

*Physique*

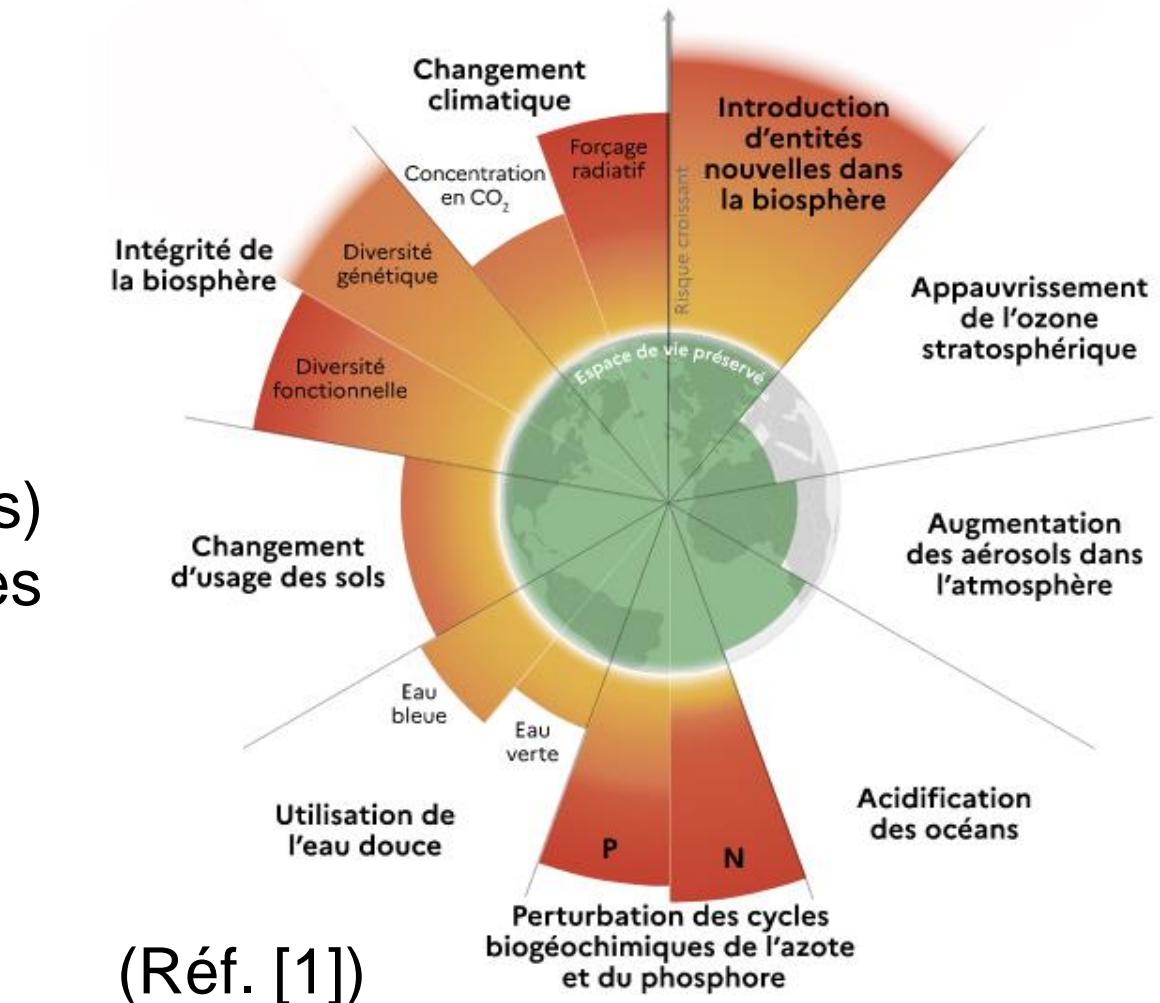
---

Chapitre 9  
**Défis liés à l'Énergie**

Dr. Benoît CHABAUD

# Remarques

- Ce chapitre entre dans le cadre de la formation à la **Transition Ecologique pour un Développement Soutenable (TEDS)**.
- La TEDS peut être abordée sous l'angle des '**limites planétaires**' :
  - 1) Changement climatique
  - 2) Érosion de la biodiversité
  - 3) Modifications des usages des sols
  - 4) Pollution chimique (nouvelles entités)
  - 5) Perturbation des cycles biochimiques de l'azote et du phosphore
  - 6) Acidification des océans
  - 7) Aérosols atmosphériques
  - 8) Diminution de la couche d'ozone
  - 9) Utilisation d'eau douce



# Remarques (suite)

- Ici, nous allons développer la notion transverse d'**énergie**, sans chercher à être exhaustif.
- Vous étudierez sans doutes d'autres aspects de la TEDS dans d'autres cours.
- L'approche consiste à présenter les notions et les défis liés à l'énergie de façon factuelle et quantitative.
- Dans ce chapitre, les valeurs numériques ne sont **pas à apprendre par cœur**.
- Une liste de Références est donnée à la fin du chapitre.

# Objectifs

- Dans ce Chapitre, on va :
  - Rappeler quelques définitions, ordres de grandeur et unités
  - Introduire la notion de rendement
  - Présenter l'énergie du corps humain
- Puis on présentera :
  - Les énergies présentes sur la Terre
  - Notre consommation d'énergie (§ sur le numérique)
- Enfin, on ouvrira une réflexion sur :
  - Les effets de notre consommation d'énergie (§ sur le changement climatique)

## 1.1. Ordres de Grandeur

- Lorsque l'on parle d'énergie, on est confronté à quelques difficultés :
  - L'énergie n'est généralement pas observable directement : elle se manifeste par des **transformations** entre diverses formes.
  - Ces **formes d'énergies** sont multiples, ce qui rend complexe la comparaison entre des systèmes différents.
  - Un certain nombre de grandeurs liées à l'énergie sont difficilement mesurables ou sont **imprécises**.
- Par conséquent, certaines valeurs numériques dans ce chapitre sont à considérer comme des '**ordres de grandeur**'

- Quelques ordres de grandeur :

➤  $0,16 \text{ aJ}$  ≈ énergie d'un électron accéléré sous 1 Volt (1eV).

↑ atto :  $10^{-18}$

:

➤  $1 \text{ J}$  ≈ énergie d'une masse de 100 g qui tombe de 1 mètre.

➤  $1 \text{ kJ}$  ≈ énergie solaire arrivant chaque s. sur 1 m<sup>2</sup> au sol.

➤  $1 \text{ MJ}$  ≈ énergie contenue dans 300 g de pomme de terre.

➤  $1 \text{ GJ}$  ≈ énergie contenue dans de 28 ℥ d'essence.

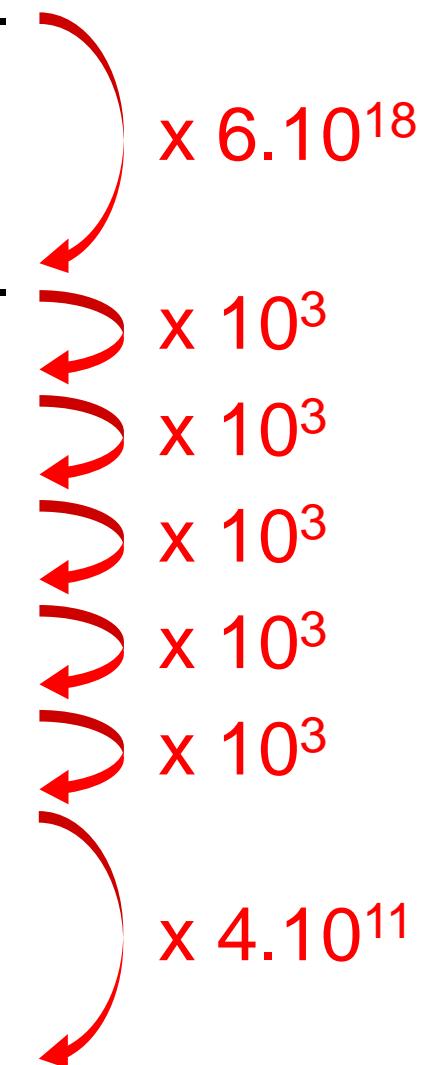
➤  $1 \text{ TJ}$  ≈ énergie d'un km<sup>3</sup> d'air à 160 km/h (ouragan).

➤  $1 \text{ PJ}$  ≈ énergie du choc d'une météorite de 10 000 tonnes.

:

↓ Yotta :  $10^{24}$

➤  $400 \text{ YJ}$  ≈ énergie dégagée par le Soleil en une seconde.



## Rappel sur les unités [!]

- L'unité officielle de l'énergie est le Joule :

$$1 \text{ J} = 1 \text{ W} \times 1 \text{ s} \text{ ou } 1 \text{ J} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m} \text{ ou } 1 \text{ J} = 0,24 \text{ g} \times 4,18 \text{ J/g.K} \times 1 \text{ K}$$

↑  
Capacité thermique massique :  $C_{\text{eau}}$

- Pour des consommations domestiques, on utilise plutôt le kWh :

$$1 \text{ kWh} = 1000 \text{ W} \times 1 \text{ h} = 1000 \text{ W} \times 3600 \text{ s} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$$

- Pour des consommations industrielles, on utilise la tonne-éq.-pétrole :

$$1 \text{ tep} = 1000 \text{ kg} \times 42 \text{ MJ/kg} = 42 \cdot 10^9 \text{ J} = 42 \text{ GJ}$$

↑  
Pouvoir Calorifique Supérieur : PCS<sub>pétrole</sub>

- Soit :  $1 \text{ tep} = 11\ 700 \text{ kWh}$

## 1.2. Rendements

- Rappel : la **puissance** d'un système est égale à l'**énergie** qu'il produit (ou qu'il reçoit) par unité de temps :

$$P = E / \Delta t$$

[!]

- Définition : le **rendement d'une transformation** est le rapport entre l'énergie 'souhaitée' et celle 'dont on dispose'. [!]
- Le rendement est une grandeur sans dimensions qui est notée  **$\eta$** . On l'exprime généralement en pourcents.
- Voici plusieurs exemples :

## a) Moteur à explosion

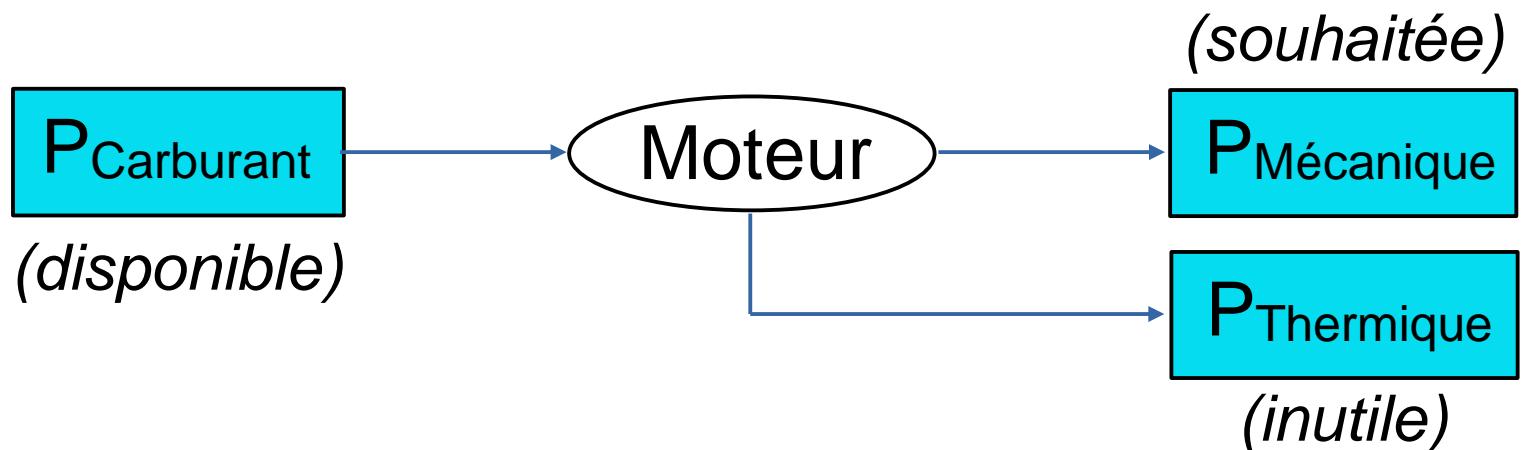
- Le rendement d'un moteur à explosion est le rapport de l'énergie **mécanique** fournie par le moteur (souhaitée) sur l'énergie thermique fournie par le **carburant** (disponible) :

$$\eta = \frac{E_{\text{Mécanique}}}{E_{\text{Carburant}}}$$

- Le rendement peut également s'exprimer à partir du rapport des puissances :

$$\eta = \frac{E_{\text{Mécanique}} / \Delta t}{E_{\text{Carburant}} / \Delta t} = \frac{P_{\text{Mécanique}}}{P_{\text{Carburant}}}$$

- On peut illustrer cette transformation par un schéma :



