



# Introduction à l'énergie



Olivier Plantevin  
Université Paris-Saclay  
Laboratoire de Physique des Solides



# L'énergie est partout, mais qu'est-ce que l'énergie ?

1 – Energie mécanique

2- Chaleur

3- Echanges d'énergie

4- Principes généraux de la conversion d'énergie

5- Problématiques de l'énergie – Objectifs 2050

6- Aller vers 100% Renouvelables, c'est possible ?

# Energie = un concept abstrait et multiforme

Le Robert : « Caractère d'un système matériel capable de produire du travail. »

Bernoulli 1717 : Produit de la **Force** par le **Déplacement** → **Notion actuelle du travail d'une force.**

## Energie mécanique

### Energie

Du grec « **ergos** » = travail

Travail d'une force quelconque sur un chemin rectiligne : Le travail de la force  $\vec{F}$  sur le segment  $AB$  est :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = \int_{A \rightarrow B} \vec{F}(x) \cdot \vec{i} dx$$

où  $\overrightarrow{AM} = x\vec{i}$ .

Dimension du travail d'une force :

$$[W_{A \rightarrow B}(\vec{F})] = [\vec{F}] L = ML^2T^{-2}.$$

Dimension :

$$[Energie] = M.L^2.T^{-2}$$

Unité légale SI :

$$Joule \sim kg.m^2.s^{-2}$$



**1 kWh = 3600 kJ = 3,6 MJ**

Radiateur de 1000 W pendant 1h de fonctionnement.

# Energie potentielle

Si la force est dite **conservative**, le travail de cette force d'un point A à un point B ne dépend pas du chemin suivi. C'est le cas si la force est constante.

On peut associer **le travail de la force à une variation d'énergie potentielle**.

Le **travail des forces** correspond donc à **l'énergie apportée ou retirée au système** par les forces qui s'appliquent au système.

**Positif** = travail **moteur**

**Négatif** = travail **résistant**

**Energie potentielle associée à  $\vec{F}$  :**  
L'énergie potentielle associée à une force  $\vec{F}$  conservative, est une fonction  $E_p(M)$  de la position  $M$ , telle que :

$$W_{A \rightarrow B}(\vec{F}) = E_p(A) - E_p(B); \forall A, B \in \mathbb{R}^3.$$

## Travail de la force de pesanteur

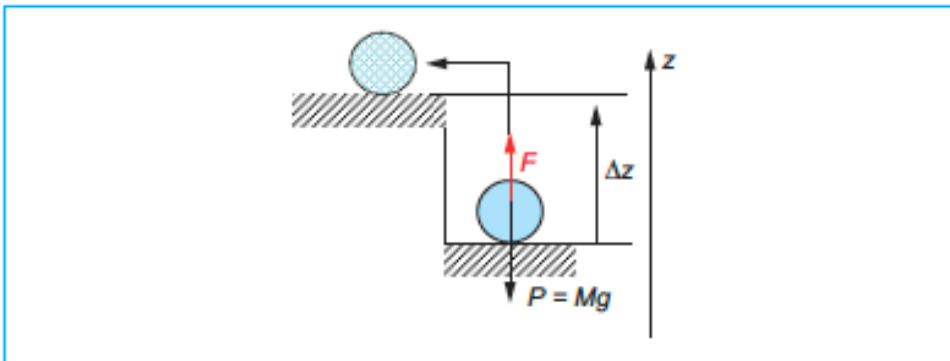


Figure 6 - Corps d'un poids déplacé vers une altitude supérieure

$$W = -P\Delta z = \Delta E_p < 0$$

Travail résistant.

## Corps en chute libre

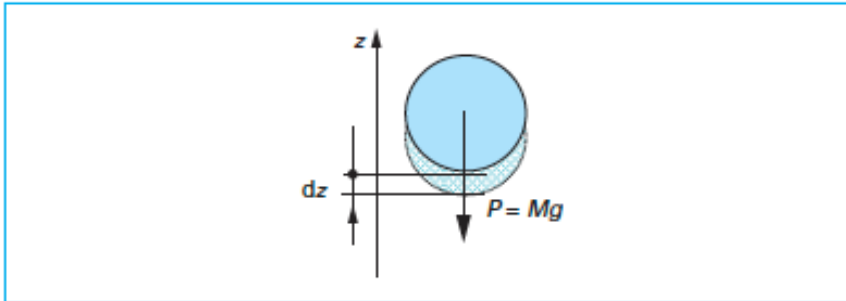


Figure 5 - Corps en chute libre soumis à son poids

## Energie cinétique

$$W = P \Delta z = \Delta E_p > 0$$

Travail moteur

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2$$

Lors de la chute, l'énergie potentielle diminue, mais la vitesse du corps augmente :  
Il y a **conversion de l'énergie potentielle en énergie cinétique**.

On voit donc qu'il y a **deux formes d'énergie mécanique qui peuvent se convertir l'une en l'autre**.  
C'est **le travail qui permet cette transformation d'énergie**.

---

A.N. Energie cinétique d'une voiture de 800 kg à  $V=100 \text{ km/h} = 27,8 \text{ m/s} \rightarrow E_c = 310 \text{ kJ} = 86 \text{ Wh}$   
Quelle masse d'eau doit chûter d'une hauteur de 100 m pour obtenir la même énergie ?  $\sim \mathbf{M=315 \text{ kg}}$

Énergie mécanique si on roule pendant 1h à 100 km/h :  $\sim 10 \text{ kWh} \rightarrow$  combustion de  $\sim \underline{4 \text{ l d'essence}}$  dans le moteur  
Contenu énergétique d'1 l essence (combustion) = 36 MJ thermique = 10 kWh

**Sur nos 4 l d'essence,  $\sim 3 \text{ l}$  sont perdus sous forme de chaleur !!**  
 **$\rightarrow$  Quelles relations entre chaleur et énergie mécanique ?**

# La chaleur : une forme équivalente d'énergie ?

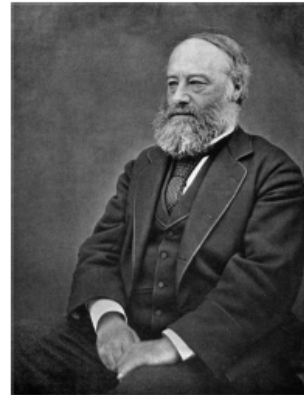
Jusqu'au XIX<sup>ème</sup> siècle : notion d' **énergie**  $\leftrightarrow$  **mécanique** et **chaleur**  $\leftrightarrow$  **chimie** : calorimétrie (Laplace, Lavoisier)  
La chaleur = fluide « calorique » qui passe d'un corps à l'autre ??

1824 : Sadi Carnot  $\rightarrow$  « Réflexions sur la puissance motrice du feu et des machines propres à développer cette puissance ».  
Discussion de ce qui deviendra le 2<sup>nd</sup> principe de la thermodynamique

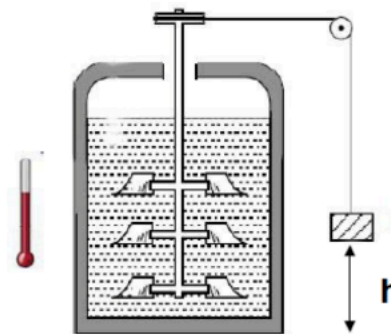
= Relation entre **travail mécanique** et **transfert de chaleur** pour le fonctionnement des **moteurs thermiques**  
Carnot : a postulé aussi un principe de conservation de la chaleur : **FAUX**

C'est la somme algébrique :  
**Chaleur + travail**  
qui est conservée (J.P. Joule).

$$\frac{|Q|}{|W|} \approx 4.185 \text{ J cal}^{-1}$$



James Prescott Joule

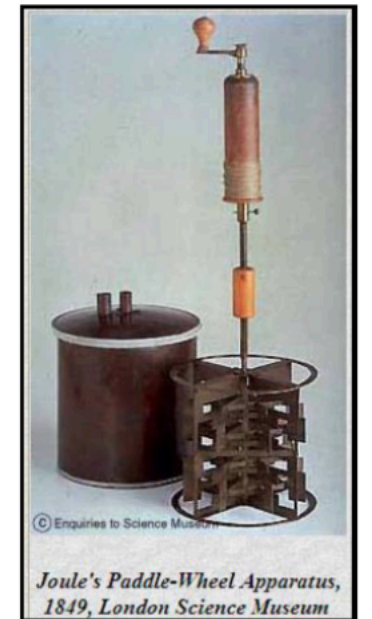


Mesures

Q = quantité de chaleur  
W = travail mécanique

$$\frac{\Delta Q}{\Delta W} = \text{constante (4.185 unités)}$$

**Principe d'équivalence entre chaleur et travail mécanique**



« On the mechanical equivalent of heat » - 1845

[https://fr.wikipedia.org/wiki/James\\_Prescott\\_Joule](https://fr.wikipedia.org/wiki/James_Prescott_Joule)

# Energie interne et équivalence chaleur-travail

J.R. von Mayer (1845) : Pour un système isolé c'est la somme de **l'énergie macroscopique** (cinétique et potentielle) et de **l'énergie interne** (somme des  $E_c$  et  $E_p$  microscopiques de la matière) qui est conservative :  $\Delta U + \Delta E = 0$

## Premier principe de la thermodynamique

**Tous les processus de conversion d'énergie sont régis par le premier principe** : moteurs électriques, alternateurs, réfrigérateurs, pompes à chaleur, piles, batteries, centrales thermiques ou nucléaires, photovoltaïque ...etc

