



Université Internationale
de Casablanca

LAUREATE INTERNATIONAL UNIVERSITIES

Nous innovons pour votre réussite !

COURS

TRANSFERTS THERMIQUES

FILIÈRE CYCLE ING TRONC COMMUN

SESSION S5

Objectifs

Vous pourrez:

- Calculer le bilan thermique d'un bâtiment, déterminer ses faiblesses
- Assurer le **confort**, la qualité de l'environnement intérieur
- Prédire les **puissances** nécessaires, **dimensionner** les installations
- Proposer des améliorations énergétiques
- Prédire les **consommations**

Pour garantir le confort et le bien être des occupants, tout en assurant une consommation énergétique la plus faible possible

Objectifs

Energie dans le bâtiment

- ❖ Chauffage
- ❖ Refroidissement
- ❖ Aération, ventilation
- ❖ Eau chaude (et froide)
- ❖ Autres....

Plan du cours

Séance	Contenu
1,2	1. Introduction et généralités 2. Grandeurs thermiques. Calcul d'incertitudes
3,4,5,6	Conduction thermique: conductivité thermique, loi de Fourier, équation de la chaleur dans un solide immobile et isotrope.
7	Contrôle N1
8,9	Rayonnement thermique. Loi de Stefan-Boltzman. Théorie du corps noir. Rayonnement des corps réels. Loi de Kirchhoff
10,11	La convection thermique. Convection naturelle. Convection forcée. Loi de Newton
12	Contrôle N2

STRATÉGIES PÉDAGOGIQUES

- ❖ Deux heures de cours magistral par semaine.
- ❖ De nombreux exemples seront faits en classe pour permettre aux étudiants de bien assimiler la théorie et les techniques présentées au cours.
- ❖ Deux heures seront consacrées à l'analyse de problèmes et d'applications pertinentes. L'étudiant est alors en mesure d'évaluer objectivement son degré d'acquisition des connaissances et d'y apporter les correctifs appropriés.

évaluations

- ❖ Examens partiaux: 20%
- ❖ Devoirs et TP: 20% (en groupe)
- ❖ Participations: 5%
- ❖ Examen final: 55%

- James R. Welty, Charles E. Wicks, Robert E. Wilson Gregory L. Rorrer
« *Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer* », 5th Edition,
John Wiley & Son
- Frank P. Incropera, David P. DeWitt, « *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* », 5th Edition, John Wiley & Son
- R. Byron Bird, Warren E. Stewart, Edwin N. Lightfoot, « *Transport Phenomena* » ,third edition, John Wiley & Son

Pour un bon déroulement....

Je m'engage à:

- Répondre à toutes vos questions: toutes vos questions sont les bienvenues.
- Disponibilité en dehors des séances des cours.
- Vous accordez 5 minutes de pause à la fin de la première heure à condition que vous restiez dans la classe

Vous vous engagez:

- **D'être à l'heure:** au delà de 10 minutes, un retard est considéré comme une absence
- **D'avoir l'esprit de groupe:** Si vous avez des questions, éviter les discussions bilatérales. Toute question devra être posée au professeur pour que tout le monde puissent en bénéficier



**INTERDICTION
DE BOIRE OU
DE MANGER**



**TELEPHONE PORTABLE
INTERDIT**

GRANDEURS PHYSIQUES FONDAMENTALES EN THERMIQUE

LA THERMIQUE

La thermodynamique permet de prévoir la quantité totale d'énergie qu'un système doit échanger avec l'extérieur pour passer d'un état d'équilibre à un autre.

La thermique (ou thermocinétique) se propose de décrire quantitativement (dans l'espace et dans le temps) l'évolution des grandeurs caractéristiques d'un système, en particulier la température, entre l'état d'équilibre initial et l'état d'équilibre final.

