This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 3.0 France License.

Crise de l'énergie (2022)

Pb de fin de mois ou de fin d'un temps ?

B.Remaud – U Permanente

2022

La crise de l'énergie

LE FIGARO

« Sans la liberté de blâmer, il n'est point d'éloge flatteur. » Beaumarchais

Les Français obnubilés par la crise énergétique

Par Marc Landré
Publié le 23/09/2022 à 18:27

Écouter cet article 00:00/01:23

44% des Français estime important de maintenir le bouclier énergétique en 2023 . *KACPER PEMPEL / REUTERS*

Crise

Manifestation brusque et intense, de durée limitée, pouvant entraîner des conséquences néfastes

Un choc pétrolier

Après celui de 1973 – suite de la guerre du Kippour
Et celui de 1979 – suite de la guerre en Irak

Un 3ème (?) choc pétrolier avec la guerre en Ukraine ?
Ou quelque chose de plus fondamental ?

CC BY SA

Crise de l'énergie : un iceberg devant nous

Examiner les problèmes de fond, notamment scientifiques

Pour mieux aborder les solutions techniques, économiques, politiques et sociétales

CC BY SA

État des lieux

CC BY SA

L'énergie de l'Homo Sapiens

S'entretenir

- Se développer (grandir)
- Se maintenir en forme
- Maintenir sa température (animal à sang chaud)

3 kWh

Faire des « choses »

- Chasser, cuisiner,…
- Bricoler (vêtements, outils)
- Jouer
- Se reproduire
- …

1 kWh

CC BY SA

L'énergie humaine

Homo sapiens

Il y a 150 000 ans

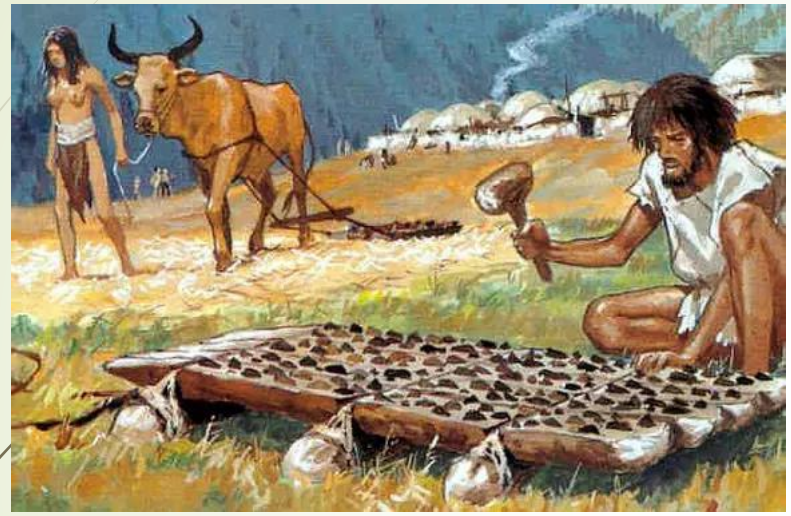
4 kWh de nourriture par jour

1 kWh d'énergie active** par jour et par personne
(10 heures de travail à 100 Watts
** Hors chauffage et cuisine)

CC BY SA

L'énergie humaine

Néolithique



Il y a 12 000 ans

-150 000

1 KWh

Le feu, la roue, l'outil
1 kWh d'énergie active par jour, par personne

Domestication animale
2 kWh d'énergie active par jour/par personne

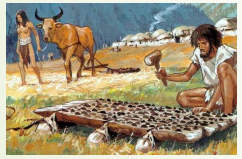
L'outil ne multiplie pas l'énergie humaine : il la rend plus efficace

Les pyramides ont été construites sans machines

CC BY SA

Ère moderne – Moyen Âge (-500 à + 1500)

Moudre, piler, pomper, irriguer, …, voyager



-12 000

2 KWh

-150 000

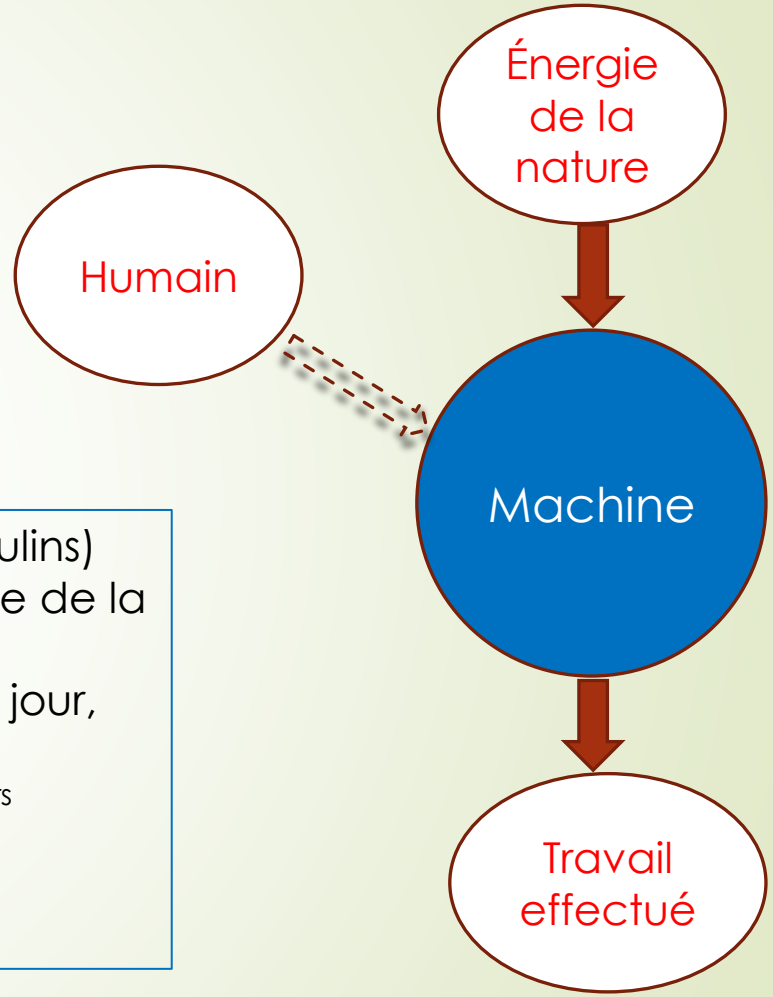
1 KWh

Les premières machines (moulins) utilisant des sources d'énergie de la nature

+4 kWh d'énergie active par jour, par personne

2 000 KWh (4 kW*500 heures) pour plusieurs centaines de personnes

Esclavage



CC BY SA

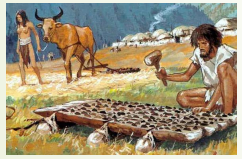
L'énergie humaine – le jackpot

Ère industrielle – depuis 1800

+ 1 000

Dizaine de kWh

-12 000



2 kWh

-150 000

1 kWh

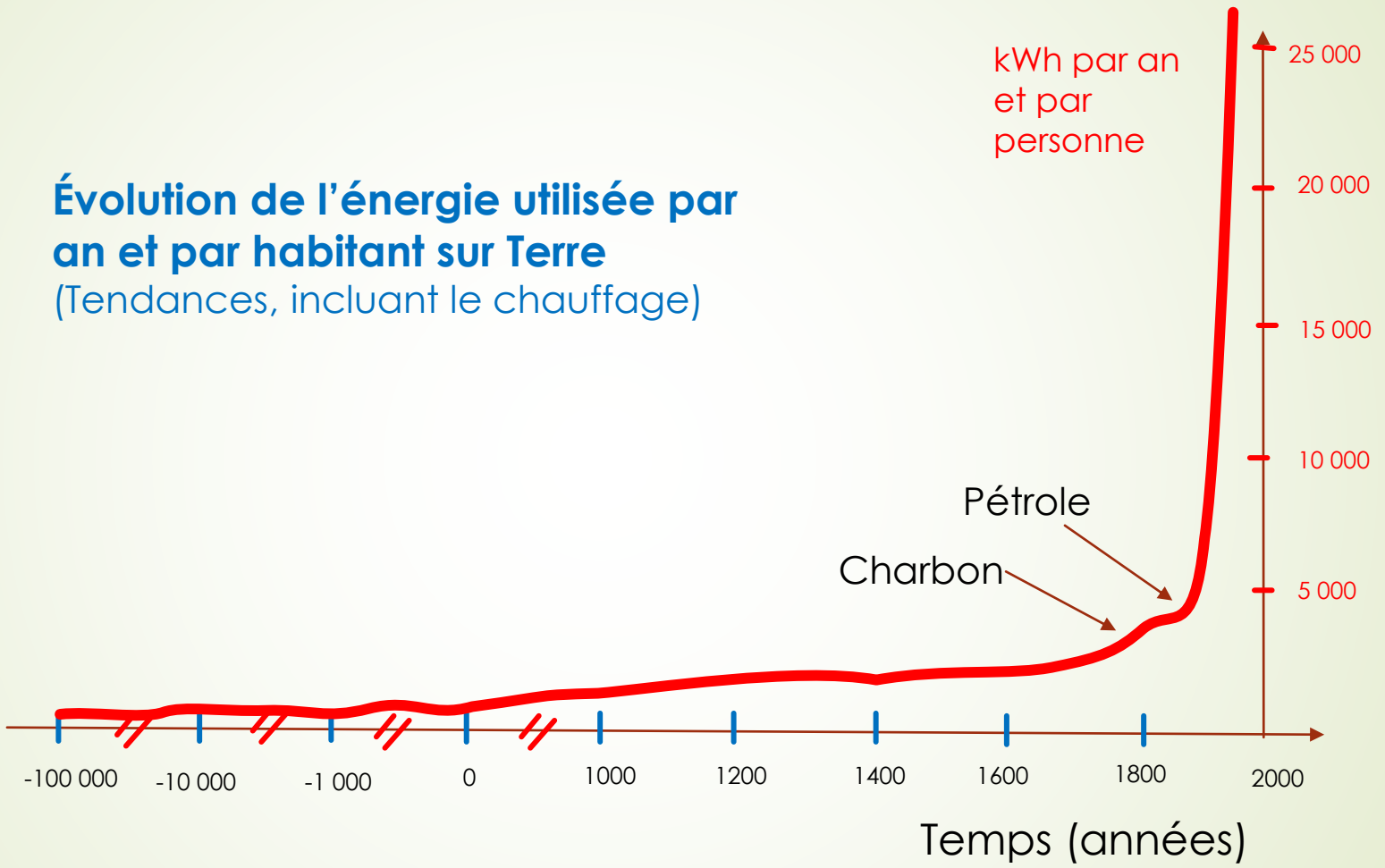
Utilisation de la puissance du feu, de l'électricité, de l'atome