Énoncé général du 1<sup>er</sup> principe :

**L'énergie totale d'un système quelconque ne peut évoluer que si ce système échange de l'énergie sous quelque forme que ce soit (travail ou chaleur) avec le milieu extérieur.**

Définition générale de l'énergie :

**L'énergie d'un système est une grandeur qui caractérise sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes.**

# Premier principe de la thermodynamique

Variation de l'énergie d'un système qui subit une transformation :

$$\Delta E = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p = W + Q$$
$$\Delta U = W + Q \text{ pour un syst. au repos à l'échelle macro.}$$

**U = Energie interne** ( =E<sub>c</sub> et E<sub>p</sub> microscopiques / Mouvement des particules)

E<sub>c</sub> = Energie cinétique

E<sub>p</sub> = Energie potentielle

Deux modes différents de transfert de l'énergie :

**W = Travail = Mode de transfert ordonné** d'énergie entre un système et le milieu extérieur

**Q = Quantité de chaleur = Mode de transfert désordonné** (agitation thermique) de l'énergie

**Impossibilité du mouvement perpétuel !! : On a  $\Delta E = 0$  au cours d'un cycle  $\rightarrow W = -Q$**

**Tout système qui fournit un travail ( $W < 0$ ) reçoit nécessairement une énergie pour compenser le travail fourni (autre travail ou chaleur).**



# Thermodynamique = Etude des échanges d'énergie

**Int**

**Variables intensives** : indépendantes de l'étendue du système  
Par ex. **température, pression**, contrainte, **potentiel électrique**, vitesse, viscosité etc  
= **grandeurs définies localement**

**Ext**

**Variables extensives** : proportionnelles à l'étendue du système (ou quantité)  
Par ex. **masse, longueur, volume, capacité thermique..**  
Variables spécifiques = par unité de masse, de longueur, etc

**Etat d'équilibre** = aucune modification du système au cours du temps  
→ **Toutes les variables intensives ont la même valeur en tout point du système.**

**Gradient de variable intensive → Déséquilibre → Flux d'énergie**

Exemples : Gradient de Température → CHALEUR

**Q**

Gradient de Pression → TRAVAIL MÉCANIQUE

Gradient de Potentiel électrique → TRAVAIL ÉLECTRIQUE

**W**

# Comment écrire en général la variation d'énergie ?

Toute variation d'énergie peut être mise sous la forme du produit d'une variable intensive par l'évolution de la variable extensive associée.

$$\delta E = \text{Int} \times \delta \text{Ext}$$

## EXEMPLES

Energie mécanique – **extension d'une barre**

$$\delta E = FdL$$

Energie mécanique – **compression d'un gaz par un piston**

$$\delta E = -PdV$$

Condensateur qui reçoit des charges électriques

$$\delta E_{el} = U_{el} dQ_{el}$$

Chaleur

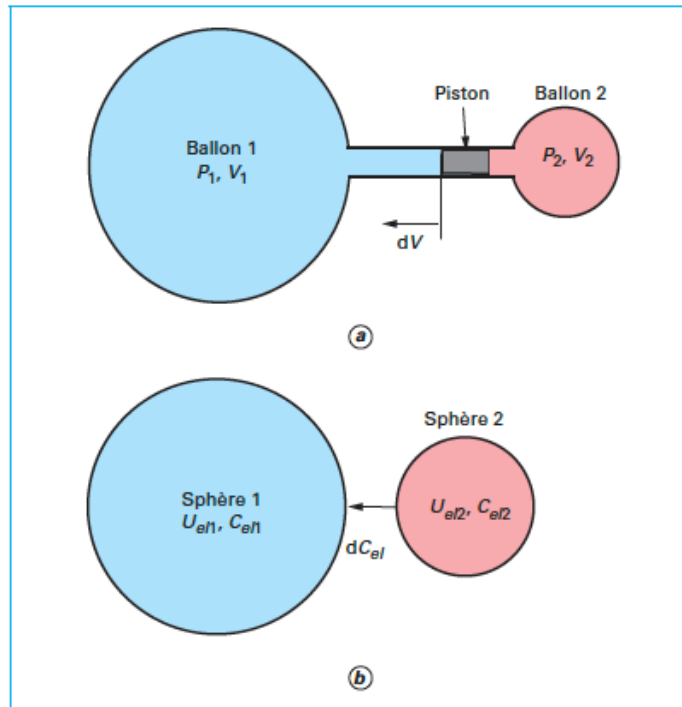
$$\delta E = TdS$$

Etc

# Sens du transfert de l'énergie ?

L'énergie passe **du réservoir à haute variable intensive (source) vers le réservoir à plus faible variable intensive**. La variable extensive correspondante accompagne le transfert d'énergie.

**Etat d'équilibre = égalité des variables intensives : Pression, Potentiel électrique, Température,..**



## Exemples :

Ce n'est pas la quantité d'énergie qui fixe le sens d'évolution de l'extensité et de l'énergie mais **la valeur de la variable intensive !!**

(a) Pression  $P_2 > P_1$

→  $V_2$  diminue →  $V_1$  augmente

(b) Potentiel  $U_{el2} > U_{el1}$

→ Transfert de charges  $C_{el2} \rightarrow C_{el1}$

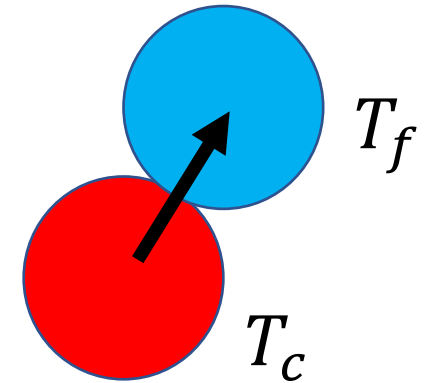
# Transfert de chaleur

Le flux de chaleur a toujours lieu du corps le plus chaud vers le plus froid.

→ La Température est la variable intensive de l'Énergie Thermique.

→ La variable extensive associée est l'Entropie.

→ L'entropie est une fonction d'état. Ce n'est pas une grandeur mesurable.



$$dS = \delta Q/T + d_i S \quad \text{avec } d_i S > 0$$

Pour tout système il existe une fonction d'état extensive  $S$ , nommée entropie, dont les variations  $\Delta S$  lors d'un processus sont la somme de deux termes correspondant l'un à des causes extérieures et l'autre à des causes internes (toujours positif ou nul pour tout processus réversible).

*(énoncé de Born 1921)*

Comme pour l'énergie, l'entropie d'un système n'est définie **que par ses variations**, donc à une constante additive près !

# Deuxième principe de la thermodynamique

Pour tout processus spontané, l'entropie d'un système isolé est, dans l'état final, supérieure (ou égale) à sa valeur dans l'état initial.

$$\Delta S > 0$$

La transformation spontanée se traduit par une augmentation du désordre et/ou une perte d'information.

Les processus survenant dans un système isolé sont en général **irréversibles**.

**Processus réversible = entropie constante = sans transfert de chaleur**  
**→ très bon rendement de conversion**

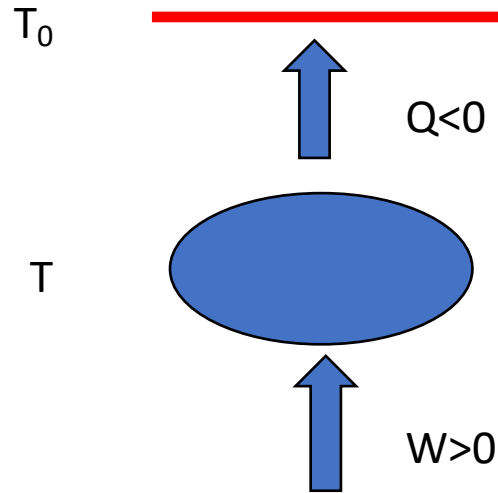
Exemples :

**Energie mécanique/électrique (alternateur/moteur électrique)**  
**ou Energie cinétique/potentielle (pendule oscillant)**

**On peut transformer intégralement de l'énergie mécanique, électrique ou chimique en chaleur mais l'inverse est impossible**

**→ Limitation physique du rendement de conversion des machines thermiques : moteur à explosion, centrale thermique, centrale nucléaire, etc**

# Cycle monotherme (une seule source de chaleur)



## Cas du cycle monotherme

Si un système échange une quantité de chaleur  $Q$  avec une la source à la température  $T_0$

Pour un cycle, les états initial et final étant identiques, on a :  $\Delta S=0=Q/T + \Delta S_i$

$$\text{On a : } \Delta S_i > 0 \rightarrow Q < 0$$

1<sup>er</sup> principe  $W+Q=0 \rightarrow W=-Q > 0$

Pas de travail moteur.

