

# Chaleur et énergie

- Température et chaleur
- Transfert de chaleur
- Formes d'énergie & conversion
- Machines thermiques

## Notions utilisées :

1. Introduction
7. Mécanique classique
8. Relativité restreinte
14. Radioactivité
15. Thermodynamique



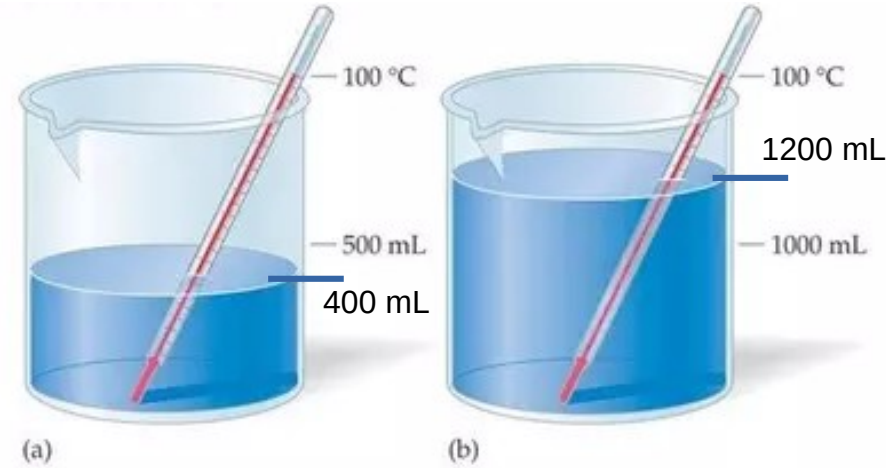
Pour une meilleure compréhension, certaines explications pourront être légèrement simplifiées/tronquées

Images : Wikipedia sauf mention contraire

<https://www.pinterest.fr/pin/180495897553733056/>

# Rappel : température et chaleur

- Microscopiquement, les particules d'un corps ne sont **jamais au repos** : elles ont toujours une **vitesse** et donc une **énergie cinétique** (variable extensive)
- La **température** (variable intensive) est la grandeur physique qui mesure l'**agitation thermique** d'un corps
- Lorsque l'on met en contact deux corps de **température différente**, il y a **échange d'énergie cinétique microscopique** entre les particules plus rapides et les moins rapides, c'est-à-dire de « **chaleur** »

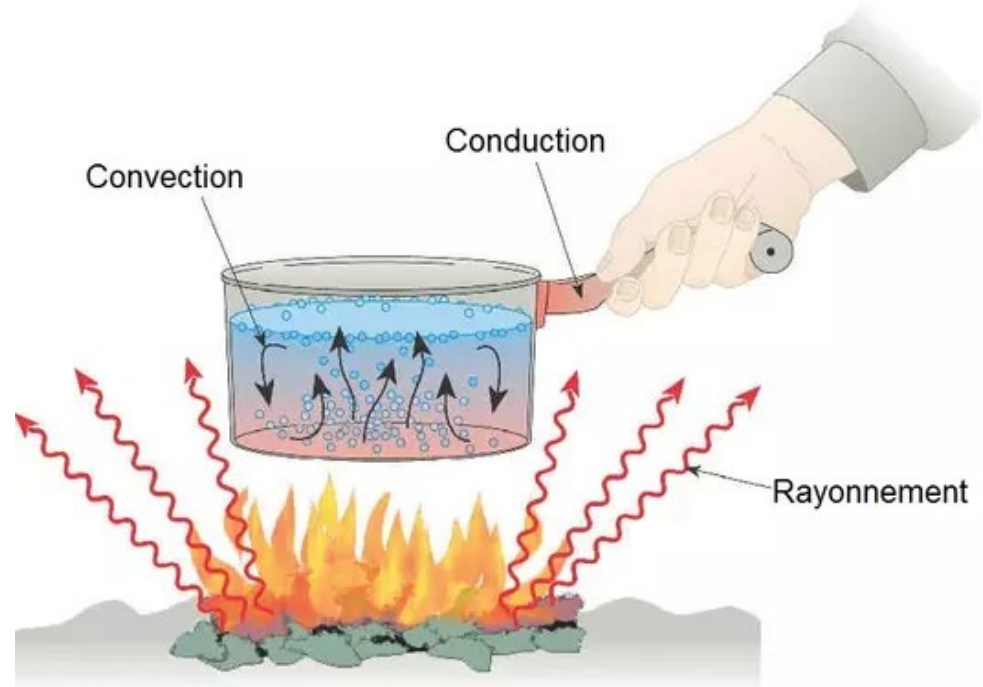


Même température :  
(a) aussi « chaud » que (b)  
Trois fois plus d'énergie thermique  
en (b) qu'en (a) :  
trois fois plus de chaleur  
transférable

# Le transfert de chaleur

## Il existe 3 modes de transfert de chaleur

- La **conduction**, due à la **diffusion** progressive de l'agitation thermique dans la matière
- La **convection** : transfert thermique qui accompagne les **déplacements** macroscopiques de la matière
- Le **rayonnement**, qui correspond à la propagation de **photons**

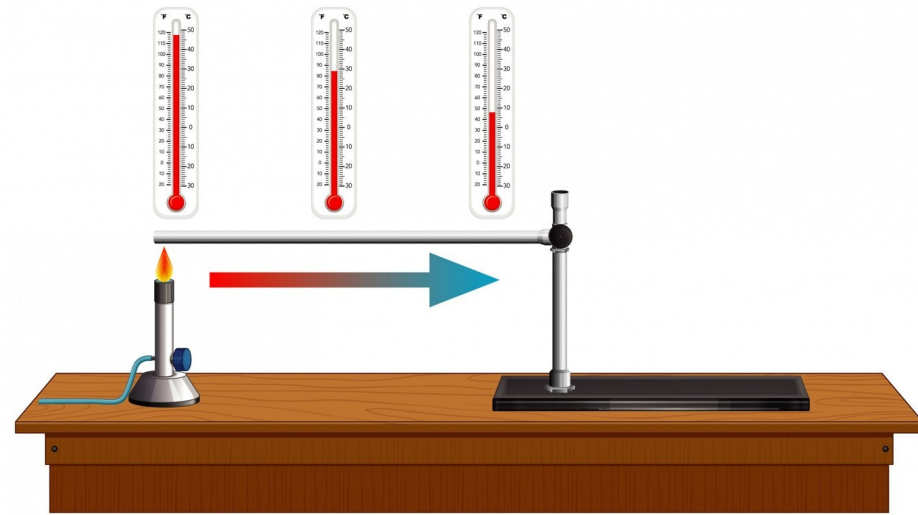


# La conduction

- Transmission **de proche en proche** de l'agitation thermique
  - **sans déplacement macroscopique** de matière : un(e) atome / molécule cède une partie de son **énergie cinétique** à son voisin par choc
- Du plus chaud vers le plus froid : la chaleur « descend le gradient de température »

$$\vec{\phi} = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T = -\lambda \vec{\nabla} T$$

- Vitesse dépend des matériaux
  - $\lambda$  : conductivité thermique ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )
    - liée à la conductivité électrique
    - Meilleur : Ag mais le Cu est moins cher...