Énergies fossiles (en stock)

CC BY SA

L'énergie humaine

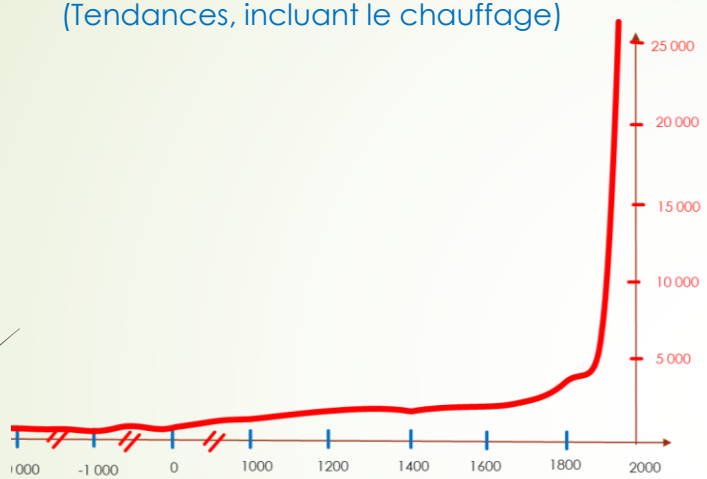
Évolution de l'énergie utilisée par an et par habitant sur Terre
(Tendances, incluant le chauffage)

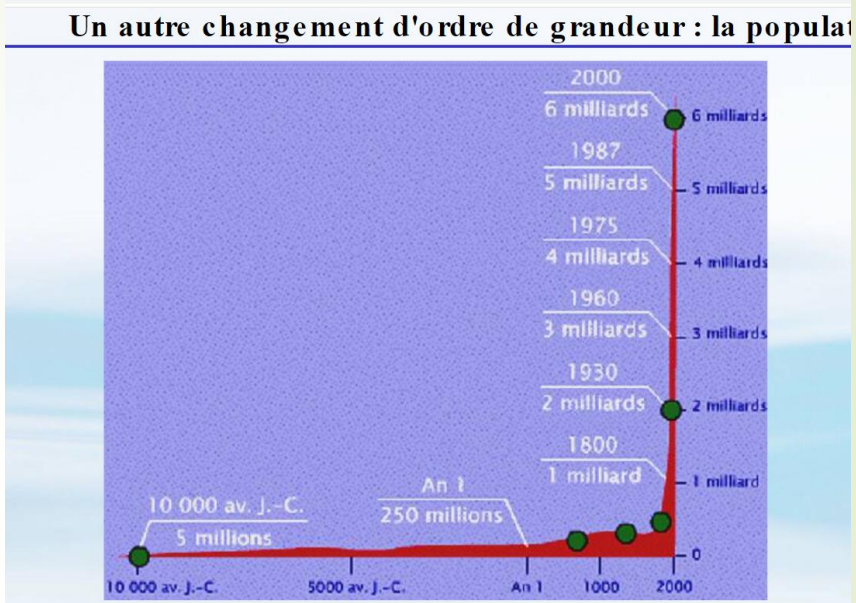


CC BY SA

L'impôt des humains sur la planète Terre

Évolution de l'énergie utilisée par an et par habitant sur Terre
(Tendances, incluant le chauffage)





Évolution démographique depuis le néolithique (découverte de l'agriculture). Source : Musée de l'Homme

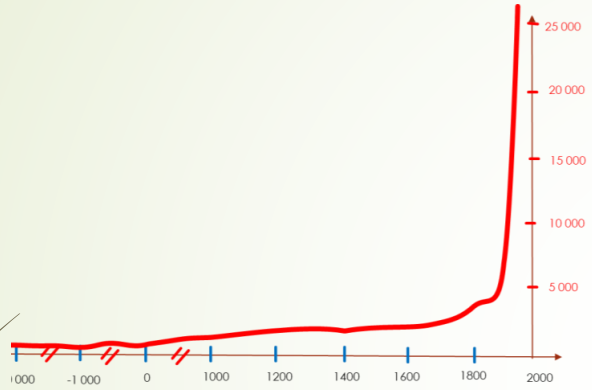
L'énergie demandée à la planète Terre par les Terriens
(Ordre de grandeur) :

Est passée de 100 000 000 kWh
À 200 000 000 000 000 kWh
Soit 2 millions fois plus

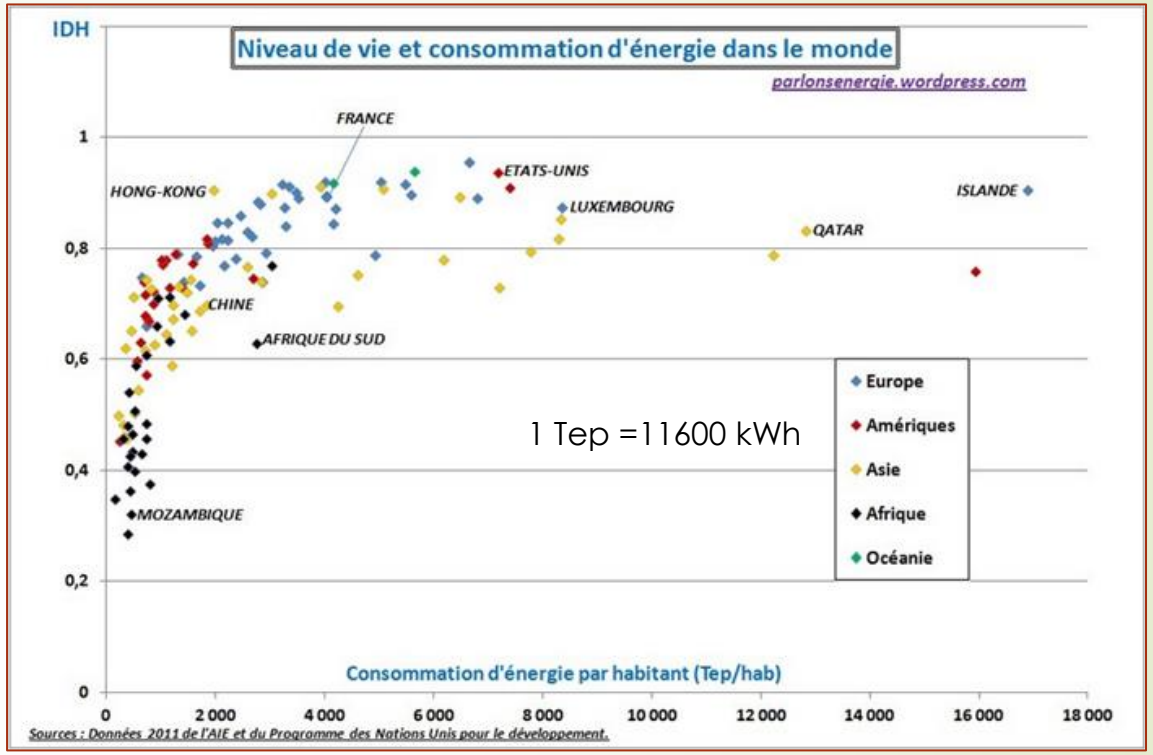
CC BY SA

L'impôt des humains sur la planète Terre

Évolution de l'énergie utilisée par an et par habitant sur Terre
(Tendances, incluant le chauffage)



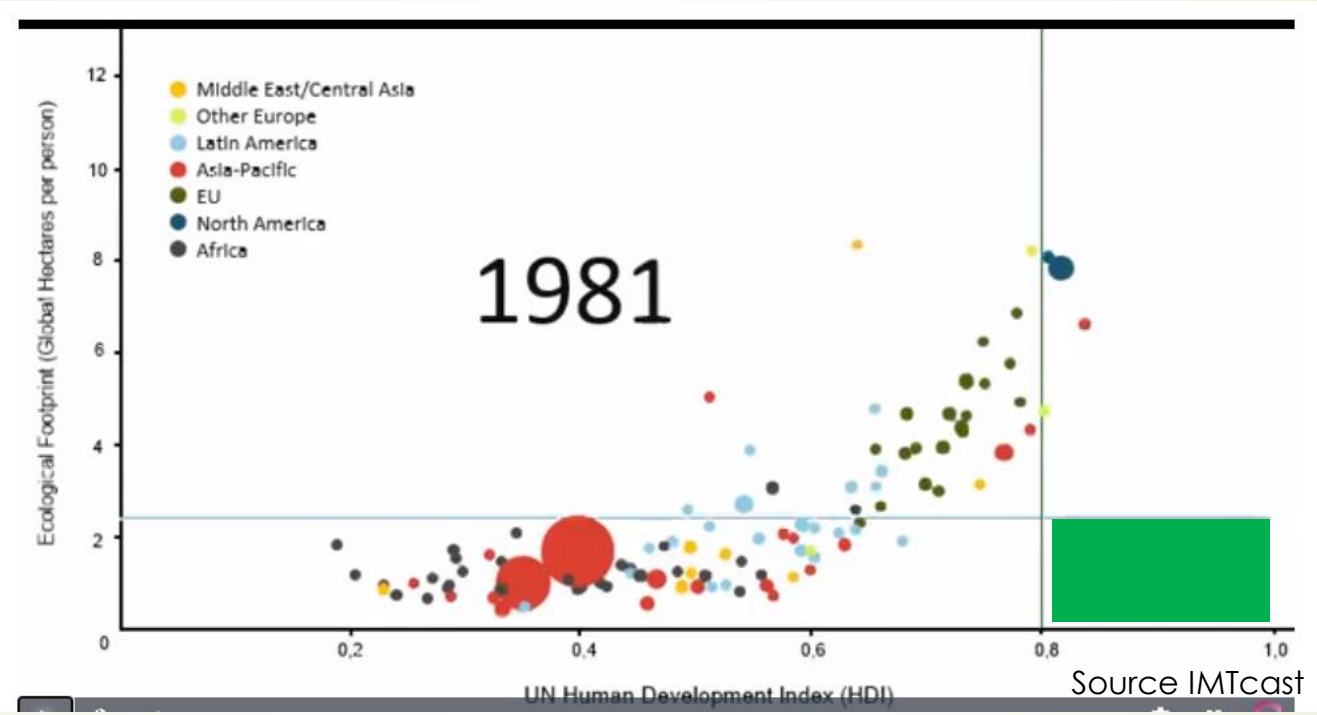
C'est une moyenne !



