un static range faible ne signifie pas épuisement mais peut-être lenteur d'approvisionnement à court-moyen terme. Cf. *Flux not Stocks* par Zenon Research.

Cas du Lithium

Global lithium reserves

A known reserve is a deposit that is deemed to be economically and technologically feasible to extract. This is shown in tonnes. This can increase over time if we discover more lithium deposits, or existing ones become feasible to mine under current market conditions.

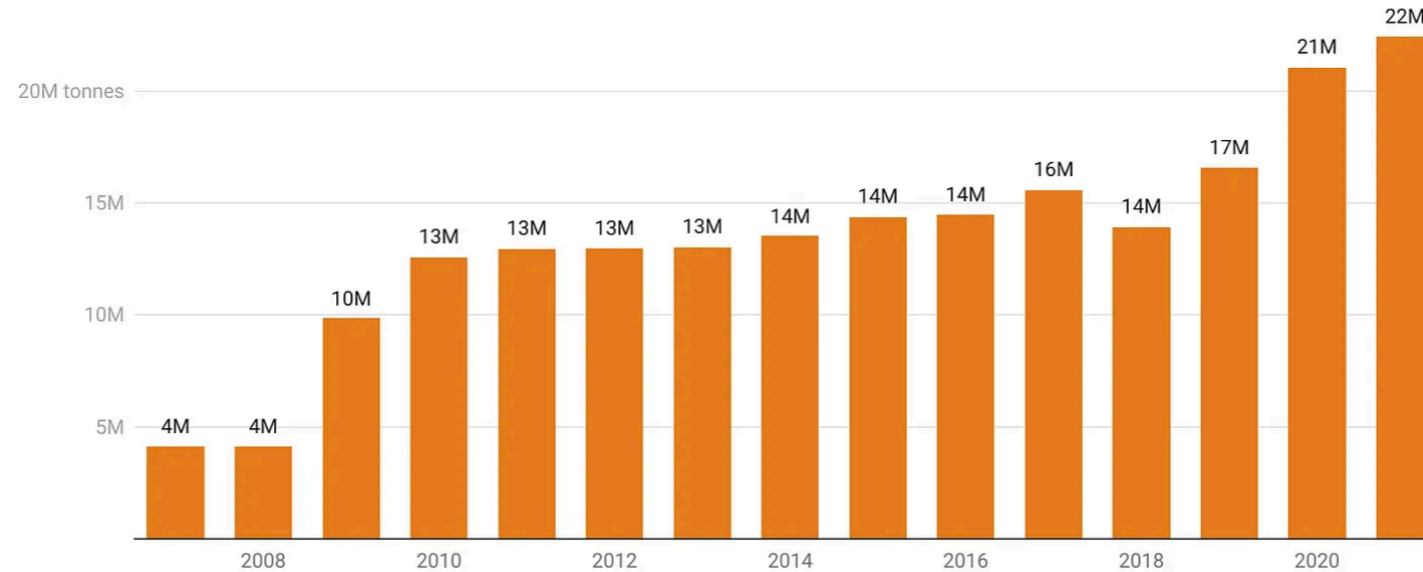


Chart: Hannah Ritchie • Source: US Geological Survey (USGS) • Created with Datawrapper

Global lithium resources

Resources are estimates of discovered and undiscovered deposits. This is measured in tonnes. Not all of these resources are economically or technologically viable to extract. Resources become 'reserves' when they become viable under current market conditions.

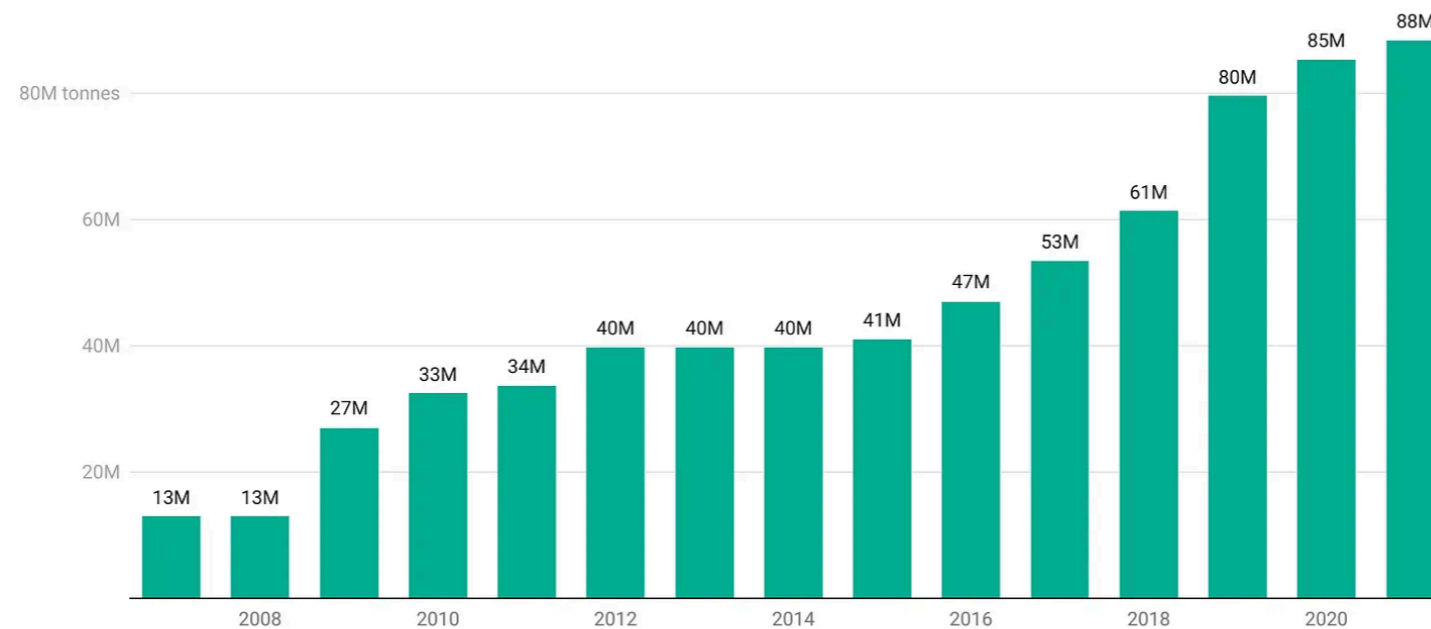


Chart: Hannah Ritchie • Source: US Geological Survey (USGS) • Created with Datawrapper

**Des changements
possibles**

Leviers possibles

Offre :

- sources d'énergie bas carbone (ex : éolienne)
- efficacité énergétique (ex : pompe à chaleur)

Demande :

- Sobriété (ex : chauffer moins et mettre un pull)
- Flexibilité (ex : utiliser le lave-vaisselle la nuit)

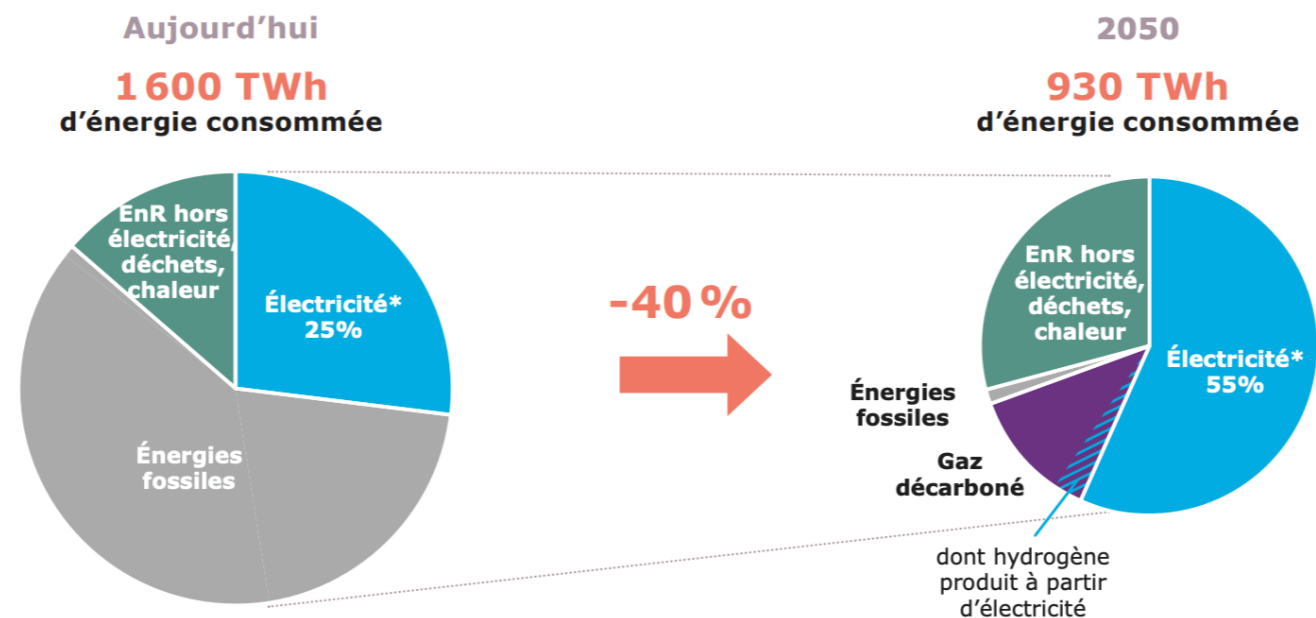
1. Efficacité/

sobriété

Réduction de la consommation énergétique

Les objectifs de baisse d'émission ne peuvent être atteints *à temps* sans une *baisse* de la consommation d'énergie

Figure 2 Consommation d'énergie finale en France et dans la SNBC



* Consommation finale d'électricité (hors pertes, hors consommation issue du secteur de l'énergie et hors consommation pour la production d'hydrogène)
Consommation intérieure d'électricité dans la trajectoire de référence de RTE = 645 TWh

RTE, Futurs énergétiques 2050

Remarque : augmentation de la demande absolue en électricité (voir plus loin)

Efficacité et sobriété/modération

Efficacité énergétique :

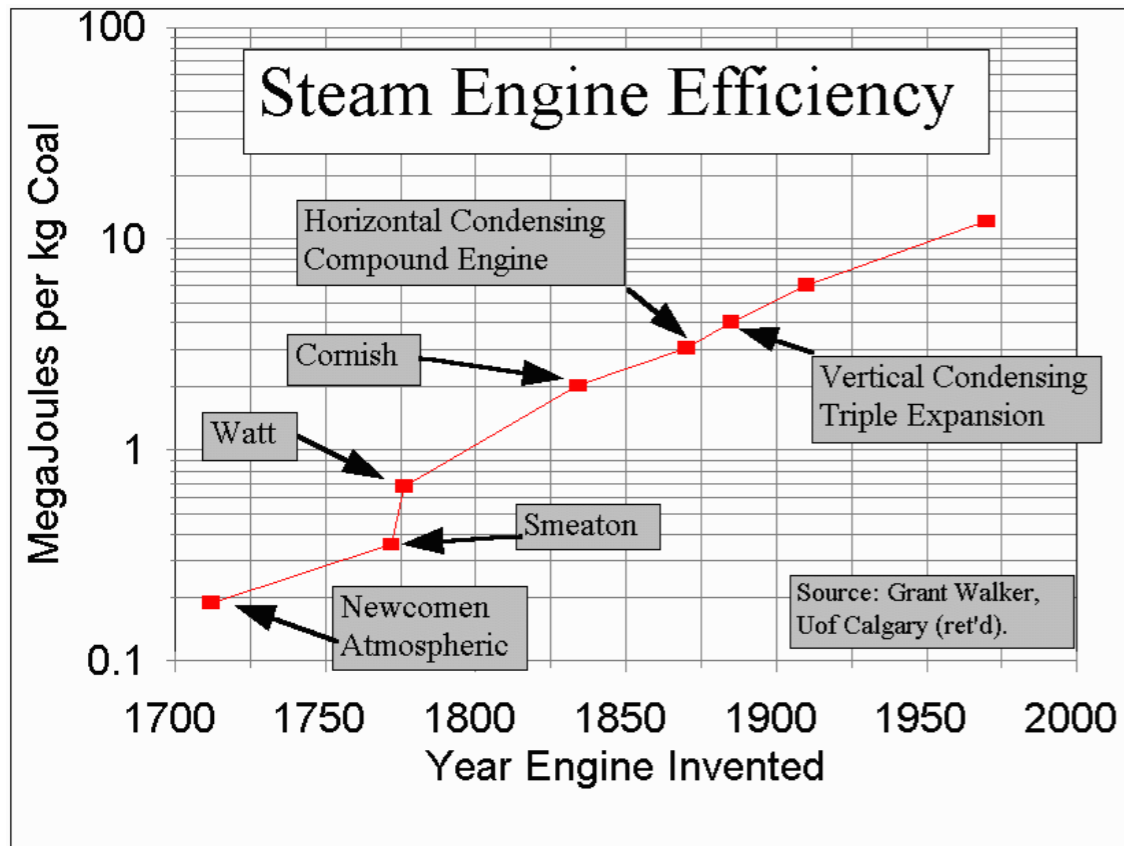
Réduction de la consommation à usage équivalent

Sobriété énergétique :

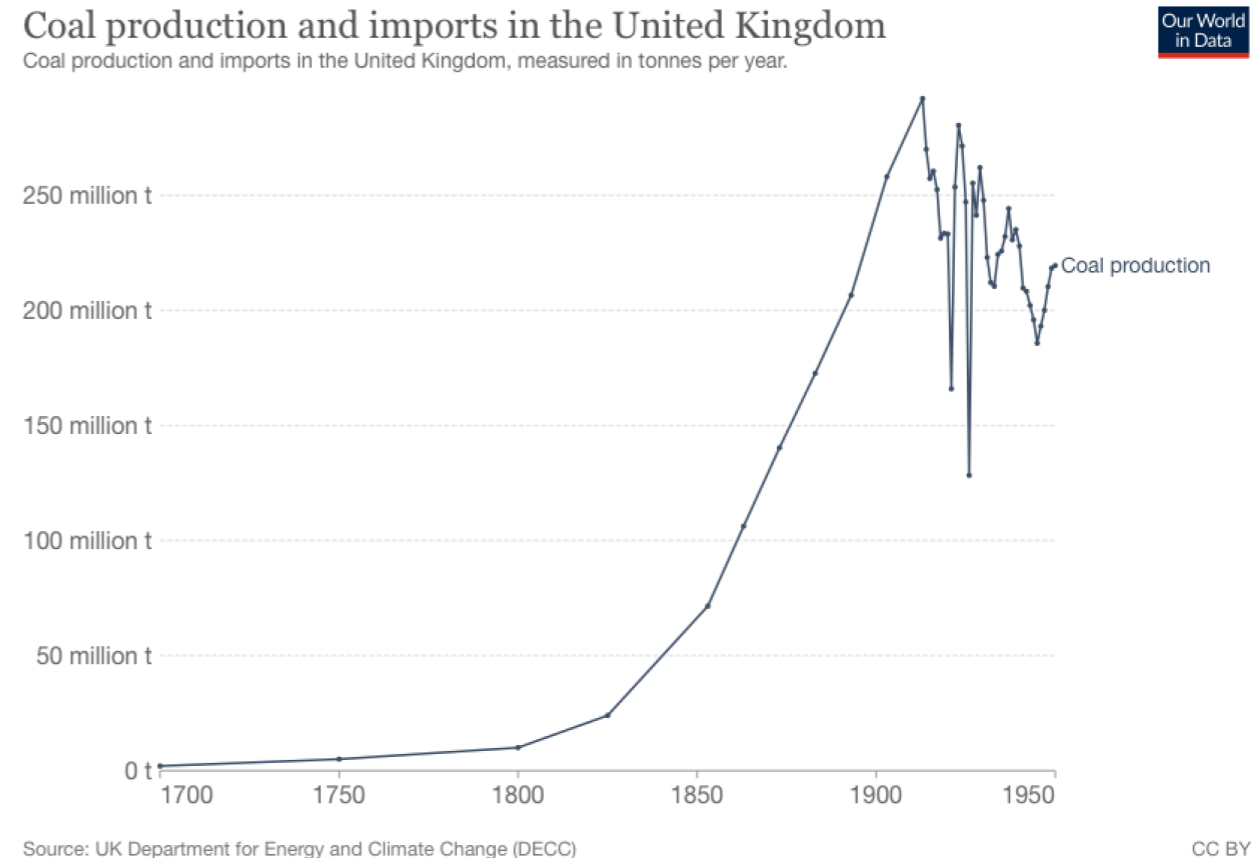
Réduction grâce à une modification *volontaire* des usages

L'efficacité énergétique doit être accompagnée d'une forme de **sobriété** ou de **modération** pour avoir un impact sur la consommation d'énergie.

Le paradoxe de Jevons



accroissement ~ exponentiel



CC BY

La consommation de charbon *augmente* alors que l'efficacité énergétique *augmente*

Explication : une machine plus performante est plus rentable

Exemple actuel : l'éclairage



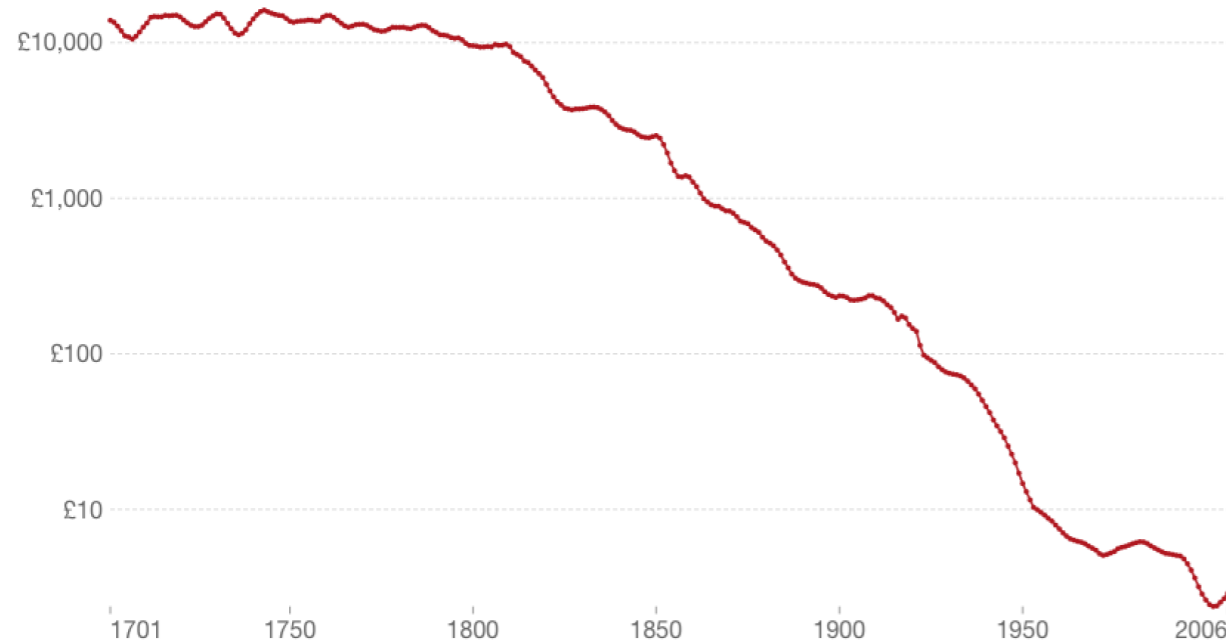
Le jeu en vaut-il la chandelle ?

Exemple actuel : l'éclairage

The price for lighting in the UK

The price per million lumen-hours in British Pound. 1 lumen hour is equal to the luminous energy emitted in 1 hour by a light source emitting a luminous flux of 1 lumen. For comparison: a standard 100W incandescent light bulb emits ± 1700 lumen.

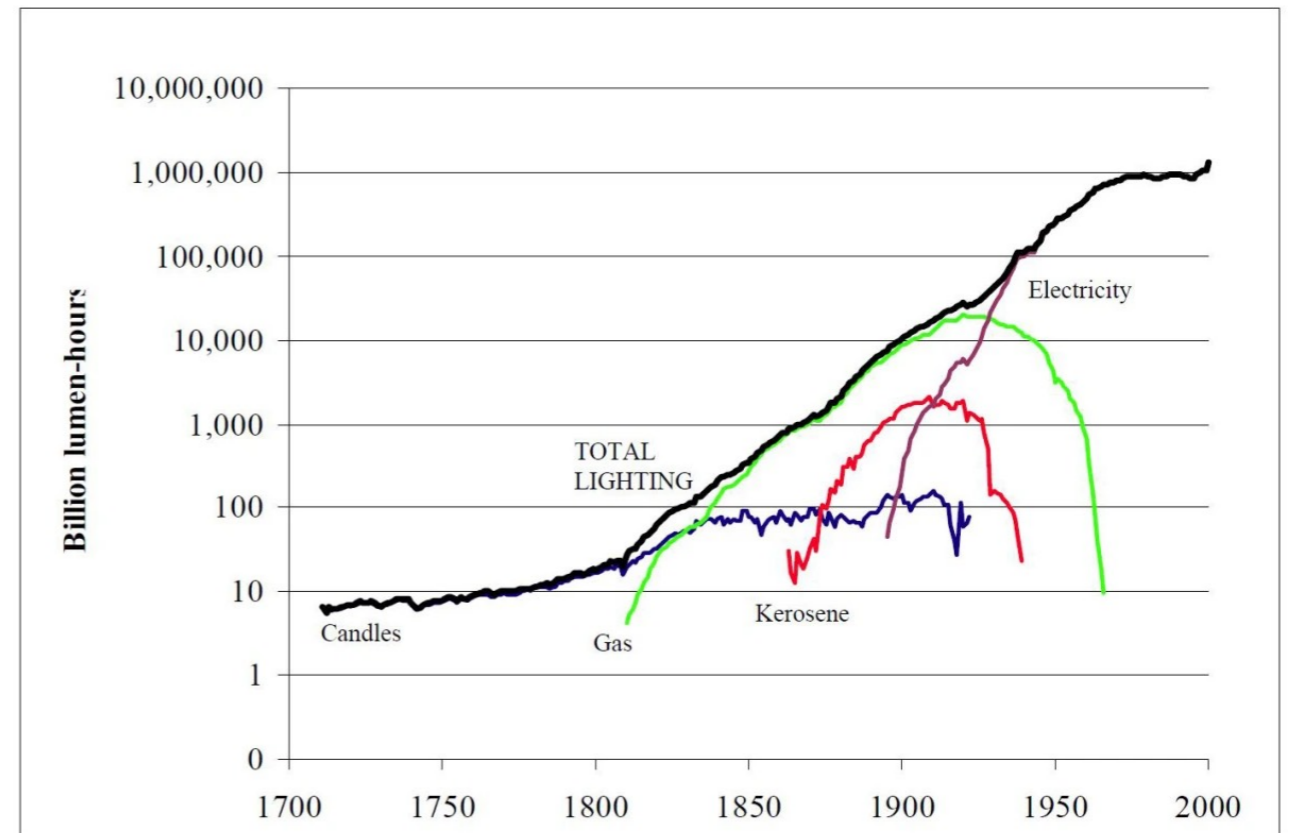
Our World
in Data



Source: Fouquet and Pearson (2012)

Note: The price is adjusted for inflation and expressed in prices for the year 2000. Shown is a 5-year moving average.

OurWorldInData.org/light/ • CC BY



Fouquet et Pearson, 2007, UK

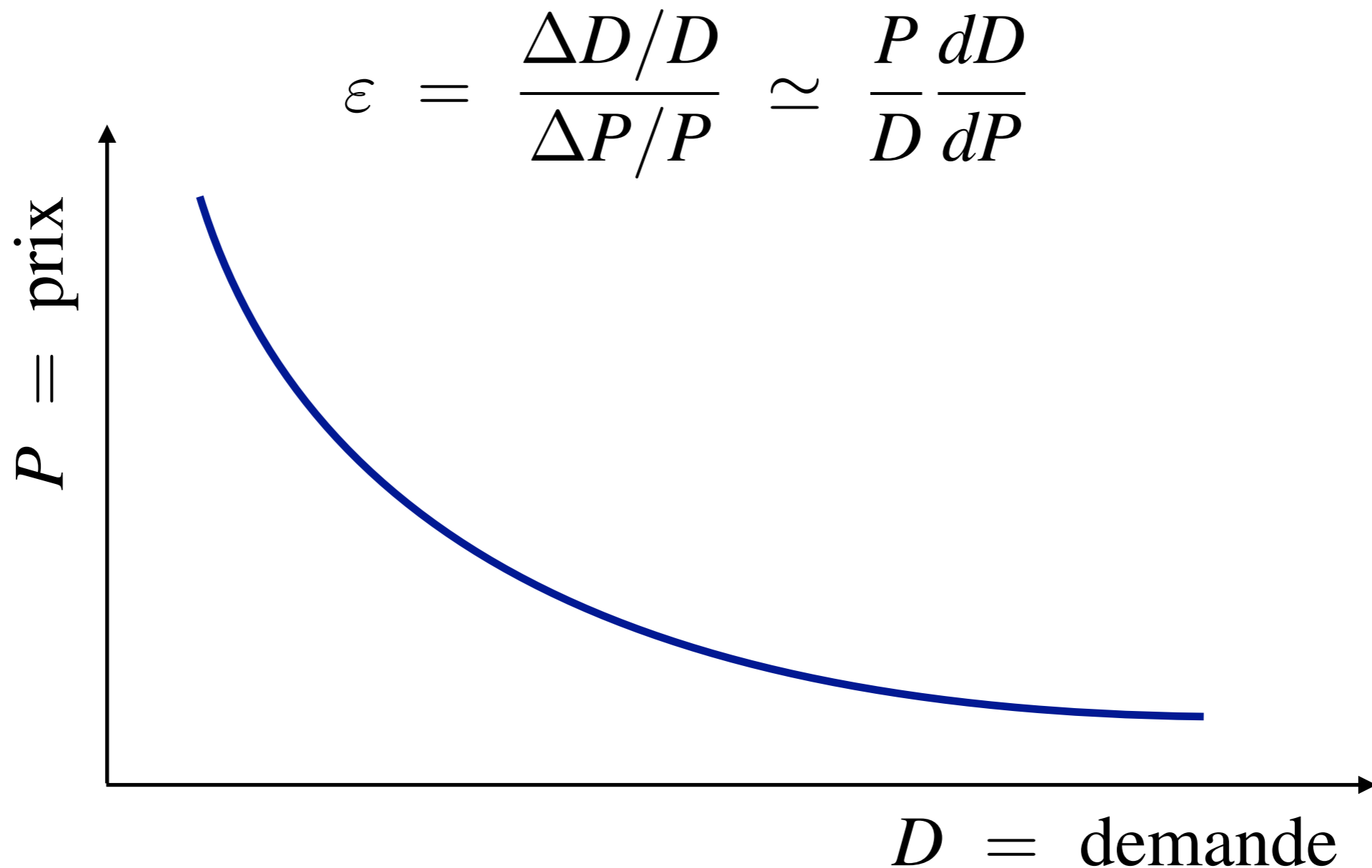
diminution exponentielle du prix

~

accroissement exponentiel de la demande

Prix $P = P(\varepsilon, p, \dots)$, $\varepsilon =$ efficacité énergétique, $p =$ prix de l'énergie

Elasticité de la demande



Explication : l'éclairage meilleur marché permet à plus de monde d'éclairer plus

Exercice : efficacité énergétique

Comparer la consommation énergétique par habitant pour l'éclairage en UK en 1800, 1900 et 2000.