- De plus, la conservation de l'énergie implique que :

$$P_{\text{Carburant}} = P_{\text{Mécanique}} + P_{\text{Thermique}}$$

- Autrement dit, le rendement peut aussi s'écrire :

$$\eta = \frac{P_{\text{Mécanique}}}{P_{\text{Carburant}}} = \frac{P_{\text{Mécanique}}}{P_{\text{mécanique}} + P_{\text{Thermique}}} < 1$$

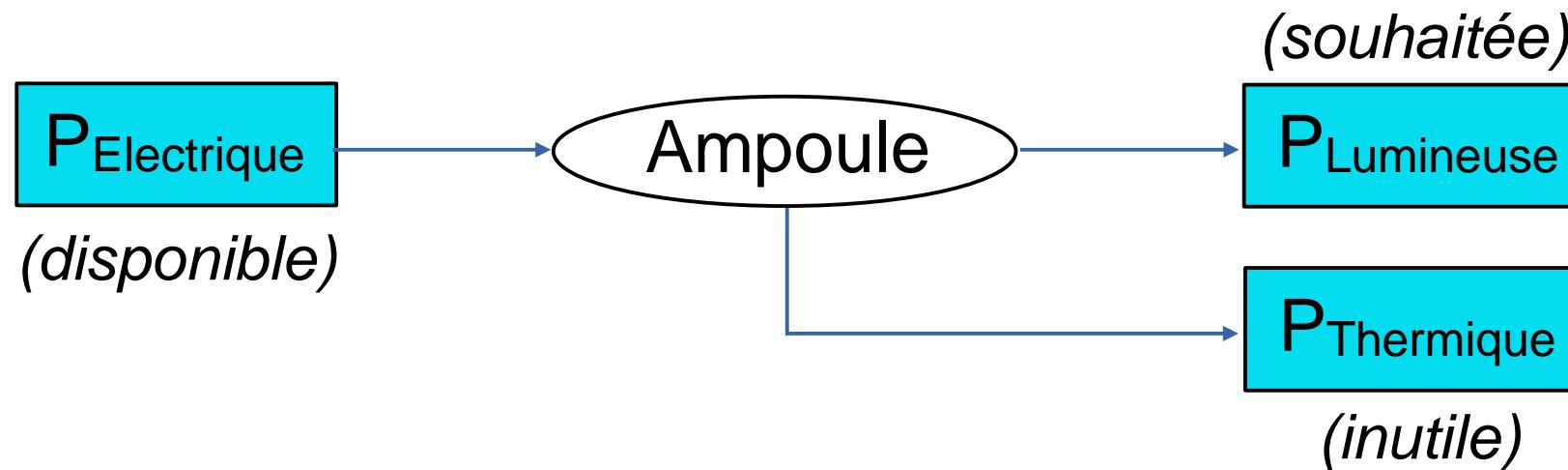
- En pratique, le rendement d'un moteur à explosion est de l'ordre de 0,3 à 0,4, c'est-à-dire 30 à 40 % (limite Thermodynamique).
- L'énergie non transformée en travail mécanique est rejetée sous forme de **chaleur** (gaz d'échappement, radiateur, ...)

## b) Ampoule électrique

- Le rendement d'une ampoule est le rapport de la puissance **lumineuse** sur la puissance **électrique** disponible :

$$\eta = \frac{P_{\text{Lumineuse}}}{P_{\text{Electrique}}}$$

- Schéma :



- Comme on peut l'observer expérimentalement, une part importante de l'énergie électrique est dissipée sous forme de chaleur.

- Les rendements dépendent du type d'ampoule :

- Ampoule à incandescence :  $\eta \approx 2$  à 5 %



- Ampoule halogène :  $\eta = 6$  à 12 %



- Ampoule fluorescente :  $\eta = 15$  à 30 %



- Ampoule LED :  $\eta$  jusqu'à 50 %



- Une ampoule est d'autant plus efficace, qu'elle produit moins de chaleur (pour une même puissance lumineuse).

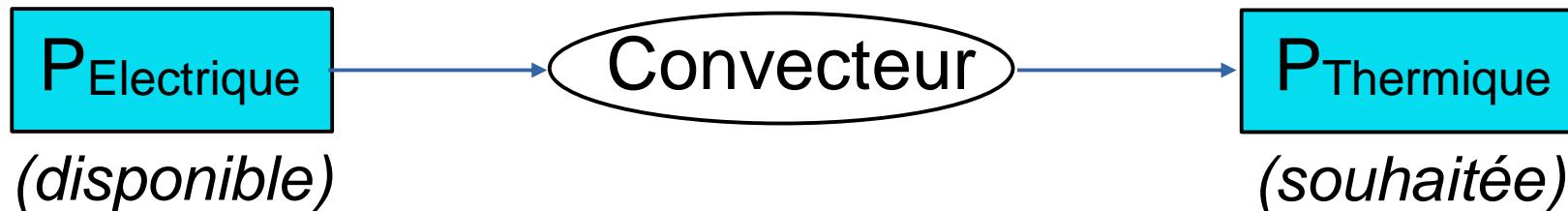
### c) Convecteur ou chaudière

- Le rendement d'un appareil qui transforme une énergie en **chaleur** est de 100 % ( $\eta = 1$ ) !
- Par exemple, pour un radiateur électrique :

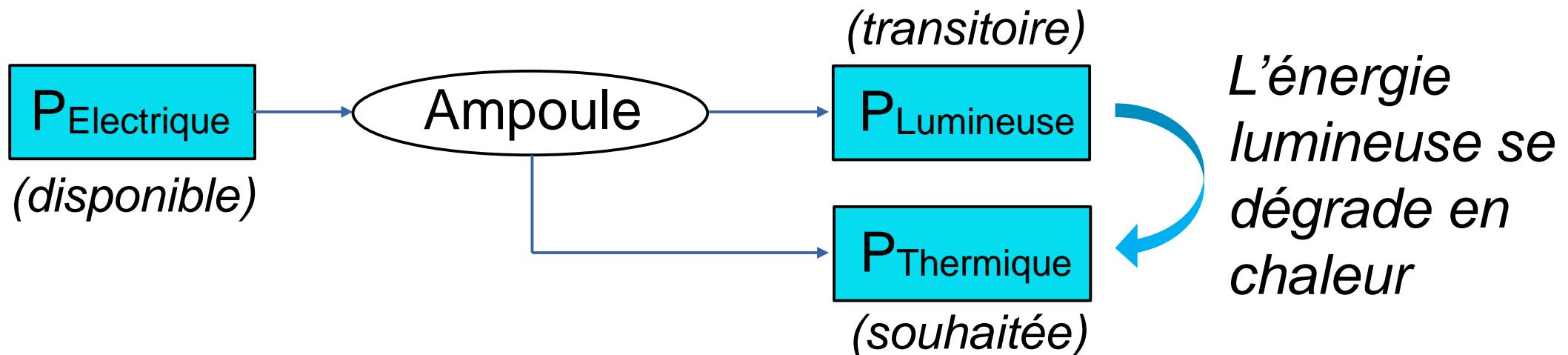
$$\eta = \frac{P_{\text{Thermique}}}{P_{\text{Electrique}}} = 1$$

- La chaleur est la forme la plus « dégradée » de l'énergie : on a vu dans un chapitre précédent que les diverses formes d'énergie (cinétique, potentielle, ...) se transforment finalement en **chaleur**.
- Si la forme d'énergie que l'on *souhaite obtenir* est justement la **chaleur** (avec un convecteur ou une chaudière), on comprend que la transformation a un rendement égal à 1.

- Pour un radiateur électrique, le schéma correspondant est :



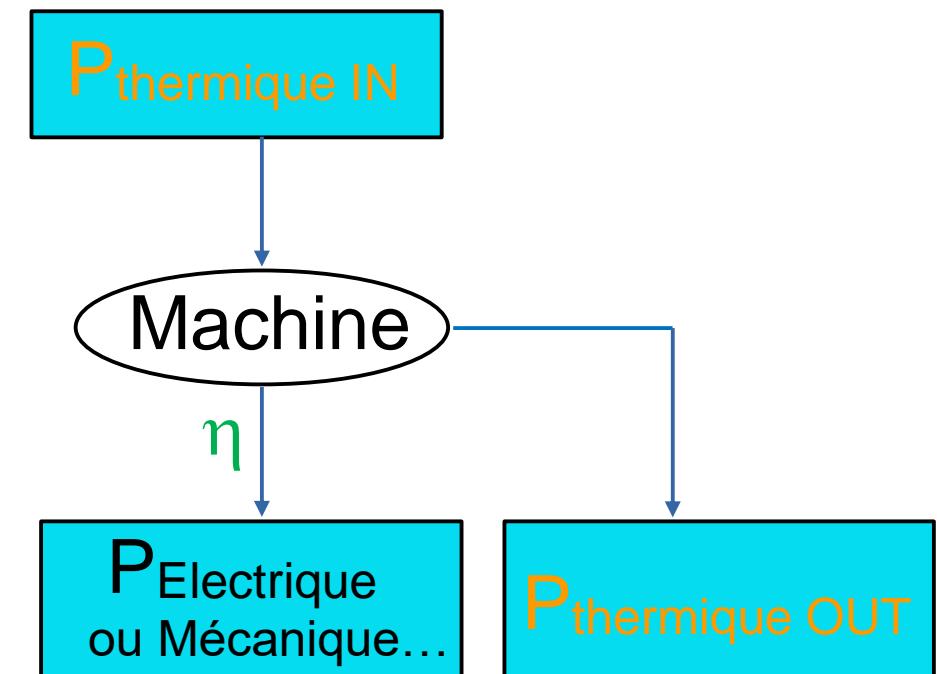
- Ceci est vrai pour tous les appareils qui transforment une énergie en **chaleur** !
- Remarque : on pourrait utiliser une **ampoule** comme **radiateur** :



- Dans ce cas :  $P_{\text{thermique totale}} = P_{\text{electrique}}$ , c'est-à-dire :  $\eta = 1$ .

## d) Transformation de chaleur en une autre forme d'énergie

- On vient de voir qu'il est facile de 'dégrader' une énergie en chaleur.
- Mais les transformations inverses (par ex. : *chaleur* → *électricité*, ou *chaleur* → *travail mécanique*, ou *chaleur* → *énergie chimique*) sont beaucoup moins efficaces.
- Les lois de la Thermodynamique limitent la fraction de la chaleur disponible qui peut être convertie en une autre forme d'énergie :
  - Moteur à essence :  $\eta \approx 35$  à 40 %
  - Moteur Diesel :  $\eta \approx 40$  à 45 %
  - Turbine à vapeur :  $\eta \approx 20$  % à 80 %



## 1.3. Energie du corps humain

- On a vu précédemment que le **corps humain** n'est généralement pas un bon système pour illustrer les Lois de la mécanique...
- Cependant, il est intéressant de comparer l'énergie que le corps peut produire, aux énergies que nous utilisons quotidiennement.

### 1. Besoins énergétiques

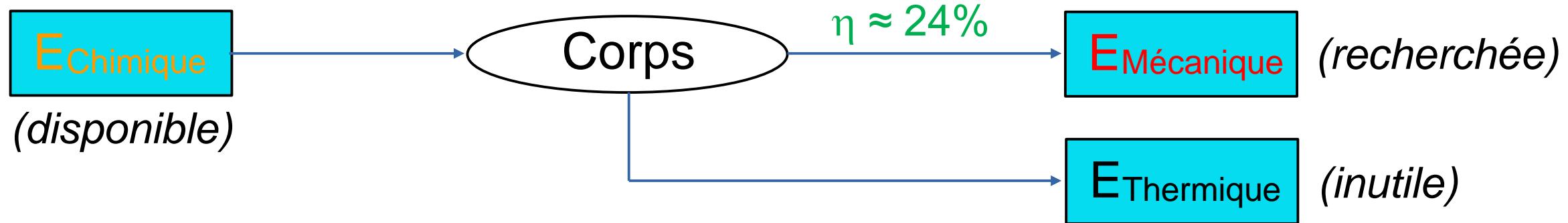
- Les **besoins quotidiens** en énergie du corps humain sont de l'ordre de **10 000 kJ par jour**.
- Cette valeur peut être multipliée ou divisée par un facteur 1,5 à 2 suivant le sexe, l'âge, le poids, l'activité physique...