DOMAINES DE LA THERMIQUE

- ⌚ l'énergie (machines à vapeur, turbines à gaz et à vapeur, réacteurs nucléaires)
- ⌚ le chauffage, le séchage, la cuisson (fours électriques, à gaz, micro-ondes)
- ⌚ l'industrie du froid
- ⌚ la construction (chauffage, climatisation)

Introduction

DATE	INVENTION	INVENTEUR	NATIONALITÉ
1629	turbine à vapeur	Giovanni Branca	italien
1687	principe d'une machine à vapeur à piston	Denis Papin	français
1712	machine à vapeur	Thomas Newcomen	britannique
1714	thermomètre à mercure	Daniel Gabriel Fahrenheit	allemand
1791	turbine à gaz	John Barber	britannique
1814	locomotive	George Stephenson	britannique
1855	brûleur à gaz	Robert Wilhelm Bunsen	allemand
1860	moteur à gaz	Étienne Lenoir	français
1861	four électrique	Wilhelm Siemens	britannique
1877	moteur à combustion interne (quatre-temps)	Nikolaus August Otto	allemand
1877	camion frigorifique	G.F. Swift	américain
1884	turbine à vapeur	Charles Algernon Parsons	britannique
1892	bouteille Thermos (vase Dewar)	James Dewar	britannique
1911	air conditionné	W.H. Carrier	américain
1925	congélation des aliments	Clarence Birdseye	américain
1942	réacteur nucléaire	Enrico Fermi	américain
1947	four à micro-ondes	Percy L. Spencer	américain

Qu'est-ce que l'énergie ?

L'énergie est une *quantité physique* que l'on retrouve dans les lois fondamentales de la physique.

L'énergie totale d'un système *isolé* se conserve (première loi de la thermodynamique).

L'énergie prend différentes formes, et peut être transférée d'un système à un autre grâce aux forces d'interaction entre les systèmes.

L'unité SI de l'énergie est le Joule (J).

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$$

(énergie fournie par un objet
de 100g qui tombe de 1m)

= 1 W.s = 1 / 3 600 000 kW.h (kilowatt.heure)
(énergie électrique fournie
avec une puissance de 1W pendant 1s)

Les différentes formes d'énergie: Des exemples.

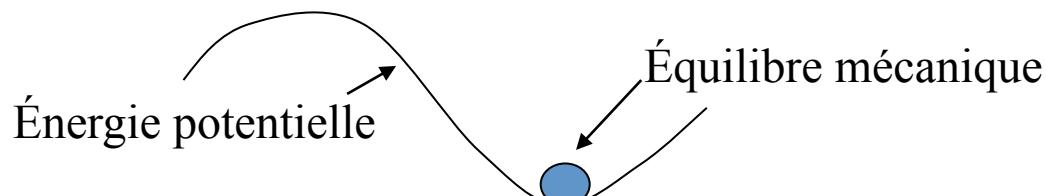
Quelques exemples:

- Énergie thermique $E \sim k_B \cdot T$
- Énergie cinétique $E \sim \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$
- Énergie potentielle de pesanteur $E \sim m \cdot g \cdot z$

...

Energie d'origine mécanique (mouvement):

Energie cinétique E_c , énergie potentielle E_p ,
énergie mécanique = $E_c + E_p$



Travail des forces $dW = - DE_p = F \cdot dr = \text{Force} \times \text{Distance}$ l'énergie dépend de la distance parcourue !

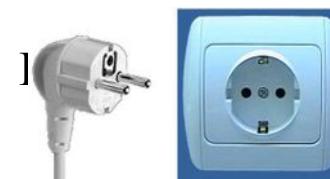
Energie d'origine thermique (chaleur):

- Transfert de quantité de chaleur $dQ \sim m \cdot C_v \cdot DT$ $1 \text{ cal} = 4,18 \text{ J}$
(quantité de chaleur à fournir pour éléver d' 1°C , 1g d'eau liquide).
- Chaleur latente de changement de phase $dQ \sim L \sim l \cdot n$

Introduction & généralités

Énergie d' origine électrique:

$E \sim P_e \cdot Dt \sim DV_e \cdot I \cdot Dt \sim q \cdot DV_e$ (travail des forces électriques).