Efficacité énergétique (valeurs *très approximatives*) :

bougie : 0,1 *lm/W*

lampe à gaz : 1 *lm/W*

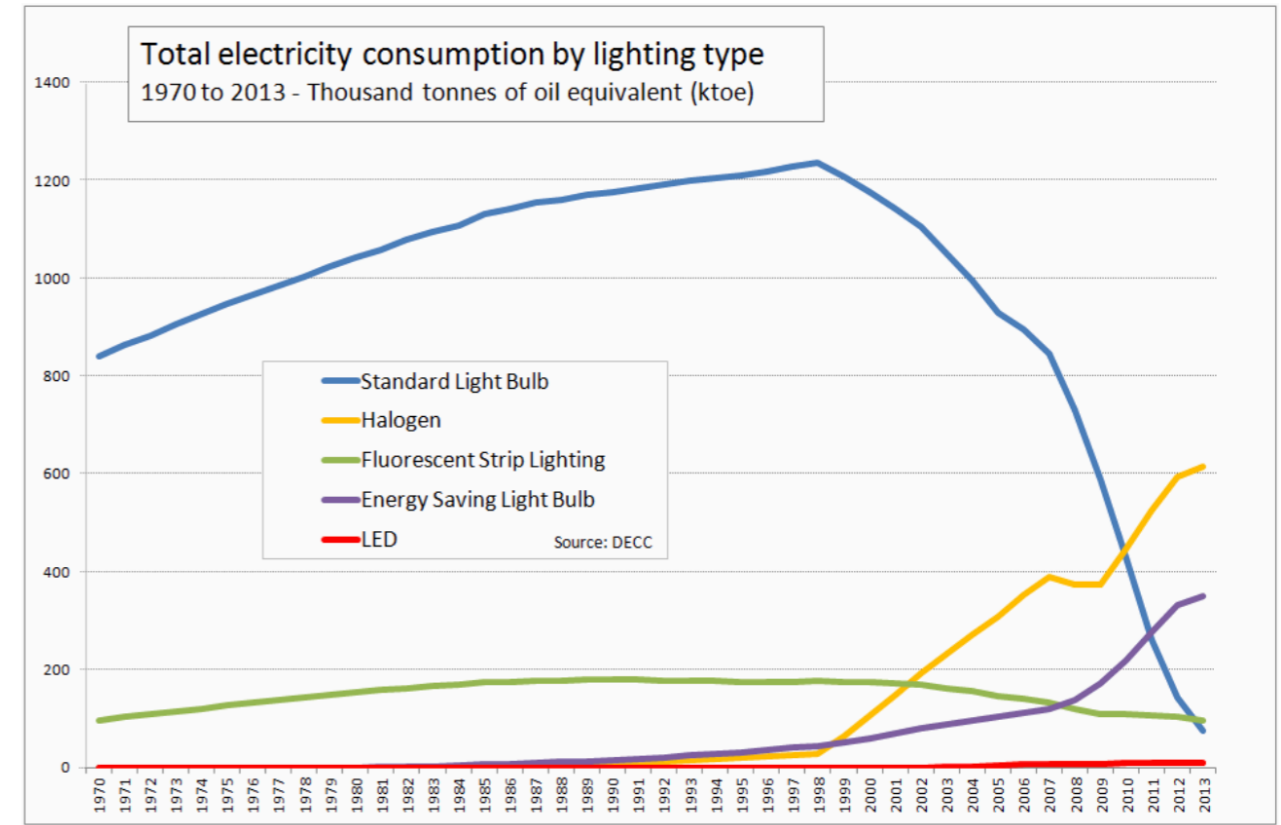
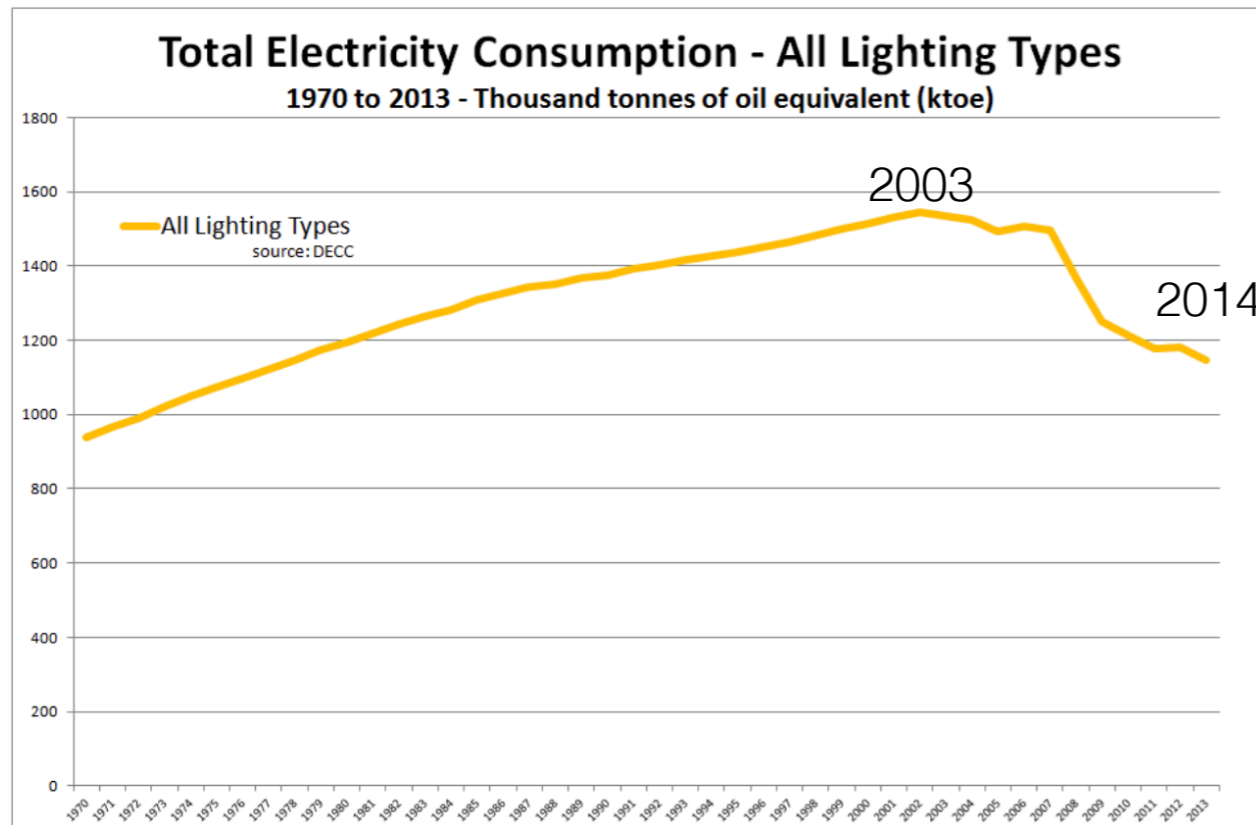
lampe à incandescence : 10 *lm/W*

Population (en millions d'habitants):
1800 : 10, 1900 : 40, 2000 : 60

miracle 1 de la
fée électricité

Données plus récentes

Usage domestique seulement (UK) :



Saturation de la demande ?

Autre exemple : voitures

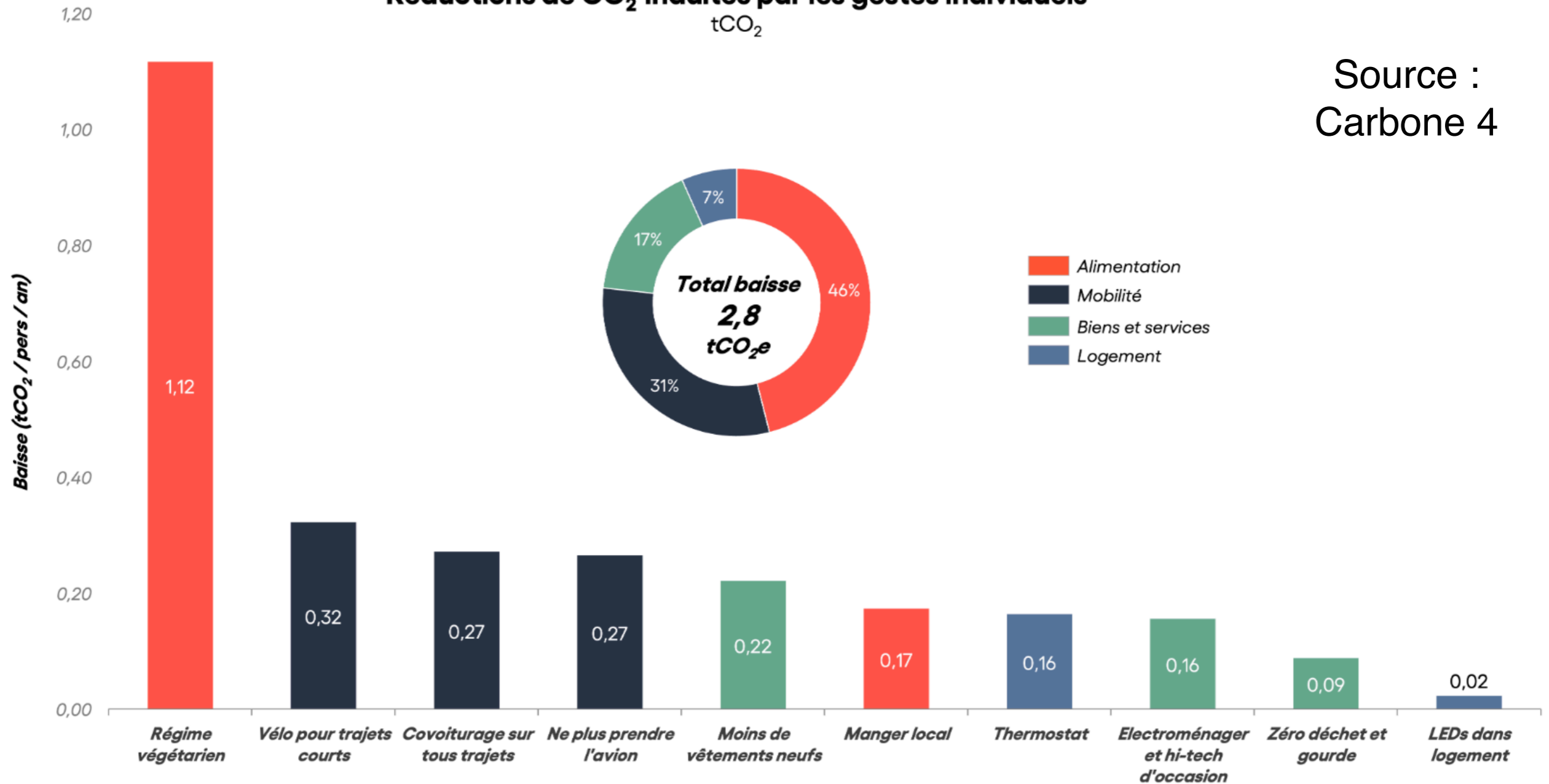
Des moteurs plus efficaces mais des voitures plus grosses...



Mini 1970 : 635 kg et 3 m de long
Mini 2022 : 1300 kg et 4,3 m de long

Gestes individuels

Réductions de CO₂ induites par les gestes individuels
tCO₂



Empreinte carbone moyenne en France ~ 10 tCO₂e

Gestes individuels

Cette réduction des GES suppose :

- que tout le monde y prenne part,
- un comportement qui peut être perçu comme héroïque.

| Action | Hypothèse |
|--------------------------------------|--|
| Régime végétarien | Supprimer la viande et le poisson du régime alimentaire ^[5] |
| Vélo pour trajets courts | Remplacer les trajets voiture courte distance en milieu urbain par du vélo ^[6] |
| Covoiturage sur tous trajets | Fixer le taux d'occupation de tous les trajets en voiture, courts et longs, à 2,2 personnes/voiture ^[7] |
| Ne plus prendre l'avion | Supprimer 100% des vols domestiques et internationaux ^[8] |
| Moins de vêtements neufs | Acheter trois fois moins de vêtements neufs ^[9] |
| Manger local | Consommer l'ensemble de son alimentation en circuit court ^[10] |
| Thermostat | Baisser la température de consigne de son logement ^[11] |
| Electroménager et hi-tech d'occasion | Tout acheter d'occasion ^[12] |
| Zéro déchet et gourde | Supprimer les émissions liées aux emballages ^[13] |
| LEDs dans logement | Equiper son logement d'un éclairage LED ^[14] |

2. Energies bas carbone

Production d'énergie bas carbone

Principalement 3 façons de s'approvisionner en énergie en émettant (très) peu de gaz à effets de serre :

1. Energies renouvelables
2. Energie nucléaire
3. Capture et séquestration du carbone (CSC)

On regarde ici seulement en détail la première solution

CSC (en deux mots)

Exemple : capture du SO_2 en sortie de cheminée d'une centrale à charbon. Même chose avec le CO_2 ?

- Pourrait capter 90% des émissions de la centrale
- Technologie très peu déployée (capture environ 1/1000e des émissions annuelles)...
- ... mais présente dans de nombreux scénarios de décarbonation
- Coût énergétique \sim 1/4 de l'électricité produite
- Coût économique \sim 50-60€/t CO_2

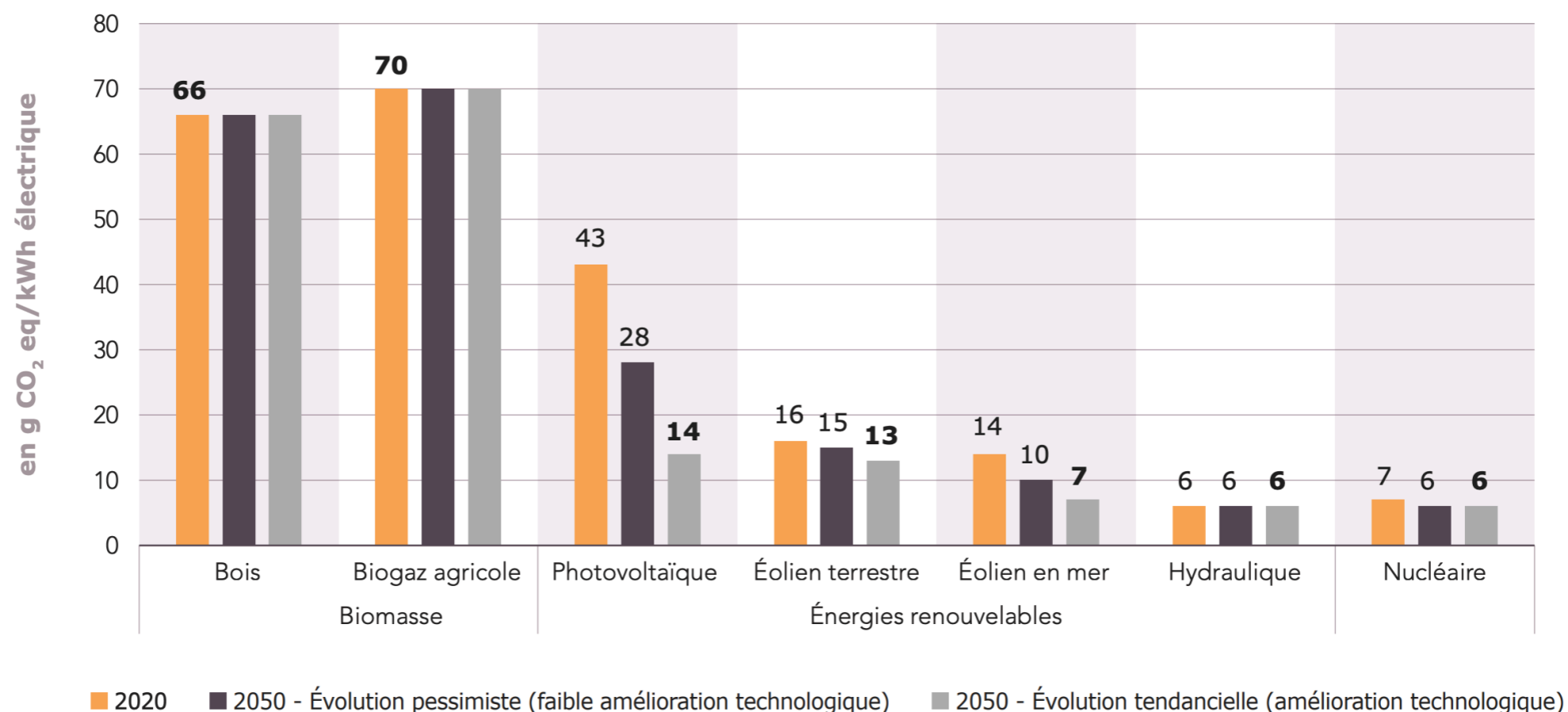
Energie nucléaire (en deux mots)

Trois raisons d'intérêt notamment :

- Faibles émissions de CO₂
- Sécurité d'approvisionnement (déjà discuté)
- Pilotable (vs intermittence)

Analyse en cycle de vie : renouvelables et nucléaire

Figure 12.11 Émissions en cycle de vie des technologies bas-carbone en 2020 et en 2050 (évolution pessimiste et tendancielle)



RTE, Futurs énergétiques 2050

Comparaison : Charbon ~ 1000 gCO₂/kWh (kWh électrique)

Remarque : deux premières colonnes non représentatives (production électrique)

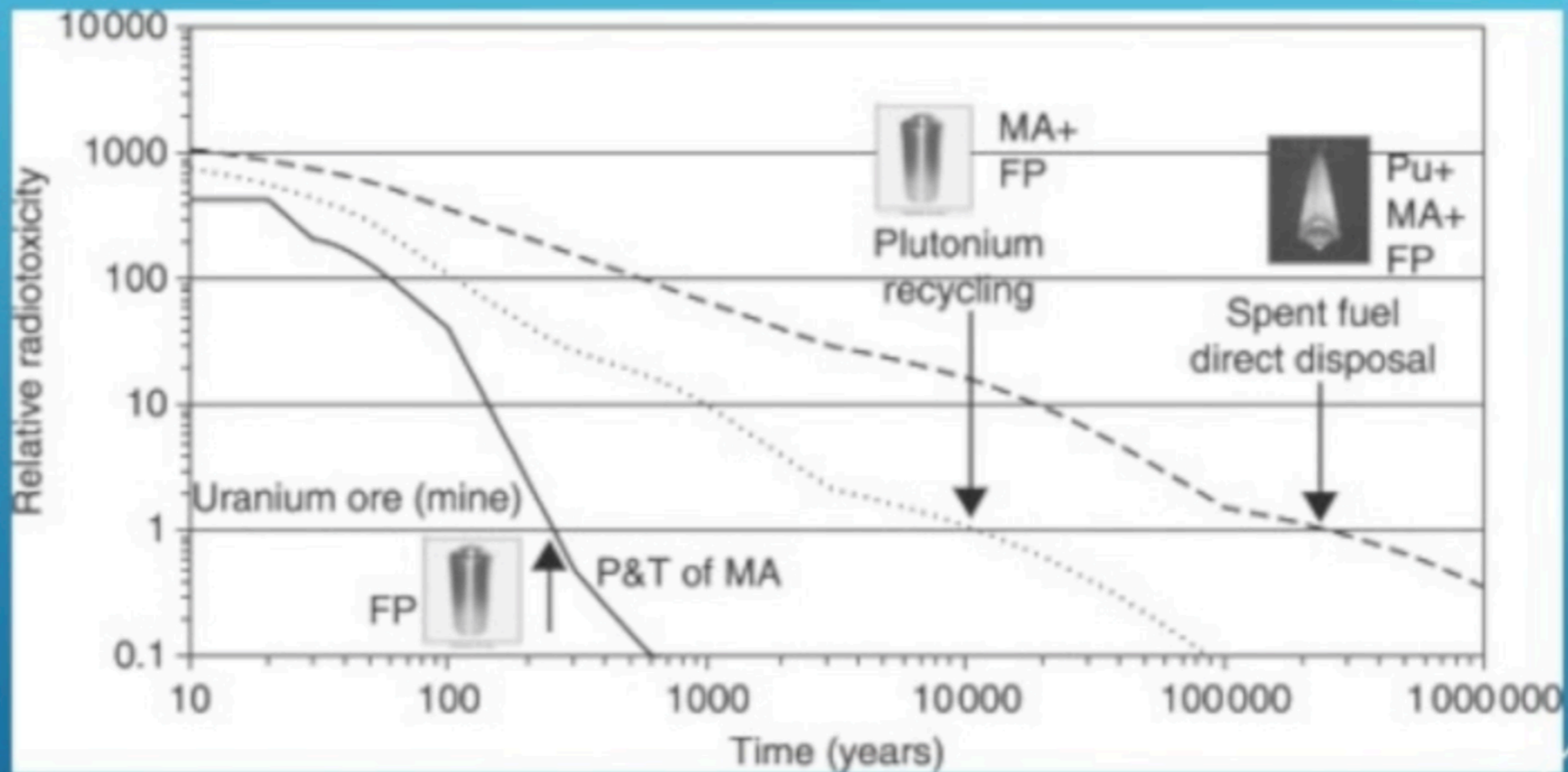
Energie nucléaire (en deux mots)

Difficultés :

- Economiques : Très gros investissements initiaux
- Sécurité. Trois accidents majeurs : Three Mile Island (1979), Tchernobyl (1986), Fukushima (2011).
- Déchets nucléaires.
- Prolifération nucléaire.
- Approvisionnement en uranium. Static range ~100 ans (ici aussi : attention à cette notion !)

Déchets nucléaires

« ON NE SAIT PAS QUOI FAIRE DES DÉCHETS »



Source : Maxence Cordiez

Energies renouvelables

Le potentiel renouvelable dépend du pays

Islande

Norvège



81% d'énergies renouvelables :
géothermie et hydraulique

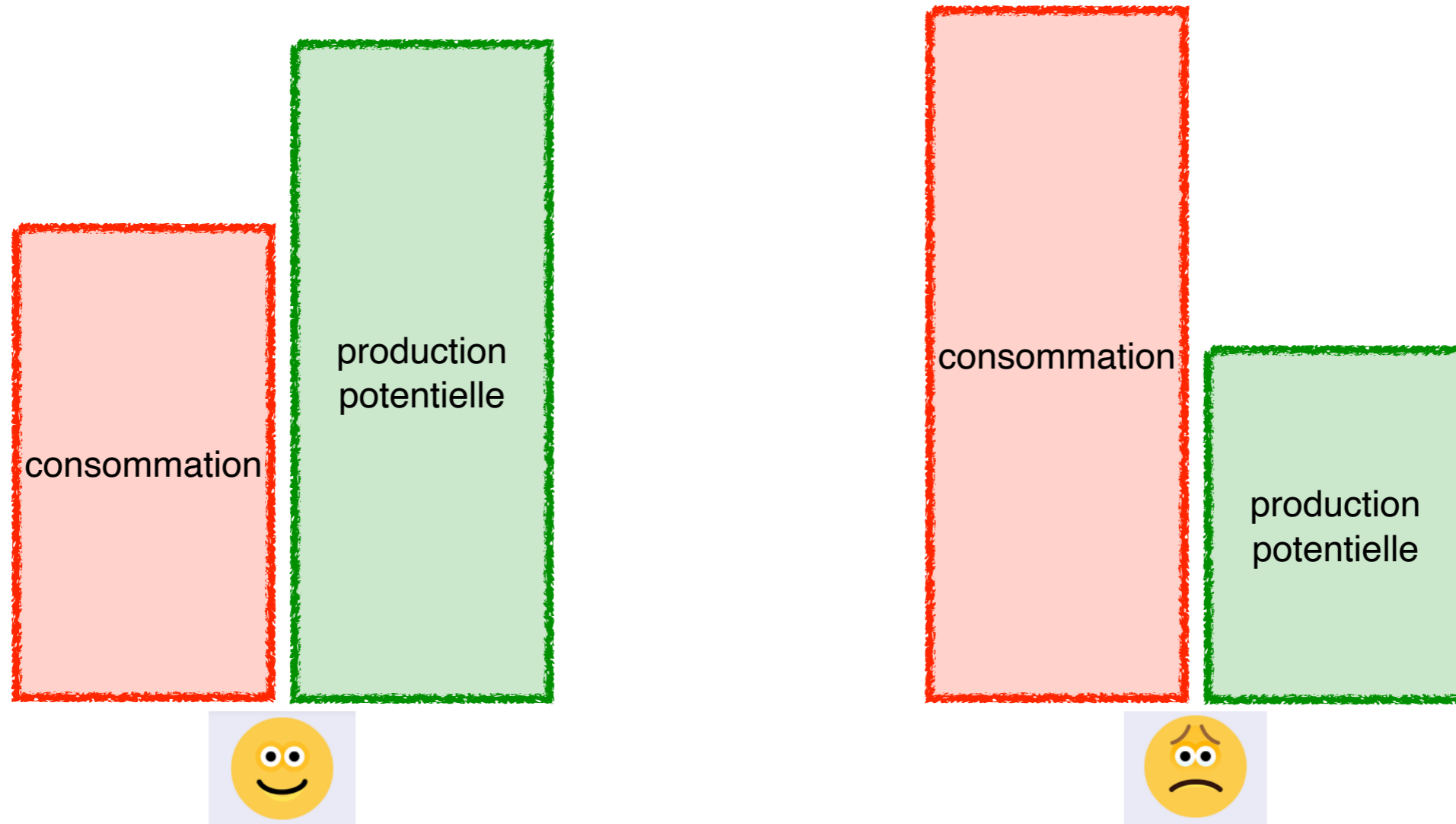


> 70% d'énergies renouvelables :
hydraulique

Très faible densité de population, géographie très particulière

Bilan à besoins constants

On compare besoins et production potentielle (cf. Mackay) :



consommation = consommation par personne par jour $\left(\frac{kWh}{j \times p} \right)$

pays \sim France

Ce bilan sera grossier

Difficulté à dresser une comptabilité :

- Différence entre énergie primaire/finale/utile
- Changements de technologie (gains d'efficacité)
- Problèmes de stockage (pertes d'efficacité)
- Changements des usages
- ...