25 000 KWh/an/habitant
À multiplier par 3 ou 4 si tous les humains suivaient les standards actuels des pays riches

CC BY SA

L'impôt des humains sur la planète Terre



Source IMTcast

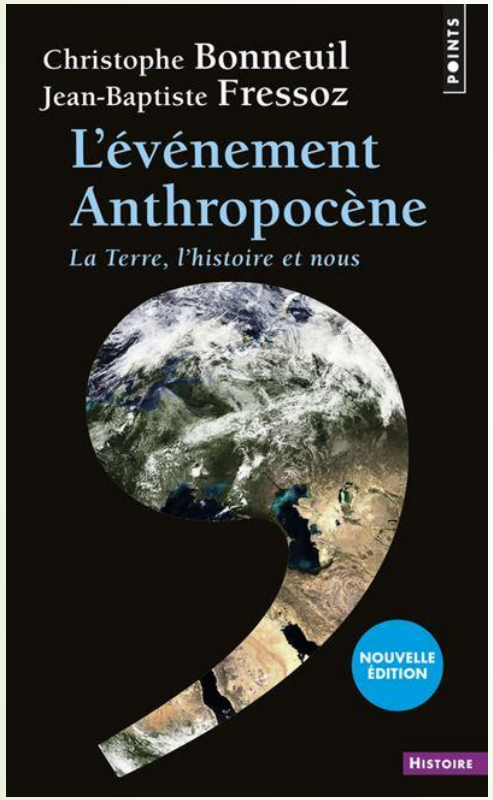
Le progrès va-t-il dans la bonne direction sur le long terme ?

CC BY SA

L'anthropocène

Les activités humaines modifient l'environnement terrestre de manière plus significative et plus rapide que les évolutions géologiques naturelles.

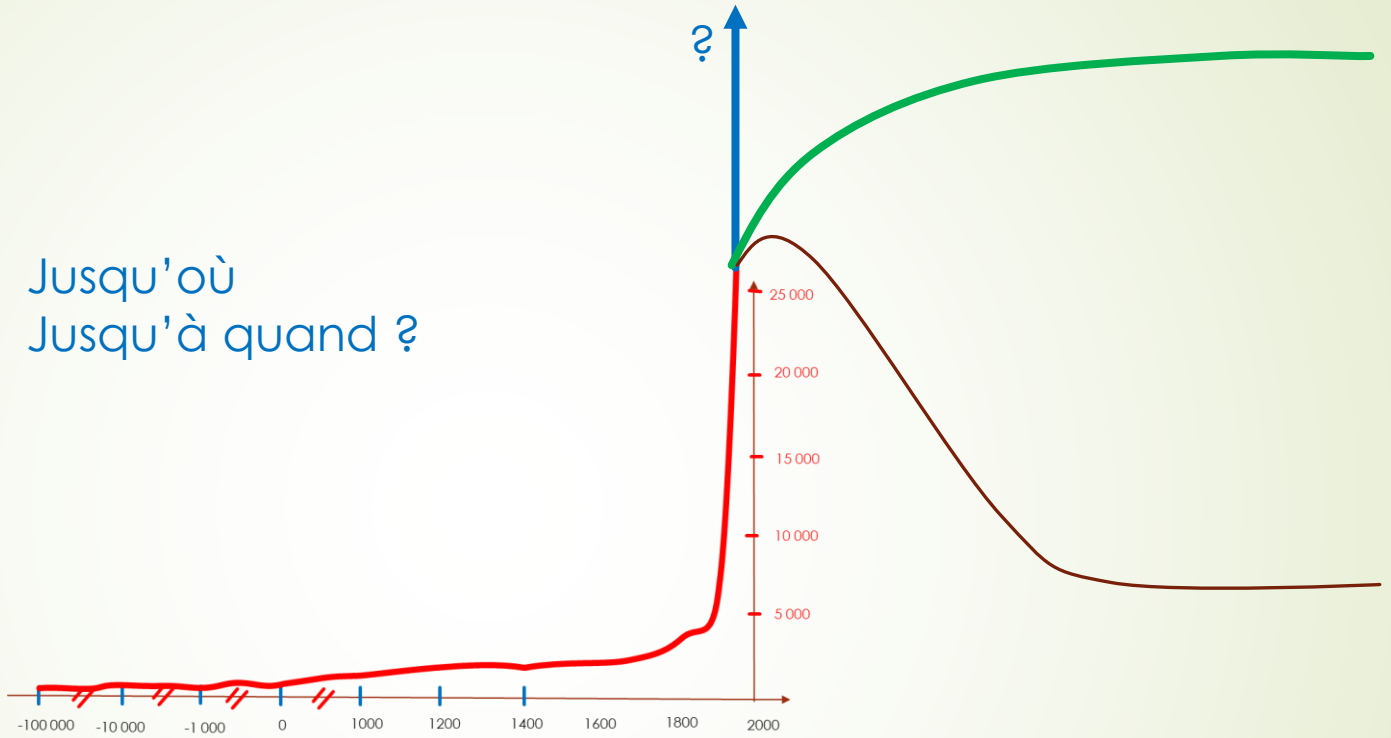
https://www.youtube.com/watch?v=-cJYXlfjADE



CC BY SA

L'énergie humaine

Jusqu'où
Jusqu'à quand ?



L'ingéniosité de l'Homo Sapiens + la découverte d'un stock d'énergie gratuite → un développement exponentiel dans une planète finie.

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète

CC BY SA

De quoi l'énergie est-il le nom ? (E. Klein)

Il a fallu attendre les années 1850 pour répondre à cette question

CC BY SA

Les différentes formes d'énergie

La nourriture,
une pile

La lumière

Ces « objets » ont une propriété en commun qu'ils peuvent échanger

Le Soleil

Le courant
électrique

Une casserole
d'eau bouillante

Une chute
d'eau

CC BY SA

Les différentes formes d'énergie

Énergie d'un système
=
Mesure de sa capacité à évoluer, à changer d'état

Radiative
Lumière
Infrar

Chimique
Pétrole, bois, poudre
Accus, piles,
Aliments

ucléaire
sion (étoiles, bombe H)
sion (centrales, bombe A)

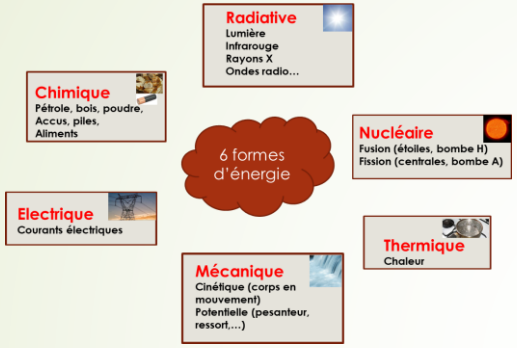
Electrique
Courants électriques

Thermique
Chaleur

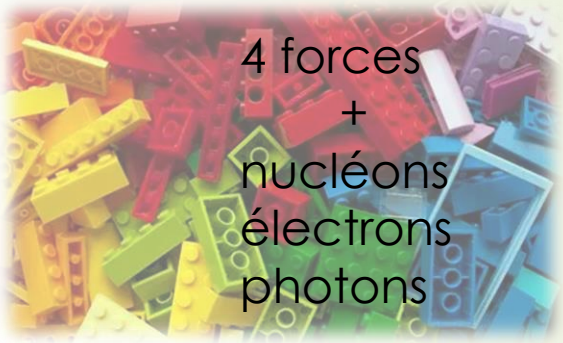
Méc ique
Cinétique (corps en mouvement)
Potentielle (pesanteur, ressort,…)

CC BY SA

Peut-on espérer découvrir des énergies inconnues à ce jour ?



Nous connaissons (mieux) les briques de l'Univers



Pas de nouvelles énergies à espérer à moyen terme

Mais des progrès technologiques (EPR, filière hydrogène)

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?

CC BY SA

De quoi l'énergie est-il le nom ? (E.Klein)

CC BY SA

Les énergies se transforment – la voiture électrique

Radiative
Lumière
Infrarouge
Rayons X
Ondes radio…

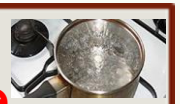
Photo-synthèse

Réactions dans le Soleil

Chimique
Pétrole, bois, poudre,
Accus, piles,
Aliments

Moteur

Thermique
Chaleur



Nucléaire
Fusion (étoiles, bombe H)
Fission (centrales, bombe A)

