

Crise de l'énergie (2022)

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

1

B.Remaud – U Permanente

Pornic, le 24 janvier 2023

LE FIGARO
« Sans la liberté de blâmer, il n'est point d'éloge flateur. » 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 3^{ème} (?) choc pétrolier avec la guerre en Ukraine ?
Ou quelque chose de plus fondamental ?



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



La quête de 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

Homo sapiens

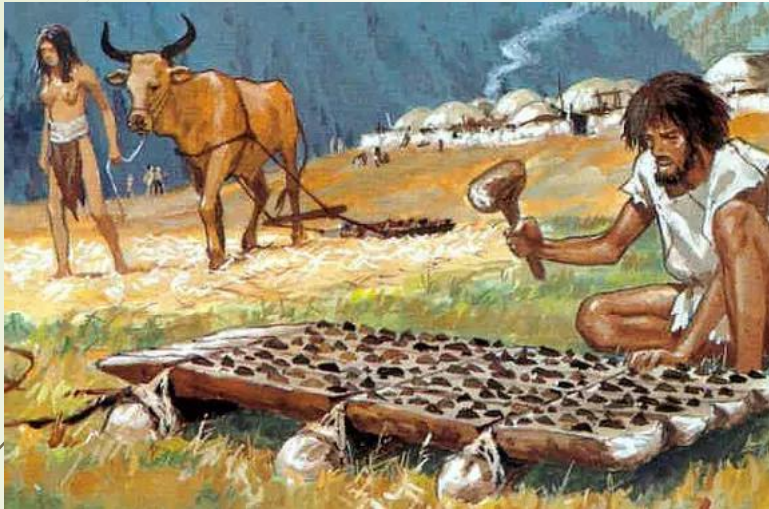


Il y a 150 000 ans

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)

Néolithique



Il y a 12 000 ans

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



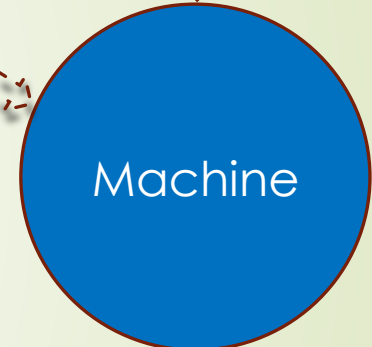
-150 000

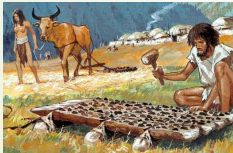
1 kWh/Jour

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



Moudre, piler, pomper, irriguer, ..., voyager



-12 000  2 KWh/Jour

-150 000  1 KWh/Jour

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

Ère industrielle – depuis 1800

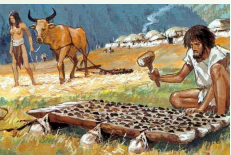


Utilisation de la puissance du feu, de l'électricité, de l'atome

Machine + Énergies fossiles (en stock)



Dizaine de kWh/Jour



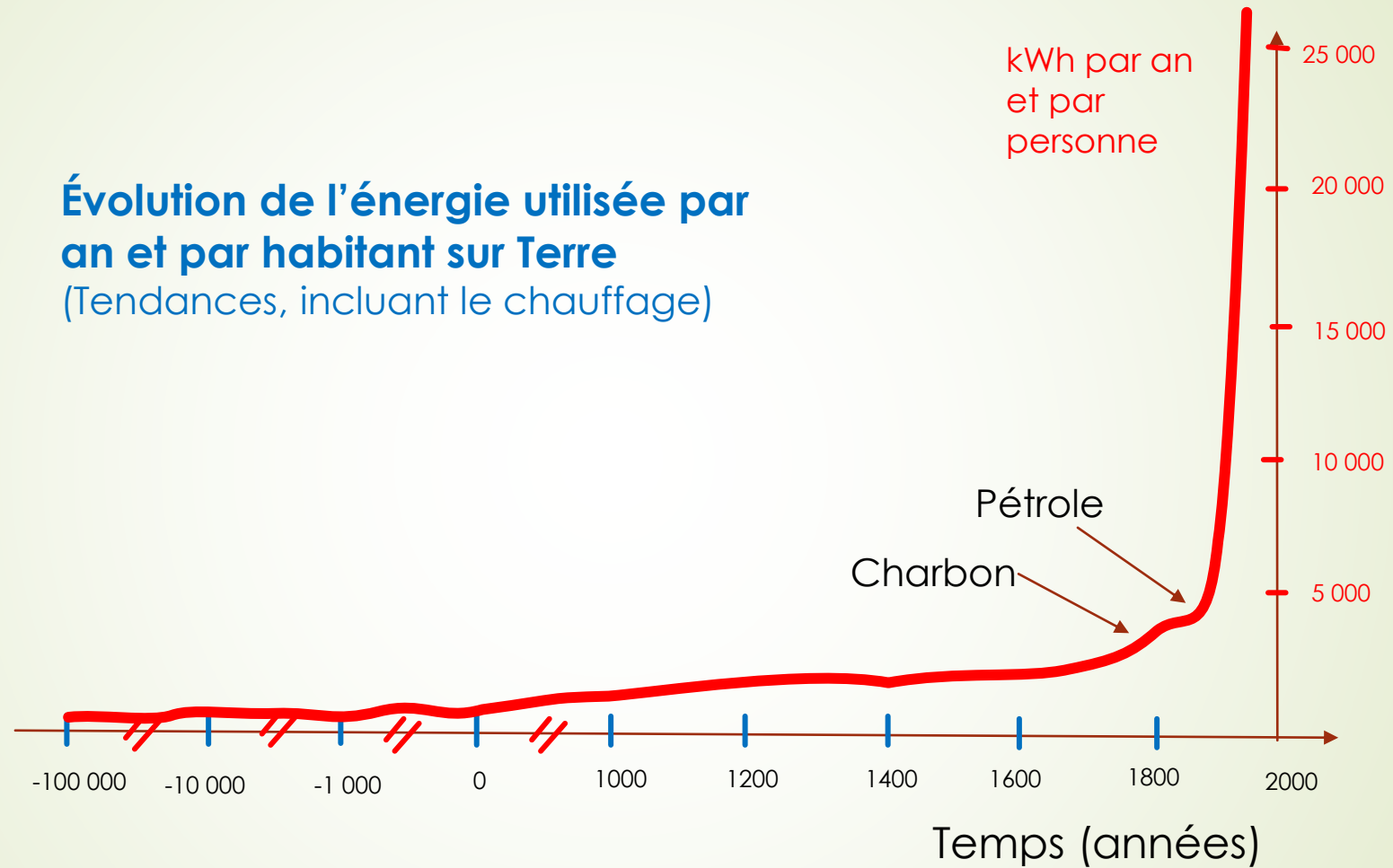
2 kWh/Jour



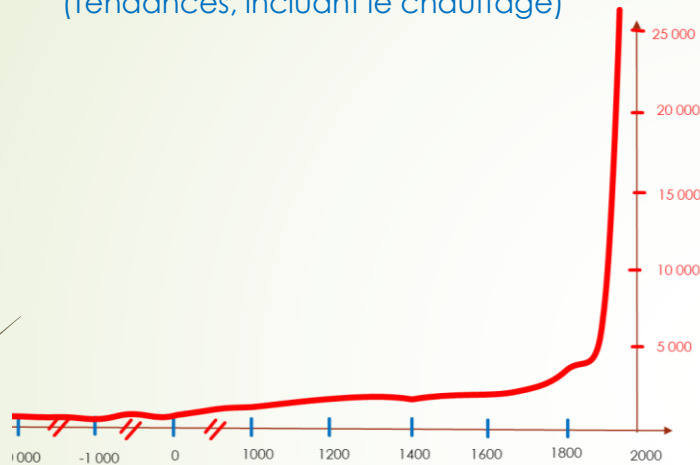
1 kWh/Jour



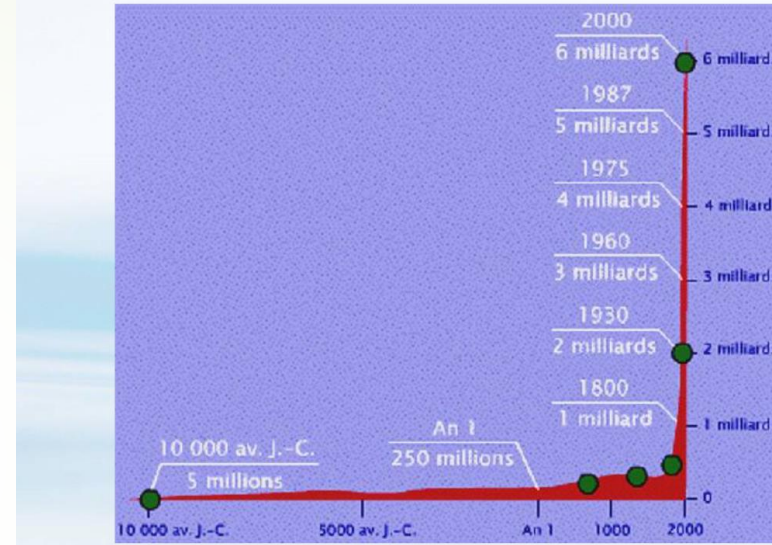
Évolution de l'énergie utilisée par an et par habitant sur Terre (Tendances, incluant le chauffage)



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



Un autre changement d'ordre de grandeur : la population



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, par an) :