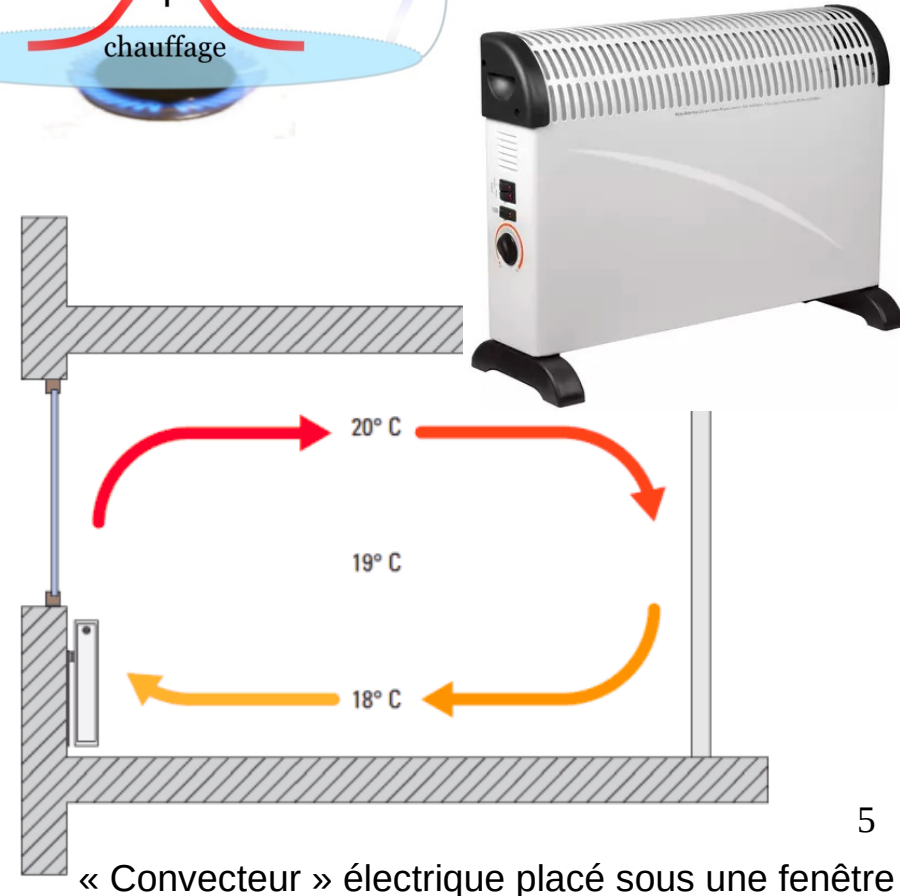
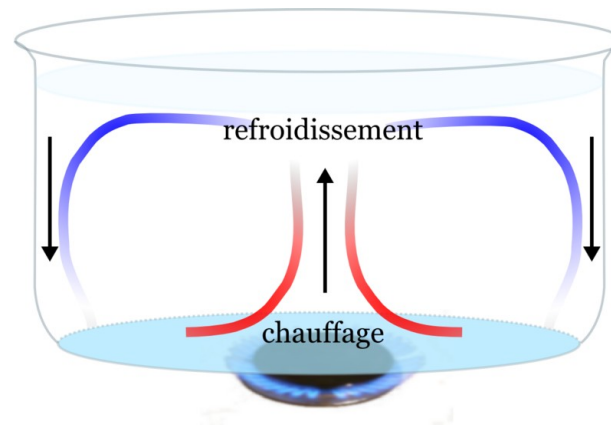


2-4 : Aluminium



# La convection

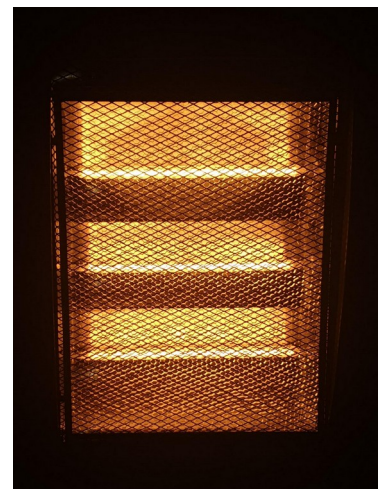
- Transfert d'énergie thermique par le **mouvement d'un fluide**
- Elle peut être :
  - **Naturelle**
    - Augmentation de la température → plus d'agitation thermique → expansion du fluide → baisse de densité → poussée d'Archimède → élévation, puis refroidissement → redescente
  - **Forcée**
    - Écoulement du fluide provoqué (ex : ventilateur)
- Se compose de 2 phénomènes :
  - **Advection** : transport par mouvement macroscopique
  - **Diffusion** : mouvement aléatoire des particules





# Le rayonnement

- Le rayonnement thermique est un **rayonnement électromagnétique** généré par l'**agitation thermique des particules**
  - Des **micro-ondes** à l'**ultra-violet** (infra-rouge pour  $T_p$  ambiante)
- Ce rayonnement peut se **transformer en énergie thermique lorsqu'il est absorbé** par un corps
  - On sent la chaleur d'un feu à distance
- Permet :
  - la vision de nuit (détecteurs à infra-rouge)
  - La thermométrie (prise de température à distance, caractérisation thermique de bâtiments)
- Radiateurs rayonnants
  - Un convecteur rayonne également un peu...