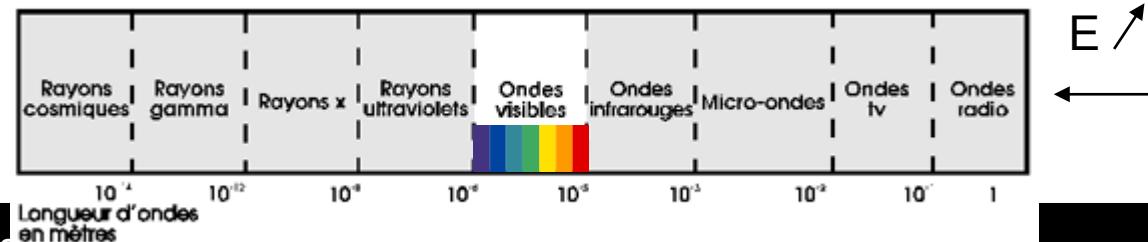
$1 \text{ J} = 1 \text{ W.s} = 1 / 3\,600\,000 \text{ kW.h}$ (kilowatt.heure)

(énergie électrique fournie avec une puissance de 1W pendant 1s)

Energie de rayonnement (lumière):

$E \sim h \cdot v \sim h \cdot c / \lambda$ lumière, énergie d' excitation.

(cf. définition actuelle de la seconde - ondes électromagnétiques)



Introduction & généralités

Energie d' origine nucléaire:

Énergie de masse $E \sim m.c^2$, énergie nucléaire.

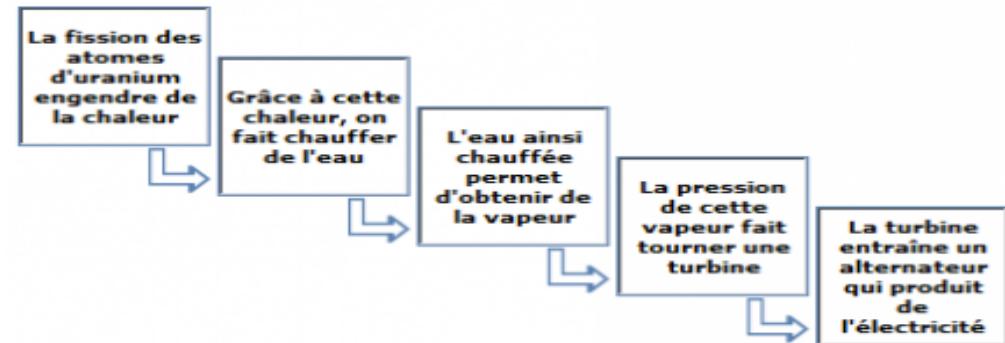
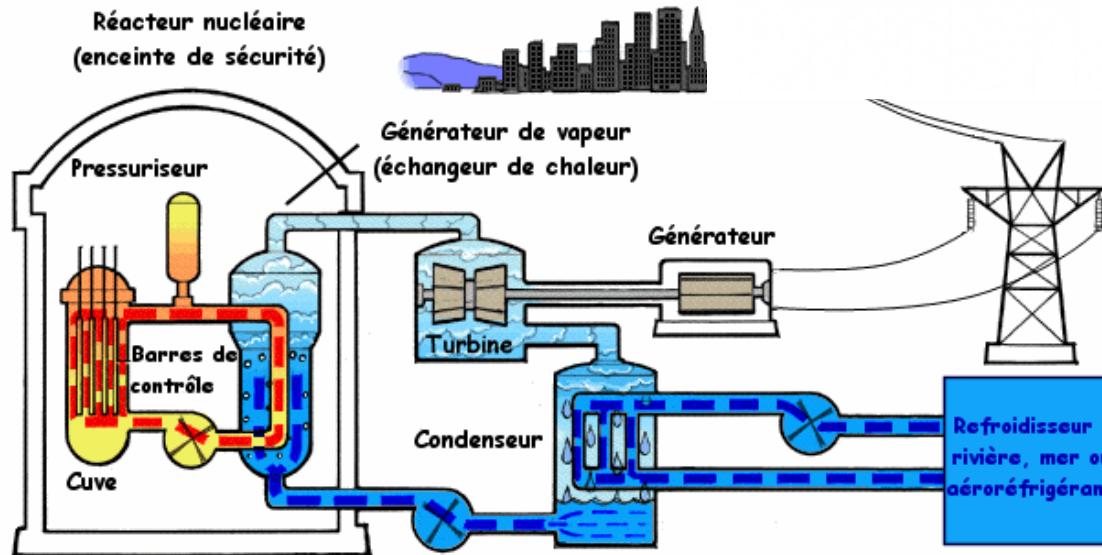


Energie d' origine chimique:

réactions chimiques

(ouverture/fermeture de liaisons interatomiques fournit de l'énergie)

Ex. combustibles, pile électrique...