Est passée de

100 000 000 kWh

À

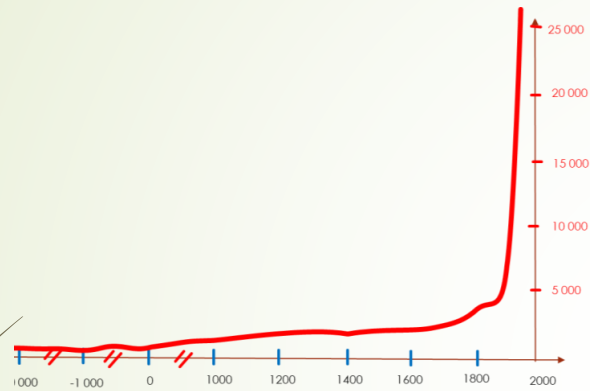
200 000 000 000 000 kWh

Soit

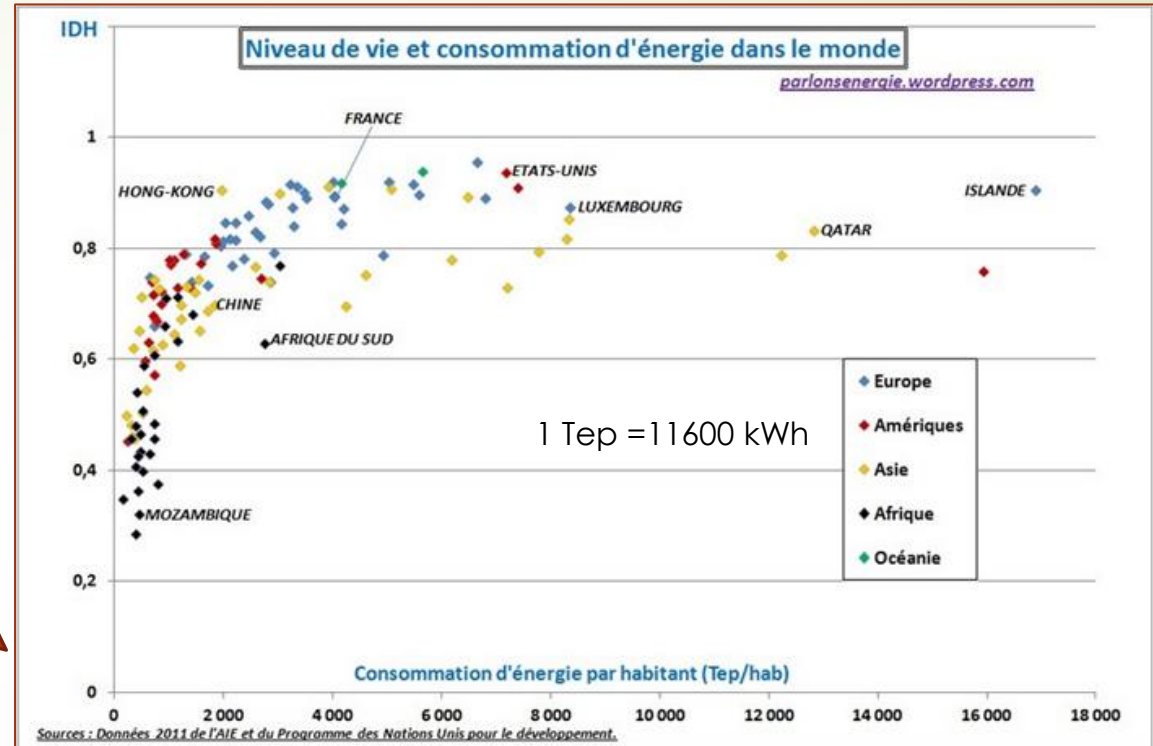
2 millions fois plus

Évolution de l'énergie utilisée par an et par habitant sur Terre

(Tendances, incluant le chauffage)

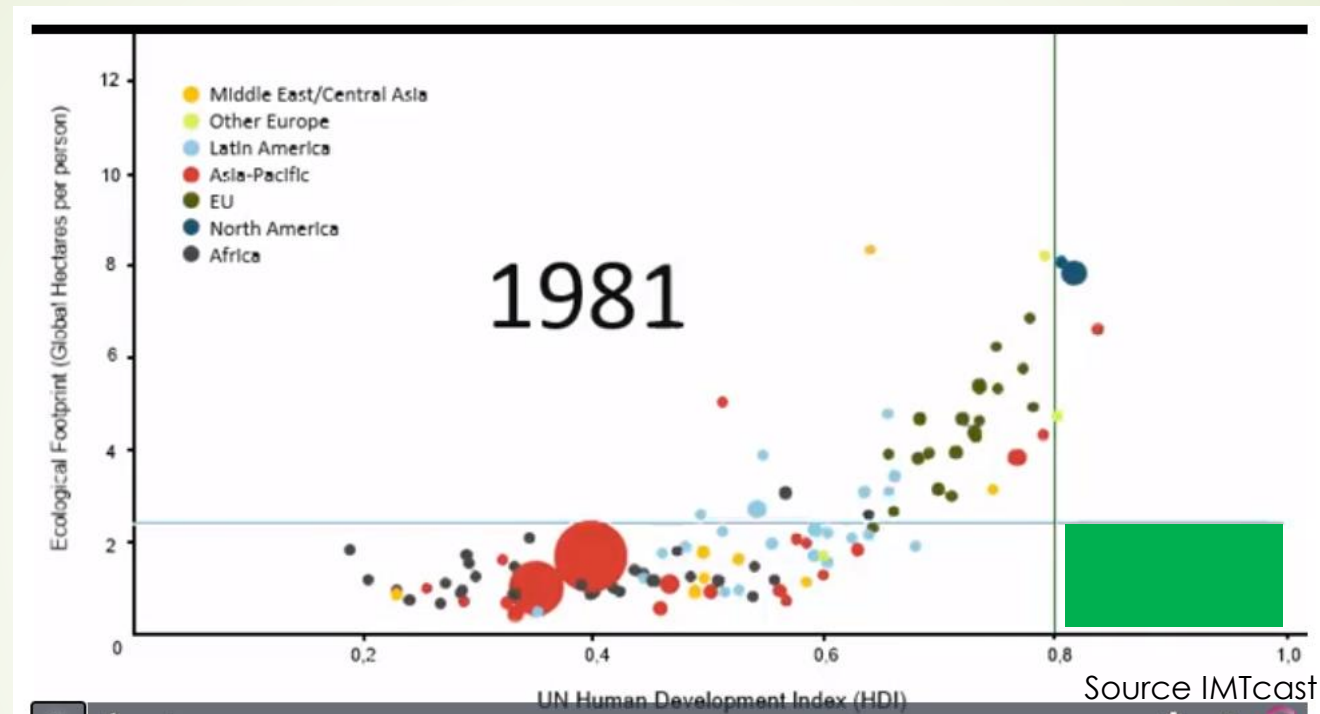


C'est une moyenne !



25 000 KWh/an/habitant

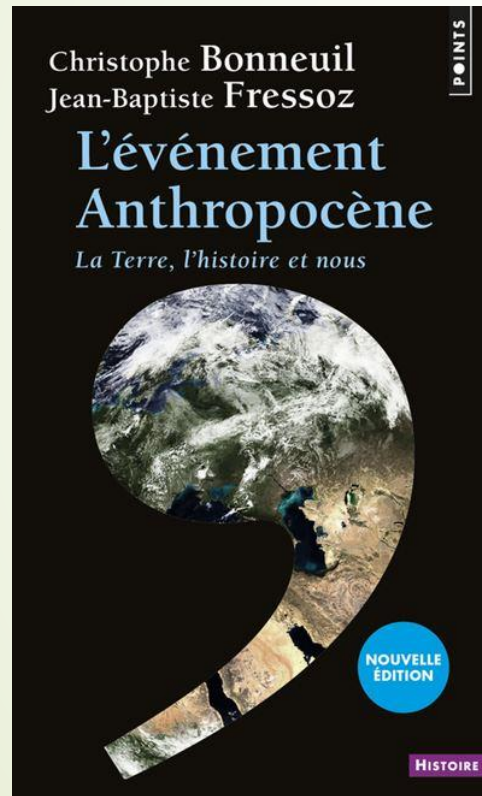
À multiplier par 3 ou 4 si tous les humains suivaient les standards actuels des pays riches

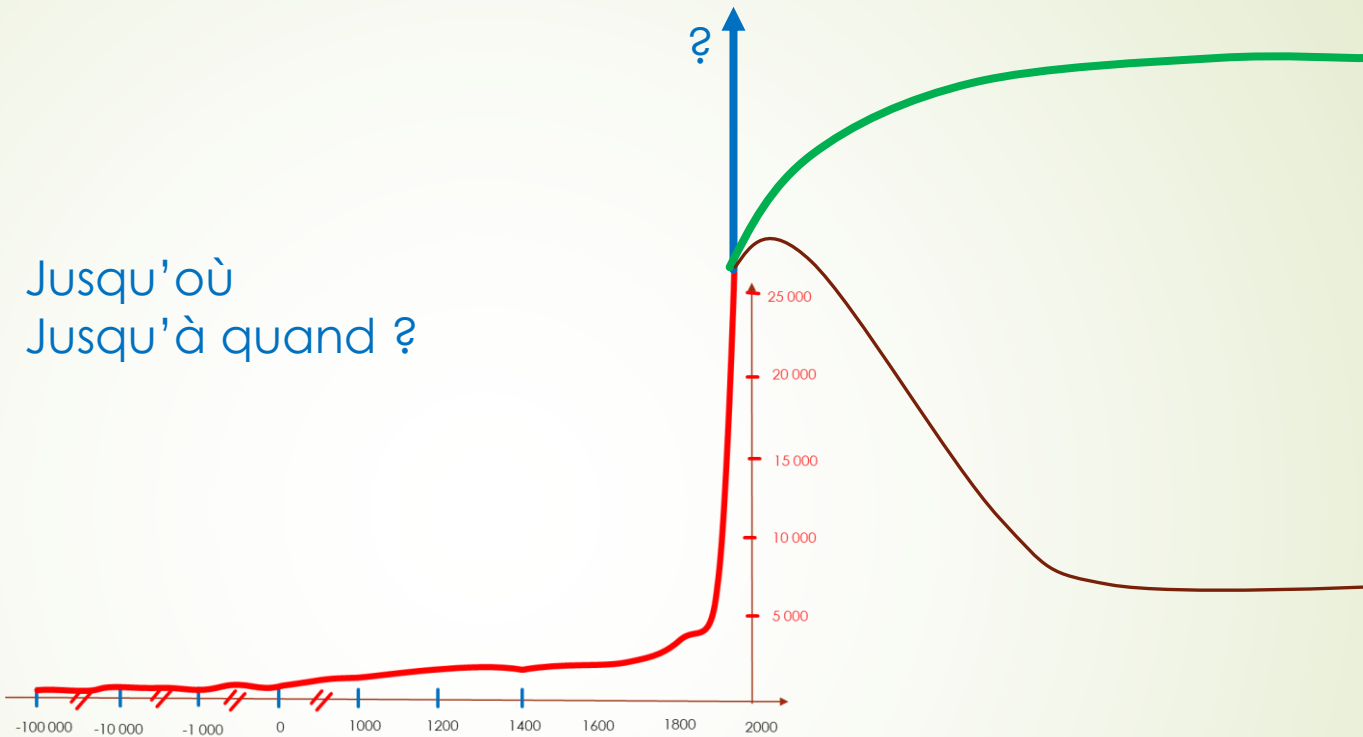


Le progrès va-t-il dans la bonne direction sur le long terme ?