<https://brazyer.com/blogs/infos/camera-thermique-isolation>

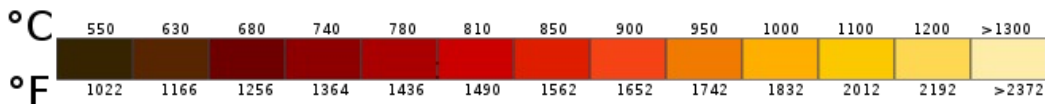
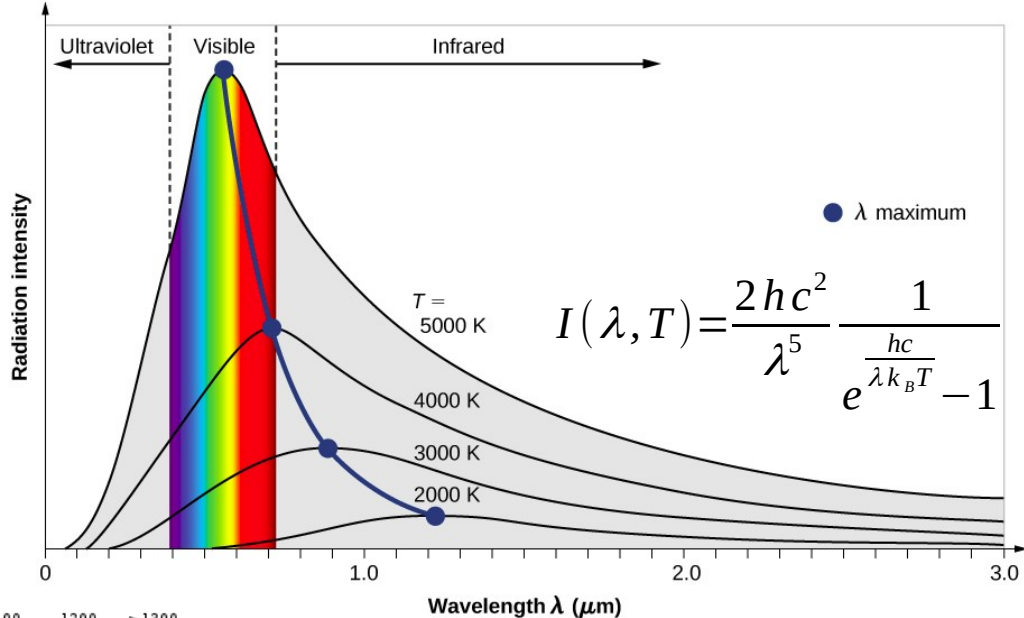
<https://phys.org/news/2018-04-astro-ecology-endangered-animals-software-stars.html>

<https://www.charentelibre.fr/charente/esse/un-premier-feu-de-saint-jean-au-village-de-la-cour-6144910.php>

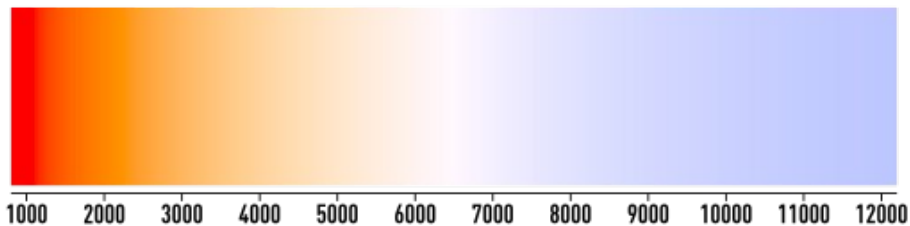
<https://www.laboratoire-giphar.fr/parapharmacie/sante-et-bien-etre/autodiagnostic/thermometre-sans-contact>

# Le corps noir

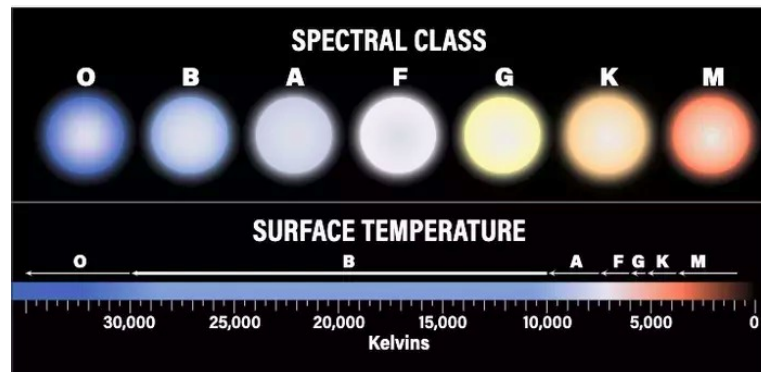
- Objet (idéal) qui absorbe **tout rayonnement électromagnétique reçu**
  - agitation thermique
  - émission d'un rayonnement électromagnétique « du corps noir »
- Calcul effectué par M. Planck en 1901



Echelle de couleur de l'acier pour les forgerons

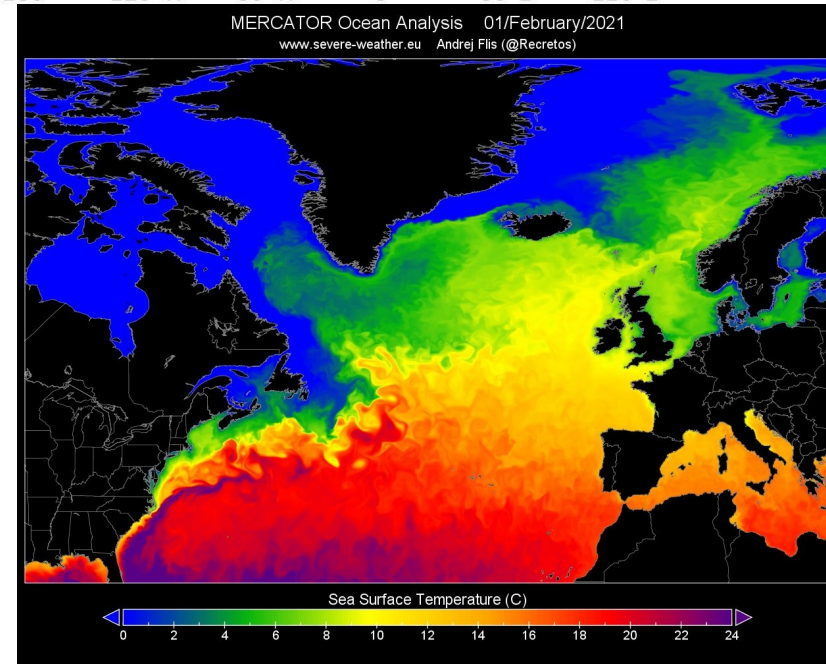
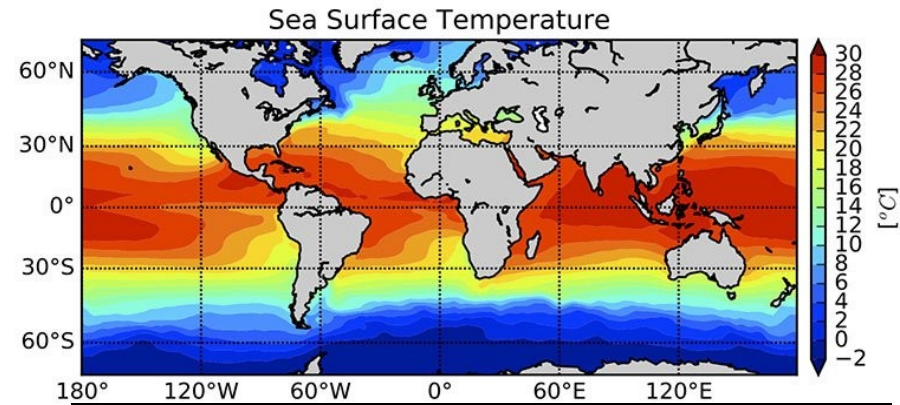


Couleur d'un corps noir en fonction de la température (décrit approx. la couleur perçue des étoiles)