Iron Biby

## 2. Métabolisation

- Cette énergie est apportée au corps sous forme d'**énergie chimique**, par les aliments que l'on ingère et qui sont métabolisés.
- Le rendement énergétique de la production d'**énergie mécanique** (travail des muscles) par le corps humain est de l'ordre de  $\eta \approx 24\%$  (Réf. [2])

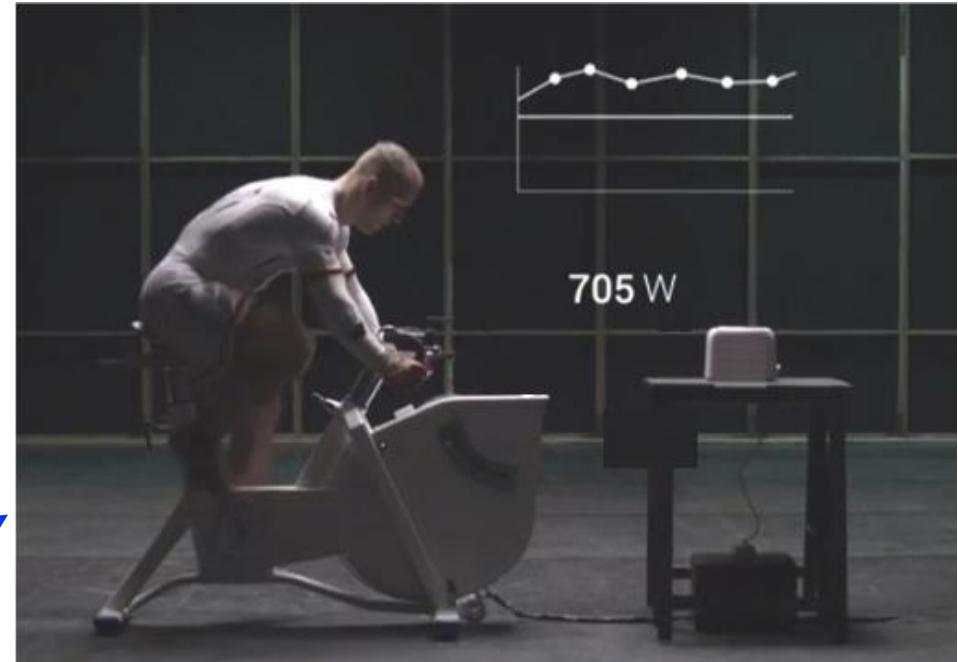


- A partir de ce rendement, on peut estimer le travail mécanique que le corps humain peut fournir quotidiennement :

$$W_{\text{corps}} \approx 10\ 000 \text{ kJ} \times 24\% = 2400 \text{ kJ}$$

### 3. Puissances du corps humain

- La puissance **thermique** dégagée par le corps humain au repos est de l'ordre de :  $P_{th} \approx 100 \text{ W}$  (thermogenèse).
- La puissance **mécanique** produite par le corps humain au travail est variable :
  - $P_m \approx 0 \text{ W}$  (repos)
  - $P_m \approx 80 \text{ W}$  (continu)
  - $P_m \approx 500 \text{ W}$  (effort intense et court)
- NB : des sportifs de haut niveau peuvent produire jusqu'à 700 W, mais pendant des durées courtes.



(Réf. [3])

#### 4. Energie en kWh

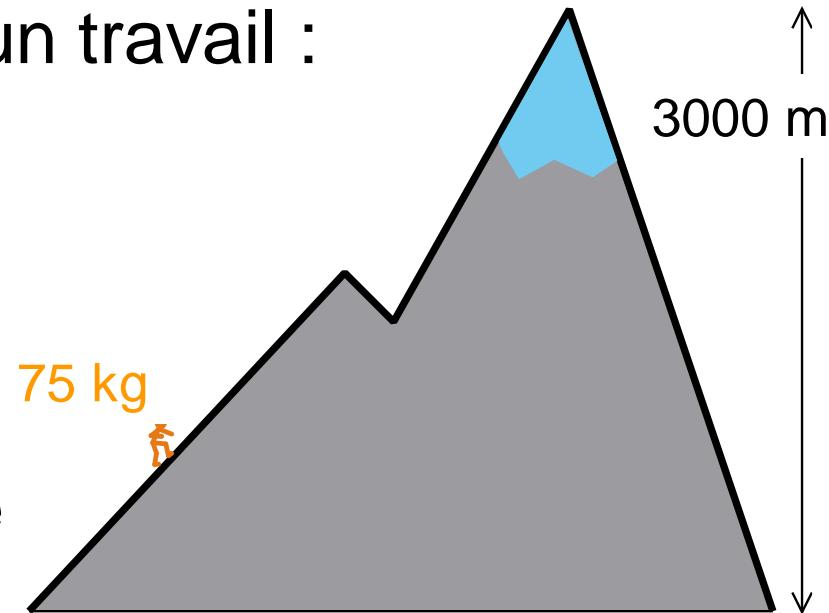
- Considérons un individu moyen qui fournit un travail mécanique continu de 80 W pendant 8 heures.
- A la fin de la journée, cet individu aura fourni un travail :

$$W_{\text{corps}} = 80 \text{ W} \times 8 \text{ h} \times 3600 \text{ s/h} \approx 2300 \text{ kJ}$$

(on retrouve la valeur obtenue à partir du rendement, 2 pages plus haut).

- Cela correspond par exemple à une personne de 75 kg qui monte un dénivelé de 3000 m :

$$E_{\text{pot}} = mgh = 75 \text{ kg} \times 10 \text{ m.s}^{-2} \times 3000 \text{ m} \approx 2300 \text{ kJ}$$



- Exprimée en kWh, cette énergie vaut :  $W_{\text{corps}} = E_{\text{pot}} = 0,64 \text{ kWh}$

## 5. Comparaison

- Le travail mécanique fourni par 1 individu en une journée est :

$$W_{\text{corps}} \approx 0,64 \text{ kWh}$$

- On verra un peu plus loin (§ ‘Notre consommation d’énergie’) que la consommation totale d’énergie par personne en France (électricité, chauffage, transports, biens de consommation...) s’élève à :

$$E_{\text{pers/j}} \approx 118 \text{ kWh}$$

- Autrement dit, nous consommons une énergie équivalente au travail de :

$$\frac{E_{\text{pers/j}}}{W_{\text{corps}}} \approx 184 \text{ humains !}$$

(Réf. [4]  
et [7])



## 6. Coût de l'énergie

- Ce qui précède peut être exprimé d'un point de vue financier :
- Si on devait payer **184 'esclaves'** (pour produire tout ce que nous avons l'habitude de consommer sous une forme ou sous une autre), le total s'élèverait à  $\approx 184 \times 1500$  € (sans les charges), soit :

**$\approx 276\,000$  € / mois**

- Si on estime ce coût financier mensuel de nos besoins en énergie à partir du prix du kWh électrique, on a :

**$118 \text{ kWh} \times 30 \text{ jours} \times 0,252 \text{ €/kWh} \approx 890 \text{ € / mois}$**

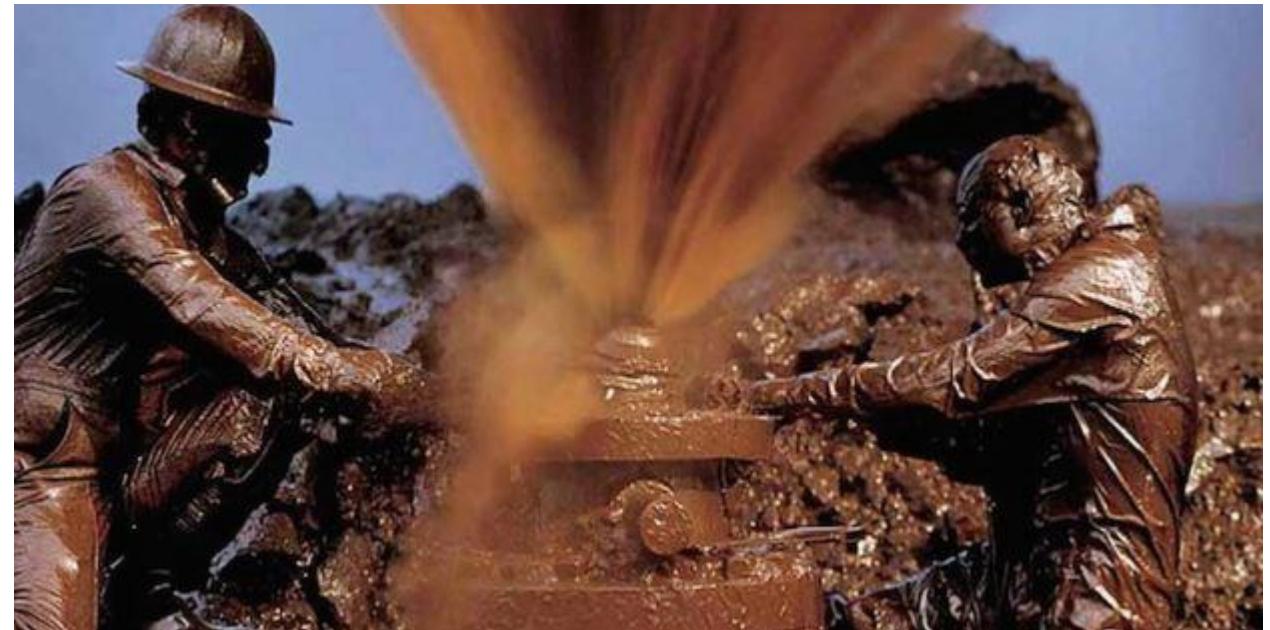
Prix du kWh TTC 

**→ C'est à dire plus de 300 fois moins !**



## 7. Conclusion

- L'énergie reste considérablement **peu chère** par rapport au coût du travail humain.
- Ceci explique en partie les **différences de niveau de vie** entre les pays industrialisés (accès à l'énergie, infrastructures, réseaux, machines) et les pays pauvres.
- Cette énergie peu chère entraîne une très forte « **addiction** » (cf. § ‘Effets de notre consommation d'énergie’)



## 1.4. L'énergie dans le monde

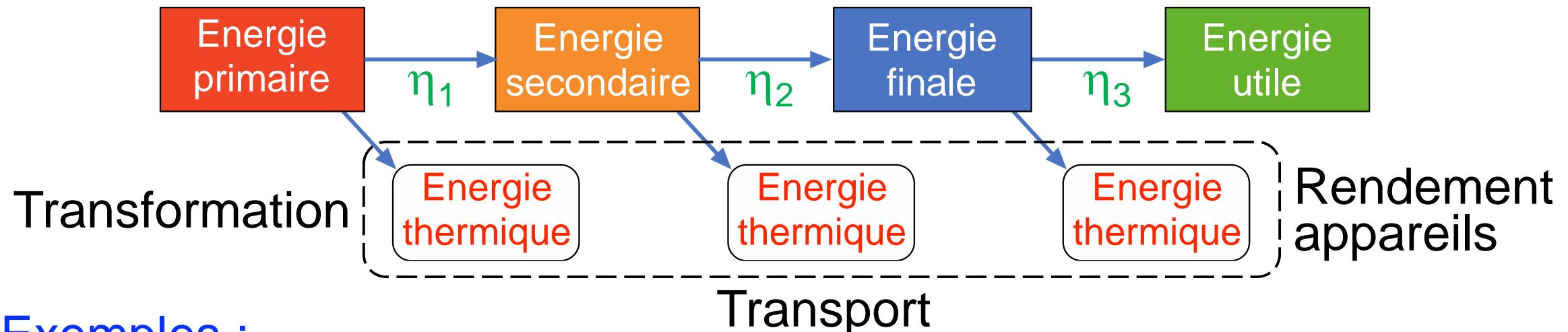
- On peut classer les différents types d'énergies de la façon suivante :
  - Energie  **primaire** : forme brute naturellement disponible qui n'a pas subi de transformation. Exemples : pétrole non raffiné, charbon, gaz naturel, minerai d'Uranium, rayonnement solaire, vent...
  - Energie  **secondaire** : énergie qui a subi des transformations mais n'a pas encore été acheminée jusqu'au lieu de consommation. Exemples : électricité, pétrole raffiné...
  - Energie  **finale** : énergie directement prête à être utilisée par les consommateurs (entreprises, particuliers...). Exemples : électricité au compteur, essence à la pompe...
  - Energie  **utile** : part de l'énergie finale qui procure le service recherché (voir plus loin).

- Densités énergétiques (MJ/kg) de quelques **énergie primaires** et **autres systèmes** (ordres de grandeur) :

Type	D (MJ/kg)	Remarque
Corps humain	$\approx 0,03$	Un jour de travail d'une personne de 75 kg
Accumulateur Li	$\approx 0,7$	Energie électrique
Bois	$\approx 16$	Energie thermique
Charbon	$\approx 24$	Energie thermique
Pétrole	$\approx 42$	Energie thermique (définition de la tep)
Gaz naturel	$\approx 50$	Energie thermique
Uranium	$\approx 4.10^5$	Energie thermique : centrales nucléaires
Combustible DT	$\approx 4.10^8$	Combustible fusion nucléaire (expérimental)

- D'autres critères interviennent dans les choix et les usages : stockage, transport, facilité d'emploi, polluants émis, ...