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>





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

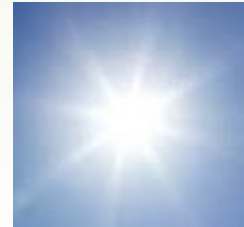
- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète



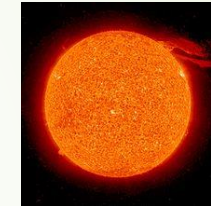
C'est quoi l'énergie ?

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

La nourriture,
une pile



La lumière



Le Soleil

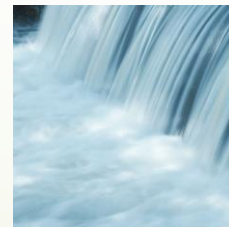
Ces « objets »
ont une
propriété en
commun
qu'ils peuvent
échanger

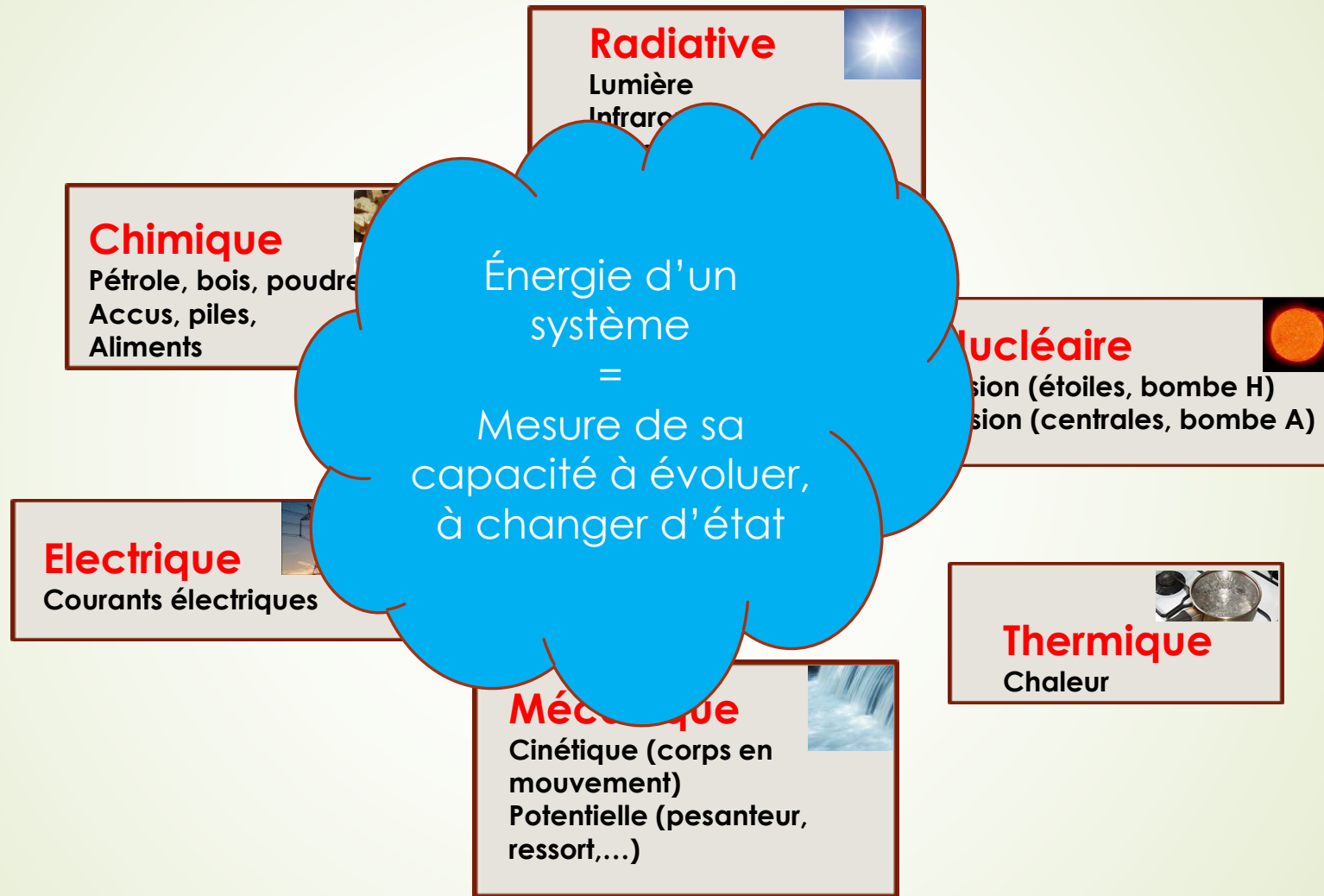
Le courant
électrique



Une casserole
d'eau bouillante

Une chute
d'eau

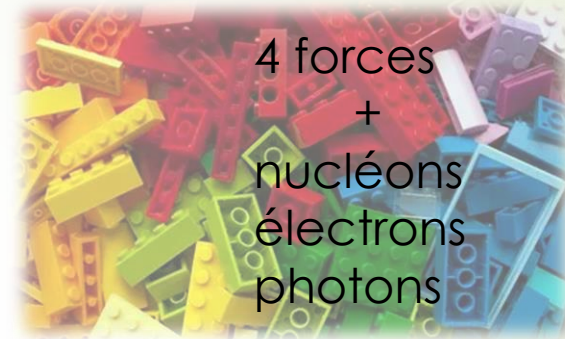




Peut-on espérer découvrir des énergies inconnues à ce jour ?



Nous connaissons (mieux) les briques de l'Univers



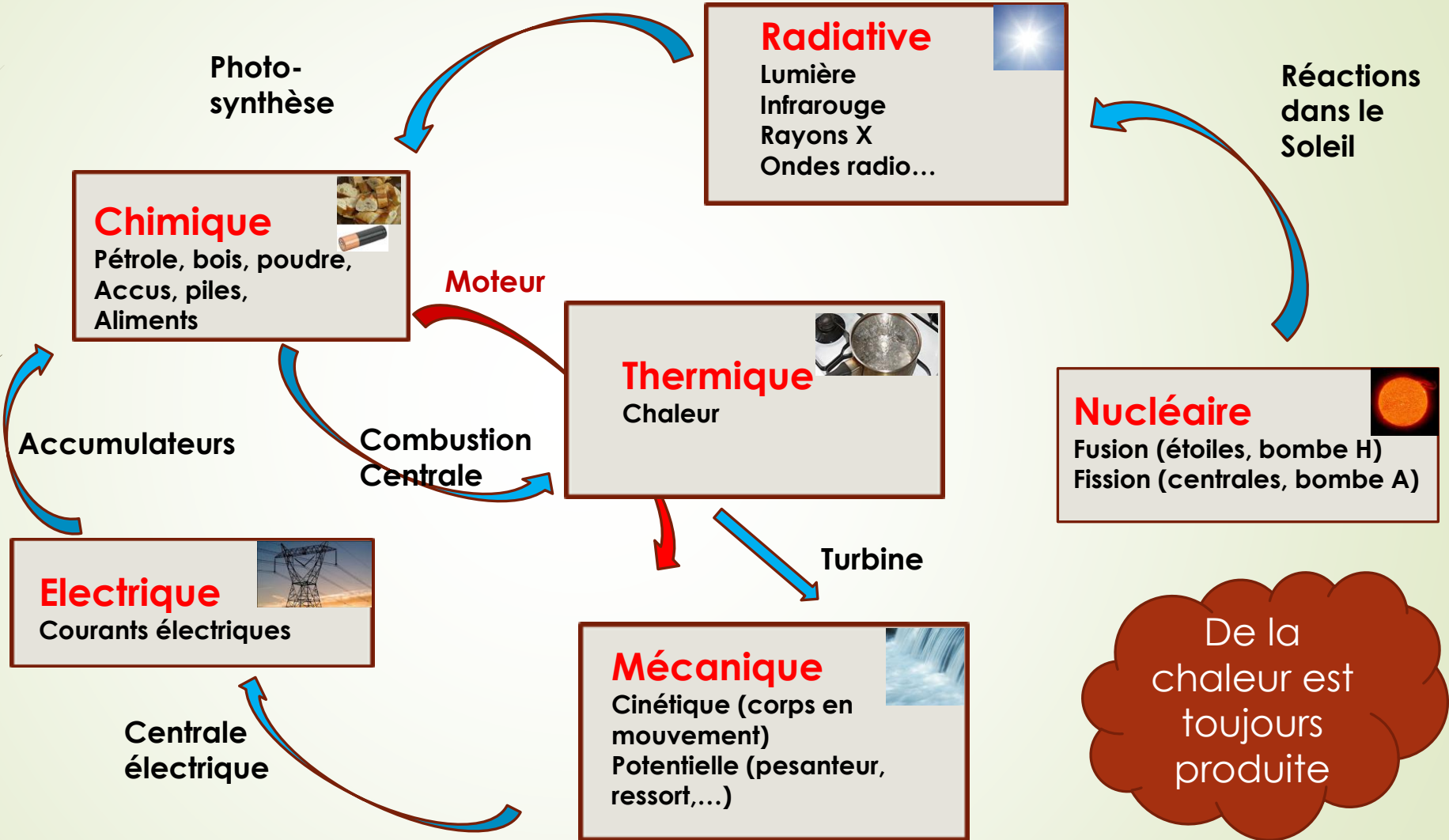
Pas de nouvelles énergies à espérer
à moyen terme

Mais des progrès technologiques
(EPR, filière hydrogène)

