

# UE Energie – Climat - Société

## Cours n°5 : Energie 1

Etat des lieux (énergie primaire)

Energie, puissance, rendement

Les chaines de conversion de l'énergie  
(en lien avec les usages sociétaux)

# Comment exploiter les transparents ?

## Quelques repères pour vous aider à hiérarchiser les informations données dans ce cours :

- 3 « niveaux » d'importance sont indiquées par un code en haut à droite : \_\_\_\_\_↑  
 N1 : contient des notions fondamentales, au cœur de l'UE (*ça tombera sûrement à l'examen ...*)  
 N2 : notions intermédiaires (*ça pourrait tomber à l'examen ...*)  
 N3 : pour votre culture générale (car y'a pas que l'examen dans la vie ...).
- Les formules ou les définitions les plus importantes sont encadrées. Les valeurs numériques à savoir (transparents N1 ou N2) sont en gras. Ex. : puissance consommée (monde) : **20 TW**.
- Lorsqu'un mot est en italique et surmonté du symbole †, une définition est donnée dans un transparent en Annexe (ou dans le Glossaire) en fin de document. Exemple : *Energie primaire*†.

[Facultatif] En bas à gauche : lien cliquable vers la référence scientifique dont sont extraites les figures ou les données principales (dans la mesure du possible, le texte et les légendes sont traduites en Français). Ces liens sont donnés à titre informatif ; il n'est absolument pas demandé de les consulter.

[Facultatif] En bas à droite : lien cliquable vers une référence ou un média qui prolonge le thème. Donné au titre de la curiosité, il n'est absolument pas requis de les consulter.

# L'énergie. Introduction

*a priori*  
abondante ...

Flux d'énergie solaire (au sommet de l'atmosphère) : 173 000 TW

Flux d'énergie (puissance) consommée par l'humanité (2022) : **20 TW**

} *facteur*  
*8650 !*

Mais les enjeux sont la captation et la conversion de cette énergie sous des formes utiles, économiquement viables et les moins impactantes possibles (pour les écosystèmes et nous-mêmes).

Les principes de la Physique mettent non seulement des **limites sur les quantités disponibles** de certaines sources mais aussi sur **l'efficacité dans les conversions** d'une forme d'énergie vers une autre (ex. : centrale thermique : 35 % de l'énergie thermique utilisée).

Au final, l'énergie est une denrée précieuse (elle ne se consomme pas mais sa forme utile se dégrade en chaleur).

Il n'existe pas d'énergie *propre* (à grande échelle) :

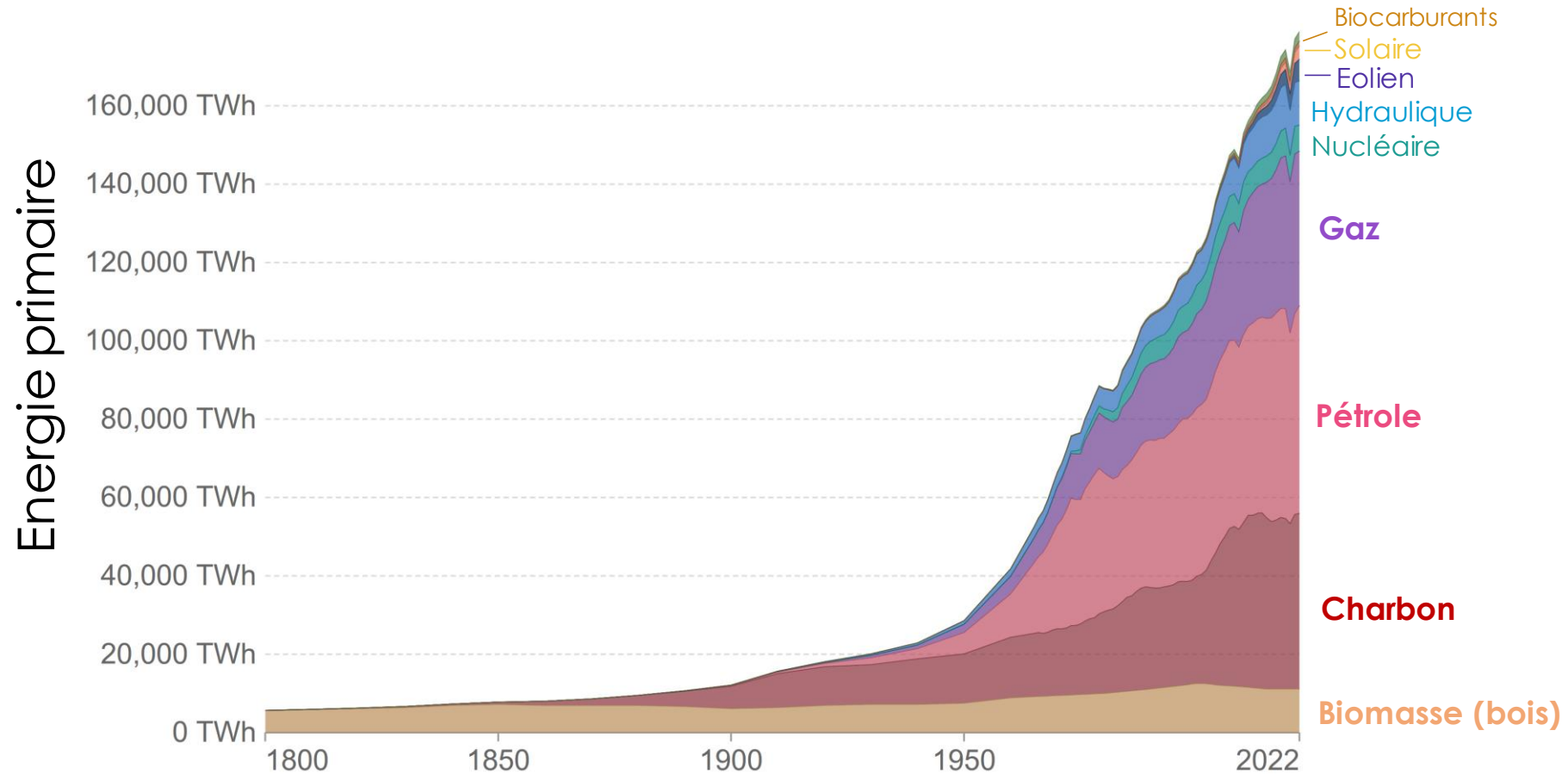
- énergies fossiles : CO<sub>2</sub>, extraction minière
- énergie nucléaire : déchets radioactifs, risque d'accidents relarguant de la matière radioactive, ...
- énergies renouvelables (la plupart très diffuses) : infrastructures intrusives, forte emprise au sol, matériaux

Mais il existe de vrais avantages à (re)transiter vers les énergies renouvelables dans le cadre d'un usage privilégiant efficacité et sobriété :

- se libérer des énergies fossiles (dangereuses pour le climat, et sources de pollutions atmosphériques)
- se libérer des énergies de stock (amenées à disparaître à plus ou moins court terme)
- diminuer notre dépendance énergétique

# Etat des lieux

## Consommation mondiale d'énergie primaire†

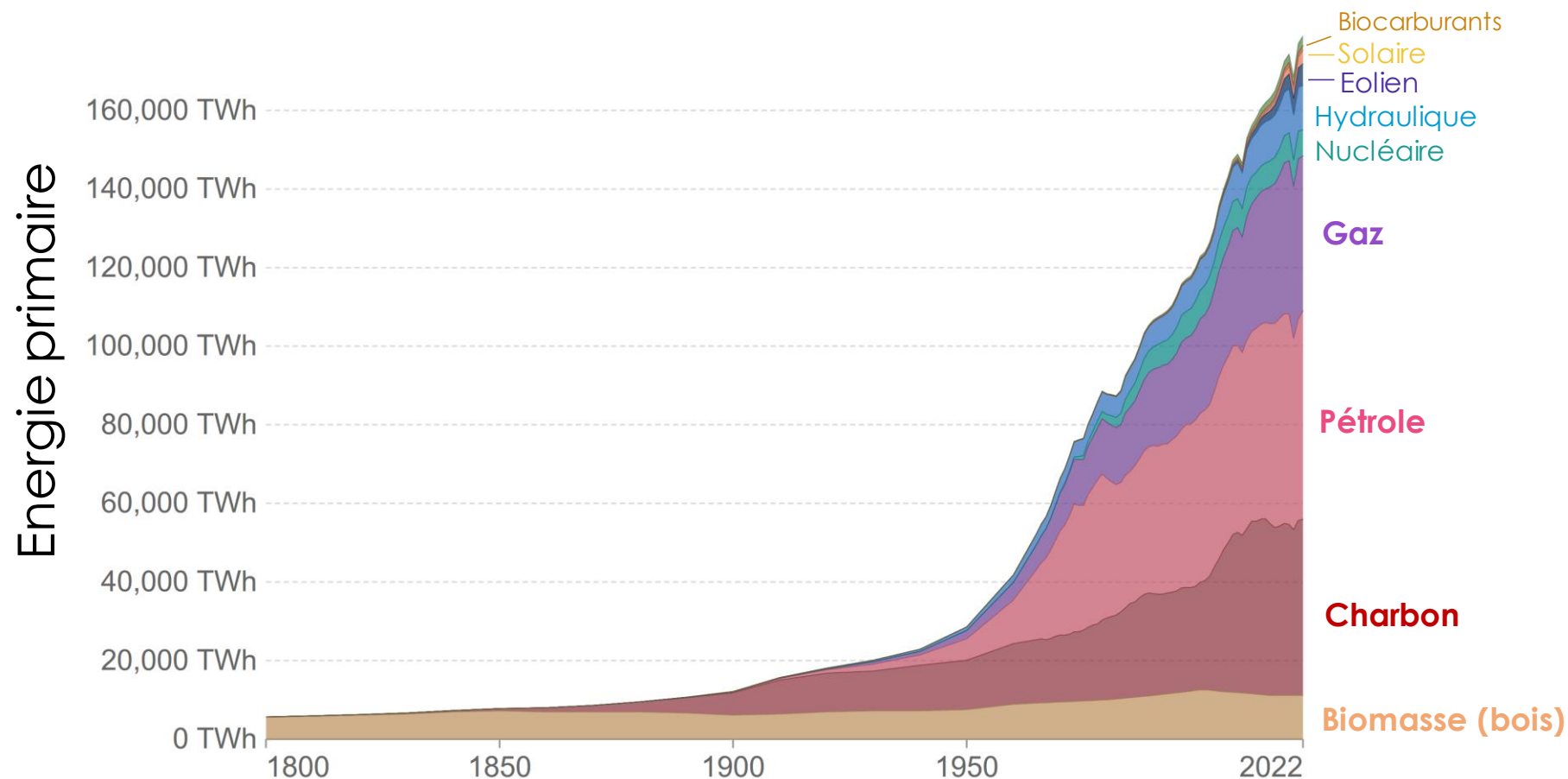


Aujourd'hui : ~ 180 000 TWh =  $180\,000 \times 10^{12} \text{ Wh} = 1.8 \times 10^{17} \times 3600 \text{ J} \sim 650 \times 10^{18} \text{ Joules}$  (650 exajoules)

**~ 2-3 % croissance annuelle depuis 1950**

# Etat des lieux

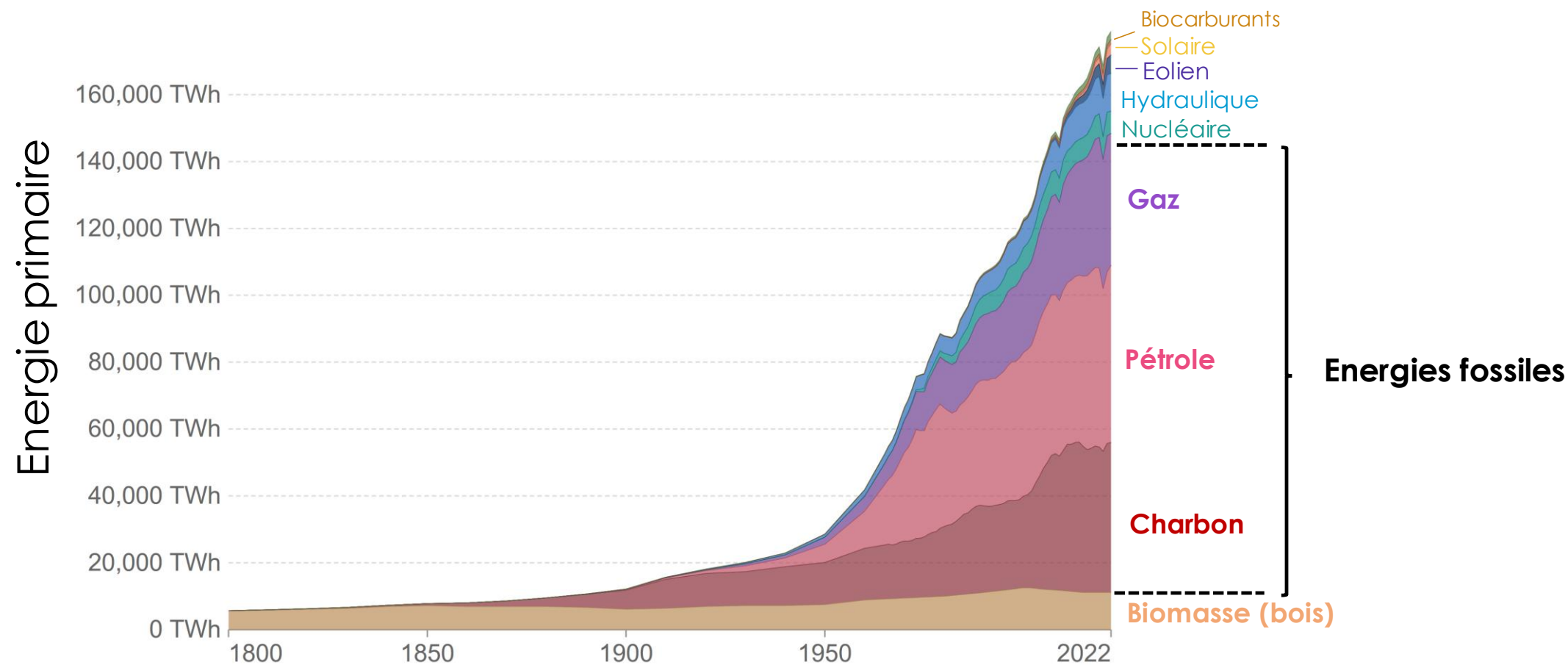
## Consommation mondiale d'énergie primaire†



**Historiquement, les différentes énergies se sont ajoutées, sans se substituer.**

# Etat des lieux

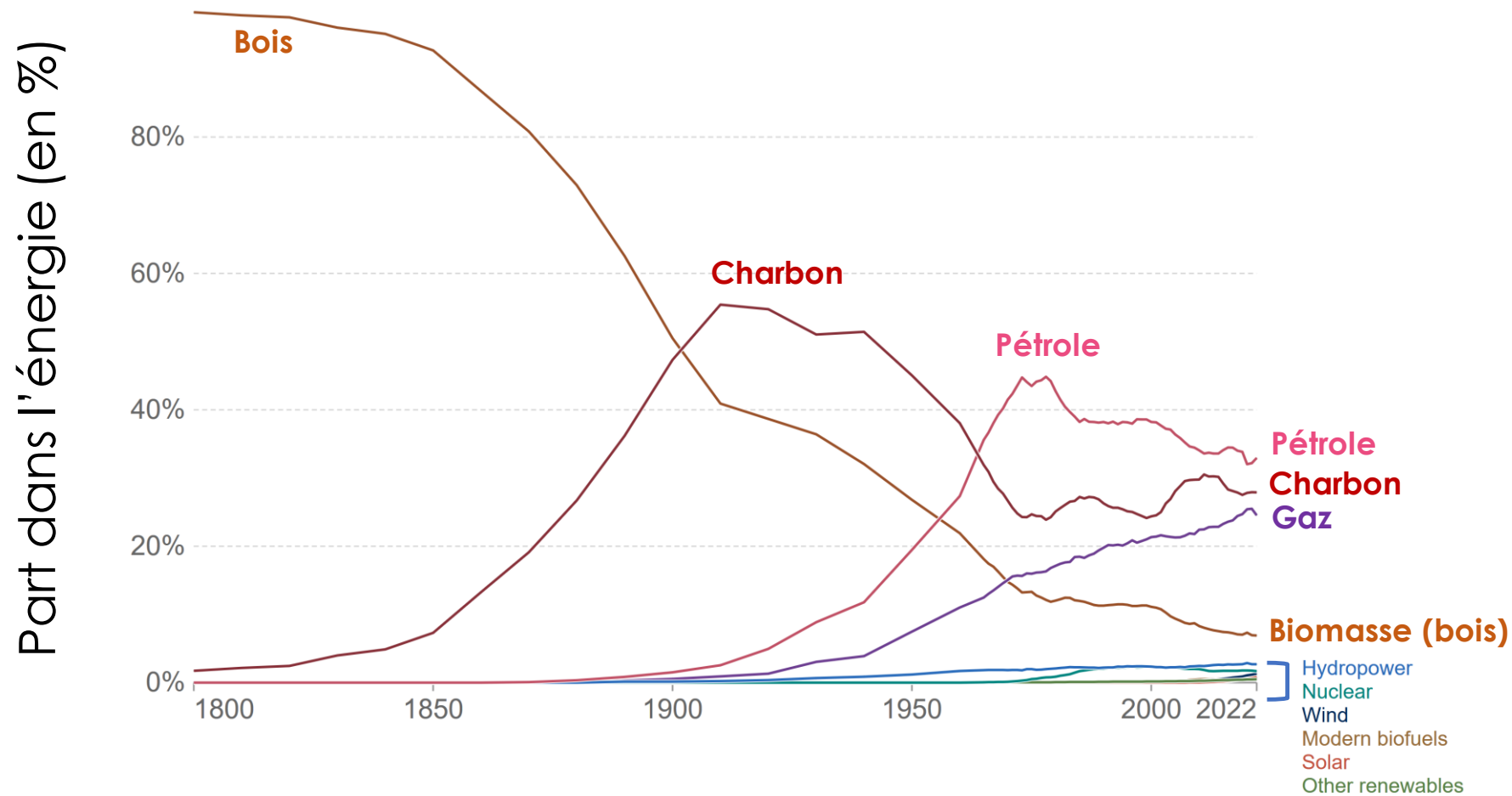
## Consommation mondiale d'énergie primaire†



Une énergie très largement carbonée (82 % en 2022)

# Etat des lieux

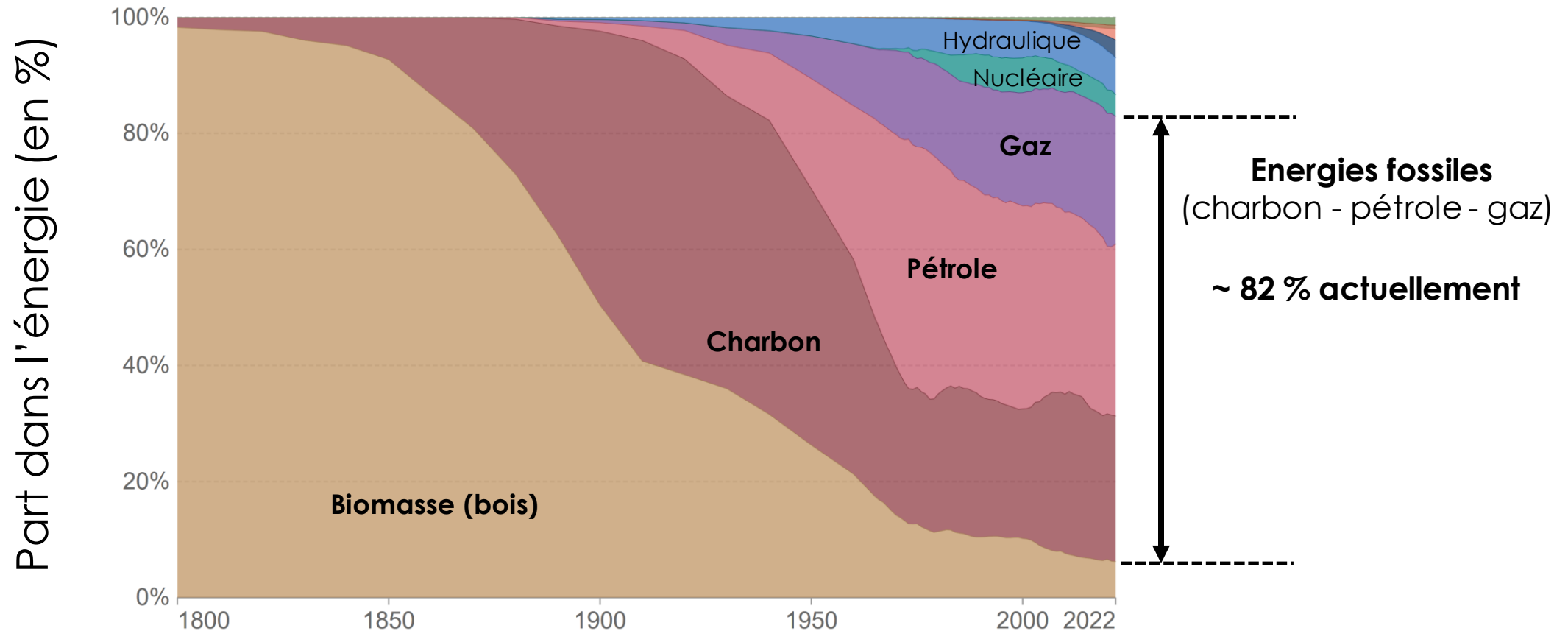
Part (en %) dans la consommation mondiale d'énergie primaire



Rq : Attention aux représentations en % quand on compare deux instants différents. Ex. : la part relative du charbon est en baisse (depuis ~1910) mais son volume absolu est en augmentation (Cf transparent précédent).