**Le système ne peut pas fournir de travail !!**

## Théorème de Kelvin

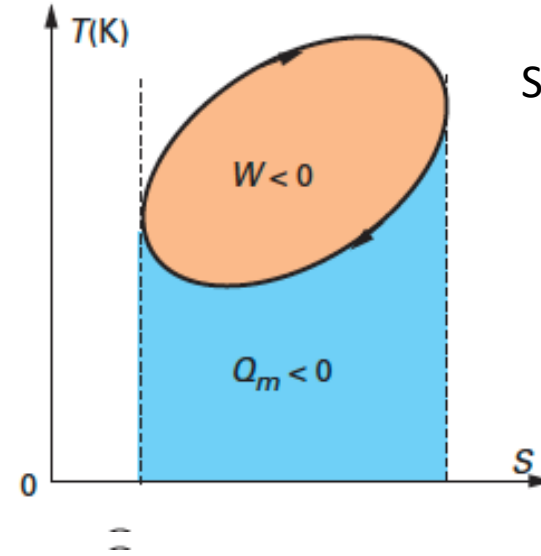
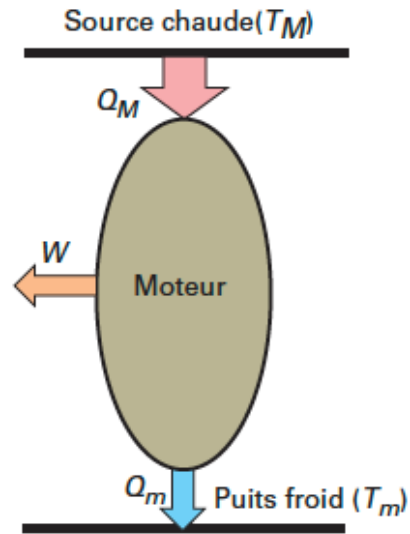
Au cours d'une évolution cyclique monotherme un système reçoit du travail de l'extérieur et fournit de la chaleur à la source.

On ne peut pas par exemple propulser un véhicule ou un navire simplement en transformant en travail la chaleur reçue de l'atmosphère ou de la mer :  
*impossibilité de mouvement perpétuel.*

**IMPORTANT : Pour qu'un système produise du travail à partir de chaleur, il doit être en contact avec au moins 2 sources de chaleur (source chaude  $T_c$  et source froide  $T_f$ ) = Machines dithermes.**

# Machine ditherme : transformation chaleur-travail

MOTEUR

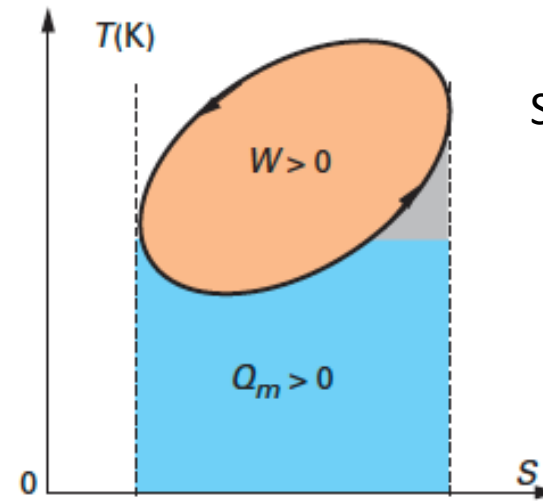
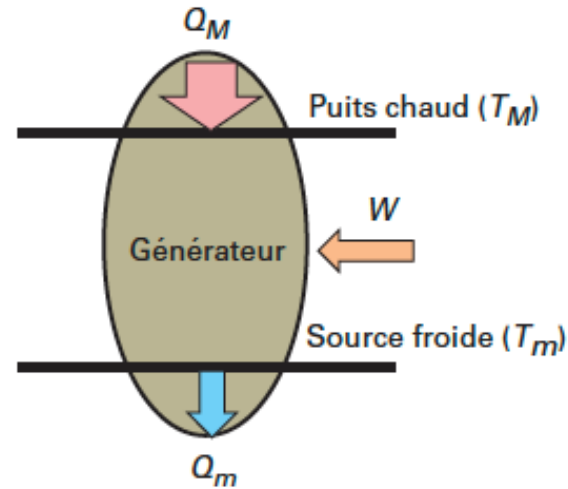


Sens horaire

Diagramme entropique (T,S)

$$W = -Q = -\oint T dS$$

GÉNÉRATEUR



Sens anti-horaire

# Schéma général d'un convertisseur d'énergie

De façon générale, pour convertir une forme d'énergie d'un type A vers un type B, il faut disposer pour chacune des 2 formes d'énergie, d'une source et un puits à des tensions différentes .

Tous les convertisseurs que nous utilisons peuvent être décrits sur ce schéma :

conversion thermo-mécanique, électrochimique, thermoélectrique, photovoltaïque, etc

**Gradient de variable intensive**

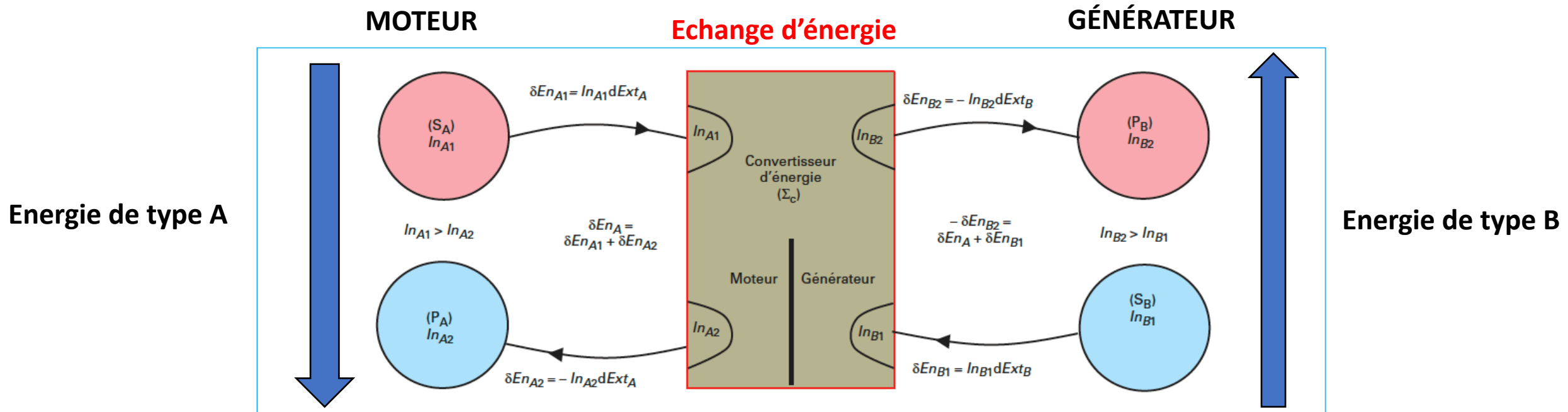


Figure 22 - Convertisseur d'énergie à quatre réservoirs et deux types d'énergie

**Gradient de variable intensive**

Ref. André Lallemand « Généralités sur les convertisseurs d'énergie », Techniques de l'ingénieur BE 8064



# Centrale thermique : Conversion de chaleur en énergie électrique

## Gradient de température

**Source à haute température**  
Rayonnement solaire, chaudière, centrale nucléaire, ..

**Puits à basse température**  
Atmosphère, lac, rivière, ..

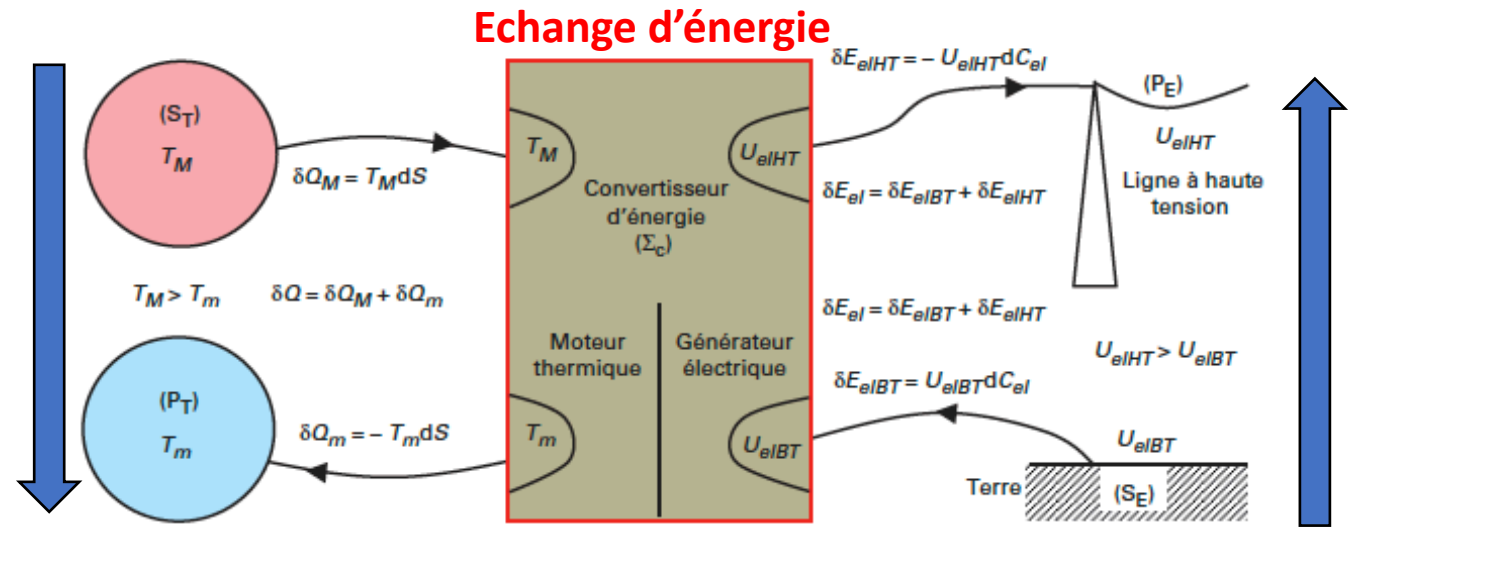
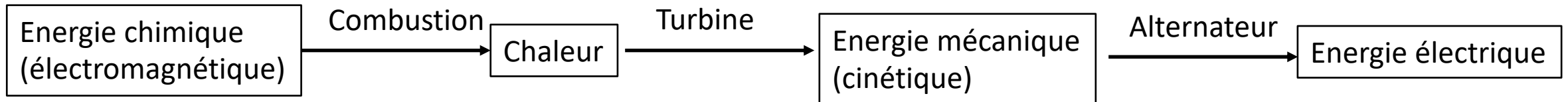