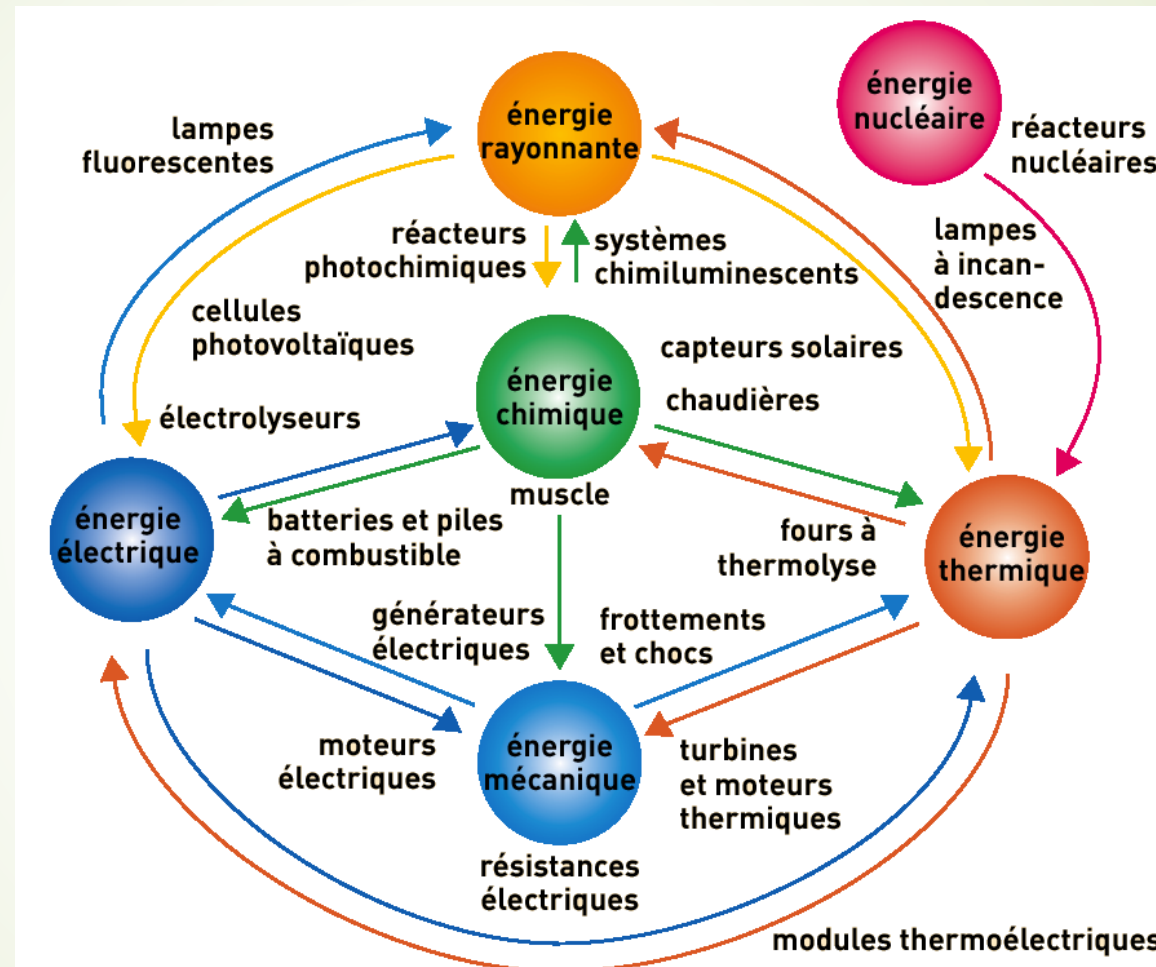
- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
La Technologie le peut-elle ?



Les énergies se transforment – la voiture électrique



Les différents transformateurs d'énergie



Energieplanete.fr

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

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

- Société.** Les Russes n'ont pas le moral, et c'est mauvais pour les ambitions du Kremlin
- Vu des États-Unis.** Comment Washington réagirait-il à une frappe nucléaire russe ?
- Appropriation culturelle.** Un maillot inspiré des zelliges suscite une guerre culturelle entre le Maroc et l'Algérie
- Pays-Bas.** En pleine crise de l'énergie, les Néerlandais se ruent sur les pots de fleur et les bougies

- 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.



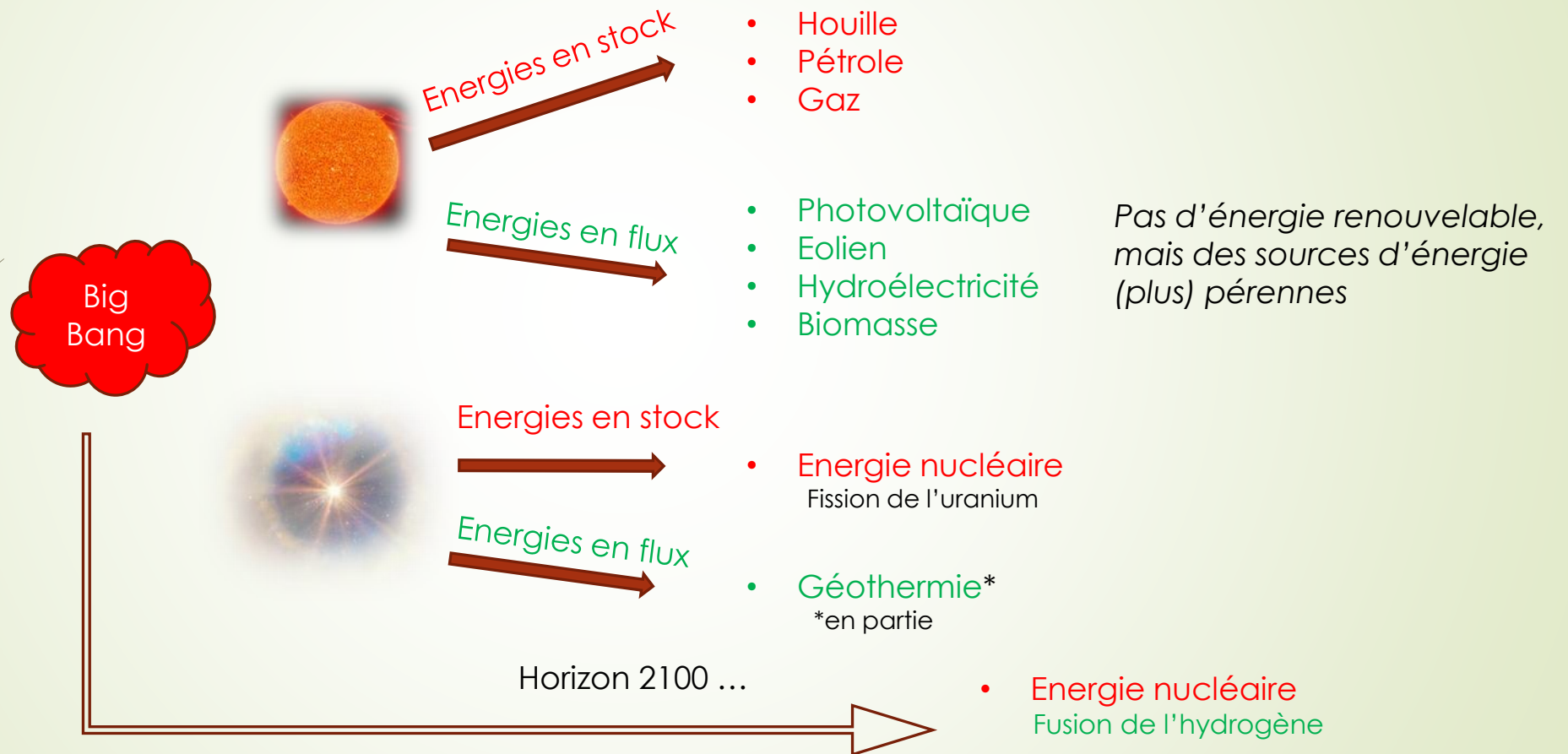


340 W/m^2

100 W/m^2 rayonnement réfléchi
 220 W/m^2 chaleur puis réémission
 20 W/m^2 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*

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



- 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



Pourquoi cette
dépendance au
pétrole et ses dérivés ?

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

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)

| 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

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



« production
d'énergie »
consommatrice
d'espace

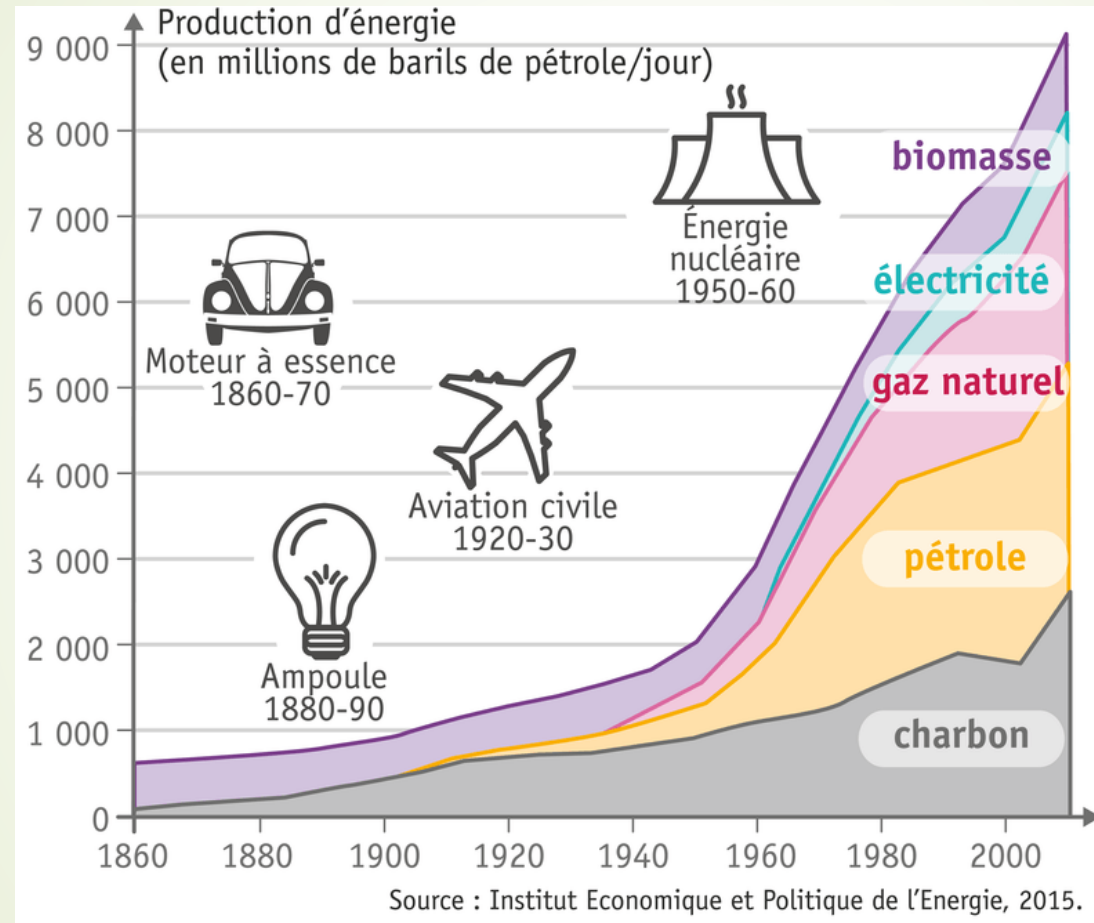


Production annuelle d'énergie par m²

| Type d'énergie | kWh/m ² /an |
|----------------|------------------------|
| Gaz | 14 000 |
| Nucléaire | 12 800 |
| Eolien | 250 |
| Hydraulique | 240 |
| Solaire | 150 |