Accumulateurs

Combustion Centrale

Turbine

Electrique
Courants électriques

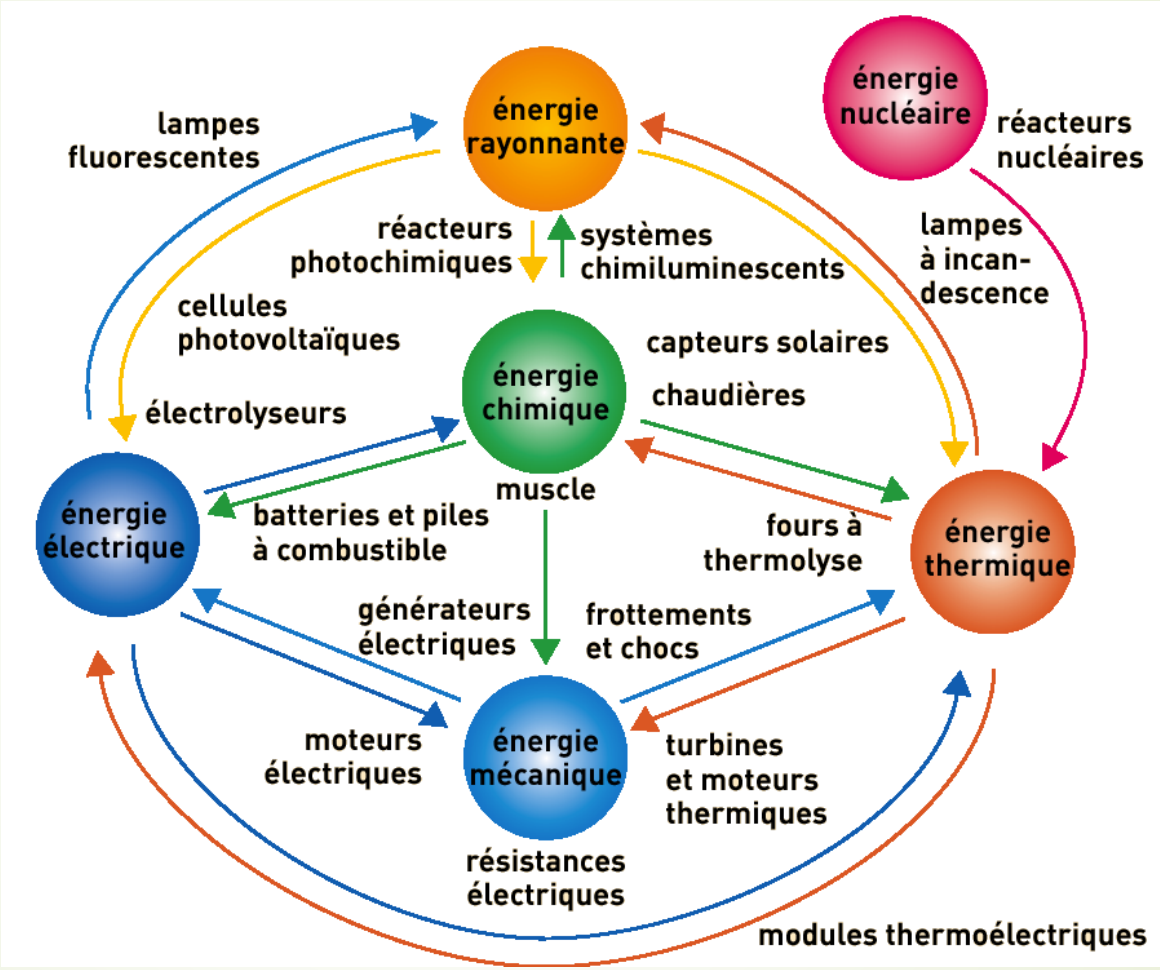
Mécanique
Cinétique (corps en mouvement)
Potentielle (pesanteur, ressort,…)

Centrale électrique

De la chaleur est toujours produite

CC BY SA

Les différents transformateurs d'énergie



Energieplanete.fr

CC BY SA

L'énergie est conservée

Une loi universelle (1850, 1905)

À toutes les échelles (de l'Atome à l'Univers)
l'énergie est toujours conservée

L'énergie n'est pas produite
Elle est transformée

De son origine jusqu'à sa fin, l'Univers conservera la même quantité d'énergie

CC BY SA

Les énergies – le bazar des unités

Énergie : propriété commune → un étalon commun ?

Quantité

Le Joule

Le Joule et le kilojoule kJ

- La calorie = 4,18 Joule
  élever de 1° la température d'un gramme d'eau
- La grande calorie = 4 180 Joules, 4,18 kJ
  utilisée en nutrition : élever de 1° la température d'un litre d'eau
- Le kWh : 3 600 kJ (1 kW pendant 1 heure)
- La tonne-équivalent-pétrole (tep)
  = 41 900 000 000 J, soit 11 627 kWh

Puissance

Le Watt = 1Joule par seconde

Le Watt et le kilowatt kW

- Le Cheval-Vapeur = 0,735 kW

CC BY SA

L'énergie est conservée – la fin d'un rêve

Marc Renaudin est un français dont le moteur de sa voiture fonctionne à l'eau de pluie

Courrier international

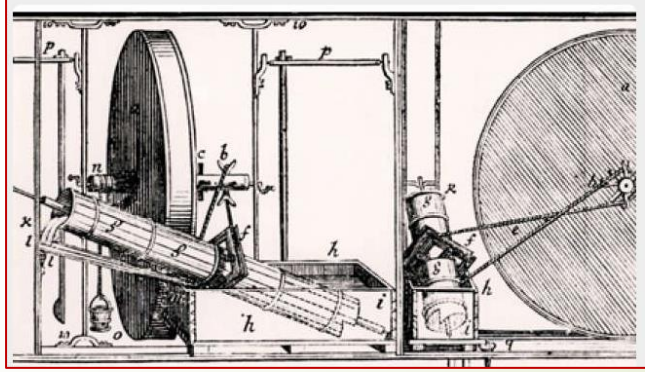
CULTURE • ALLEMAGNE • VOYAGE

ÉNERGIE. Le mouvement perpétuel : un rêve qui n'en finit pas

Le Graal de la mécanique a mobilisé scientifiques et charlatans. Notamment en Allemagne, où une machine aurait fonctionné au XVIIIe siècle… avant que la supercherie ne soit révélée.

SOURCE : Die Welt

Publié le 01 juillet 2011 à 16h17 Lecture 4 min.



Les plus lus

1 **Société.** Les Russes n'ont pas le moral, et c'est mauvais pour les ambitions du Kremlin

2 **Vu des États-Unis.** Comment Washington réagirait-il à une frappe nucléaire russe ?

3 **Appropriation culturelle.** Un maillot inspiré des zelliges suscite une guerre culturelle entre le Maroc et l'Algérie

4 **Pays-Bas.** En pleine crise de l'énergie, les Néerlandais se ruent

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.

CC BY SA

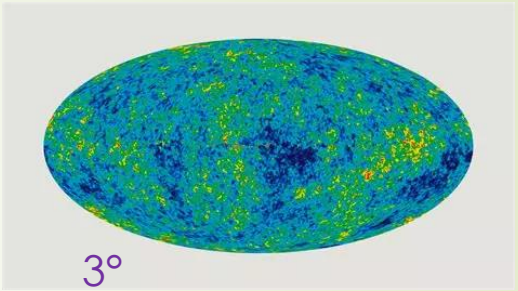
CC BY SA

La machine « Terre »

340 W/m²

340 W/m²

Univers



340 W/m²

100 W/m²	rayonnement réfléchi
220 W/m²	chaleur puis réémission
20 W/m²	énergie mécanique puis réémission
	énergie chimique en partie réémise, en partie stockée

La Terre est une machine exceptionnelle qui capte une part de l'énergie du Soleil et la rend utilisable par des systèmes évolués notamment biologiques
Nous pouvons la dérégler

CC BY SA

Les sources d'énergie sur Terre

Le Soleil est la source de 99% de l'énergie que nous utilisons

Energies en stock

- Houille
- Pétrole
- Gaz

Energies en flux

- Photovoltaïque
- Eolien
- Hydroélectricité
- Biomasse

Pas d'énergie renouvelable, mais des sources d'énergie (plus) pérennes

Big Bang

Energies en stock

- Energie nucléaire
  Fission de l'uranium

Energies en flux

- Géothermie*
  *en partie

Horizon 2100 …

- Energie nucléaire
  Fusion de l'hydrogène

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de l'énergie utilisée vient du stock (dite non renouvelable) créé surtout à l'ère secondaire ; le reste vient du flux qui prend sa source dans l'énergie du Soleil

CC BY SA

Le roi carbone

Charbon, pétrole et gaz → énergies chimiques à base de carbone

CC BY SA

Comparons les énergies de ces 4 systèmes :

Un petit déjeuner (*500 kcal*)

Un camion de 12 tonnes à 65 km/h

Un rocher d'une tonne à 200 m de hauteur

½ verre (6cl) d'essence

Leur énergie est identique

2 Mégajoules (1 MJ = 10^6 Joules)

Soit l'équivalent de 0,025 microgrammes d'uranium (ou toute autre matière)

CC BY SA

Concentration ←→ dispersion

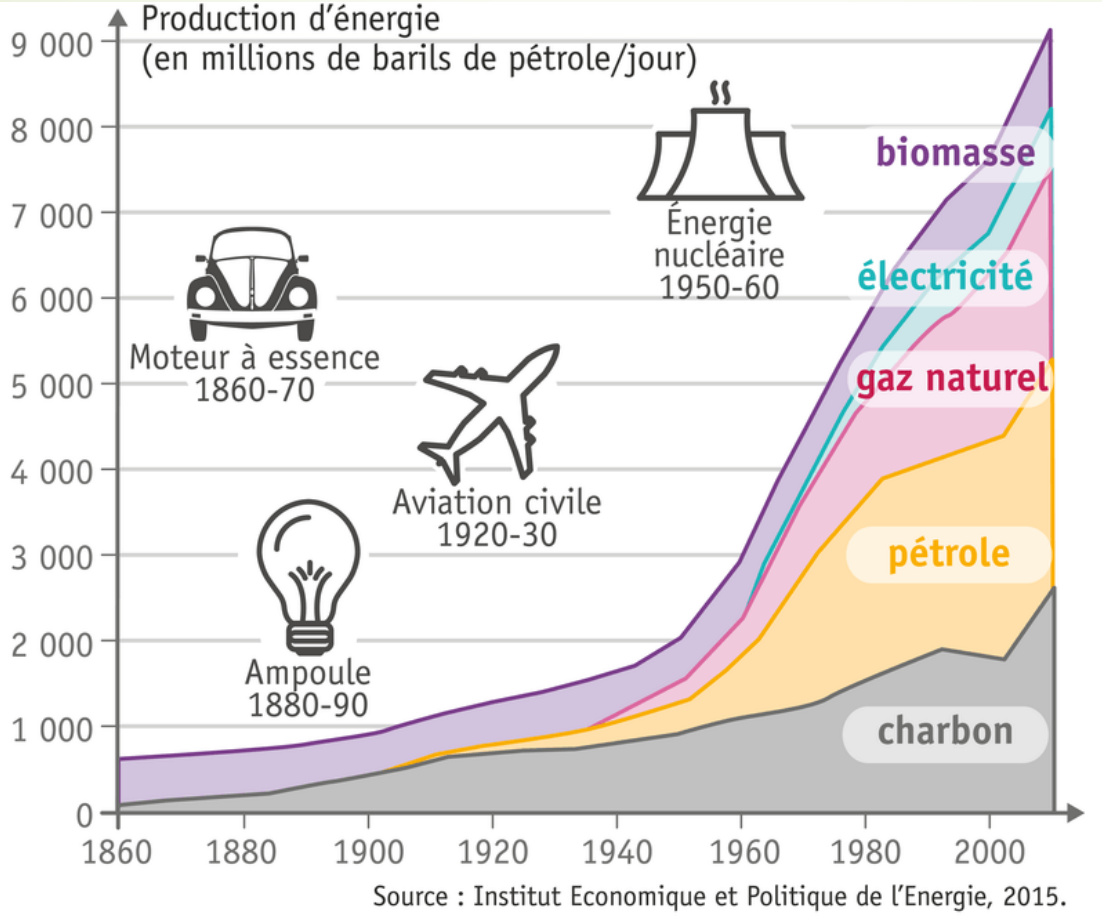
Source	Energie MJ/kg	Type d'énergie	Remarques
Batterie au Plomb	0,1	Chimique	Rechargeable
Pile alcaline	0,6	Chimique	Non rechargeable
Accu Lithium	1,8	Chimique	Rechargeable
Bois	16,2	Chimique	Energie de flux
Glucides	17,0	Chimique	Nutrition
Graisses	37,0	Chimique	Nutrition
Essence	47,2	Chimique	Energie de stock
Uranium-235	79 500 000	Fission	Energie de stock
Hydrogène (isotopes)	330 000 000	Fusion	Technologie non mature