- Pour passer d'un type d'énergie au type suivant, il faut prendre en compte les rendements liés à chacune des transformations :



Exemples :

*Fossiles → électricité :*

$$\eta_1 \approx 33 \text{ à } 44 \%$$

*Solaire → électricité :*

$$\eta_1 \approx 23 \text{ à } 30 \%$$

*Eolienne → électricité :*

$$\eta_1 \approx 23 \text{ à } 30 \%$$

*Centrales électriques → consommateurs (lignes HT) :*  
 $\eta_2 \approx 97 \%$

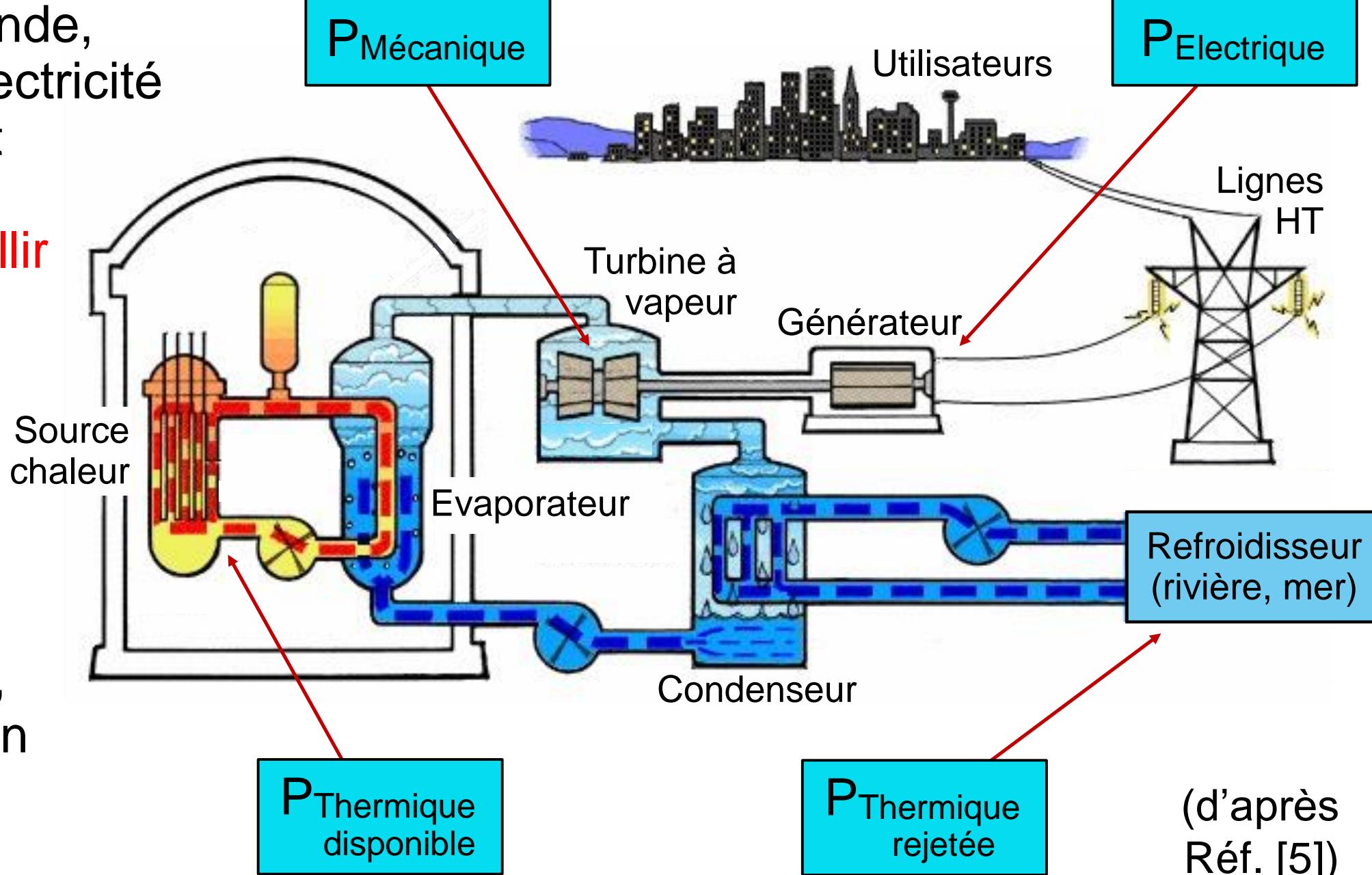
*Électricité → chaleur :*

$$\eta_3 \approx 100 \%$$

*Électricité → travail :*

$$\eta_3 \approx 90 \text{ à } 95 \%$$

- Dans le monde, 85% de l'électricité produite est obtenue en faisant **bouillir de l'eau**.

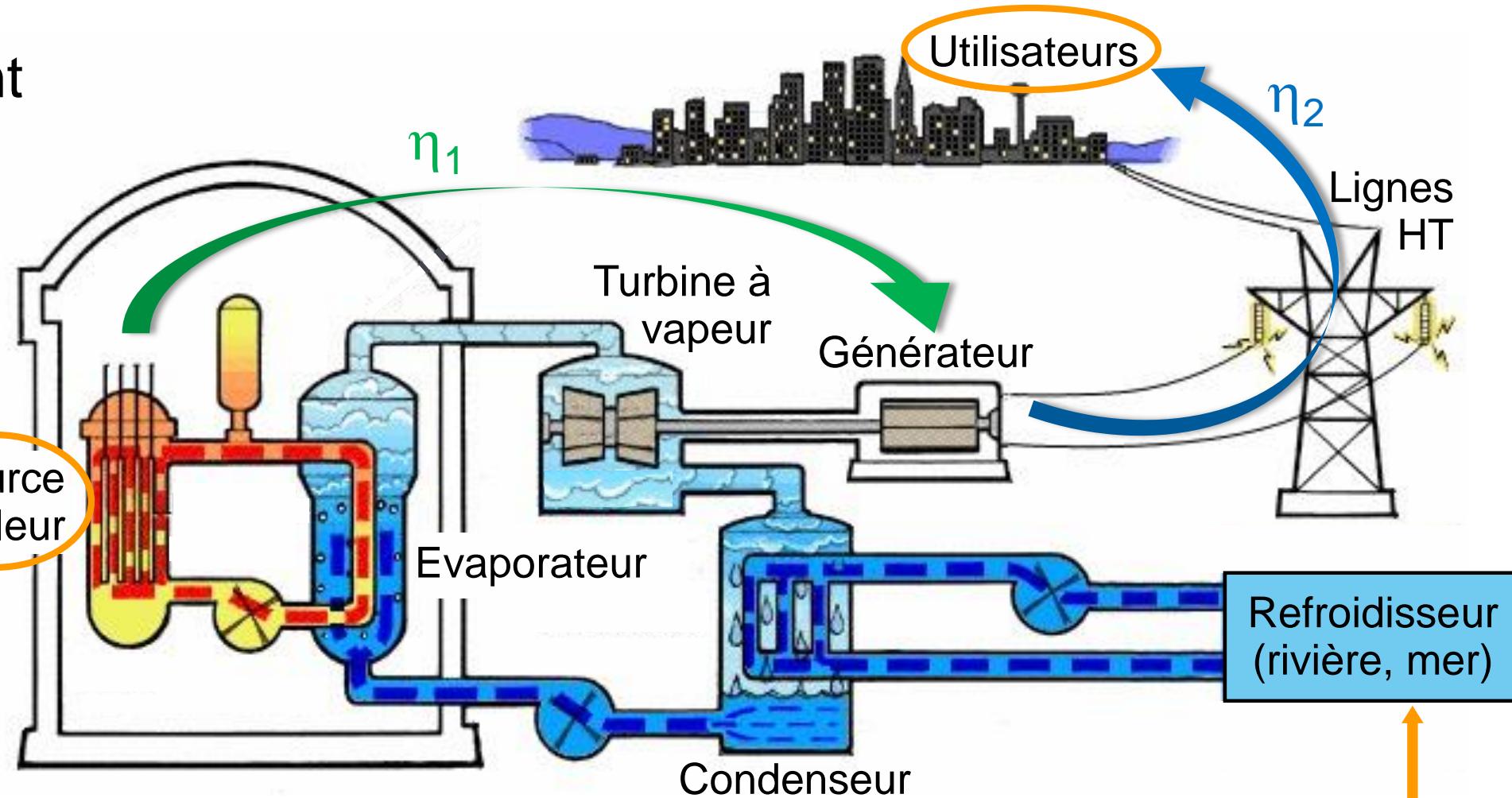


- La **vapeur** produite (à haute pression) entraîne une **turbine**, couplée à un **générateur** électrique.

(d'après  
Réf. [5])

- Le principe de fonctionnement est semblable pour les centrales à énergies fossiles.

Source chaleur



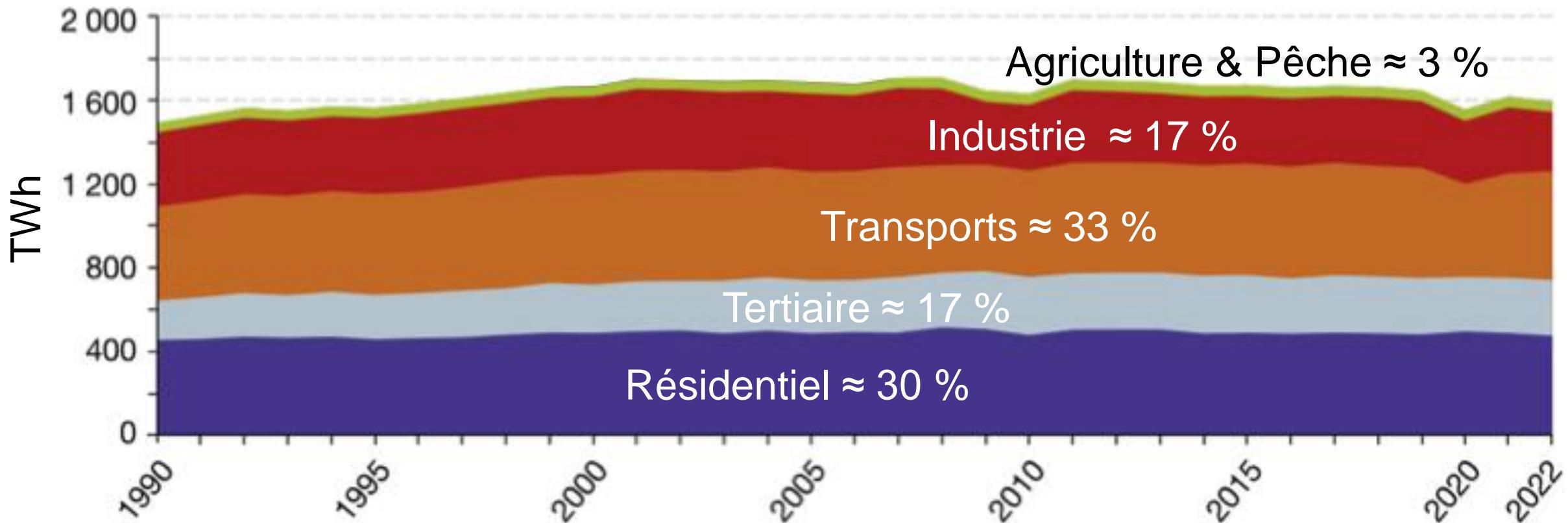
- Rendement transformation thermique → électricité :

$\eta_1 \approx 33\%$  Le surplus de chaleur est rejeté dans l'environnement

- Rendement transport électricité centrales → utilisateurs :  $\eta_2 \approx 97\%$

## 1.5. Notre consommation d'énergie

- Dans nos sociétés industrielles, nous utilisons de l'énergie... **partout et en permanence**. Exemple pour la France : (d'après Réf. [6])



➤ Consommation d'énergie **finale** en France **par secteur** (en TWh)

- Aperçu des différents secteurs :

- **Résidentiel** :

- Construction
- Chauffage
- Eau chaude
- Electroménager
- ...



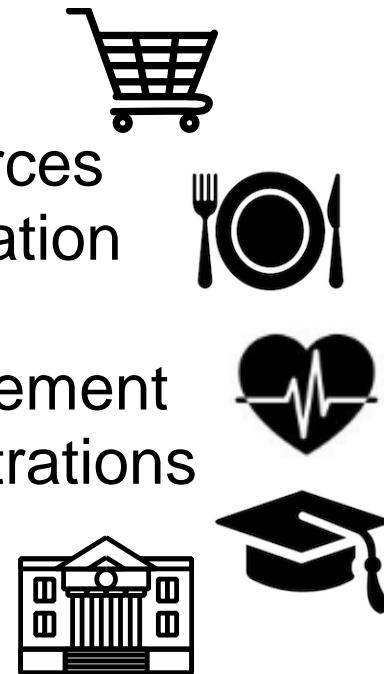
- **Transports** :

- Voitures
- Camions
- Avions
- Trains
- Navires
- ...



- **Tertiaire** :

- Commerces
- Restauration
- Santé
- Enseignement
- Administrations
- ...



- **Agriculture-pêche** :

- Engins agricoles
- Engrais
- Elevage
- ...