Figure 24 - Convertisseur d'énergie thermique en énergie électrique

## Gradient de tension électrique

Combustible fossile

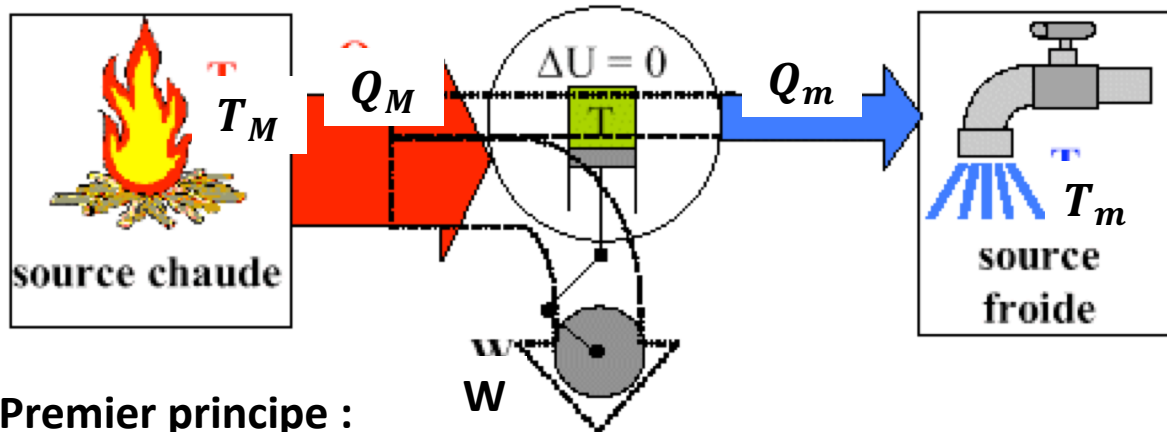


$$\delta Q = \delta Q_M - |\delta Q_m| = (T_M - T_m) dS \quad \longrightarrow \quad |\delta E_{el}| = (U_{elHT} - U_{elBT}) dC_{el}$$

## Rendement $\eta$ ?

# Convertisseur de CARNOT

## Cycle thermo-mécanique idéal



Premier principe :  
 $\Delta U = W + Q_M + Q_m = 0$

Travail fournit :

Échanges de chaleur réversibles :

$$-W = Q_M + Q_m = (T_M - T_m) \Delta S_M$$

$$Q_M = T_M \Delta S_M \quad \text{et} \quad Q_m = T_m \Delta S_m$$

Rendement de Carnot :  $\eta_C = -\frac{W}{Q_M} = \frac{T_M - T_m}{T_M} = 1 - \frac{T_m}{T_M} = \frac{\Delta T_{mM}}{T_M} = \frac{a}{b} < 1$

$$\Delta S_M = -\Delta S_m$$

**Le rendement ne dépend que de la température des thermostats.**

Diagramme entropique

Cycle moteur décrit dans le sens des aiguilles d'une montre.

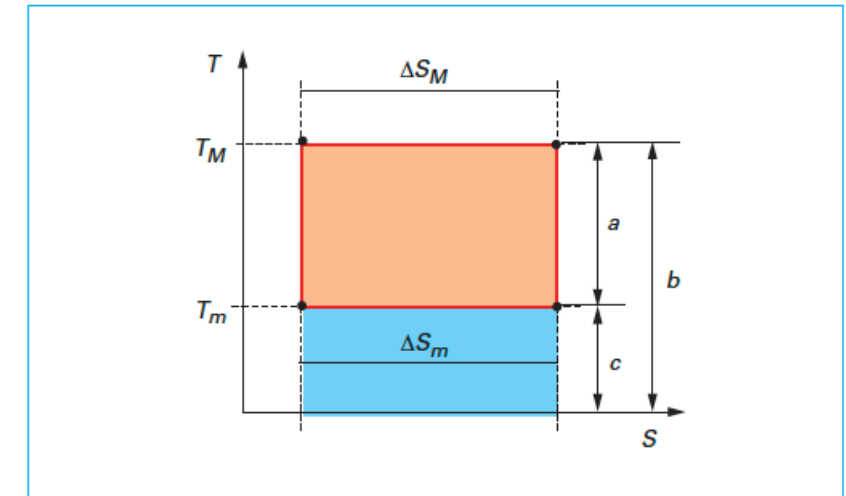


Figure 30 - Évolution cyclique du fluide dans un convertisseur de Carnot

En pratique  $\eta < \eta_{Carnot}$ , et des contraintes techniques imposent  $T_M$  et  $T_m$  :

- moteur à combustion essence :  $\eta \sim 25-30\%$ , diesel  $\sim 30-35\%$  (moteur électrique  $\sim 90\%$ )
- Turbine à gaz (centrale électrique) :  $\sim 40\%$
- Turbine vapeur (centrales nucléaires) :  $\sim 33\%$

# Rendements de conversion

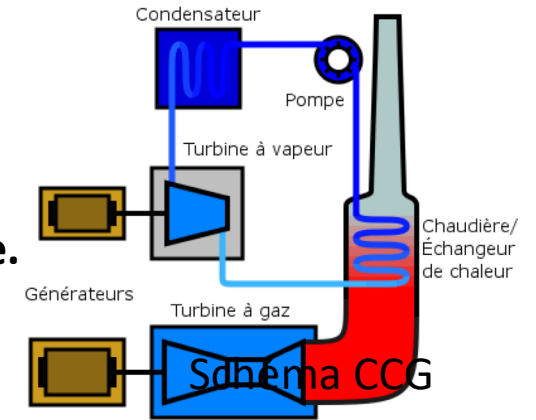
**Machines thermiques ~ entre 2/3 et 3/4 de l'énergie est perdue sous forme de chaleur dans la conversion !**

On peut combiner plusieurs cycles thermodynamiques = turbine à gaz + turbine à vapeur

→ **Rendement  $\eta$  ~ 60% : centrales à cycle combiné gaz CCG**

On peut aussi récupérer la **chaleur utile** pour réaliser de la **cogénération : électrique ET thermique.**

→ **Meilleure utilisation de l'énergie primaire du combustible.**



CONNAÎTRE POUR AGIR

La **chaleur de récupération**, ou **chaleur fatale**, est la « chaleur générée par un procédé qui n'en constitue pas la finalité première, et qui n'est pas récupérée ».

Incitation dans la « loi sur la transition énergétique et pour la croissance verte » (2015)  
L'objectif est d'arriver à 0,8 TWh en 2023 et 4 TWh en 2028 (~ chauffage 300 000 foyers).

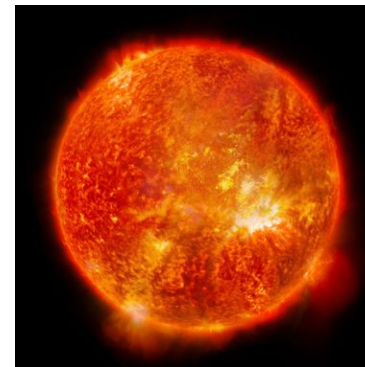
# L'Énergie se transforme, se transporte et se stocke

Les autres convertisseurs d'énergie connaissent aussi des limites intrinsèques de rendement. De manière générale les rendements réels sont inférieurs aux rendements théoriques du fait des mécanismes de dissipation.

Chaudière individuelle au gaz :	chaleur → chaleur	$\eta \sim 85-95 \%$
Solaire photovoltaïque :	rayonnement → énergie électrique	$\eta \sim 20 \%$
Limite de Shockley-Queisser (1961) pour une simple jonction en c-Si		$\eta_{\max} \sim 32 \%$
Éolienne :	énergie cinétique → énergie électrique	$\eta \sim 25-35 \%$
Limite de Betz (1926)	$\eta_{\max} \sim 59 \%$ - mécanique des fluides – Max. si la vitesse aval est 1/3 de la vitesse amont	
Turbine hydraulique :	énergie cinétique → énergie électrique	$\eta \sim 85 \%$
Captage d'énergie hydraulique en conduites forcées	→ meilleure récupération d'énergie	
Batteries :	énergie électrique → énergie électrique	$\eta \sim 70 \%$
Chaîne de conversion Hydrogène :	énergie électrique → chimique → électrique	$\eta \sim 25 \%$
Alternateur :	énergie mécanique → énergie électrique	$\eta \sim 98 \%$
Moteur électrique :	énergie électrique → énergie mécanique	$\eta \sim 90 \%$