1. Voitures

- Distance : 30km/(jour x personne)
- Consommation de carburant : 7litres/(100 km)
- Densité énergétique : 10 kWh/litre



On ne prend pas en compte ici l'énergie nécessaire pour fabriquer ni la voiture ni les infrastructures (voir plus loin)

Voitures
21

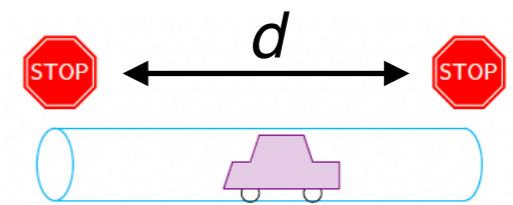
unités : kWh/(j*p)

Où va l'énergie ?

Quatre sources de dissipation principalement :

1. Chaleur ~ 70% (moteur thermique)
2. Freinage :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \simeq \frac{mv^2/2}{d/v} = \frac{mv^3}{2d}$$



3. Résistance de l'air :

$$P = \frac{E}{\Delta t} \simeq \frac{m_{air}v^2/2}{\Delta t} = \frac{(\rho Av \Delta t)v^2/2}{\Delta t} = \frac{\rho Av^3}{2}$$



4. Frottement au sol

Questions

- Quelle est la distance d^* entre arrêts à partir de laquelle la perte par freinage devient moins importante que la résistance de l'air ?

$$m = 1200 \text{ kg}$$

$$\rho_{air} = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$A \simeq 1 \text{ m}^2 \quad (\text{effectif})$$

- Faites des propositions pour améliorer l'efficacité énergétique du transport de personnes. Justifier vos choix.

1. Electrifier

miracle de
l'électricité n°2

| | pétrole | batterie |
|---------------------|-----------|------------|
| densité énergétique | 10 kWh/kg | 0,3 kWh/kg |
| rendement | 30 % | 90 % |

+ freinage régénératif

évolue encore

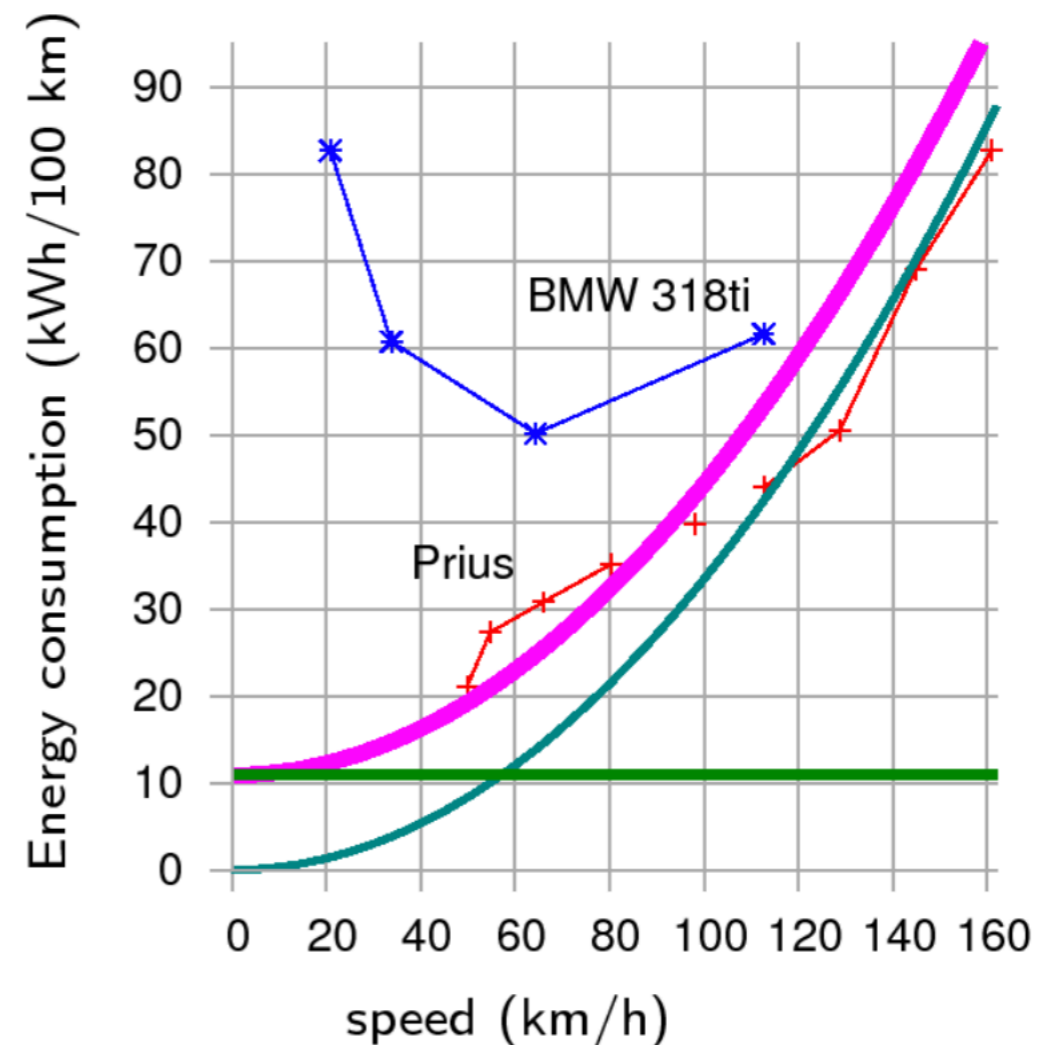
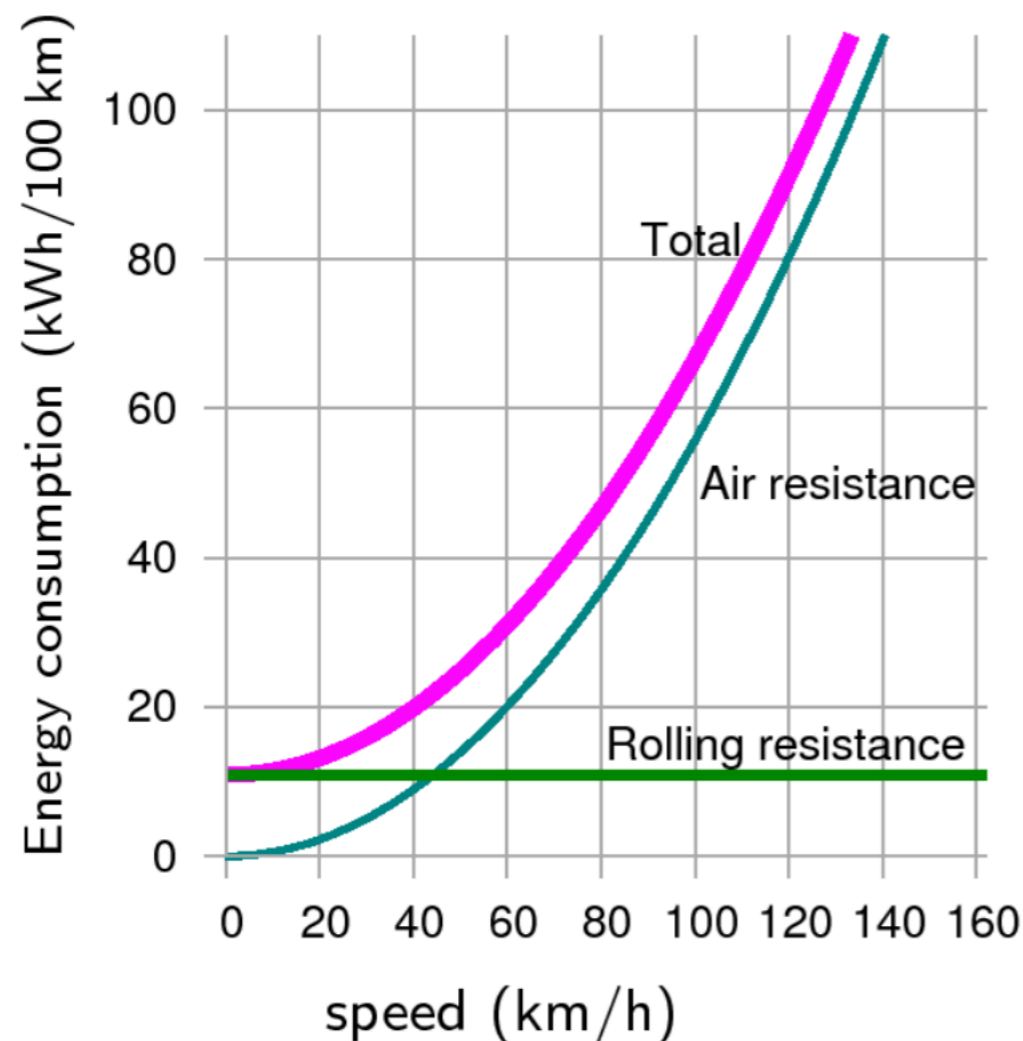
Performance voiture électrique (citadine) :

- Autoroute : **25 kWh/100km**
- Ville : **13 kWh/100 km**

Voiture à essence (citadine) : **60-70 kWh/100km**

2. Réduire la masse et la vitesse

- Réduire la vitesse est en principe toujours bon
- Réduire la masse est surtout utile en milieu urbain



L'effet réel de la réduction de la vitesse varie

3. Changer de moyen de transport

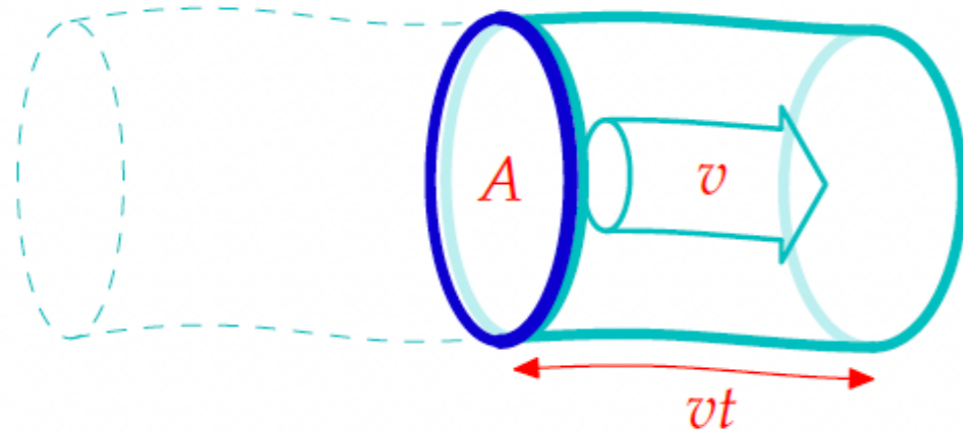
| | consommation (kWh/ 100 km-passager) |
|--------------------|--|
| voiture thermique | 60 |
| voiture électrique | 15 |
| train | 10 |
| TGV | 3 |
| vélo (électrique) | 2 |

vélo : efficace en milieu urbain (faible masse)

train : faible résistance au sol, faible déplacement d'air par passager



2. L'éolien terrestre



Energie sur un temps t :

$$E = \frac{mv^2}{2} = \frac{(A\rho vt)v^2}{2}$$

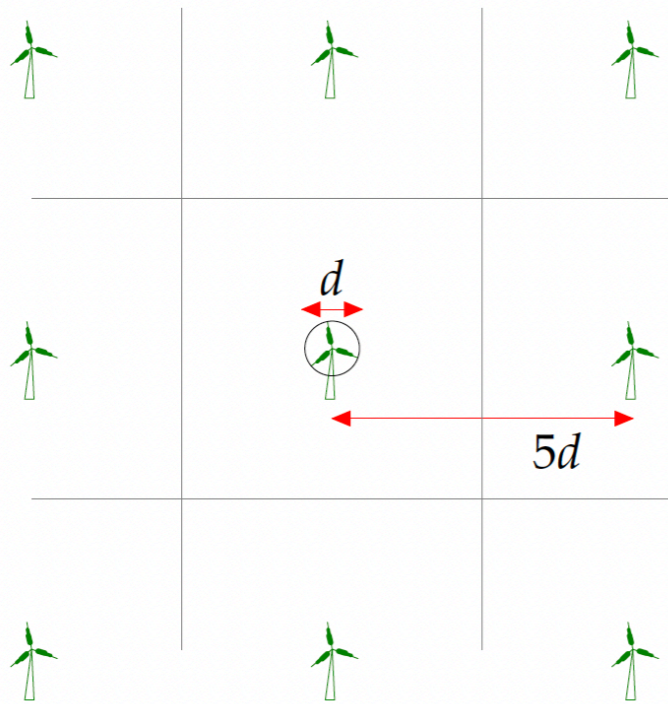
Puissance :

$$P = \frac{A\rho v^3}{2}$$



Puissance par unité de surface

disposition des éoliennes
(règle empirique) :



Surface occupée par une éolienne :

$$S \sim d^2$$

Puissance par unité de surface :

$$P/S \sim cv^3$$

En pratique, pour un vent moyen de 6 m/s, $P \approx 2 \text{ W/m}^2$

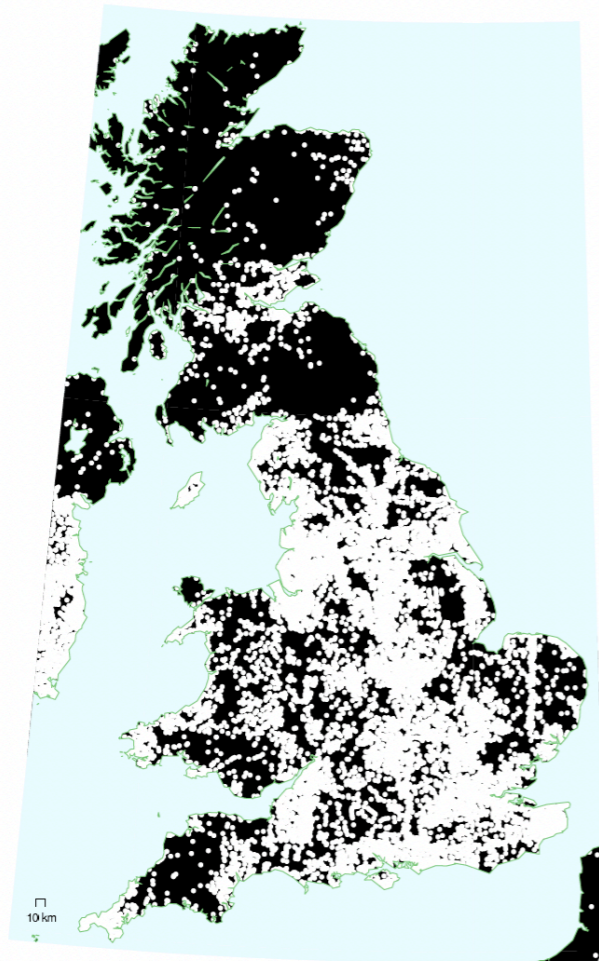
Quelle proportion de la surface de la France à couvrir
d'éoliennes pour faire rouler toutes les voitures ?

superficie France : 544000 km^2

population française : 67×10^6 habitants

Eoliennes sur 5% du territoire

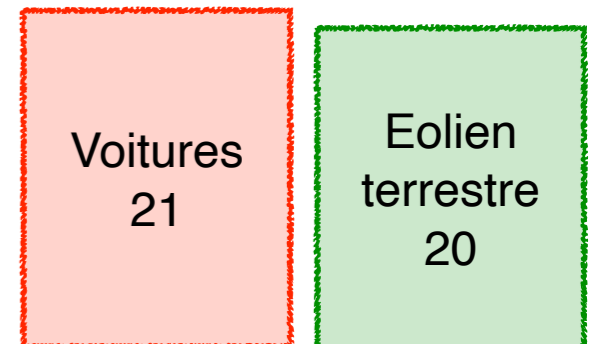
Empreinte surtout visuelle : peu d'artificialisation des sols et co-usages possibles (not. agriculture)



- Trop près des habitations. Pas d'éolienne !
- Zone naturelle. Pas d'éolienne !

Et les oiseaux ?

Les chats et les voitures sont pires !



unités : kWh/(j*p)

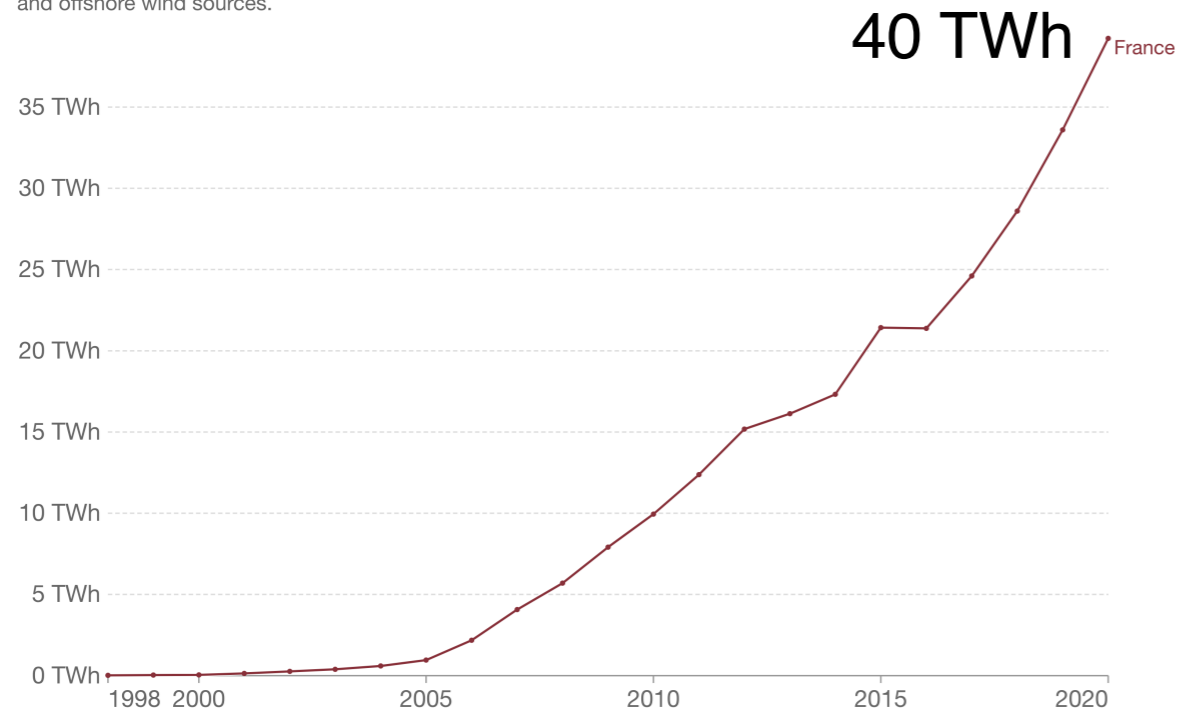
Installées à quel rythme ?

France

Wind power generation

Annual electricity generation from wind is measured in terawatt-hours (TWh) per year. This includes both onshore and offshore wind sources.

Our World in Data



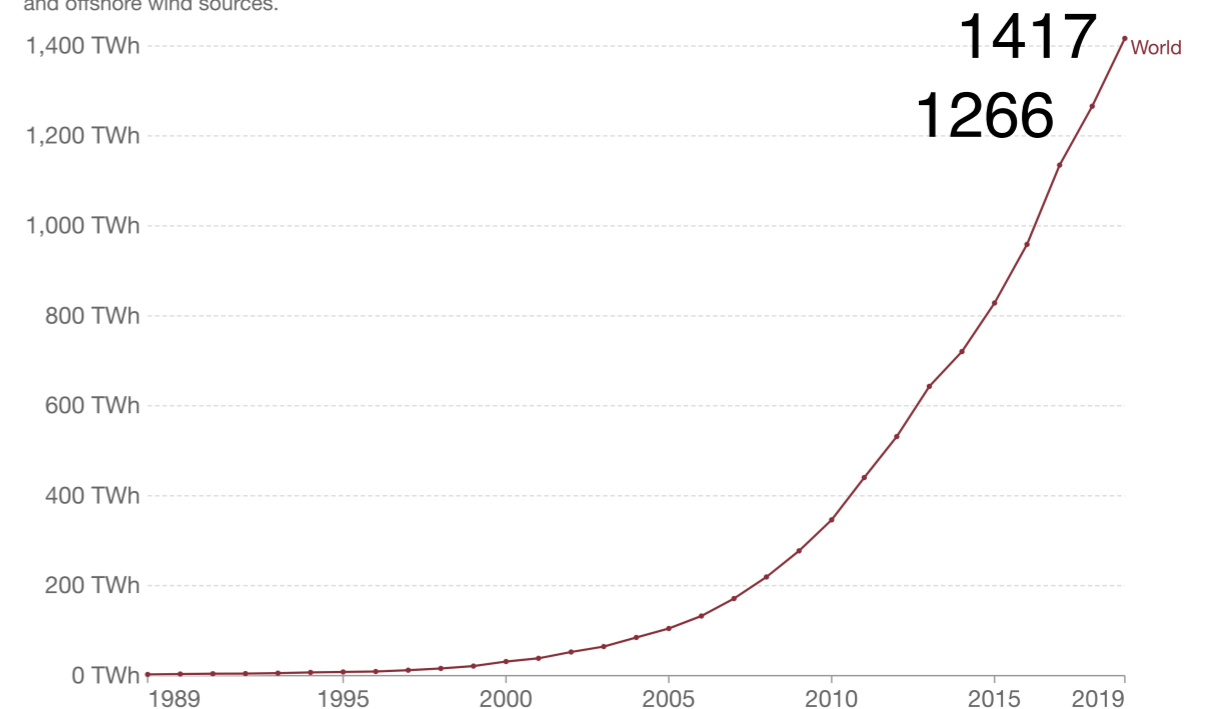
Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2021) OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Monde

Wind power generation

Annual electricity generation from wind is measured in terawatt-hours (TWh) per year. This includes both onshore and offshore wind sources.

Our World in Data



Source: Our World in Data based on BP Statistical Review of World Energy & Ember (2021) OurWorldInData.org/renewable-energy • CC BY

Donner l'énergie par an pour la France à fournir qui correspond à $20 \text{ kWh}/(\text{j} \cdot \text{p})$

Remarque : production du parc nucléaire $\sim 400 \text{ TWh}/\text{an}$

Modèle logistique

Calibrons le modèle logistique :

$$Q'(t) = r Q(t) \left(1 - \frac{Q(t)}{U} \right)$$

On imagine que le facteur limitant est la place (détermine U)

$Q(t)$: production à l'année t ,

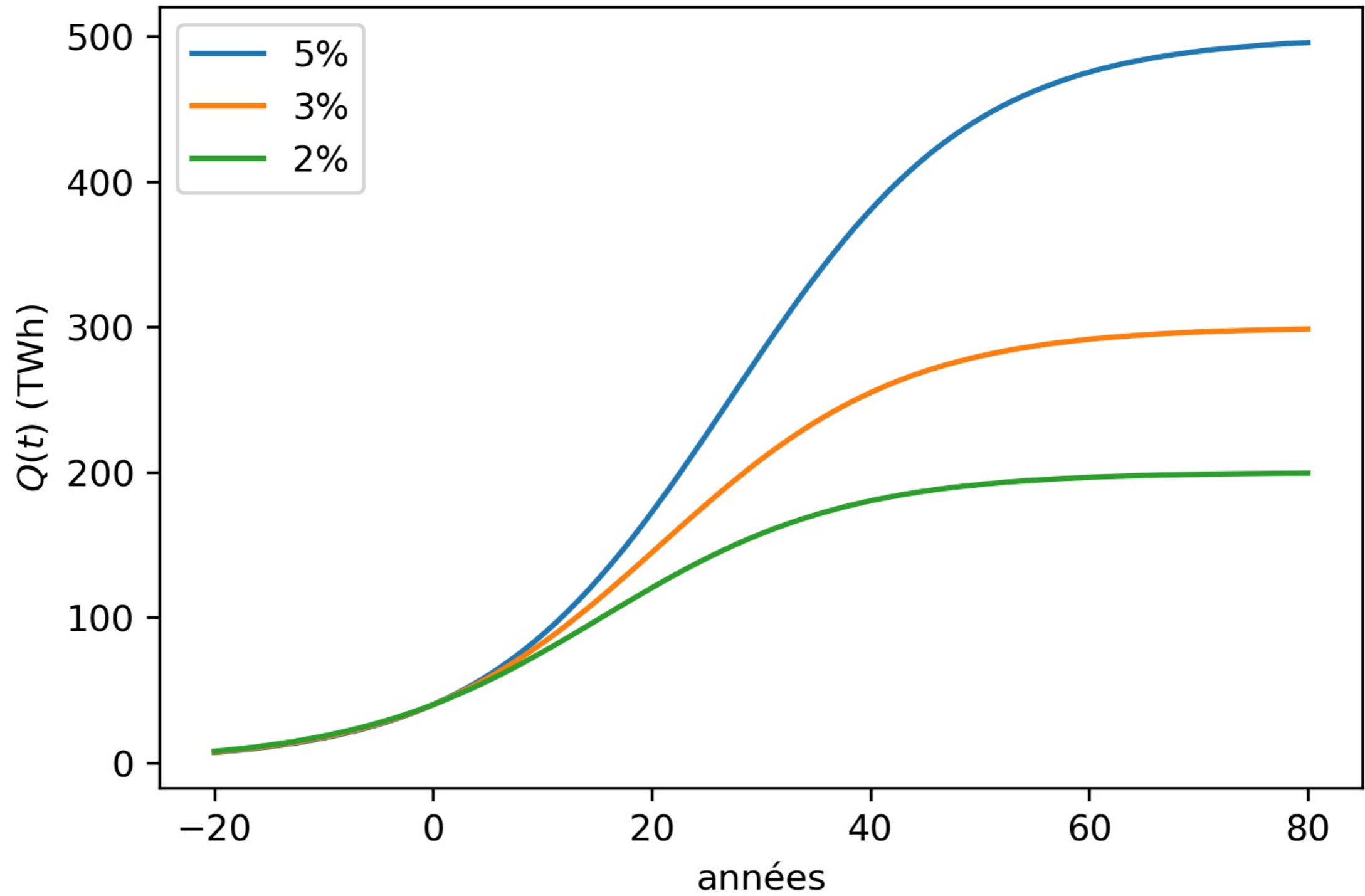
r : taux en phase initiale,

U : production maximale,

Q_0 : production actuelle

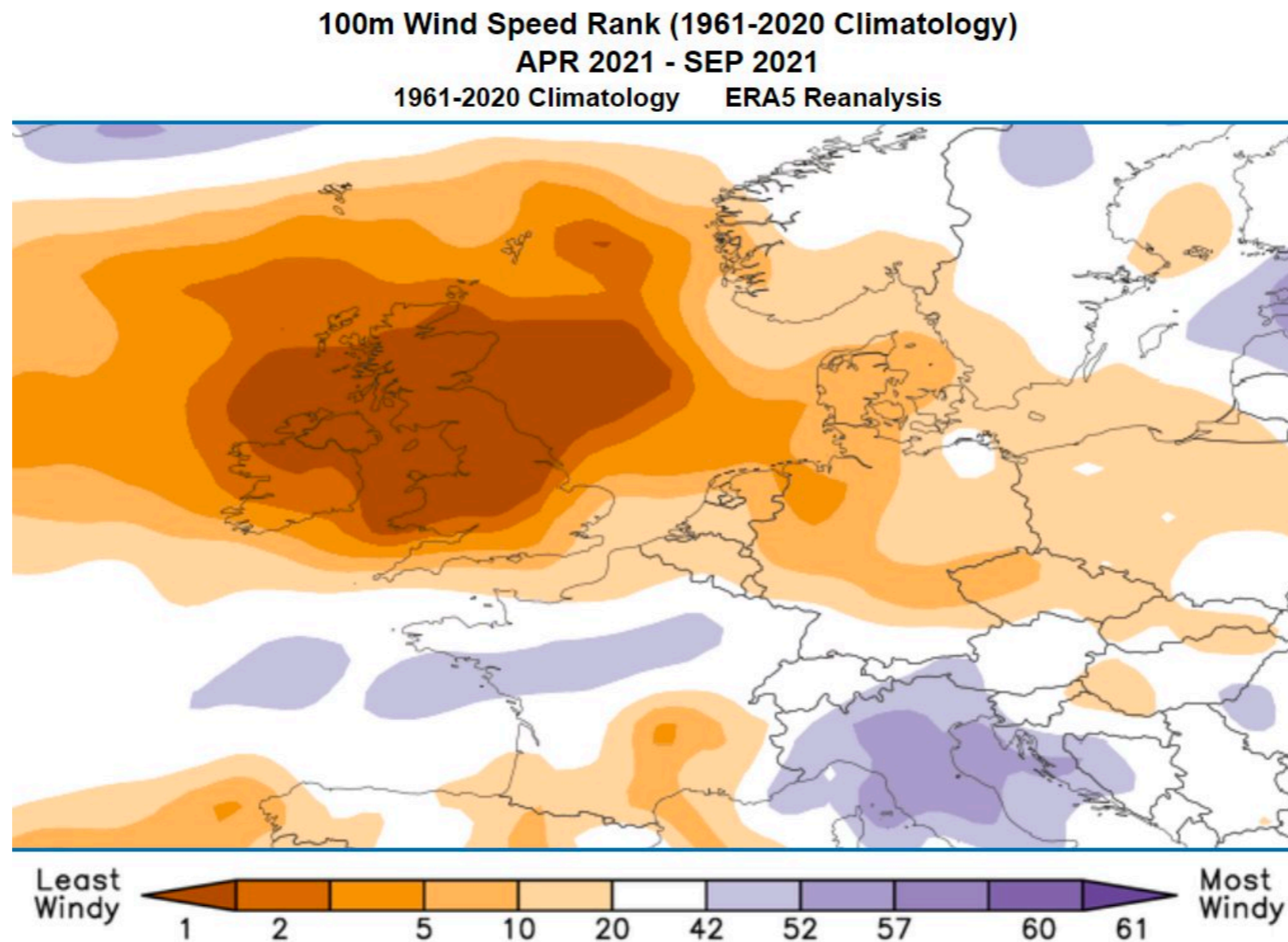
**Rien ne dit que c'est un bon modèle !
Ca donne seulement une idée a priori.**

Résultats



Intermittence

La puissance du vent n'est bien sûr pas constante.