Source Wikipedia - Densité massique d'énergie

CC BY SA

13 865 Mtep

L'origine de la période industrielle



NB une incertitude de ± 50% sur de telles données est admissible

Bep = Baril equivalent pétrole
Production = 2 à 3 fois la consommation

Environ

13 800 MTeP

160 10 ^{12} kWh

par an(2018)

(https://www.connaissancedesenergies.org)

7, 5 milliards habitants (2017)

20 000 kWh par an et par habitant

Plus de 80% sur les stocks

CC BY SA

Remplacer le pétrole ?

Remplacer énergie de stock (concentrée) → énergie de flux (dispersée)

« production d'énergie » consommatrice d'espace

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

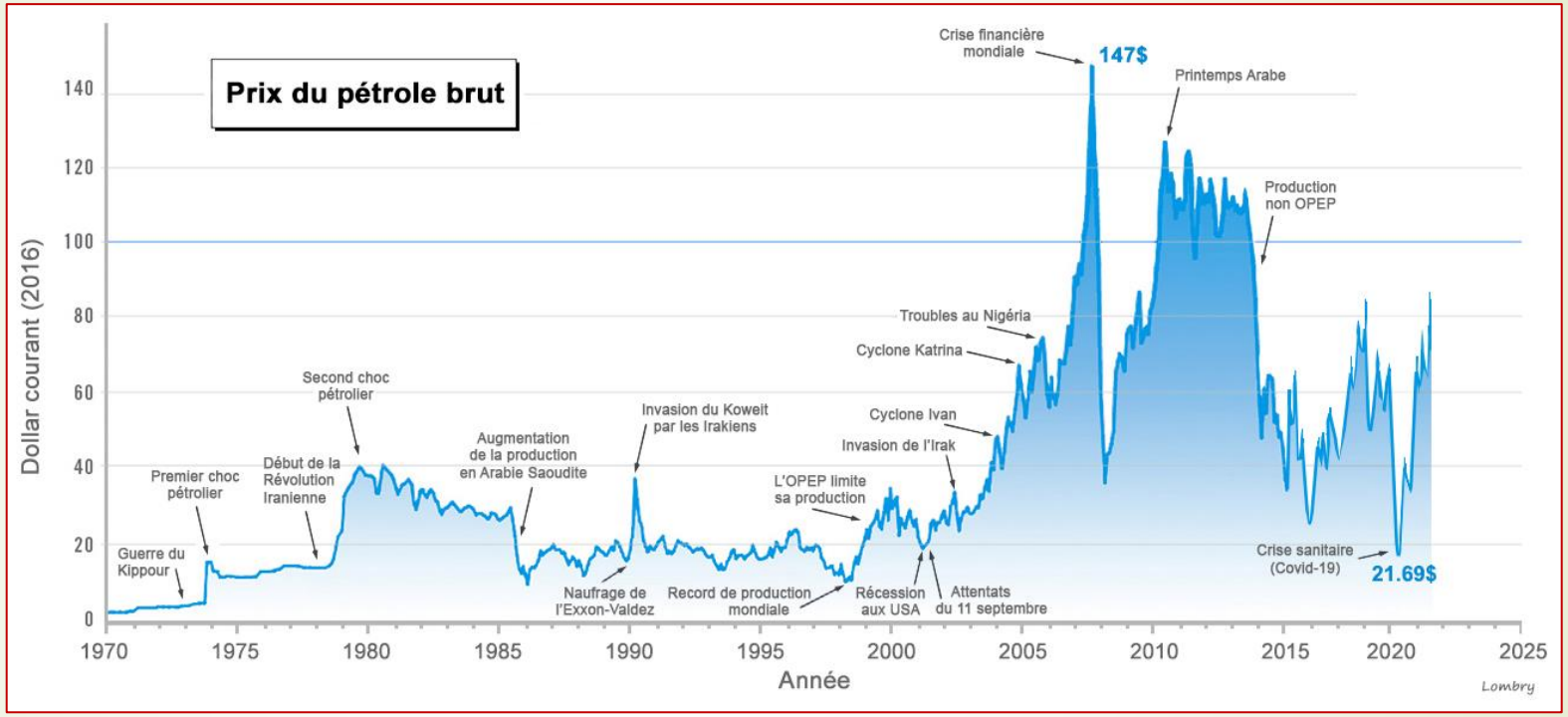
- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de l'énergie utilisée vient du stock (dite non renouvelable) créé à l'ère secondaire ; le reste vient du flux qui prend sa source dans l'énergie du Soleil
- L'énergie chimique à base de carbone(pétrole, charbon, accus) est à la base de notre civilisation industrielle

CC BY SA

Et maintenant ?

CC BY SA

N°1 Baisse des énergies en stock



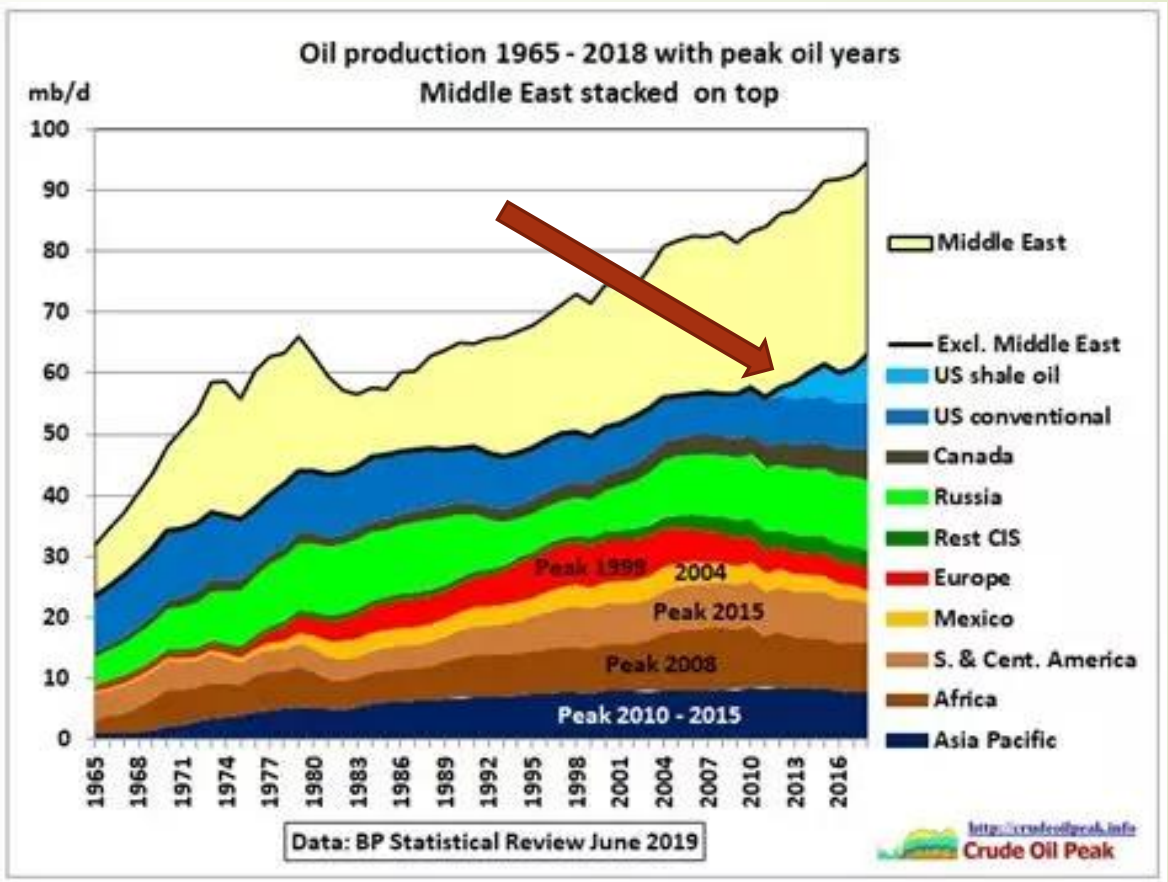
Pétrole très abondant

Production stagnante ou en déclin

CC BY SA

N°1 Baisse des énergies en stock

Le pic de production du pétrole classique est passé depuis 2010
La consommation n'a fait que croître



