

Concepts et ordre de grandeur énergétiques



Roland Lehoucq
CEA Paris – Saclay
roland.lehoucq@cea.fr

Plan du cours (5 séances de 2 h)

26 février

1. Qu'est-ce que l'énergie ?

4 mars

2. Énergie et durée : notion de puissance.

11 mars

3. La machine climatique - Perturbations anthropiques.

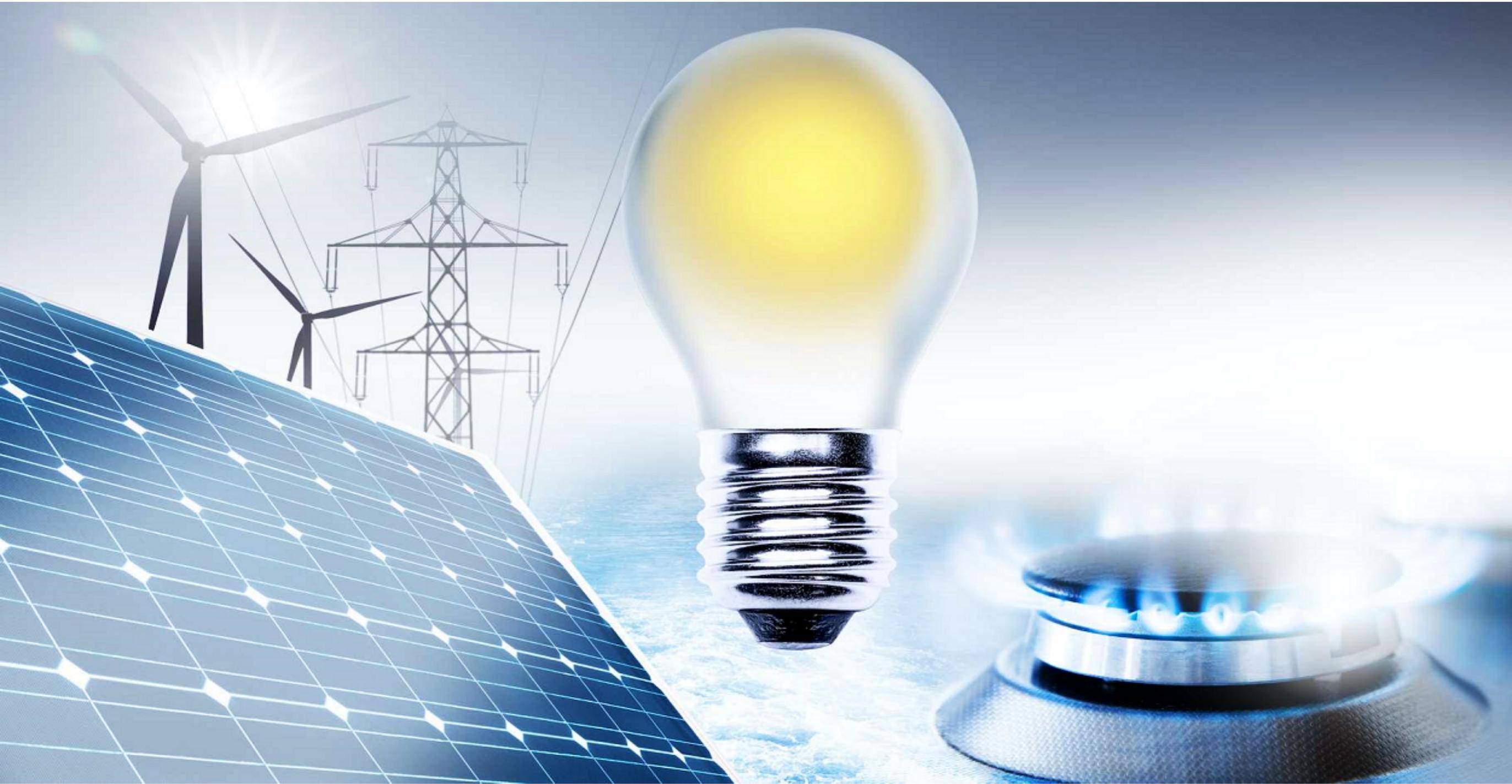
18 mars

4. Énergie et humanité.

25 mars

5. Les énergies renouvelables.

1. Qu'est-ce que l'énergie ?



Qu'est-ce que l'énergie ?

Nous avons besoin d'énergie.

Nous allons manquer d'énergie.

Nous produisons de l'énergie.

Nous payons pour avoir de l'énergie.

Il faut économiser l'énergie.

Pour maigrir, il faut brûler de l'énergie.

Nos aliments contiennent de l'énergie (d'ailleurs c'est indiqué sur la boîte...).

Dans le langage courant, le mot « énergie » désigne aussi bien la force que la puissance, la vigueur, l'élan, le dynamisme, la volonté, la détermination, ...

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

Nous transformons la matière et vivons de ces transformations.

L'agent de ces transformations se nomme « interaction » (ou « force »).

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

Où intervient l'énergie ?

Modification de température



Modification de vitesse



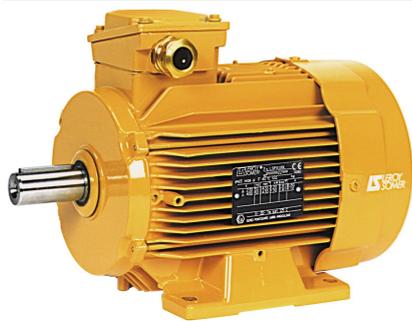
Modification de forme



Modification de luminosité



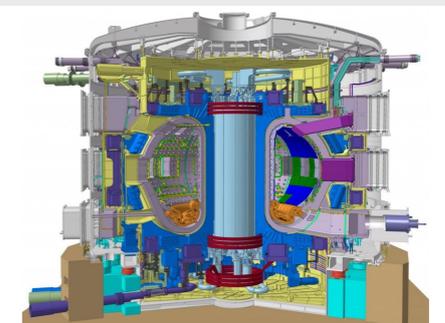
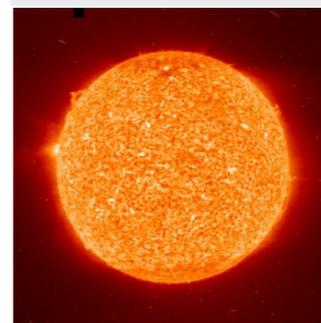
Modification de position dans un champ (électrique, magnétique, gravitationnel)