Source : Simon Cardy

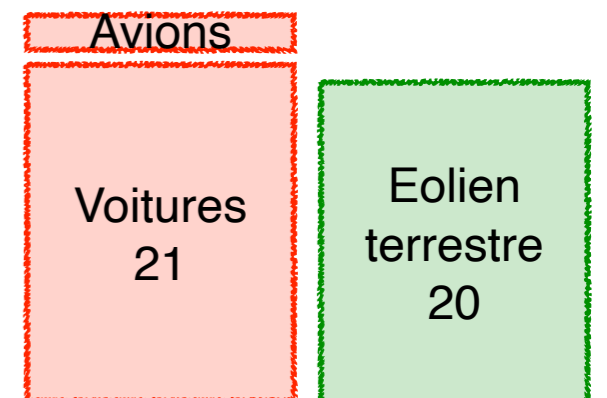
On en discutera plus loin (éolien en mer)

3. Avions

- Distance : un A-R Paris-NY tous les 5 ans par personne
- Consommation (avion plein) : 3 litres/(100 km * personne)
- taux de remplissage : 85%



$\sim 2\text{kWh}/(\text{j} \cdot \text{p})$

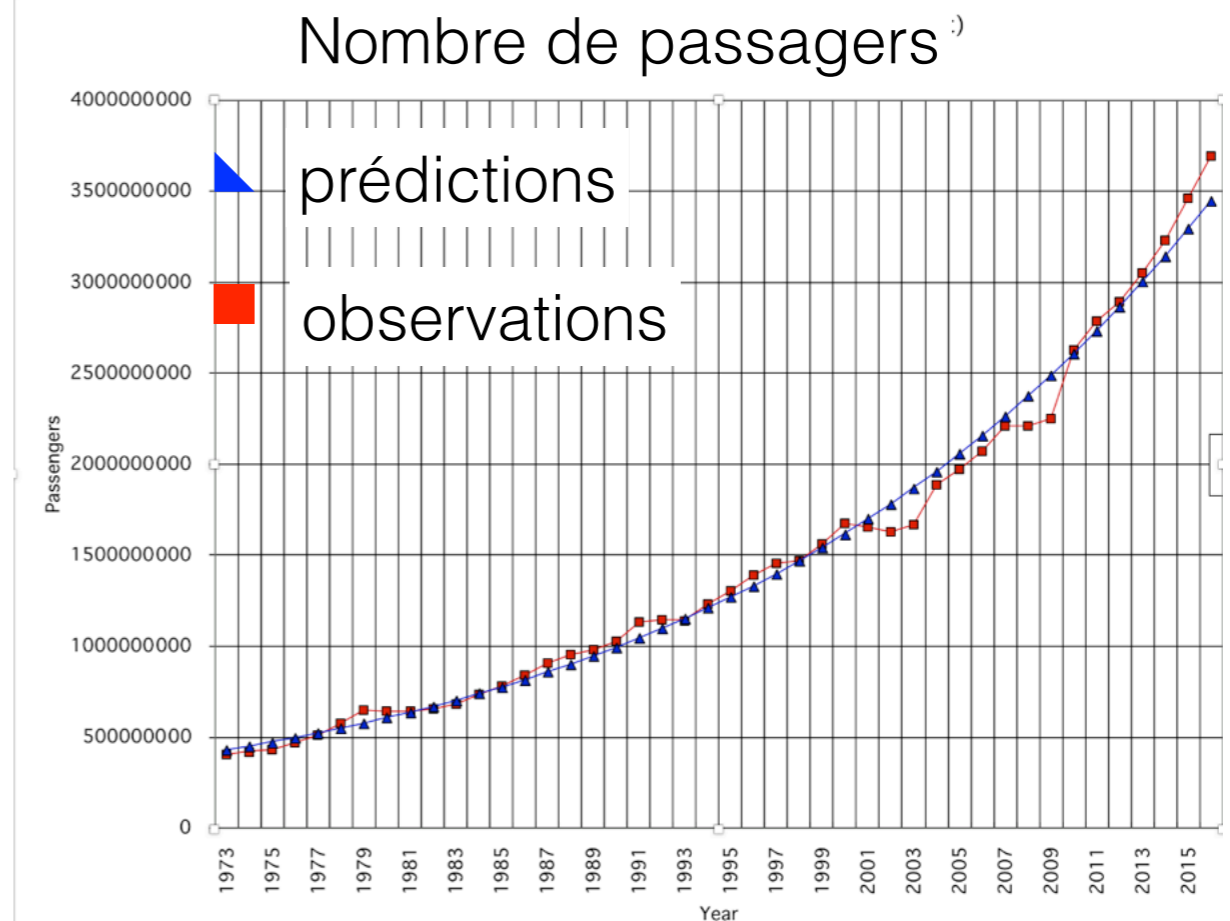
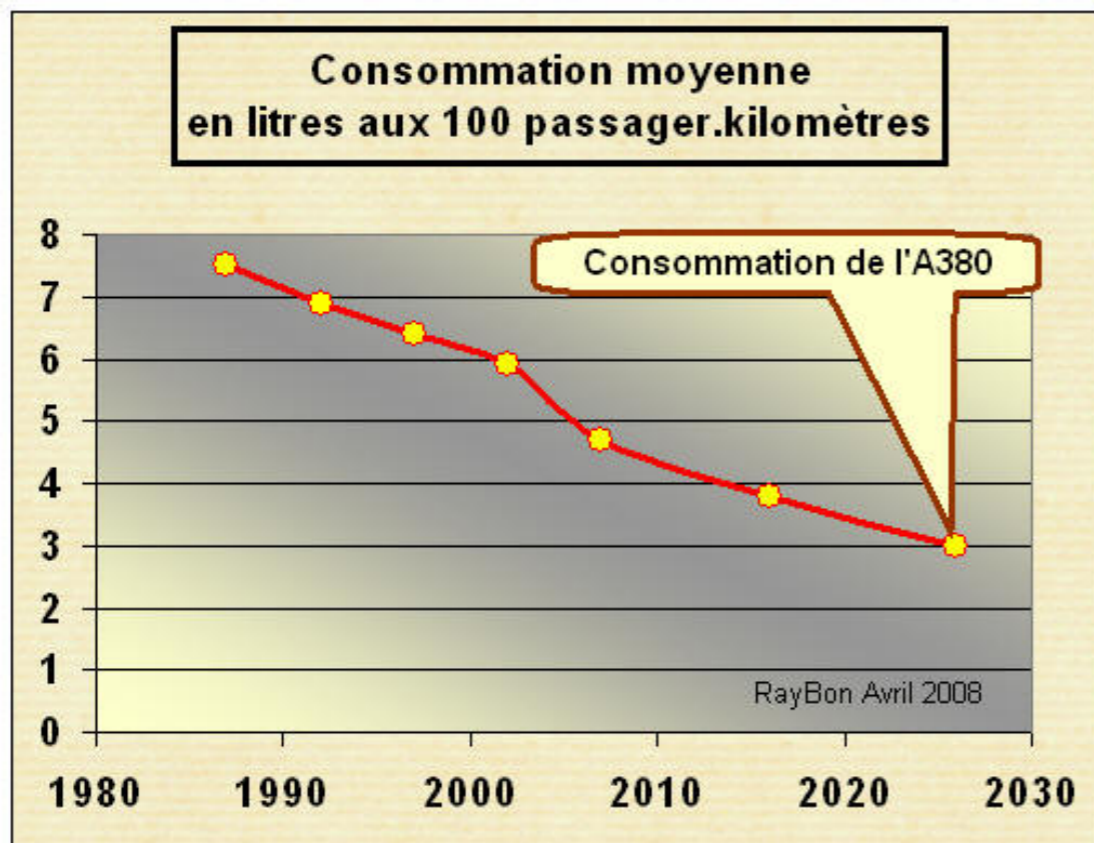


moyenne française \sim A-R Paris-NY tous les 7 ans,
mais moyen de transport très inégalitaire

unités : kWh/(j*p)

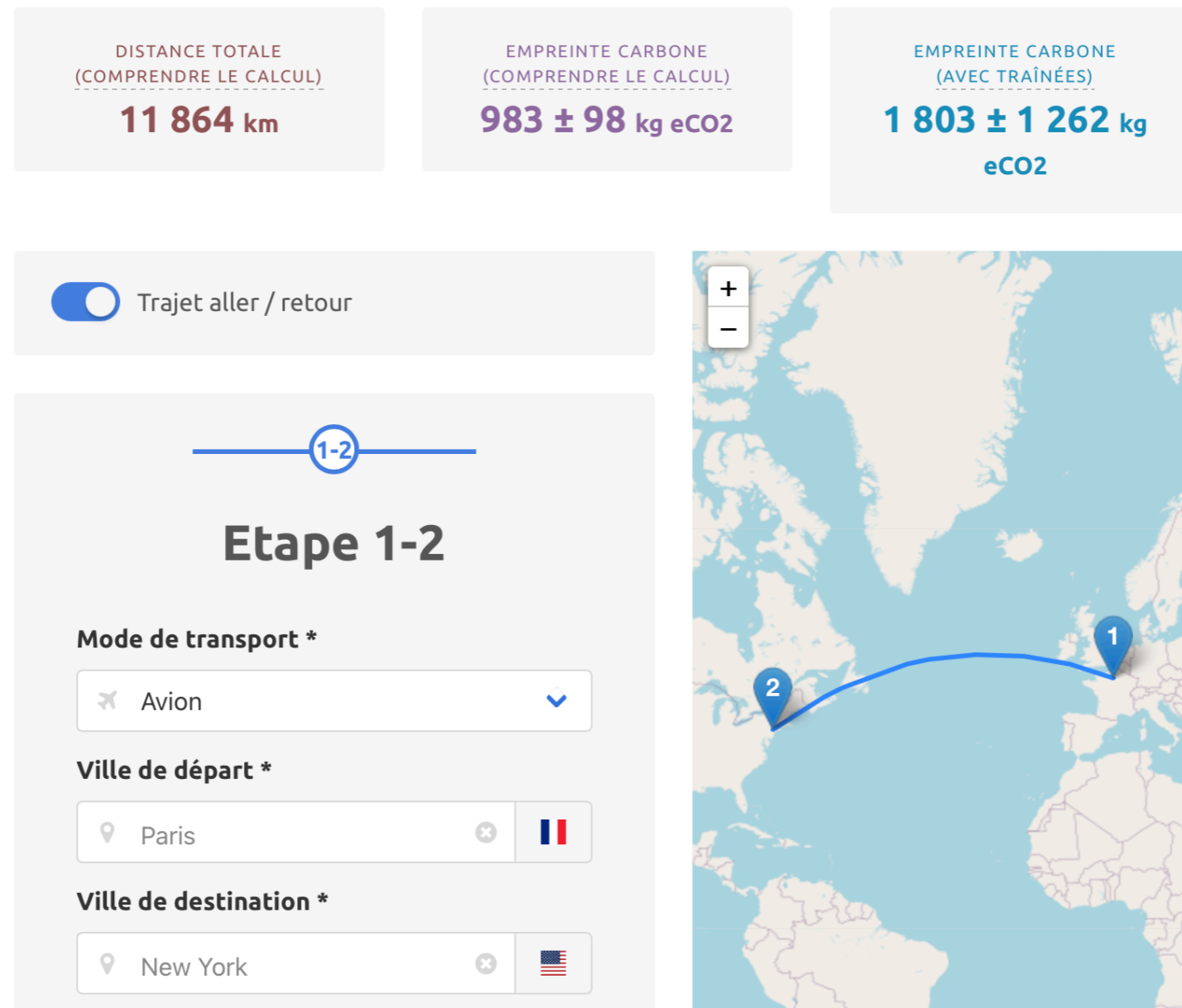
Efficacité énergétique

- Pas d'amélioration radicale en vue
- Une amélioration du taux de remplissage a amélioré l'efficacité, en partie en créant une demande
- Le paradoxe de Jevons s'est vérifié :



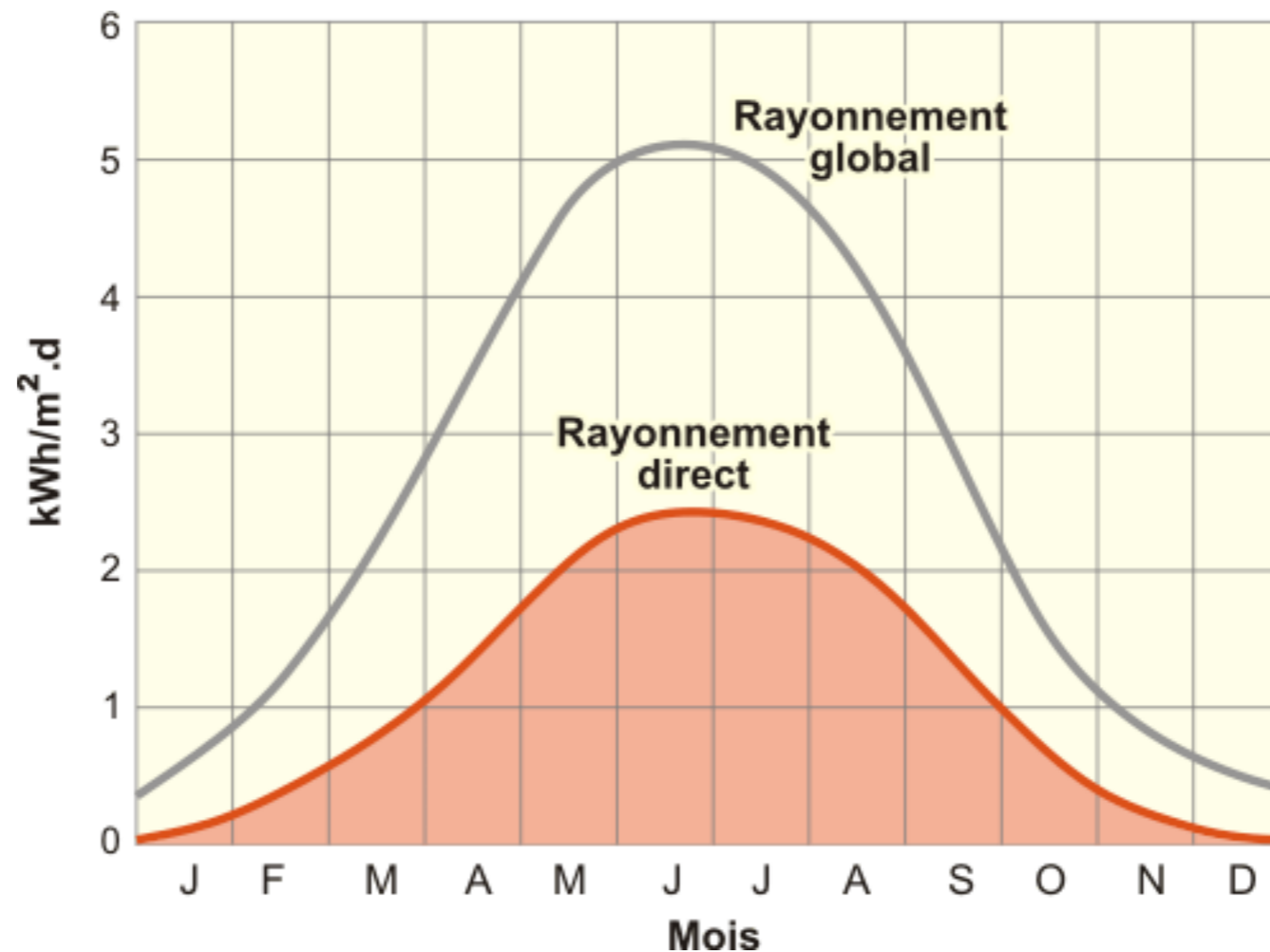
Et la pollution ?

- Difficile de se passer d'un carburant à forte densité énergétique (kérosène)
- Il n'y a pas seulement le CO₂. Ex : traînées (vapeur)



simulateur
Labos 1.5

4. Energie solaire

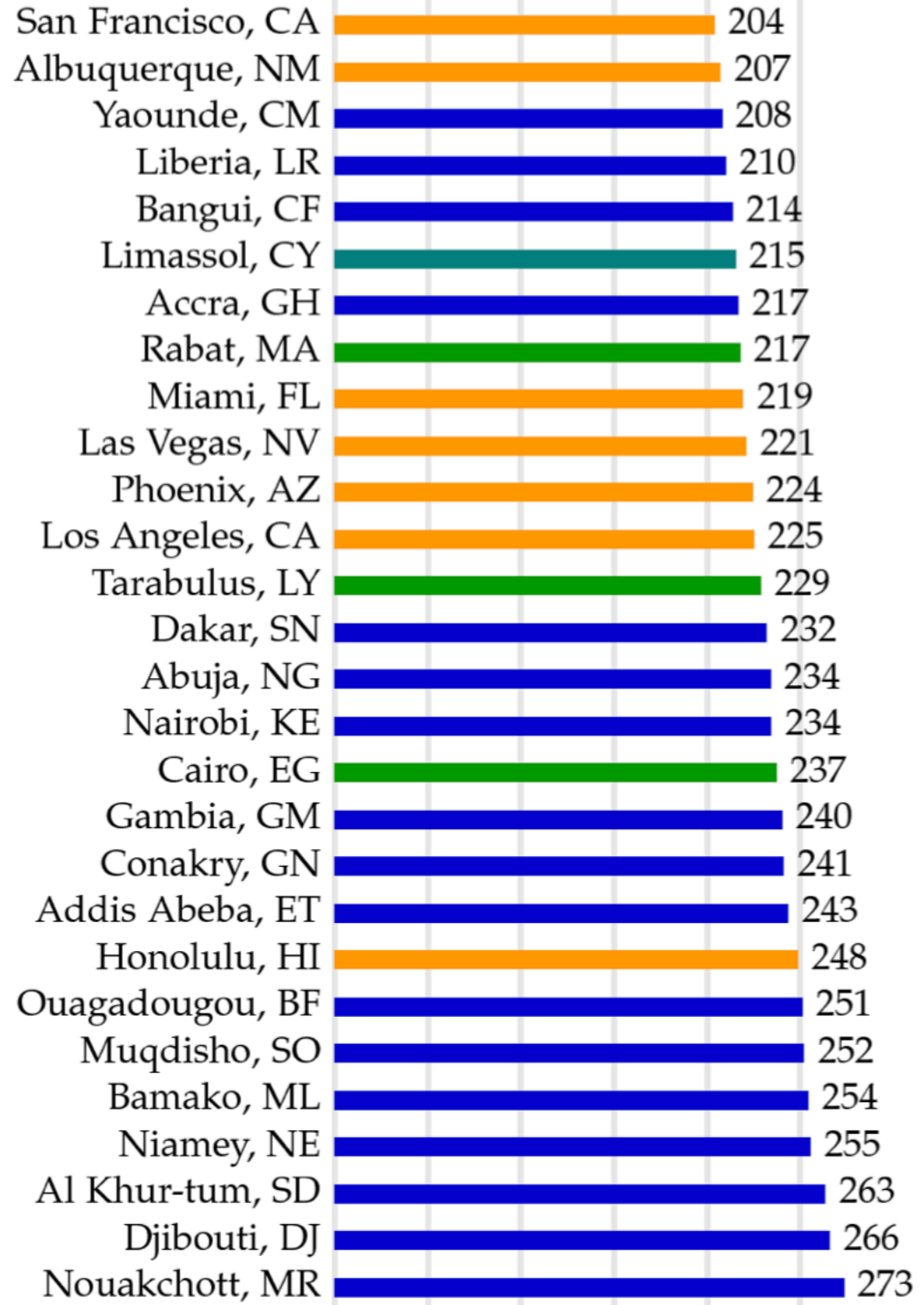
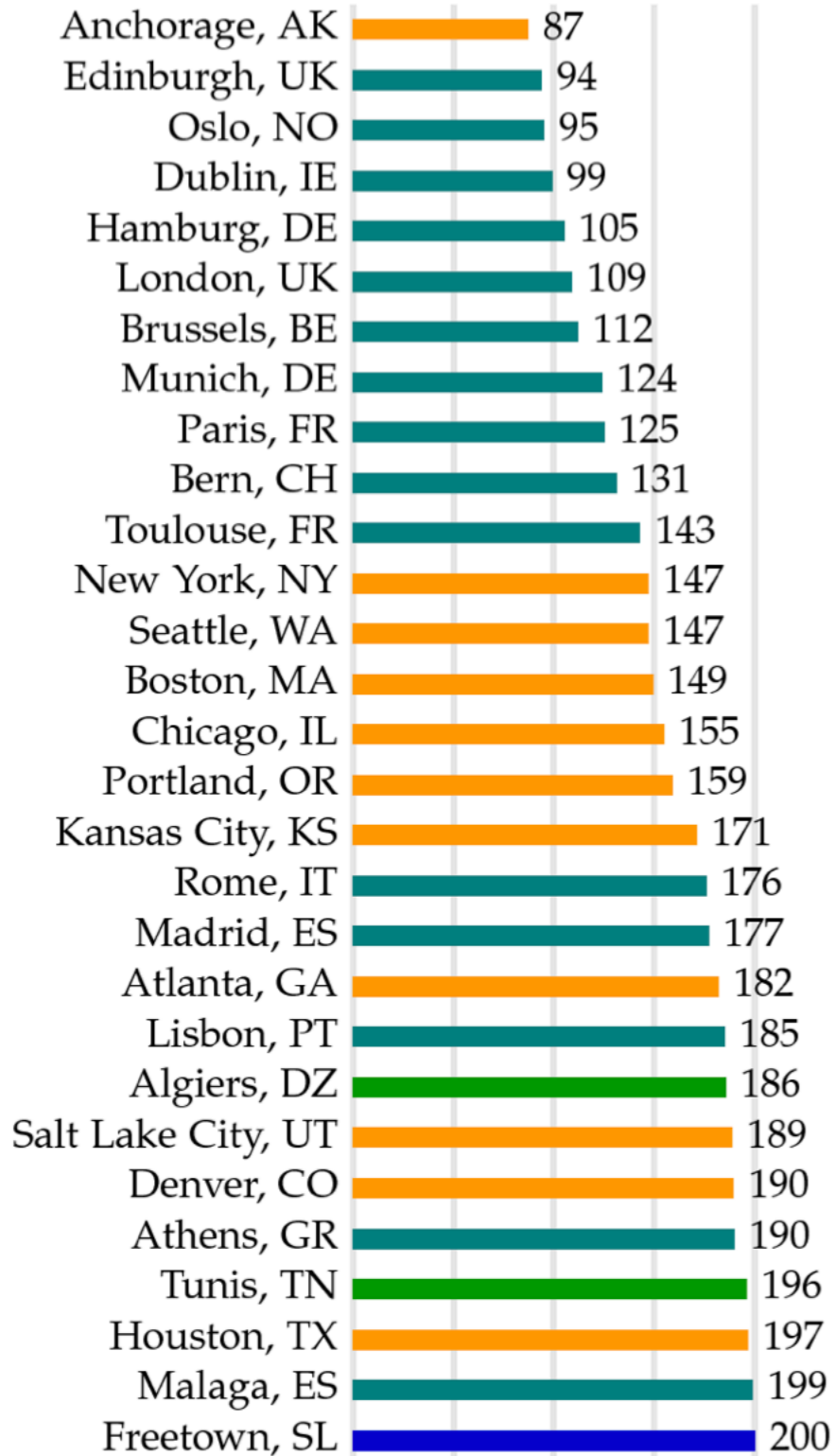


Puissance moyenne annuelle (au sol, Paris) : $P \approx 125 \text{ W/m}^2$

Grosse variation saisonnière !

average sunshine (W/m²)

0 50 100 150 200 250



Comment récolter l'énergie solaire ?