CC BY SA

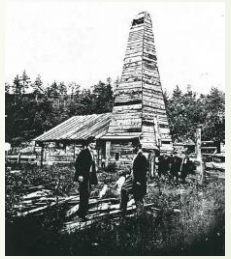
Εὑρηκα
ERoEI

Pour « produire » de l'énergie, il faut… de l'énergie

Taux de retour énergétique (ERoEI)
ERoEI=(énergie collectée)/(énergie investie)

$$ERoEI = \frac{energie\ collectée}{énergie\ investie}$$

US(XIXème siècle), Arabie Saoudite	100
US, Canada (1970)	50, 30
Mer du Nord (1980)	25
Gaz de schiste (2020)	4
Charbon (US, Chine)	60-30
Ensemble énergies fossiles (2013)	**15**

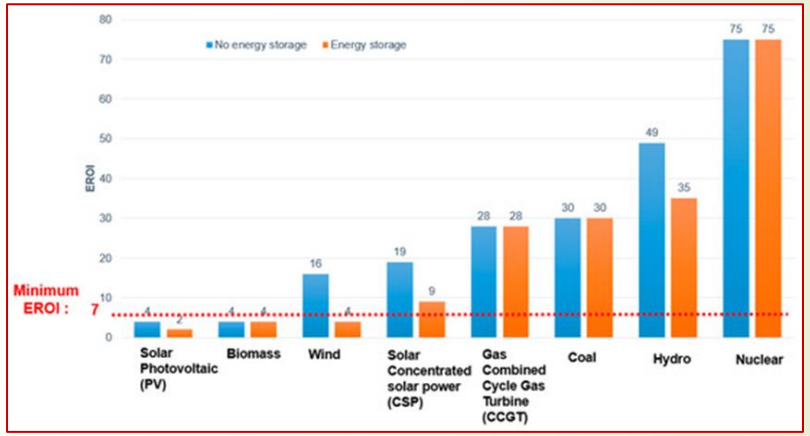


CC BY SA

N°1 baisse des énergies de stock

Les énergies en flux demandent des investissements importants
Construire un barrage, une éolienne nécessite beaucoup d'énergie (génie civil, béton, turbines,…)

Énergies en flux	EoREI
Hydroélectricité	50
Éolien, solaire sans stockage	10
Éolien, solaire avec stockage	4
Bio carburant	1,5



Pour produire des énergies en flux (renouvelables), il faut des énergies en stock !!!

CC BY SA

Un développement tel que celui passé des « 30 glorieuses » → EoREI =15

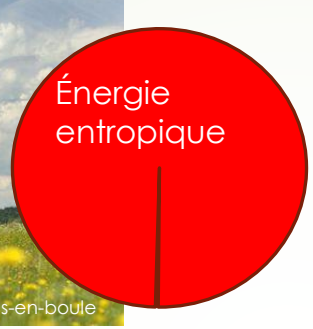
Quel développement, quelle civilisation si désormais :
EoREI global décroît vers 4-5

CC BY SA

Pas encore parlé de CO2, bilan carbone, climat,…

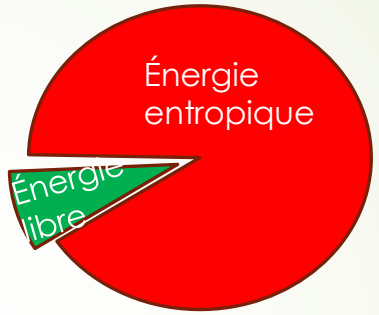
CC BY SA

Énergie éolienne



Air calme
- Énergie totale 50 Wh/m^3
- Énergie libre 0 (aucune énergie libre)

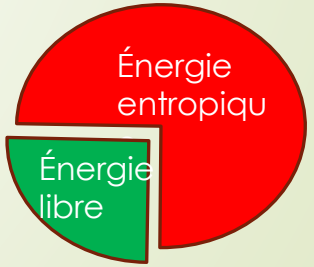
entropie maximum



Vent
- Molécules d'air en agitation thermique (520 m/s) + déplacement collectif 10 m/s
- Énergie totale 52,5 Wh/m^3
- Energie libre 2,5 Wh/m^3 (énergie éolienne)

→ entropie plus basse

Entropie : détermine la part de l'énergie dégradée (non utilisable directement sous forme mécanique, chimique ou électrique)
Énergie libre : part de l'énergie utilisable



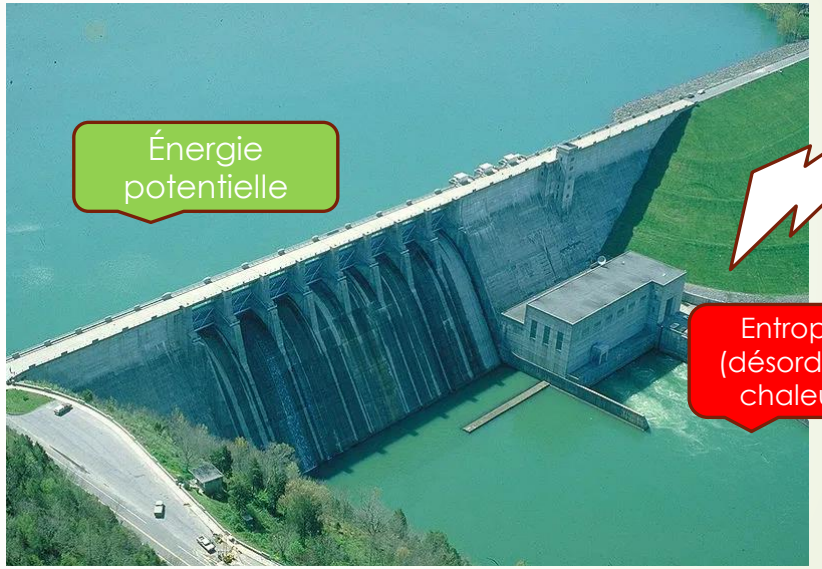
CC BY SA

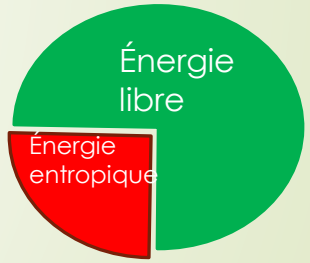
Énergie hydraulique

Énergie mécanique → Chaleur + énergie électrique

Un processus qui crée peu d'entropie (beaucoup d'énergie libre)
Quasi réversible
(remonter l'eau dans le barrage pour stocker de l'énergie)

https://business-ethics.com/



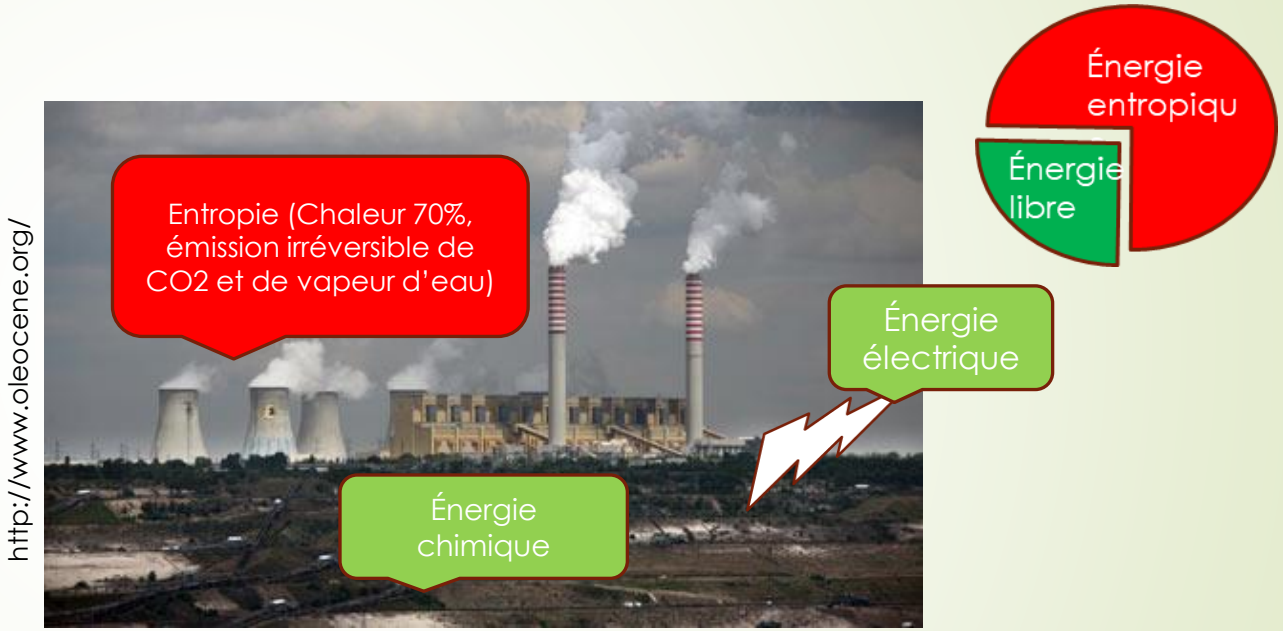


CC BY SA

Un autre exemple : une centrale au charbon

Énergie chimique → Chaleur + Déchets + énergie électrique

Un processus qui crée beaucoup d'entropie (rendement d'énergie libre faible)
Irréversible (comment recapturer le CO2 et la vapeur d'eau émise)