# Etat des lieux

Part (en %) dans la consommation mondiale d'énergie primaire

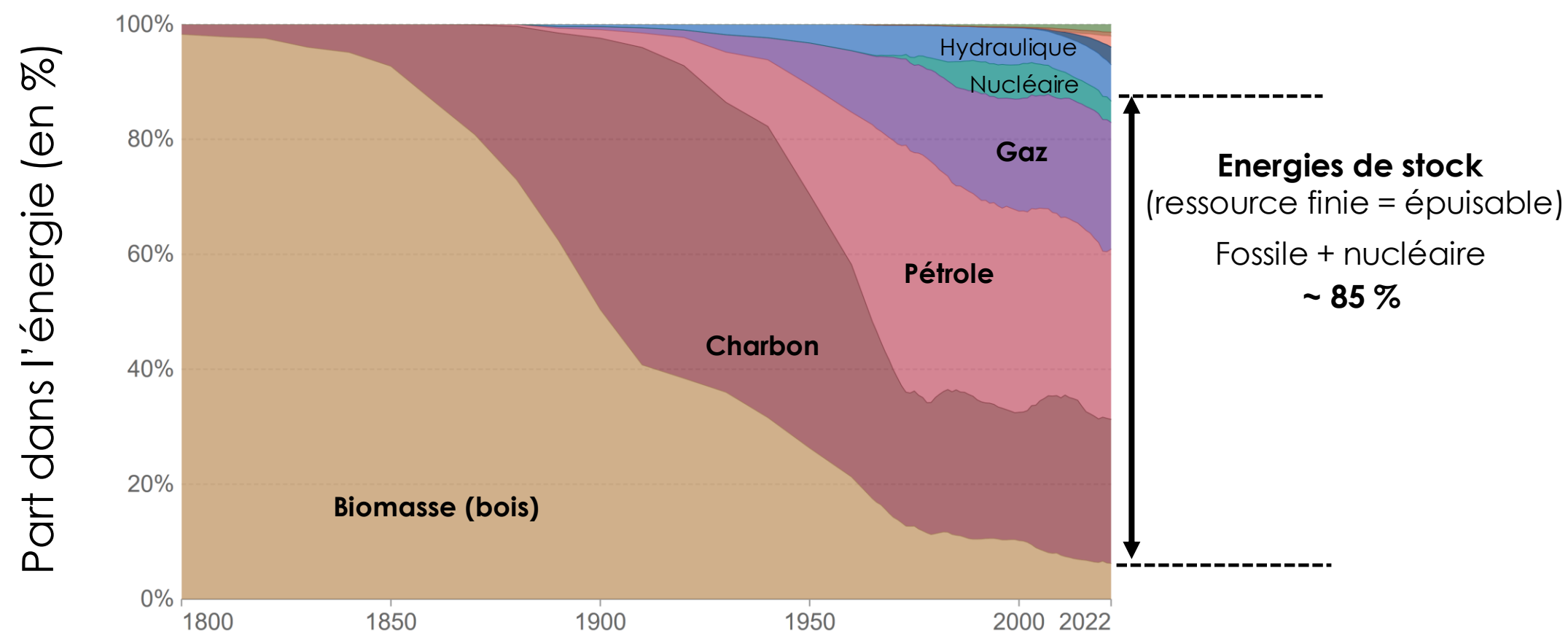


En 2022 : part des énergies *bas-carbone* (renouvelables + nucléaire) : 18 %



# Etat des lieux

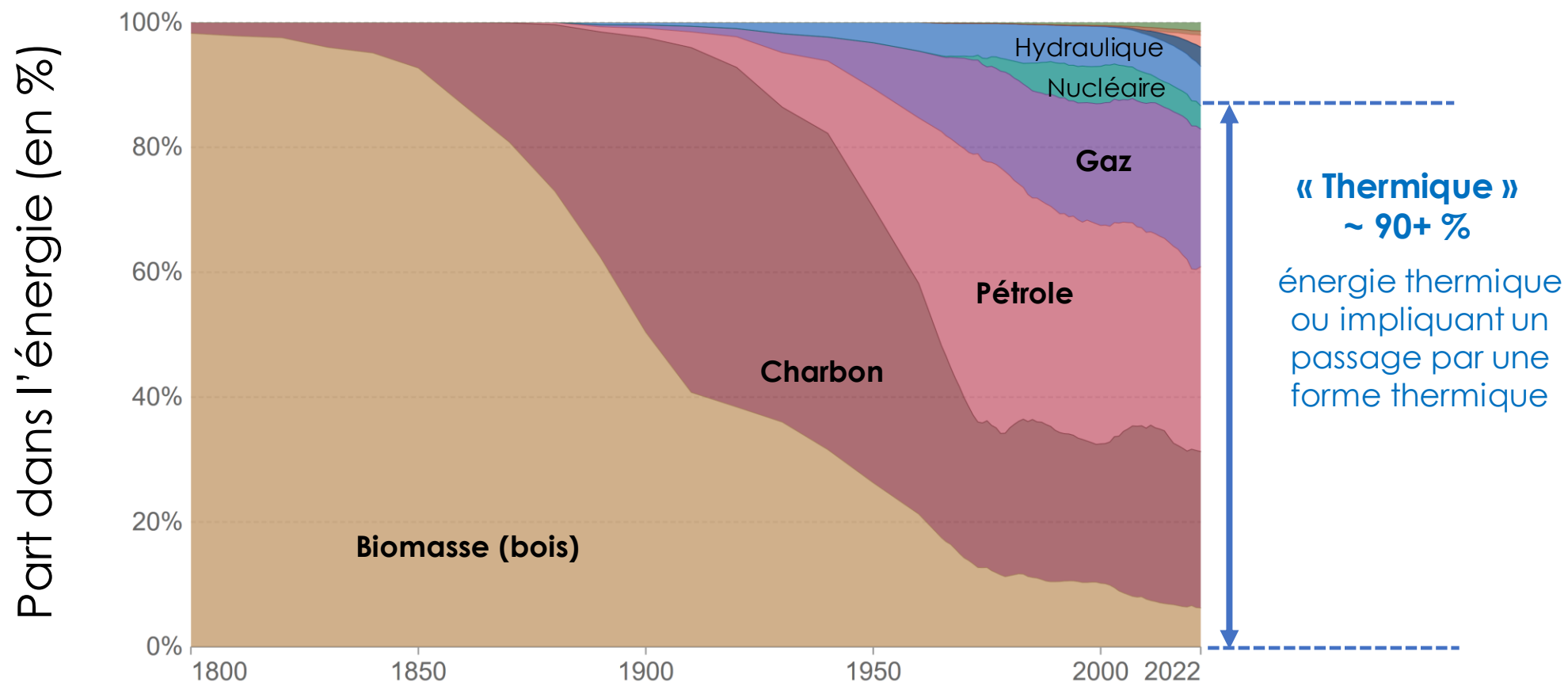
Part (en %) dans la consommation mondiale d'énergie primaire



En 2022 : part des énergies renouvelables : 15 % Monde (14 % France)

# Etat des lieux

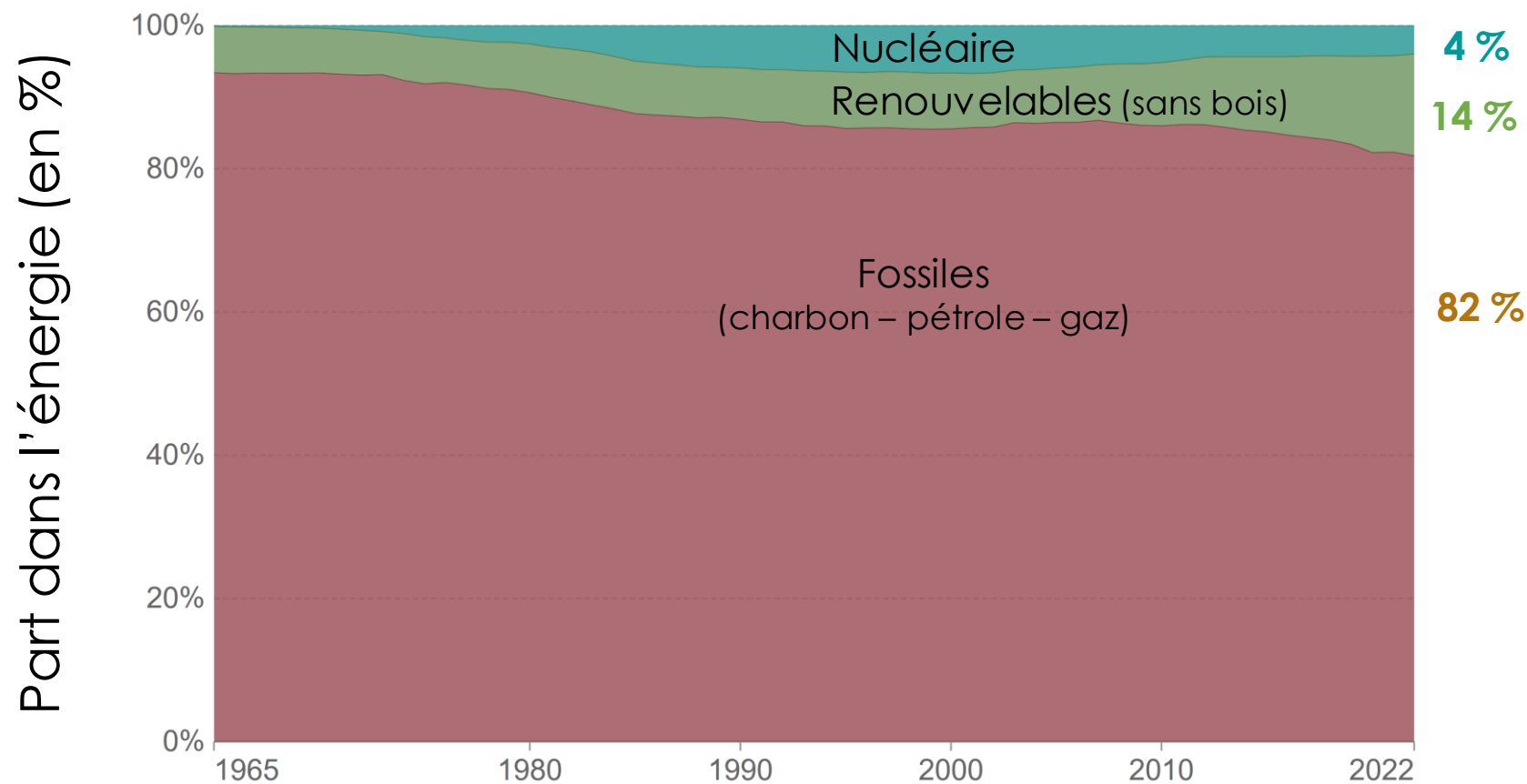
Part (en %) dans la consommation mondiale d'énergie primaire



« thermique » : fossile + bois + nucléaire + certaines énergies renouvelables (géothermie, solaire thermique, biogaz, déchets)  
= « tout » sauf hydraulique, éolien, solaire photovoltaïque

# Etat des lieux

Part (en %) dans la consommation mondiale d'énergie primaire  
Nucléaire / Renouvelables / Fossiles depuis 1965



En France, la part du nucléaire dans la consommation d'énergie est :

1

~ 70-75 %

~ 75 % : part dans l'**électricité**  
la plupart des années (63 % en 2022)

0%

0 

2

~ 35-40 %

~ 38 % : part dans l'**énergie primaire**  
la plupart des années (32 % en 2022)

0%

0 

3

~ 15-20 %

~ 17 % : part dans l'**énergie finale**  
la plupart des années (11 % en 2022)

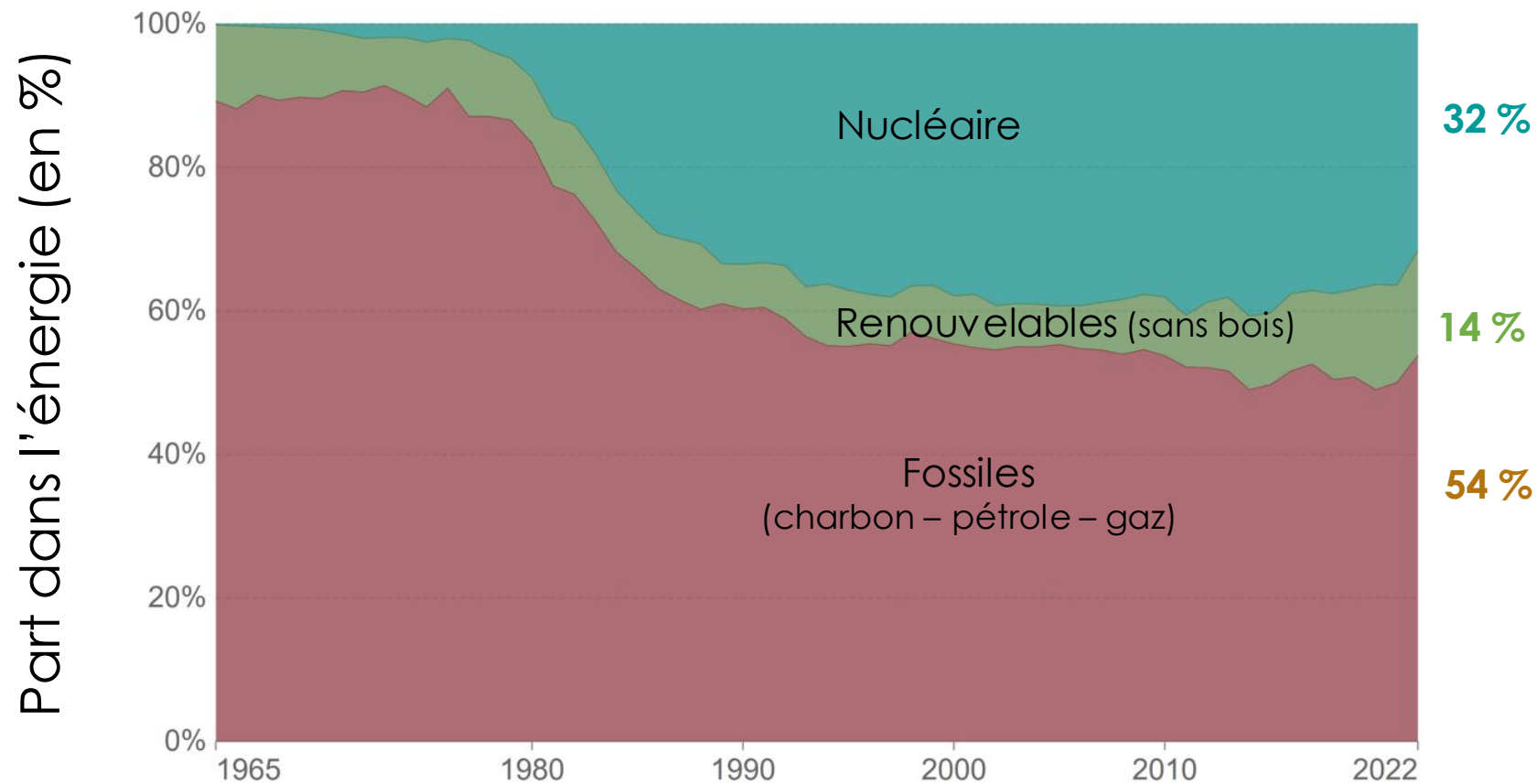
0%

0 

Et part dans l'**énergie utile** : ~ 25 %

# Aparté : le cas Français

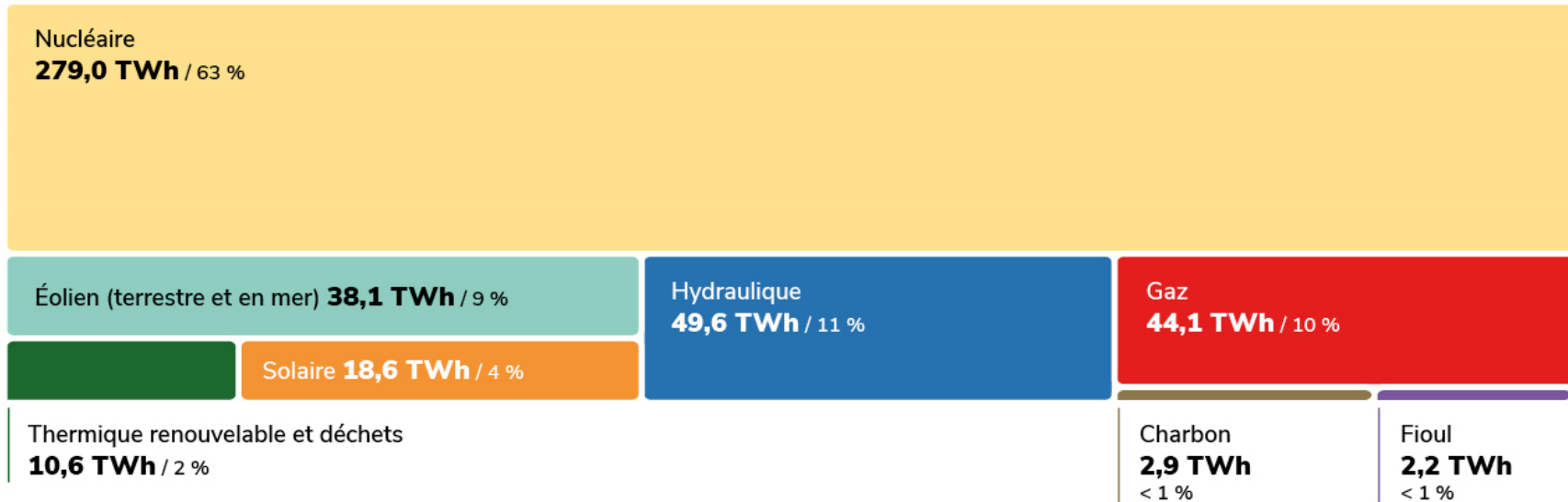
Part (en %) dans la consommation d'énergie primaire  
Nucléaire / Renouvelables / Fossiles depuis 1965



# Aparté : le cas Français

## Electricité produite en France en 2022 : répartition par filière

[RTE : Bilan électrique 2022](#)



**Production électrique totale** : 445,2 TWh

Production électrique **fossile** (gaz, charbon, fioul) : 49,2 TWh (11 %)

Production électrique **non-renouvelable** (fossile + fissile + déchets non-renouvelables) : ~ 330 TWh (74+ %)

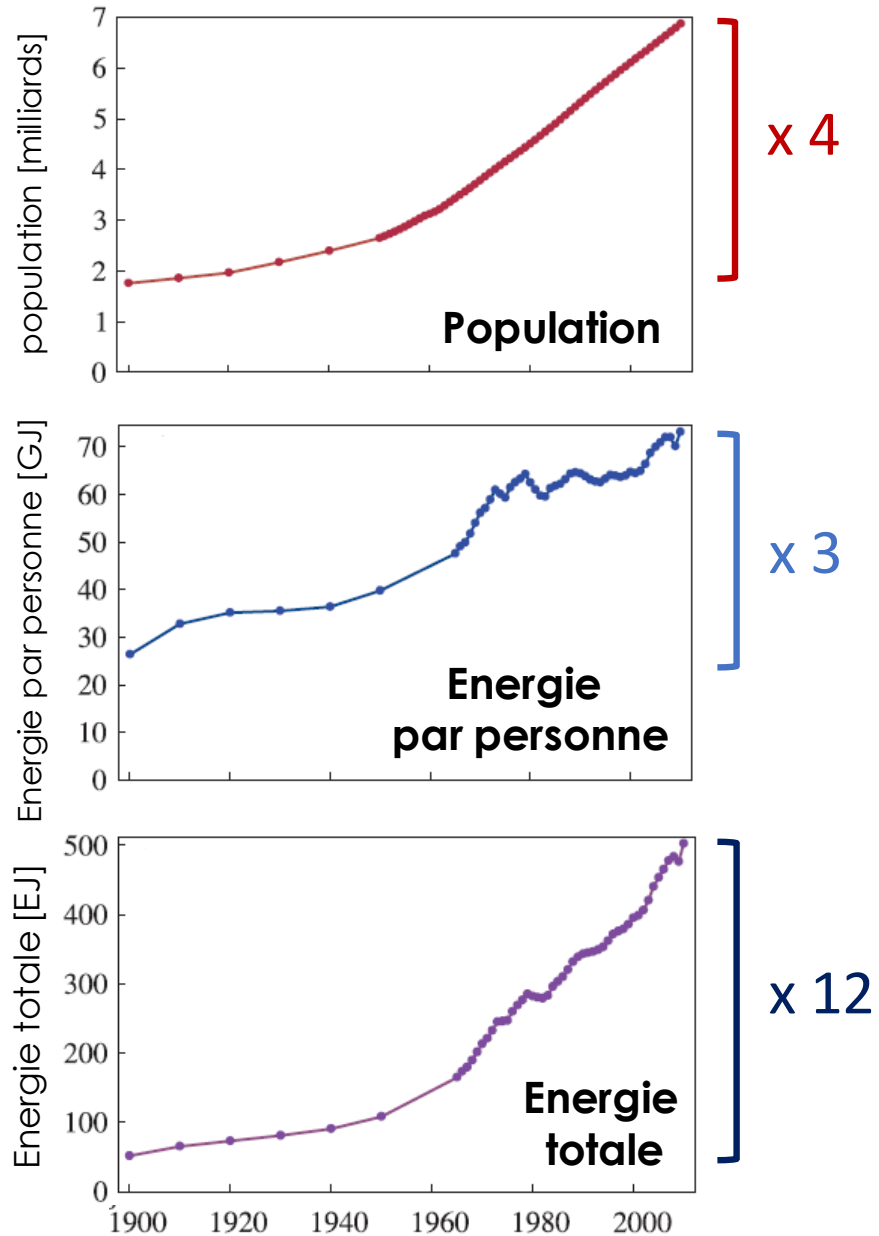
La production d'**électricité** en France est largement **décarbonée** (~ 88 %).

Mais **l'électricité ne représente qu'une fraction (27 %) de l'énergie finale** (1 657 TWh)\*, le reste n'étant (à 94 %) pas décarboné\*\* ...