# Tout vient de là !

- Les quatre interactions fondamentales
- Premier principe
- Second principe



Fusion – fission thermonucléaires  
Fission  $^{235}\text{U}$  - 200 MeV/atome

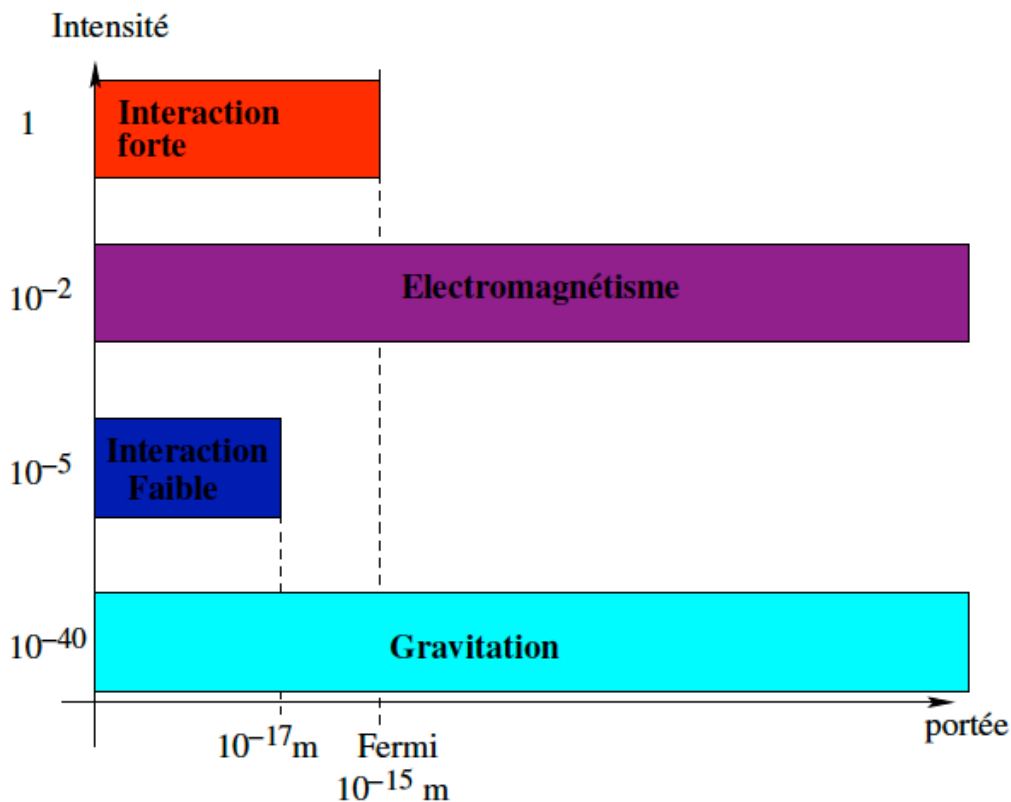
## Soleil

### Energie nucléaire

Extrêmement **concentrées**

1 centrale nucléaire  $\sim$  1  $\text{GW}_e$

Géothermie – **très diluée**



Combustion – énergie chimique

Issue de la photosynthèse

8,37 eV/molécule  $\text{CH}_4$

1 centrale gaz  $\sim$  0,4  $\text{GW}_e$

Assez **concentrée**



Rayonnement électromagnétique

$f \sim 1362 \text{ W/m}^2$

Solaire thermique - photovoltaïque

**Très dilué**  $\sim 10 \text{ kWh}_e/\text{jour} \cdot 10 \text{ m}^2$

Indirectement énergie éolienne

**Dilué**  $\sim 10 \text{ MWh}_e/\text{jour}$  en moyenne

Energie hydraulique

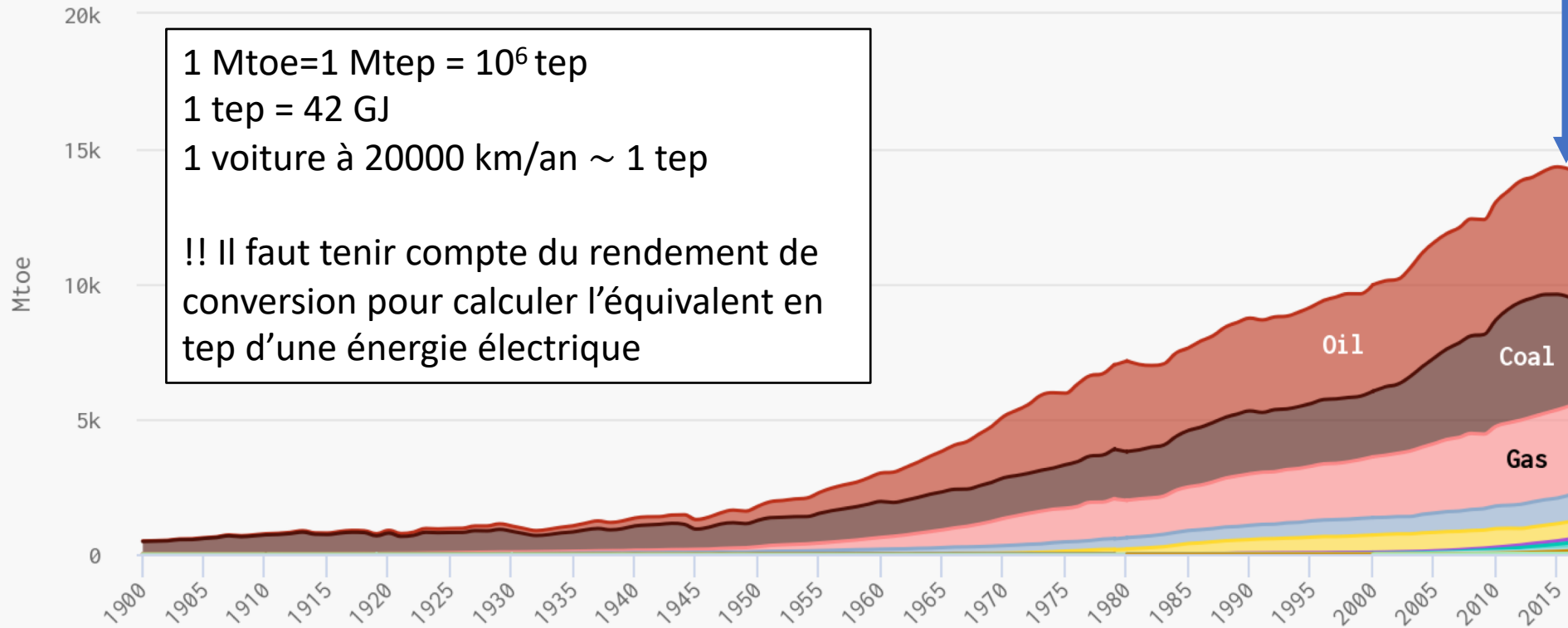
40 t eau  $\sim 3 \text{ kWh}_e \sim 1$  l essence

**Diluée** 1 centrale  $\sim 0,05 - 0,5 \text{ GW}_e$

# Energie primaire

C'est l'énergie sous sa forme initiale telle qu'elle est extraite de la Terre (pétrole brut, gaz naturel, charbon) ou telle qu'elle est disponible sans être convertie par la combustion (électricité éolienne, solaire, etc).

Primary Energy Production by source, World, 1900-2016



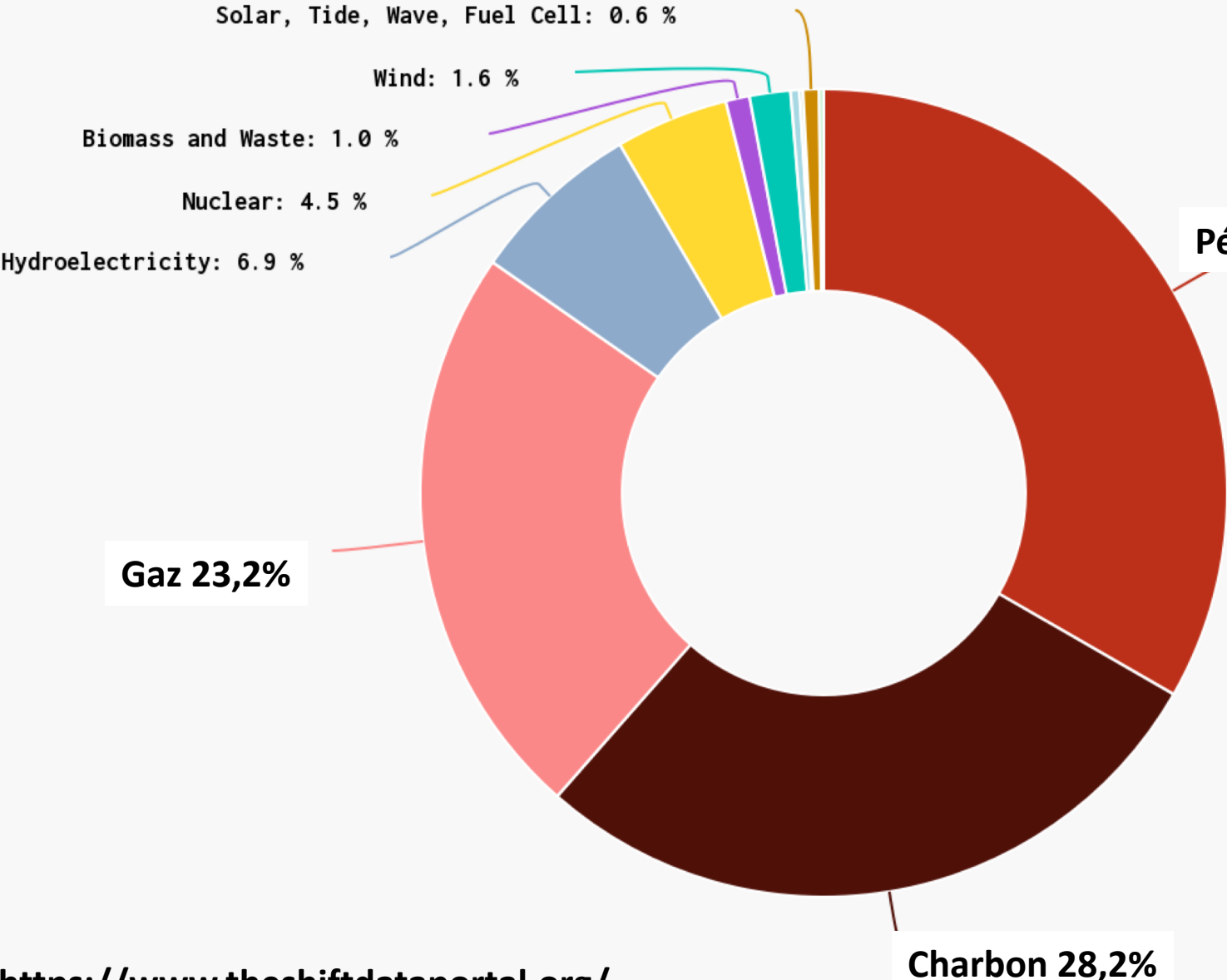
85% de combustibles fossiles en 2016

Energie de stock : ressource épuisable , combustibles fossile (pétrole, charbon, gaz), Minerai Uranium