Principe de fonctionnement d'une centrale nucléaire:

Sources d' énergie naturelles (ou *primaires*):
pouvant être captées simplement dans la nature.

- Le rayonnement du **soleil**, reçu par la terre (*énergie solaire*).
- La pression du **vent** (*énergie éolienne*)
- Le mouvement de l' **eau** (rivières, marées, barrages hydrauliques:
énergie hydraulique)
- La contraction des **muscles** (*énergie musculaire*)
- La combustion du **charbon**, du **pétrole**, du **gaz naturel**
(*énergies fossiles*)
- La combustion de la **biomasse** (*énergie verte*, obtenue par
combustion de végétaux et d' animaux combustibles)
- La chaleur transportée par l' **eau chaude souterraine**
(*énergie géothermique*).
- La fission de l' **uranium** (*énergie nucléaire*)



Sources d'énergie secondaires:

doivent être produites avant de pouvoir être utilisées.

ex: Le courant électrique, produit par les centrales nucléaires, les éoliennes,...

On ne sait pas utiliser le courant électrique produit dans les éclairs.



Les transferts d'énergie.

Un même effet peut être produit par des sources différentes (ex. génération de courant électrique), et une même source peut conduire à différents effets (mouvement, chaleur, lumière...), grâce à des convertisseurs d'énergie.

Grâce aux **convertisseurs** d'énergie, l'énergie fournie par une

source peut être transformée en énergie d'une autre forme, et transférée à d'autres systèmes..

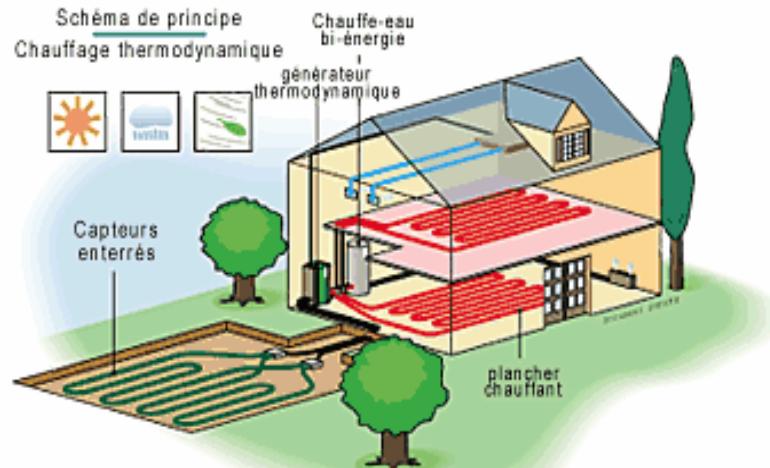
Ex:

cellules photo-électriques: rayonnement / électricité

moteurs: chimique / mécanique

...

L'énergie est ensuite **transférée** à d'autres systèmes, en *interaction* avec la source.



Introduction & généralités

La maîtrise de l' énergie:

Le choix des sources d' énergie répond à des considérations techniques et économiques, mais aussi à des choix politiques.

Exemple1: la production d' électricité.

Avantages et inconvénients de différentes sources d' énergie:



Centrale thermique classique: à partir de la combustion de réserves fossiles (charbon, gaz, fioul).

Épuisement des réserves.

Production de gaz à effet de serre.



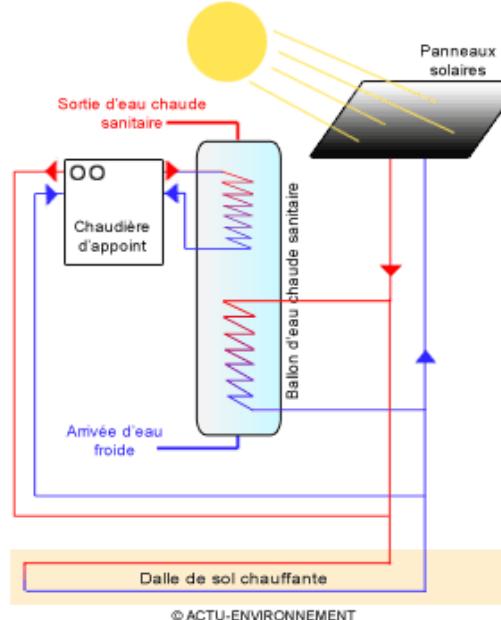
Energie renouvelable: gratuite et peu polluante. Peu concentrée. Vastes installations. « offshore ».