\*Source : Ministère

\*\* part décarbonée hors électricité ~ 6 % (biomasse 4,2 %, agrocarburants ~ 1,3 %, biogaz 0,3 %, déchets 0,2 %)

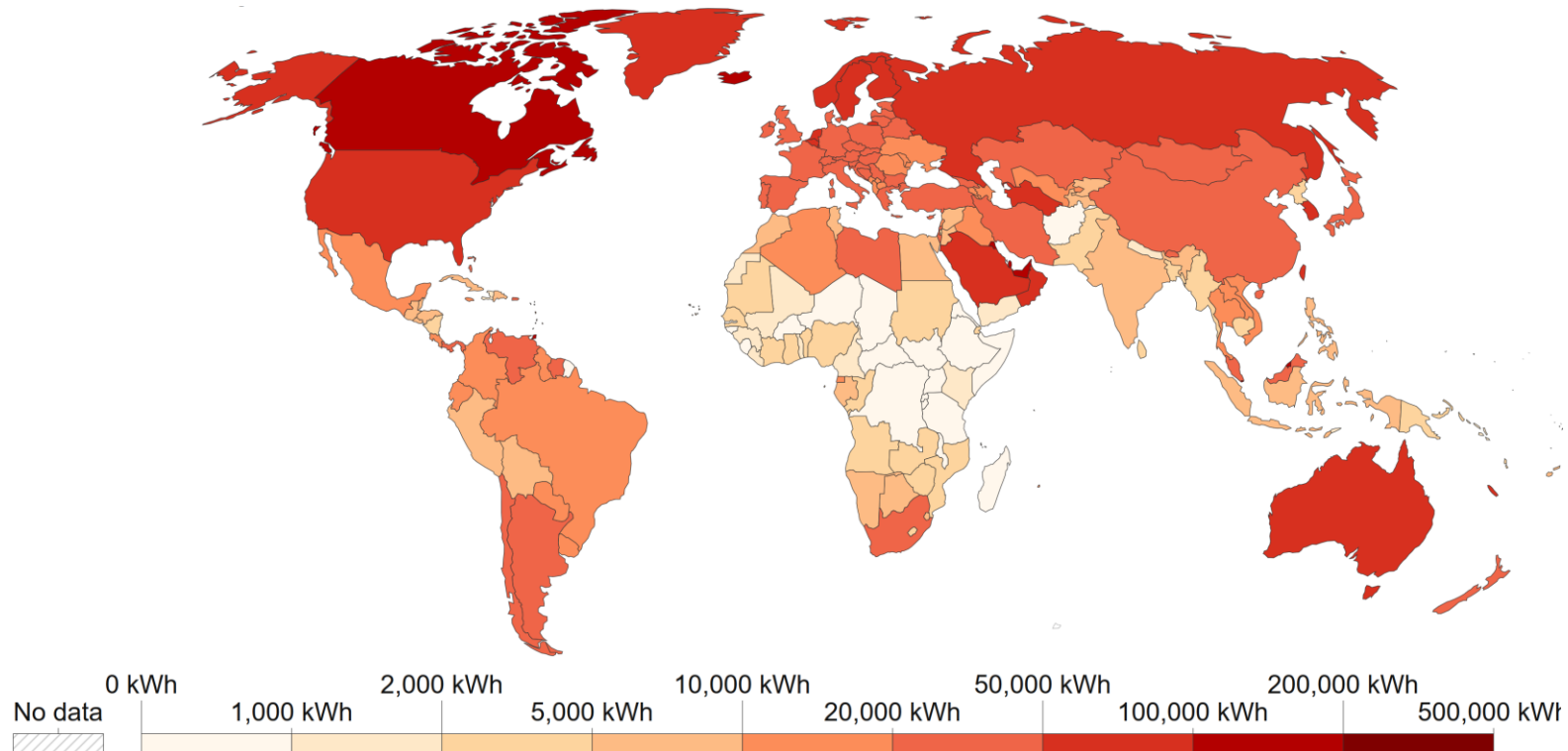
# Etat des lieux



L'augmentation de la consommation d'énergie résulte **et** de l'augmentation de la population **et** de l'augmentation de l'énergie consommée par personne.

# Etat des lieux

## Energie primaire par personne (2022)



Moyenne mondiale : 20 000 kWh / an / personne (= Turquie, Croatie, Argentine, Venezuela)

**De fortes disparités :** République centrafricaine : 290 kWh / an / personne

Chine : 31 000 kWh / an / personne

France : 36 000 kWh / an / personne

Canada : 102 000 kWh / an / personne

Qatar : 194 000 kWh / an / personne



# Etat des lieux

## Quelques chiffres en résumé

Production énergie primaire (monde, 2022) : 170 000 TWh ~ **600 EJ**

Production électricité (monde, 2022) : 28 500 TWh

Part de l'électricité / énergie finale : **20 %**

Consommation pétrole : ~ 100 millions de barils par jour (1 baril = 159 litres)

Consommation charbon : ~ 23 millions de tonnes par jour

Consommation gaz naturel : ~ 11 milliards de m<sup>3</sup> par jour

Emissions annuelles : ~ **35 Gt CO<sub>2</sub>-eq liées à l'énergie** (70 % du total, 50 Gt)

En résumé, la consommation énergétique actuelle est insoutenable car en **croissance exponentielle** (2,5 % / an), **carbonée** (80+ %) et basée sur des **ressources finies** (85 %). Par ailleurs (*on va le voir dans la suite*), le système énergétique est très **inefficient** (beaucoup de pertes, notamment dans les conversions d'énergie thermique).

Enjeux : décarboner, passer du stock au flux, électrifier et améliorer l'efficacité (en réduisant les conversions entre formes d'énergie), changer les usages pour in fine réduire la demande.

# Plan du cours

## Partie I : Concepts physiques

Energie et puissance : définition & propriétés physiques

Formes de l'énergie. Conversions d'énergie

*[Incursion de thermodynamique : chaleur, 2<sup>nd</sup> principe]*

## Partie II : Convertisseurs d'énergie *[en lien avec les usages sociétaux]*

Puissance mécanique humaine et animale

*[Notions de mécanique et d'hydrodynamique : rotation, frottements, forces exercées par un fluide (trainée, portance)]*

Transports terrestres, aériens, fluviaux et maritimes

Focus sur les rendements de la conversion d'énergie thermique : moteurs, centrales thermiques, pompes à chaleur

Focus sur l'hydraulique, l'éolien et le solaire ] *Prochain cours*

# Energie : définition & propriétés physiques

L'énergie est l'unité de compte des transformations de la matière



Modification de vitesse



Modification de température



Modification de forme



Modification de position dans un champ  
(électrique, magnétique, gravitationnel)



Modification de  
structure chimique



Modification de  
structure nucléaire



Modification  
de luminosité



# Energie : définition & propriétés physiques

L'énergie est l'unité de compte des transformations de la matière



1. C'est une **quantité scalaire**, *i.e.* quantifiée par un nombre et son unité.
2. C'est une **quantité extensive**, *i.e.* proportionnelle à la taille du système.
3. C'est une **quantité qui se stocke**, *i.e.* en transformant la matière.
4. C'est une **quantité qui se transfère**, d'un système à un autre.
5. C'est une **quantité conservée** lors d'une transformation.

# Energie : Unités

Dans le **système international** : **Joule** = kg.m<sup>2</sup>/s<sup>2</sup>

Analyse dimensionnelle : [Energie] = [Masse] [Longueur]<sup>2</sup> / [Temps]<sup>2</sup>

$$\ll E_c = \frac{1}{2}mv^2 \gg \quad \ll E_p = mgz \gg \quad \ll W = F \cdot d \gg$$

**1 J** : élever une pomme (~100 g) d'un mètre

- Ration énergétique alimentaire quotidienne d'un humain : 10 MJ
  - Chaleur dégagée par la combustion d'un litre d'essence : 33 MJ
  - Consommation d'énergie primaire en France (2022) : 9,97 10<sup>18</sup> J (~ 10 EJ)
- un Français consomme en moyenne (2022) : 147 10<sup>9</sup> J d'énergie primaire (147 GJ)

exa / peta / tera / giga / mega / kilo 10 <sup>18</sup> / 10 <sup>15</sup> / 10 <sup>12</sup> / 10 <sup>9</sup> / 10 <sup>6</sup> / 10 <sup>3</sup>
--

# Energie : Unités

**Tonne équivalent pétrole** (tep) : unité utilisée en référence aux énergies fossiles

Définition : chaleur dégagée par une tonne de pétrole

1 tep = 41,868 GJ (par convention. En fait, la valeur réelle dépend du type de pétrole)

- Consommation d'énergie primaire en France (2022) : 238 Mtep → pour un Français : 3,5 tep

**kilocalorie (aussi nommée Calorie)** : unité utilisée par les nutritionnistes

Déf. : La calorie est l'énergie qu'il faut fournir pour échauffer un gramme d'eau d'un degré Celsius (dans les conditions habituelles de température et de pression).

1 calorie = 4,18 J

- Ration énergétique alimentaire quotidienne d'un humain : 2400 kcal (10 MJ ~ 0,24 tep)

exa / peta / tera / giga / mega / kilo
$10^{18}$ / $10^{15}$ / $10^{12}$ / $10^9$ / $10^6$ / $10^3$



$$\begin{aligned}\Delta E_{\text{méca}} &= mgh \approx 74 \times 10 \times 0,2 \\ &\sim 0,15 \text{ kJ} \\ &= (0,15 / 4,18) \text{ kcal} = 0,036 \text{ kcal}\end{aligned}$$

+ efficacité du métabolisme : 25 %

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta E_{\text{méca}} / 0,25 \\ &\sim 0,036 / 0,25 \sim 0,15 \text{ kcal}\end{aligned}$$



# Puissance : définition physique

Puissance : débit d'énergie

$$\mathcal{P} = \frac{\Delta E}{\Delta t}$$

variation d'énergie  
durée de la variation

stock d'énergie



débit d'énergie  
(puissance)

Unité dans le système international : **Watt** = Joule/s = kg.m<sup>2</sup>/s<sup>3</sup>

Analyse dimensionnelle : [Puissance] = [Masse] [Longueur]<sup>2</sup> / [Temps]<sup>3</sup>

$$\ll \mathcal{P} = E/t \gg \quad \ll \mathcal{P} = F \cdot v \gg$$

**1 W** = 1 J/s : élever une pomme (~ 100 g) d'un mètre en une seconde

- Puissance typique d'une **éolienne** : ~ **1 MW**
- Puissance d'un **réacteur nucléaire** : ~ **1 GW**
- Conso. énergie France (2022) : ~ 10 EJ par an → puissance moyenne : (10<sup>19</sup> J) / (365 x 24 x 3600 s) = 317 GW  
Puissance moyenne d'un Français (2022) : 147 GJ d'énergie primaire par an, soit 4,66 kW
- Conso. énergie (monde, 2022) : ~ 650 EJ par an → puissance moyenne utilisée par l'humanité : ~ **20 TW**

exa / peta / tera / giga / mega / kilo 10 <sup>18</sup> / 10 <sup>15</sup> / 10 <sup>12</sup> / 10 <sup>9</sup> / 10 <sup>6</sup> / 10 <sup>3</sup>
--



# Energie du quotidien

On peut réécrire la définition de la puissance  $\Delta E = \mathcal{P} \Delta t$

Ce qui permet de définir une nouvelle unité d'énergie, le watt-heure :  $1 \text{ Wh} = 3\,600 \text{ J}$ .

Au quotidien, l'énergie s'exprime souvent en kilowatt-heure (kWh).

- Énergie consommée par un radiateur de 1000 W pendant 1 heure :  $1 \text{ kWh} = (1 \text{ kW}) \times (3600 \text{ s}) = 3,6 \text{ MJ}$ .
- 1 repas  $\sim 1 \text{ kWh}$  ; ration alimentaire journalière  $\sim 2,8 \text{ kWh}$ .
- 1 litre d'essence  $\sim 10 \text{ kWh}$ .
- 1 feu de cheminée (10 kg de bois)  $\sim 30 \text{ kWh}$ .
- Consommation d'énergie primaire en France (2022) :  $(10 \text{ EJ}) / 3600 = 2780 \text{ TWh}$   
 Consommation moyenne d'un Français :  $\sim 40\,900 \text{ kWh} / \text{pers.} / \text{an}$ , soit **112 kWh / personne / jour**  
*(sans prise en compte de l'énergie grise contenue dans les produits importés)*
- Consommation d'énergie primaire (monde, 2021) :  $(650 \text{ EJ}) / (3,6 \text{ MJ}) = 180\,000 \text{ TWh}$ , soit **62 kWh / pers. / jour**

→ Unité appropriée pour les consommations du quotidien :  $\sim$  dizaine de kWh

# Echelles d'énergie et puissance

## Flux d'énergies à l'échelle globale :

Flux d'énergie solaire (au sommet de l'atmosphère) : 173 000 TW

Puissance cinétique de déplacement des masses d'air : ~ 1000 TW

Puissance cinétique des vagues (sur toutes les côtes du monde) : ~ qq TW

Puissance associée à la consommation d'énergie par l'humanité (2022) : ~ 20 TW

## Energies à l'échelle microscopique : $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

1 réaction chimique ~ qq eV

1 photon capturé par une cellule photovoltaïque ~ qq eV

1 réaction nucléaire ~ qq MeV

*Voir aussi (en annexe) des exemples balayant 17 ordres de grandeur*

exa / peta / tera / giga / mega / kilo
$10^{18}$ / $10^{15}$ / $10^{12}$ / $10^9$ / $10^6$ / $10^3$

# Energie : définition & propriétés physiques

L'énergie existe sous **différentes formes** :

**énergie mécanique** : • cinétique : due au mouvement (translation)  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  (rotation)  $E_c = \frac{1}{2}J\omega^2$   
• potentielle : énergie stockée dans une configuration de l'objet du fait de l'existence du champ gravitationnel terrestre  $E_p = mgz$

**énergie thermique** : énergie contenue dans la dynamique microscopique d'un grand nombre d'atomes ou molécules (translation + vibration + rotation)

**énergie électromagnétique** : énergie contenue dans les champs électriques et magnétiques.

Peut se propager sous forme de radiation électromagnétique (ex. : lumière visible). Peut se transmettre au moyen de circuits électriques

**énergie chimique** : énergie stockée dans les liaisons chimiques (interaction électromagnétique entre atomes : voir cours de mécanique quantique)

**énergie nucléaire** : énergie stockée dans les liaisons du noyau atomique

**énergie de masse** :  $E = mc^2$  (nécessite de l'antimatière pour être convertie ... )

# Energie : définition & propriétés physiques

L'énergie existe sous **différentes formes** :

CINETIQUE

POTENTIELLE

énergie mécanique : • cinétique : due au mouvement (translation)  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  (rotation)  $E_c = \frac{1}{2}J\omega^2$

• potentielle : énergie stockée dans une configuration de l'objet du fait de l'existence du champ gravitationnel terrestre  $E_p = mgz$

énergie thermique : énergie contenue dans la dynamique microscopique d'un grand nombre d'atomes ou molécules (translation + vibration + rotation)

énergie électromagnétique : énergie contenue dans les champs électriques et magnétiques.

Peut se propager sous forme de radiation électromagnétique (ex. : lumière visible). Peut se transmettre au moyen de circuits électriques

énergie chimique : énergie stockée dans les liaisons chimiques (interaction électromagnétique entre atomes : voir cours de mécanique quantique)

énergie nucléaire : énergie stockée dans les liaisons du noyau atomique

énergie de masse :  $E = mc^2$  (nécessite de l'antimatière pour être convertie ... )

# Energie : définition & propriétés physiques

Toutes ces formes appartiennent à l'une ou l'autre des deux catégories suivantes :

**Energie cinétique** : énergie du **mouvement** (macroscopique ou microscopique)

$E_c$  (mouvement du centre de masse macroscopique)

Chaleur (mouvements microscopiques)

Electricité (débit de charges)

Lumière (propagation d'onde électromagnétique)

Onde mécanique (son, marée)

**Energie potentielle** : énergie stockée dans une **configuration** de l'objet.

Elle exprime la *potentialité* d'un mouvement ultérieur.

Gravitation (hydroélectricité, marée)

Liaisons chimiques (réaction de combustion, métabolisme)

Nucléaire (fission, fusion)

Energie élastique (déformation d'un matériau : élastique, ressort, ...)

*On peut relier ces différentes formes d'énergies potentielles aux quatre interactions fondamentales : gravitationnelle, électromagnétique, forte (responsable de la cohésion des noyaux atomiques), et faible (responsable de la radioactivité et de la fusion de l'hydrogène en hélium, entre autres).*

L'énergie n'est pas une chose en soi mais une propriété de la matière en interaction.

# Energie : définition & propriétés physiques



L'énergie est l'unité de compte des transformations de la matière

1. C'est une **quantité scalaire**, *i.e.* quantifiée par un nombre et son unité.
2. C'est une **quantité extensive**, *i.e.* proportionnelle à la taille du système.
3. C'est une **quantité qui se stocke**, *i.e.* en transformant la matière.
4. C'est une **quantité qui se transfère**, d'un système à un autre.

5. C'est une **quantité conservée** lors d'une transformation.

1<sup>er</sup> principe de la thermodynamique :

l'énergie totale d'un système isolé est invariante au cours du temps.

Tout en étant conservée l'énergie d'un système peut varier d'une forme à une autre au gré de son évolution. Ces échanges se font par l'intermédiaire d'un travail et/ou d'un transfert thermique (ou quantité de chaleur).

# Energie : définition & propriétés physiques

Exemples de conversions entre différentes formes de l'énergie :

- L'interaction **gravitationnelle** Terre - Lune - Soleil donne lieu au phénomène de marée (déplacement de masses d'eau) = énergie **cinétique** (+ un peu de frottement).



- Une ampoule à incandescence de 100 W reçoit 100 J d'énergie par seconde du réseau électrique. Cette énergie **électrique** est convertie en énergie **thermique** par la résistance du filament puis le filament **rayonne** cette énergie sous forme de lumière visible à ~ 3 W et le reste est « perdu » sous forme de **chaleur**.

Dans cet exemple, la conversion électrique → thermique est complète (efficacité de 100 %) mais la conversion thermique → rayonnement est très mauvaise.

Pourquoi ? ...

$$\text{Efficacité : } \eta = \frac{E_{\text{"utile"}}}{E_{\text{utilisée}}}$$

*Remarque : Les expressions « production d'énergie » et « consommation d'énergie » sont imprécises. Elles signifient en réalité :*

- « transformation d'une forme d'énergie en une autre utilisable »
- « utilisation d'une forme d'énergie utile ».

# Energie : définition & propriétés physiques

Des différentes formes d'énergie, la dichotomie qui nous intéresse particulièrement est :

**énergie ordonnée**

= formes entièrement  
convertibles en travail

**énergie désordonnée**

= chaleur



# Energie : définition & propriétés physiques

Des différentes formes d'énergie, la dichotomie qui nous intéresse particulièrement est :



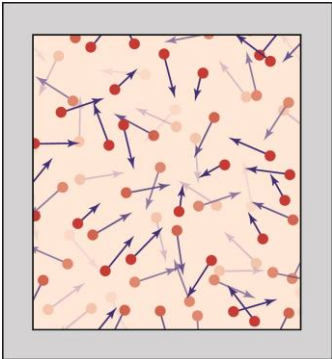
**[Spoiler]**

On peut intégralement transformer du travail mécanique en chaleur, mais l'inverse n'est pas vrai  
(en lien avec le 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique)

# L'énergie thermique

« Rappel »  
de Thermo.

Du mouvement « désordonné »



**Energie thermique** : énergie collective contenue dans les **mouvements relatifs** (collisions) d'un grand nombre de particules formant un ensemble macroscopique ; ces mouvements incluent aussi les *degrés de liberté*<sup>1</sup> de vibration et rotation dans le cas de molécules.

→  $U(T) - U(T=0)$  part de l'énergie interne en excès de sa valeur à température nulle (n'inclue pas les contributions des énergies de liaison chimique, de liaison nucléaire et l'énergie de masse au repos)

Energie interne  $U$  : somme de toutes les contributions à l'énergie du système. N'inclue ni l'énergie cinétique du mouvement d'ensemble, ni l'énergie potentielle du centre de masse.

La **chaleur** est de l'énergie thermique qui se transfère d'un système à un autre.

*Note 1) Degré de liberté* : contribution indépendante à l'énergie cinétique ou potentielle du système.

Théorème de l'équipartition de l'énergie (limite classique) :

à l'équilibre thermique, chaque degré de liberté apporte  $\frac{1}{2}k_bT$  à l'énergie interne.

Par contraste, l'énergie cinétique macroscopique (celle du centre de masse) est un mouvement d'ensemble ordonné, parfaitement dirigé dans une direction et un sens.

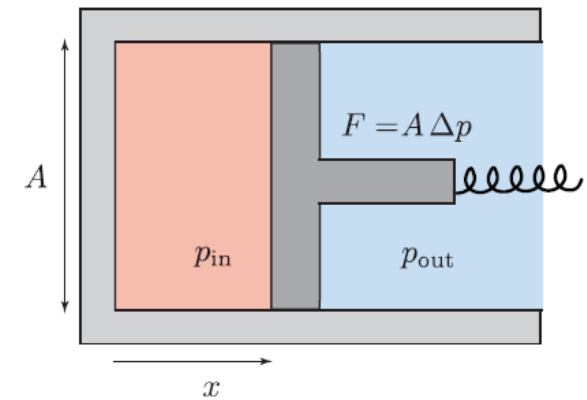
# Conversion énergie thermique → mécanique

« Rappel »  
de Thermo.

mouvement désordonné → ordonné

La pression d'un gaz chaud peut être utilisée pour produire du travail mécanique. Mais au cours de ce processus, **il y a inévitablement une perte d'énergie dans l'environnement**. Explication avec l'exemple d'un gaz agissant sur un piston :

Le système est initialement à l'équilibre ( $p_{in} = p_{out}$  et  $T_{in} = T_{out}$ ).  
De la chaleur est apportée au gaz (à gauche du piston).  
Son énergie interne augmente et sa pression devient  $p_{in} = p_{out} + \Delta p$   
→ force de pression sur le piston (de la gauche vers la droite).



- Travail en jeu proportionnel à  $p_{in}$  :  $W = p_{in} dV = p_{in} A dx$
- Travail utile (récupérable par un ressort par ex.) proportionnel à  $\Delta p$  :  $W_{utile} = F dx = A \Delta p dx$

La différence (entre  $W$  et  $W_{utile}$ ) a chauffé le gaz de l'autre côté du piston.

Efficacité :  $\eta = \frac{W_{utile}}{W}$

$$\eta = \frac{\Delta p}{p_{in}} = \frac{p_{in} - p_{out}}{p_{in}}$$

Cas du gaz parfait (par simplicité) :  $p = N k_b T / V$

$$\rightarrow \eta = \frac{T_{in} - T_{out}}{T_{in}} = 1 - \frac{T_{out}}{T_{in}}$$

# Les principes de la thermodynamique

« Rappel »  
de Thermo.

## Premier principe :

L'énergie d'un système isolé (= fermé) est conservée et ne peut pas changée si rien (matière ou énergie) n'entre ni ne sort des frontières du système.

## Second principe :

L'entropie totale d'un système fermé ne décroît jamais.

A l'équilibre thermodynamique, l'entropie d'un système est maximale.