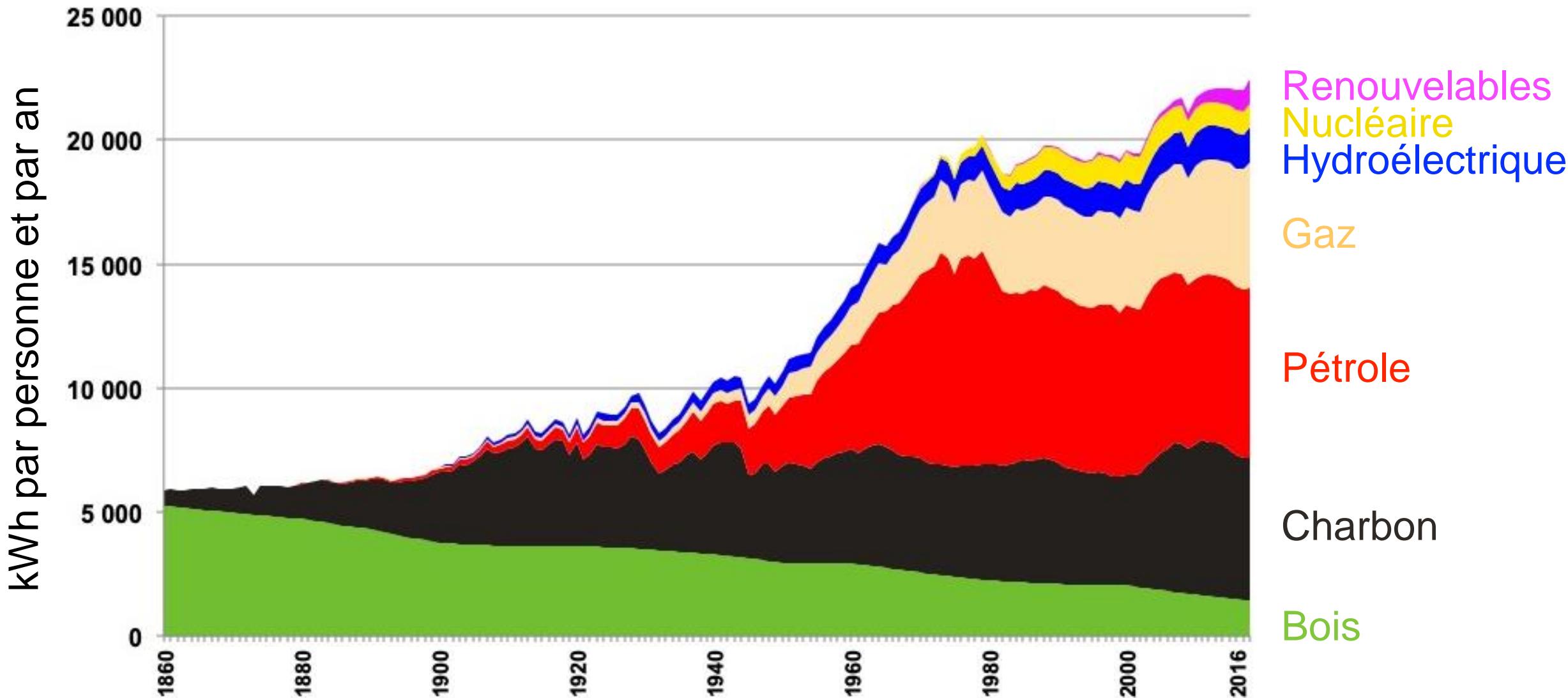


- **Industrie** :

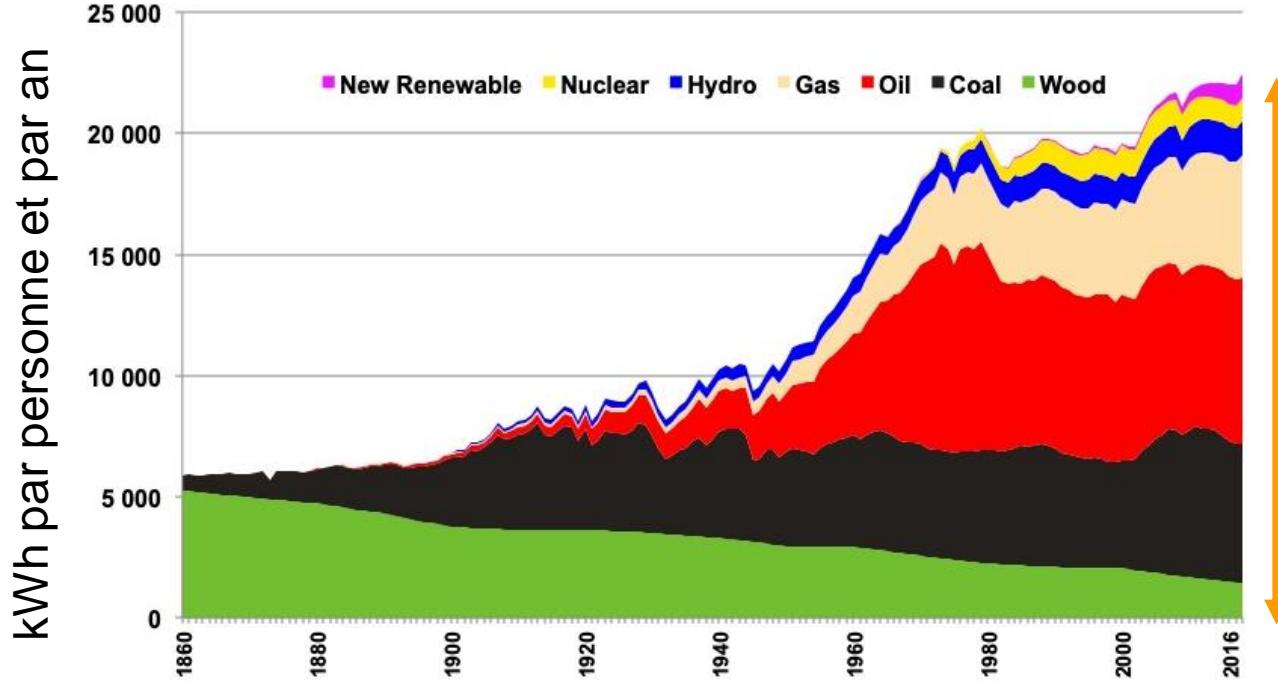
- Ciment
- Sidérurgie
- Chimie
- Internet
- Habillement
- Machines
- Mines
- ...



- Une consommation croissante depuis la révolution industrielle :



- Energie primaire consommée par terrien et par an (en kWh). (Réf. [7])

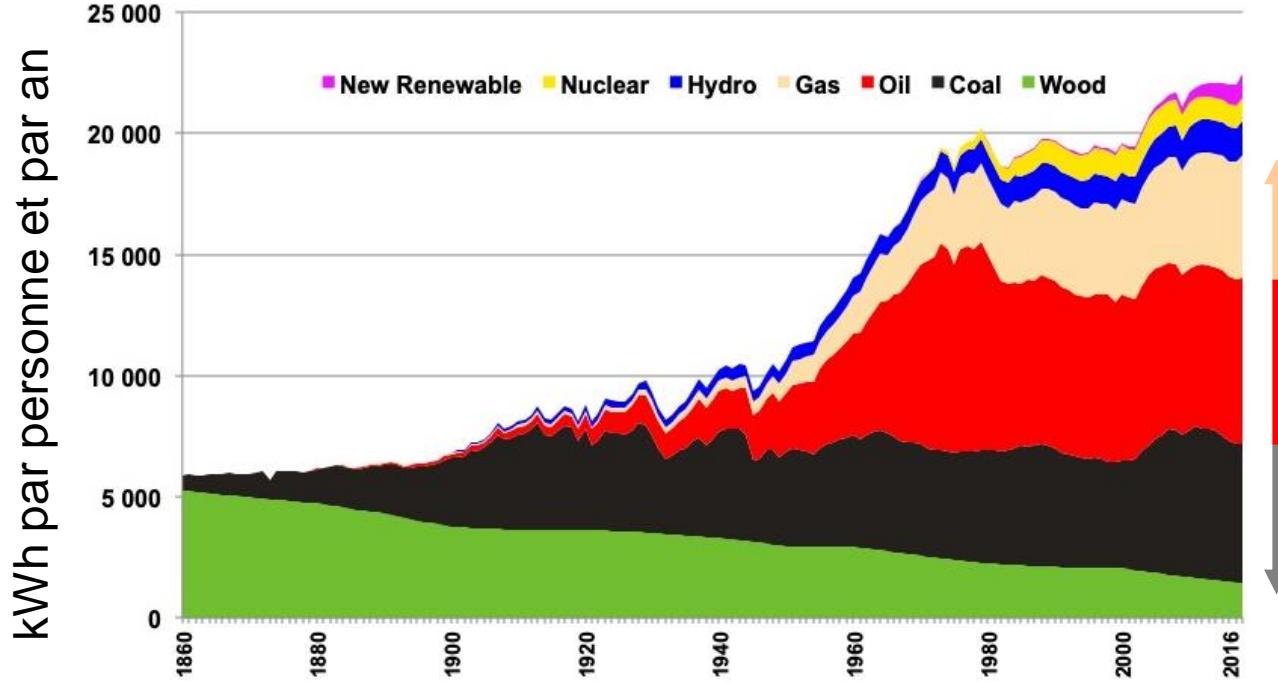


- Axe vertical : consommation moyenne en énergie  **primaire par personne et par an** :
- Aujourd'hui, elle s'élève à plus de **20 000 kWh** (moyenne mondiale).

- En **France**, la consommation d'énergie par personne et par an s'élève à  $\approx 43\,000 \text{ kWh}$ .
- C'est à dire une énergie  **primaire** consommée par jour de :

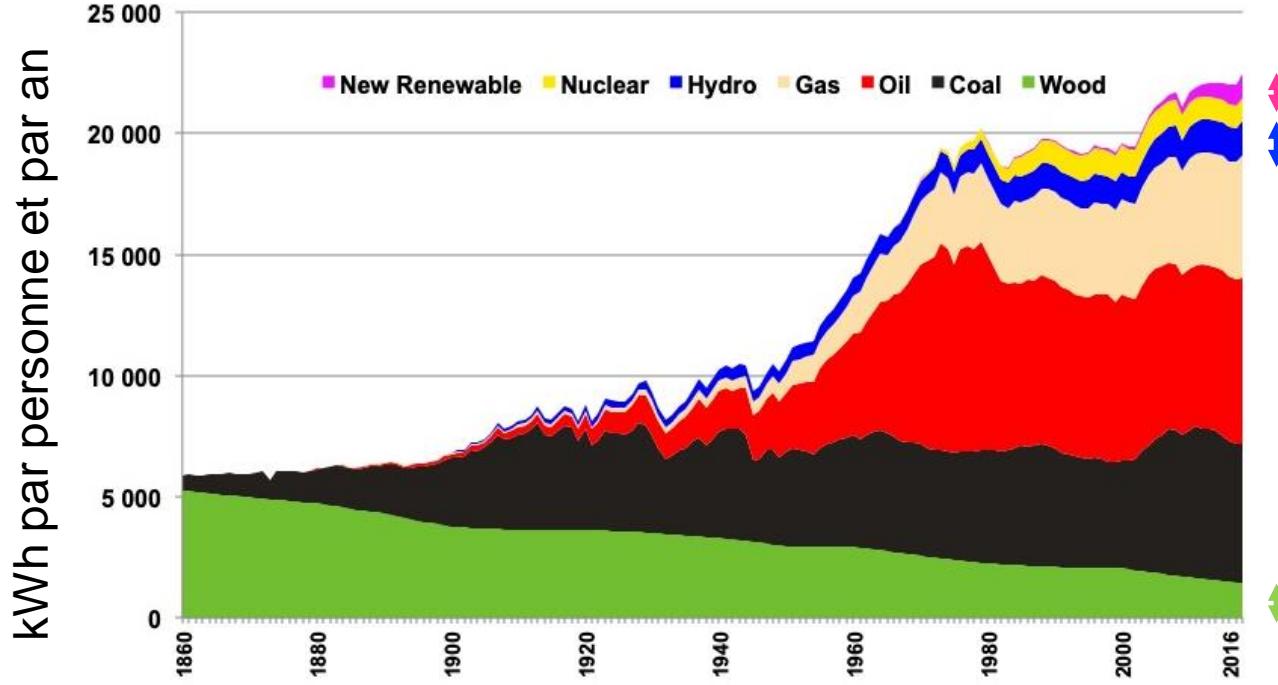
$$E_{\text{pers/j}} \approx 118 \text{ kWh}$$

(cf. § ‘Energie du corps humain’)

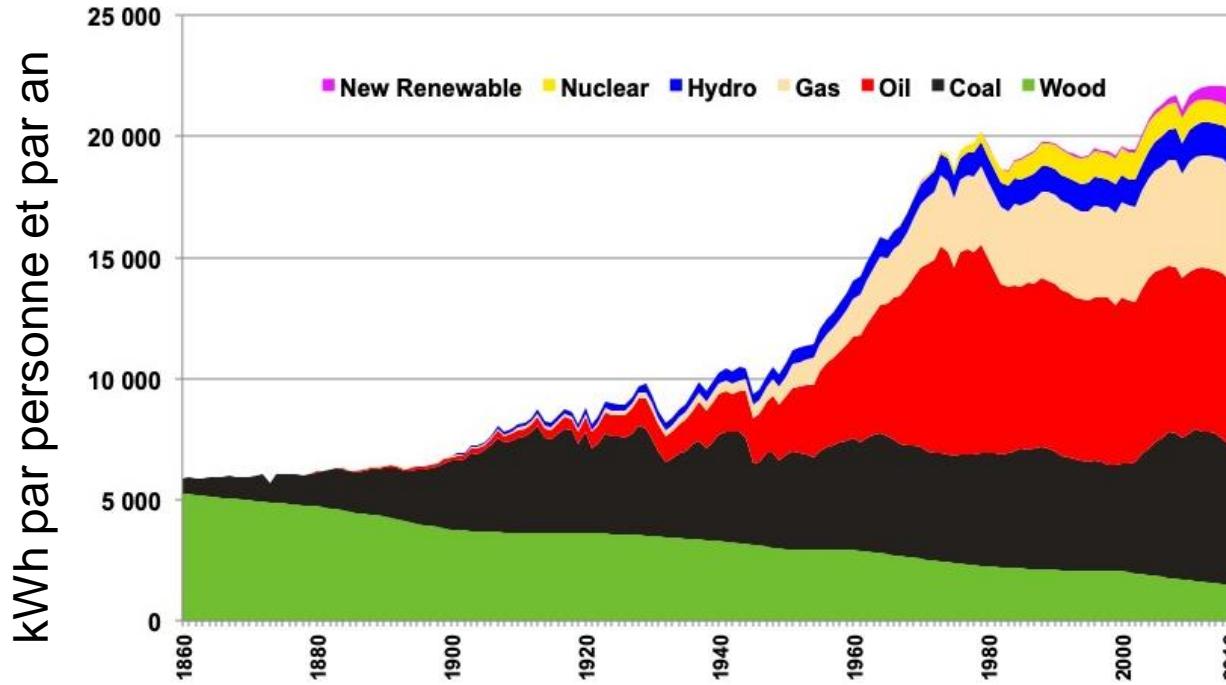


➤ En dépit des crises, des guerres, et autres chocs pétroliers, la consommation énergétique de l'humanité a continué à augmenter.