http://www.oleocene.org/

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

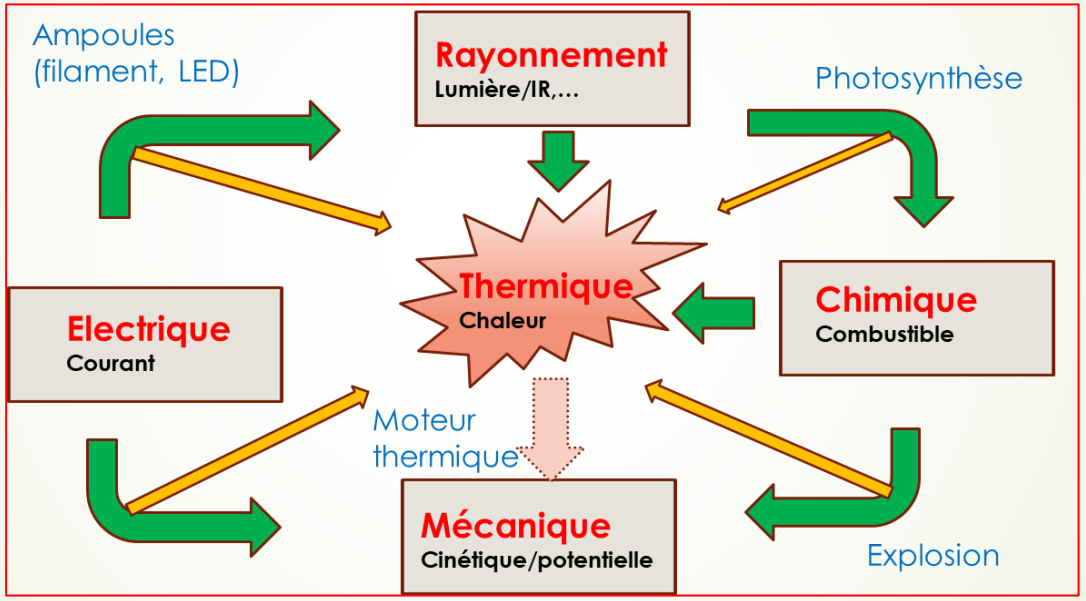
- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de l'énergie utilisée vient du stock (dite non renouvelable) créé à l'ère secondaire ; le reste vient du flux qui prend sa source dans l'énergie du Soleil
- L'énergie chimique (pétrole, charbon, accus) est de loin la forme la plus concentrée ; l'électricité est la forme d'énergie la plus facile à distribuer.
- L'entropie mesure la part de l'énergie « difficile » à transformer en énergie « noble » (mécanique, électrique)

CC BY SA

Le Second principe de la thermodynamique

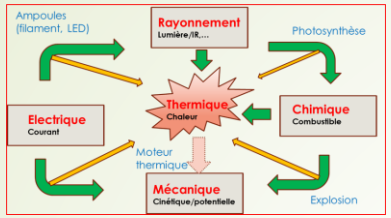
Corollaires

- Toute transformation* d'énergie se fait avec augmentation de l'entropie**
- La chaleur est la forme la plus dégradée (plus désorganisée) des types d'énergie



CC BY SA

Les signatures de l'entropie dans les « productions » d'énergie



Toute transformation crée de l'entropie :

- Pertes (chaleur)
- Déchets (usure, gaz d'échappement, …)

Signatures de l'entropie

- Bas rendement
- Déchets
- Irréversibilité (moteur électrique ←→dynamo ; moteur thermique → ??

CC BY SA

Les signatures de l'entropie dans les « productions » d'énergie

Le moteur thermique : la « pire » invention de l'Homo Sapiens

- Utiliser de la « chaleur » pour générer des énergies « nobles » (électriques, chimiques, etc.)
- Brûler du carbone → énergie en stock
- Brûler du carbone → effet de serre

Carbone
Tas de charbon, localisé, non dispersé

Carbone dans l'atmosphère (CO_2)
Dispersé dans des milliards de m3

Taux d'émission de CO2 ≈ Taux de création d'entropie ≈ Taux d'irréversibilité

CC BY SA

Effet de serre

Verre :

- « transparent » au rayonnement solaire (UV, visible) – 5 000°
- « opaque » au rayonnement infra-rouge – 300 °

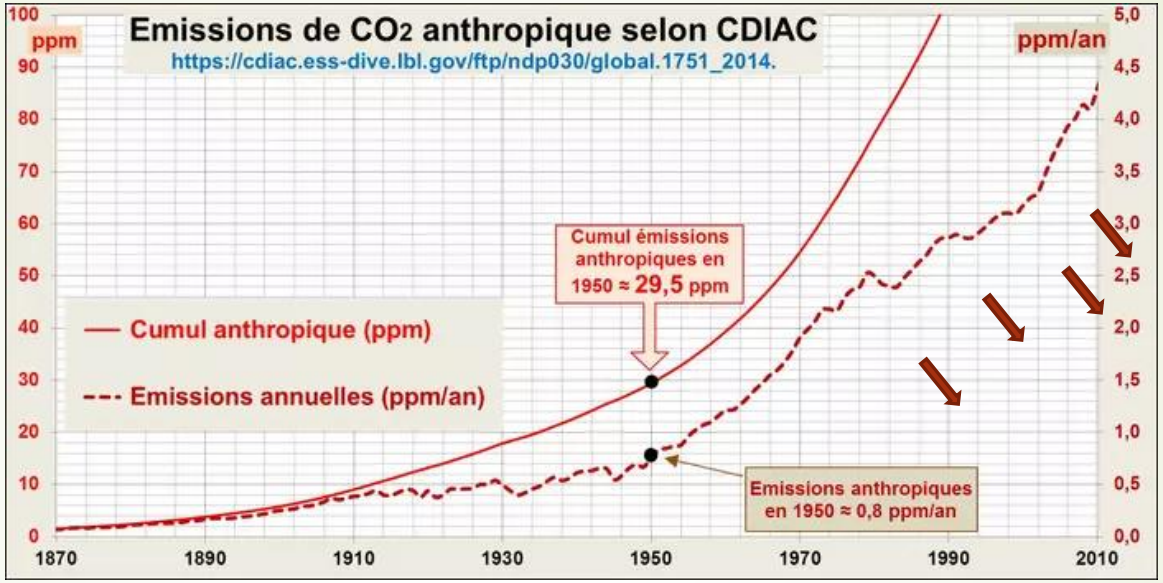
Atmosphère terrestre :

- Oxygène (O_2), Azote (N_2), … transparents aux Infrarouges
- CO2, CH4, NH3, etc… absorbent les Infrarouges

L'humanité a le pouvoir de réguler le thermostat de la planète

CC BY SA

Taux de CO_2



Des centaines d'années pour se débarrasser du CO_2 émis dans l'atmosphère

CC BY SA

Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de l'énergie utilisée vient du stock (dite non renouvelable) créé à l'ère secondaire ; le reste vient du flux qui prend sa source dans l'énergie du Soleil
- L'énergie chimique (pétrole, charbon, accus) est de loin la forme la plus concentrée ; l'électricité est la forme d'énergie la plus facile à distribuer.
- L'entropie mesure la part de l'énergie « difficile » à transformer en énergie « noble » (mécanique, électrique)
- L'émission de CO2, indicateur et cause de déséquilibre pour la planète

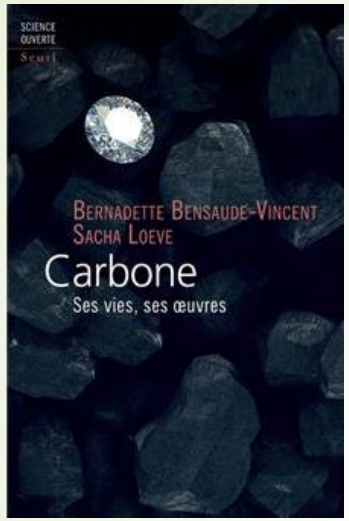
CC BY SA

Urgence de l'urgence :

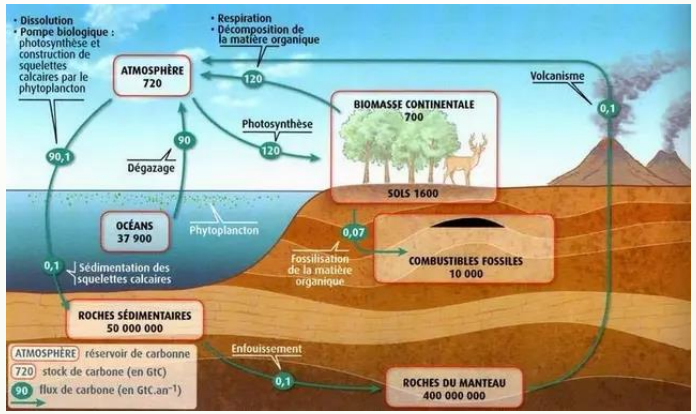
- diminuer drastiquement (stopper) les émissions de CO_2 :
- arrêter de déterrer le carbone et de l'envoyer dans l'atmosphère

CC BY SA

Et pourtant : le carbone c'est la vie



Carbone : élément de la vie et composant de la plupart de nos objets.

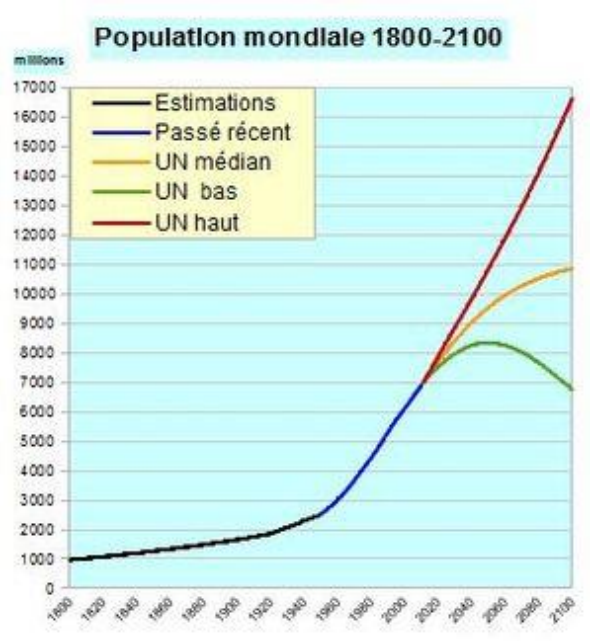


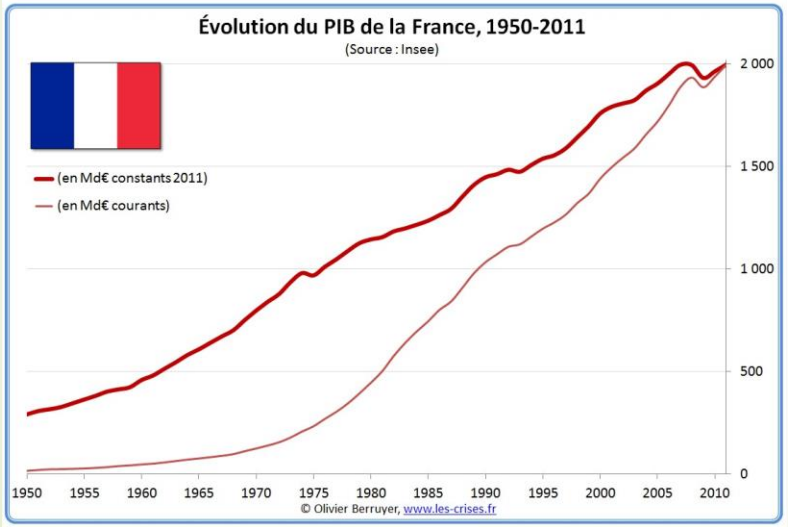
Diminuer (supprimer) l'usage des énergies fossiles par combustion

CC BY SA

Quels paramètres de l'empreinte carbone ?