# Capacité thermique massique

- Anciennement « capacité calorifique »
- « massique » ou « spécifique »
- C'est la **chaleur** qu'il faut transférer à un **kilogramme** d'une substance pour **augmenter sa température d'un kelvin** : unité =  $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ 
  - Elle représente la **capacité d'un corps à stocker de la chaleur** en chauffant ou **la restituer** en se refroidissant et à la **transporter** (bouillotte, océans)
  - $c_{\text{eau}}=4,185 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ,  $c_{\text{bois}}\approx 2 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ ,  $c_{\text{air}}=1 \text{ kJ.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$
- Comparaison : une pièce de 20 m<sup>2</sup> (50 m<sup>3</sup>) contient 65 kg d'air et une table en bois de 30 kg
  - $C_{\text{air}} = 65 \times c_{\text{air}} = 65 \text{ kJ.K}^{-1}$ ,  $C_{\text{table}} = 30 \times c_{\text{bois}} = 60 \text{ kJ.K}^{-1}$





# Marche sur le « feu »

- Ou « **pyrobatie** » (de pyro « feu » et batein « marcher »)
- Température des braises : ~ 700°C
- Explication scientifique :
  1. La braise a une faible capacité thermique massique : elle **emmagasine peu d'énergie thermique**
  2. La **conduction thermique** avec la peau est faible : la chaleur est mal transférée (présence de cendre)
  3. Le **temps de contact** avec la braise est **faible** : ~0,5 s, puis le pied peut refroidir jusqu'au prochain pas
- **Donc aucune lésion visible** sous les pieds après la traversée **malgré la température élevée**
  - (tout comme on ne se brûle pas lorsque l'on ouvre son four
  - mais on se brûle en attrapant le plat en verre avec les mains...)
- Le zététicien Henri Broch a proposé de faire la même traversée sur une **plaque en cuivre à « seulement » 300°C**, il n'a pas eu de candidat...



Température ≠ chaleur

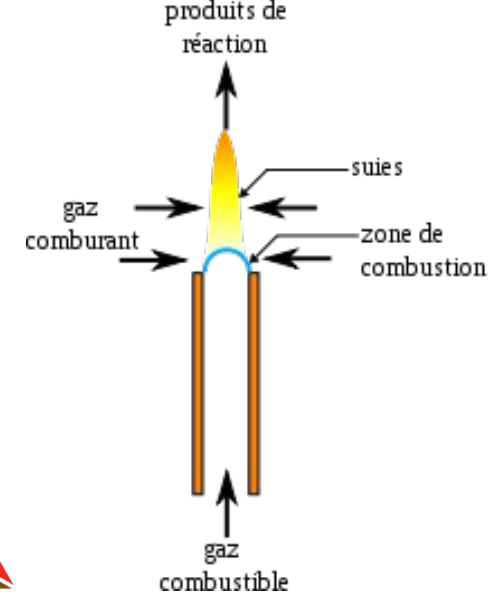
C'est la chaleur transférée et non la différence de température qui procure la sensation de froid ou de chaud.

# Qu'est-ce que le feu ?

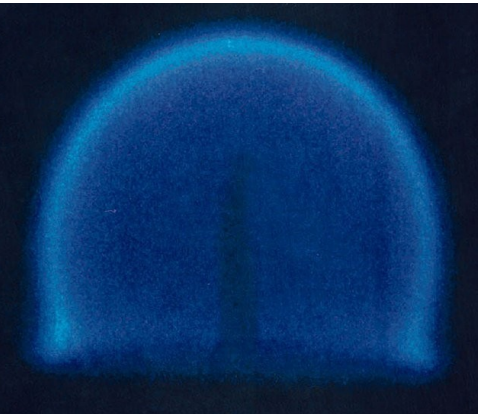
- **Dégradation** d'un corps par **combustion**
  - réaction chimique d'**oxydo-réduction exothermique**
- Et production d'une **flamme** (lumière)
  - Couleur dépend de la **nature** du carburant et de la **température**
  - Forme de la flamme en grande partie due aux mouvements de convection
    - poussée d'Archimède
    - → alimentation en comburant par les côtés



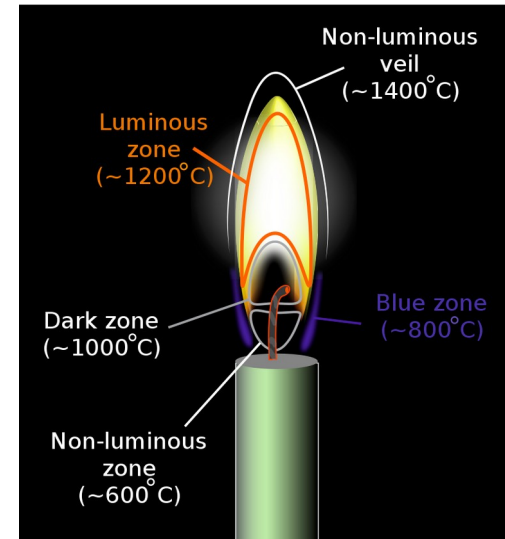
Éléments indispensables à une combustion



Flamme de diffusion



- En situation de **microgravité**, **pas de différence de densité** entre air chaud et air froid
  - → **plus de convection** pour emporter les produits de la combustion ( $\text{CO}_2$  par exemple), qui bloquent l'accès du dioxygène à la flamme → la flamme **s'éteint rapidement**
  - → Flamme de **diffusion sphérique**



# Les différentes formes d'énergie

- Définition (larousse.fr) :
  - Grandeur caractérisant un système physique, gardant la même valeur au cours de toutes les transformations internes du système (loi de conservation) et exprimant sa capacité à modifier l'état d'autres systèmes avec lesquels il entre en interaction
- Du grec ἐνέργεια, « force en action », par opposition à δύναμις « force en puissance »
- Énergie **thermique** (énergie cinétique microscopique)
- Énergie **mécanique**
  - Énergie **cinétique** (mouvement d'un corps ou d'une particule)
  - Énergie **potentielle**
    - **de pesanteur** (gravitationnelle)
    - **élastique** (ressort)
- Énergie **électromagnétique** (rayonnement) = énergie cinétique
- Énergie **électrique**
- Énergie **chimique**, chaleur latente
- Énergie de **masse** ( $E = m.c^2$ )
- Énergie **noire**



# Différentes formes d'énergie et conversions

Noter la particularité de l'énergie nucléaire

On pourrait ajouter :