4 méthodes :

- ***solaire thermique*** : conversion en **chaleur**.
Ex : chauffe-eau, chauffage de la maison.
Faible développement actuellement.
- ***solaire photovoltaïque*** (PV) : conversion en électricité. Fermes ou toitures.
- ***biomasse*** : conversion en énergie chimique dans des plantes puis des carburants.
Ex : bois, biogaz
- ***alimentation*** : biomasse directement utilisable par les humains (traité plus loin)

Panneaux photovoltaïques

Les panneaux ne captent qu'une fraction de l'énergie solaire :

$P \approx 10 \text{ W/m}^2$ (y compris chemin d'accès, etc...)



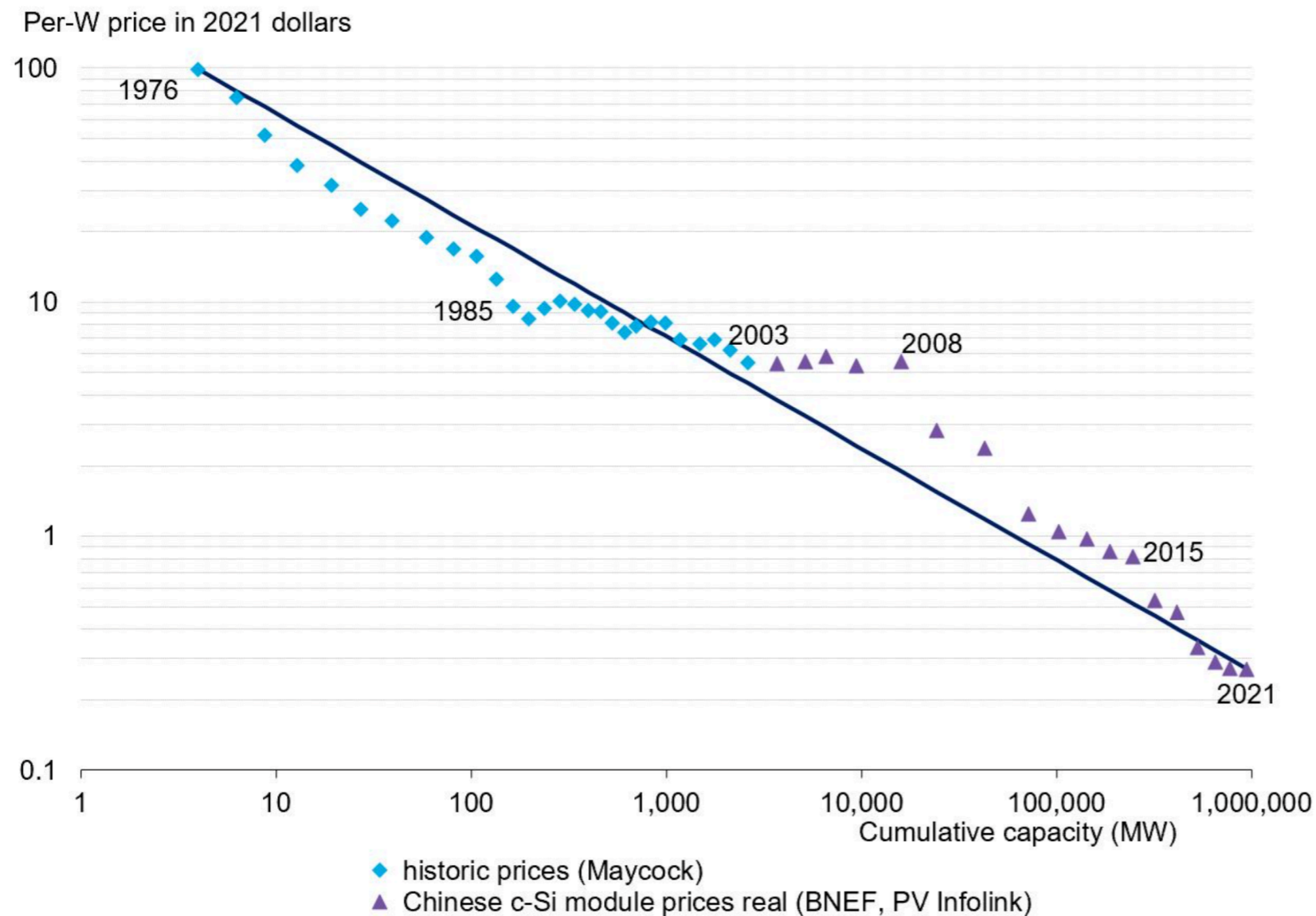
Panneaux solaires au-dessus
d'un canal, Inde

Comparaison :
surface routes et infrastructures :
~3% du territoire

Quelle énergie par personne et
par jour récolte-t-on en couvrant
1,5% du territoire français de PV ?

Panneaux photovoltaïques

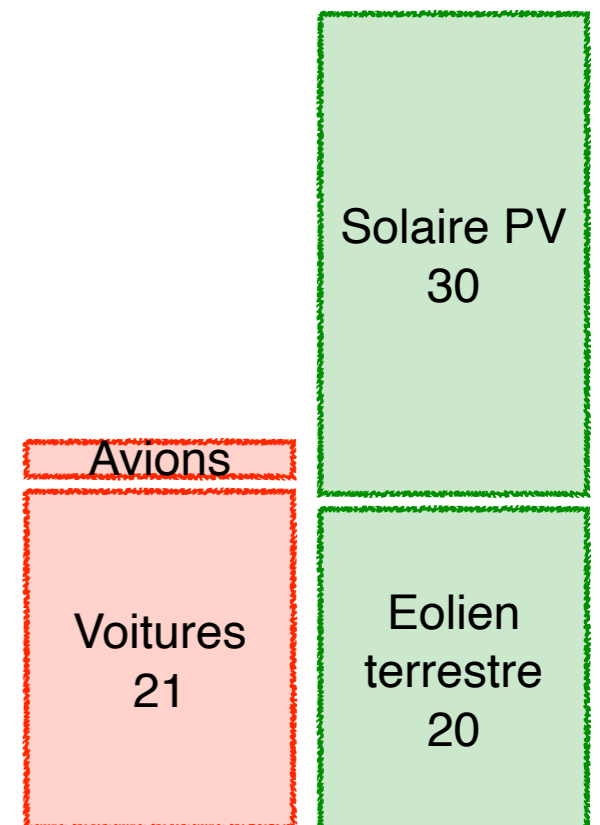
Courbe d'apprentissage : $P = C/Q^\alpha$ (relation empirique)



Source : J. Chase

Source: BloombergNEF, Maycock, PV Infolink

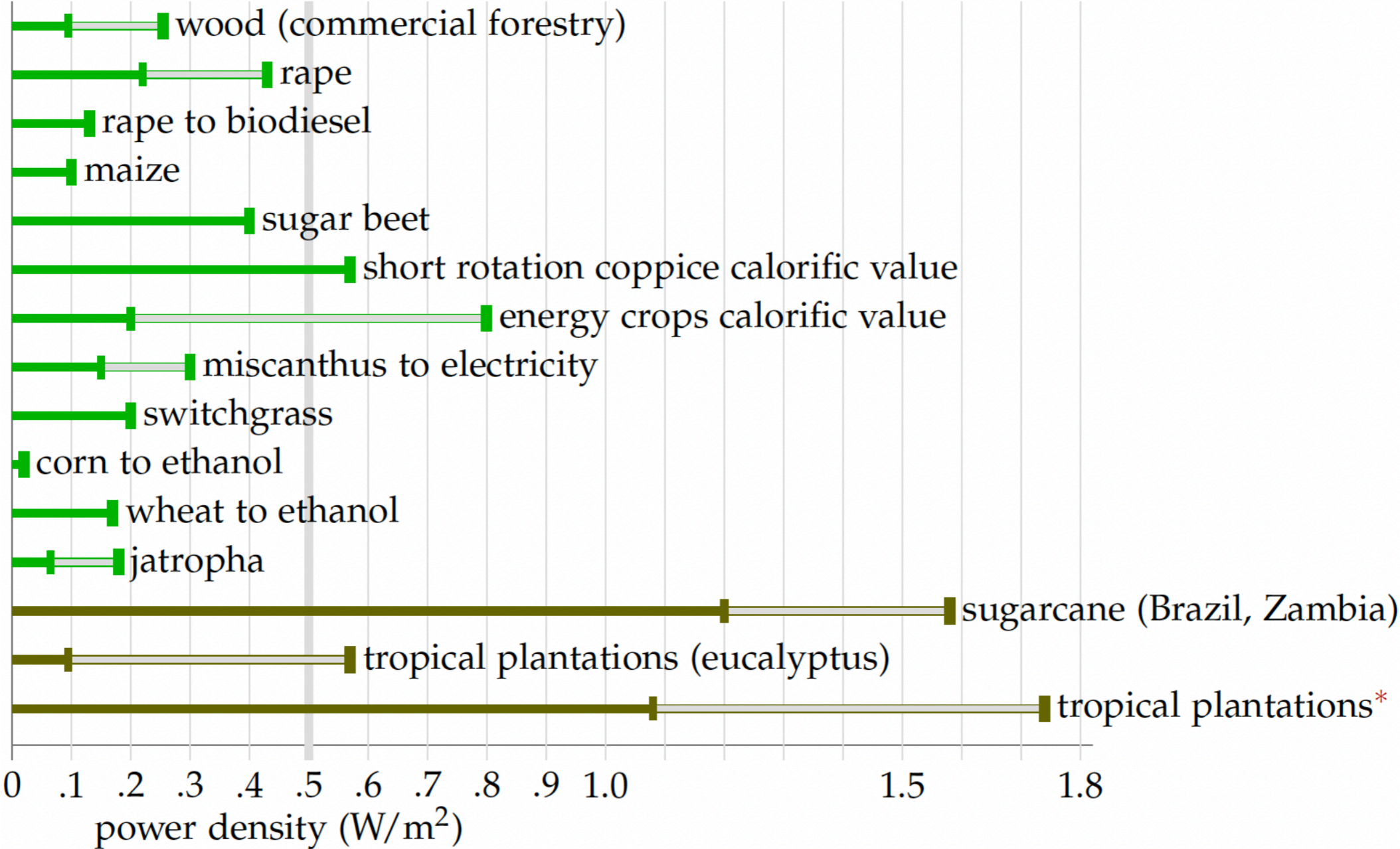
**! Coût des panneaux ≠ coûts de production (LCOE)
≠ coûts de production et d'intégration au réseau !**



unités : kWh/(j*p)

Biomasse

Le rendement énergétique de quelques végétaux :



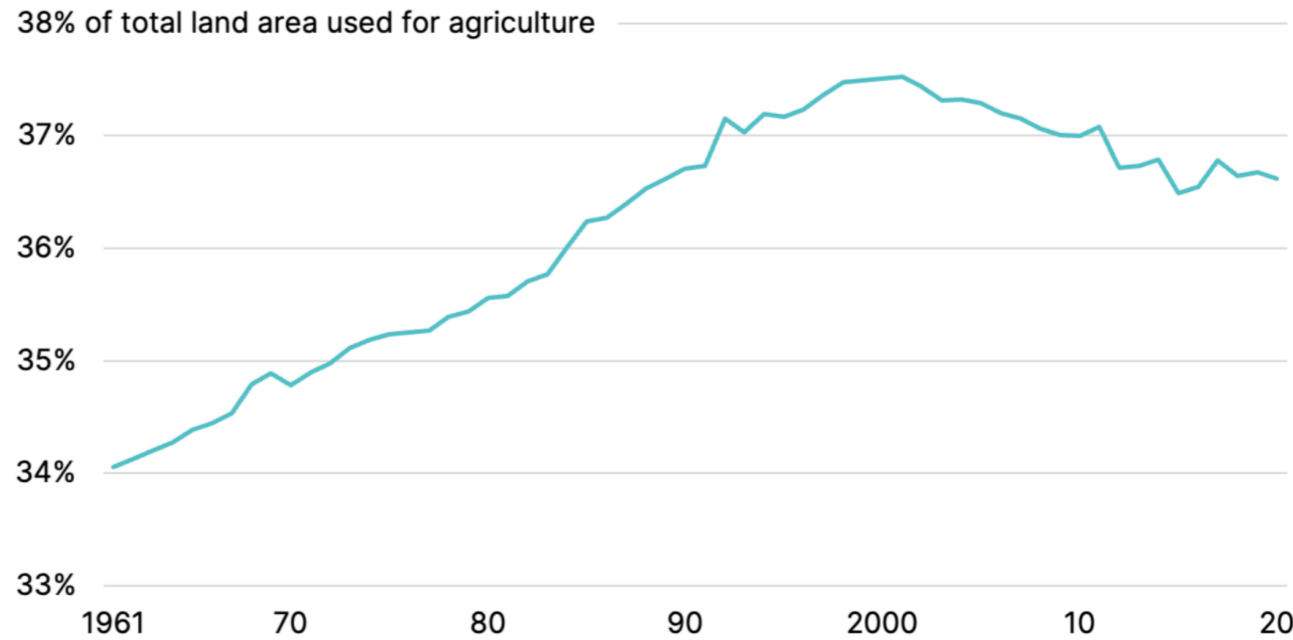
PV : ~ 10 W/m²

Plusieurs formes de biomasse

- **Bois** : chauffage et un peu électricité.
1ère source d'énergie renouvelable en France aujourd'hui.
- **Biocarburants issus de cultures dédiées** (1ère génération).
Ex : bioéthanol issu de betteraves sucrières. Concurrence avec d'autres cultures et très faible rendement.
- **Biocarburants issus de valorisation de déchets** (2e gén.).
Ex : biogaz (méthane) obtenu par décomposition anaérobie de déchets organiques.
- **(Micro)-algues** (3e génération).
Meilleurs rendements ($\sim 4\text{W/m}^2$) sous certaines conditions

Agricultural land use is declining

The percentage of global land used for food peaked two decades ago



January 2023

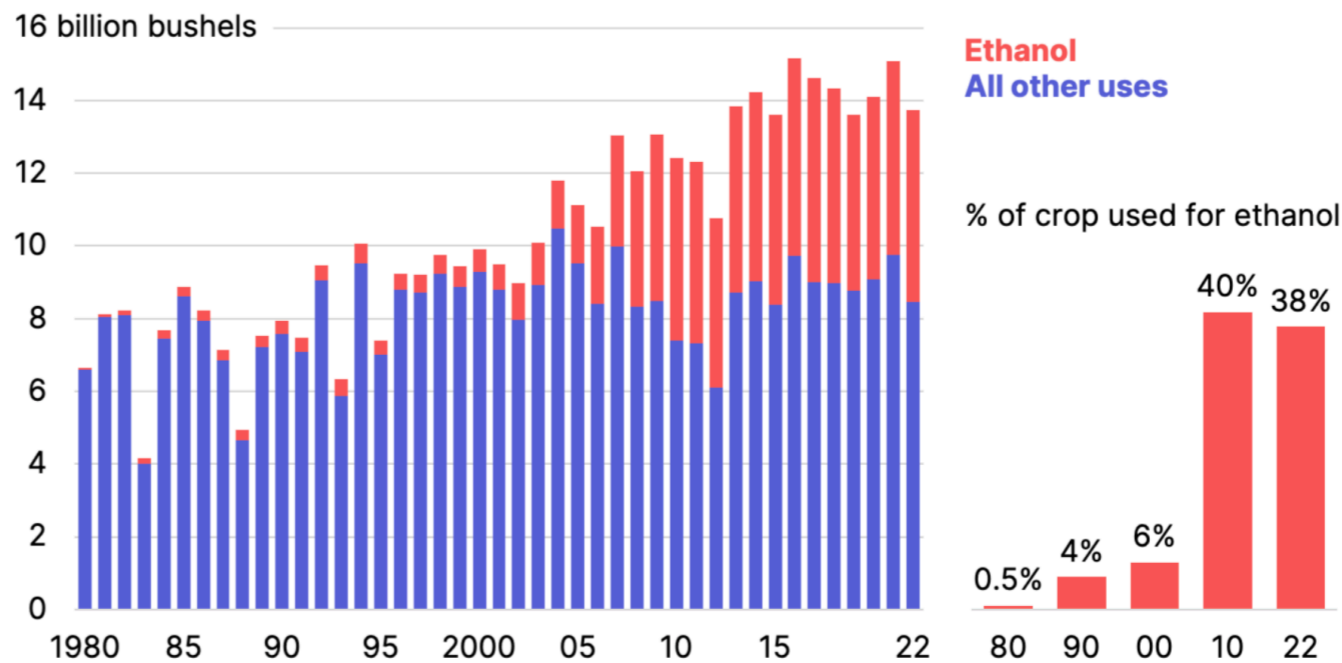
Source: FAO



25

Our food and fuel choices matter

The US uses 40% of its corn crop to meet 10% of its motor gasoline demand



January 2023

Source: USDA, RFA



14

production biomasse

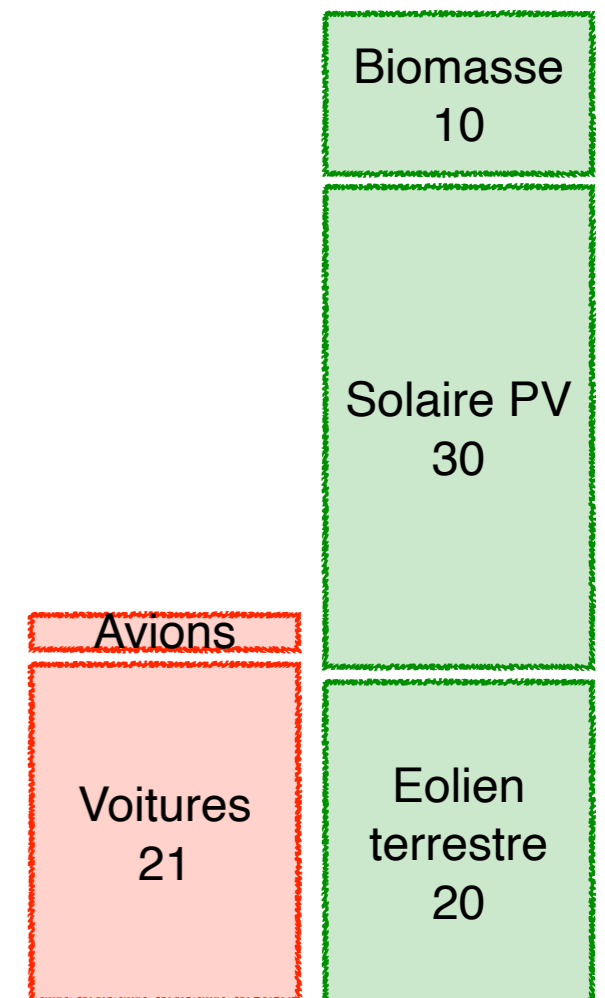
Imaginons uniquement de la production à partir de déchets et de bois :

$$P = 0,1 \text{ W/m}^2$$

$$S = 50\% \text{ de la surface de la France}$$



production de biogaz. Source : connaissance des énergies



unités : kWh/(j*p)

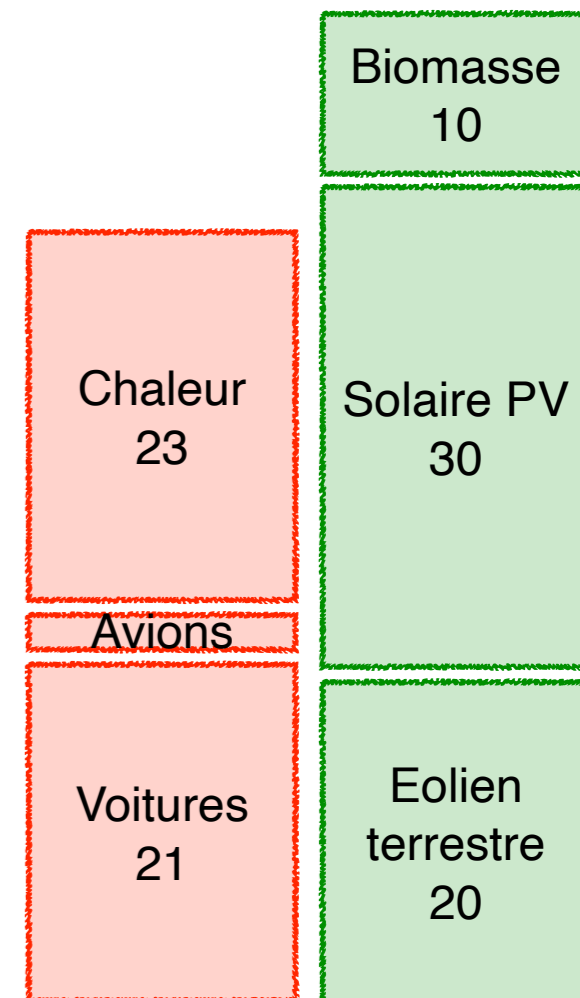
5. Chauffage



- Trois choses comptées ici :
- chauffage domestique
 - chauffage au bureau
 - eau chaude domestique

Données d'un simulateur en ligne :

- maison (100 m², 2 personnes) : 15 kWh/(j*p)
- bureau (12m²/personne) : 5 kWh/(j*p)
- Eau chaude : 3 kWh/(j*p)



unités : kWh/(j*p)

diminuer la consommation

Pertes de chaleur :

- conduction ($J = \kappa \Delta T$)
- ventilation (~20% pour maison standard)

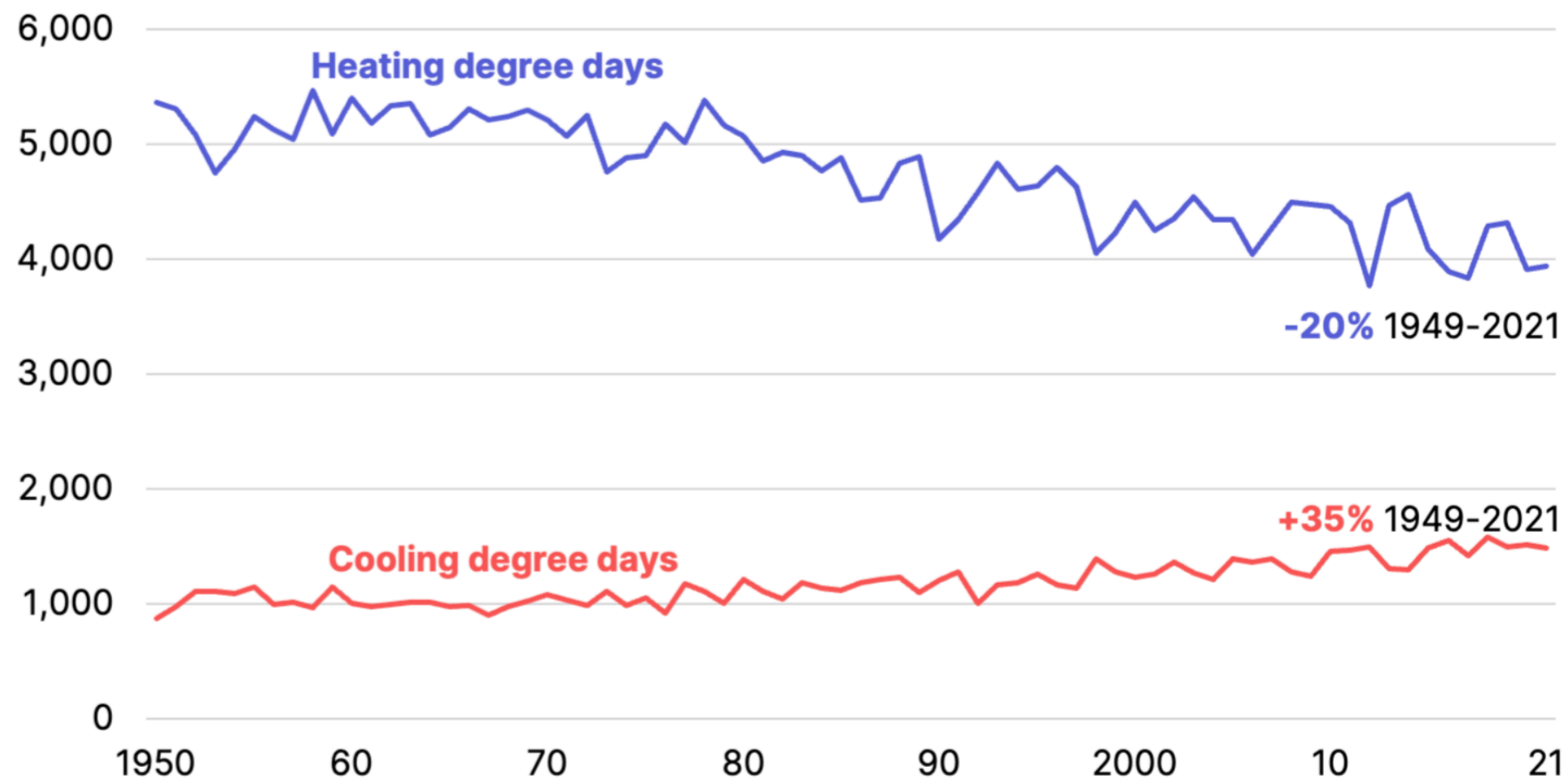
Plusieurs solutions connues depuis longtemps :

- Baisser la température (sobriété)
- Isoler (efficacité)
- Thermostats, domotique (efficacité, confort)
- Mode de production de chaleur (efficacité)

Certaines évolutions des usages

Our built environment is effectively hotter

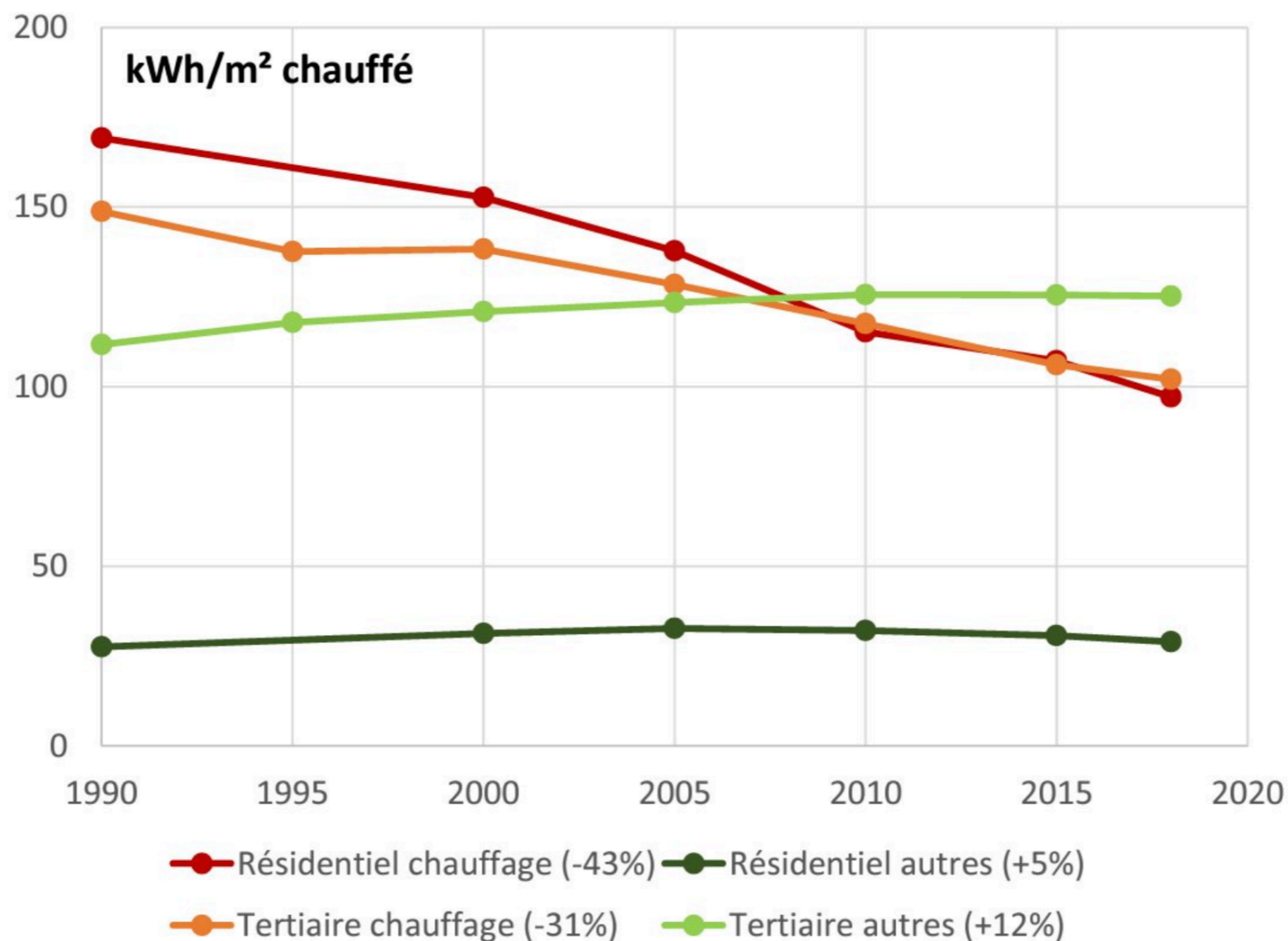
US heating degree days are down, and cooling degrees up



Source:
EIA

Une sorte de paradoxe de Jevons ici aussi...