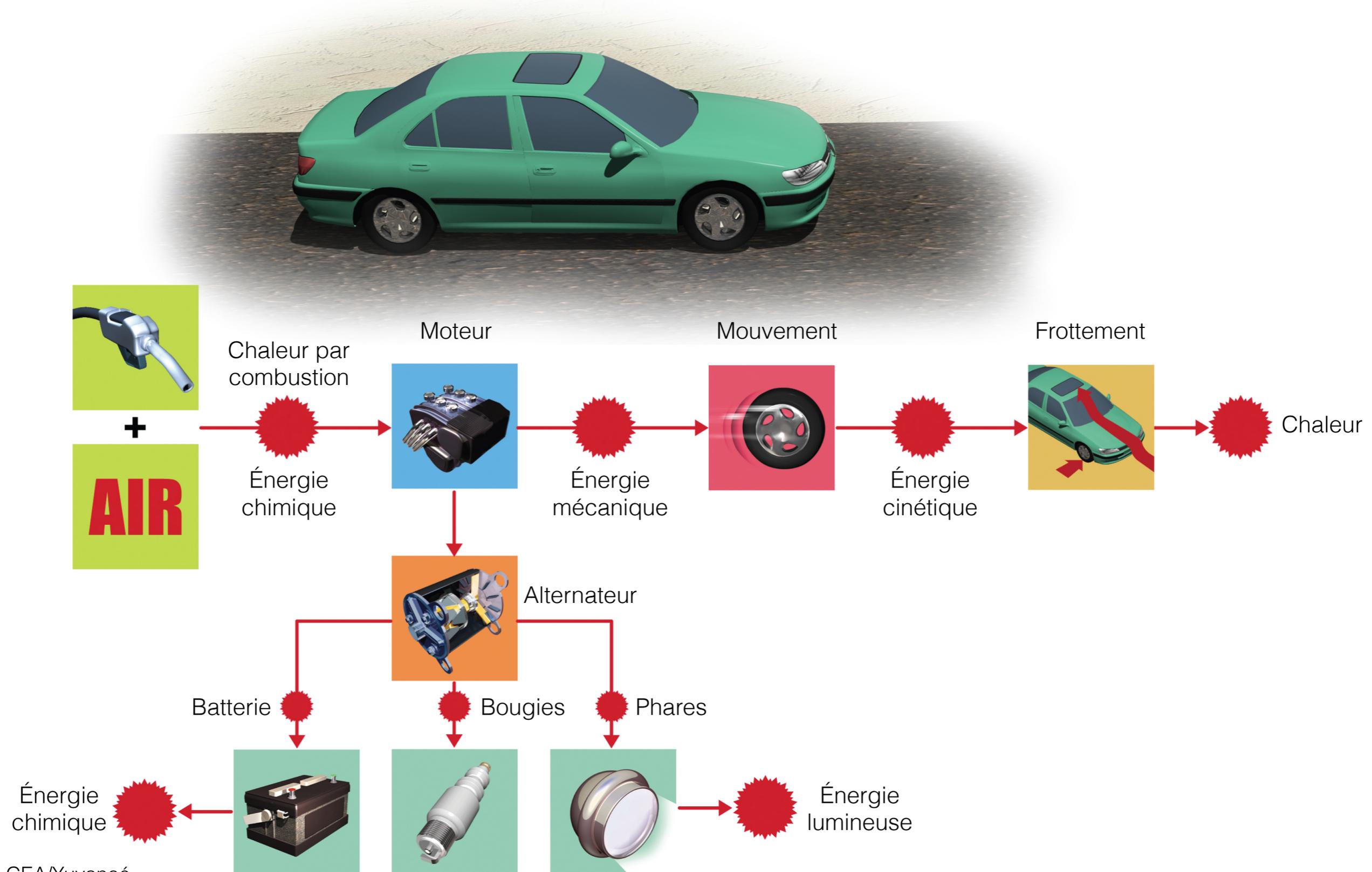
Modification de structure chimique

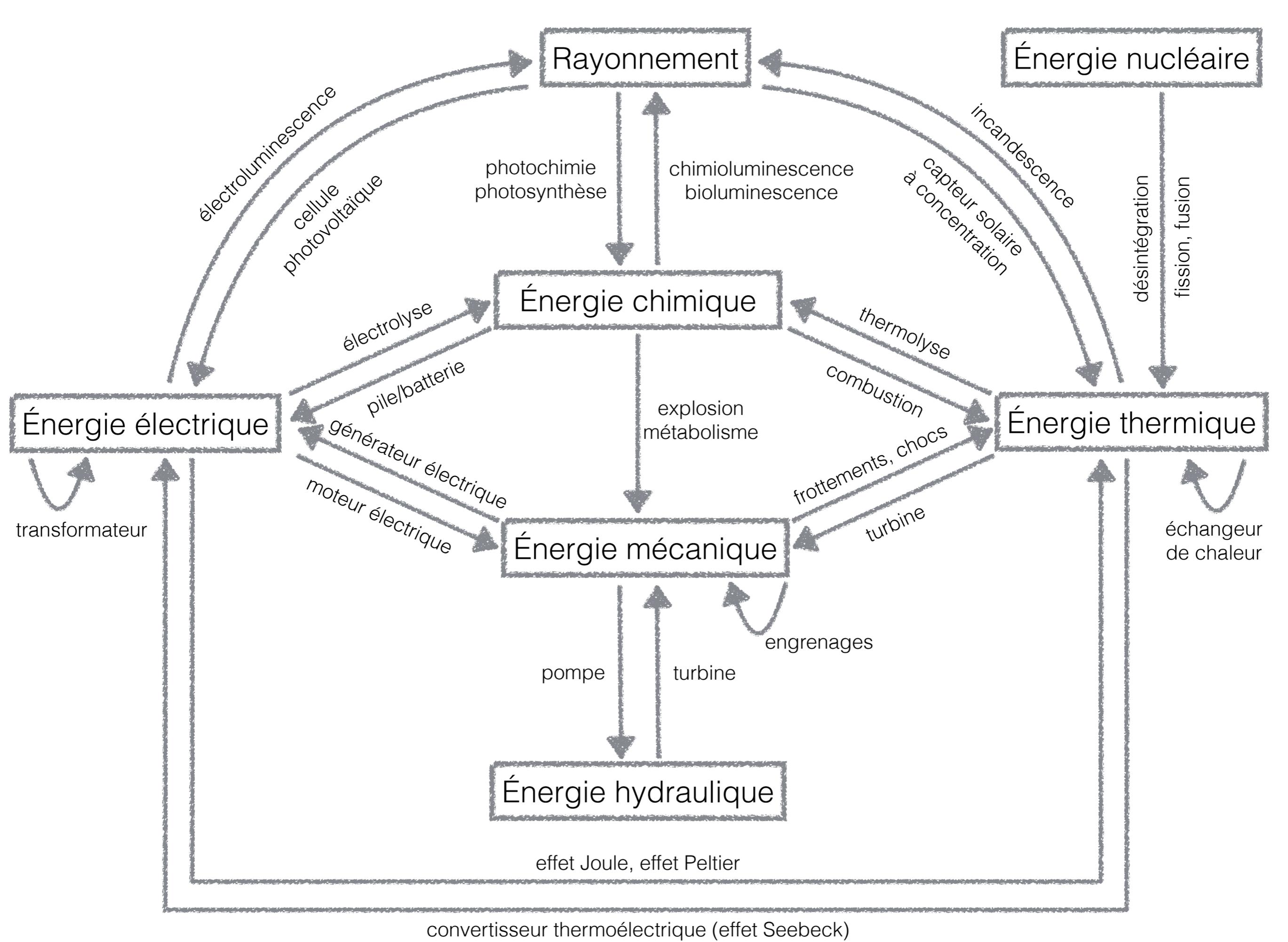


Modification de structure nucléaire



Exemple de transformation





Ordres de grandeur

Dans le système international d'unités (SI), l'énergie s'exprime en joule (symbole J).

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 m ² .
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.

Les unités d'énergie

joule (J) : unité d'énergie dans le système international d'unités (SI).

- Définition : travail d'une force de 1 Newton sur 1 mètre (i.e. soulever une pomme d'un mètre !).
- Bilan énergétique français (2019) = 10 152 PJ d'énergie primaire (PJ = 10^{15} J), ou 10,152 EJ (PJ = 10^{18} J).
- Un Français a consommé (2019) en moyenne 150,4 GJ d'énergie primaire (GJ = 10^9 J).
- La combustion d'1 litre d'essence fournit environ 33 MJ (MJ = 10^6 J).

tonne équivalent pétrole (tep) : unité utilisée en référence aux « énergies » fossiles.

- Définition : chaleur dégagée par la combustion d'une tonne de pétrole.
- 1 tep = 41,868 GJ (par convention, la valeur réelle dépend du type de pétrole...)
- Bilan énergétique français (2019) = 242,5 Mtep d'énergie primaire ($242,5 \cdot 10^6 \times 41,868 \cdot 10^9 = 10\,152 \cdot 10^{15}$).
- Consommation annuelle d'un Français (2019) = 3,59 tep par an ($3,59 \times 41,868 \cdot 10^9 = 150,4 \cdot 10^9$).

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

- Définition : 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.
- Énergie quotidienne nécessaire à un humain = 2 000 kcal \approx 8 MJ.

kilowatt-heure (kWh) : unité utilisée par les électriciens, égale à 3,6 MJ.