Une organisation spontanée ne se produit pas dans un système fermé. Il est cependant possible d'observer une baisse d'entropie dans un endroit si elle est compensée par une augmentation à un autre endroit : la vie organise la matière, mais au détriment d'une augmentation de l'entropie dans le reste de l'univers.

L'entropie régit le sens d'écoulement de la chaleur (du chaud vers le froid).

Dans toute transformation, une partie de la forme utile de l'énergie se dégrade en chaleur.

# Energie : définition & propriétés physiques

L'énergie existe sous **différentes formes** :

ORDONNEE

DESORDONNEE

énergie mécanique :

- cinétique : due au mouvement (translation)  $E_c = \frac{1}{2}mv^2$  (rotation)  $E_c = \frac{1}{2}J\omega^2$
- potentielle : énergie stockée dans une configuration de l'objet du fait de l'existence du champ gravitationnel terrestre  $E_p = mgz$

énergie thermique : énergie contenue dans la dynamique microscopique d'un grand nombre d'atomes ou molécules (translation + vibration + rotation)

énergie électromagnétique : énergie contenue dans les champs électriques et magnétiques.

Peut se propager sous forme de radiation électromagnétique (ex. : lumière visible). Peut se transmettre au moyen de circuits électriques

énergie chimique : énergie stockée dans les liaisons chimiques (interaction électromagnétique entre atomes : voir cours de mécanique quantique)

énergie nucléaire : énergie stockée dans les liaisons du noyau atomique

→ Nécessite une réaction (combustion, fission) pour obtenir *in fine* de l'énergie thermique

# Conversions d'énergie [à retenir]

**On peut intégralement transformer du travail mécanique en chaleur, mais l'inverse n'est pas vrai**

- Il existe une **limite fondamentale** à la conversion d'énergie thermique en une forme ordonnée : mécanique, électrique, ... [Cf 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique].

Ex. : moteur thermique (~ 25 %), centrale thermique (~ 35 %)

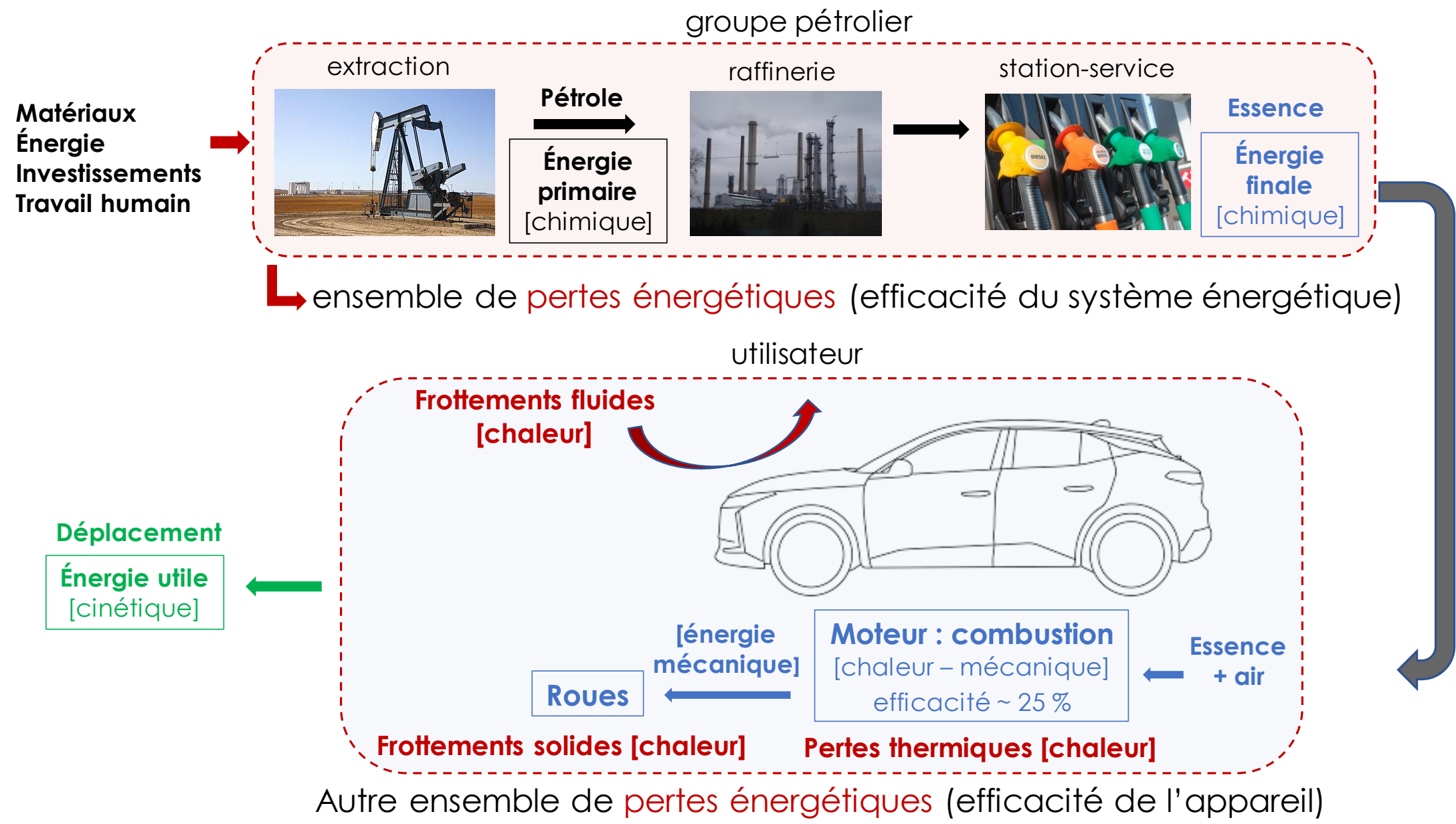
- Cette limite fondamentale ne s'applique pas aux autres types de conversion (partant d'une forme initiale d'énergie ordonnée). Mais, en pratique, il existe (presque toujours) une source de dissipation (transformant une partie de l'énergie initiale en énergie cinétique microscopique **désordonnée**, c'est-à-dire en **chaleur**).

Ex. : l'énergie mécanique fournie par un cycliste n'est pas intégralement transformée en énergie de mouvement du vélo.

**La conversion d'une forme d'énergie en une autre (ordonnée) n'est jamais complète : une partie de la forme utile de départ se dégrade en chaleur.**

Une machine **efficace** minimise cette **dégradation de l'énergie** afin de maximiser l'énergie « utile ».

# Exemple d'une chaîne de conversions de l'énergie



# Convertisseurs d'énergie

*Tour d'horizon d'usage sociétaux de l'énergie illustrant différentes séquences de transformations d'énergie :*

*Chimique → mécanique*

*Mécanique → chaleur*

*Chaleur → mécanique*

*...*

Puissance mécanique humaine et animale

Transports terrestres, aériens, fluviaux et maritimes

Moteurs, centrales thermiques, pompes à chaleur



# Puissance et force humaine

L'humain tire son énergie de son alimentation (énergie chimique) :  $\sim 2.8$  kWh par jour, en partie convertie en énergie mécanique. Typiquement (voir calculs en TD),

- Un individu rayonne une puissance thermique :  $P_{th} \sim 100$  W
- Puissance mécanique des jambes :  $P_{jambe} \sim 100$  W
- Puissance mécanique des bras :  $P_{bras} \sim 50$  W

La limite en énergie est fixée par le temps : 10 h à 100 W  $\sim$  **1 kWh / jour**

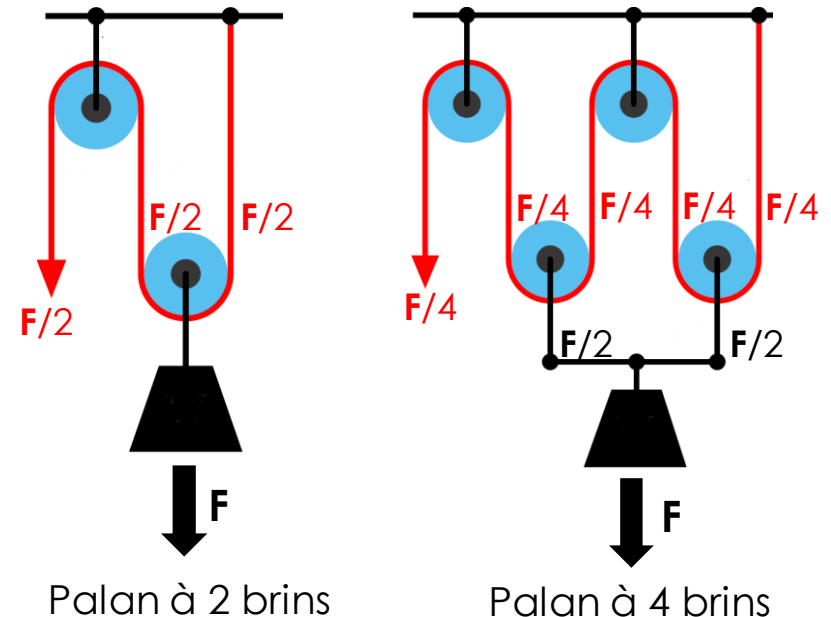
- Force des bras  $\sim 100$  Newton (10 kg)

Comment tirer 100 kg ?

Principe du **palan** : diviser la force (par  $n$ , nombre de brins)

Rq : le coût en énergie (ou en puissance) est inchangé, puisque la distance à tirer (comme la vitesse) est augmentée de  $n$ .

Travail = Force x distance  
Puissance = Force x vitesse



# Puissance et force animale

- Boeuf / cheval : force en traction ~ 400 – 800 Newton.

Puissance mécanique ~ **1000 W**

La limite en énergie est fixée par le temps : 10 h à 1000 W ~ **10 kWh / jour**

*Définition d'une nouvelle unité de puissance, le cheval-vapeur (ch) :*  
 1 ch = élever 75 kg d'une hauteur de 1 m, en 1 s

$$P = mgv = 735 \text{ W}$$

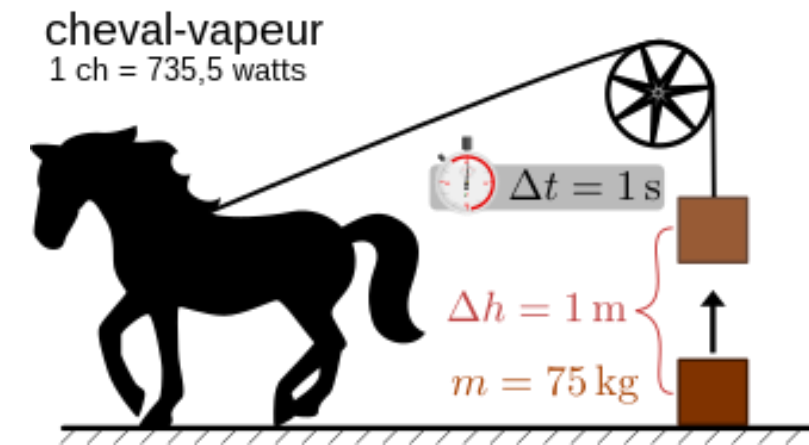
Données agricoles (1860) :

- Angleterre : 0,54 cheval / ouvrier
- France : (0,2 cheval + 0,23 boeuf) / ouvrier

Source : [Kander & Warde \(2011\)](#)

Aujourd'hui :

puissance moyenne contenue dans la consommation (hors importation) d'un Français ~ 4,7 kW ~ 6 ch  
 (plus réalistement, 112 kWh / jour correspond à 11 chevaux travaillant 10 h).



# Puissance humaine, animale et machines

Un grille – pain : 700 W



~ 1 ch ~ 7 paires de jambes ordinaires ou 1 champion olympique !

*"Un Robert est nécessaire pour griller une tranche de pain, 180 Robert peuvent alimenter une voiture en énergie, et 43 000 Robert sont nécessaires pour fournir la puissance énergétique d'un avion (moyen)."*

# Puissance humaine, animale et machines

$$P_{jambe} \sim 100 \text{ W} \quad P_{bras} \sim 50 \text{ W}$$



~ 150 ch ~ 110 kW ~ 2200 paires de bras !  
[ou 1100 paires de jambes]



~ 500 ch ~ 360 kW ~ 7200 paires de bras !



~ 135 000 ch ~ 100 000 kW ~ 2 millions de paires de bras !

Laminoir industriel

~ 130 ch ~ 100 kW ~ 1 000 paires de jambes !



~ 13 000 ch ~ 10 000 kW ~ 100 000 paires de jambes !



~ 270 000 ch ~ 200 000 kW ~ 2 000 000 de paires de jambes !

[Boeing 777]



# Importance de la rotation dans les convertisseurs

Un grand nombre de machines fonctionnent avec de la **rotation autour d'un axe**.

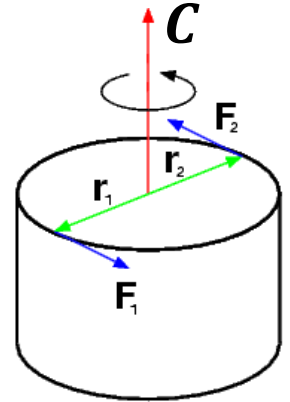
**Energie cinétique de rotation :**  $E_c = \frac{1}{2} J \omega^2$

$J$  : moment d'inertie (en kg.m<sup>2</sup>)

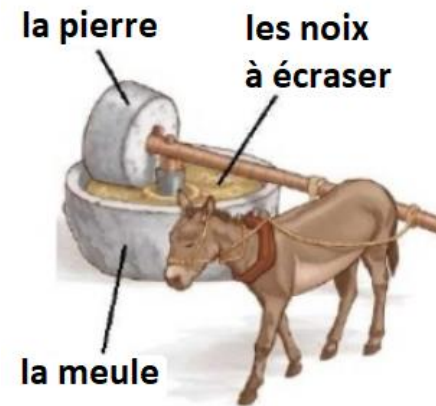
$\omega$  : vitesse angulaire (en rad.s<sup>-1</sup>)

**Puissance mécanique :**  $P = C \omega$

$C$  : couple sur l'axe résultant des moments des forces (en N.m)



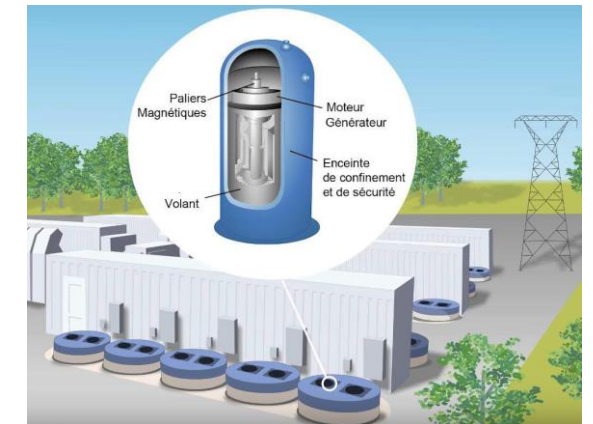
Transfert  
axe horizontal → vertical



Moulin à manège



Grutage par « cage à écureuil »

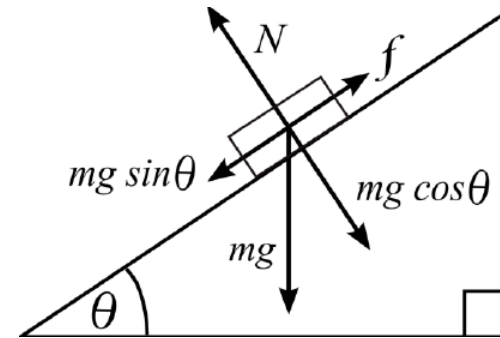


Volant d'inertie pour  
le stockage d'énergie

# Frottements solides

- **Frottement sec** : force opposée au mouvement et **proportionnelle au poids** :  
 $[\mu : \text{coefficient de frottement}]$

$$f = \mu mg$$



- frottements solides : limitent le glissement
- frottements solides sur un axe de rotation
- résistance au roulement (invention de la roue et du moyeu)

Le travail des forces de frottements est **dissipé en chaleur**.

Les rendements mécaniques peuvent être rendus plutôt (très) bons (en minimisant les frottements).

*On les évite* : vérin, presse, roulement à bille  $\rightarrow$  *frottement = perte d'efficacité énergétique*

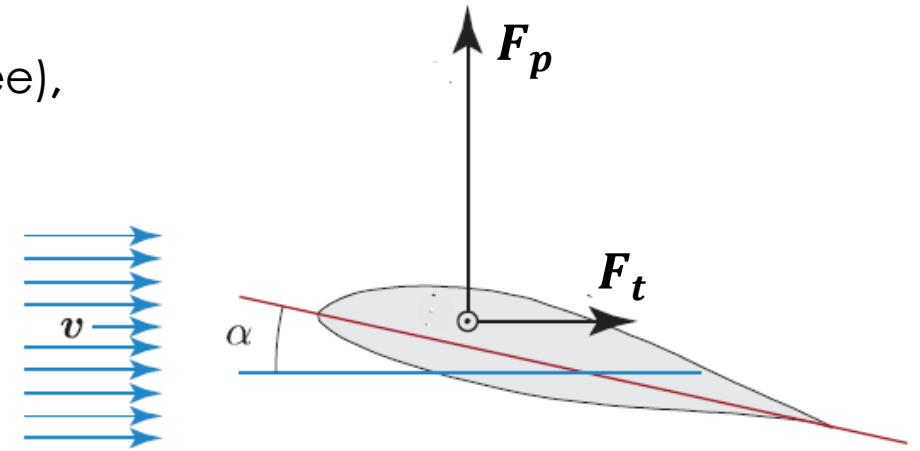
*On les recherche* : chaleur (par friction), meulage, broyage, frein, transmission mécanique, amarrage, musique ...

# Forces exercées par un fluide sur un objet

## Trainée et portance

Un corps placé dans un écoulement d'air (ou d'eau) subit une force aérodynamique (ou hydrodynamique). Pour l'analyse, on décompose cette force en :

- une composante **parallèle** au vent relatif : la **trainée** (ou trainée),
- une composante **perpendiculaire** au vent relatif : la **portance**.



**Trainée** : force qui s'oppose au mouvement du corps dans le fluide (dirigée dans le sens de l'écoulement du fluide). Agit comme un frottement (force dissipative) : convertit l'énergie cinétique en chaleur. Résulte des forces de viscosité (n'existe pas dans un fluide non-visqueux).

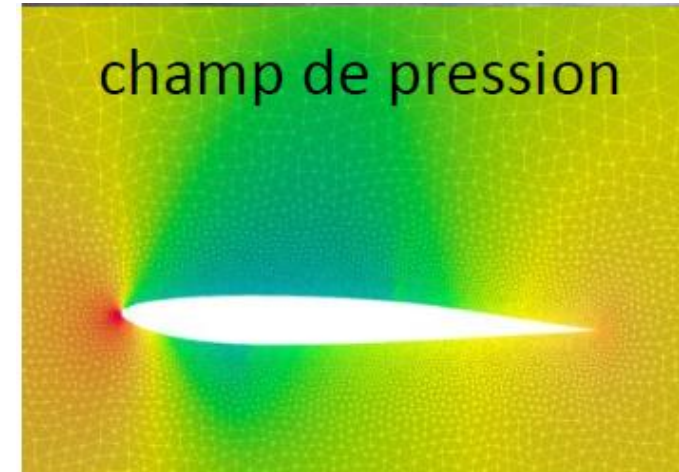
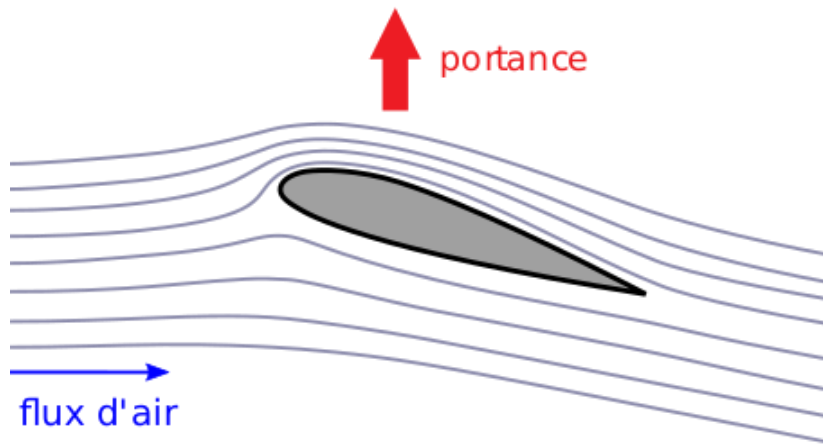
$$F_t = \frac{1}{2} C_x S \rho v^2$$

$C_x$  : coefficient de trainée  
 $S$  : surface alaire (voile du bateau, aile de l'avion, ...)  
 $\rho$  : masse volumique du fluide  
 $\frac{1}{2} \rho v^2$  : pression dynamique (densité volumique d'énergie cinétique)



# Forces exercées par un fluide sur un objet

## Portance



**Portance** : résulte d'une différence de pression dans le fluide entre les faces opposées de l'objet.  
 Se produit lorsque l'écoulement présente des vitesses différentes sur les deux faces de l'objet (Th. Bernoulli).  
 Ex. : la vitesse de l'air au-dessus d'une aile d'avion est supérieure à celle sous l'aile (dépression au-dessus de l'aile)

$$F_p = \frac{1}{2} C_z S \rho v^2$$

$C_z$  : coefficient de portance

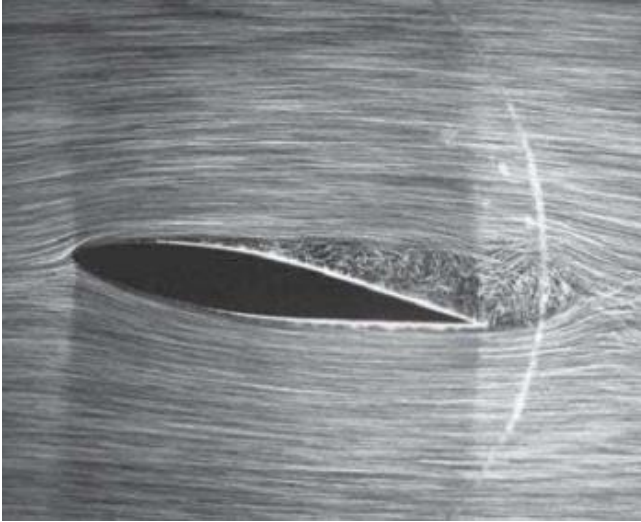
$S$  : surface alaire (voile du bateau, aile de l'avion, ...)