Paramètre Pop comme « population »





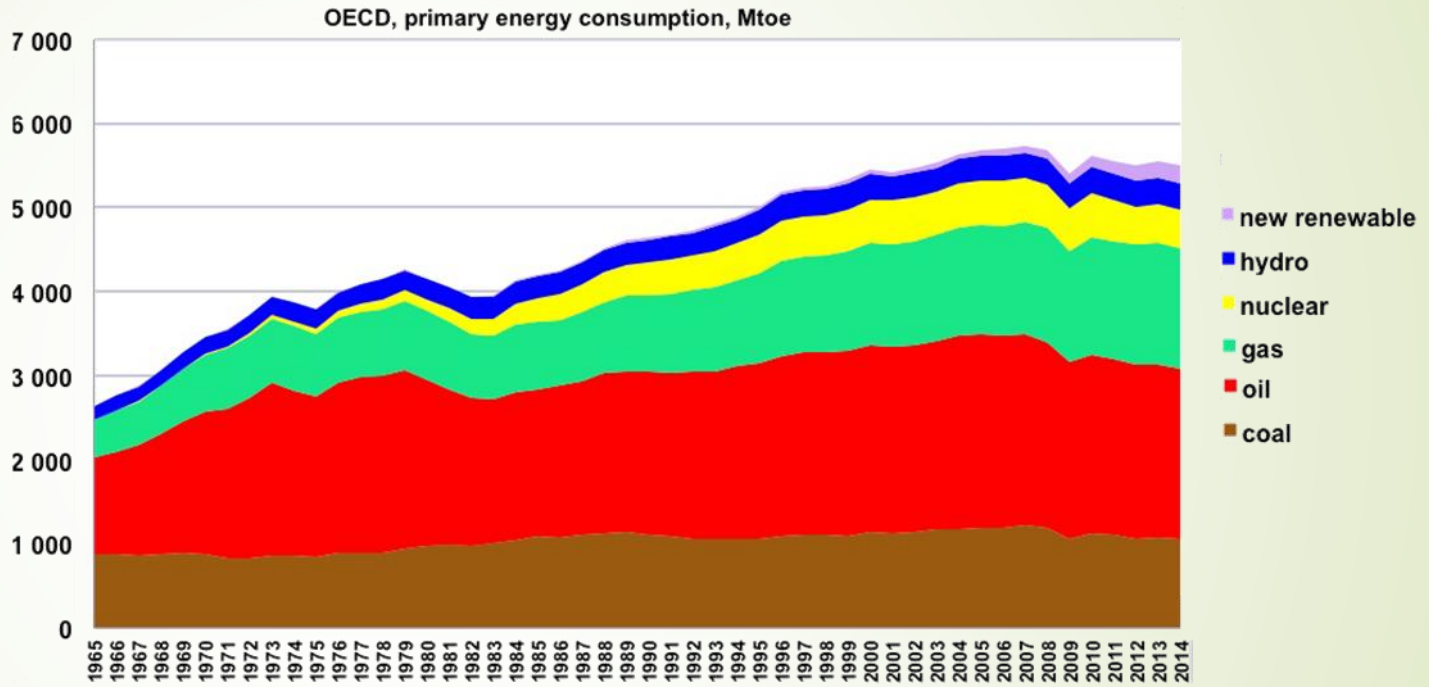
Paramètre PIB comme « richesses produites »

CC BY SA

Quels paramètres de l'empreinte carbone ?

Paramètre E comme « énergie utilisée »

Paramètre CO_2 comme « part d'énergies carbonées »



CC BY SA

L'équation de Kaya

Facteurs influant le taux d'émission de CO_2

L'efficacité énergétique de l'économie

Équation de Kaya

Population

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} * \frac{E}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

Quantité totale de CO_2

Pourcentage d'énergies fossiles

Quantité par unité d'énergie utilisée

Ex
Charbon = 350g/kWh
Hydraulique = qq g/kWh

Quantité d'énergie fonction du PIB

Efficacité énergétique des activités

PIB par tête

Richesses produites par tête

Population

Le niveau de vie

CC BY SA

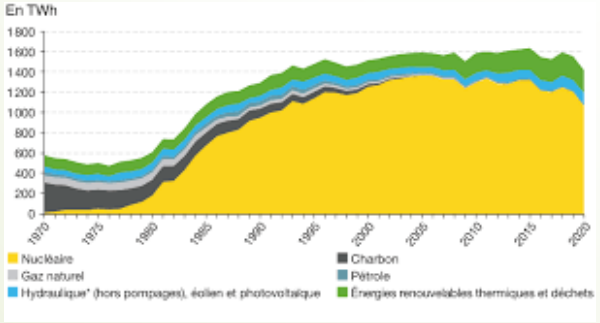
De Kaya à … Yaka

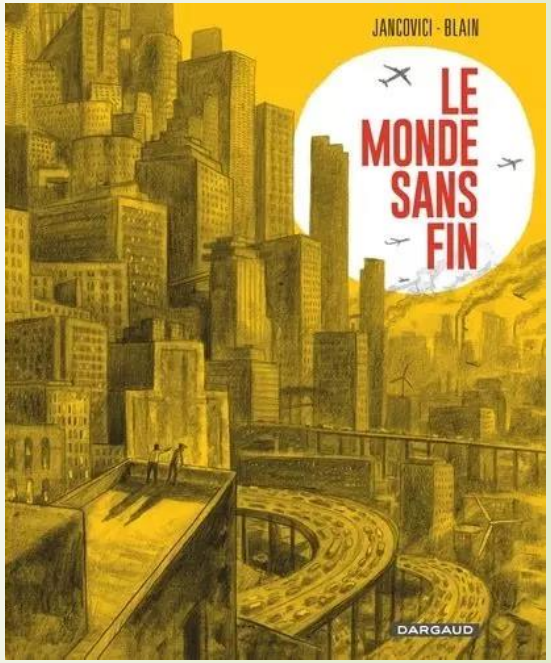
Objectif de la France
→ diminuer le taux de CO2 d'un facteur 3 avant 2050

$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} * \frac{E}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

$$33\% = 40\% * X * 180\% * 140\%$$

60% d'énergies en flux (bas carbone)
Population mondiale estimée 10 000 000 000 (2050)
Plan retraite français : +2%/an → total 180% en 30 ans





CC BY SA

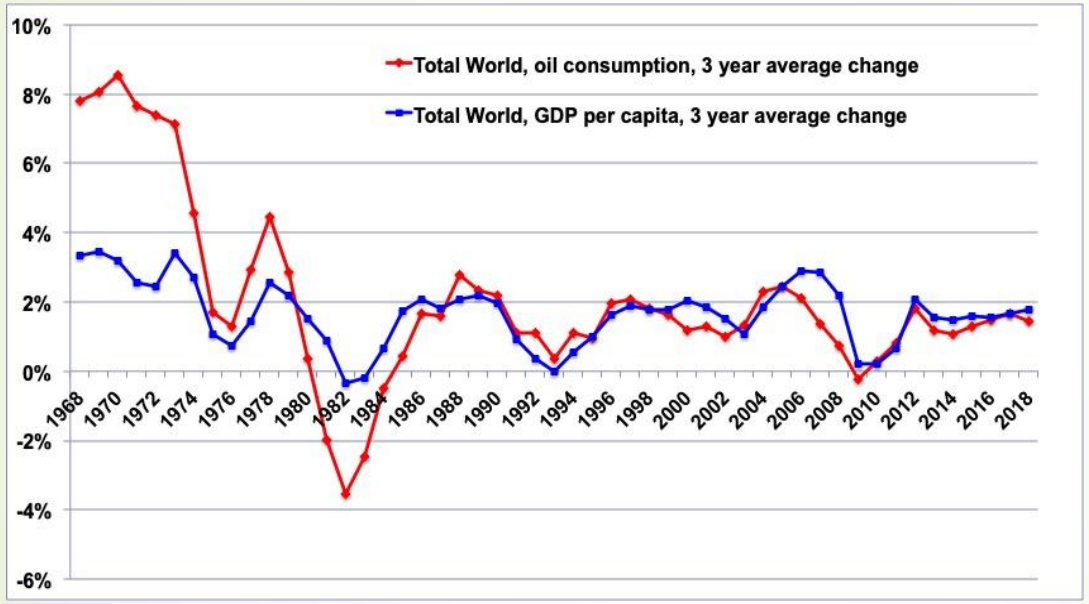
Crise de l'énergie – en résumé

- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
  La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de l'énergie utilisée vient du stock (dite non renouvelable) créé à l'ère secondaire ; le reste vient du flux qui prend sa source dans l'énergie du Soleil
- L'énergie chimique (pétrole, charbon, accus) est de loin la forme la plus concentrée ; l'électricité est la forme d'énergie la plus facile à distribuer.
- L'entropie mesure la part de l'énergie « difficile » à transformer en énergie « noble » (mécanique, électrique)
- L'émission de CO_2, indicateur et cause de déséquilibre pour la planète
- L'objectif est de réduire **drastiquement** l'usage des énergies fossiles (empreinte carbone)

CC BY SA

L'espèce humaine est-elle capable de s'auto-contrôler

Pour la première fois depuis 2 siècles, apprendre à découpler consommation et développement humain.



CC BY SA

Merci

La chaîne YouTube

Le blog

bernard.remaud@univ-nantes.fr

https://www.un-peu-de-physique.fr

https://www.youtube.com/channel/UCdPBh5KXlol50MEV8p1DrlA/playlists

CC BY SA