Lisons une étiquette

VALEURS NUTRITIONNELLES	Pour 100 g	Par portion de 45 g
ÉNERGIE	1558 kJ 370 kcal	700 kJ 166 kcal
MATIÈRES GRASSES	8,7 g	3,9 g
dont		
acides gras saturés	2,7 g	1,2 g
mono-insaturés	3,3 g	1,5 g
polyinsaturés	2,3 g	1,0 g
GLUCIDES	59,2 g	26,6 g
dont sucres	16,1 g	7,2 g
FIBRES ALIMENTAIRES	9,4 g	4,2 g
PROTÉINES	9,0 g	4,1 g
SEL	0,03 g	0,01 g

*Apports de référence pour un adulte-type (8400 kJ / 2000 kcal).
Ce paquet contient au moins 16 portions de 45 g de céréales.
À consommer dans le cadre d'une alimentation variée et équilibrée et d'un mode de vie sain.

Substance	Densité énergétique	
Lipides	37,2 kJ/g	8,9 kcal/g
Glucides	16,7 kJ/g	4,0 kcal/g
Fibres	7,9 kJ/g	1,9 kcal/g
Protéines	17,6 kJ/g	4,2 kcal/g

Énergie pour une portion de 45 g

$$\begin{aligned}
 & 3,9 \text{ g} \times 8,9 \text{ kcal/g} \\
 + & 26,6 \text{ g} \times 4,0 \text{ kcal/g} \\
 + & 4,2 \text{ g} \times 1,9 \text{ kcal/g} \\
 + & 4,1 \text{ g} \times 4,2 \text{ kcal/g} \\
 = & \quad \mathbf{166,3 \text{ kcal}}
 \end{aligned}$$

$$166,3 \text{ kcal} \times 4,18 \text{ J/cal} \approx 695,1 \text{ kJ}$$

Énergie suffisante pour faire monter un humain de 1 000 mètres d'altitude !

Où est le problème ?

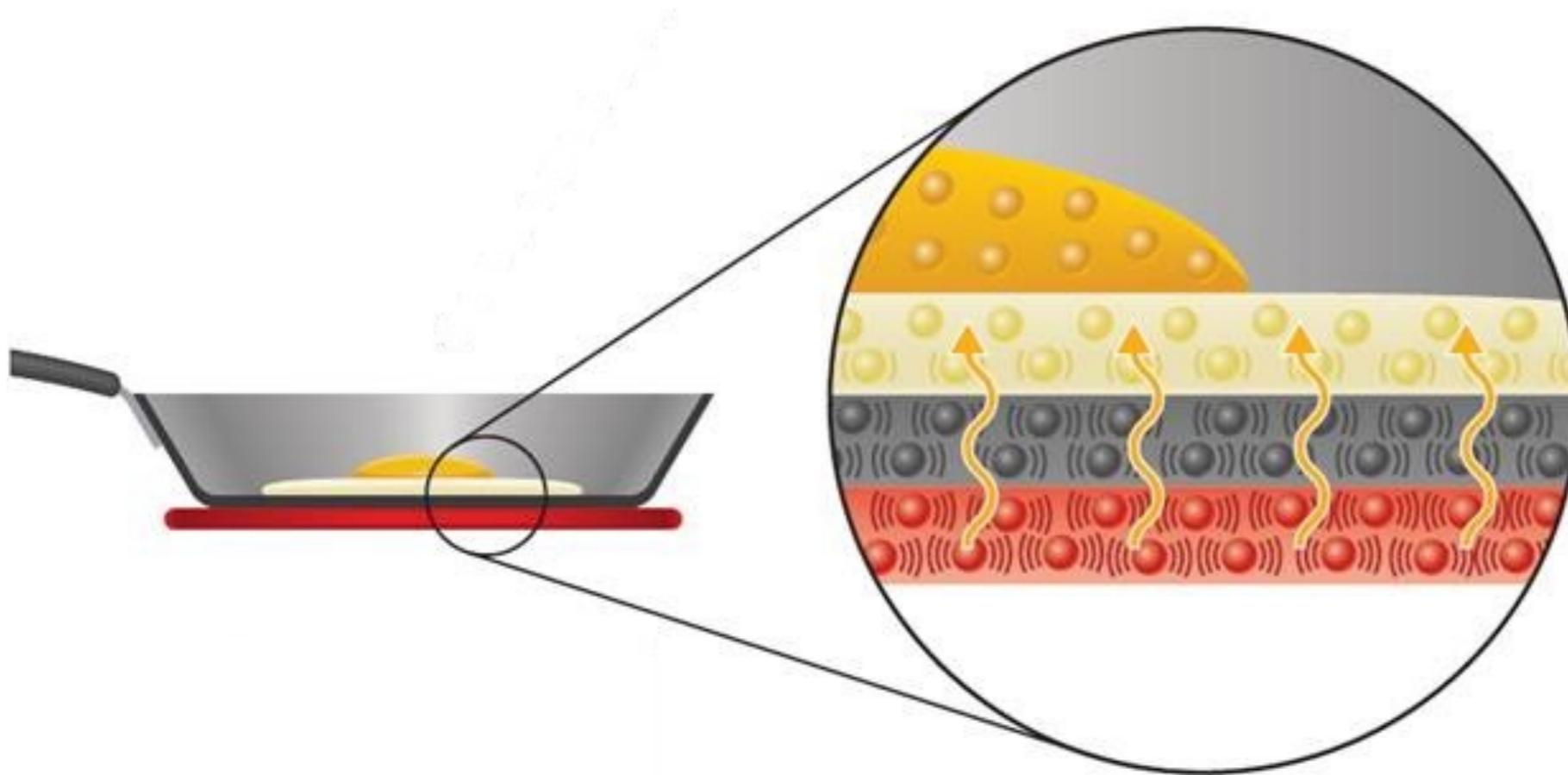
Phénomènes de transfert

Quand une quantité n'est pas homogène dans l'espace, des phénomènes d'homogénéisation se produisent spontanément.

Quantité inhomogène	Phénomène induit
Hauteur	Chute
Température	Conduction thermique ou rayonnement
Masse volumique	Convection
Pression	Travail mécanique
Concentration	Diffusion, osmose
Charge électrique	Courant électrique
Salaire horaire	Délocalisation
Impôts	Évasion fiscale
Prix	Concurrence

Transfert d'énergie : conduction

La **conduction thermique** est la transmission de proche en proche de l'agitation thermique des molécules (chaleur).



La conductivité thermique caractérise le comportement des matériaux lors du transfert thermique par conduction.

Matériau	λ (W/m/K)
Cuivre	380
Aluminium	230
Béton plein	1,80
Pierre	1,70
Brique pleine	0,74
Bois (sapin)	0,15
Béton cellulaire	0,09
Liège	0,05
Laine de verre	0,04
Polystyrène expansé	0,04
Polyuréthane	0,02