<https://www.greenandgreatagain.com/>

L'origine de la période industrielle



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

Environ

13 800 MTeP

160 10¹² kWh

par an(2018)

(<https://www.connaissancedesenergies.org>)

7, 5 milliards habitants (2017)

20 000 kWh

par an et par
habitant

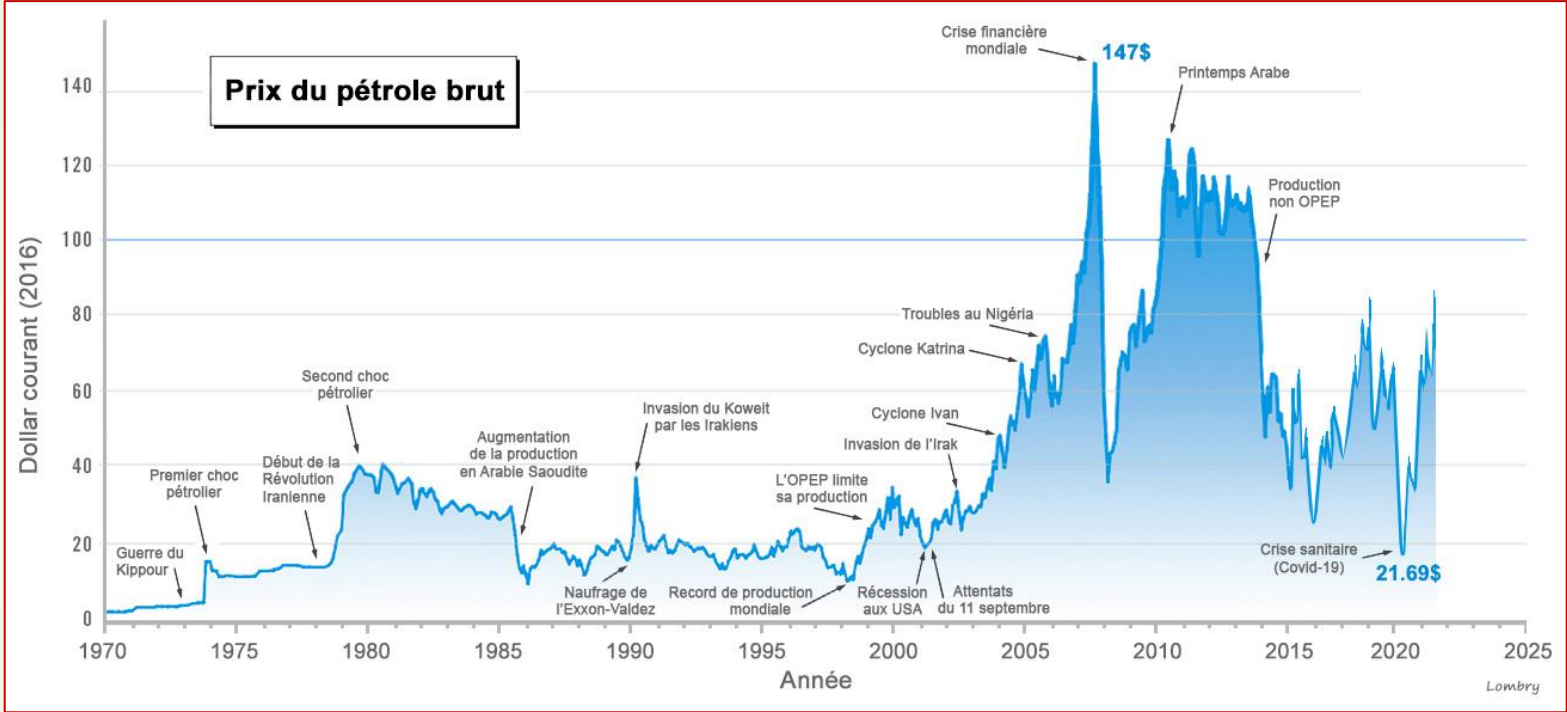
NB une incertitude de $\pm 50\%$ sur de telles données est admissible

Plus de 80% sur les stocks

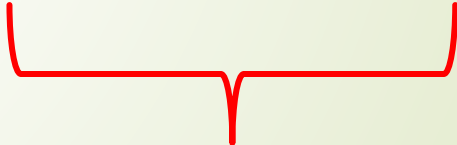
- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de 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



Éléments pour le
futur



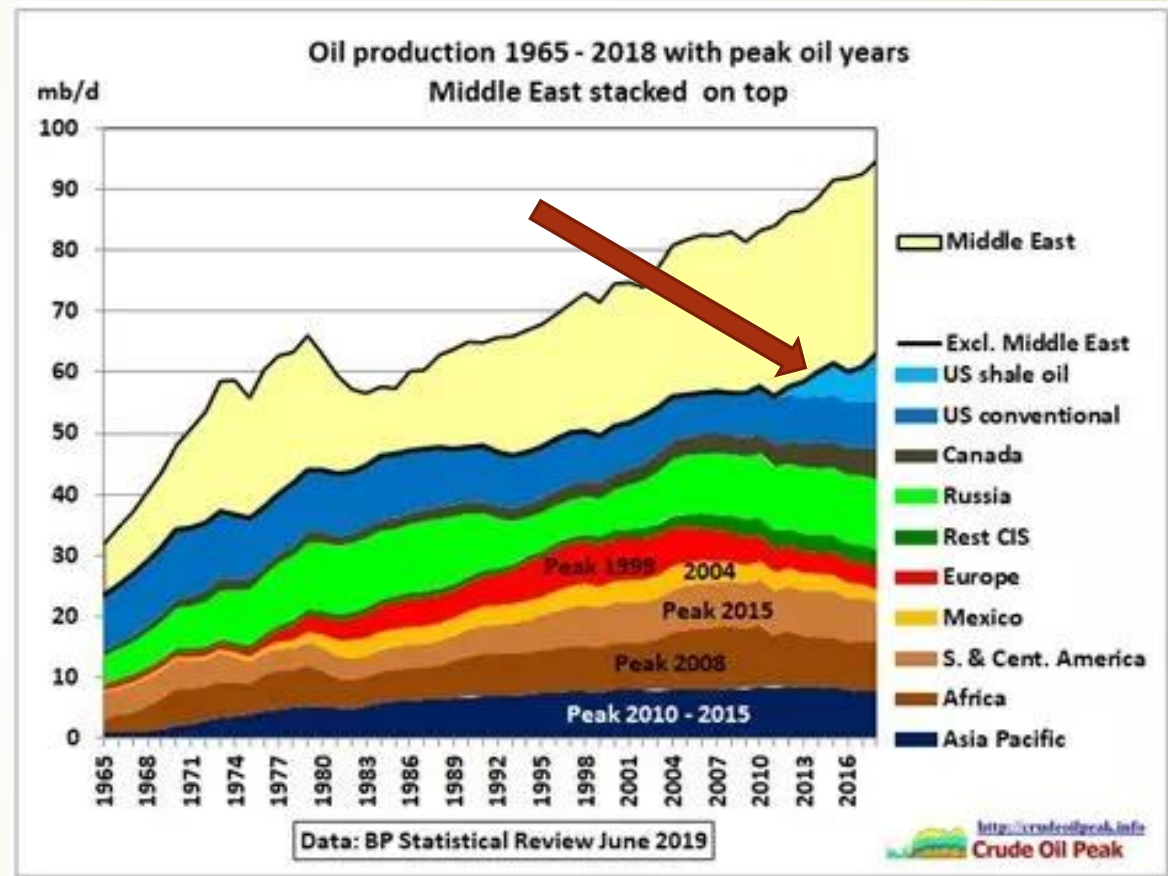
Pétrole très abondant



Production stagnante ou en déclin



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



Εὐρηκα
ERoEI



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

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

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

| | |
|--|-----------|
| 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 |

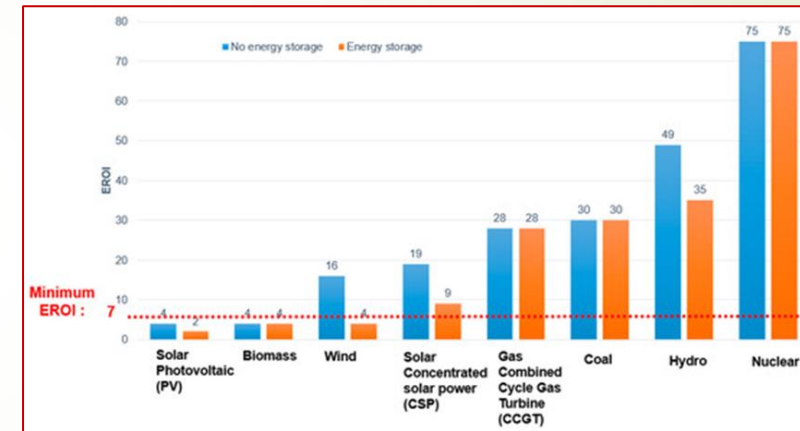




Les énergies en flux demandent des investissements importants

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 !!!