- Oil
- Gas
- Nuclear
- Wind
- Peat
- Solar, Tide, Wave, Fuel Cell
- Coal
- Hydroelectricity
- Biomass and Waste
- Fuel Ethanol
- Geothermal
- Biodiesel

<https://www.theshiftdataportal.org/>

# Energie primaire par source, Monde 2016



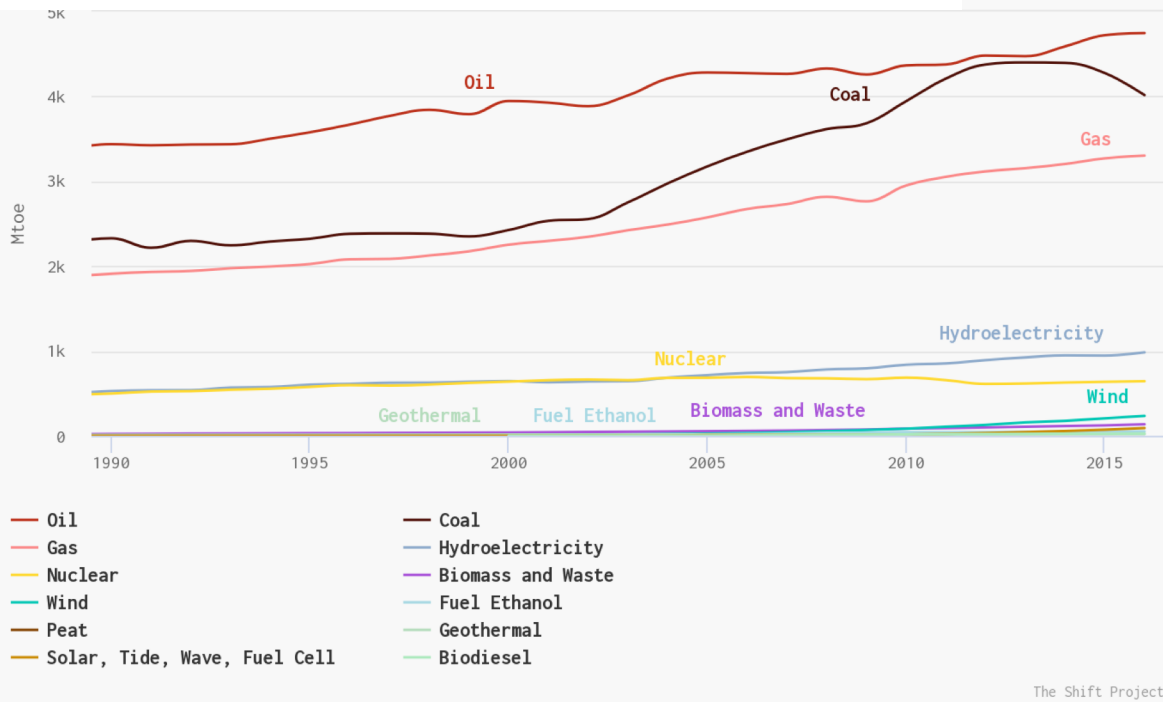
Energie de stock  
85% de combustibles fossiles  
4,5 % de nucléaire



**Décarboner ?  
Quelle transition  
énergétique pour  
limiter le changement  
climatique ?**

Energie de flux = ressource renouvelable  
En 2016  
Hydroélectrique 6,9 %  
**Autres renouvelables 3,2 %**

## Energie primaire par source, Monde 1990-2016



## TENDANCE ACTUELLE DANS LE MONDE → 2016

**Pétrole et gaz en augmentation ces 30 dernières années**

**PÉTROLE + 30% ~ 5 Gtep**

**GAZ + 60% ~ 4 Gtep**

**CHARBON +80% diminution amorcée en 2014 ~ 4 Gtep**

**2019 → Fossile 84,3% - Total ~ 13,9 Gtep**

**Sur la même période dans le Monde 1990-2016**

**HYDROÉLECTRIQUE +46%**

**NUCLÉAIRE +30%**

**AUTRES RENOUVELABLES en très forte augmentation**

**~ x15 en 30 ans à l'échelle mondiale**

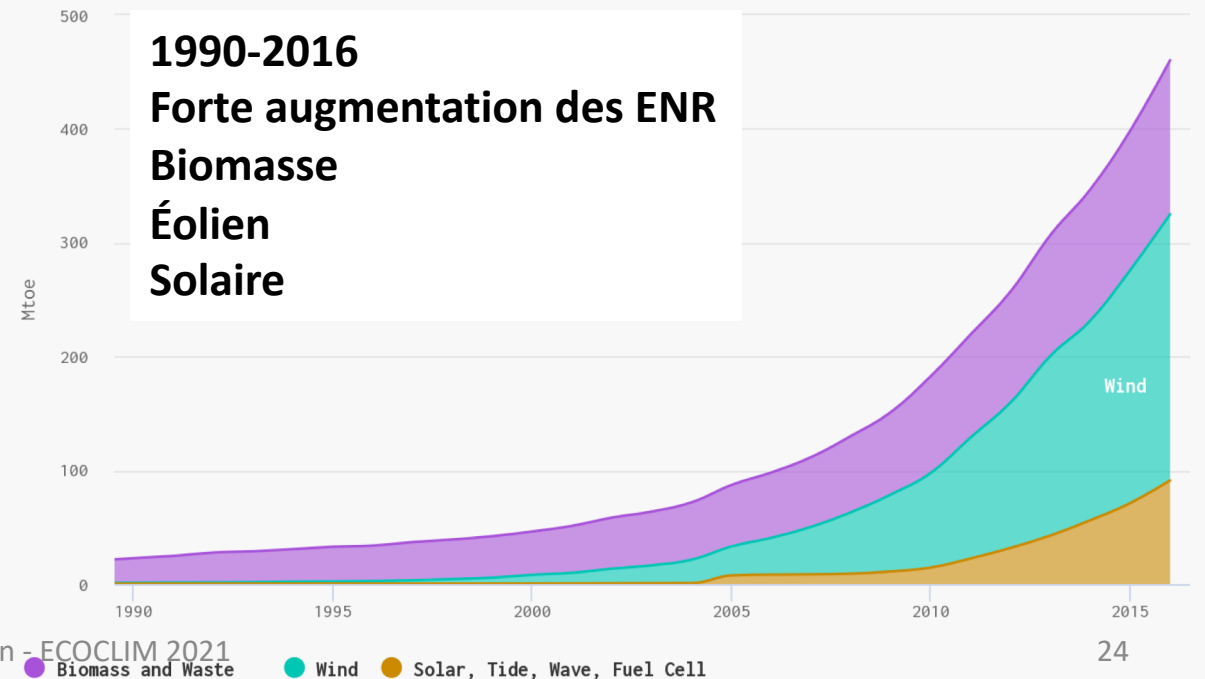
**2016 ~ 0,5 Gtep → 3,6 % du total**

**Nucléaire ~ 0,64 Gtep → ~ 4,5 %**

**2019 → 5% d'ENR – 4,3% de Nucléaire**

*BP Statistical Review of World Energy*

Primary Energy Production by source, World, 1990-2016



<https://www.theshiftdataportal.org/>



# Energies fossiles – Pourquoi un tel succès ?

## Densité massique d'énergie

**Charbon** 20-35 MJ/kg

**Pétrole** ~ 42 MJ/kg

**Gaz naturel** 55 MJ/kg

À comparer

Alimentation quotidienne 2400 Cal/jour

~10 MJ/kg(sec)

Pile électrique ~0,1-0,5 MJ/kg

- **Abondantes (mais pas durables) - Transportables et stockables**
- Très faciles à utiliser pour de multiples besoins : transport, chaleur, génération d'électricité..
- **MOBILITÉ** : Plein d'essence – 50 l en 2 min correspond à un transfert d'énergie très rapide (~ 15 MW) pour 1000 km d'autonomie
- **CENTRALES GAZ ET CHARBON** flexibles pour ajuster à la demande électrique

## Émissions de CO<sub>2</sub>

**Charbon** ~ 4,5 tonnes CO<sub>2</sub>/tep produite

**Pétrole** ~ 3,1 tonnes CO<sub>2</sub>/tep

**Gaz naturel** ~ 2,2 tonnes CO<sub>2</sub>/tep



CARtoons, Andy Singer

# Réduire les énergies fossiles d'un facteur 2 ou 3 en 2050 ?

Incontournable pour réduire les émissions de CO<sub>2</sub> !