Isolation thermique

Fibre de bois



Laine de roche



Polystyrène
expansé



Polystyrène
graphité



Mousse de
polyuréthane

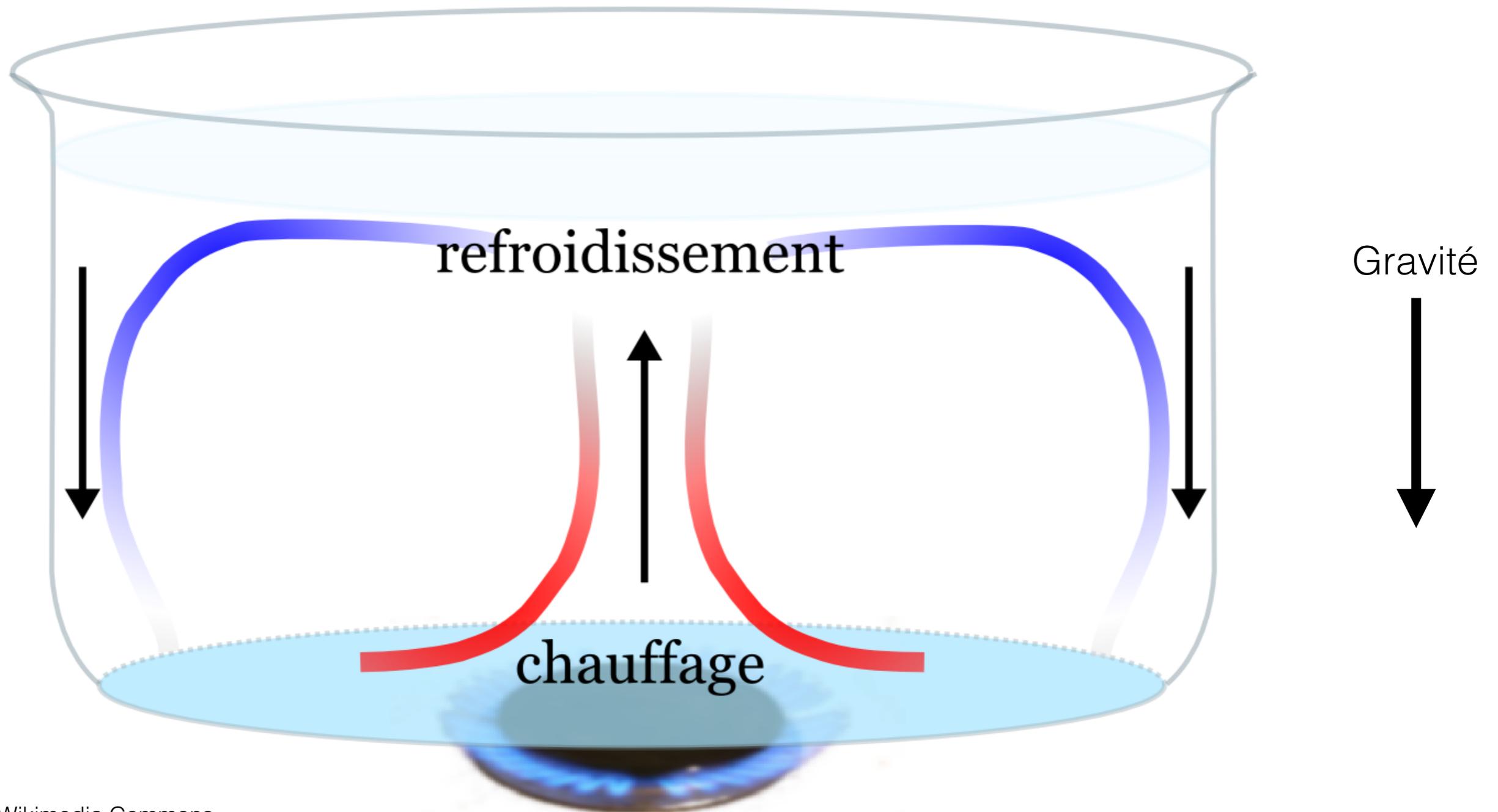


Transfert d'énergie : convection

La **convection** est le transfert de chaleur dû au mouvement global des particules d'un fluide.

Exemple : l'air chaud monte car il est moins dense (poussée d'Archimède !).

Cela transporte la chaleur du bas vers le haut.

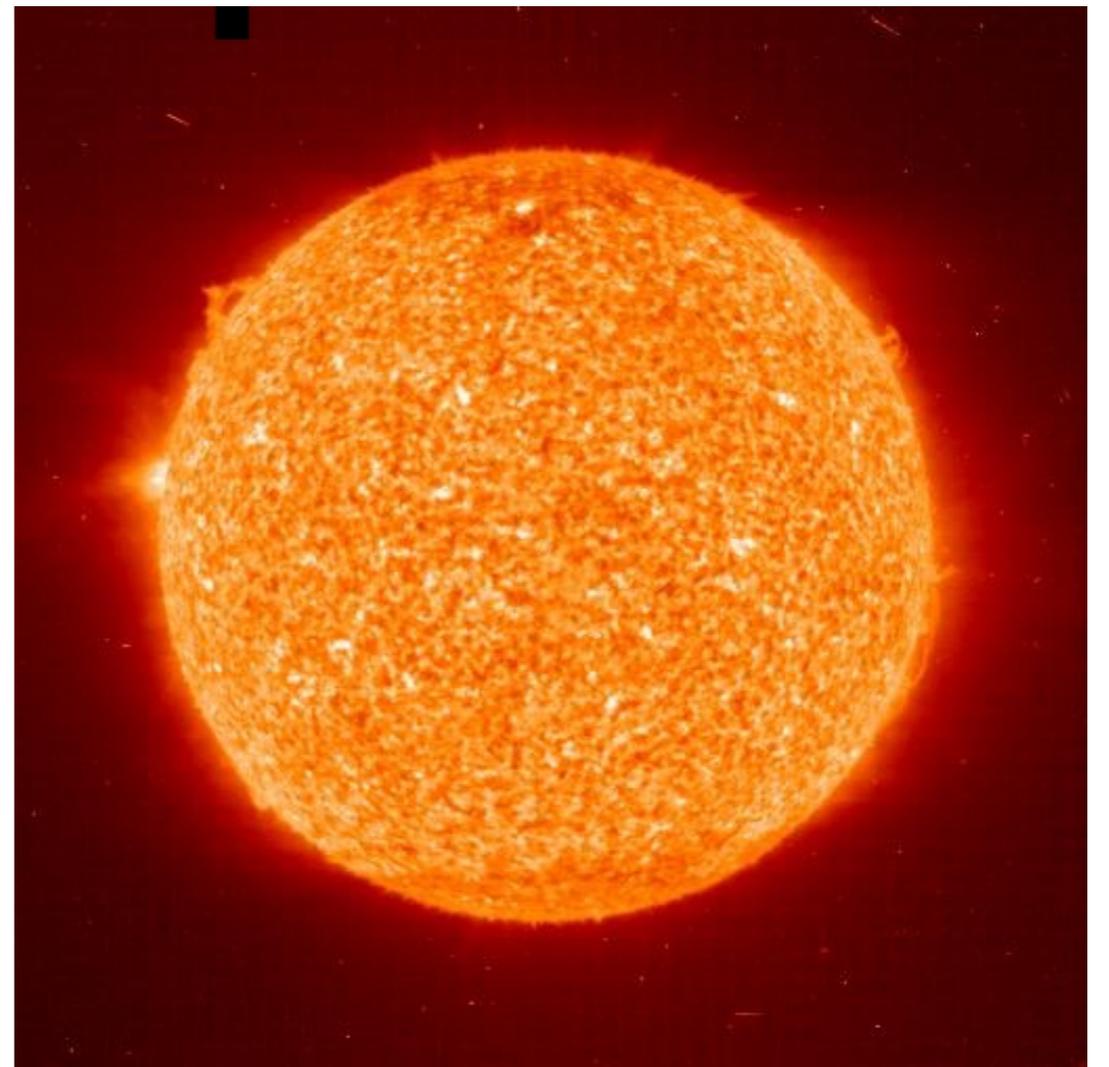
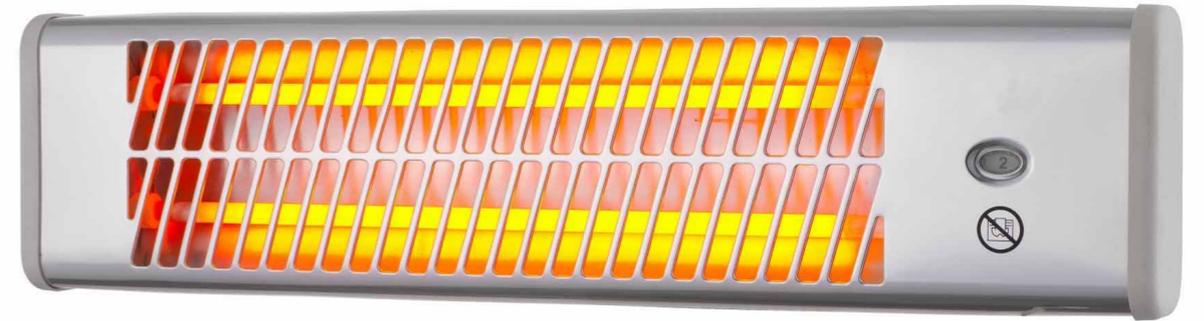




Cumulus dit « de beau temps », résultant de la convection atmosphérique. Remarquez le « plancher » de condensation.