- Le monde reste aujourd'hui massivement dépendant des énergies fossiles ( $\approx 85\%$ ) : pétrole, charbon, gaz.
- Depuis un quart de siècle, l'énergie primaire qui s'est le plus développé est le charbon, notamment en Chine. (Réf. [8])



- L'énergie hydroélectrique se développe peu, en raison notamment de la rareté de nouveaux sites exploitables (pays industrialisés) et des coûts de construction (autres pays).
  
  
  
- Même si elles se développent rapidement depuis plus de 20 ans, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, biomasse et bois...) ne représentent qu'une fraction faible de notre 'mix énergétique' (13 % en France).



- A l'exception du **bois**, les énergies se sont ajoutées et ne se sont pas substituées les unes aux autres. Depuis 1,5 siècles, l'humanité n'a pas connu de '**transition énergétique**'.
- Avant de voir s'il est possible de réaliser aujourd'hui une vraie '**transition énergétique**', on va détailler la consommation liée aux usages du **numérique**.

## 1.6. Energie du numérique

- La ‘dématérialisation’ de nombreuses activités humaines est une illusion, puisqu’elle nécessite des :

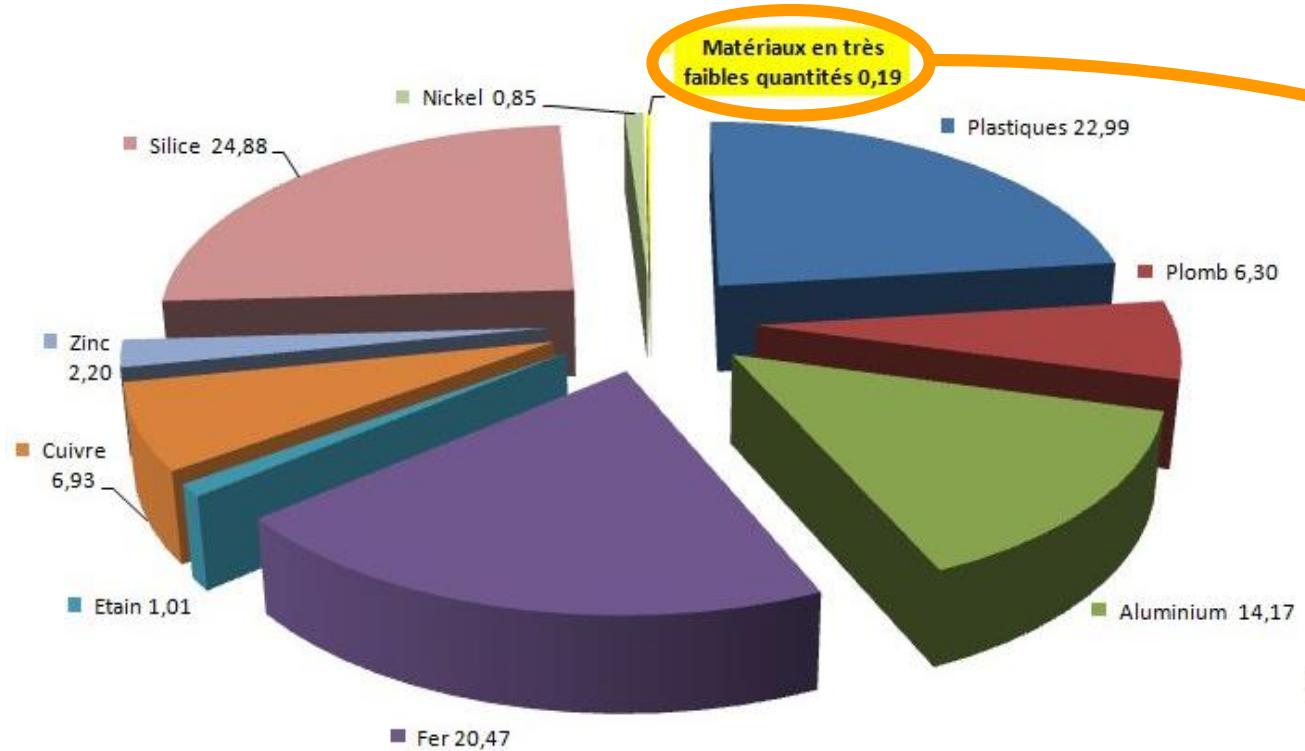
- **Terminaux** (ordinateurs, smartphones, ...)
- **Réseaux** (satellites, antennes, câbles, ...)
- **Serveurs** (clouds, ...)
- **Energies** (électrique donc fossiles !)



- Les équipements sont innombrables (2019) : (Réf. [9])
  - **34.10<sup>9</sup> équipements** (ordis., smartphones, objets connectés...)
  - représentant **223 millions de tonnes**
  - et contenant des **dizaines de matériaux** :

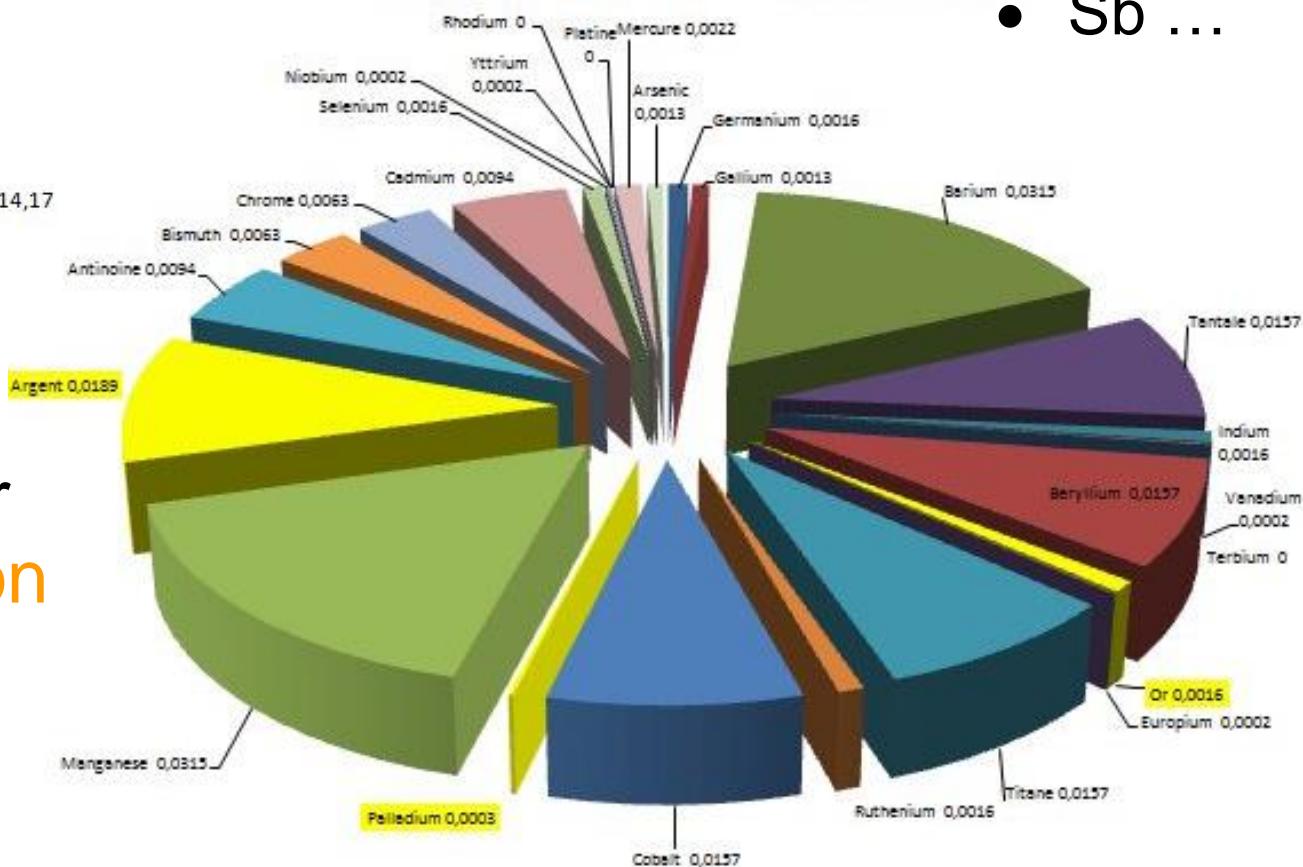
- Contenu d'un PC (% du poids total) :

(Réf. [10])



- Silice
  - Plastiques
  - Fer
  - Al
  - Cu
  - Pb ...

- Métaux pour la plupart non recyclables



- Croissance rapide ( $\approx 6\%$  par an) :
    - Volume de données transporté
    - Rapidité des échanges
    - Complexité des demandes (IA)



- Autres chiffres sur le numérique (2019) :

➤ 4,2 % de la consommation d'énergie primaire mondiale

➤ 3,8 % des émissions de GES mondiales

➤ 0,2 % de la consommation d'eau mondiale

➤ 5,6% de la consommation d'électricité mondiale

(Réf. [9] et [11])

- Consommations annuelles d'électricité (2019, en TWh) :

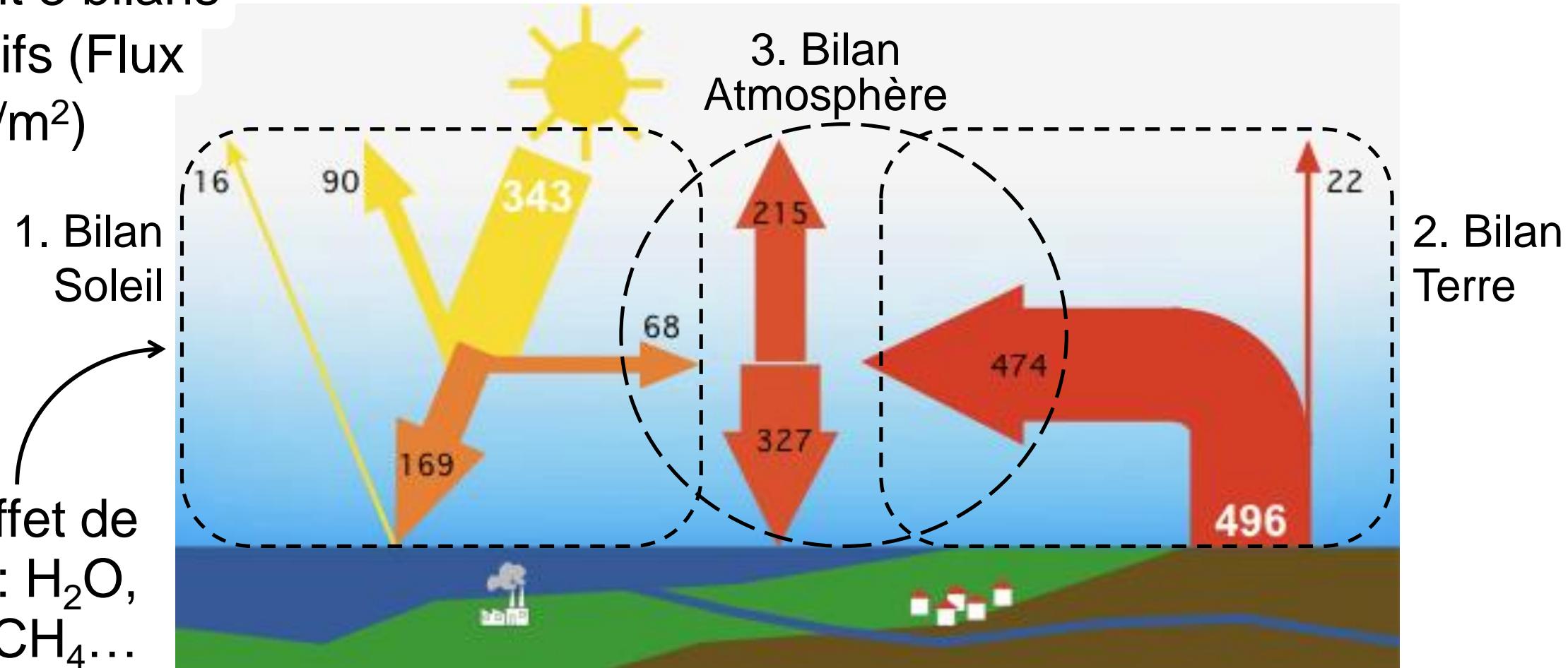
Chine	USA	France	Serveurs	Bitcoin	Norvège	Google	Facebook
6543	3989	449	205	143	124	12	3

# 1.7. Effets de notre consommation d'énergie

## 1. Effet de serre

On fait 3 bilans radiatifs (Flux en  $\text{W/m}^2$ )

$$T_{\text{Soleil}} \approx 5770 \text{ K} \text{ (centré } \lambda \text{ visible)}$$



$$T_{\text{Terre}} \approx 288 \text{ K} \text{ (centré } \lambda \text{ Infra-Rouge)}$$

## 2. Les Gaz à Effet de Serre (GES)

- Certains GES ne sont **pas naturellement** présents dans l'atmosphère.
- **PRG** = Potentiel de Réchauffement Global à 100 ans : p/r au CO<sub>2</sub>.