$\rho$  : masse volumique du fluide

$\frac{1}{2} \rho v^2$  : pression dynamique (densité volumique d'énergie cinétique)



# Trainée et portance



*On évite la trainée : frottements fluides → dissipation en chaleur*

*On recherche la portance : éolienne, ventilation, bateau à voile moderne, foils*

# Transports terrestres : voiture, train, vélo

Nous devons fournir de l'énergie pour :

Lutter contre	Voiture / camion	Train	Vélo
inertie	forte	très forte	faible
gravité	significative	très limitante	limitante
résistance au roulement	significative	très faible	faible
frottement fluide	très significatif	significatif	peu limitant

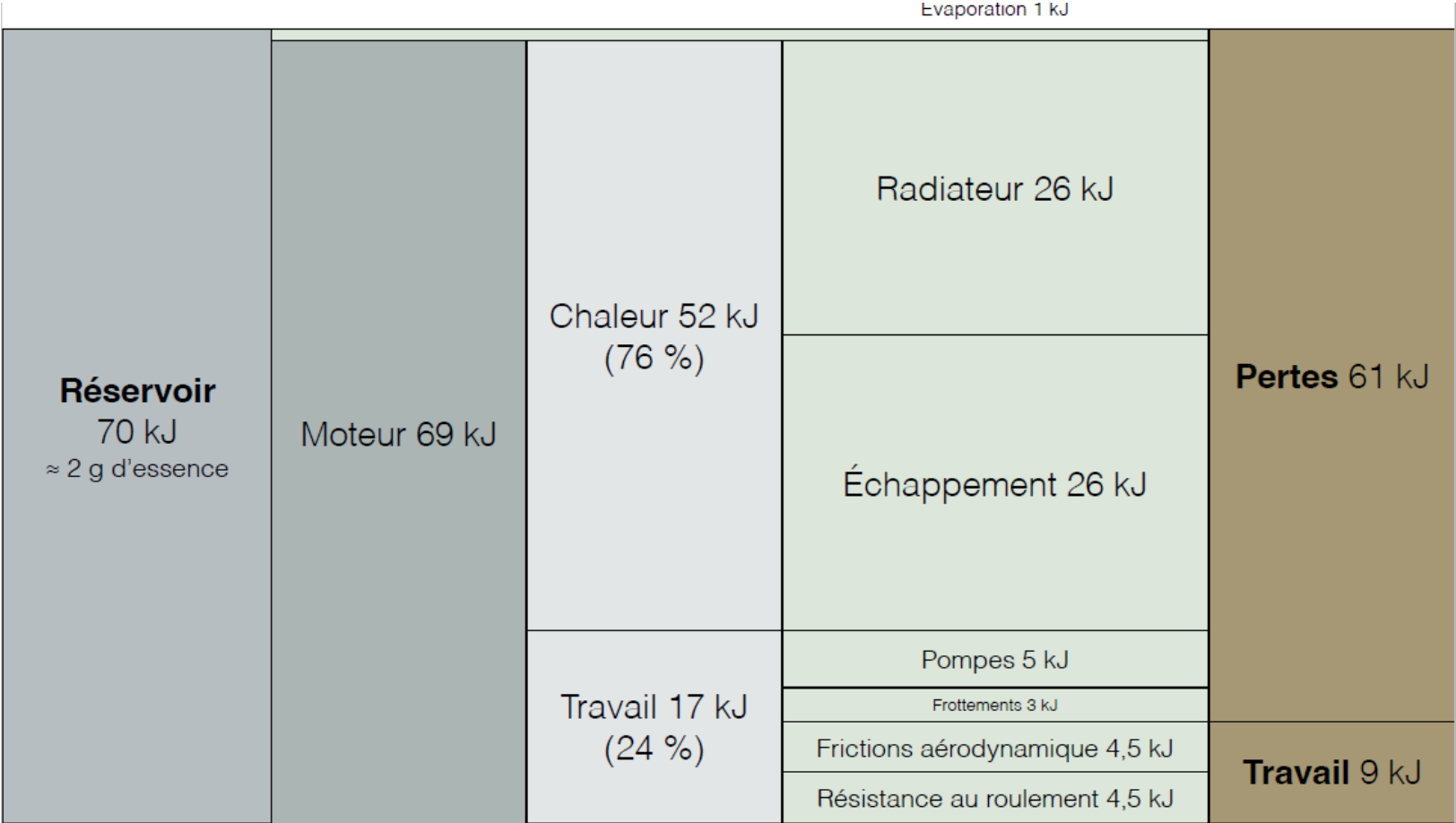
Estimation de **puissances utiles** (en kW) pour une Renault Zoé, puissance mécanique 110 ch = 81 kW

Vitesse (km/h)	30	80	110
Puissance résistance roulement	1,2	3,3	4,5
Puissance brassage de l'air	0,3	5,4	14
Puissance pour atteindre la vitesse en 10 s	5,2	37	70
Total	6,7	45,7	88,5



# Bilan énergétique du moteur à explosion

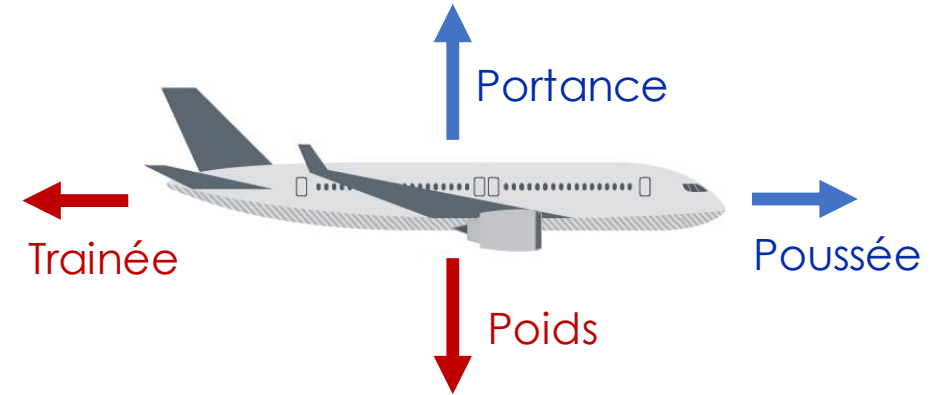
Consommation d'énergie d'un moteur de voiture  
roulant à vitesse constante sur autoroute, en 1 seconde



# Transports aériens

**Avion** : en terme d'énergie et puissance utile, il faut :

- Décoller : atteindre une vitesse suffisante pour que la portance dépasse le poids (**seuil en puissance**)
- Atteindre une altitude de 10 000 m : coût « mgh »
- Lutter contre les frottements fluides à 900 km/h



**Dirigeable, montgolfière** : décollage beaucoup plus sobre en énergie grâce à la poussée d'Archimède.



600 ch ~ 440 kW  
8 tonnes  
14 passagers



100 ch ~ 74 kW  
450 kg  
2 passagers



130 000 ch ~ 100 000 kW  
400 tonnes  
850 passagers

# Transports fluviaux & maritimes

Transports très économes en énergie grâce à la poussée d'Archimède (qui compense le poids).

Les forces de frottement aérodynamiques sont en général faibles (sauf dans le cas de la voile où elles sont exploitées).

Il faut lutter contre les forces hydrodynamiques de résistance à l'avancement (force de trainée sur section verticale immergée) et courant contraire, ...

Propulsion : force humaine (rames), animale (halage), vent (voile), moteur (charbon, fioul lourd, diesel, gaz), ...



Halage : traction terrestre des bateaux  
Ici : 2 ch = 1,5 kW !!  
Chargement ~ 300 tonnes



2 000 ch = 1,5 MW  
Chargement : 4 000 tonnes



40 000 ch = 30 MW  
Chargement : 400 000 tonnes



21/08/2023 : première ligne commerciale à propulsion éolienne (Singapour – Brésil). Cargo vraquier de 230 m de long, rétrofité avec deux voiles à ailettes de 37,5 mètres de haut. 30 % d'économie de carburant.

# L'énergie thermique

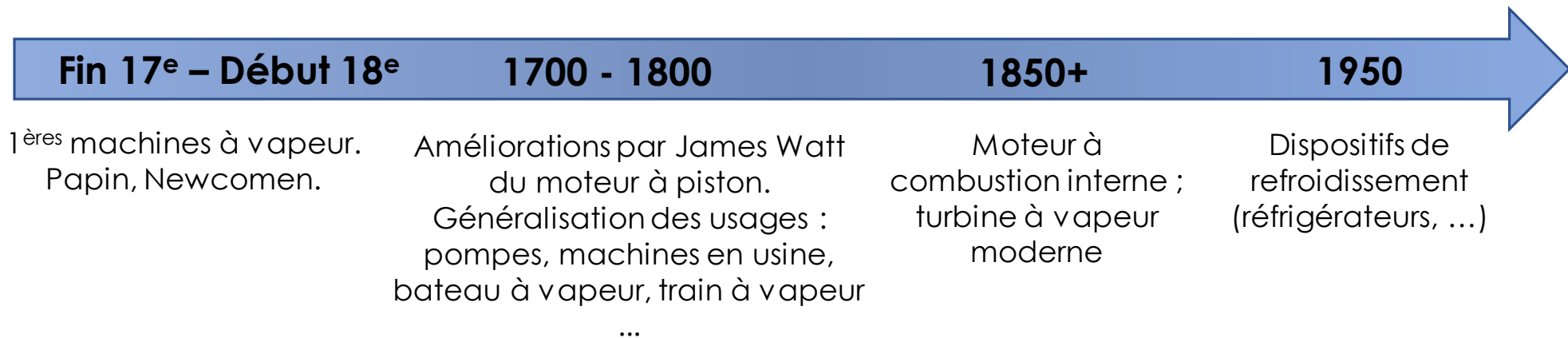
## Un rôle central dans les systèmes énergétiques

Avant  
1800

Plupart de l'énergie utilisée : **chaleur** pour le chauffage et la cuisson, par combustion du bois.  
**énergie mécanique** : principalement par forces humaine et animale,  
et de façon limitée par moulins à vent et à eau.

Fin du  
18<sup>e</sup>  
siècle

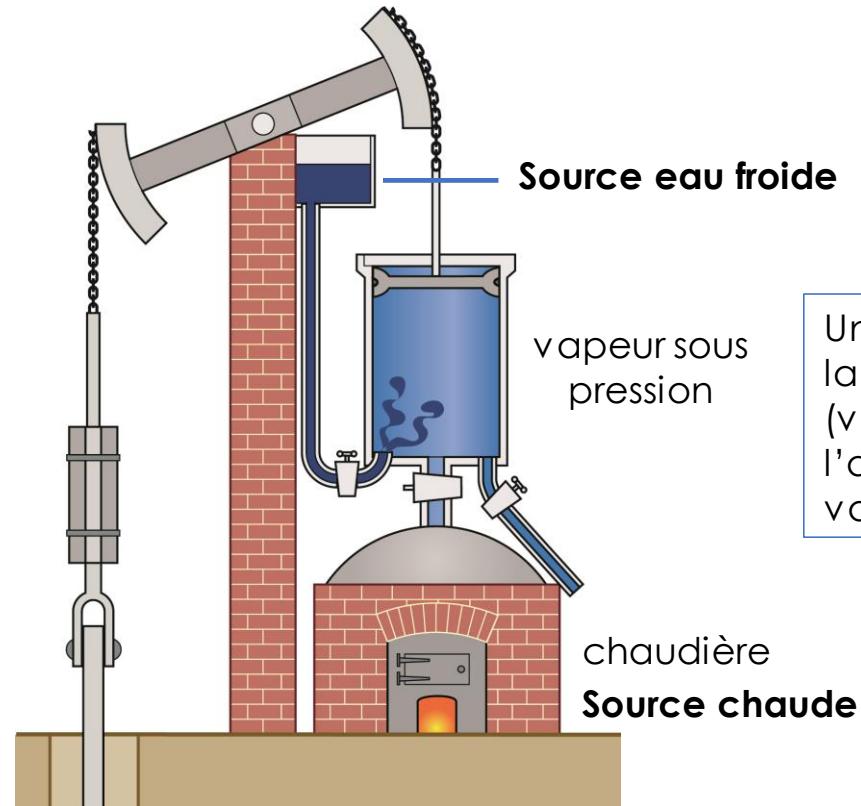
Machine à vapeur : transformation de **l'énergie thermique** en **énergie mécanique** [augmente considérablement l'utilité de la chaleur]. À partir de là, dépendance sans cesse croissante à la combustion de ressources fossiles (et fissiles) pour alimenter des dispositifs mécaniques et générer de l'électricité. **Aujourd'hui, 90+ % de l'énergie dans le monde repose (soit directement soit à une étape intermédiaire) sur l'énergie thermique (exception principale : hydraulique).**





# Conversion thermique – mécanique

## Principe du piston en mouvement de va-et-vient



Une source de chaleur produit de la vapeur qui pousse un piston (vers le haut) en se dilatant. Puis, l'ajout d'eau froide condense la vapeur : le piston redescend.

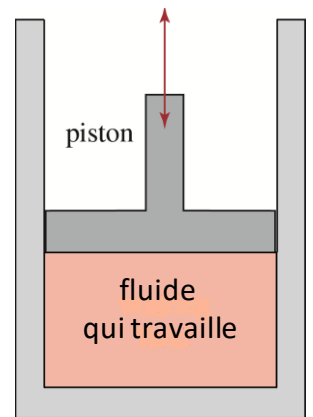
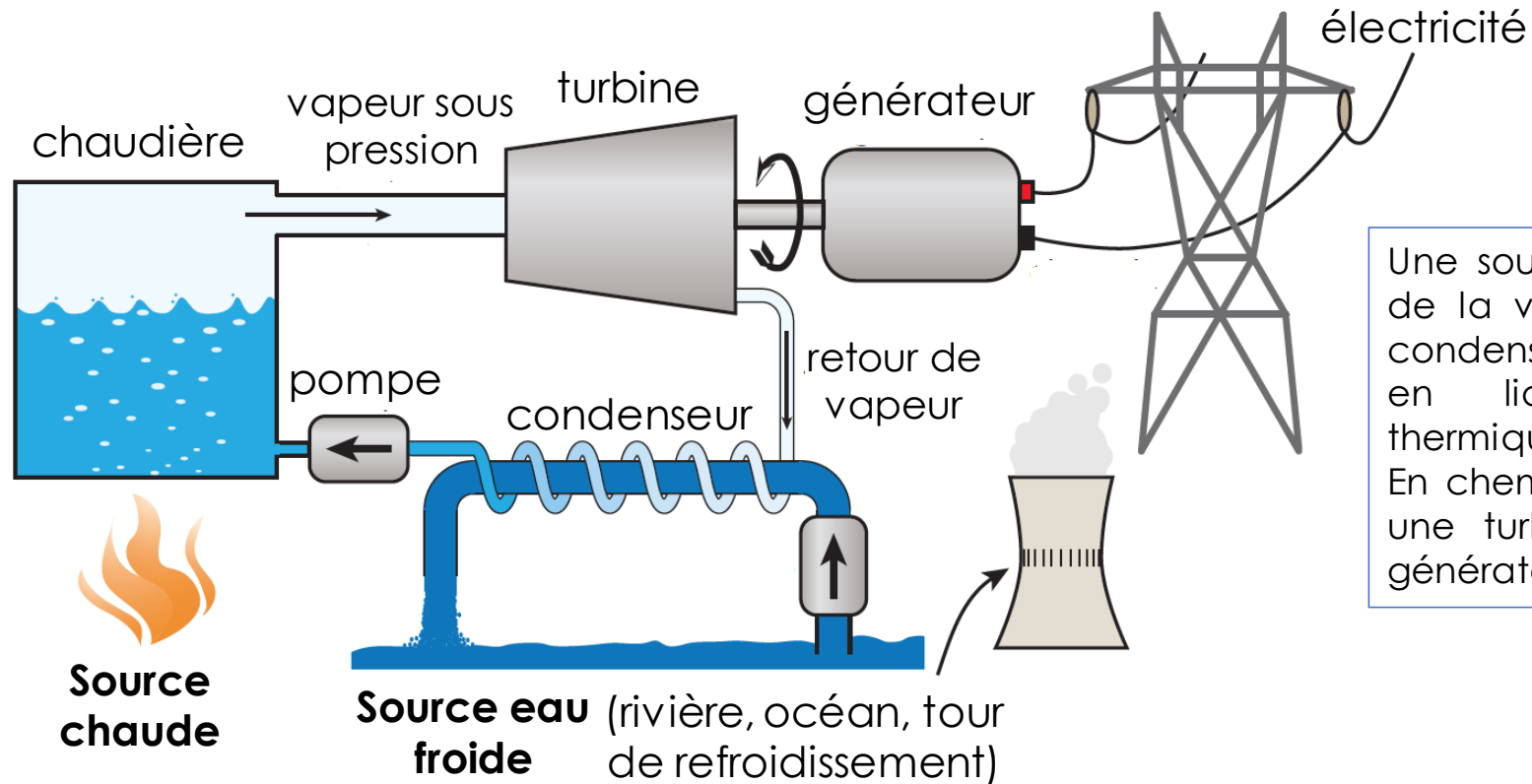


Schéma de la 1<sup>ère</sup> machine à vapeur (Thomas Newcomen, 1712)  
pour pomper l'eau dans les mines de charbon inondées.

Remarque : pompe → moins d'eau dans les mines → plus de charbon accessible  
→ plus de pompes utilisables → moins d'eau dans les mines ... Rétroaction positive !

# Conversion thermique – mécanique - électrique

## Principe d'une centrale thermique



Une source de chaleur produit de la vapeur qui retourne au condenseur où elle se condense en liquide, au contact thermique de la source froide. En chemin, la vapeur actionne une turbine connectée à un générateur d'électricité.

Schéma de base de la plupart des centrales thermiques (utilisant de la chaleur issue d'une source : fossile, nucléaire, solaire thermique, géothermique, bois, déchets)



# Conversion thermique - mécanique

## Cycles moteurs

Moteurs à cycle fermé : le fluide de travail est conservé dans l'enceinte de confinement et n'est pas remplacé entre les cycles. Après un cycle complet, le fluide de travail et l'enceinte de confinement retournent à leur état initial. Ce sont les moteurs des centrales thermiques, des dispositifs réfrigérants, ..

Moteurs à cycle ouvert : une partie ou la totalité du fluide de travail est remplacé entre les cycles. Ce sont les moteurs de la mobilité (combustion interne).

Tout cycle de moteur thermique implique les processus basiques suivants :

**Entrée de chaleur  $Q_+$**  La chaleur est transférée au fluide à partir d'une substance à plus haute température  $T_+$

**Expansion** L'énergie thermique  $Q_+$  du fluide est transformée en énergie mécanique au moyen d'un travail  $W = p dV$  pendant que le fluide se dilate

**Evacuation de chaleur  $Q_-$**  (chaleur *fatale* ou *perdue*). L'entropie, associée à la chaleur résiduelle doit être rejetée à une substance à plus basse température  $T_-$  (pour respecter le 2<sup>nd</sup> principe)

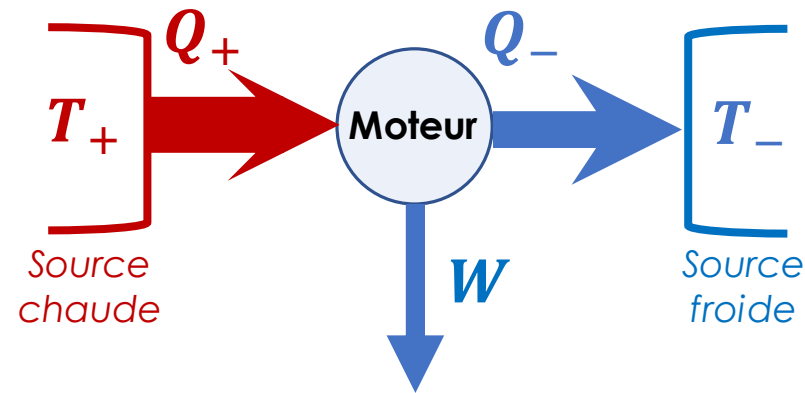
**Contraction** Pour fermer le cycle, l'enceinte se contracte à sa taille initiale.