Baisse très faible de la consommation alors que :



Evolution de la surface par personne sur la même période :
de 36m² à 45m² (maison) et de 29m² à 33m² (collectif)

Proposition

Imposer que tous les logements neufs soient à basse consommation (BBC)

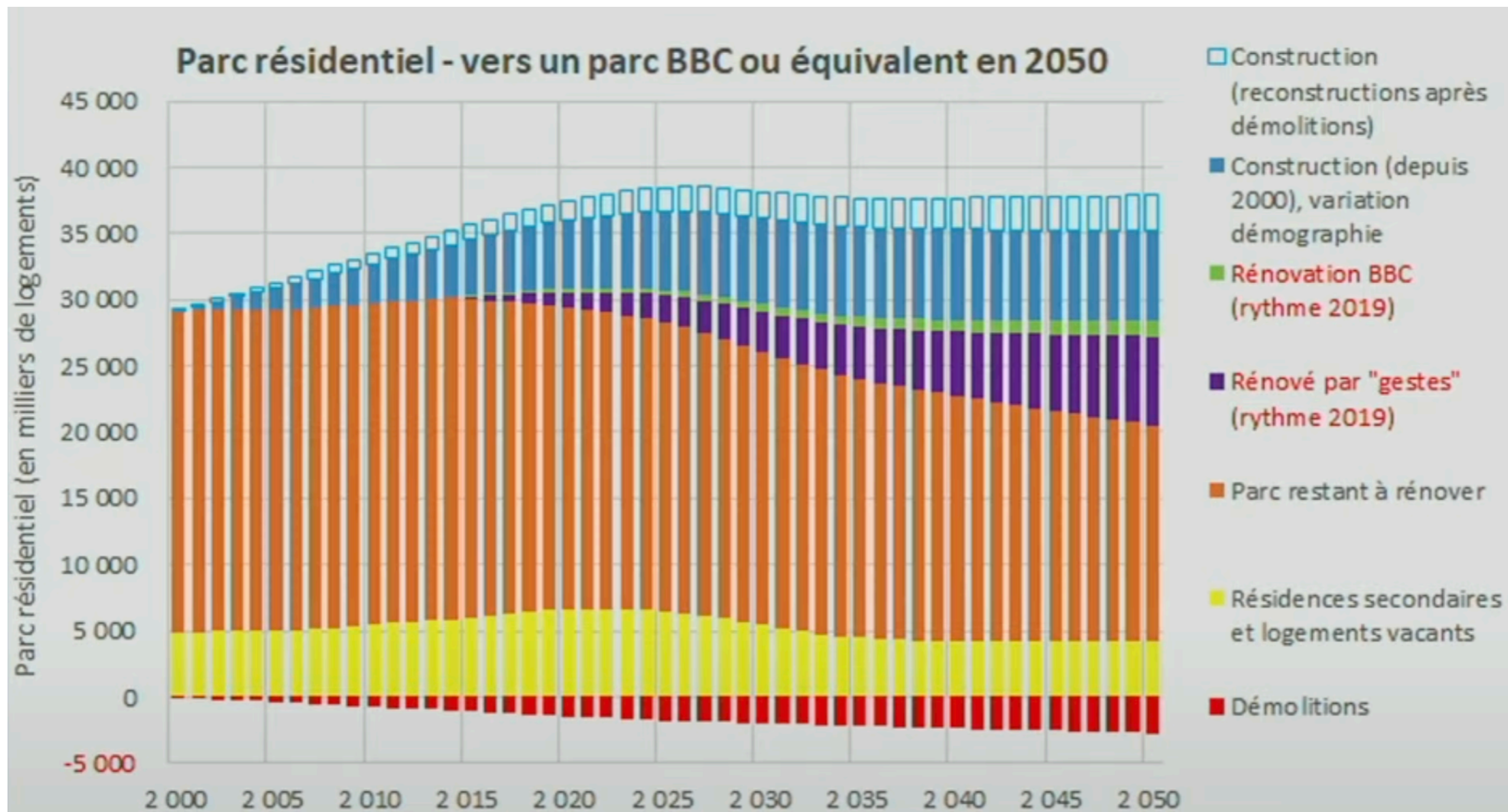
Nombre de logements en France : 36 millions

Nombre de démolitions/désaffectations par an ~ 50000

Quel est le rythme de rénovation du parc ?

Comparer à l'âge de votre habitation.

rythme et qualité

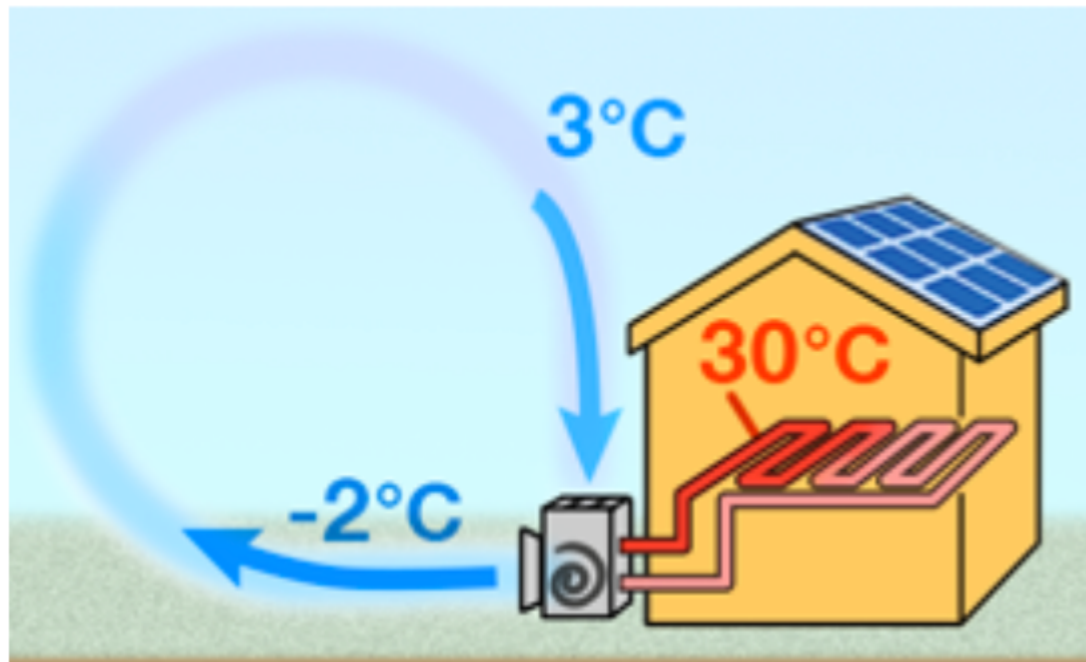


source : présentation négaWatt 2022

- BBC : bâtiment basse consommation
- démolition/reconstruction : rythme très lent
- rénovation par gestes : rythme lent et qualité insuffisante

Deux systèmes formidables !

La pompe à chaleur



La maison est réchauffée en refroidissant l'extérieur.

Rendement $\eta > 1$:

$$\eta = \frac{Q}{W} \sim 3$$

miracle de l'électricité n°3

La co-génération



La chaleur fatale de la production d'électricité est récupérée dans un réseau de chaleur

Exercice : comparons-les !

1 kWh de gaz dans une centrale produit :

- pas de co-génération : 0,5 kWh d'électricité produit.
- avec co-génération : 0,3 kWh d'électricité et 0,55 kWh de chaleur produits (la co-génération induit une perte de rendement dans la production électrique). En tout : 0,85kWh.

Dans les deux cas, on utilise l'électricité pour se chauffer (pompe à chaleur). Quel est le meilleur rendement ?

La fin des réseaux de chaleur ? Non :

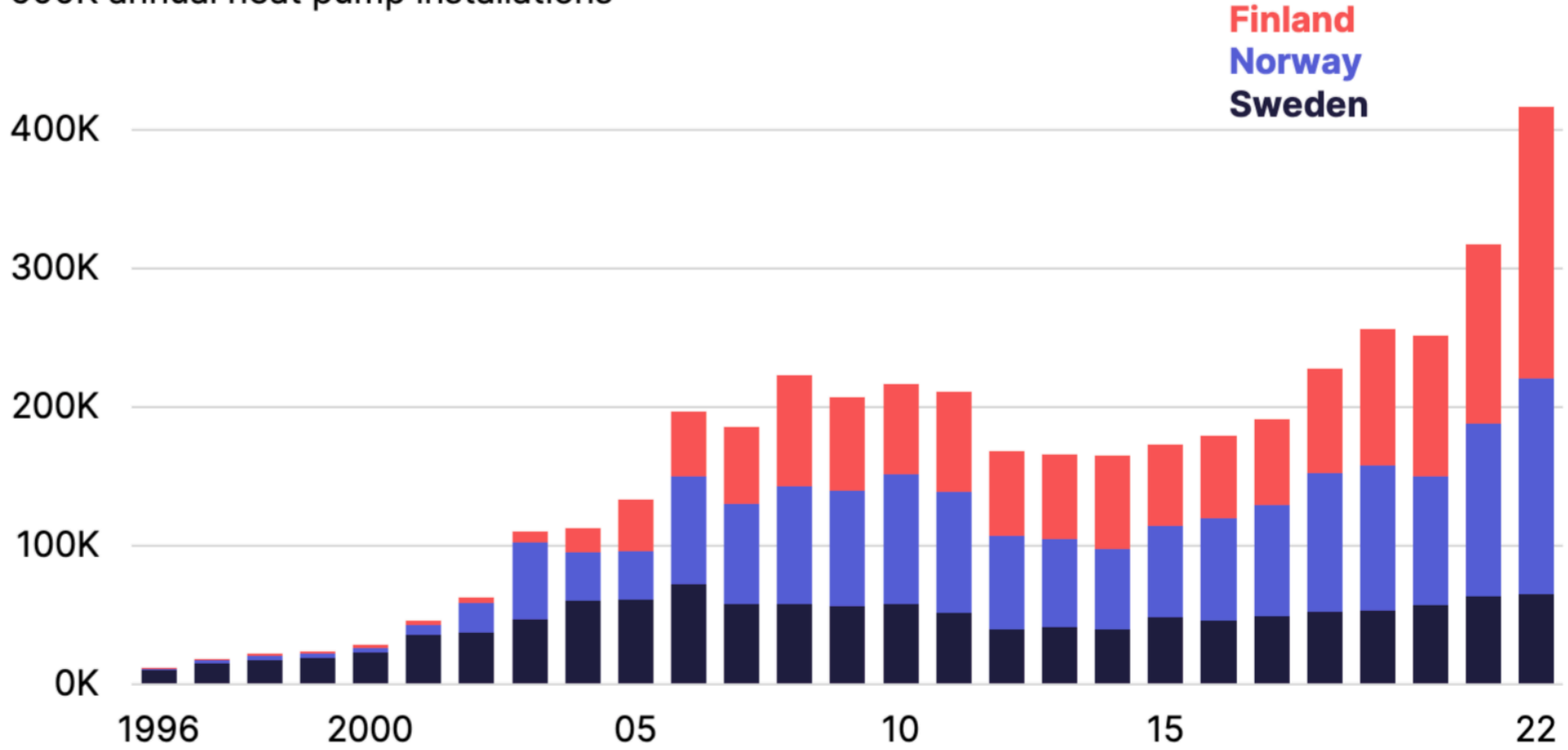
- pour beaucoup de centrales (moins efficaces), la différence de rendement est plus petite,
- un usage massif de la pompe à chaleur en ville peut devenir moins efficace (refroidissement du milieu),
- possibles tensions sur le réseau électrique.

Pompes à chaleur dans les pays froids

They do work in the cold

The Nordics now buy more than 400,000 heat pumps a year

500K annual heat pump installations



Source:
NOVAP,
SKVP,
SULPU

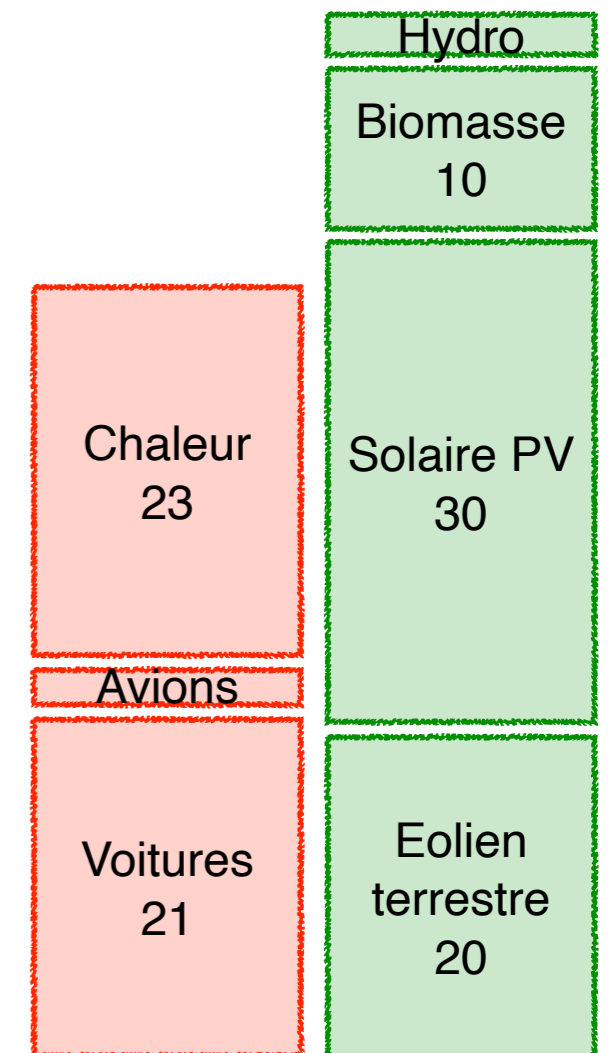
6. Hydraulique

- Seconde source d'énergie renouvelable en France
- Potentiel essentiellement déjà exploité $\sim 2,5 \text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$



Barrage hydroélectrique de Saint-Pierre Cognet

Plus grand barrage hydro-électrique au monde : le barrage des Trois-Gorges $\sim 0.4 \text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$ (en Chine)



unités : $\text{kWh}/(\text{j}^*\text{p})$

7. Eclairage

Scénario :

- un appartement de 2 personnes,
- 4 led dans la cuisine (10W),
- 10 tungstène dans l'appartement (60W),
- allumées 5h par jour.



Déduire la consommation d'énergie par personne et par jour

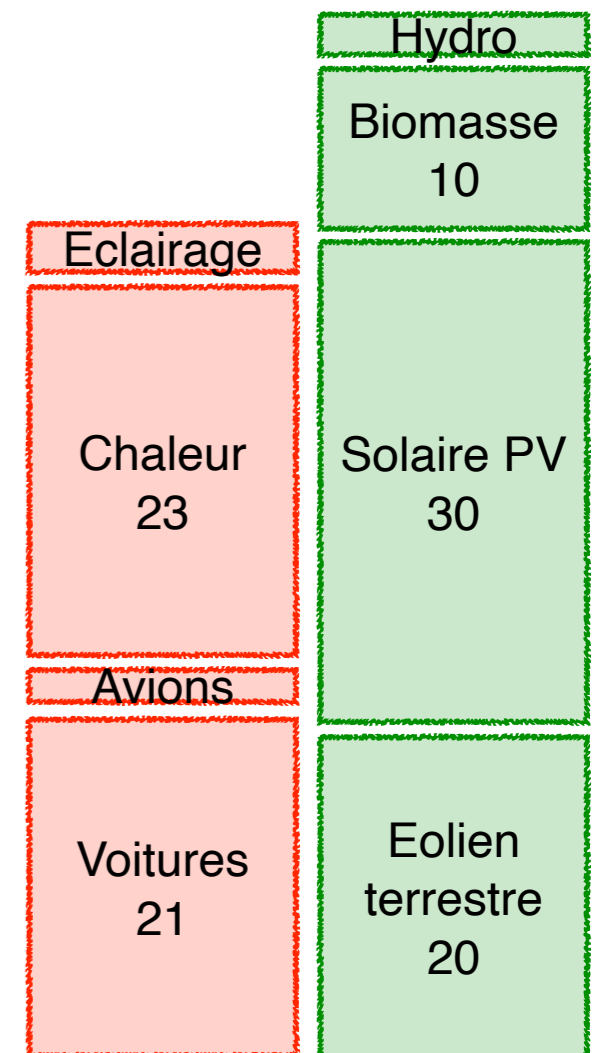
Eclairage ~ 3 kWh/(j*p)

Efficacité (période 1800-200 déjà discutée) :

| Bulb type | efficiency (lumens/W) |
|---------------------|--------------------------|
| incandescent | 10 |
| halogen | 16–24 |
| white LED | 35 |
| compact fluorescent | 55 |
| large fluorescent | 94 |
| sodium street-light | 150 |

rappel : bougie ~ 0,1 ; gaz ~ 1

Devient (probablement) un **contre-exemple**
du paradoxe de Jevons



unités : kWh/(j*p)

8. Eolien en mer

pratiquement inexploité en France aujourd'hui

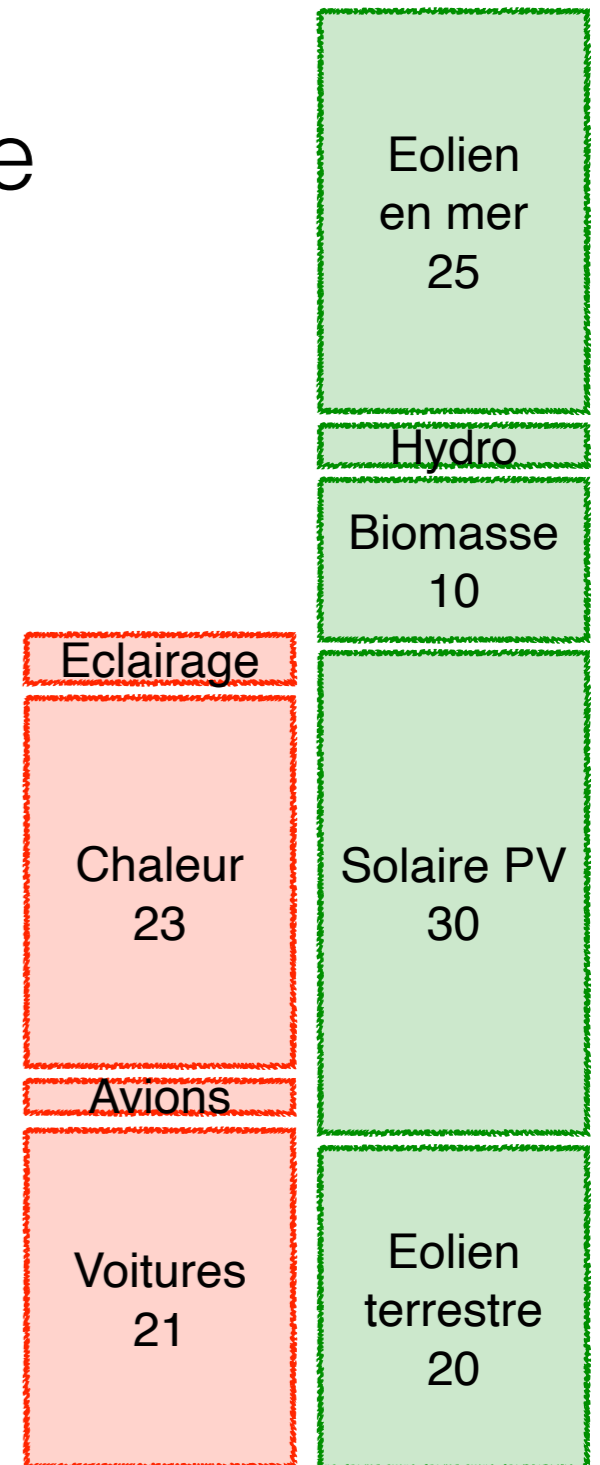


Surface des eaux territoriales : 75000 km²
Vents plus puissants et plus stables: 3 W/m²
Couverture : 30%

Remarque : prendre les eaux territoriales comme limite est artificiel et naïf

Eolien en mer ~ 25 kWh/(j*p)

- Eoliennes posées : profondeur < 40m
Impact environnemental faible voire favorable
- Eoliennes flottantes : profondeur < 250m
Premier parc : 2017 (Hywind, Ecosse)



unités : kWh/(j*p)

Deux objectifs

1. Maximiser la puissance

2. Minimiser les fluctuations (foisonnement)

Winds of change

Optimal location of offshore wind farms needed to supply the world's total energy demands

The Biden administration has proposed sites along the west coast

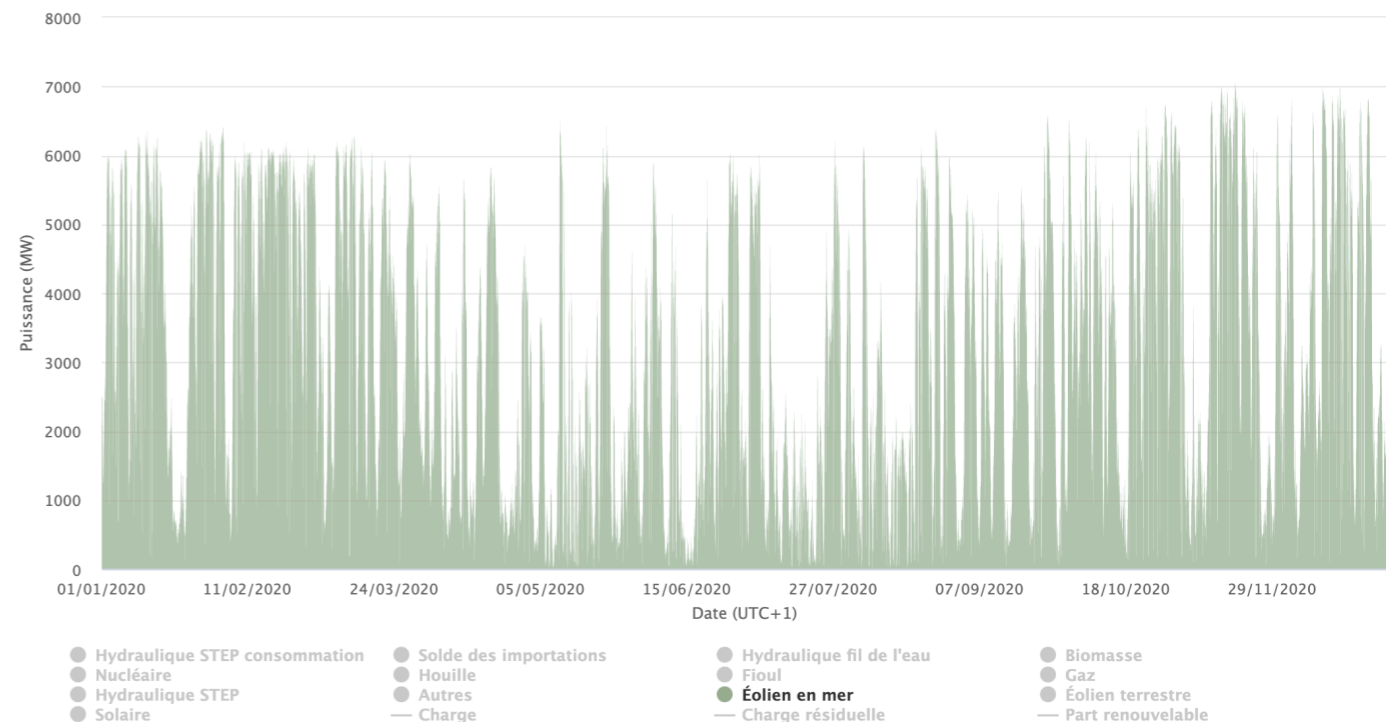
Many wind farms are already in the North Sea