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

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

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



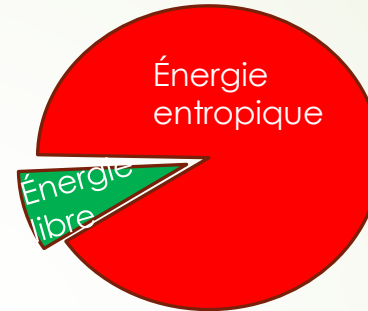


<https://jardinage.ooreka.fr/tips/voir/343884/les-arbres-en-boule>

Air calme

- Énergie totale 50 Wh/m³
- Énergie libre 0 (aucune énergie libre)

entropie maximum



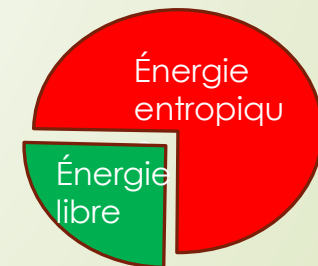
<https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about-weather>

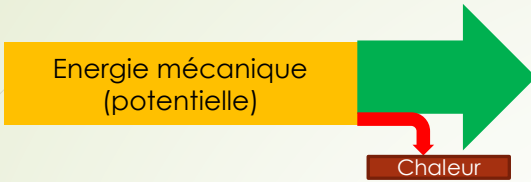
Vent

- Molécules d'air en agitation thermique (520 m/s) + déplacement collectif 10 m/s
- Énergie totale 52,5 Wh/m³
- Énergie libre 2,5 Wh/m³ (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

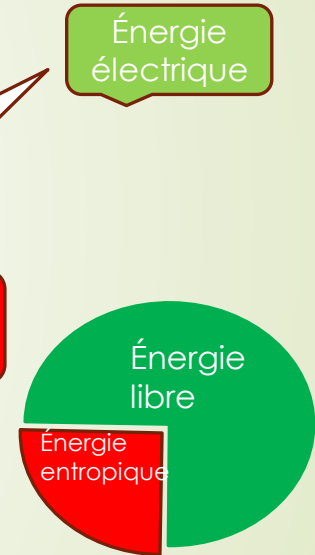




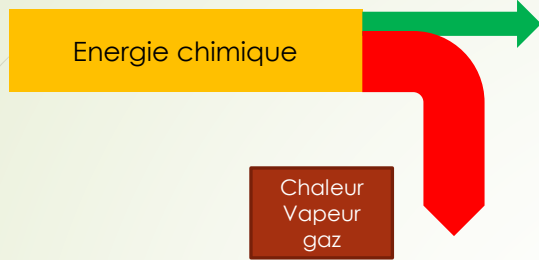
Énergie mécanique → Chaleur + énergie électrique

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/>



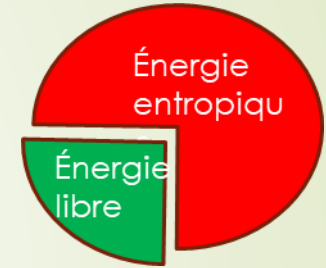
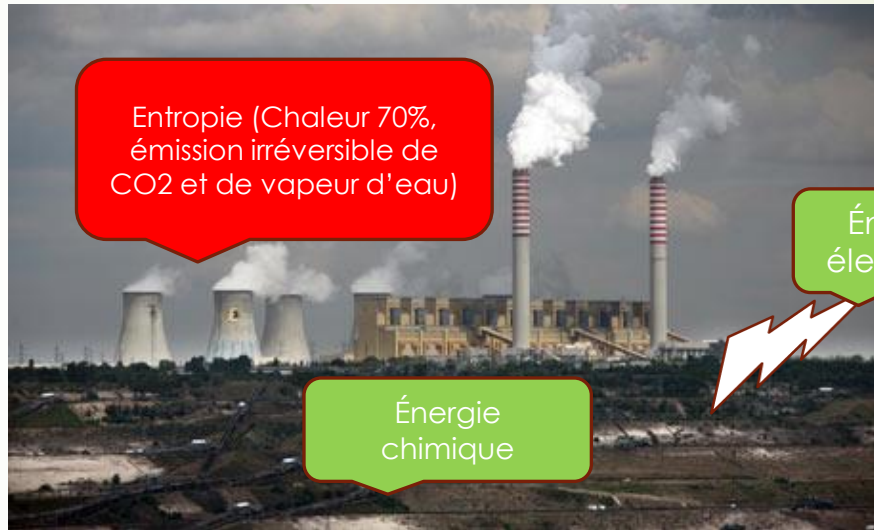
Un autre exemple : une centrale au charbon



Énergie chimique → Chaleur + Déchets + énergie électrique

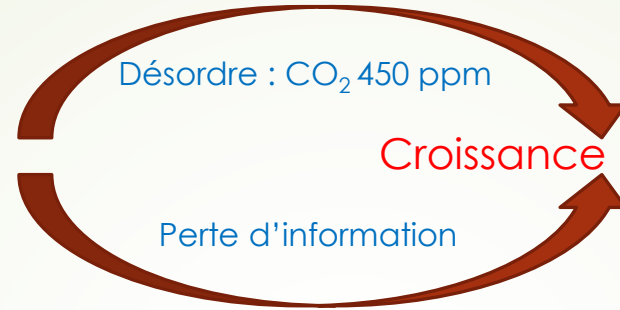
Un processus qui crée **beaucoup d'entropie** (rendement d'énergie libre faible)
Irréversible (comment recapturer le CO2 et la vapeur d'eau émise)

<http://www.oleocene.org/>



- 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)

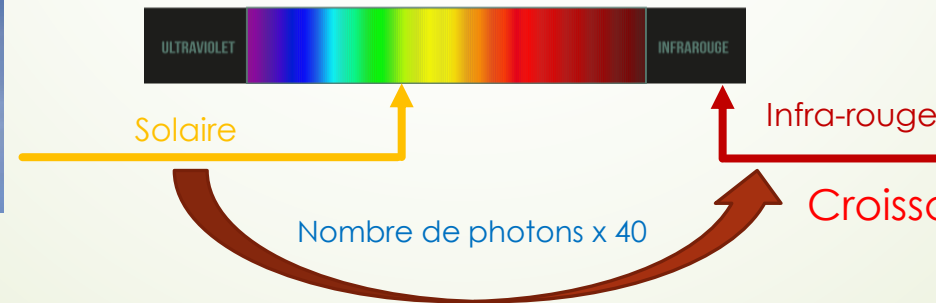
Emission de CO₂



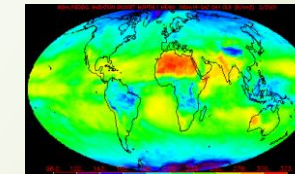
Tri sélectif des déchets



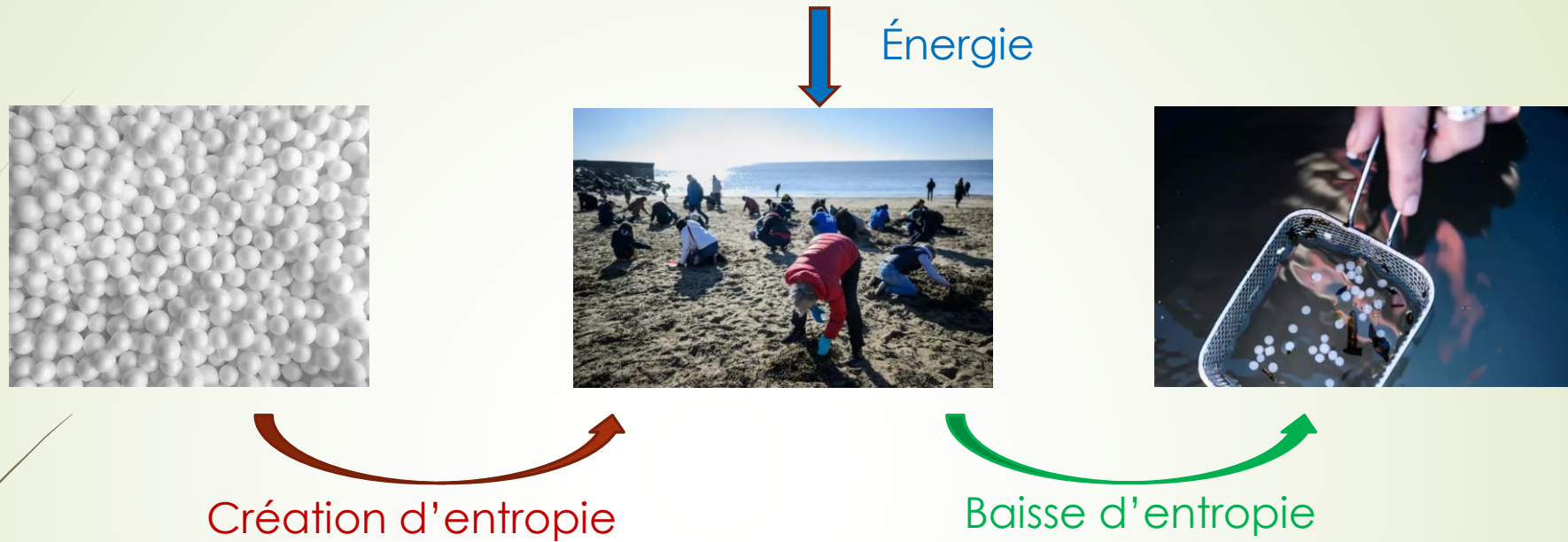
Rayonnement



<http://psbgsi1.nesdis.noaa.gov/>



Croissance de l'entropie



Signatures des processus entropiques :

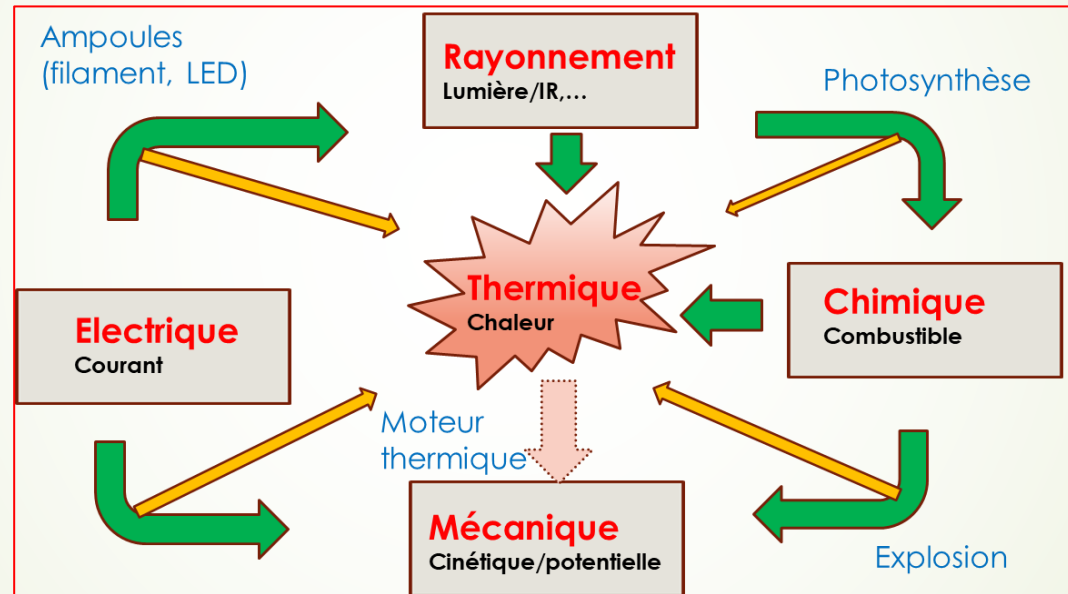
- Création de désordre
- Difficilement réversibles
- Nécessitent de l'énergie pour les inverser