# Conversion thermique - mécanique

## Le moteur thermique

Dispositif qui convertit l'énergie thermique en mouvement mécanique

[On injecte de la chaleur  $Q_+$  pour récupérer du travail mécanique  $W$ . Le dispositif ne convertit pas intégralement la chaleur ; une partie  $Q_-$  est rejetée (chaleur fatale)]

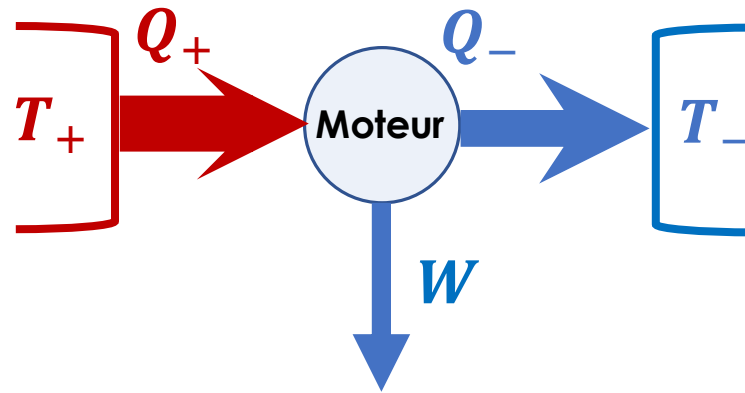


Exemples :

- centrale thermique : une chaudière produit de la vapeur qui fait tourner des turbines
- moteur d'automobile : combustion de carburant → augmentation abrupte de température dans un cylindre → expansion rapide du gaz contenu dans le cylindre → mouvement de piston
- flux d'énergie thermique du Soleil sur la Terre : produit des gradients de température qui mettent en mouvement des masses d'air (énergie cinétique du vent)

# Conversion thermique - mécanique

## Efficacité maximale du moteur thermique



1<sup>er</sup> principe :  $Q_+ = Q_- + W$

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S_{tot} = \Delta S_- - \Delta S_+ \geq 0$

car  $\Delta S_+$  retiré à la source chaude  
 $\Delta S_-$  ajouté à la source froide

avec :  $Q_+ = T_+ \Delta S_+$   
 $Q_- = T_- \Delta S_-$   $\rightarrow \frac{Q_-}{Q_+} \geq \frac{T_-}{T_+}$

Efficacité  $\eta \equiv \frac{[\text{Ce qu'on récupère d'utile}]}{[\text{Ce que l'on a dépensé}]} \rightarrow \eta = \frac{W}{Q_+} = \frac{Q_+ - Q_-}{Q_+}$

Si la transformation est réversible :  $\Delta S_{tot} = 0$  ( $\Delta S_- = \Delta S_+$ )  $\rightarrow$

$$\eta_{max} = 1 - \frac{T_-}{T_+}$$

efficacité  
de Carnot

Si la transformation est irréversible :  $\Delta S_{tot} > 0$  ( $\Delta S_- > \Delta S_+$ )  $\rightarrow \eta < \eta_{max} = 1 - \frac{T_-}{T_+}$

# Conversion thermique - mécanique

## Efficacité maximale du moteur thermique

$$\eta_c = \frac{\Delta T}{T_+} = 1 - \frac{T_-}{T_+}$$

N. B. : Températures  
exprimées en kelvin

- Efficacité proportionnelle à  $\Delta T$  (nulle si différence thermique nulle).  
Efficacité proche de 1 si  $T_- \rightarrow 0$  ou  $T_+ \rightarrow +\infty$  : c'est impossible en réalité  
Limite sur  $T_+$  fixée par la tenue des matériaux
- Plupart des situations réelles :  $T_- \sim 300 \text{ K}$  (source froide = eau d'une rivière ou d'un océan)

	$T_+$	$\eta_c$	$\eta_{typique}$	En réalité (valeurs observées)  <b>Pourquoi ? ...</b>
Centrale géothermique	400 K	→ 25 %	15 %	
Centrale nucléaire	600 K	→ 50 %	33 %	
Centrale au charbon	800 K	→ 62 %	33 %	
Cycle combiné	1500 K	→ 83 %	45 %	
Moteur à essence (cycle d'Otto)	2300 K	→ 87 %	25 %	

# Conversion thermique - mécanique

## Efficacité maximale du moteur thermique

- Pour obtenir une **efficacité en énergie maximale**, l'expression de l'efficacité de Carnot  $1 - \frac{T_-}{T_+}$  a été établie dans l'hypothèse d'un transfert de chaleur *réversible* : cela implique de pouvoir décomposer le transfert en une *succession infinie de transferts quasi-statiques*  
 → Le transfert est alors infiniment lent et la puissance du moteur tend vers ... 0 !
- Dans la pratique, le transfert de chaleur est toujours *irréversible* et l'expression de l'efficacité d'un moteur thermique semi-idéal travaillant **à puissance maximale** devient (résultat non démontré) :

$$\eta_{CNCA} = 1 - \sqrt{\frac{T_-}{T_+}}$$

efficacité de  
Chambadal – Novikov  
– Curzon – Ahlborn

	$T_+$		$\eta_C$	$\eta_{CNCA}$	$\eta_{typique}$
Centrale géothermique	400 K	→	25 %	13 %	15 %
Centrale nucléaire	600 K	→	50 %	29 %	33 %
Centrale au charbon	800 K	→	62 %	39 %	33 %
Cycle combiné	1500 K	→	83 %	45 %	45 %
Moteur à essence (cycle d'Otto)	2300 K	→	87 %	64 %	25 %

En réalité  
(valeurs observées)

# Améliorer la récupération de chaleur

## Dans les centrales thermiques

- **Cycle de surchauffe (ou cycle de régénération)** : La vapeur en sortie de turbine est surchauffée avant d'être réinjectée (en général dans une deuxième turbine). En plus de fournir un gain d'efficacité, la surchauffe diminue l'humidité de la vapeur nuisible aux aubes de turbines et augmente la puissance fournie par cycle.
- **Cycle combiné** : Les turbines à gaz opèrent à très haute température ( $\sim 1500\text{ °C}$ ) et en sortie le gaz est à suffisamment haute température ( $\sim 600\text{ °C}$ ) pour servir de source de chaleur pour un autre cycle avec une turbine à vapeur cette fois.

Efficacité finale :  $\eta = \eta_1 + \eta_2(1 - \eta_1)$

Efficacité typique  $> 50\text{-}60\%$  (jusqu'à  $90\%$  quand couplé à la cogénération!).

Inconvénient : gaz naturel = ressource fossile dont il faut se passer. Alternative : biogaz

- **Cogénération** : Production d'énergie mécanique/électrique + valorisation de la chaleur. La chaleur rejetée en sortie de cycle (« déchet ») est utilisée en tant que ... chaleur (en l'injectant dans le réseau de chauffage par exemple). A priori, l'efficacité finale de l'ensemble peut tendre vers  $100\%$ .

En pratique : pour avoir une bonne efficacité  $\eta_1$  il faut  $T_-$  basse : la chaleur rejetée est alors à trop basse température pour de l'eau de chauffage. Il faut donc sacrifier un peu d'efficacité sur le cycle produisant l'énergie mécanique/électrique. Par ailleurs, il vaut mieux que le centre de production soit proche d'un réseau dense (pour optimiser les coûts d'infrastructure). Idéalement, lieu de production = centrale thermique ou usine près d'un centre urbain, Université, ...

Part de l'électricité produite par cogénération : Europe  $11\%$  (Danemark  $40\%$ , France  $3\%$ ).

# Améliorer la récupération de chaleur

## Plus généralement

La **chaleur fatale**, est la « chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée ». De fait, rejeter localement de grandes quantités de chaleur dans l'environnement peut avoir des conséquences graves sur les écosystèmes (pollution thermique). Certaines installations industrielles sont donc soumises à des seuils de température de rejets à ne pas dépasser.

En récupérant cette chaleur, on fait d'un « déchet » une ressource (pour chauffer un bâtiment par exemple).

Ex. : réseau de chaleur de la commune de Dunkerque alimenté par la chaleur fatale d'une aciérie proche.

La récupération de chaleur permet aussi de limiter l'utilisation d'eau de refroidissement (centrales, usines).

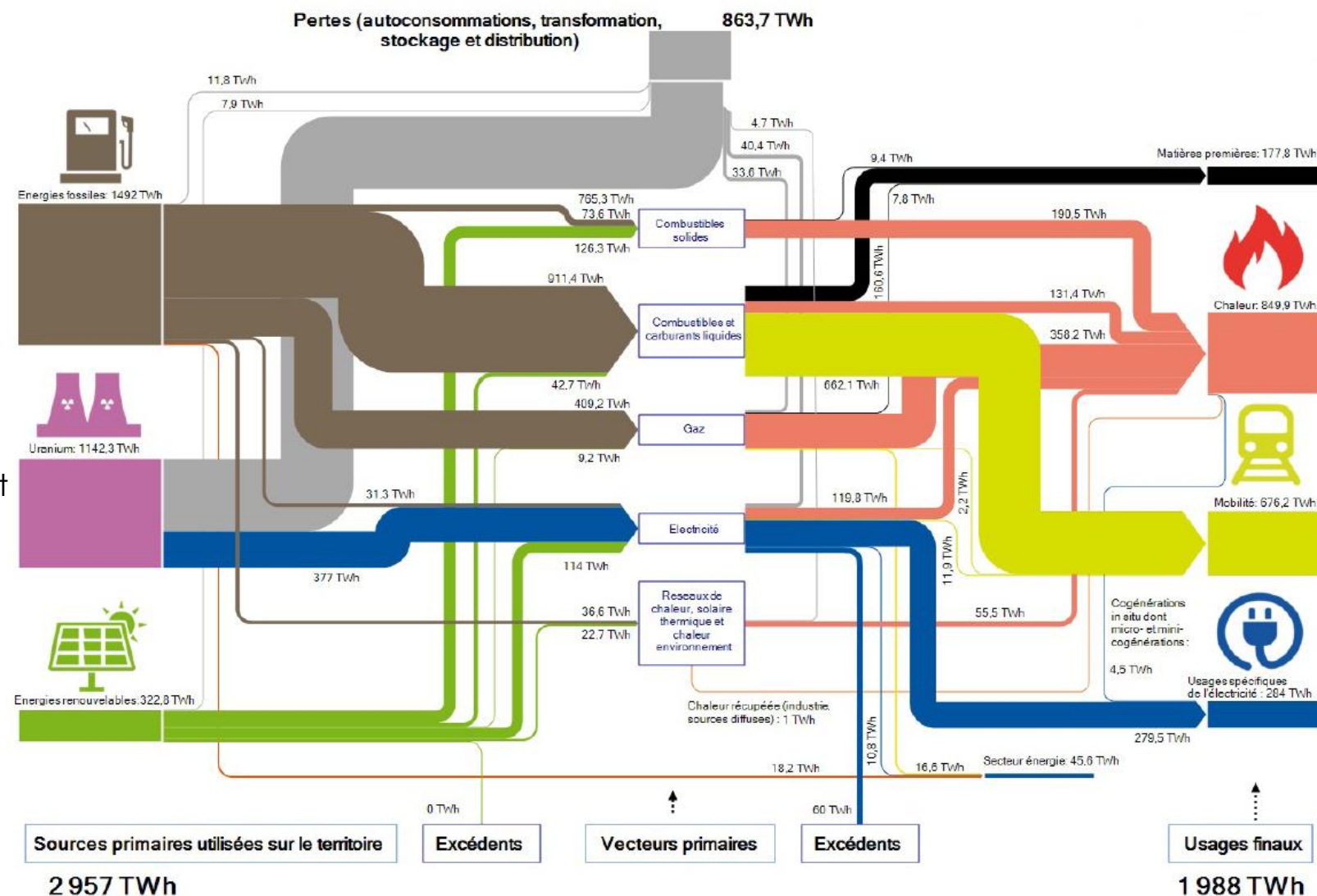
Exemples de systèmes dont la chaleur fatale est ou pourrait être récupérée :

- moteurs fixes ou moteurs de véhicules (chaleur perdue par le radiateur ou par le pot d'échappement)
- rejets d'eaux de refroidissement et fumées d'usines et de centrales thermiques
- la plupart des procédés de climatisation et de réfrigération
- procédés d'incinération des déchets
- serveurs informatiques (serveurs de calcul ou de données)
- systèmes d'éclairage
- réseaux d'évacuation des eaux usées (eaux chaudes de douches, vaisselles, lessives, ...).

Selon l'ADEME : gisement de chaleur fatale facilement valorisable dans l'industrie en France ~ 12 TWh/an (= chauffage d'un million de logements). Réellement exploité en 2020 : moins de 0,4 TWh.

# Représentation des flux d'énergie

## Diagramme de Sankey, France 2019

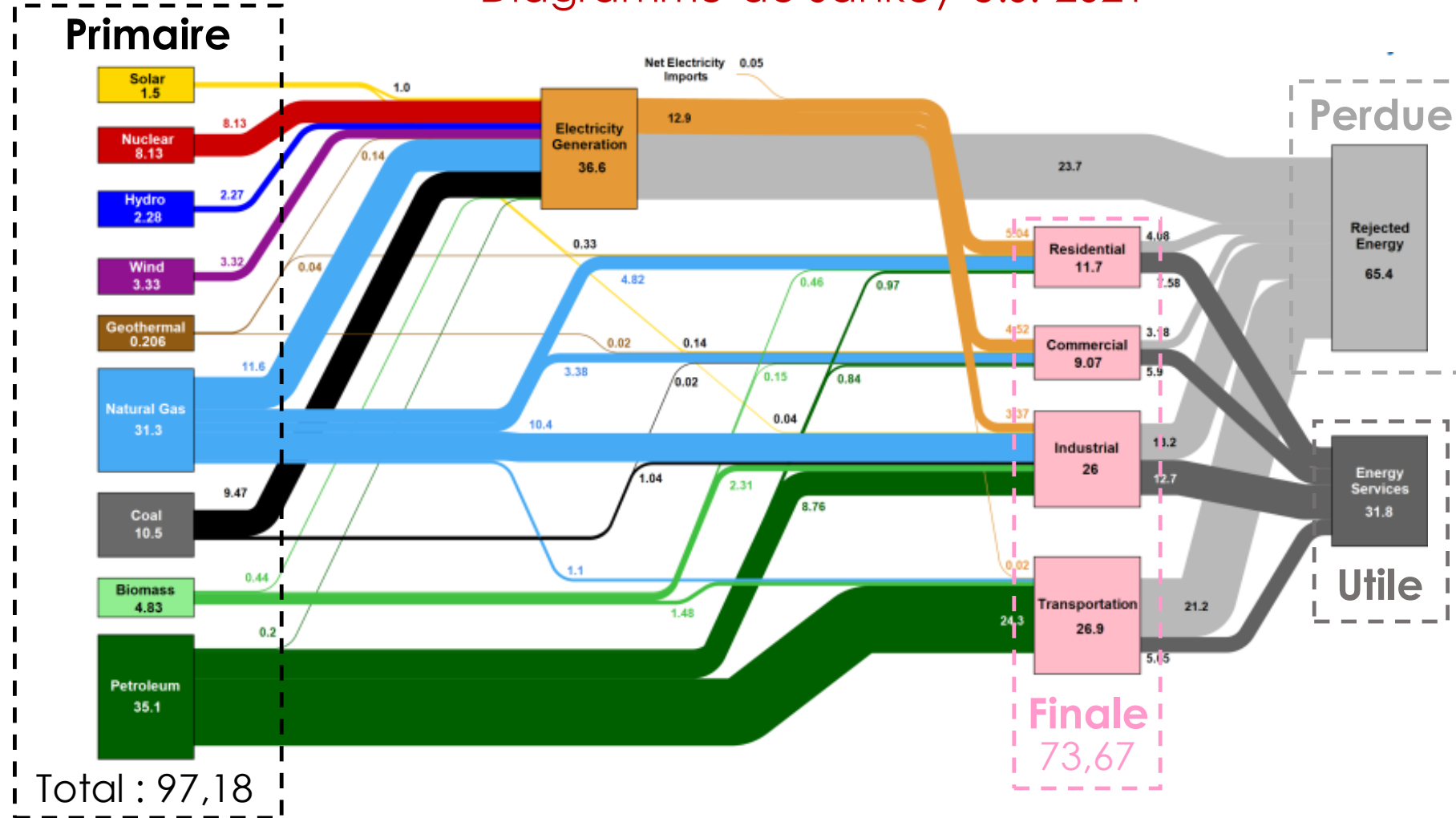


Pour 377 TWh d'électricité, il faut 1142 TWh d'énergie thermique (efficacité 33 %)



# Représentation des flux d'énergie

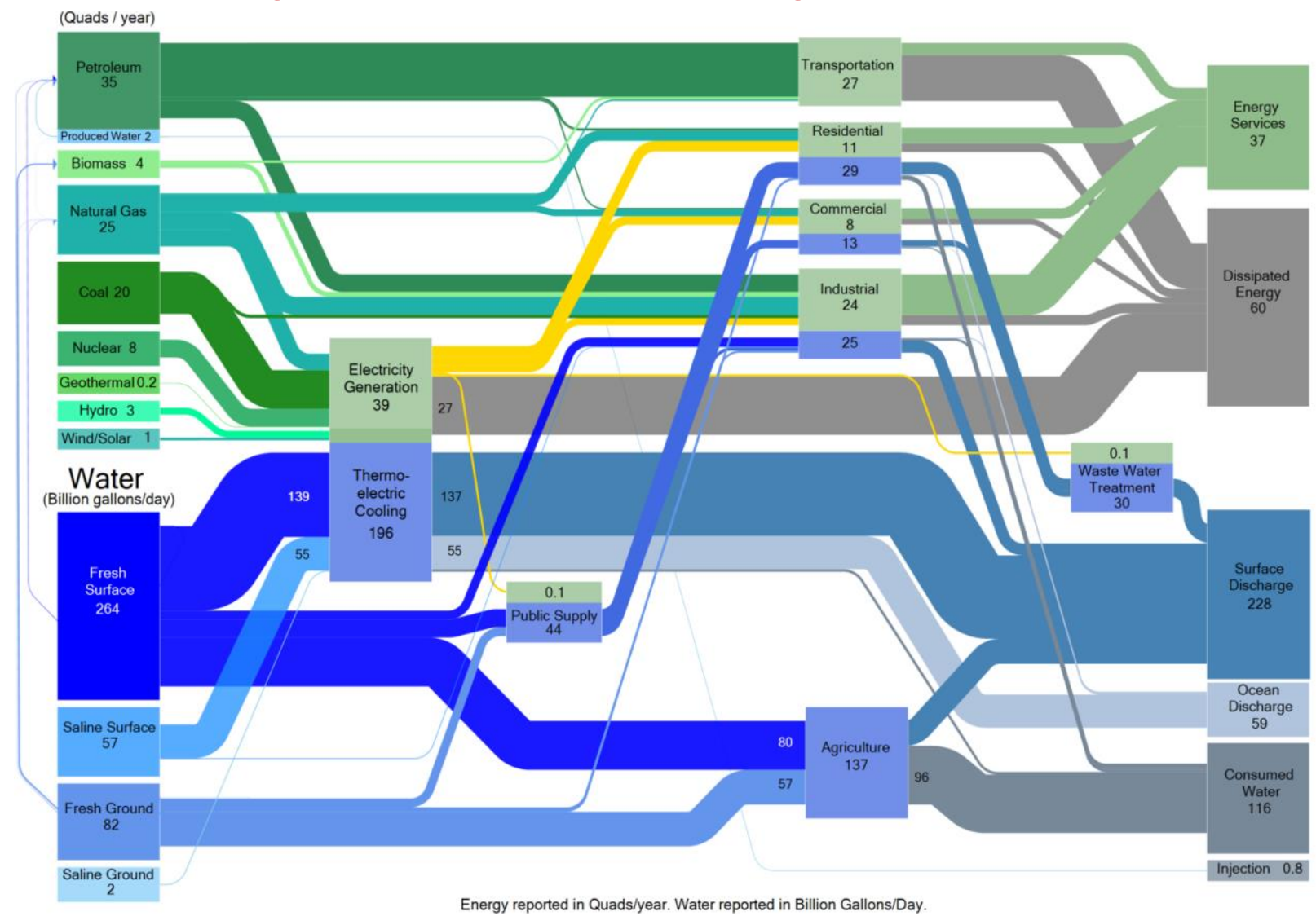
Diagramme de Sankey U.S. 2021



Consommation d'énergie U. S. en 2021 : 97.1 Quads =  $97.1 \times 1.055 \cdot 10^{18} \text{ J} \sim 100 \text{ exajoules}$

# Représentation des flux d'énergie et d'eau

Diagramme de Sankey énergie-eau, U.S. 2011



1 Quad :  $1.055 \cdot 10^{18}$  J  
1 Gallon : 3,78 litre

# Conclusions (moteur thermique)

## LIMITE FONDAMENTALE

$$\eta_c = 1 - \frac{T_-}{T_+}$$

Aucun moteur thermique ne peut transformer complètement la chaleur en travail. Il existe toujours une chaleur dite *fatale* rejetée dans l'environnement.

*Les conséquences de cette limitation sont importantes puisque la majeure partie de l'énergie utilisée par les humains passe par un stade thermique pour être convertie en énergie mécanique ou en électricité (usage : transport, puissance électrique).*

## + LIMITES PRATIQUES :

- Les cycles ne sont jamais idéaux dans la réalité (la chaleur n'est pas intégralement prise à la température maximale, ni rejetée à la température minimale)
- L'irréversibilité est presque toujours inévitable
- Les limites des matériaux (il n'existe pas d'isolant ou de conducteur parfaits)

→ Efficacité abaissée par rapport à la limite de Carnot

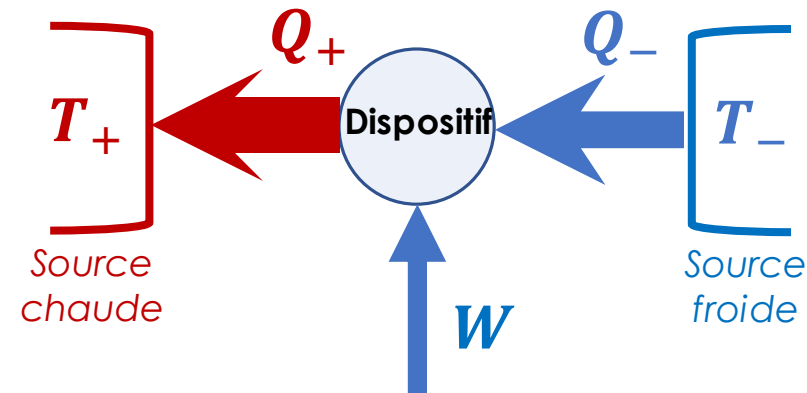
Par ailleurs, efficacité optimale ou puissance maximale : il faut choisir ...