Il faudrait réduire les énergies fossiles à ~ 5 Gtep/an

(actuellement ~ 14 Gtep/an)

Le déploiement mondial du nucléaire présente d'autres problèmes : déchets radioactifs, démantèlement, accidents.

Fusion → les promesses de ITER ?

**Le problème est planétaire, les solutions devraient aussi l'être avec un meilleur accès à l'énergie des pays pauvres.**

Projections démographiques INED 2025 : 8,2 milliards

→ 2050 : 9,7 milliards → 2100 : 10,9 milliards

Population de l'ensemble des continents :

~ stable excepté **Afrique + 2,8 milliards**

<https://www.ined.fr/fr/tout-savoir-population/chiffres/projections-mondiales/projections-par-continent/>



©Matt Groening

Pour la transition vers les énergies renouvelables il faudra un changement fondamental de nos modes de vie :

**Sobriété et Efficacité énergétiques**

**Économies d'énergie (batiment)**

**Mobilité**

**Industrie**

**Agriculture**

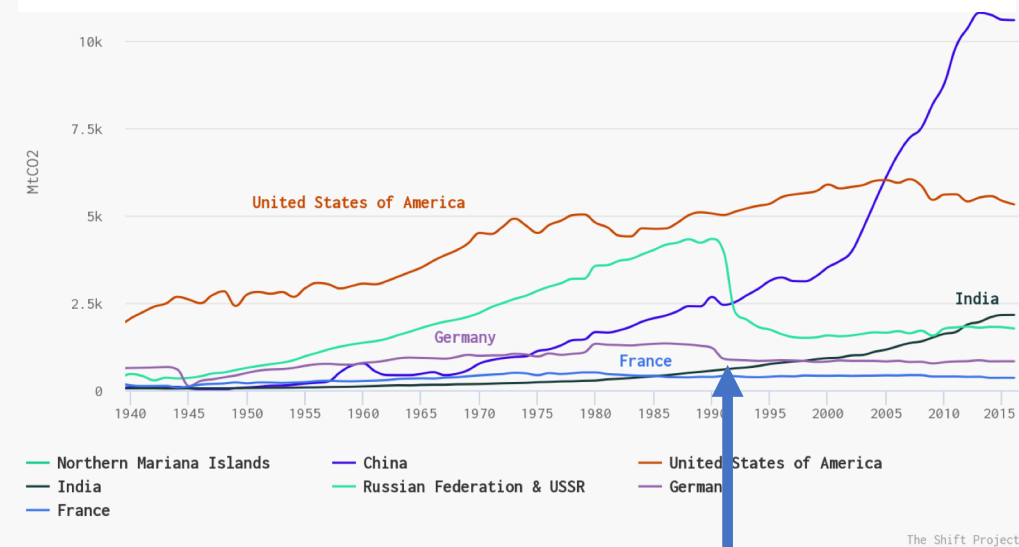
..

# Émissions de CO<sub>2</sub> et énergies fossiles

Par pays en MTCO<sub>2</sub> sur 1940-2016

CO2 emissions from fossil fuels, 1940-2016

**Largement dominé par la Chine et les Etats-Unis**

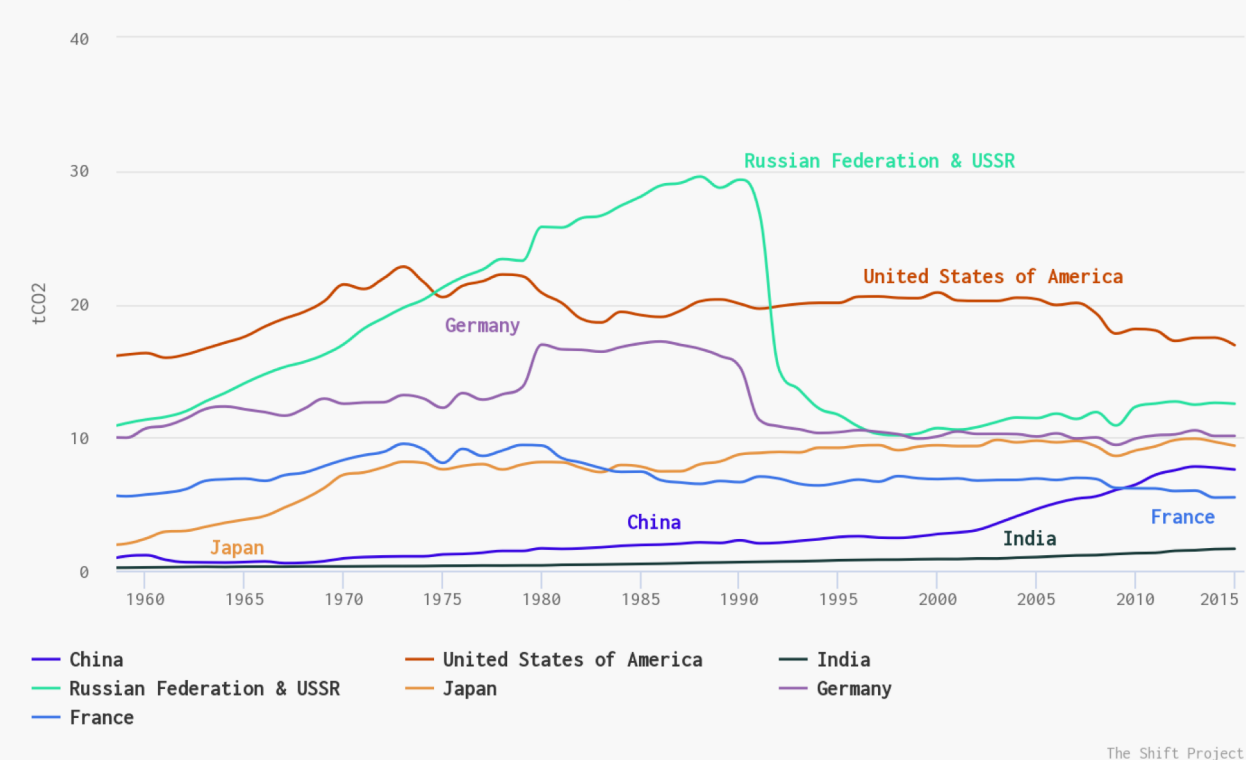


Un changement de modèle nécessaire ..  
Des modalités différentes suivant les pays !

**Objectif : en moyenne 1,5 t CO<sub>2</sub>/hab.an**  
~ Américain /10 – Français/4 etc..

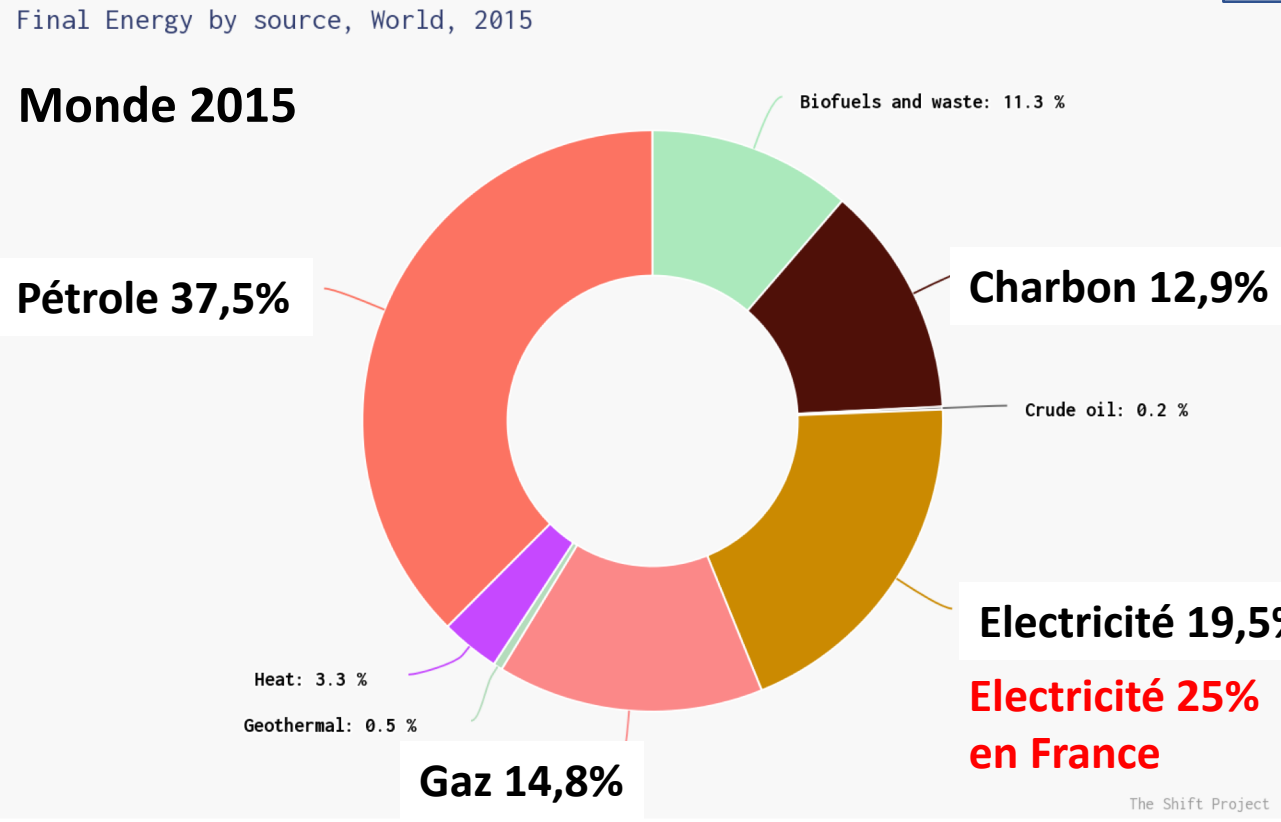
Par pays et par habitant en MTCO<sub>2</sub> sur 1960-2016