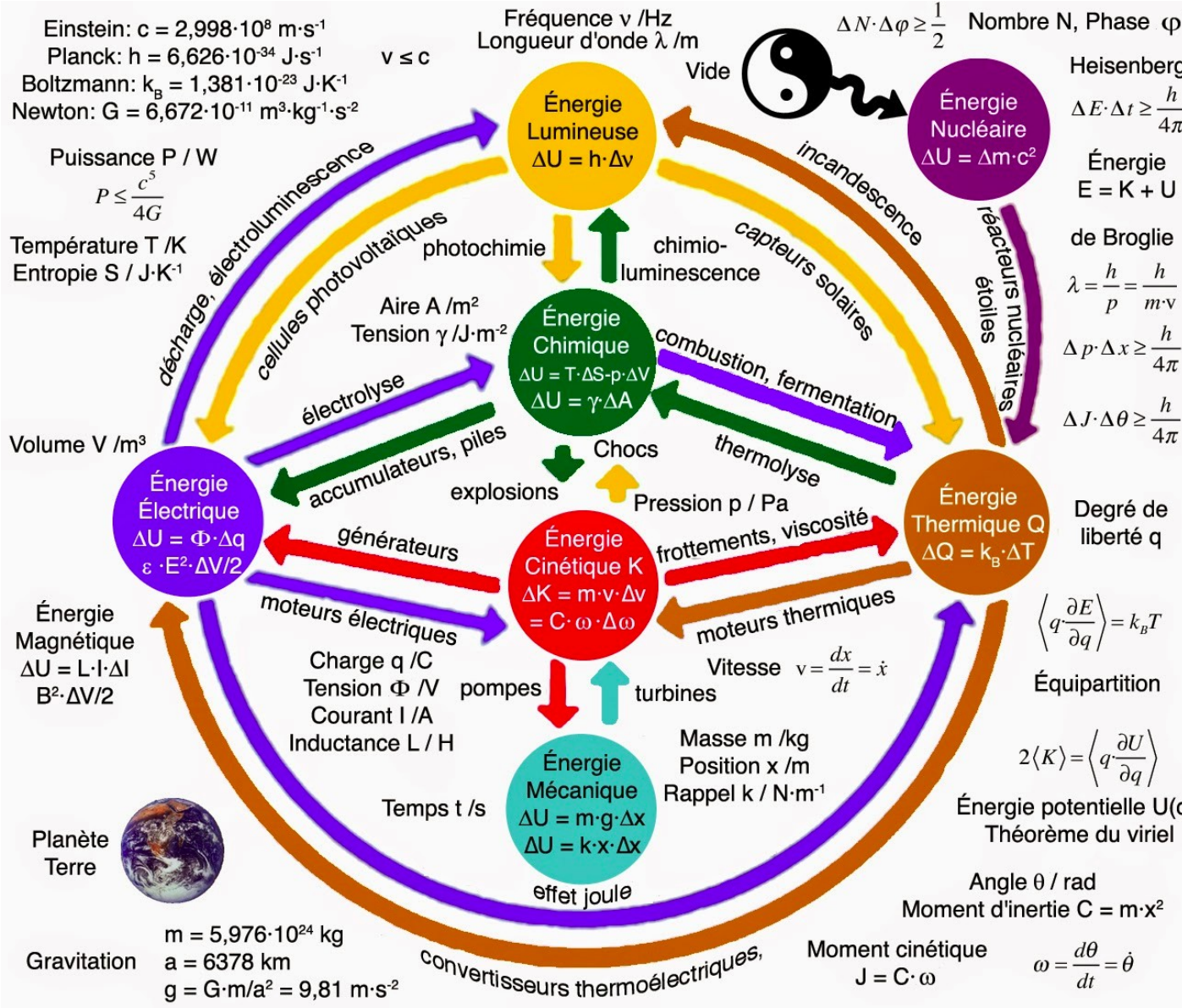
Énergie potentielle de gravitation

→ énergie cinétique

→ énergie thermique

→ énergie nucléaire

**Toutes les énergies proviennent du « Big Bang »**





# Les unités

- Énergie

- Unité officielle : **Joule** :  $1 \text{ J} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-2}$
- Ancienne unité : **calorie**
  - quantité d'énergie nécessaire pour **élever la température d'un gramme d'eau liquide de  $1 \text{ }^\circ\text{C}$  sous une pression d'une atmosphère  $\approx 4,184 \text{ J}$**
  - ( $\text{cal}_{15}$  : de  $14,5^\circ\text{C}$  à  $15,5^\circ\text{C}$ )
  - $1 \text{ Cal} = 1000 \text{ cal} = 1 \text{ kcal}$  (« grande » et « petite » calories)
- BTU (British Thermal Unit) :  $1 \text{ BTU} \approx 1055 \text{ J}$ 
  - quantité d'énergie nécessaire pour **élever la température d'une livre anglaise d'eau de  $1 \text{ }^\circ\text{F}$  à sous une pression d'une atmosphère**
- $1 \text{ kWh}$  est une énergie :  $1000 \text{ W} * 3600 \text{ s} = 3,6 \text{ MJ}$
- Luminosité solaire :  $L_{\odot} = 3,8 \times 10^{26} \text{ W}$
- Luminosité de notre galaxie  $\sim 5 \times 10^{36} \text{ W}$
- Luminosité approximative d'un sursaut gamma  $\sim 1 \times 10^{45} \text{ W}$

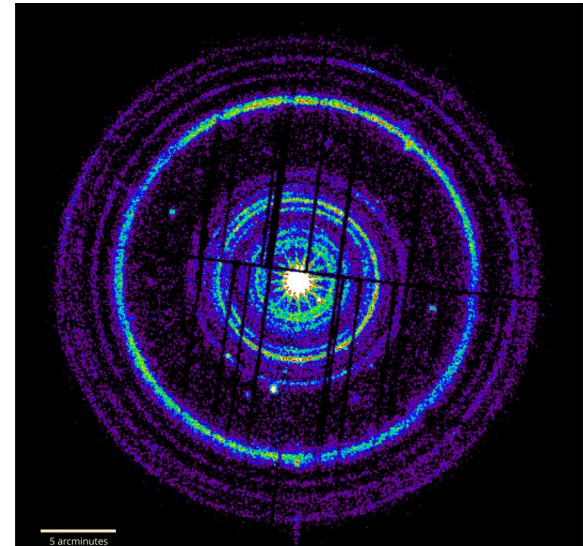
- Puissance

- Unité officielle : Watt
- $1 \text{ W} = 1 \text{ J.s}^{-1} = 1 \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-3}$
- C'est l'énergie fournie en une seconde
- (maths : la puissance est la « dérivée » de l'énergie  $\Leftrightarrow$  l'énergie est l' « intégrale » – la somme – de la puissance

- BTU/h (pour des plaques au gaz par ex.)