Give Feedback



Production nette d'électricité en Royaume-Uni 2020

Données d'origine Entsoe - non corrigées énergétiquement



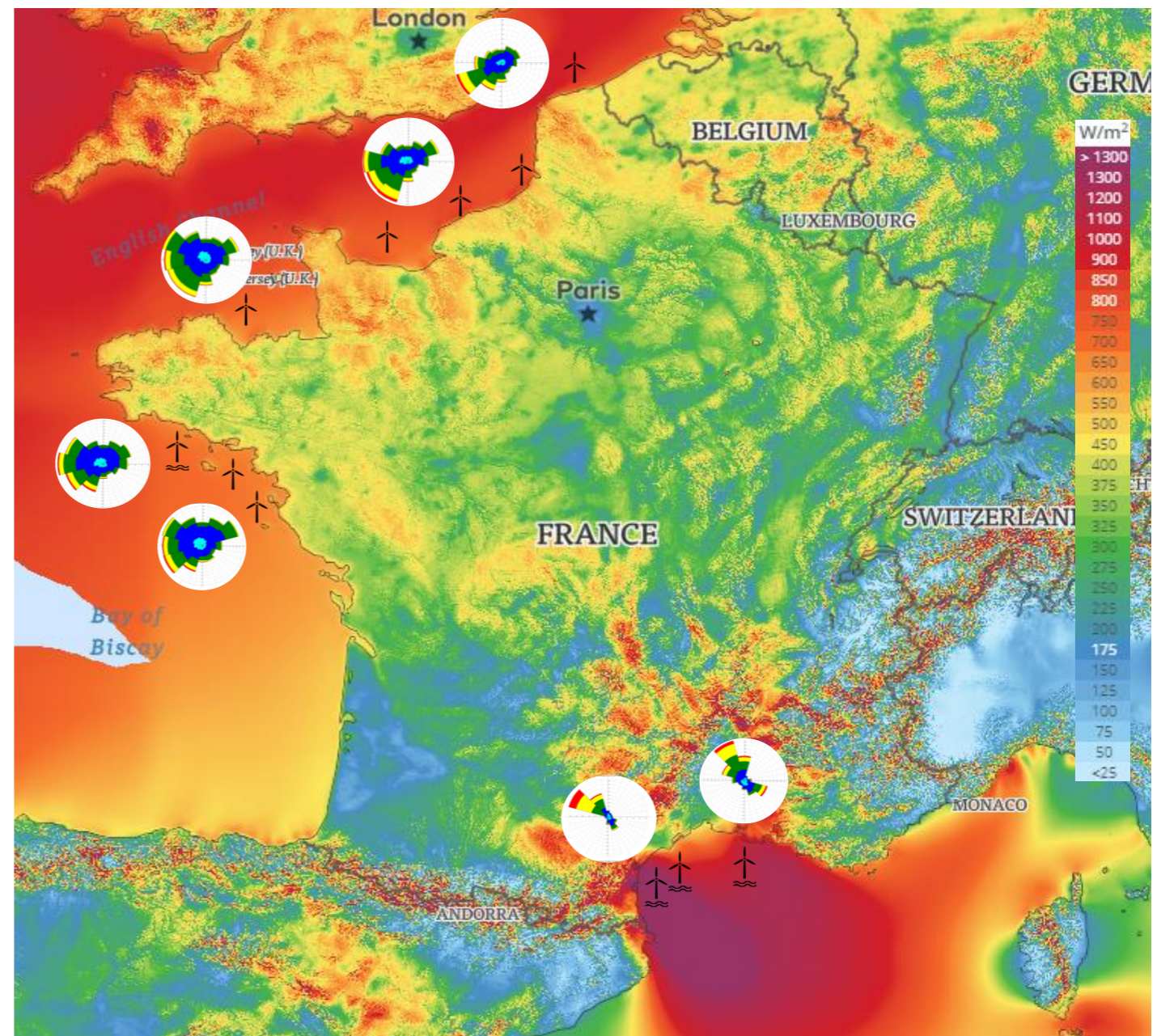
Energy-Charts.info - dernière actualisation: 13/01/2022, 13:03 UTC+1

Etude d'un projet (Engie)

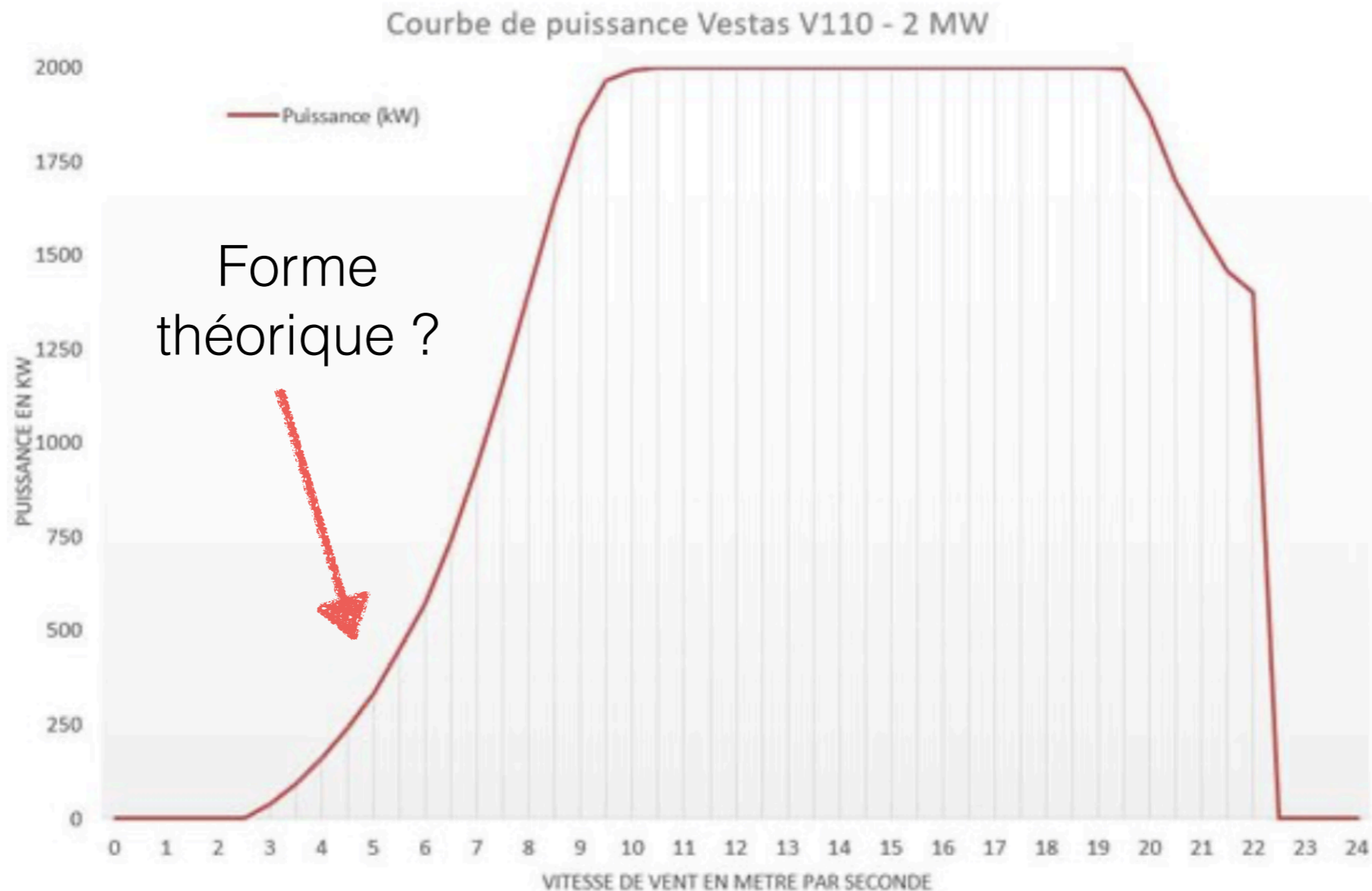
Etude du foisonnement éolien sur les façades maritimes françaises

Paramètres et hypothèses de l'étude

- Simulation de l'énergie produite en sortie d'éolienne chaque heure sur les 20 années passées à partir de données de vent au pas horaire (modèles EMD_Europe_ERA5, résolution 1.5km).
- Parc éolien global constitué de 11 parcs de même puissance correspondant aux sites des 7 projets lauréats des AO 1, 2 & 3 et des 4 projets pilotes flottants (AMI pilotes), répartis sur l'ensemble des façades maritimes.
- Chaque parc est constitué d'une éolienne Haliade-X 12 MX de GE Renewable Energy équipée d'un rotor de 220 mètres de diamètre, la plus puissante du monde actuellement, à 150m de hauteur de moyeu.
- La carte ci-contre situe les 11 parcs, accompagnés de leurs caractéristiques:
 - Les roses indiquent la répartition des vents par direction. (Source EMD_Europe_ERA5)
 - Le fond de carte donne un aperçu de la répartition spatiale de la ressource éolienne moyenne sur le long terme. (Source Global Wind Atlas, 100m).



Puissance installée et facteur de charge

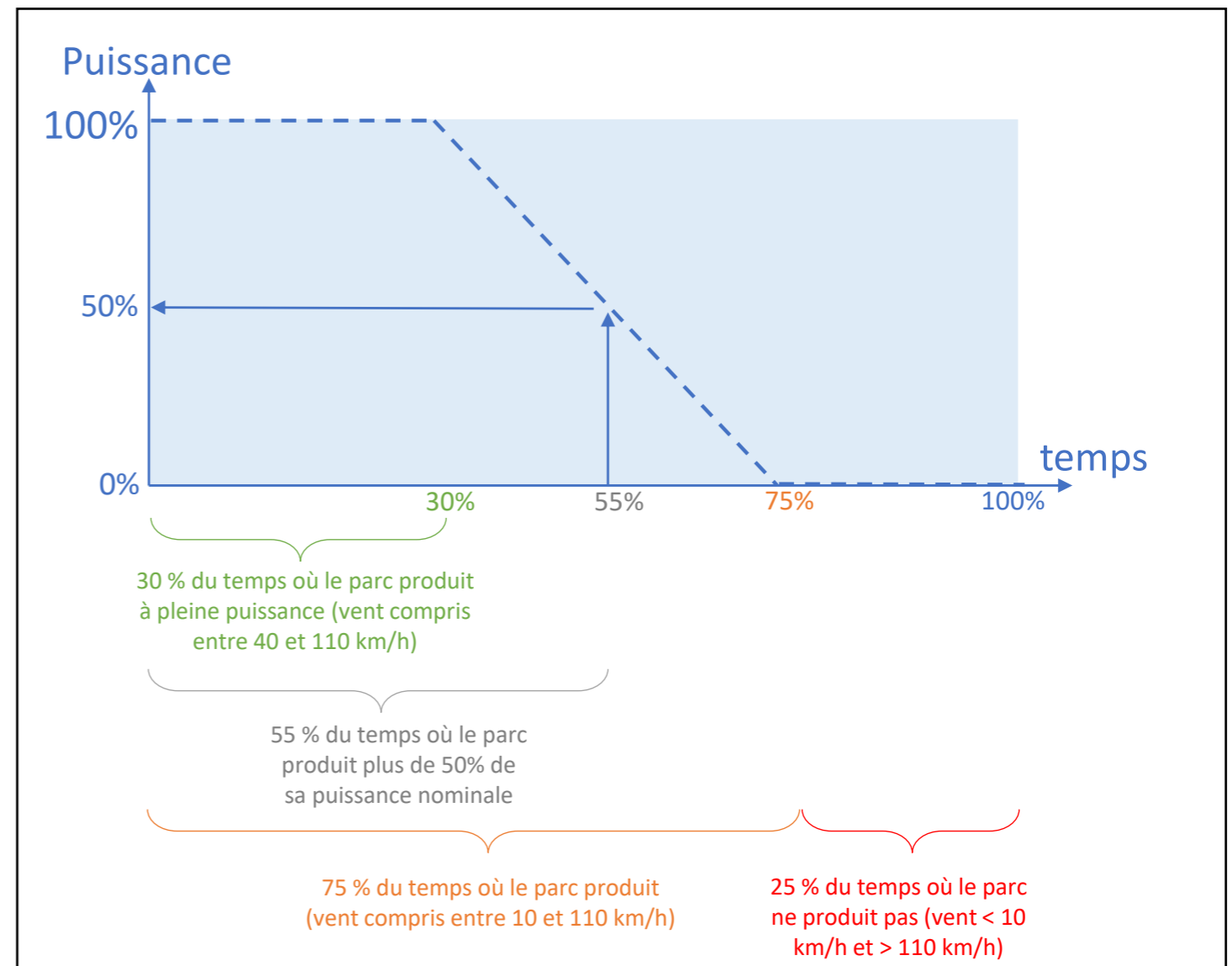


Puissance installée : $\bar{P} = \max_v P(v) = 2 \text{ MW}$

Facteur de charge : $c = \frac{\langle P \rangle}{\bar{P}}$ où $\langle P \rangle = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} P(v(s)) ds$

Méthodologie

- La vitesse moyenne du vent relevée ces 20 dernières années sur chaque site permet d'estimer le productible horaire correspondant.
- Cela permet de déterminer **les monotones de production** sur 20 ans, pour chaque site indépendamment, et pour l'ensemble des sites.
- La monotone permet de répondre à la question « **quel pourcentage du temps le parc éolien a-t-il produit plus d'un certain pourcentage de sa puissance nominale ?** ».



Exemple de monotone

Problématique

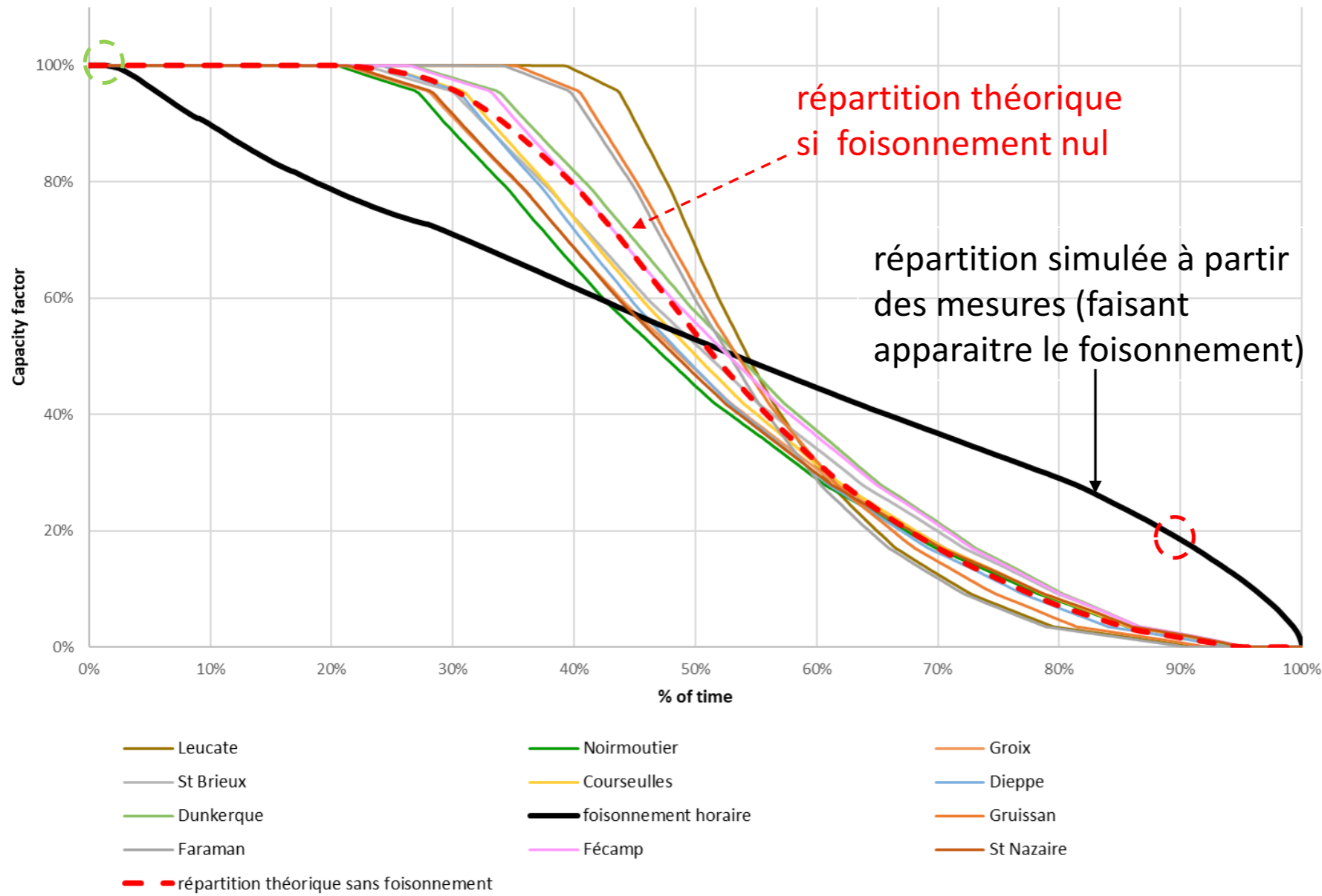
Si le foisonnement n'existait pas, cela signifierait :

Que le vent souffle sur les 3 façades françaises à peu près de la même façon à chaque instant et donc :

- qu'il existe potentiellement de larges épisodes sans vent nulle part, et donc sans production associée ;
- qu'il existe potentiellement de larges épisodes où le vent souffle partout au même moment, et donc avec une production maximale de l'ensemble des sites...

...Que révèlent les statistiques associées à 20 années de données de vent ?

Load duration curves



Foisonnement annuel

Le vent souffle quasiment toujours quelque part...

90% du temps, le parc global cumulé produit plus de 20% de sa puissance nominale

- Alors que chaque parc pris individuellement ne produit plus de 20% de sa puissance nominale « que » 64 à 72% du temps.

... et presque jamais partout en même temps

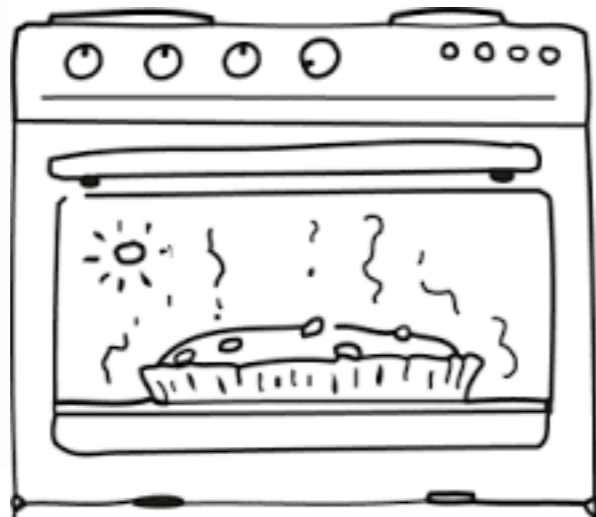
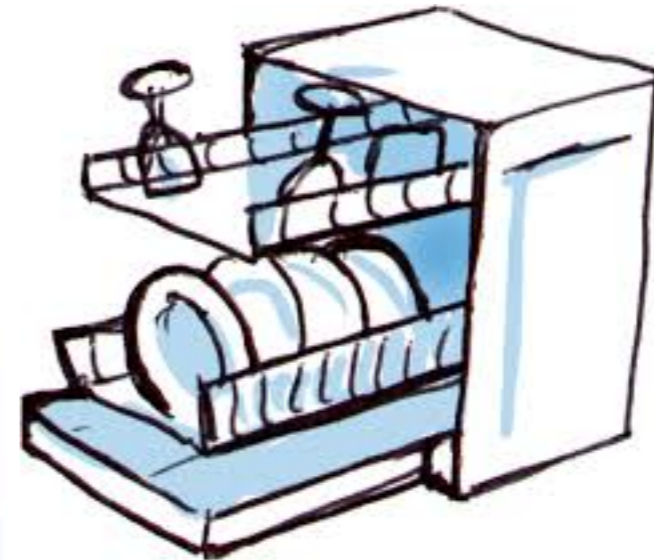
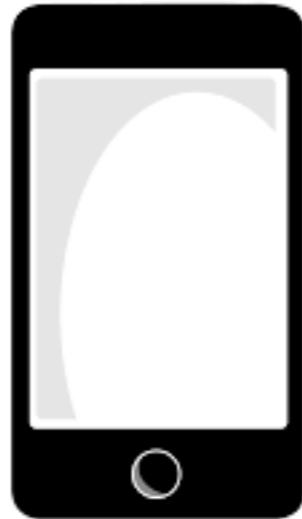
- A l'opposé, les épisodes où le parc cumulé atteint 100% de sa puissance se limitent à qq jours dans l'année.

- Alors que chaque parc va produire à pleine puissance 20 à 40% du temps selon les parcs considérés

Questions

- Qu'est-ce qu'une monotone dans le langage des probabilités/statistique ?
- Pourquoi la monotone moyenne n'est-elle pas la moyenne des monotones ? Comment calcule-t-on ces courbes à partir des données de vent ?
- Comment évalue-t-on le facteur de charge moyen ? Le facteur de charge moyen de tout le parc est-il affecté par le foisonnement ? Donner une estimation approximative sur base des monotones décrites ici (valeurs standards : 25% sur terre, 40% en mer).
- Pour un facteur de charge donné, à quoi ressemblerait une monotone d'un foisonnement idéal ?
- On suppose des vents de vitesse moyenne 6m/s distribués selon une Weibull de forme $k=2$. S'il y a de nombreux vents stochastiquement indépendants, expliquer pourquoi on s'attend à trouver une monotone à peu près idéale ?

9. Utilisation d'appareils



Eolien
en mer
25

Hydro

Biomasse
10

Appareils

Eclairage

Chaleur
23

Solaire PV
30

Avions

Voitures
21

Eolien
terrestre
20

Energie ~ 3 kWh/(j*p) (simulateur en ligne)

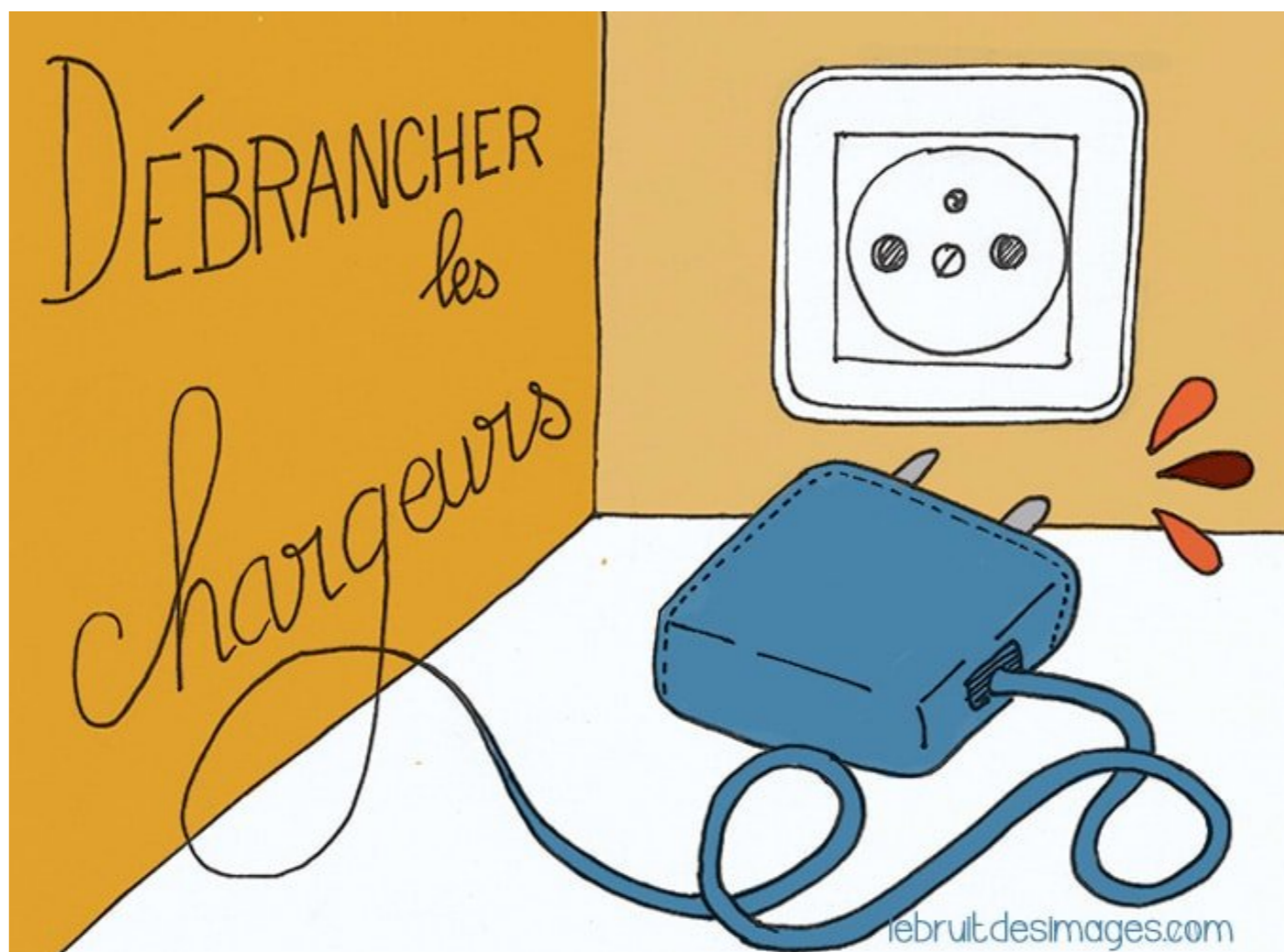
unités : kWh/(j*p)

Commenter le dialogue suivant

Un dialogue en hiver :

la mère : « Débranche ton chargeur, tu gaspilles l'électricité ! »

la fille : « Non, je chauffe la maison. »



Quelques réflexions possibles

On imagine que la maison est équipée de thermostats

- C'est de toute façon anecdotique. Vrai, mais réfléchissons quand même.
- La maison est chauffée avec des radiateurs électriques. La fille a raison, mais le mode de chauffage n'est pas optimal.
- La maison est chauffée avec des pompes à chaleur. Le chargeur est moins efficace.
- La maison est chauffée au gaz. A priori, produire de l'électricité a un plus faible rendement que brûler du gaz pour le chauffage. Mais on peut aussi voir les aspects économiques et environnementaux.
- On use inutilement le chargeur qui a demandé des ressources pour être fabriqué.