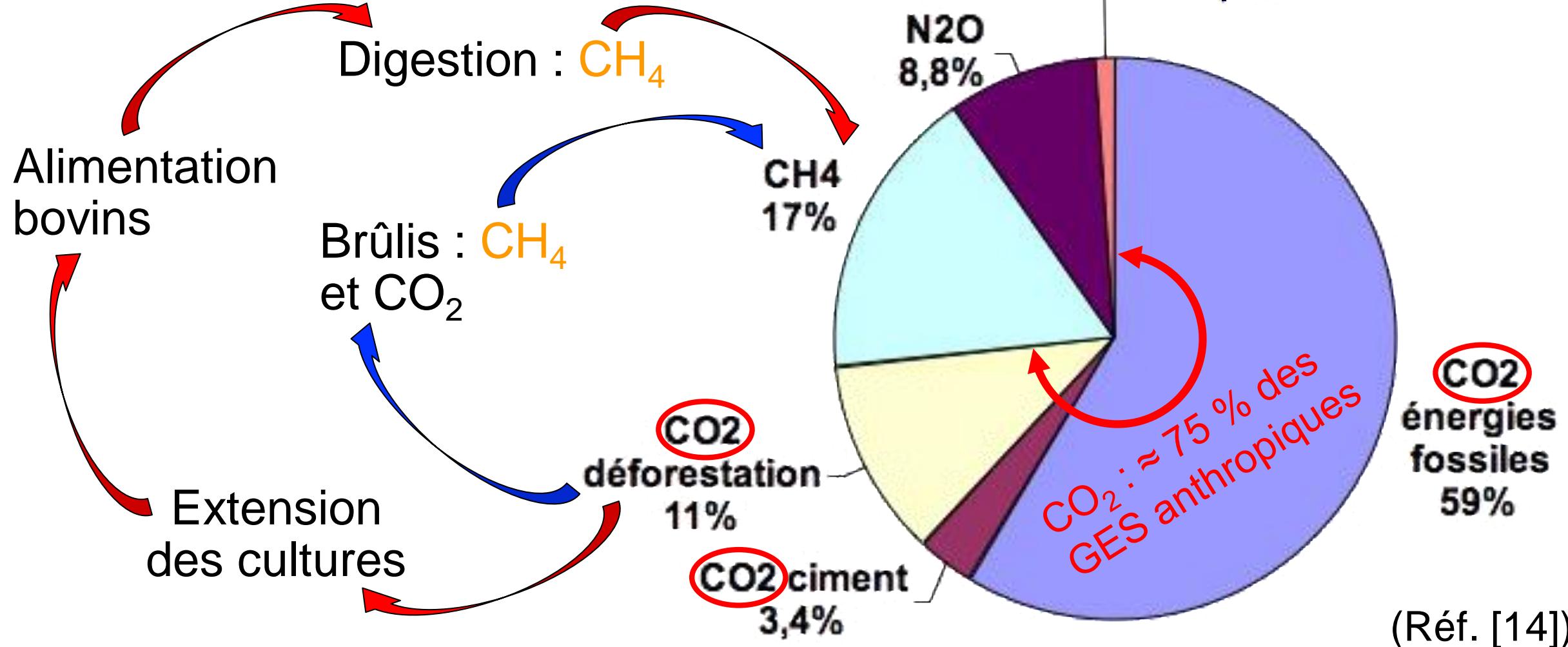
Gaz	Effet	Remarque	Durée de séjour dans l'atm.	PRG
H <sub>2</sub> O	60 %	Evaporation océans	≈ quelques jours	
CO <sub>2</sub>	26 %	↗ anthropique	≈ 1 siècle	1 (référence)
O <sub>3</sub>	8 %	Sensible CFC		
CH <sub>4</sub>	6 %	↗ anthropique	≈ 12 ans	28
N <sub>2</sub> O		↗ anthropique	≈ 110 ans	273
CF <sub>4</sub>	-	100% anthropique	≈ 50 000 ans	7400
CHF <sub>3</sub>	-	100% anthropique	≈ 230 ans	14 600

- La nocivité d'un GES dépend de sa concentration et de son PRG.

(Réf. [12] et [13])

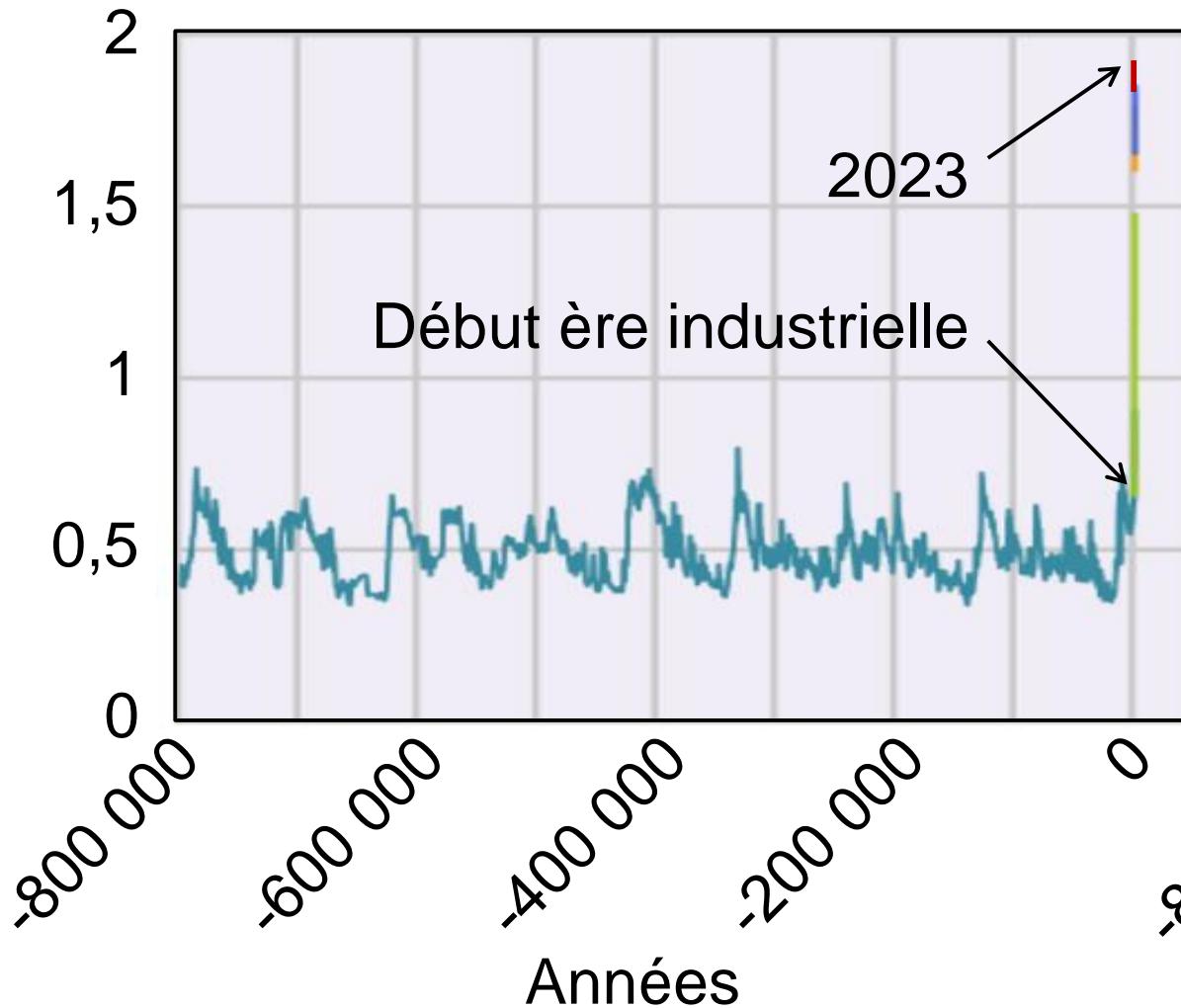
### 3. Les GES d'origine anthropique

- Des cycles complexes : exemple du CH<sub>4</sub>

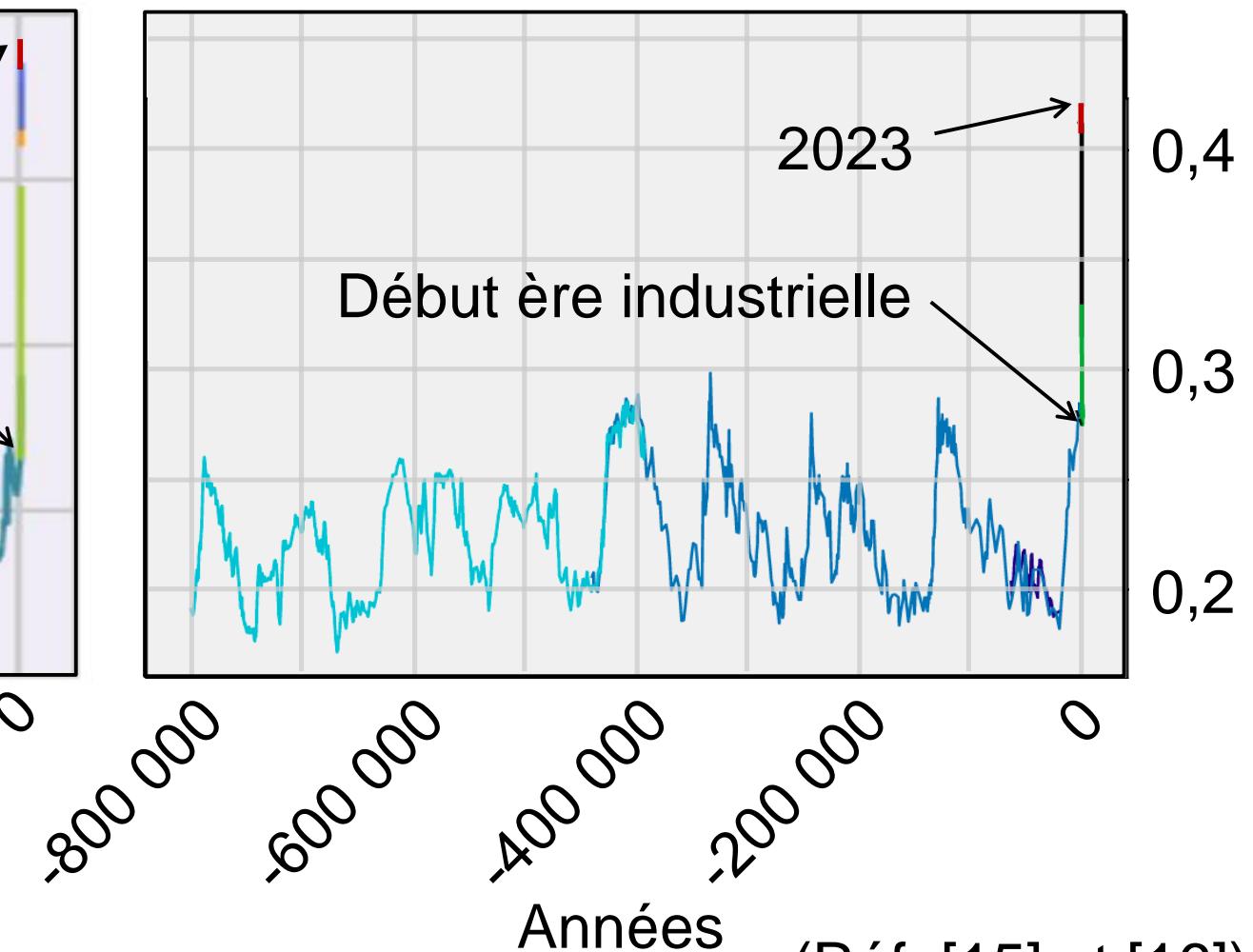


## 4. Evolution des GES anthropiques

- Concentration  $\text{CH}_4$  (en  $10^{-9}$ )