- Ex :  $12000 \text{ BTU/h} = 3,5 \text{ kW}$

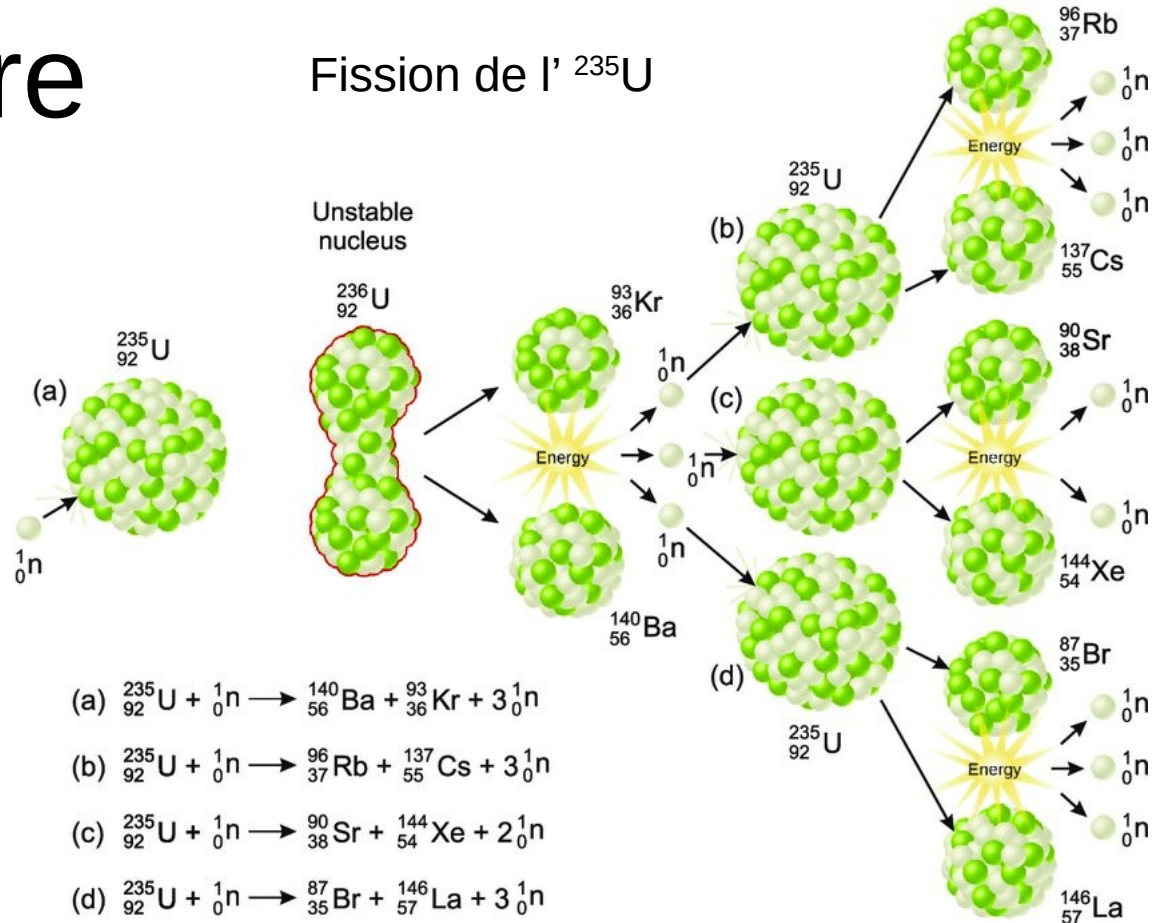
GRB 221009A,  
le plus puissant  
sursaut gamma  
jamais détecté



5 arcminutes

# La fission nucléaire

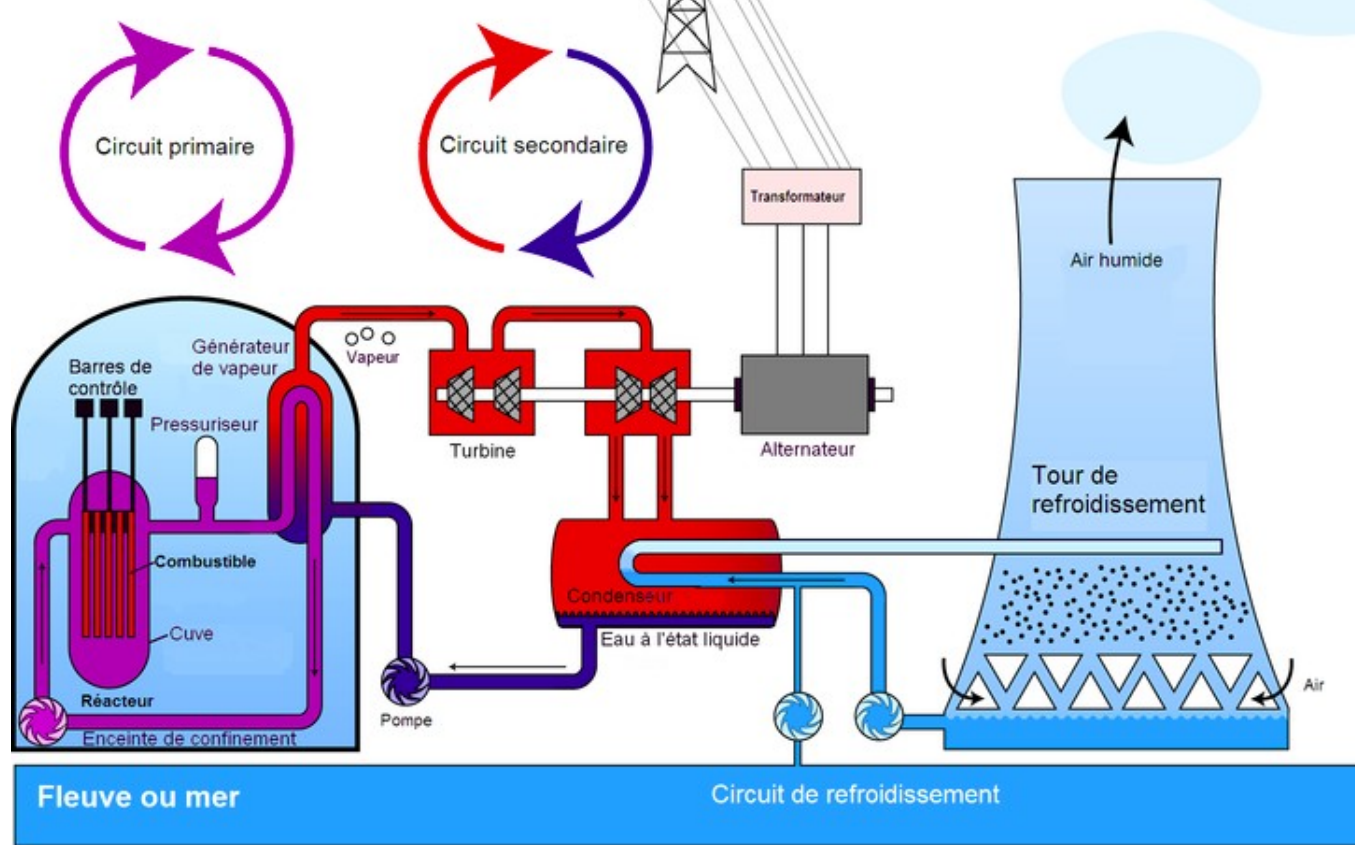
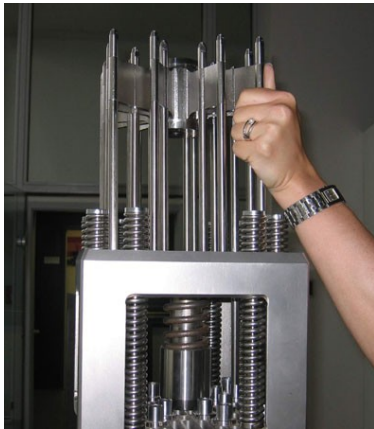
- **Ici**, provoquée par l'absorption d'un neutron
- **Différente de la radioactivité naturelle**
  - mais liée (instabilité du noyau)
- Chaque fission libère **2 à 3 neutrons** (2,5 en moyenne) = facteur de multiplication
  - Avec 2 : 1, 2, 4, 8, 16, 32, ... =  $2^n$  = **phénomène exponentiel = explosif**
  - Doit être **contrôlée** !