10. Géothermie

Origine de l'énergie géothermique:

- 1) radioactivité naturelle dans le manteau (75%),
- 2) refroidissement du centre de la terre (25%).



lieu ordinaire

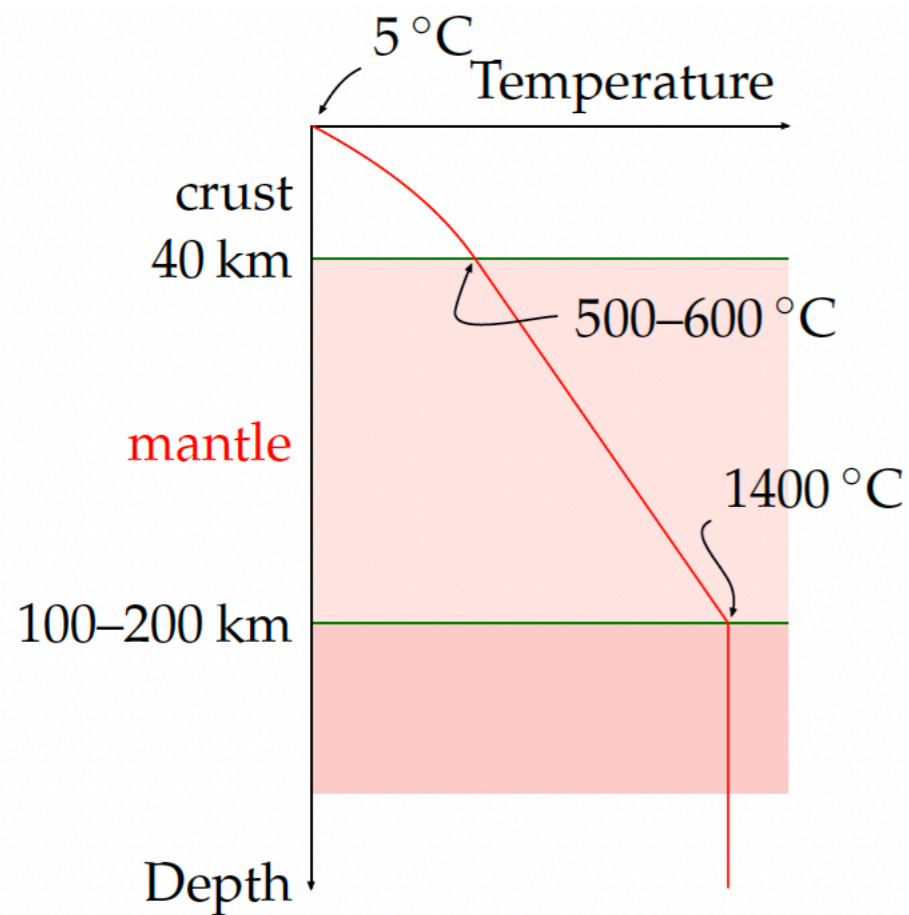


hot spot

On regarde ici le cas ordinaire

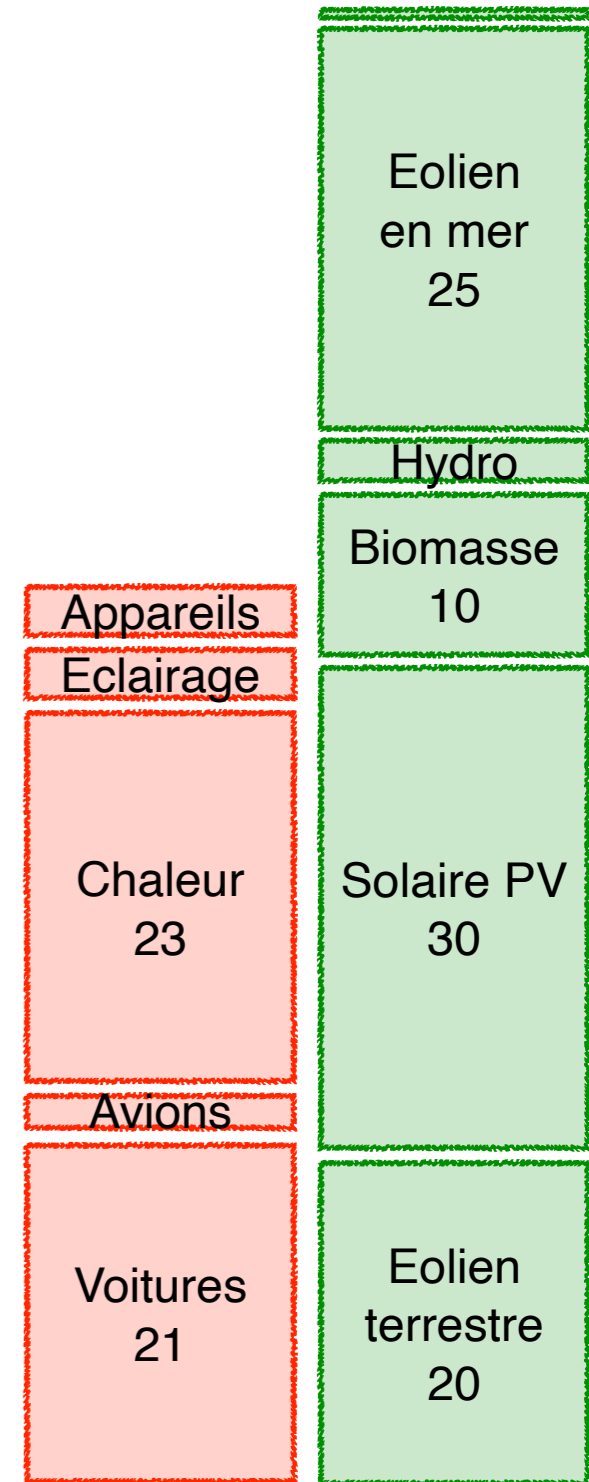
Cette énergie est-elle renouvelable ?

Oui, en y allant très doucement...
 Puissance disponible : $0,05 \text{ W/m}^2$
 (bois : $0,1-0,2 \text{ W/m}^2$, PV : $10-20 \text{ W/m}^2$)



Tirer la chaleur trop brusquement provoquerait un refroidissement. Beaucoup d'espace requis.

Figure 16.4. Temperature profile in a typical continent.



unités : kWh/(j*p)

11. Alimentation

En première approximation, la consommation (alimentation) est produite par de l'énergie renouvelable (agriculture), et le bilan est nul. On pourrait ajouter environ 3 kWh/(j*p) pour la production d'engrais (2 kWh) et les machines agricoles (1kWh) ; ceci est négligé ici.

Comparons ceci :

- Besoins nutritionnels $\sim 3 \text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$
- Energie nécessaire pour produire 3kWh d'aliments



Ca dépend du régime alimentaire

Rendement énergétique de quelques aliments :
énergie disponible / énergie végétale utilisée

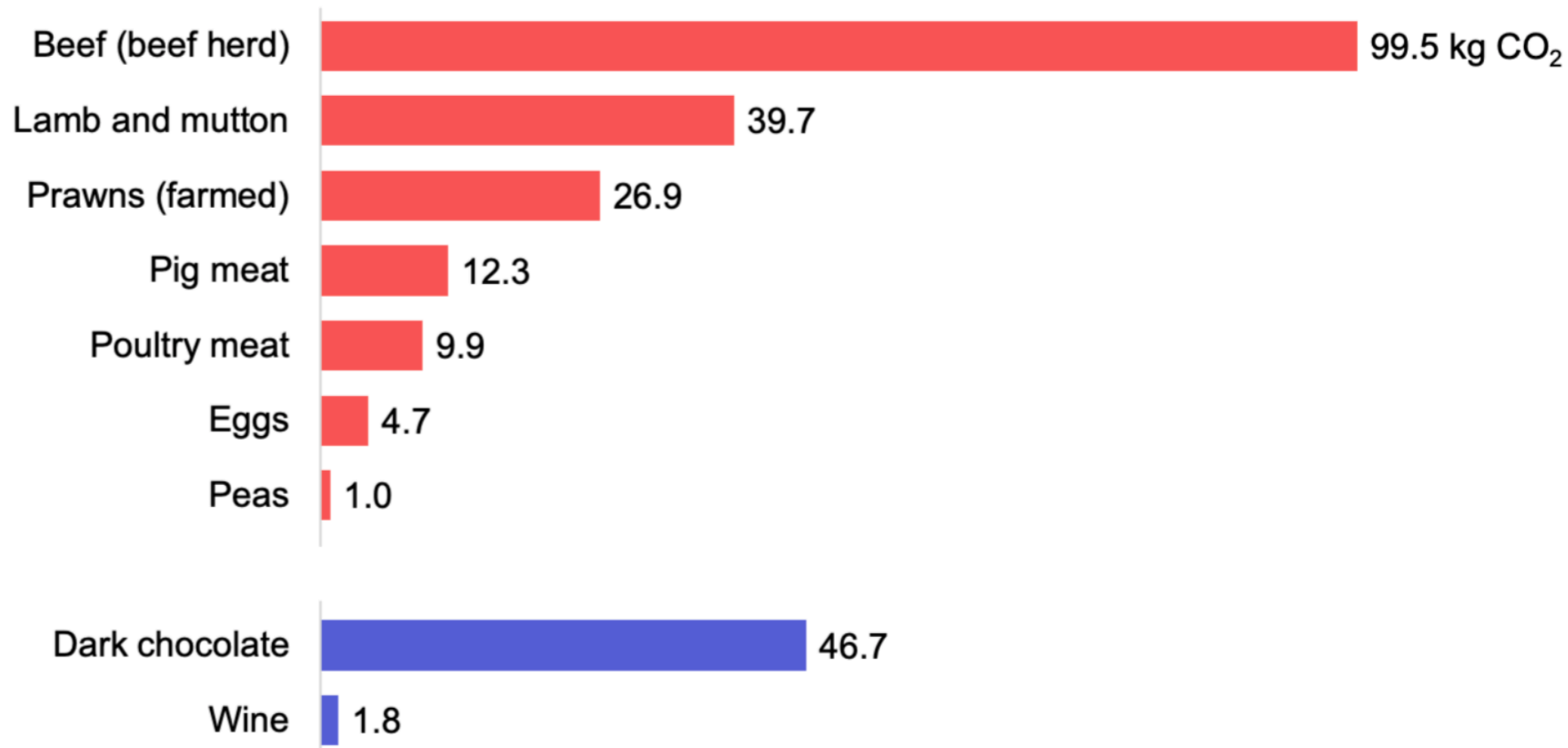
1. Végétaux : 100%
2. Lait : 50%
3. Oeufs : 20%
4. Viande (mix) : 7%
5. Poisson : ?

Avec le régime actuel, pour obtenir $3\text{kWh}/(\text{j}^*\text{p})$, on consomme environ $12\text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$.

Sanity check : on avait calculé qu'en utilisant 50% de la surface de la France pour de la biomasse sous forme de déchets/bois, on peut obtenir $10\text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$. Environ 45% de la surface sont des terres agricoles et fournissent donc environ $12\text{ kWh}/(\text{j}^*\text{p})$.

Meat is a major emitter

Agriculture products have very different emissions intensity per kilogram



Source:
Poore, J., &
Nemecek, T.
(2018),
Our World
in Data

Note:
Average
kilograms of
CO₂
equivalent
per kilogram
of food
product



NAT BULLARD

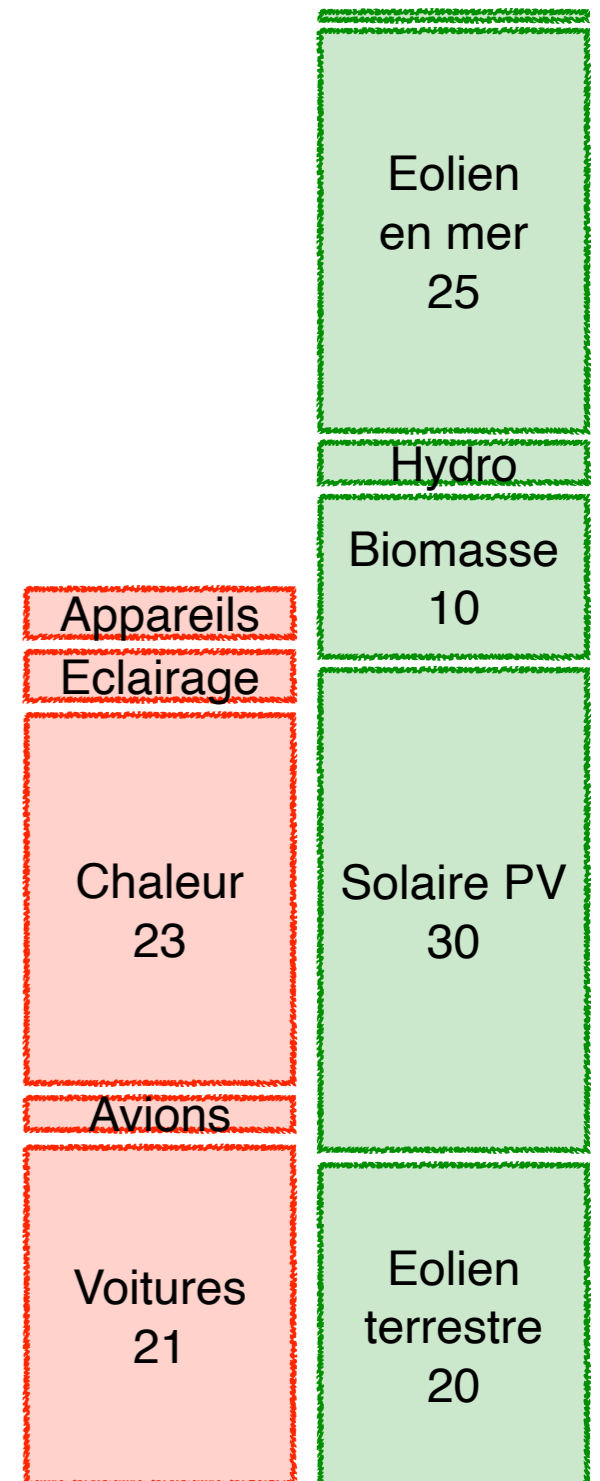
12. Autres renouvelables

Vagues et marées



Centrale marémotrice de La Rance (Bretagne),
pratiquement la plus grosse au monde.

Puissance installée : 240 MW (un réacteur nucléaire ~ 1000 MW)



unités : kWh/(j*p)

13. fabrication et transport d'objets

L'énergie **grise** correspond à l'énergie utilisée pour

- extraire les matériaux,
- fabriquer l'objet,
- le transporter,
- le recycler

Difficile à évaluer pour un consommateur

Exemple : estimer l'énergie grise par personne et par jour pour une voiture de ville (ici : Golf).

Prix : 30000 euros,

proportion du prix pour l'énergie : 6%,

prix de l'énergie : 40€/MWh,

durée de vie : 10 ans

Remarque : cette méthode donnera au mieux un ordre de grandeur correct !

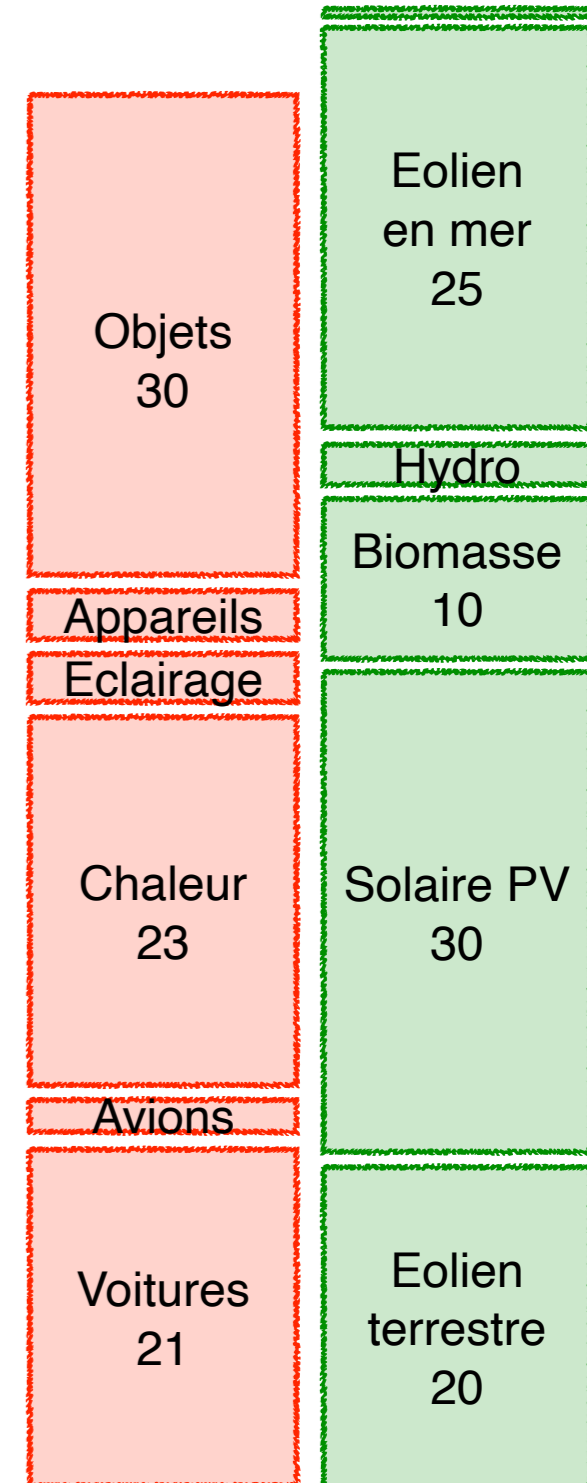
Energie grise

On obtient ~ 6 kWh/(j*p)

Remarque : les voitures électriques ont une plus grande énergie grise (batterie)

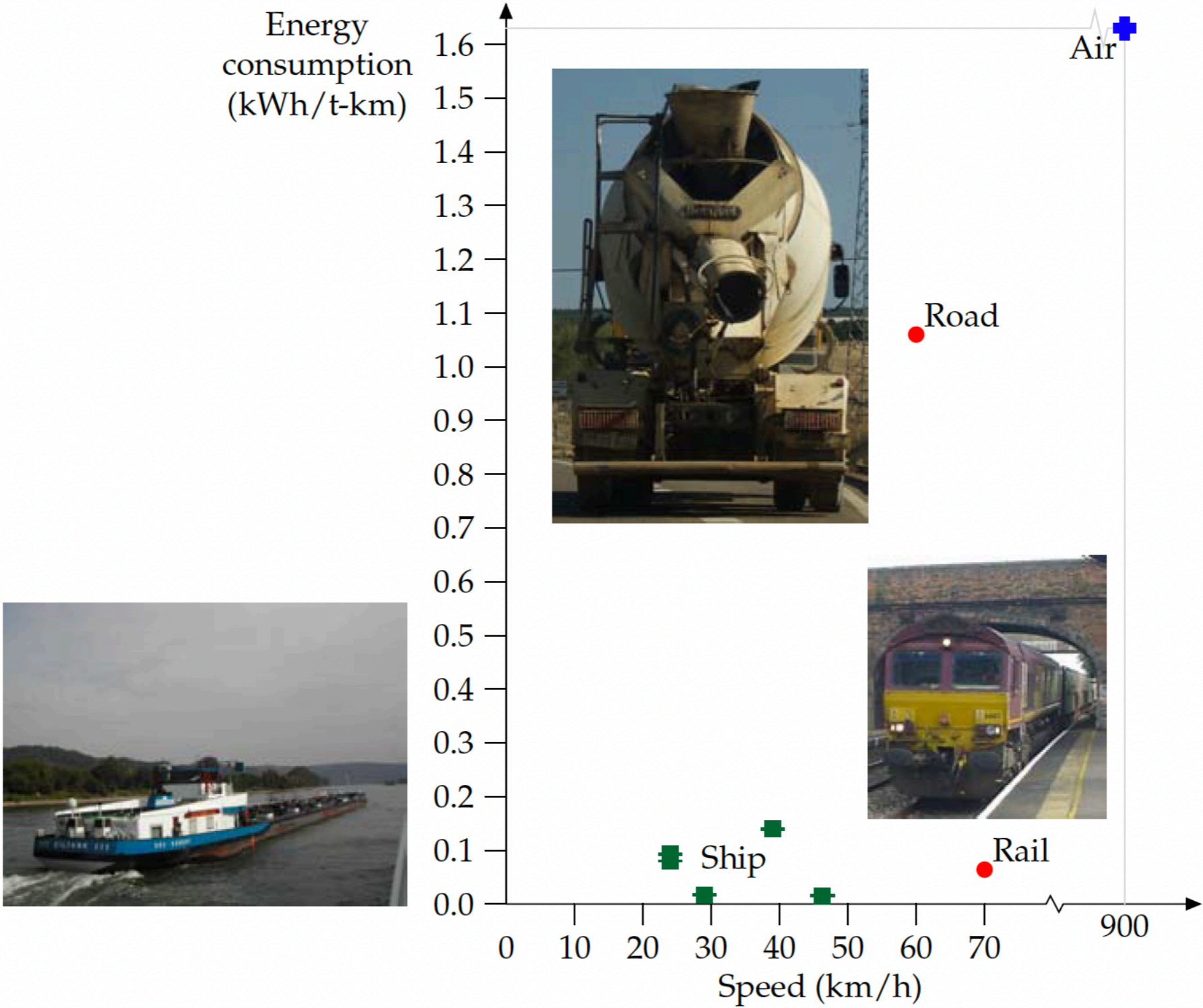
Il faut ajouter plein de choses : maison, appareils, vêtements, meubles...

On donne une estimation (très approximative) de 30 kWh/(j*p) basée sur certaines statistiques. C'est le poste le plus important !



unités : kWh/(j*p)

Transport

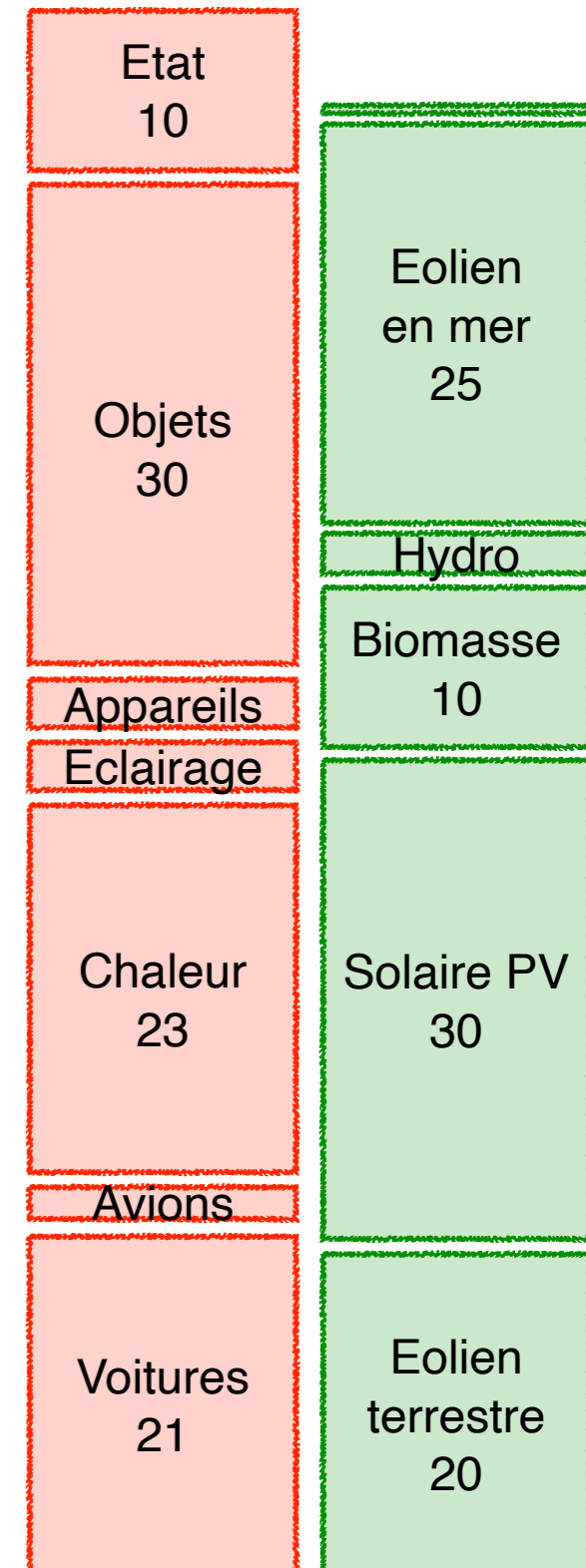


Le transport par gros conteneurs est très efficace

14. infrastructures et services publics

Exemple de choses non encore comptées : routes, mobilier urbain, défense nationale, appareil médical...

On prend de nouveau 6% du budget de l'état (~200 milliards par an) à environ 40€/MWh. Mais il y a des double comptages (ex : chauffage école déjà compté).

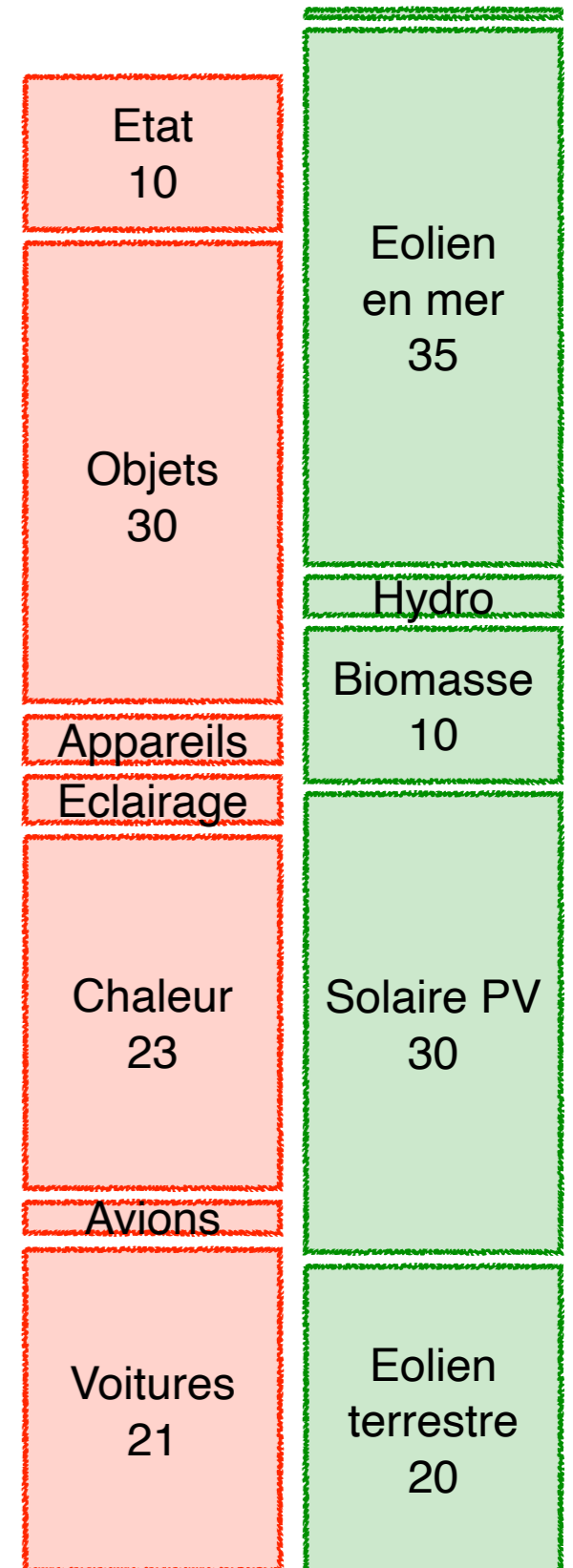


unités : kWh/(j*p)

Bilan

L'analyse *très grossière* montre que

- La faible densité énergétique des énergies renouvelables pose une difficulté.
- Au moins en principe, il serait possible de couvrir nos besoins avec des énergies renouvelables.
- Ceci représente un gros défi, en particulier le rythme d'installation.
- Il y a des pistes pour diminuer la consommation.



unités : kWh/(j*p)

Terminons avec un peu de sobriété !



President Biden ✓

@POTUS

United States government official

As a lot of folks know, I'm a car guy. I've gotten a chance to drive some pretty incredible vehicles over the years, but I never could have imagined ones like the electric vehicle I took for a spin today.

The future is electric – and it will be made right here in America.



1:04 AM · Nov 18, 2021 · The White House