Transfert d'énergie : rayonnement

Le **rayonnement** est le transfert d'énergie par émission de lumière ou de particules.



Propriétés de l'énergie - 1

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

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



Équation du tiroir-caisse (de conservation)

ce que j'ai = ce que j'avais + entrées - sorties

On ne peut donc pas « produire » de l'énergie !

Propriétés de l'énergie - 2

La transformation d'une forme d'énergie à une autre n'est jamais complète.

Exemple : l'énergie mécanique des muscles du cycliste n'est pas intégralement transformée en énergie de mouvement grâce à son vélo.

Une partie de **l'énergie** initiale **est transformée** en énergie cinétique microscopique et désordonnée : on dit qu'elle est transformée **en chaleur**.

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

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

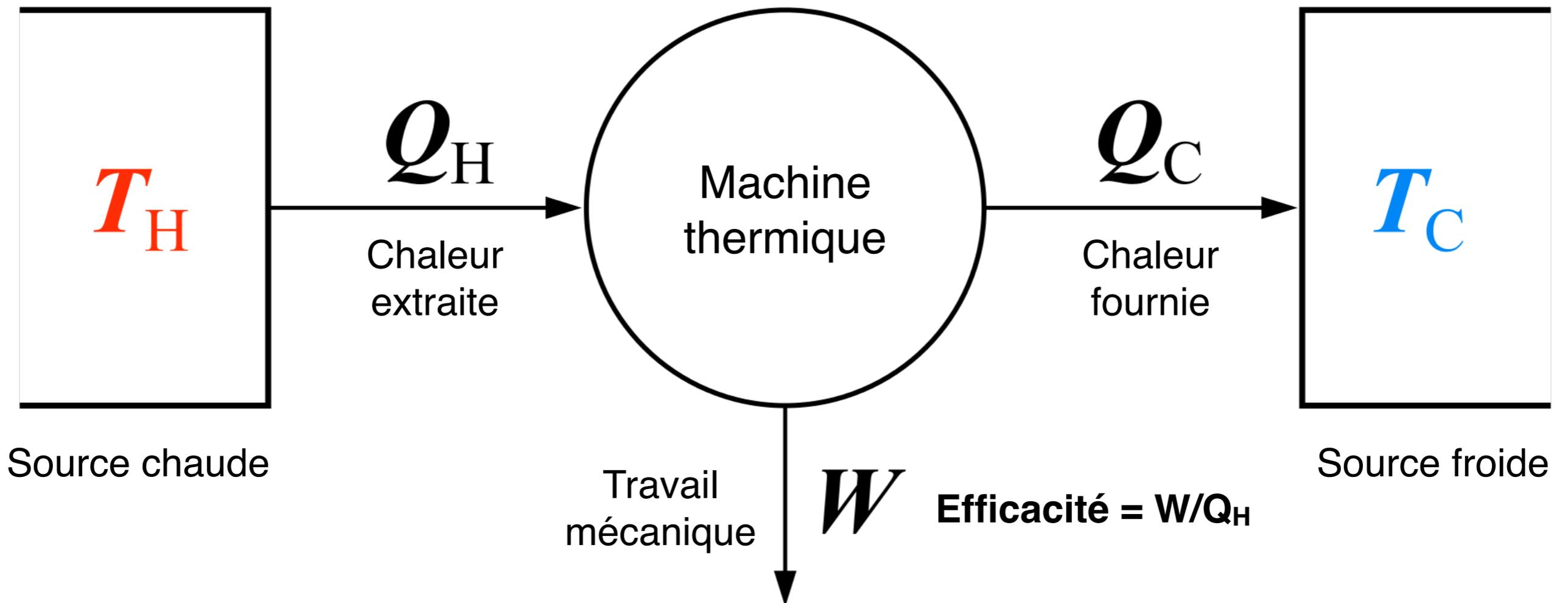
Les expressions « production d'énergie » et « consommation d'énergie » sont imprécises. Elles signifient en réalité « transformation d'une forme d'énergie en une autre utilisable » et « utilisation d'une forme d'énergie désirée/utile ».

La machine thermique

La chaleur passe spontanément du chaud vers le froid.

La machine thermique s'interpose dans ce flux pour produire un travail mécanique, qui peut être à son tour transformé, en électricité par exemple.

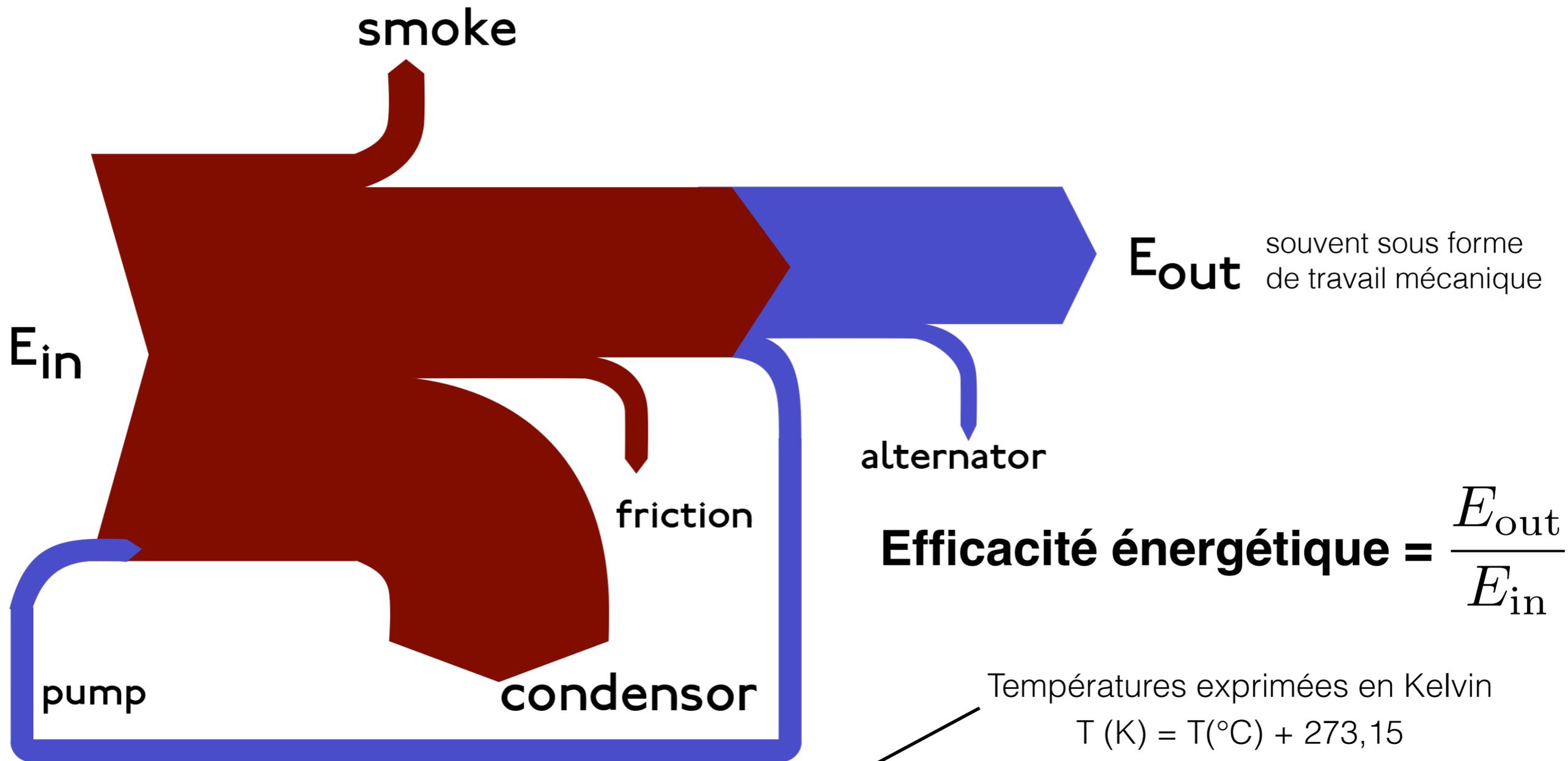
$$Q_H - Q_C - W = 0$$



Le fonctionnement inverse, i.e. fournir du travail à la machine, permet

- le réfrigérateur, qui refroidit la source froide ;
- la pompe à chaleur qui réchauffe la source chaude.