*Remarque : la limite de Carnot s'obtient pour un cycle réversible. Cependant, dans un processus non-cyclique, il existe une limite similaire sur l'énergie extractible (situation avec un corps plus chaud ou plus froid que l'environnement, sans référence à un cycle. Notion d'exergie).*

# Conversion thermique « assistée »

## Extracteur de chaleur

Dispositif utilisant du travail pour extraire de la chaleur (de la basse vers la haute température)



### Exemples :

- Pompe à chaleur
- Réfrigérateur
- Climatiseur

Remarques :

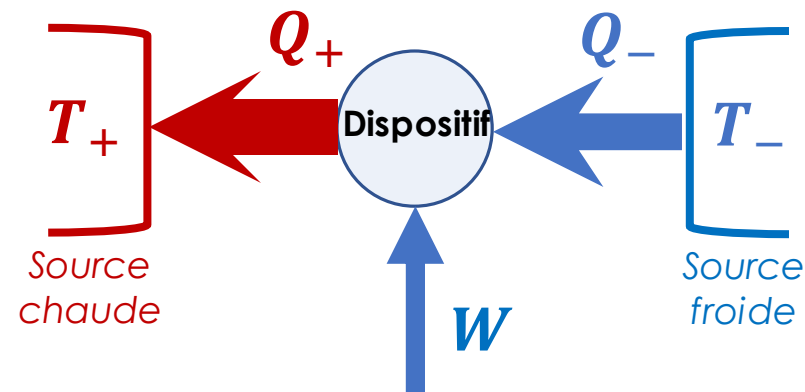
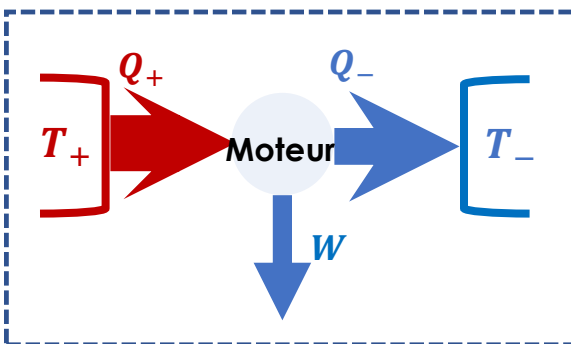
- C'est un moteur thermique en mode *inversé*
- La chaleur s'écoule dans le « mauvais sens » d'où un prix à payer (le travail)

Coefficient de Performance CoP :	[effet désiré] [dépense]	Dispositif	Effet désiré	CoP
		Pompe à chaleur	chauffer une pièce	$\frac{Q_+}{W}$
		Réfrigérateur	refroidir un bac	} $\frac{Q_-}{W}$
		Climatiseur	refroidir une pièce	

# Conversion thermique « assistée »

## Extracteur de chaleur

Dispositif utilisant du travail pour extraire de la chaleur (de la basse vers la haute température)



### Exemples :

- Pompe à chaleur
- Réfrigérateur
- Climatiseur

Remarques :

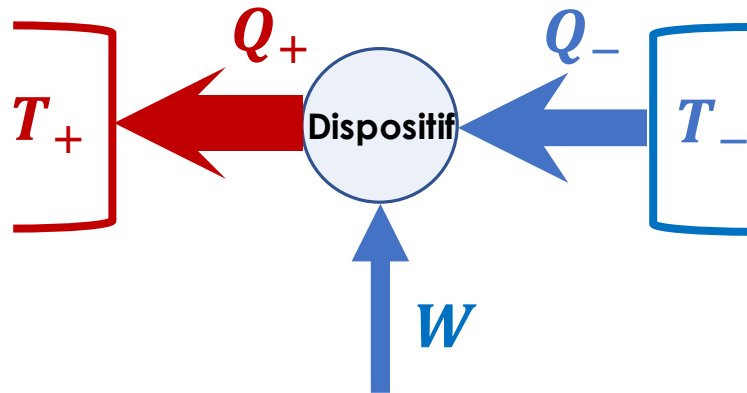
- C'est un moteur thermique en mode *inversé*
- La chaleur s'écoule dans le « mauvais sens » d'où un prix à payer (le travail)

**Coefficient de Performance CoP :**  $\frac{[\text{effet désiré}]}{[\text{dépense}]}$

Dispositif	Effet désiré	CoP
Pompe à chaleur	chauffer une pièce	$\frac{Q_+}{W}$
Réfrigérateur	refroidir un bac	} $\frac{Q_-}{W}$
Climatiseur	refroidir une pièce	

# Conversion thermique « assistée »

## Performance de l'extracteur de chaleur



1<sup>er</sup> principe :  $Q_+ = Q_- + W$

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S_{tot} = \Delta S_+ - \Delta S_- \geq 0$

car  $\Delta S_+$  ajouté à la source chaude

$\Delta S_-$  retiré à la source froide

$$\text{avec } Q_+ = T_+ \Delta S_+ \quad Q_- = T_- \Delta S_- \rightarrow \frac{Q_+}{Q_-} \geq \frac{T_+}{T_-} \rightarrow \frac{Q_-}{Q_+} \leq \frac{T_-}{T_+}$$

$$\text{CoP} = \frac{[\text{effet désiré}]}{[\text{dépendance}]}$$

**Pompe à  
chaleur**

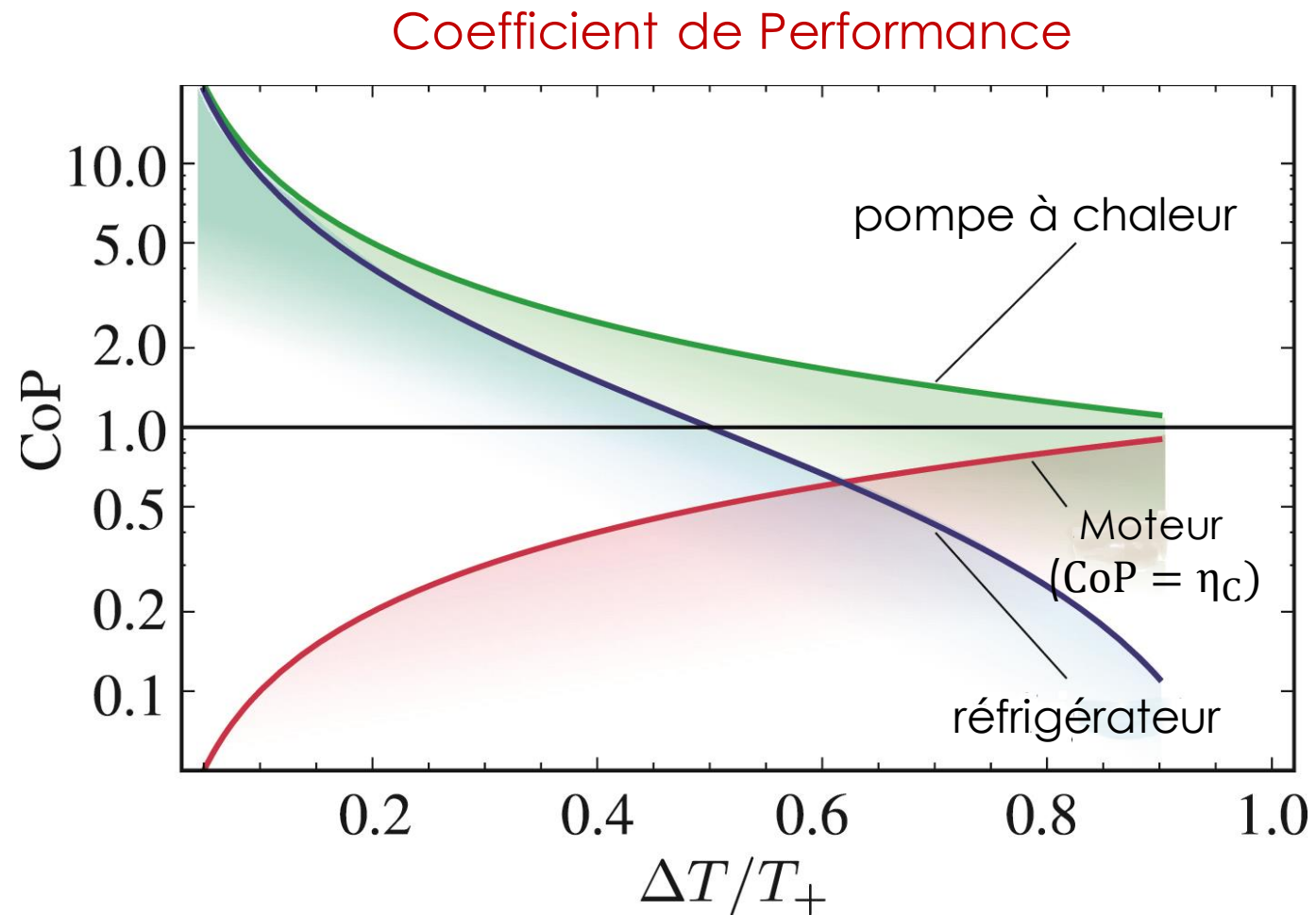
$$\text{CoP}_{\text{pac}} = \frac{Q_+}{W} = \frac{Q_+}{Q_+ - Q_-} \leq \frac{T_+}{T_+ - T_-} = \frac{1}{\eta_{\text{Carnot}}}$$

**Réfrigérateur  
/ Climatiseur**

$$\text{CoP}_r = \frac{Q_-}{W} = \frac{Q_-}{Q_+ - Q_-} \leq \frac{T_-}{T_+ - T_-} = \frac{1}{\eta_{\text{Carnot}}} - 1$$

**Les CoP peuvent être supérieurs à 1 !**

# Conversion thermique « assistée »



Les pompes à chaleur sont d'autant plus efficaces que  $\Delta T$  est petit

# Conversion thermique « assistée »

## Focus sur la pompe à chaleur (PAC)

Les pompes à chaleur utilisent un cycle frigorifique pour transférer de la chaleur de la partie à refroidir (*source froide*) vers la partie à réchauffer (*source chaude*). Le compresseur est la pompe du circuit, qui permet de faire circuler le fluide réfrigérant. Ce cycle comporte quatre temps :

- 1 **Compression** : le réfrigérant à l'état vapeur est comprimé et sort du *compresseur* à haute pression et haute température ;
- 2 **Condensation** : la vapeur très chaude (et comprimée) passe dans un *condenseur* (ou *échangeur de chaleur*) où elle va se liquéfier et céder de la chaleur au milieu ambiant (l'air de la pièce) ;
- 3 **Détente** : à la sortie du condenseur le liquide sous haute pression est détendu en faisant baisser rapidement la pression dans un *détendeur* (en faisant circuler le fluide au travers d'un orifice) → vaporisation d'une partie du fluide ;
- 4 **Evaporation** : le fluide réfrigérant à présent froid et partiellement vaporisé circule dans un *échangeur de chaleur* (*évaporateur*) qui se trouve dans l'ambiance à refroidir (milieu extérieur). Il soustrait de la chaleur au médium (air) pour refroidir celui-ci. En absorbant de la chaleur, le réfrigérant s'évapore complètement.

Il existe différents types de pompes à chaleur :

- PAC *géothermique* : utilise le sol comme source froide.
- PAC *aérothermique* : utilise l'air extérieur comme source froide.
- PAC *aquathermique* : utilise de l'eau (puits, rivière, eau souterraine...) comme source froide. La plus efficace. Mais la ressource en eau doit être en quantité suffisante (nécessité d'une autorisation). Rejet d'une eau plus froide que l'eau pompée.

Fluide frigorigène (exemples) : R134a (tétrafluoroéthane), CO<sub>2</sub>, eau, ...



# Conversion thermique « assistée »

## Focus sur la pompe à chaleur (PAC)

- Selon l'Agence Internationale de l'Energie (IEA), les ventes mondiales de PAC ont progressé de près de 15 % en 2021 (le double du taux moyen de la décennie écoulée). L'IEA estime le potentiel de réduction des émissions de CO<sub>2</sub> par les PAC à au moins 0,5 Gt en 2030 (le chauffage représente actuellement 4 Gt CO<sub>2</sub> par an).



Pour l'Union européenne : « filière industrielle stratégique »

France (2021) : 41 TWh d'énergie thermique produite

[The Future of Heat Pumps - Analysis \(November 2022\)](#)

- Ne se substitue pas à une isolation efficace (globale) des logements ! Lorsque les températures sont négatives, les PAC ne sont performantes qu'avec un bâtiment bien isolé. Il faut d'abord isoler les logements puis les équiper en fonction des besoins restants.

France : Pour tenir l'objectif d'un parc neutre en carbone en 2050, nécessité de rénover au niveau BBC (bâtiment basse consommation) 370 000 logements par an jusqu'à 2030, puis 700 000 par an jusqu'à 2050. Rythme actuel : entre 50 000 et 100 000 par an.

[Mission d'enquête sénatoriale sur la rénovation énergétique des bâtiments \(2023\)](#)

# Annexes

Energie disponible. Energies primaire, finale, utile

Echelles d'énergie (exemples balayant 17 ordres de grandeur)

Echelles de puissance (exemples balayant 17 ordres de grandeur)

« Rappels » ou compléments de thermodynamique / phys. statistique

- Entropie. Connexion avec le désordre. Connexion avec l'irréversibilité.
- Quasi-équilibre et transformations quasi-statiques
- Pourquoi parle-t-on d'énergie libre ?
- Efficacité du moteur thermique, repris avec les notations du cours LU2PY103

Un autre type de conversion de chaleur : la pile thermoélectrique

# Energie disponible

L'énergie *disponible* au sens physique du terme est l'énergie que fournit la transformation d'un système donné.

	énergie disponible
énergies fossiles et biomasse	énergie de liaison chimique (fournie par la réaction de combustion)
énergie nucléaire	énergie de liaison des noyaux (libérée lors d'une réaction de fission)
hydraulique	énergie cinétique de l'eau dans des conduites forcées (convertie à partir d'énergie potentielle de pesanteur)
énergie éolienne	énergie cinétique du vent

On parle également de *source* d'énergie en guise de synonyme, même si cette dénomination est abusive : il ne peut y avoir création d'énergie *ex nihilo*.

# Energie primaire

## Définition (pour les bilans comptables)

On dit souvent que c'est l'énergie contenue dans les ressources de la nature (charbon, uranium, vent ...). Plus précisément, pour être rendue disponible, la ressource devra subir une première transformation (réaction de combustion du charbon, réaction de fission de l'uranium, capture de l'énergie cinétique du vent via une éolienne ou un moulin, ...).

L'énergie *primaire* est donc la forme sous laquelle une énergie est disponible après la première transformation d'une ressource puisée dans la nature.

Ressources : bois, charbon,  
pétrole, gaz naturel



énergie stockée dans  
les liaisons chimiques

réaction de  
combustion



chaleur dégagée =  
**énergie primaire**

Remarque : il existe différentes méthodes de comptabilité de l'énergie primaire (variant par ce qui est retenu comme première transformation dans le cas de certaines énergies de flux : éolien, hydraulique, photovoltaïque). La variabilité sur le bilan global (mondial) d'énergie primaire est inférieure à 10 %.

# Energie primaire

## Energies de stock et énergies de flux

On peut distinguer deux grandes familles de sources d'énergie primaire :

- les *énergies de stock* : on puise dans une réserve de matière limitée. Ce sont les combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) et le minerai d'uranium.
- les *énergies de flux* : on prélève dans un flux d'énergie qui nous arrive continûment (hydraulique, éolien, solaire, géothermie, biomasse). Les énergies de flux sont des énergies renouvelables car on ne consomme pas de matière combustibles.

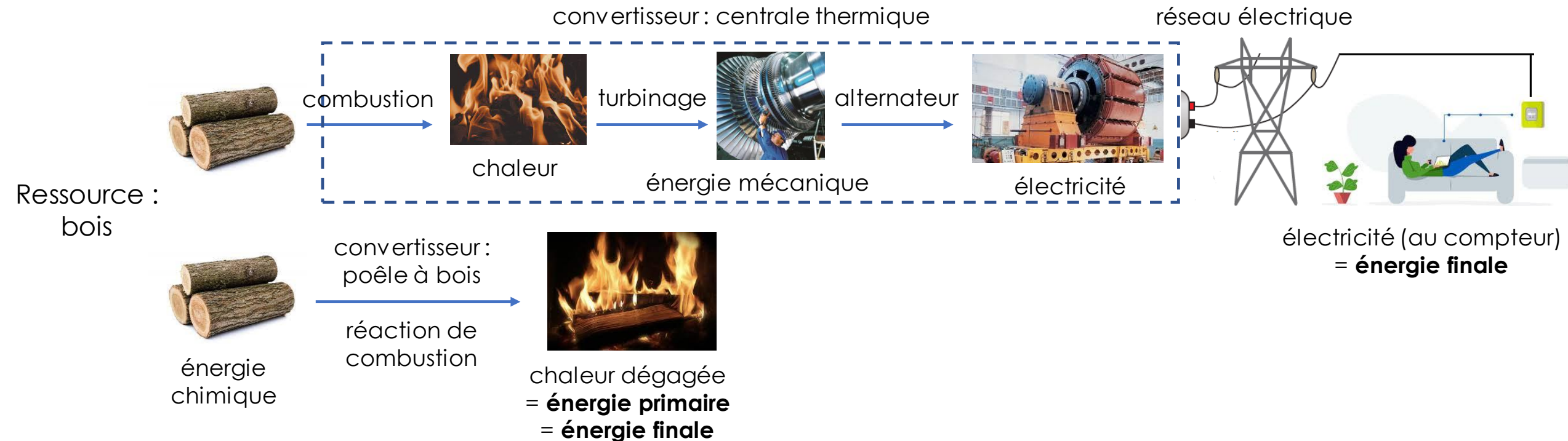
N. B. : les dispositifs pour récupérer les énergies (qu'elles soient renouvelables ou pas), nécessitent de la matière (non renouvelable).

# Energie finale

C'est l'énergie fournie à l'utilisateur. Exemples : électricité en sortie d'une prise électrique, essence disponible à la pompe, ...

Il s'agit d'une définition économique pour désigner l'énergie achetée par le consommateur. Il se s'agit pas forcément d'énergie utile (au sens physique du terme).

L'énergie finale peut être issue d'une chaîne de transformation plus ou moins longue (cas de l'électricité) ou à l'inverse s'identifier à de l'énergie primaire (achat de bois pour le chauffage).



# Energie utile

C'est la part de l'énergie finale ayant effectivement servie à satisfaire un besoin (ex. : chaleur réellement utilisée pour griller une biscotte dans un grille-pain). Cette énergie n'est en général pas mesurée dans les statistiques énergétiques car **elle dépend largement de l'usage et des performances des appareils de l'usager.**

Rappel : à chaque étape de conversion de l'énergie disponible, on a un rendement  $\eta = \frac{[\text{énergie utile}]}{[\text{énergie disponible}]}$

Exemple : l'énergie de fission nucléaire est transformée en électricité dans une centrale nucléaire dont le rendement global est d'environ 33 % (rendement thermodynamique de la machine + turbines + alternateurs). Puis l'électricité est transportée dans des câbles, avec des pertes de l'ordre de 10 % jusqu'au consommateur.

Ce dernier va utiliser l'électricité pour alimenter un appareil : ampoule à incandescence ou radiateur électrique.

À ce niveau, si l'utilité est l'éclairage, alors le rendement est d'environ 3 %,  
si l'utilité est le chauffage, alors le rendement est d'environ 100 %.

Au niveau global, dans le cas de l'éclairage, le rendement global est ~ 1 % (3 % x 90 % x 33 %)  
dans le cas du chauffage, le rendement global est ~ 30 % (100 % x 90 % x 33 %).

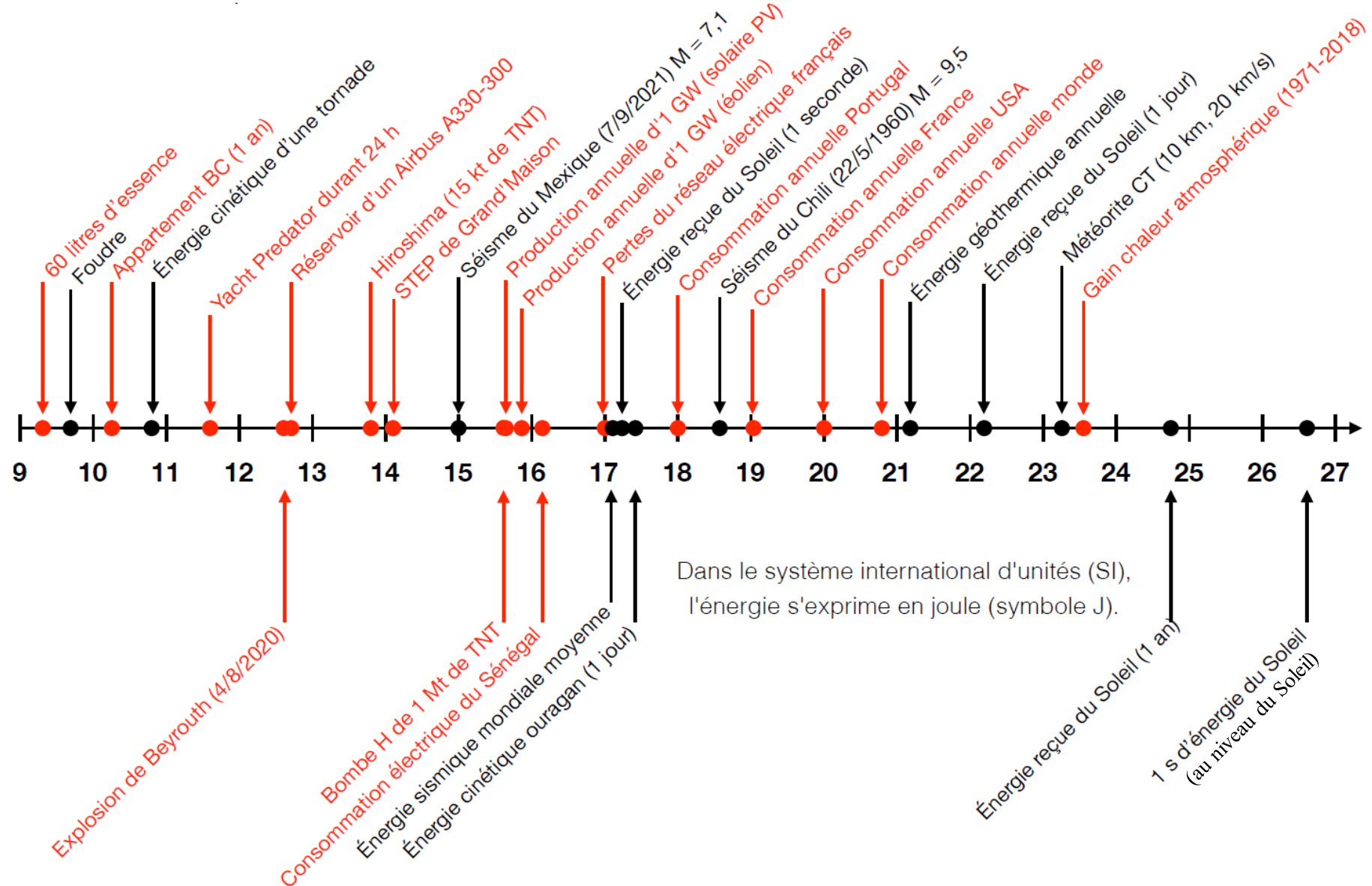
Quand on parle d'énergie utile il faut donc bien préciser *utile à quoi* et à *quel niveau* de la chaîne de transformation et de transport on se positionne, en tenant compte des différents rendements (machines) et des pertes (transport).