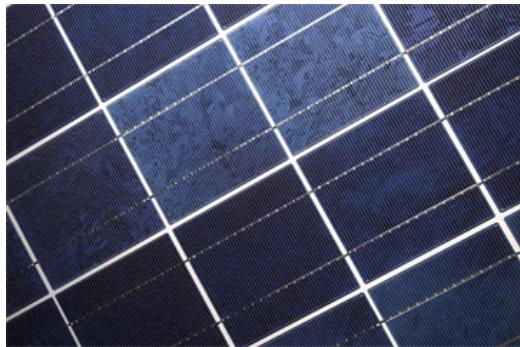
Biomasse:

Faible rendement (3% énergie solaire fournie). Nécessite une agriculture intensive.

Exemple2: le chauffage solaire.



1) L' énergie solaire photovoltaïque:



Capteurs photoélectriques à base de silicium. Conversion énergie lumineuse / énergie électrique.

Rendements moyens (16 % max.) Fragilité des photopiles.
Haut coût de fabrication.

GRANDEURS PHYSIQUES FONDAMENTALES EN THERMIQUE

- Quantité de chaleur
- Température
- Capacité thermique massique
- Chaleur latente de fusion
- Flux de chaleur
- Densité de flux de chaleur
- Champ de température
- Gradient de température

Quantité de Chaleur

Le travail mécanique W est une grandeur scalaire exprimée en Joules:

$$W = \int_a^b \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s}$$

(produit scalaire du vecteur FORCE \mathbf{F} par le vecteur DEPLACEMENT $d\mathbf{s}$)

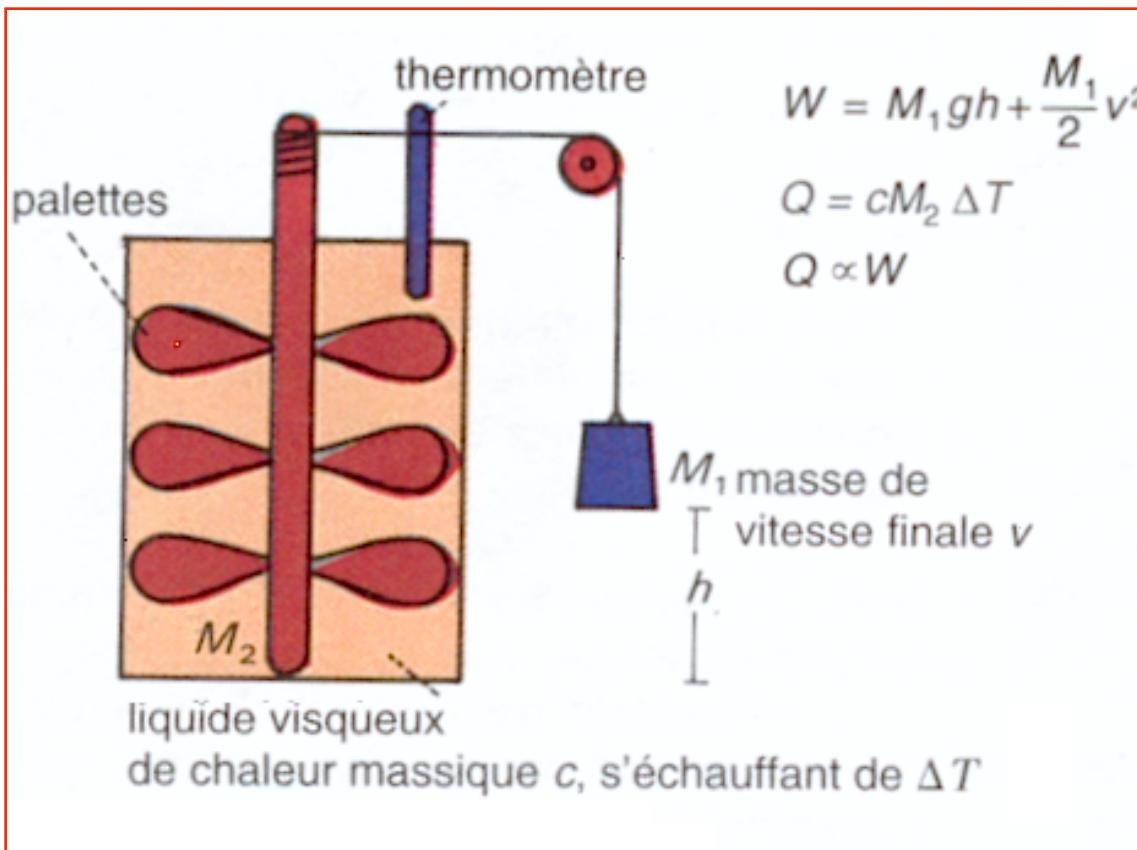
La chaleur est une forme particulière de travail, qui correspond au déplacement des particules élémentaires constituant la matière .