Diagramme de flux simplifié d'une machine thermique



$$\text{Efficacité énergétique} = \frac{E_{out}}{E_{in}}$$

Températures exprimées en Kelvin
 $T \text{ (K)} = T \text{ (}^\circ\text{C)} + 273,15$

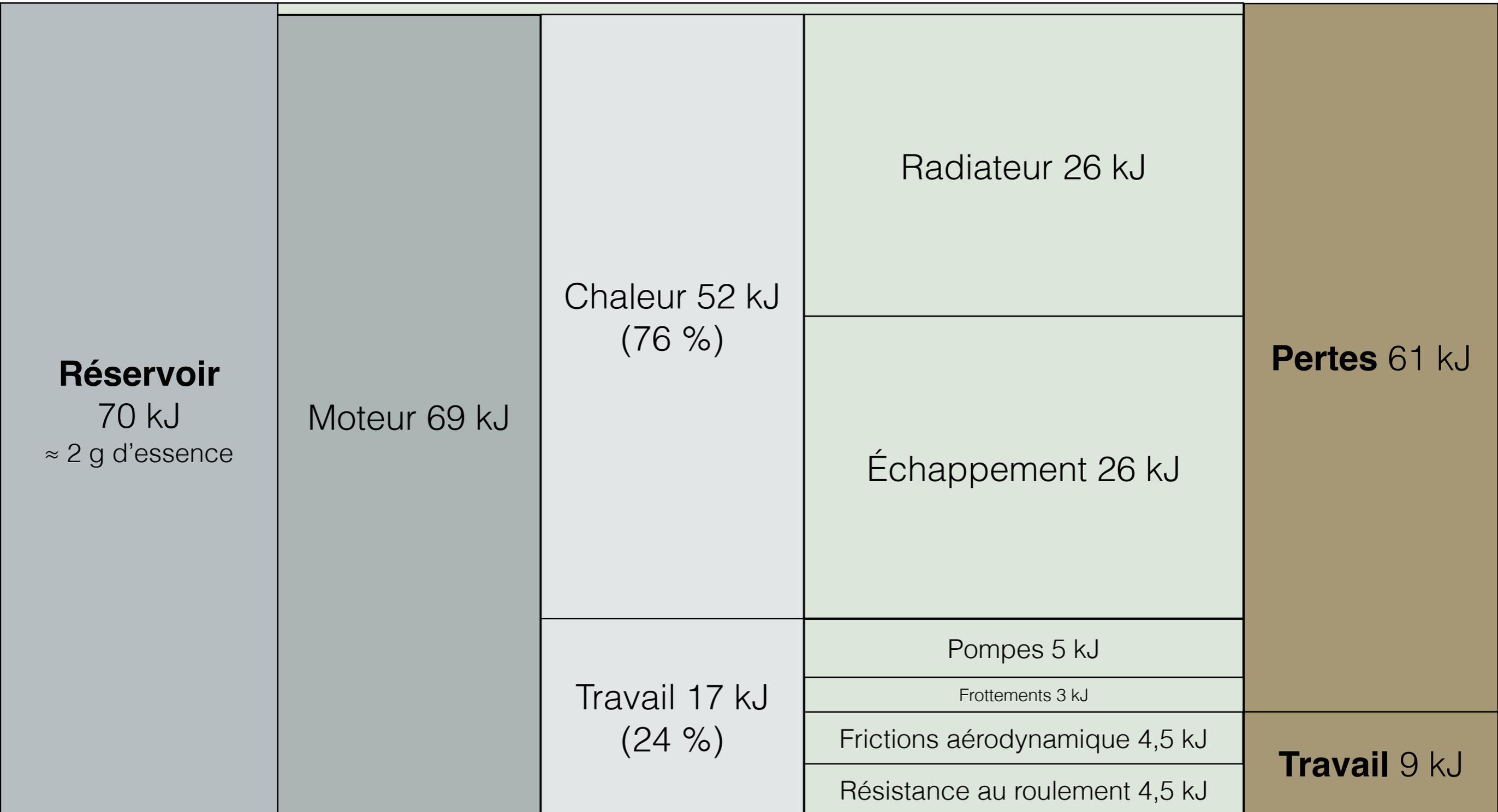
Pour une machine idéale à sa puissance maximale :

$$\eta = 1 - \sqrt{\frac{T_C}{T_H}}$$

Type de centrale	T _c	T _H	η	η réel
Charbon, gaz	25°C	565°C	0,41	0,36
Nucléaire	25°C	330°C	0,31	0,30
Géothermique	80°C	250°C	0,18	0,16