Le Second principe de la thermodynamique

51

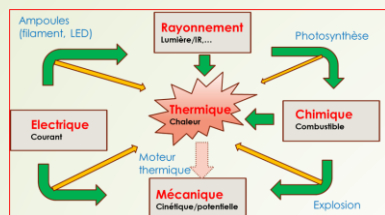
Corollaires

- 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



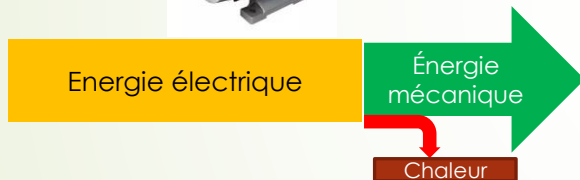
Les signatures de l'entropie dans les « productions » d'énergie

52



Toute transformation crée de l'entropie :

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



Signatures de l'entropie

- Bas rendement
- Déchets
- Irréversibilité (moteur électrique \leftrightarrow dynamo ; moteur thermique \rightarrow ??)

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
- Émission **irréversible** de déchets (CO₂ dans l'atmosphère)



Carbone
Tas de charbon, localisé, non dispersé



Carbone dans l'atmosphère (CO₂)
Dispersé dans des milliards de m³

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



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

Sans compter l'effet de serre

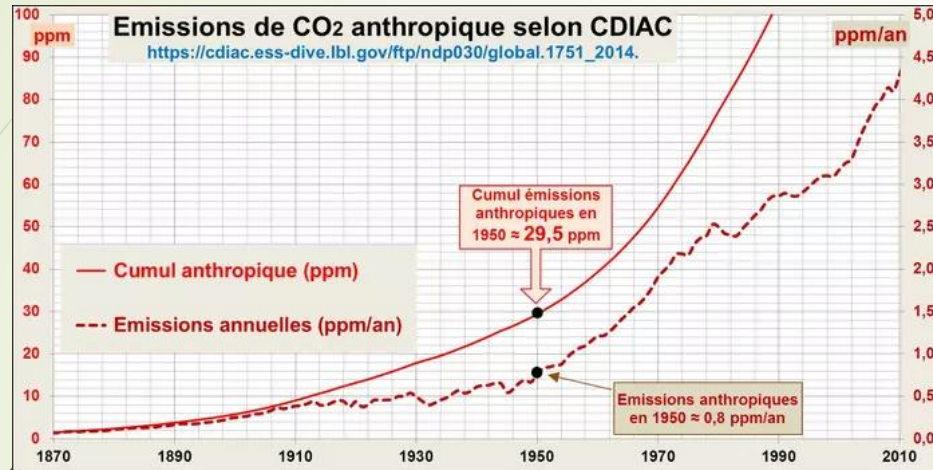
Verre :

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

Atmosphère terrestre :

- Oxygène (O₂), Azote (N₂), ... transparents aux Infrarouges
- CO₂, CH₄, NH₃, etc... absorbent les Infrarouges





Des centaines d'années pour se débarrasser du CO₂ émis dans l'atmosphère

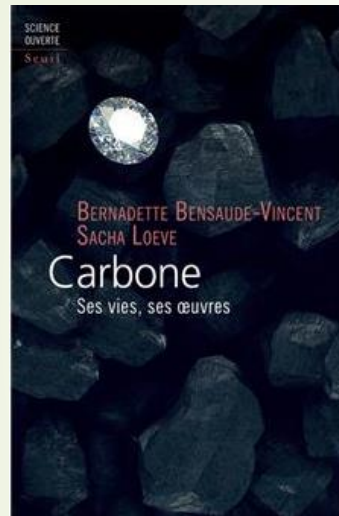
Le moteur thermique : la « pire » invention de l'Homo Sapiens

- 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



Urgence de l'urgence :

- diminuer drastiquement (stopper) les émissions de CO₂ :
- arrêter de déterrer le carbone et de l'envoyer dans l'atmosphère



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

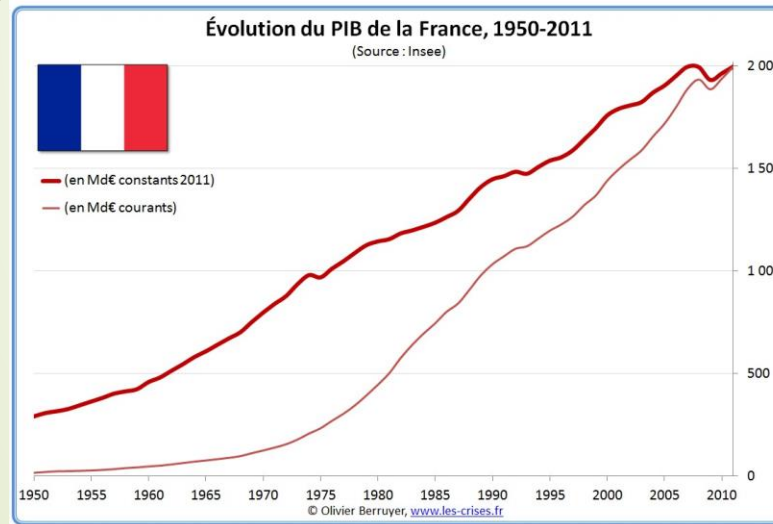
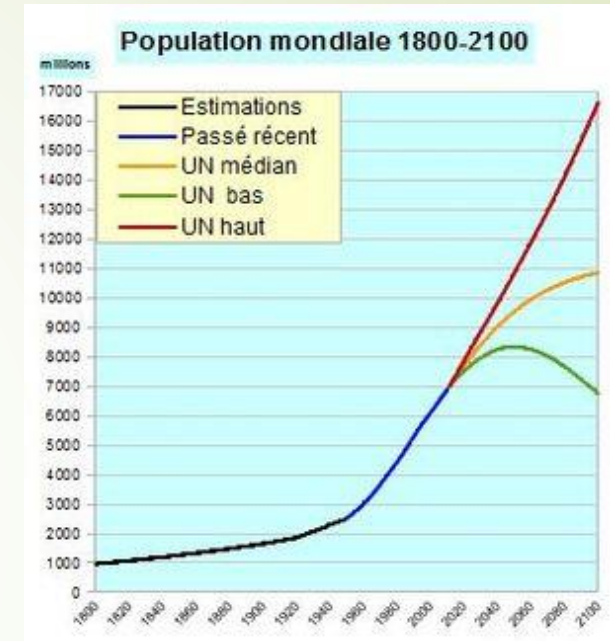
En 2022, 10% du carbone fossile est utilisé pour fabriquer nos objets modernes



Le monde sans fin – Bain, Jancovici

Diminuer (supprimer) l'usage des énergies fossiles par combustion
Diminuer l'empreinte carbone de nos activités

Paramètre **Pop** comme « population »

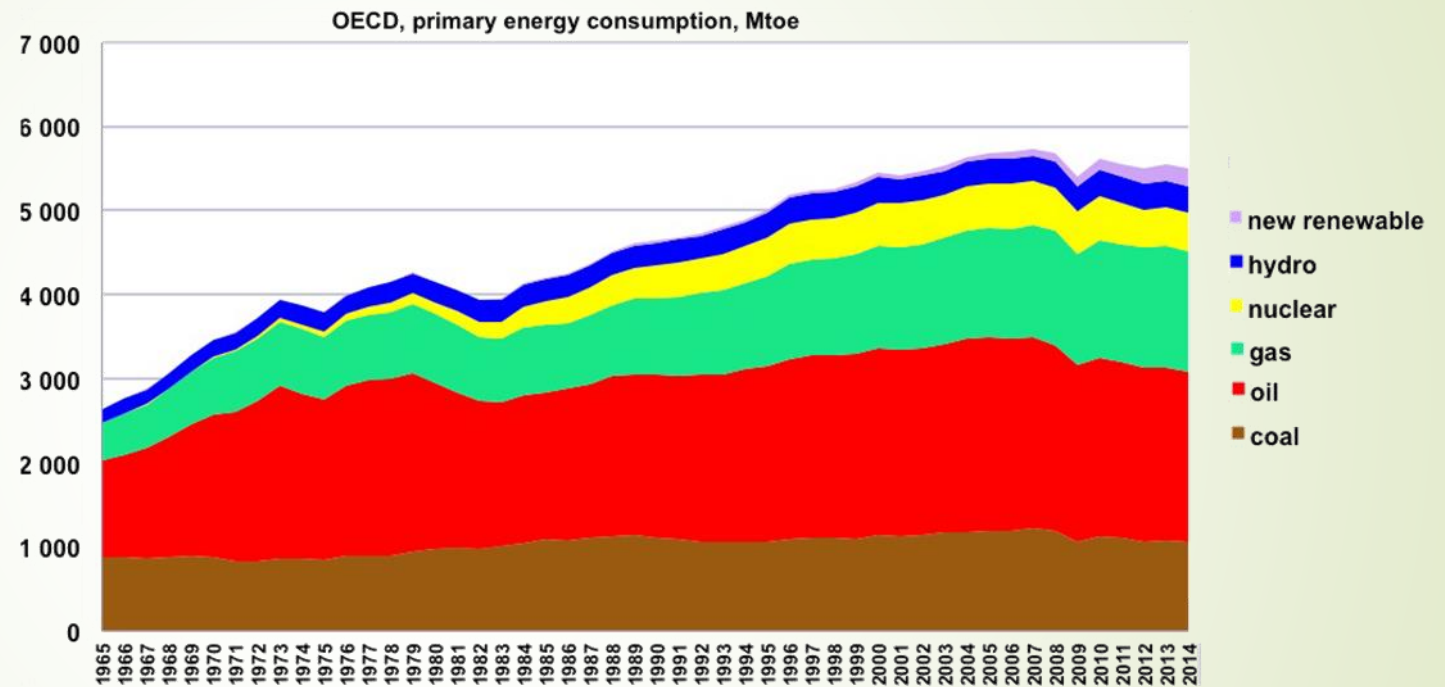


Paramètre **PIB** comme « richesses produites »