Le premier Principe de la Thermodynamique exprime l'équivalence de la chaleur et du travail, qui sont deux formes différentes d'un même concept:

L'énergie, qui doit se concevoir comme du travail ou de la chaleur emmagasiné.

Travail, Chaleur et Energie sont 3 grandeurs équivalentes s'exprimant en Joules.

Expérience de James Joule (1843)



Température

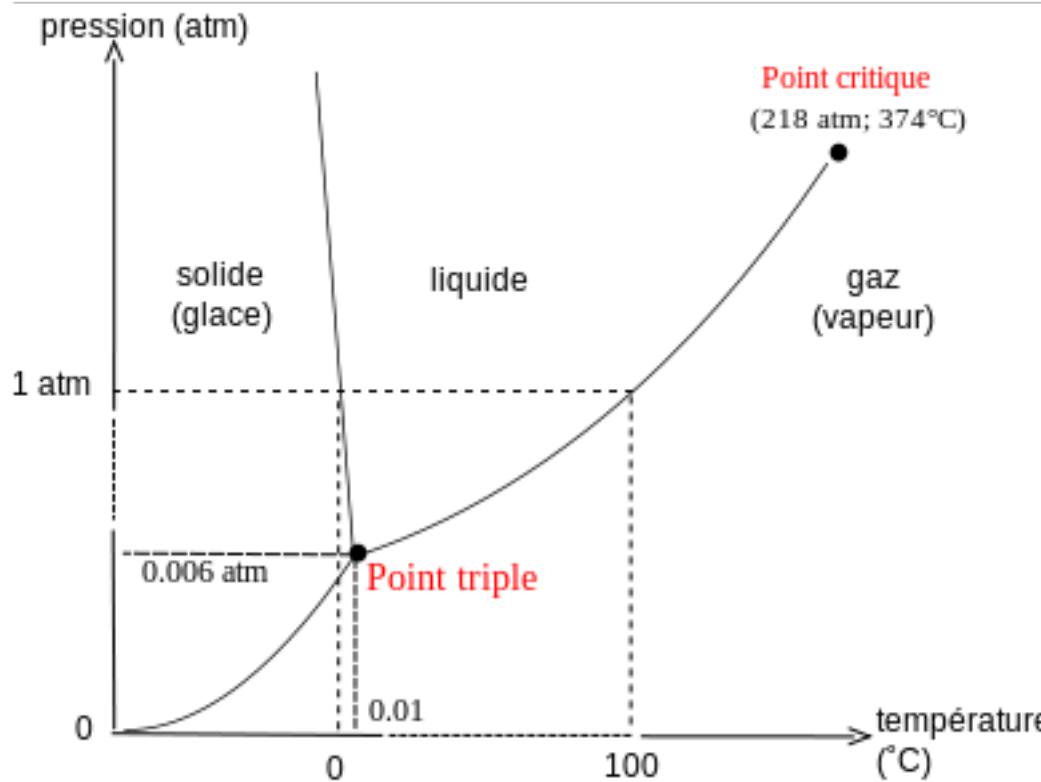
Grandeur physique qui décrit l'état thermique d'un corps.