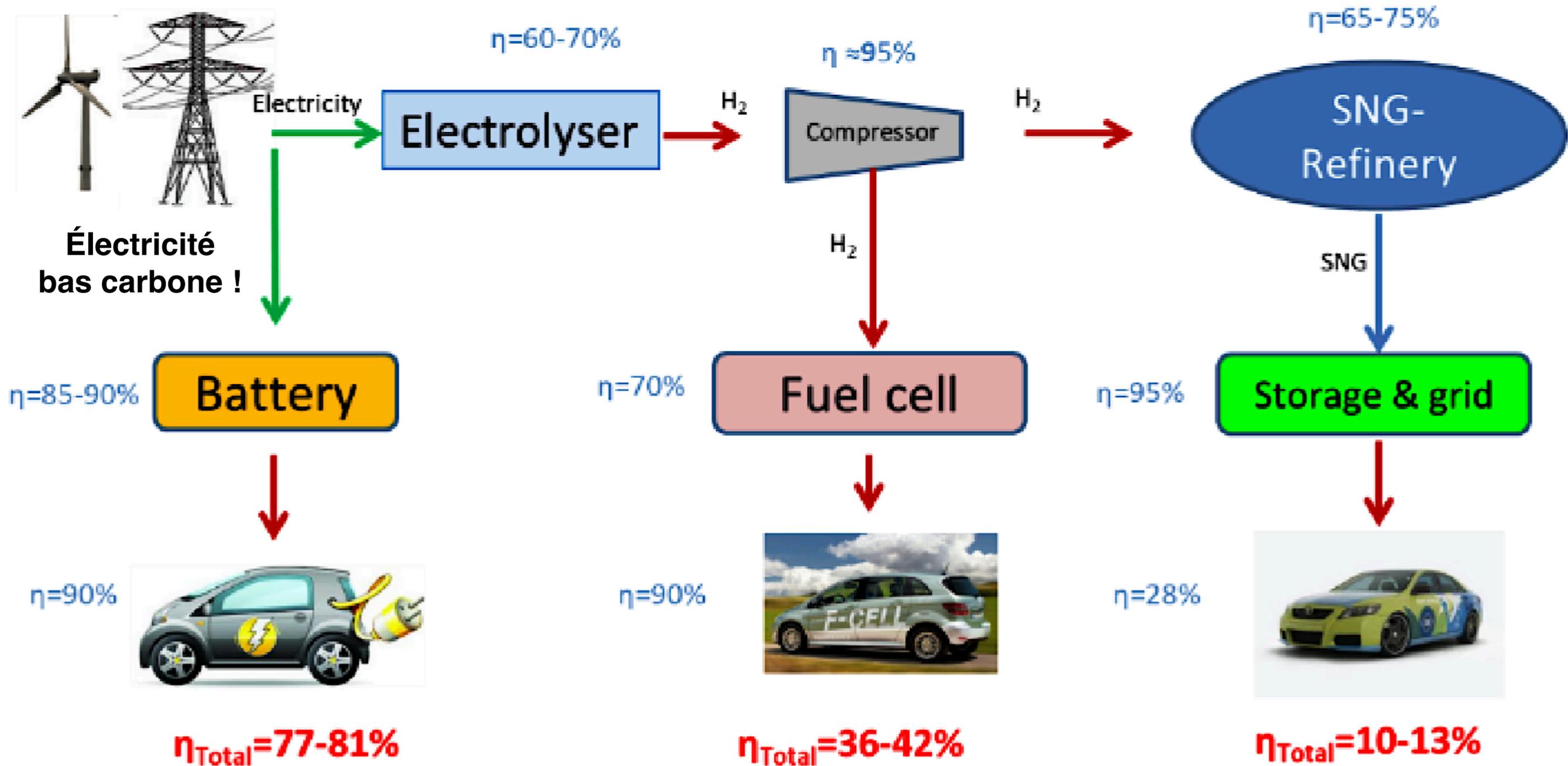
Le moteur thermique

Évaporation 1 kJ



Flux d'énergie dans le moteur d'une voiture à vitesse constante sur autoroute, en 1 seconde.

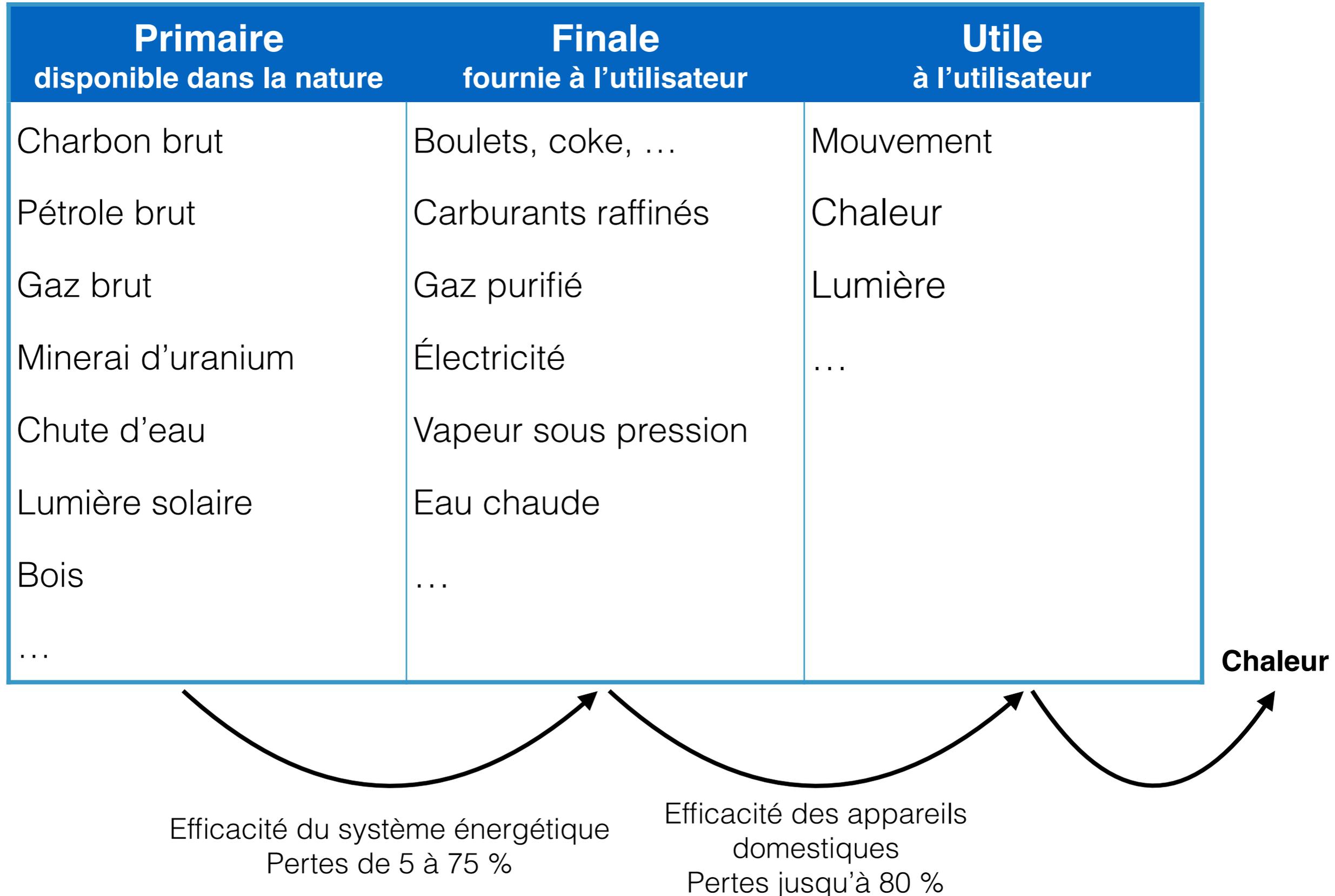
Le moteur bas carbone



Source : Ajanovic & Haas, *Heading towards low-carbon passenger car mobility: electricity vs hydrogen*, (2023).

<https://elspublishing.com/papers/j/1578694503958216704>

Les avatars de l'énergie



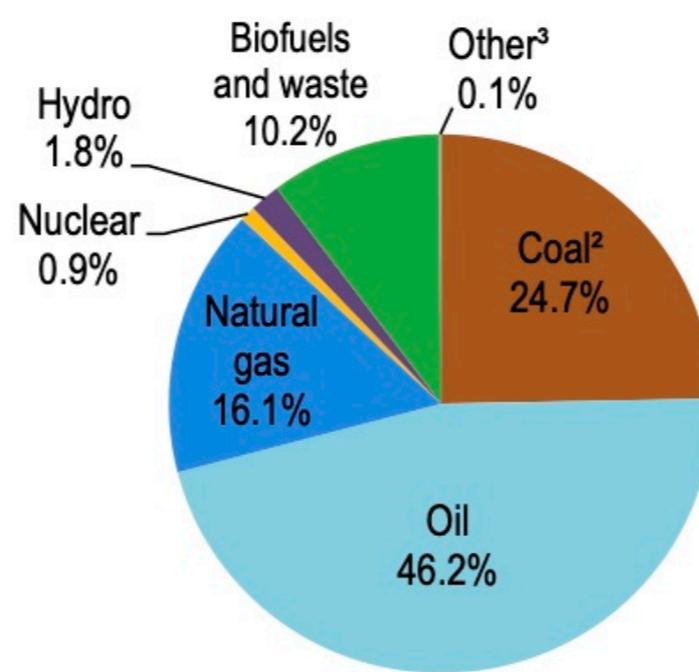
Énergie primaire mondiale



Efficacité énergétique
76% (1973) - 69% (2019)