# Echelle d'énergie

Facteur	Préfixe	Multiple	Exemple
$10^0$		1 J	Soulever une pomme de 1 mètre.
$10^1$		10 J	Flash d'un appareil photo reflex.
$10^2$		100 J	Balle de tennis (58 g) servie à 210 km/h.
$10^3$	kilo-	1 kJ	Un enfant de 35 kg monte 1 étage, chauffer 1/4 L d'eau de 1°C.
$10^4$		10 kJ	Stock d'une pile LR06 AA neuve (1,2 V, 2000 mAh) ; batterie de tél. portable.
$10^5$		100 kJ	Combustion de 2 grammes d'essence.
$10^6$	méga-	1 MJ	Un humain qui pédale durant 3 heures.
$10^7$		10 MJ	Chauffer 50 litres d'eau de 15 à 65 °C.
$10^8$		100 MJ	Combustion de 3 litres d'essence. Faire 250 km en voiture électrique.
$10^9$	giga-	1 GJ	Consommation annuelle d'une machine à laver, 2h/semaine.
$10^{10}$		10 GJ	Consommation annuel d'un appartement basse consommation de 100 m².
$10^{11}$		100 GJ	Une heure de vol de croisière d'un avion A320.
$10^{12}$	téra-	1 TJ	Explosion de 250 tonnes de TNT.
$10^{13}$		10 TJ	Production électrique d'un réacteur nucléaire en 3 heures.
$10^{14}$		100 TJ	Explosion nucléaire de Nagasaki.
$10^{15}$	péta-	1 PJ	Production électrique d'un réacteur nucléaire en 12 jours ; le CERN 3 mois.
$10^{16}$		10 PJ	Perte du réseau électrique français ; consommation électrique du Zimbabwe.



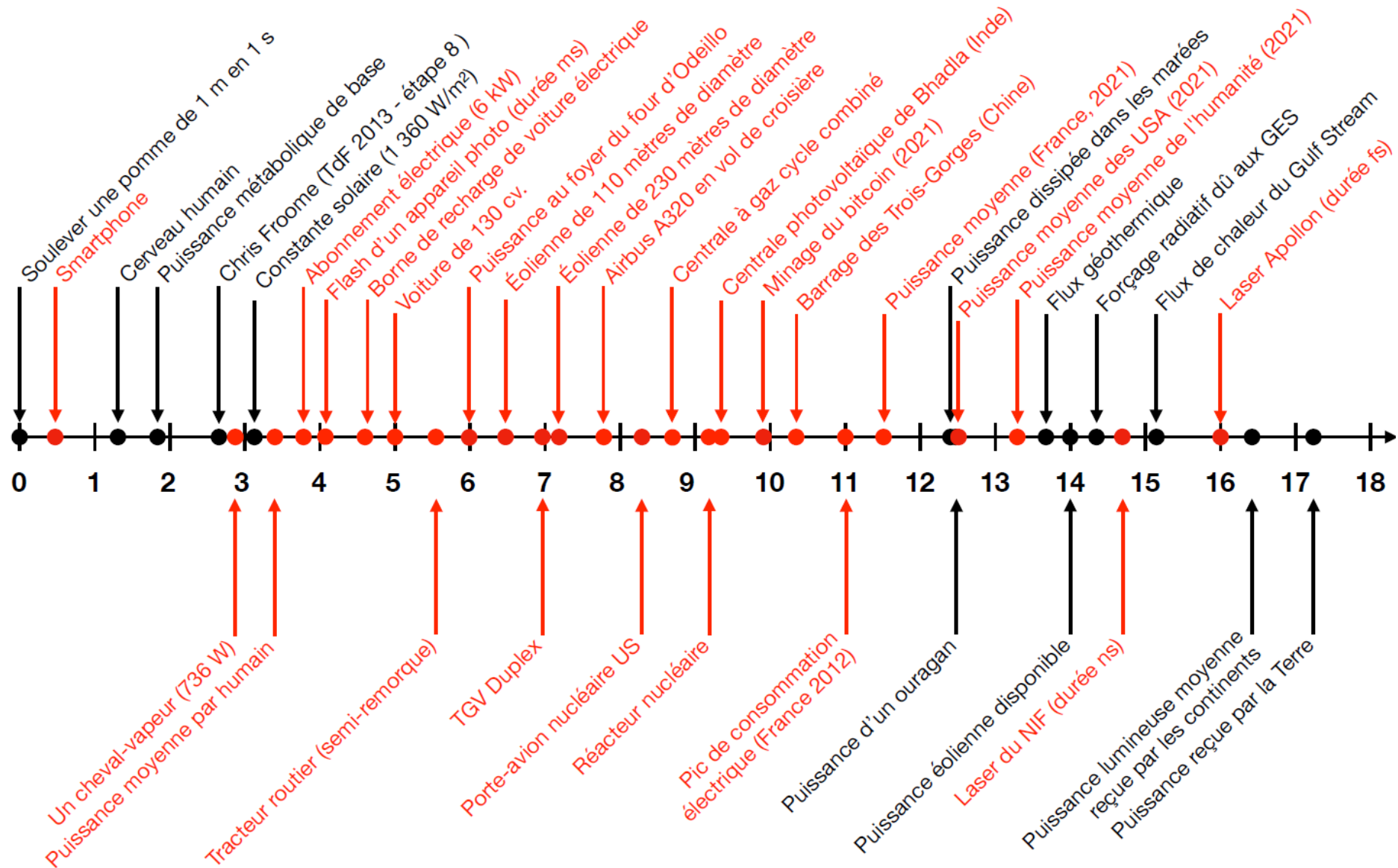
# Echelle d'énergie (unité de l'axe = puissance de 10)



# Echelle de puissance

Facteur	Multiple	Exemple
$10^{-2}$	10 mW	Diode électroluminescente.
$10^{-1}$	100 mW	Laser d'un graveur de CR-R ; réseau wifi ; liaison bluetooth.
$10^0$	1 W	Téléphone portable GSM (2G).
$10^1$	10 W	Enceinte externe pour ordinateur.
$10^2$	100 W	Puissance produite par un humain (2 000 kcal/jour).
$10^3$	1 kW	Puissance lumineuse reçue du Soleil par une surface d'1 m <sup>2</sup> (hors atmosphère).
$10^4$	10 kW	Flash d'un appareil photo.
$10^5$	100 kW	Voiture standard.
$10^6$	1 MW	Locomotive diesel.
$10^7$	10 MW	TGV Duplex.
$10^8$	100 MW	Paquebot Queen Mary 2.
$10^9$	1 GW	Un réacteur nucléaire.
$10^{10}$	10 GW	Puissance électrique générée par le barrage d'Itaipu (Brésil/Paraguay).
$10^{11}$	100 GW	Pic de consommation électrique enregistré en France le 8/2/2012 à 19h.
$10^{12}$	1 TW	Puissance électrique moyenne consommée dans le monde en 2001.
$10^{13}$	10 TW	Puissance moyenne consommée par l'ensemble de l'humanité en 2001.
$10^{14}$	100 TW	Puissance thermique d'un cyclone tropical.

# Echelle de puissance (unité de l'axe = puissance de 10)



# L'entropie

Compléments de  
Phys. Statistique

L'entropie fournit une mesure quantitative de l'ignorance de l'état microscopique d'un système correspondant à un état macroscopique donné et connu (température fixée, volume fixé, ...).

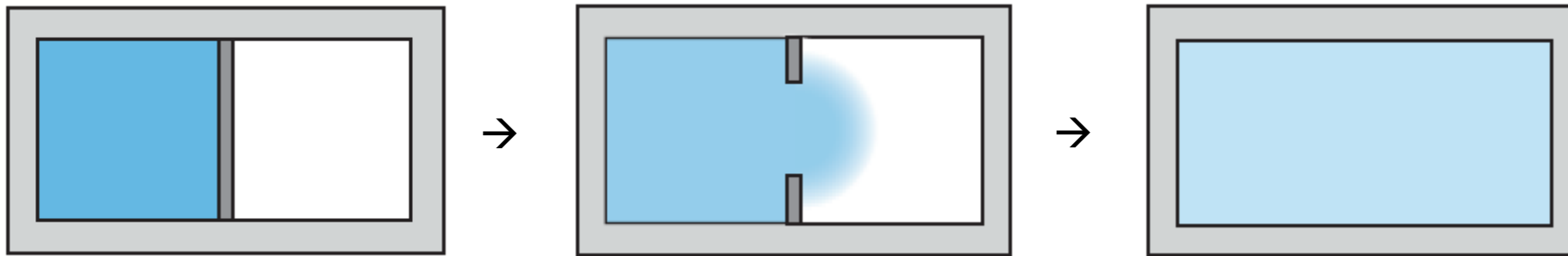
**[2<sup>nd</sup> principe] A l'équilibre thermodynamique, l'entropie d'un système est maximale.**

Pour un système isolé d'énergie  $U$  à l'équilibre thermo., tous les microétats sont équiprobables et l'entropie est donnée par :

$$S = k_b \ln \mathcal{N}$$

où  $\mathcal{N} \equiv \mathcal{N}(U)$  est le nombre de microétats compatibles avec l'état macroscopique du système.

*Tous les états équiprobables : situation dans laquelle on a le moins d'information sur le système.*



*En pratique, on ne peut pas suivre complètement en détail l'évolution du microétat initial, on ne peut que garder la trace de quantités macroscopiques comme le volume, la température et la pression. Notre inaptitude à suivre l'évolution temporelle détaillée d'un système isolé signifie que nous perdons de l'information au sujet des microétats du système. Cela correspond à une augmentation d'entropie.*

# L'entropie

Compléments de  
Phys. Statistique

## Connexion avec le désordre

L'entropie fournit une mesure des nombreuses façons pour un système de s'organiser à l'échelle microscopique tout en maintenant la même énergie interne (température fixée, volume, ...)

Exemple : « boîte à 8 places » contenant 4 atomes A et 4 atomes B :



0:4

1 configuration



4:0

1 configuration

# L'entropie

Compléments de  
Phys. Statistique

## Connexion avec le désordre

L'entropie fournit une mesure des nombreuses façons pour un système de s'organiser à l'échelle microscopique tout en maintenant la même énergie interne (température fixée, volume, ...)

Exemple : « boîte à 8 places » contenant 4 atomes A et 4 atomes B :



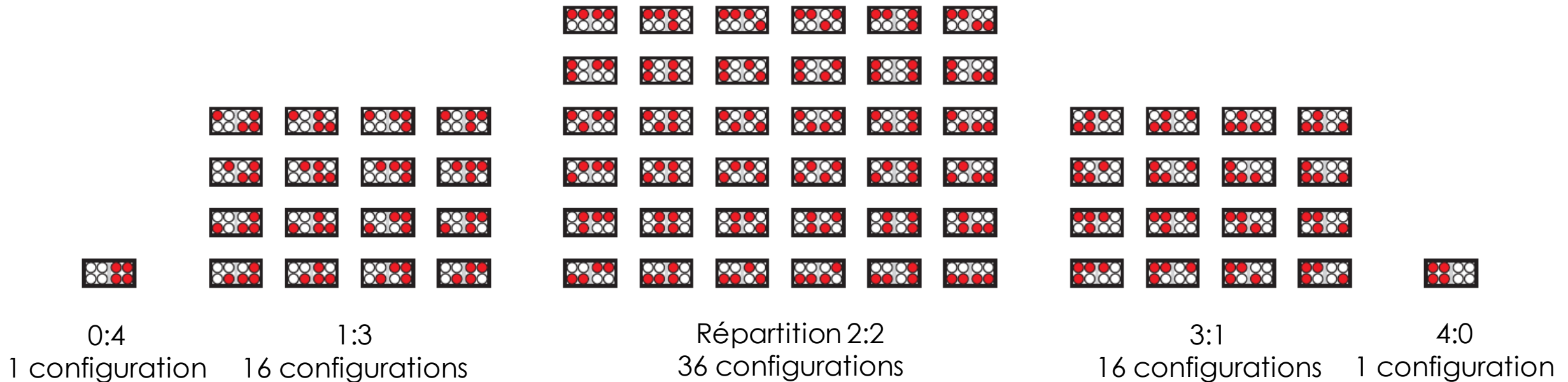
# L'entropie

Compléments de  
Phys. Statistique

## Connexion avec le désordre

L'entropie fournit une mesure des nombreuses façons pour un système de s'organiser à l'échelle microscopique tout en maintenant la même énergie interne (température fixée, volume, ...)

Exemple : « boîte à 8 places » contenant 4 atomes A et 4 atomes B :



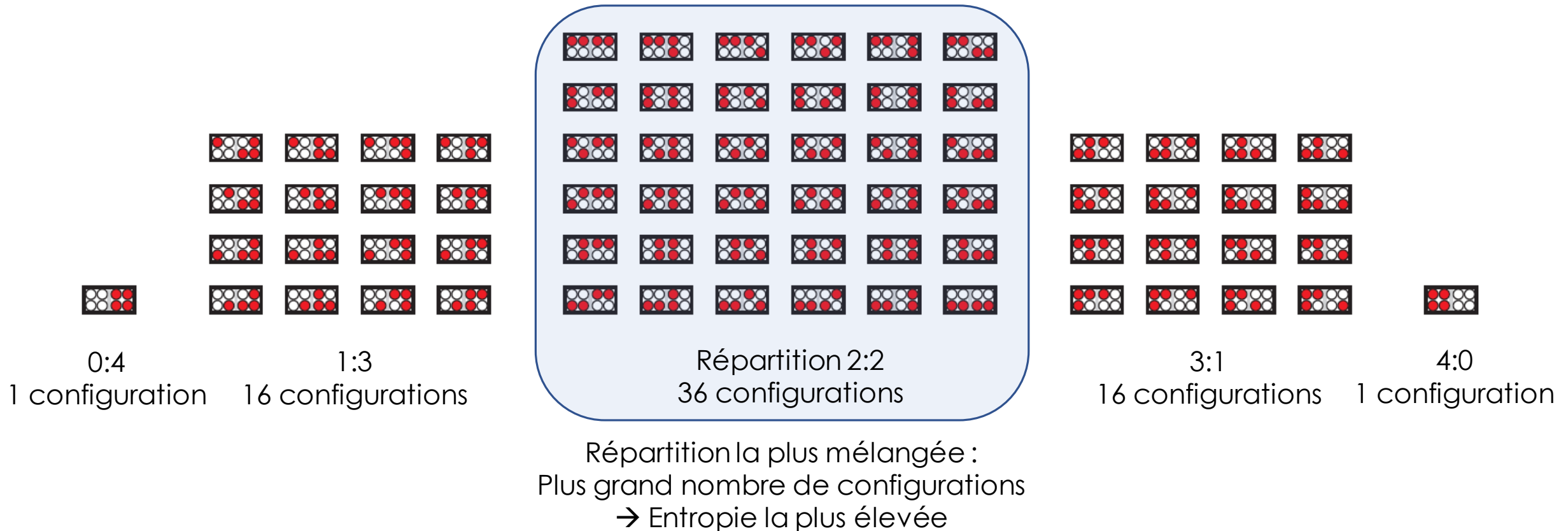
# L'entropie

Compléments de  
Phys. Statistique

## Connexion avec le désordre

L'entropie fournit une mesure des nombreuses façons pour un système de s'organiser à l'échelle microscopique tout en maintenant la même énergie interne (température fixée, volume, ...)

Exemple : « boîte à 8 places » contenant 4 atomes A et 4 atomes B :





# L'entropie

« Rappel »  
de Thermo.

## Connexion avec l'irréversibilité

*[2<sup>nd</sup> principe] l'entropie d'un système isolé ne peut pas décroître mais peut croître dans le temps.*

Le second principe vient formaliser la notion d'irréversibilité d'une transformation.

Exemples de sources d'irréversibilité :

- transfert de chaleur d'une source chaude vers une source froide,
- dissipation d'énergie cinétique en chaleur par frottement (freinage d'un véhicule dans l'air)
- réaction chimique (combustion d'une allumette),
- le mélange d'une solution dans une autre (lait dans le café, encre dans l'eau).

L'expérience commune nous permet de constater que ces transformations s'effectuent dans un seul sens ; elles sont irréversibles (au moins spontanément).

# Quasi-équilibre et transformations réversibles

Quand on change graduellement l'état d'un système de façon à ce qu'il reste constamment infiniment près de l'équilibre thermodynamique, on parle de transformation **quasi-statique**. Quand de la chaleur  $\delta Q$  est transférée à un système de façon quasi-statique et qu'il n'y a pas d'autres sources de production d'entropie, le processus est alors **réversible** et l'entropie du système augmente de :

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T}$$

Les transformations réversibles n'augmentent pas l'entropie totale des systèmes en jeu. De l'entropie additionnelle est créée quand la chaleur est transférée de façon irréversible.

Remarque : Les notions de transformation quasi-statique et de réversibilité sont des idéalizations. Dans n'importe quel système réel, il existera toujours de petites déviations à l'équilibre thermique (telles que des gradients de température dans le fluide) qui invalident l'hypothèse quasi-statique et donnent lieu à une entropie additionnelle → Pour un système réel, le transfert de chaleur n'est jamais vraiment réversible (au sens ci-dessus).

# Pourquoi parle-t-on d'énergie *libre* ?

Soit le potentiel thermodynamique  $F$  (énergie libre), défini par :  $F \stackrel{\text{def}}{=} U - TS$

- 1) La variation  $\Delta F$  permet de quantifier la quantité de travail maximale que le système peut fournir dans une transformation à température et volume constants<sup>1</sup> :

$$\Delta F = \Delta U - T\Delta S$$

En effet, pour une transformation isotherme réversible,  $\Delta S = \frac{Q_{rev}}{T}$  donc  $\Delta F = \Delta U - Q_{rev} = W_{rev}$

→ La variation d'énergie libre correspond au travail réversible ou maximal

- 2) La variation  $\Delta F$  incorpore le 2<sup>nd</sup> principe (réaction spontanée si  $\Delta F < 0$ )

Pour une transformation à  $T$  et  $V$  constant, l'entropie du système varie d'une quantité  $\Delta S$ . De plus, une quantité de chaleur  $-\Delta U$  égale à la variation d'énergie interne du système est donnée à l'environnement (ajout d'entropie  $\Delta S_{env.} = -\Delta U/T$  à l'environnement). La variation totale d'entropie, incluant le système et son environnement est :

$$\begin{aligned}\Delta S_{tot}\Big|_{T,V} &= \Delta S_{syst.} + \Delta S_{env.} \\ &= \Delta S - \Delta U/T\end{aligned}$$

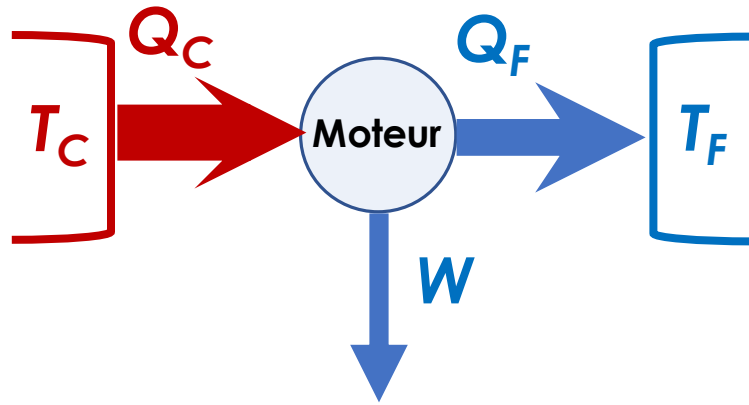
$$\text{Condition sur } \Delta S_{tot} > 0 \rightarrow \Delta S - \frac{\Delta U}{T} > 0 \quad \text{soit} \quad \Delta U - T\Delta S < 0$$

<sup>1</sup>: ou  $G \stackrel{\text{def}}{=} H - TS$  et  $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$  pour une transformation à température et pression constantes.

# De l'énergie thermique au travail

Notations du  
cours de Thermo.  
LU2PY103

## Efficacité du moteur thermique



1<sup>er</sup> principe :  $Q_C + Q_F + W = 0$  Expression algébrique (quantité en rouge : positive ; bleu : négative)

2<sup>nd</sup> principe :  $\Delta S_{cycle} + \Delta S_{therm.chaud} + \Delta S_{therm.froid} \geq 0$

avec :  $\Delta S_{cycle} = 0$

$$\Delta S_{therm.chaud} = -\frac{Q_C}{T_C} \quad \text{et} \quad \Delta S_{therm.froid} = -\frac{Q_F}{T_F}$$

$$\text{Efficacité } \eta \equiv \frac{[\text{Ce qu'on récupère d'utile}]}{[\text{Ce que l'on a dépensé}]} \rightarrow \eta = \frac{-W}{Q_C} = \frac{Q_C + Q_F}{Q_C} = 1 + \frac{Q_F}{Q_C}$$

Si la transformation est réversible :  $\Delta S_{tot} = 0 \rightarrow \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} = 0 \rightarrow \eta_{max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$  Rendement de Carnot

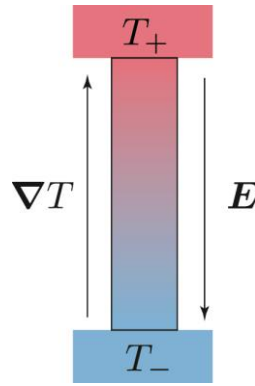
Si la transformation est irréversible :  $\Delta S_{tot} > 0 \rightarrow \frac{Q_C}{T_C} + \frac{Q_F}{T_F} < 0 \rightarrow \eta < \eta_{max} = 1 - \frac{T_F}{T_C}$

# Conversion directe thermique - électrique

## La pile thermoélectrique

Effet Seebeck : apparition d'un courant électrique dans une barre de métal lorsque ses extrémités sont soumises à différentes températures:  $\vec{E} = -S\vec{\nabla}T$  avec  $S$  coefficient de Seebeck

*Origine (quantique) : dans un matériau à plus haute température, le nombre d'électrons dans des états excités de plus haute énergie est augmenté (donné par distribution de Boltzmann) ce qui laisse des états vides (trous) à plus basse énergie. Le flux avec lequel diffuse les électrons excités depuis la région haute température peut différer du flux avec lequel les électrons retournent combler les états vides, et la différence entre ces flux peut donner lieu à un courant net (proportionnel au gradient de température).*



On peut faire une pile thermoélectrique en connectant deux matériaux de coefficient de Seebeck différents (par ex.  $S_1 > 0$  et  $S_2 < 0$ ) à des réservoirs de chaleur aux températures  $T_+$  et  $T_-$ . La différence de champs électriques dans les deux matériaux génère une différence de potentiel entre les extrémités A et B qui peut conduire un courant dans un circuit externe.

Dispositifs de petite taille et robuste mais efficacité très faible

→ Applications de niches : exploration spatiale (rover Curiosity alimenté par source radioactive (chaleur) + pile thermoélectrique. Efficacité ~6%)

**Application potentielle** : utilisation de la chaleur perdue par les moteurs automobiles ou les panneaux photovoltaïques pour augmenter leur efficacité.