C'est une mesure de l'énergie cinétique moyenne des constituants élémentaires du corps.

L'unité légale (S.I) de température est le **KELVIN** (symbole: K)

Température Point Triple de l'eau

$$1 \text{ Kelvin} = \frac{\text{Point triple}}{273,16}$$



Point triple

Le **point triple** est, en *thermodynamique*, un point du diagramme de phase qui correspond à la coexistence de trois états (liquide, solide et gazeux) d'un corps pur. Il est unique et s'observe seulement à une température et une pression données.

Le point triple de l'eau est à : $T = 273,16 \text{ K}$ (soit $0,01^\circ\text{C}$) et $P = 611 \text{ Pa}$ (soit $0,006 \text{ atm}$).

Autres exemples de point triple

Point triple du

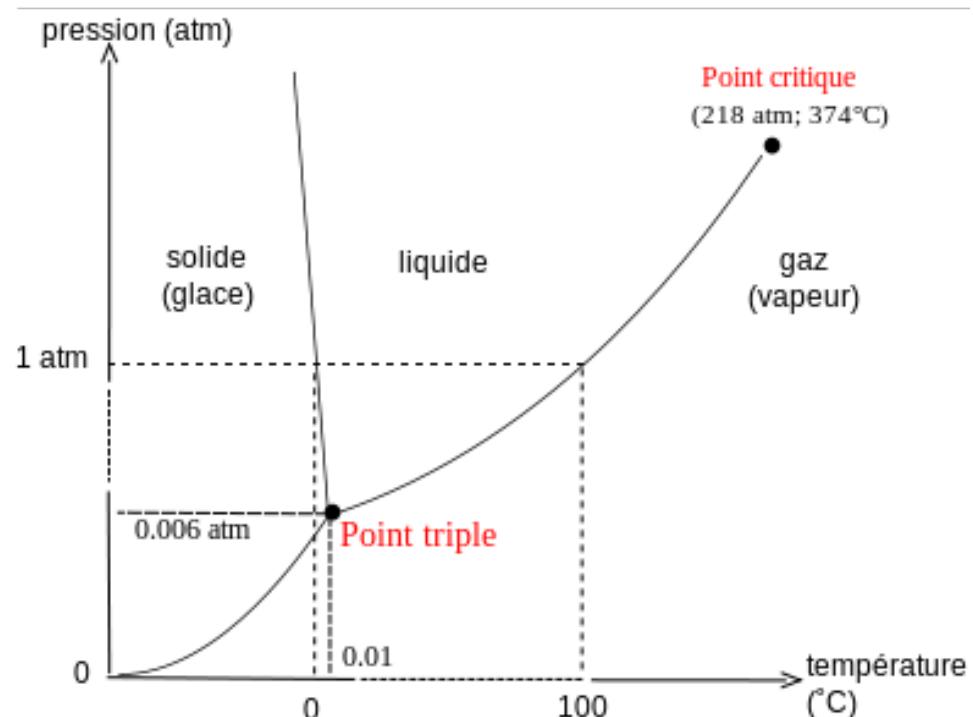
diazote : $T = 63,16 \text{ K}$ et $P = 0,126 \text{ bar} = 12,6 \text{ kPa}$