« Réaction en chaîne »

# Les centrales nucléaires

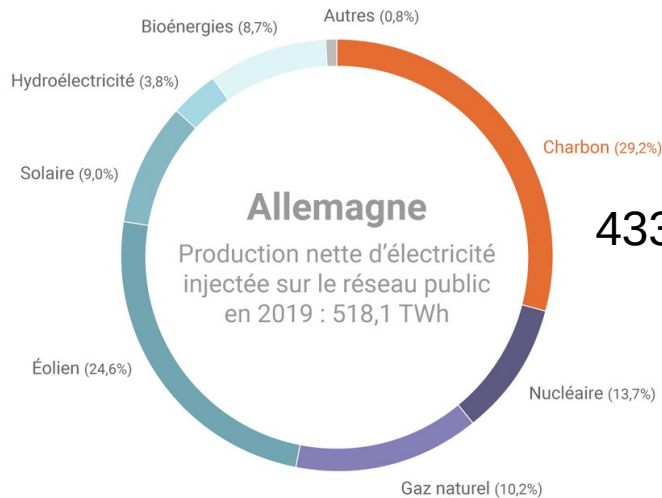
- Fission → chaleur → vapeur d'eau → turbine → électricité
  - Comme toutes les centrales électriques
  - Puissance ~ 1 GW
- EPR : « European pressurized reactor » puis « Evolutionary power reactor » : réacteur à eau pressurisée de 3<sup>ème</sup> génération : P ~ 1,6 GW



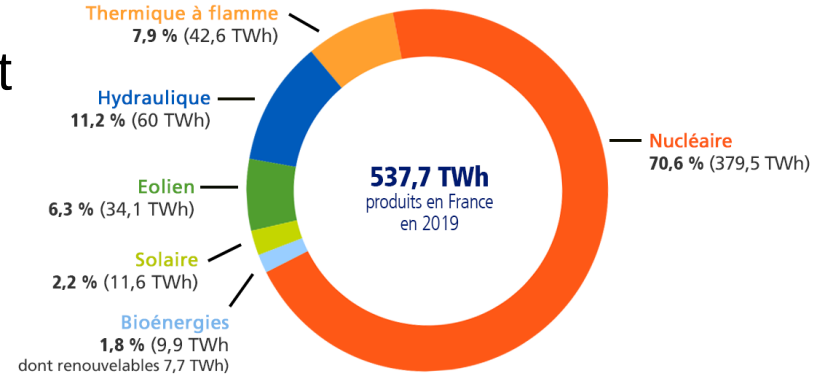
- Barre de contrôle : matériau **neutrophage** (diminue le facteur de multiplication des neutrons par capture) → permettent de contrôler des réactions en chaîne
  - Réalisées en argent, indium, cadmium, bore, cobalt, ...

# Production d'énergie dans le monde

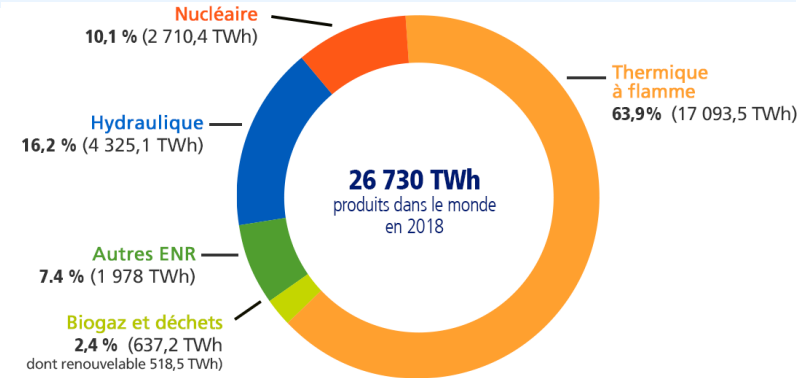
- Hiver 2022-2023 : la moitié des réacteurs à l'arrêt
  - maintenances programmées
  - travaux liés à des problèmes de corrosion
  - retards dans les remises en route
  - → importation d'électricité d'Allemagne



433 réacteurs dans le monde,  
56 en France



La production française d'électricité en 2019  
Source RTE - bilan électrique 2019 © EDF



La production mondiale d'électricité en 2018  
Source : International Energy Agency (IEA) © EDF



# Réactions en chaîne

- = réactions nucléaires incontrôlées
  - Accidents nucléaires : Tchernobyl (1986), Fukushima (2011) = niveau 7
  - Bombes : A (fission), H (fusion)



Réplique et champignon de la « Tsar Bomba » (57 Mt, 56 km)