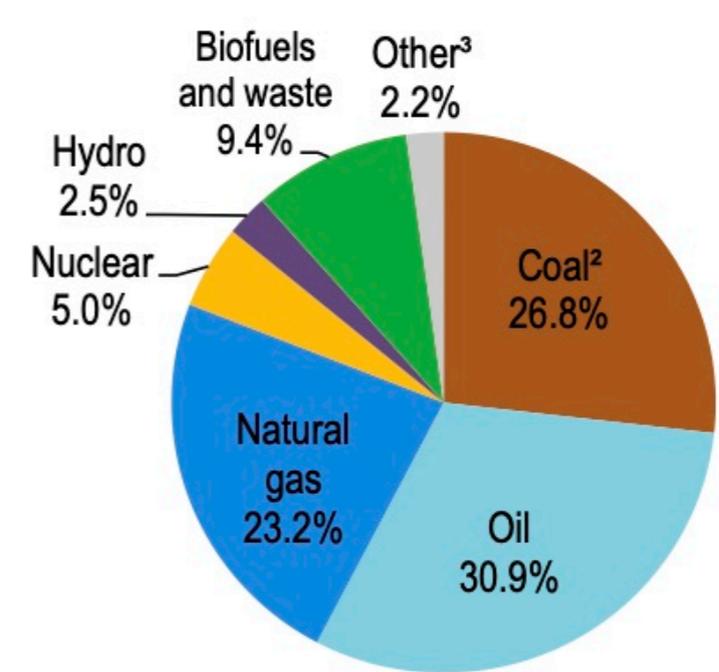
Énergie finale mondiale



Fossiles = 87,0 %

254 EJ

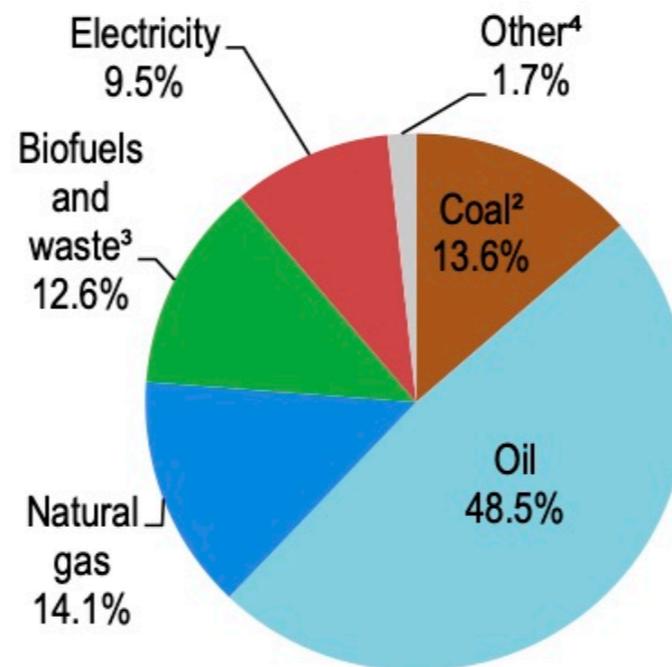
1973



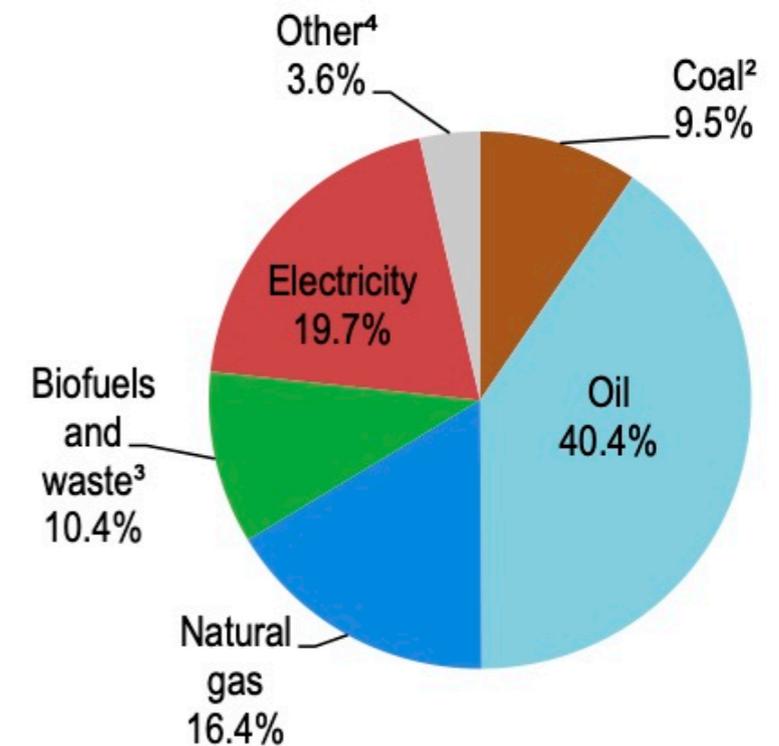
Fossiles = 80,9 %

606 EJ

2019



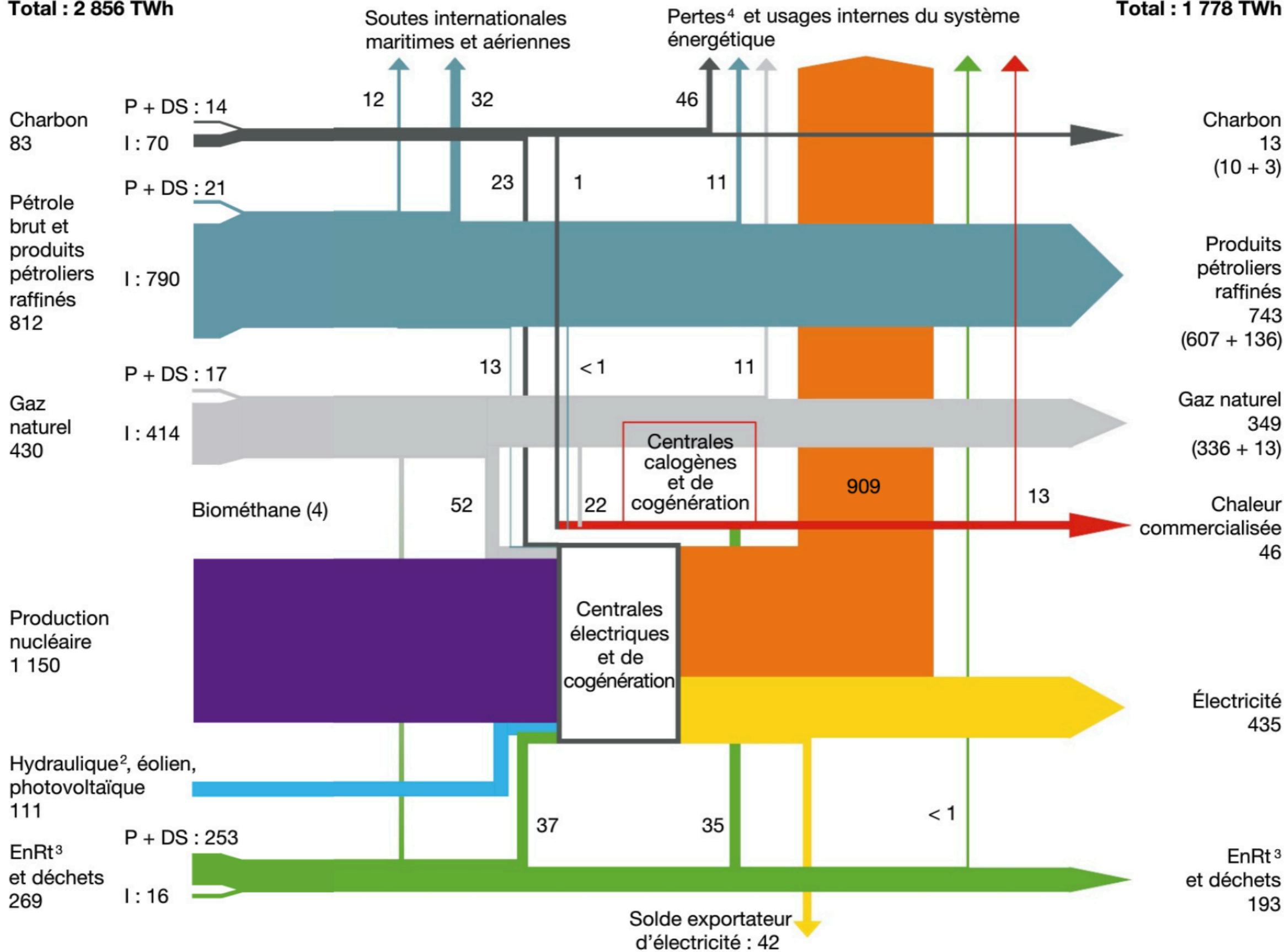
194 EJ



418 EJ

Ressources primaires¹
Total : 2 856 TWh

Consommation finale⁵
Total : 1 778 TWh



Efficacité du système énergétique français (2021) = 62,2%