CO2 emissions from fossil fuels per capita, 1959-2015



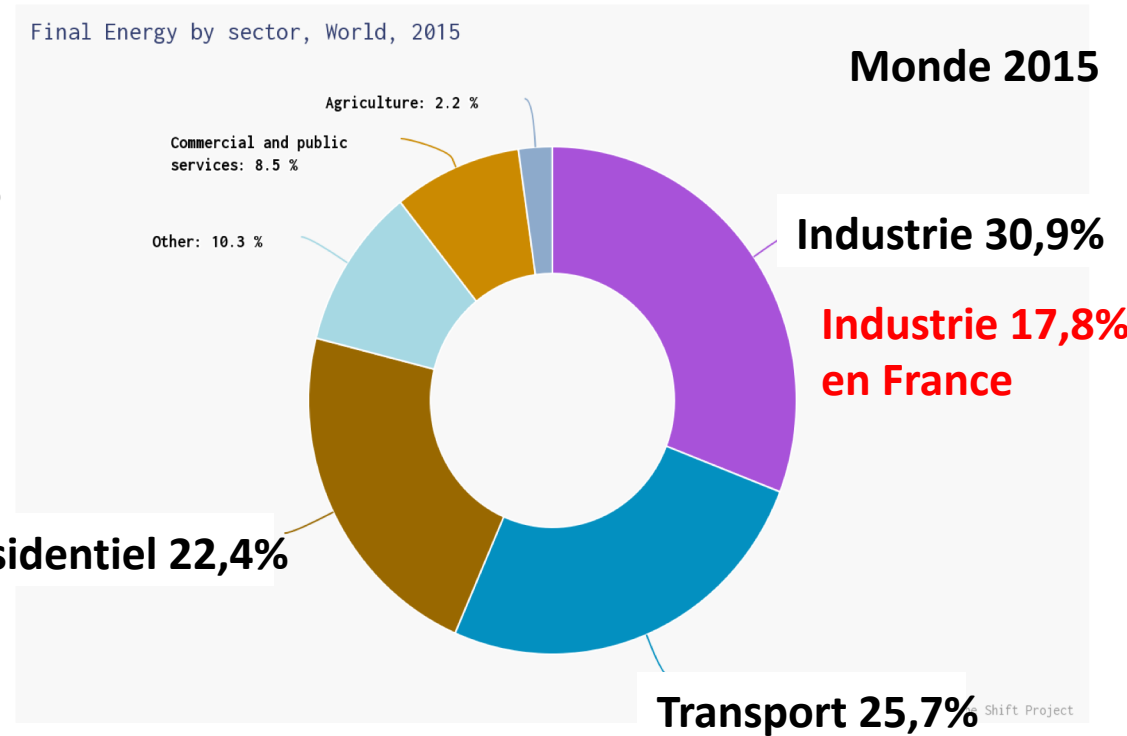
# Utilisation de l'Énergie finale par source

= énergie utilisée sous des formes adaptées : électricité, essence pour les moteurs à combustion, gaz ..



**Il faut agir sur l'ensemble des secteurs pour diminuer l'utilisation d'énergies fossiles.**

## Énergie finale par secteur

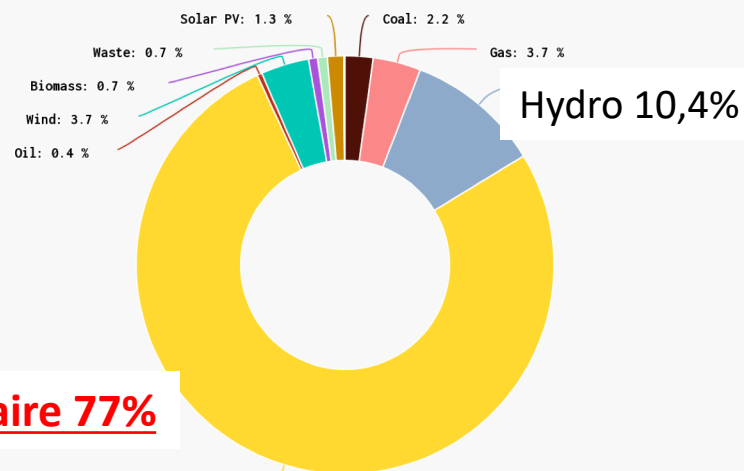


**Énergies fossiles à 65 %**  
**Dans le Monde ~ Idem en France**

**Objectif PPE France : Augmentation de la part d'électricité de 25% à 50% dans la part d'énergie finale en 2050**

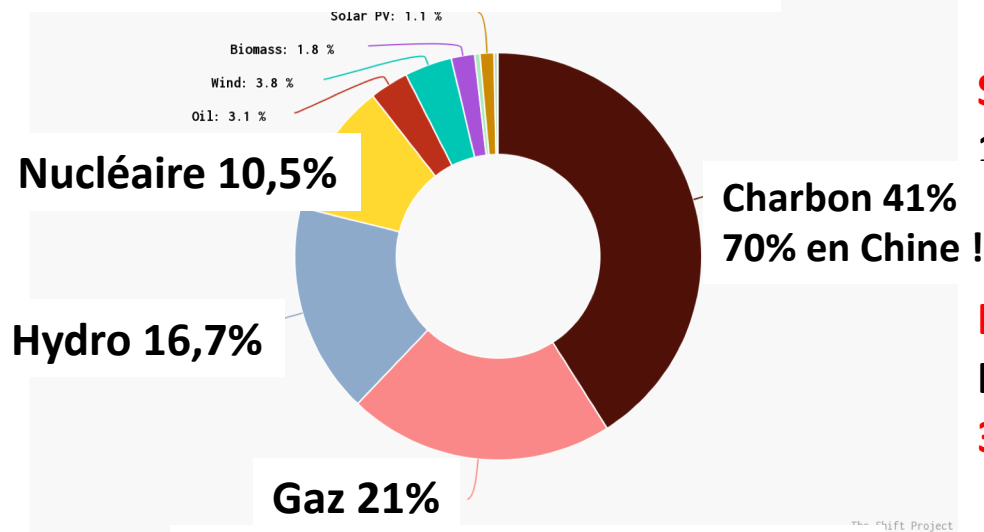
# Électricité 50% renouvelables : une 1<sup>ère</sup> étape ?

## Electricité par source – France 2015



**Nucléaire 77%**

## Electricité par source – Monde 2015



**Nucléaire 10,5%**

**Charbon 41%  
70% en Chine !**

**AIE-SDS Objectif 50% ENR dans la production d'électricité en 2050.**

**Electricité ~ 25% de l'énergie finale en France  
Le CO<sub>2</sub> à 67% vient du pétrole en France !**

**France : Évolutions de notre mix énergétique :  
Objectif de diminuer à 50% de nucléaire en 2035  
Fermeture de 12 réacteurs nucléaires (sur 56).**

**Fermeture de 3 centrales à charbon françaises en 2022. Reste 1 :  
fermeture différée.**

**Orientation PPE 2019-28 → ~ 40% d'électricité d'origine renouvelable**

### Solaire PV

**10 GW en 2020 (→ 2,5% P<sup>n</sup> électrique)  
faudrait avoir 20 GW en 2022 et 40 GW en 2028**

### Éolien terrestre

**En 2020 ~ 8,8 % de la production électrique  
33 GW en 2028 – il faut +2 GW/an mais actuellement plutôt 1-1,5 GW/an**

### MAIS Hydrogène + Voitures électriques

**→ ~ + 6% électrique en 2030...  
→ ENR OU ~ 5 EPR de plus ?? // ENR Matériaux Li, Co, etc ??**

# Aller vers 100% d'énergies renouvelables, c'est possible ?

Energies renouvelables = par nature **diluées** et **intermittentes**

→ **Nécessité d'adapter nos systèmes électriques à ces conditions :**

**Sources de flexibilité, Stockage à grande échelle, centrales de pointe, interconnexion transfrontalière..**

IAE/RTE – 01/2021

Conditions pour s'orienter vers un mix électrique à forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050. **Aller vers 85% ENR en 2050 – 100% en 2060**

<https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>

→ Rapport de la consultation publique à l'automne 2021



# Pour aller plus loin

Jean-Marcel Rax, **Physique de la conversion d'énergie**, EDP Sciences/CNRS Editions 2015

Richard Heinberg, David Fridley, **Un futur renouvelable. Tracer les contours de la transition énergétique**, Écosociété 2019

Paul Mathis, **Les énergies. Comprendre les enjeux**, ed. Quae 2011

**Renewable Energy. Power for a sustainable future**, ed. by Godfrey Boyle, Oxford University Press 3rd edition 2012

IEA/RTE « **Conditions et prérequis en matière de faisabilité technique pour un système électrique avec une forte proportion d'énergies renouvelables à l'horizon 2050** » - 01/2021

<https://www.rte-france.com/actualites/rte-aie-publient-etude-forte-part-energies-renouvelables-horizon-2050>

Données 1900-2016 - Climat et énergie

<https://www.theshiftdataportal.org/>

Ministère de la transition écologique

<https://www.ecologie.gouv.fr/politiques/energies>

Chiffres clefs des énergies renouvelables

<https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-des-energies-renouvelables-edition-2020>