- Concentration  $\text{CO}_2$  (en  $10^{-3}$ )



(Réf. [15] et [16])

## 5. Evolution de la température moyenne de la Terre

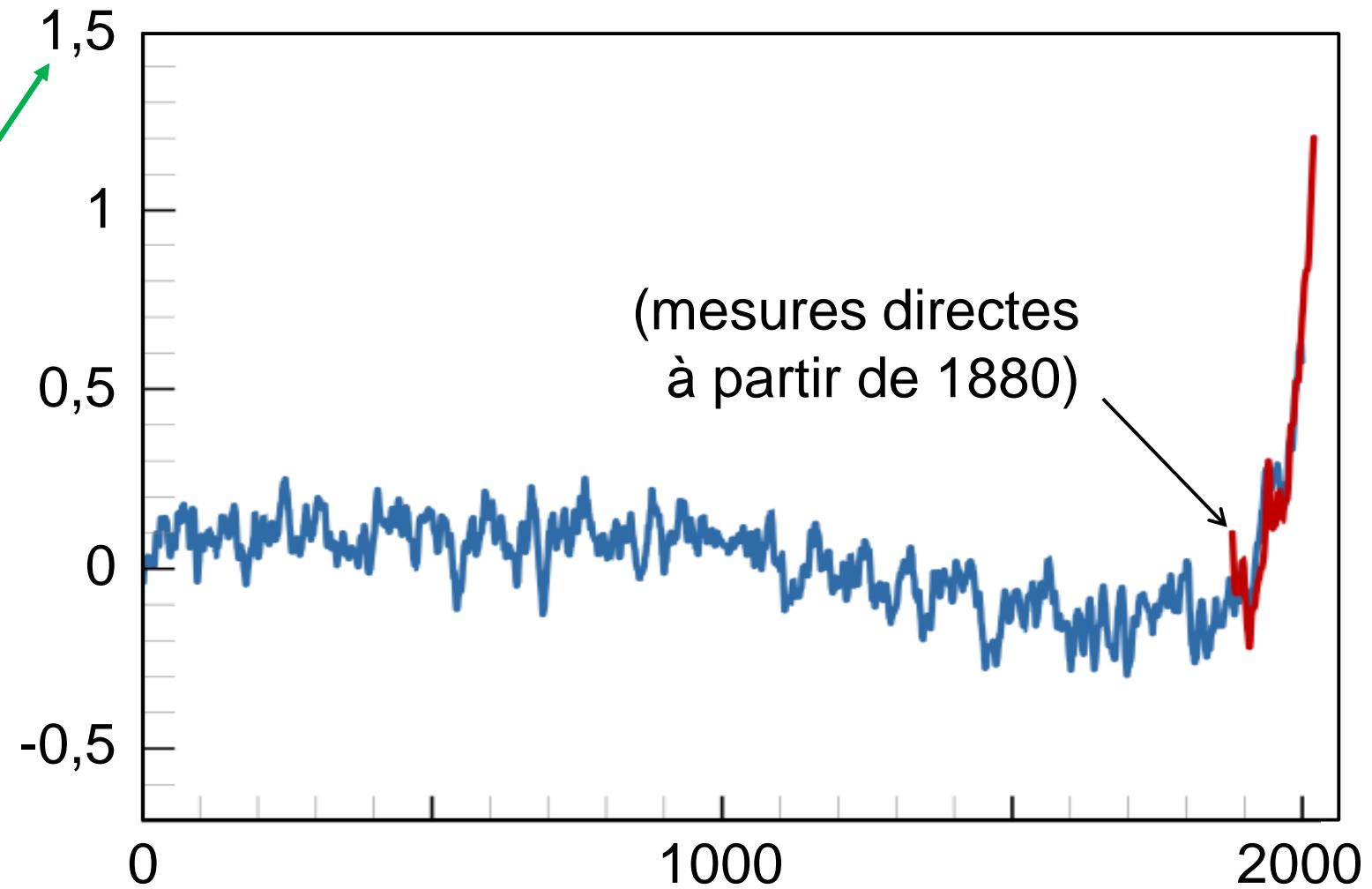
- Ecarts de température (en °C) depuis l'ère préindustrielle :

- Accords de Paris

(COP 21) :

*« maintenir  
l'augmentation de  
la température  
mondiale nettement  
en dessous de  
2°C d'ici à 2100 »*

(d'après Réf. [16])



## 6. Comment atteindre cet objectif ?

- Atténuation : tenter de limiter le changement climatique.
- Adaptation : s'acclimater au changement climatique.



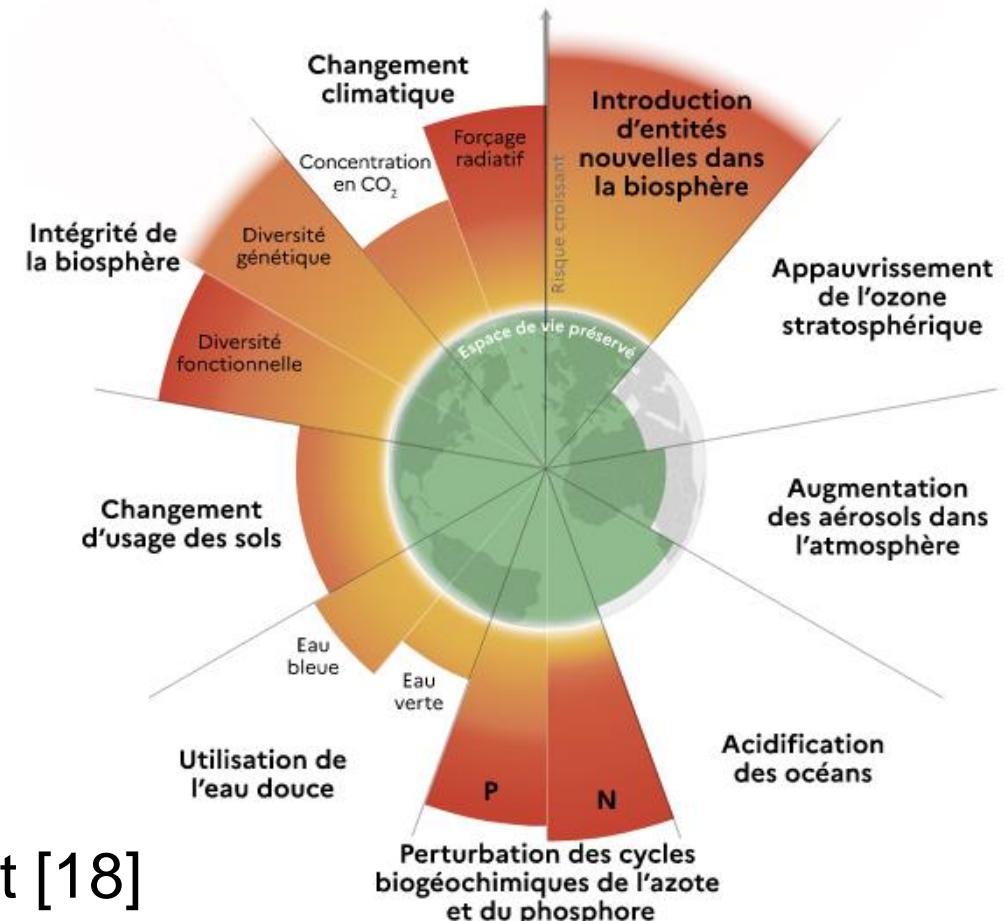
Modélisation des trajectoires :

- Neutralité Carbone d'ici la seconde moitié du XXI<sup>ème</sup> siècle.
- Non extraction des énergies fossiles à l'horizon 2050 : laisser sous terre : (Réf. [17])
  - 60 % du pétrole
  - 60 % du gaz
  - 90 % du charbon...



## 7. « Transition énergétique » ?

- À **consommation constante d'énergie**, le **remplacement des énergies fossiles** (85 %) par des **énergies renouvelables** nécessiterait d'extraire autant de métaux d'ici 2050, qu'on en a extrait depuis le début de l'humanité ! (Cu, Al, Ni, Li, Co...)
- Ceci contribuerait massivement au **dépassement des limites planétaires** :
  - Pollutions
  - Modification des usages des sols
  - Effondrement de la biodiversité
  - Epuisement des ressources d'eau douce ...



Réf. [1] et [18]

## 8. Une autre voie : la sobriété

- À des échelles **individuelle** et **collective** :
  - Logement de plus faible surface
  - Appareils électroménagers plus petits
  - Voitures plus petites et moins puissantes
  - Limitation des déplacements
  - Alimentation moins carnée
  - ... bref, consommer sensiblement moins.



# Conclusion - Références

- [1] <https://www.nature.com/articles/461472a> et [https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites\\_plan%C3%A9taires#Historique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Limites_plan%C3%A9taires#Historique)
- [2] [https://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/1526/MS\\_2000\\_10\\_1063.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://www.ipubli.inserm.fr/bitstream/handle/10608/1526/MS_2000_10_1063.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [3] Robert Förstemann : <https://www.dailymotion.com/video/x2snmfo>
- [4] [https://fr.wikipedia.org/wiki/March%C3%A9\\_aux\\_esclaves](https://fr.wikipedia.org/wiki/March%C3%A9_aux_esclaves)
- [5] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3031801>
- [6] <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/edition-numerique/chiffres-cles-energie-2023/8-consommation-finale-denergiepar-secteur-et>
- [7] <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/lenergie-de-quoi-sagit-il-exactement/> et <https://jancovici.com/transition-energetique/l-energie-et-nous/combien-suis-je-un-esclavagiste/>
- [8] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste\\_des\\_pays\\_par\\_production\\_de\\_charbon](https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_pays_par_production_de_charbon)
- [9] <https://www.greenit.fr/etude-empreinte-environnementale-du-numerique-mondial/>
- [10] <https://ecoinfo.cnrs.fr/2014/04/11/les-materiaux-dans-les-equipements-terminaux/>
- [11] « Transition énergétique : les défis de la défossilisation » Reflets de la Physique, n° 77, Février 2024 :  
<https://www.refletsdelaphysique.fr/articles/refdp/abs/2024/01/refdp2024-77/refdp2024-77.html>
- [12] <https://www2.cgd.ucar.edu/staff/trenber/Presentations/ClimSysLM.pdf>
- [13] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel\\_de\\_r%C3%A9chauffement\\_global](https://fr.wikipedia.org/wiki/Potentiel_de_r%C3%A9chauffement_global)
- [14] <https://jancovici.com/changement-climatique/gaz-a-effet-de-serre-et-cycle-du-carbone/quels-sont-les-gaz-a-effet-de-serre-quels-sont-leurs-contribution-a-leffet-de-serre/>
- [15] [https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_methane](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_methane)
- [16] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Changement\\_climatique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Changement_climatique)
- [17] Le Monde : [https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/09/08/pour-limiter-le-rechauffement-a-1-5-c-il-faudrait-laisser-60-du-petrole-et-du-gaz-dans-le-sol-et-90-du-charbon\\_6093946\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2021/09/08/pour-limiter-le-rechauffement-a-1-5-c-il-faudrait-laisser-60-du-petrole-et-du-gaz-dans-le-sol-et-90-du-charbon_6093946_3244.html)
- [18] Le Monde : [https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/05/09/extraire-des-metaux-sans-detruire-la-planete-l-autre-immense-defi-de-la-lutte-contre-le-rechauffement-climatique\\_6232303\\_3244.html](https://www.lemonde.fr/planete/article/2024/05/09/extraire-des-metaux-sans-detruire-la-planete-l-autre-immense-defi-de-la-lutte-contre-le-rechauffement-climatique_6232303_3244.html)
- Autres Réf. générales : [19] <https://planet-terre.ens-lyon.fr/ressource/rendement-energie.xml#sobriete>
- [20] <http://www-fusion-magnetique.cea.fr/energies/energie02.htm> [21] <https://climatenschemas.fr/>
- [22] <https://www.cea.fr/comprendre/Pages/energies/energie.aspx?Type=Chapitre&numero=3>
- [23] L'énergie durable, Pas que du vent ! <https://www.amides.fr/sewtha.html>

# Conclusion du Cours de Physique 1 - Mécanique

- Bases de la Mécanique du point matériel :
  - Système, repère
  - Position, vitesse, accélération, trajectoire
  - Forces conservatives et non conservatives
  - Énergie et puissance
  - Relation Fondamentale de la Dynamique
  - Mouvement harmonique
  - Défis liés à l'énergie
- Dans le Cours de Physique 2, vous aborderez l'électricité et l'optique.

# Mentions légales

---

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'Université Grenoble Alpes (UGA).

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Grenoble Alpes (UGA), et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.