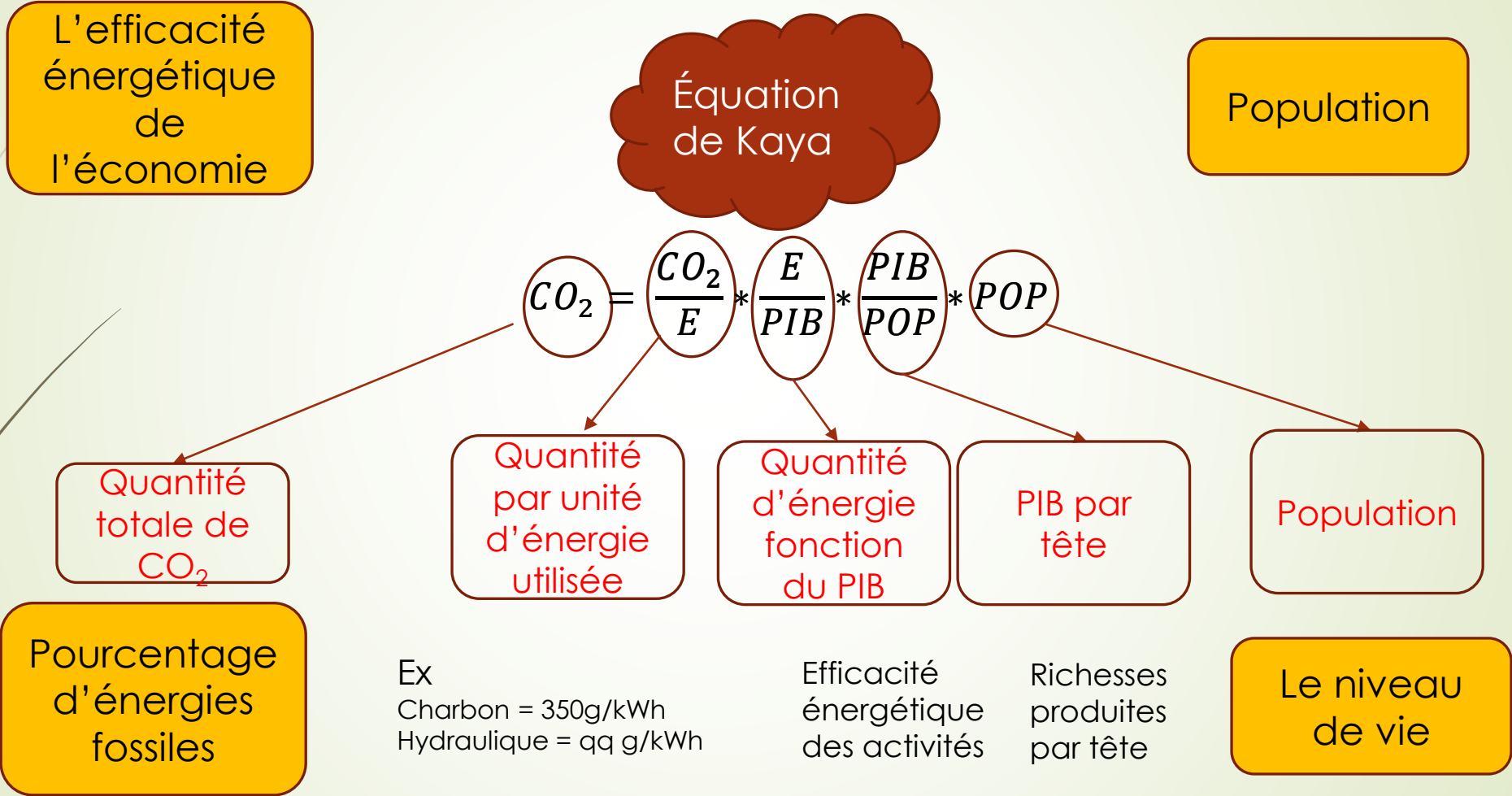
Paramètre **E**
comme « énergie
utilisée »

Paramètre **CO₂**
comme « part
d'énergies
carbonées »

Quels paramètres de l'empreinte carbone ?



Facteurs influant le taux d'émission de CO₂



Objectif de la France

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

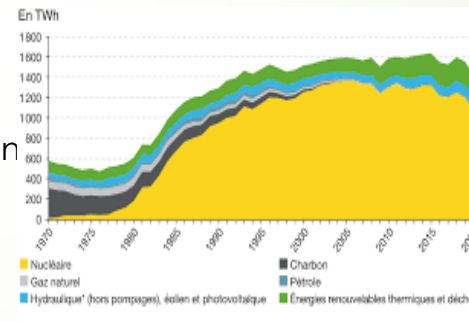
$$CO_2 = \frac{CO_2}{E} * \frac{E}{PIB} * \frac{PIB}{POP} * POP$$

$$\text{Objectif : } 33\% = 40\% * X * 180\% * 140\%$$

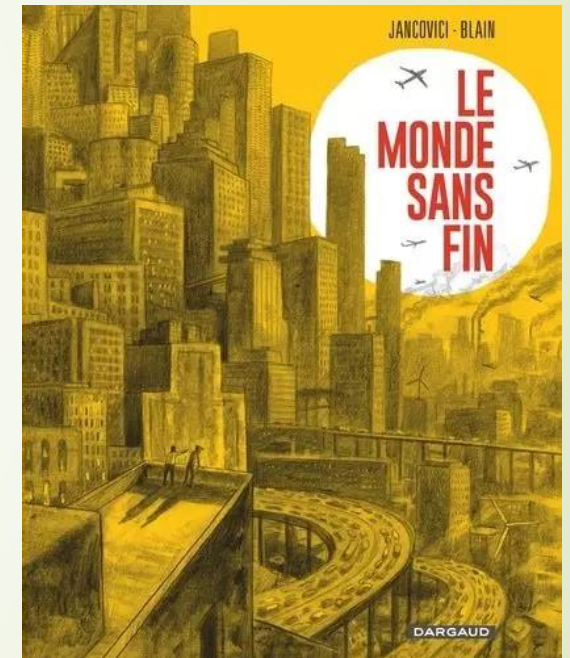
60% d'énergies en flux (bas carbone)

Population mondiale estimée 8 500 000 000 (2050)

Plan retraite français : +2%/an → total 180% en 30 an

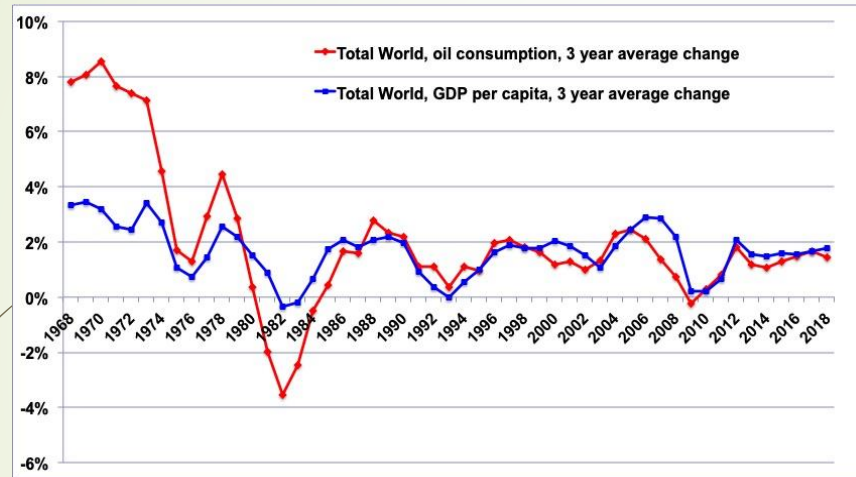


E/PIB X → 30% de la valeur aujourd'hui (années 1950)

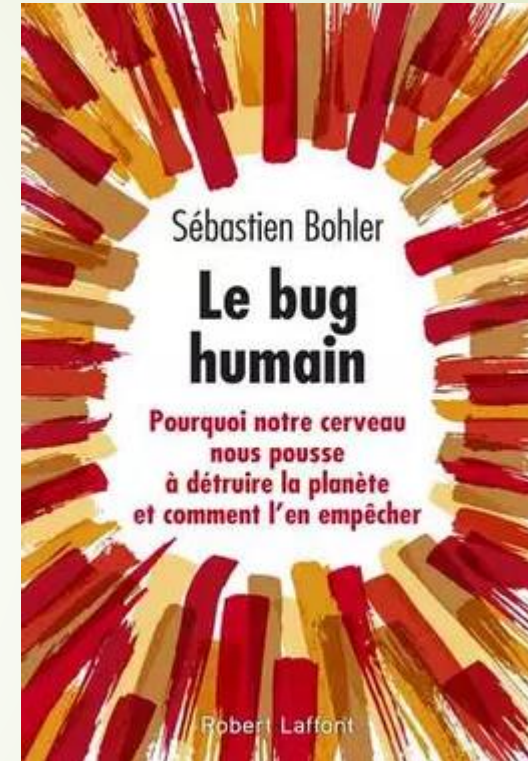


- L'énergie prélevée par les humains sur la planète Terre a explosé en quelques années. Croissance insoutenable pour la planète
- La Science ne nous sauvera pas seule à court terme.
La Technologie le peut-elle ?
- L'énergie est toujours conservée – On ne la produit jamais, on la transforme.
- 85% de 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
- L'objectif est de réduire **drastiquement** l'usage des énergies fossiles (empreinte carbone)

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



Les « qualités » qui ont permis le « succès » de l'espèce homo sapiens, ne sont-elles pas celles qui peuvent la mettre en danger?



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>