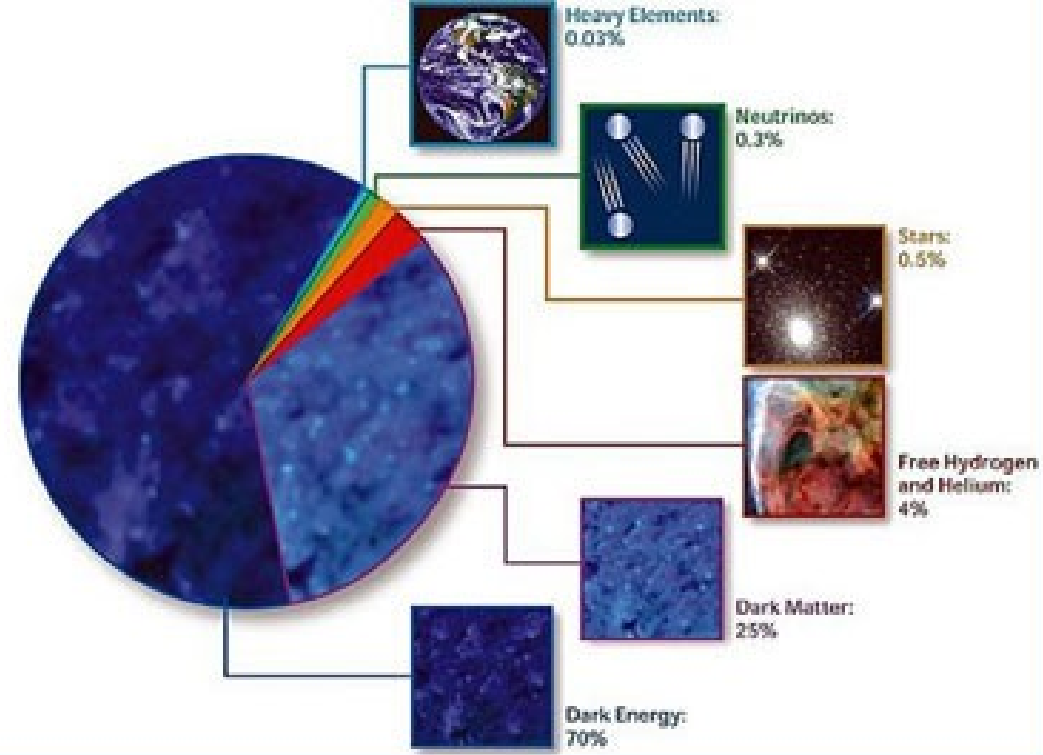
Centrale de Fukushima

- 2 utilisations de la bombe A sur des civils : Hiroshima et Nagasaki, 6 et 9 août 1945
  - 100 à 200 000 morts (explosions + séquelles)
  - essai nucléaire Trinity du 16 juillet 1945 = date proposée pour le début de l' « anthropocène »

# L'énergie noire

- Forme d'énergie **hypothétique**
- Remplit **uniformément tout l'Univers**
- **Nature inconnue**
  - pression négative
  - se comporte comme une force gravitationnelle **répulsive**
- Nécessaire pour expliquer diverses observations astrophysiques, notamment **l'accélération de l'expansion** de l'Univers
  - Dans le cadre du modèle standard «  $\Lambda$ CDM » (« lambda – Cold Dark Matter »)
  - Liée à la constante cosmologique de l'équation d'Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8 \pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$



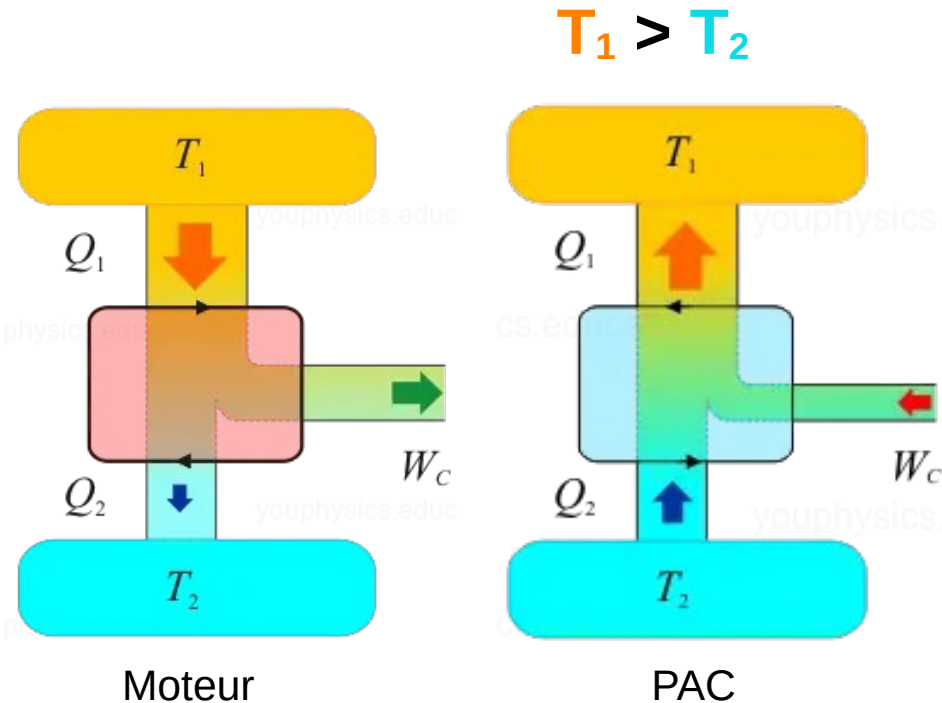
- Ne pas confondre avec la **matière noire**
  - Ne remplit pas uniformément l'Univers
  - Partie importante de la masse des galaxies
  - Interaction gravitationnelle normale ( $>0$ )
  - Peu d'interaction avec matière « ordinaire »

# Machines thermiques

Machines faisant subir à un fluide des **cycles de transformations** qui lui permettent d'**échanger du travail** ou de la **chaleur** avec l'extérieur

- **Réfrigérateurs et pompes à chaleur :**

- transfèrent de la chaleur entre 2 sources de chaleur grâce à du travail extérieur
- Coefficient de performance : énergie thermique transférée / énergie consommée
  - Exemple : COP = 3, la machine fournit 3 W de chaleur pour 1 W d'électricité consommé
  - 3 fois plus efficient qu'un chauffage électrique direct (conversion énergie électrique → énergie thermique)
- On ne peut pas refroidir une pièce en ouvrant la porte de son réfrigérateur...



# Rendement et efficacité

- **Rendement**

- Caractérise l'efficacité de la **conversion de l'énergie d'une forme à une autre**
  - Moteur (Puissance mécanique / Puissance thermique du carburant)
  - Cellule photovoltaïque (énergie électrique/énergie électromagnétique)
- $\leq 1$  : il y a toujours des pertes (2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique)
  - Sauf pour le chauffage (pertes  $\rightarrow$  chaleur)

- **Efficacité** (énergétique ou thermodynamique)

- **Rapport entre l'énergie déplacée par une machine et l'énergie utilisée pour la faire fonctionner**
- Exemple : machines thermiques
- **Peut être supérieure à 1**
  - Avec 1 J, on « déplace » plus de 1 J de chaleur
  - **coefficient de performance** (ou « COP ») d'une pompe à chaleur
- Notée  $\eta$



# Ascenseur ou escalier ?

- Une personne de 75 kg monte de 3 étages
  - différence d'altitude = 8 m = 2,66 m / étage = 16 marches (de 16,66 cm)

## • Escaliers :

- Énergie potentielle de pesanteur ( $E_{pp}$ ) :
  - énergie humaine :  $m \cdot g \cdot z = 75 \cdot 9,81 \cdot 8 = 6 \text{ kJ}$
- Minuterie : 3 ampoules de 50 W pendant 1 minute
  - Énergie électrique =  $3 \times 50 \times 60 = 9 \text{ kJ}$
- Total : 15 kJ
  - (mais coût de l'énergie humaine très élevé)

## • Ascenseur :

- Charge (8 personnes) : 600 kg
  - Contrepoids de  $M_{\text{cabine}} + 300 \text{ kg}$
  - Rendement des moteurs :  $r=0,6$
  - Énergie électrique =  $E_{pp} / r$
  - $(300-75) \cdot 9,81 \cdot 8 / 0,6 = 30 \text{ kJ}$
- ## • Pour 2 personnes :
- L'ascenseur consomme moins !
    - $(300-150) \cdot 9,81 \cdot 8 / 0,6 = 20 \text{ kJ}$
  - Escaliers :  $9 + 2 \cdot 6 = 21 \text{ kJ}$