Point triple du

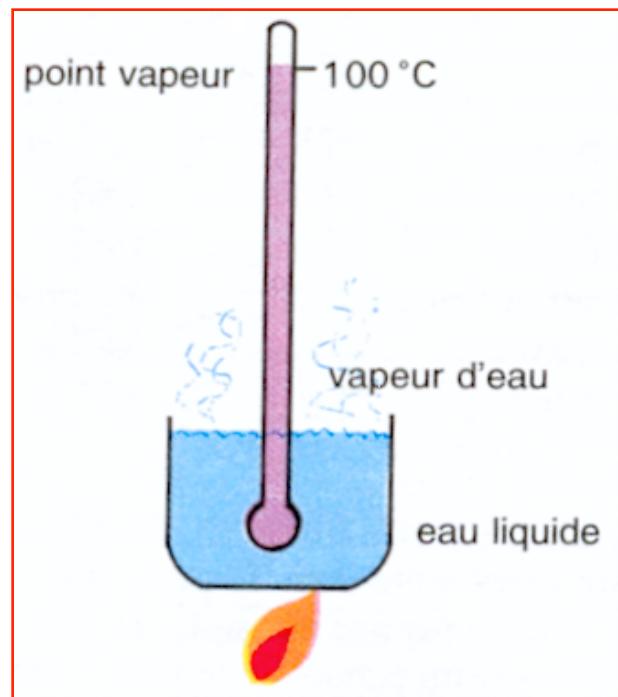
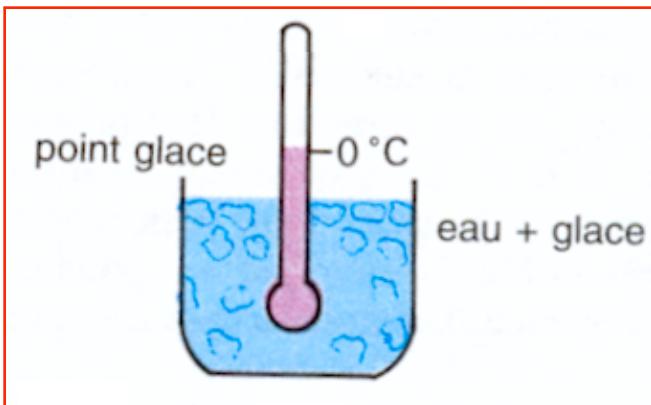
dioxyde de carbone : $T = 216,55 \text{ K}$ et $P = 519 \text{ kPa}$
(soit $5,12 \text{ atm}$)

Point triple du

néon : $T = 24,5561 \text{ K}$ et $P = 4,34 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$



Echelle Celcius



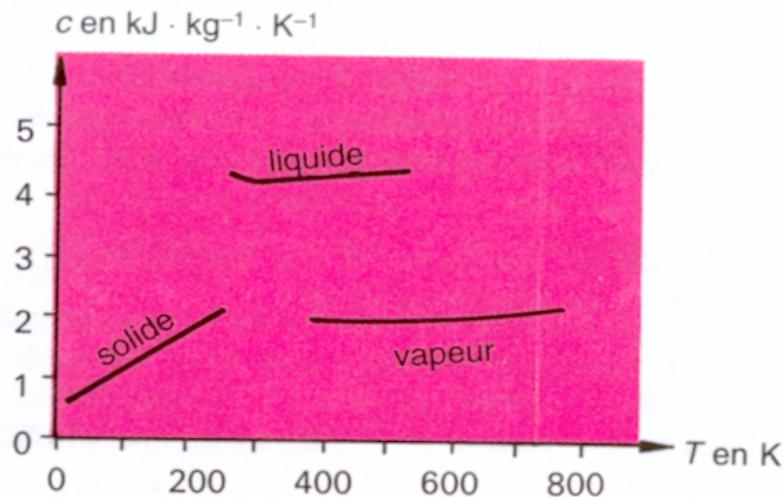
$$T \text{ (en } ^\circ\text{C)} = T \text{ (en K)} - 273,15 \text{ K}$$

$$T_{\text{Point triple de l'eau}} = 273,16 \text{ K} - 273,15 \text{ K} = 0,01 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Capacité Thermique Massique Chaleur Massique

La capacité thermique massique d'une substance est la quantité de chaleur nécessaire pour éléver de 1K la température d'une masse de 1 kg de cette substance. Elle est appelée encore chaleur massique.

Elle s'exprime en $\text{J. kg}^{-1}. \text{K}^{-1}$



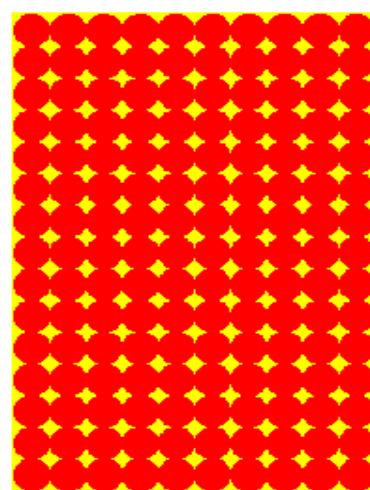
Pour l'eau liquide (ci-contre):

$$c = 4187 \text{ J / (kg. K)}$$

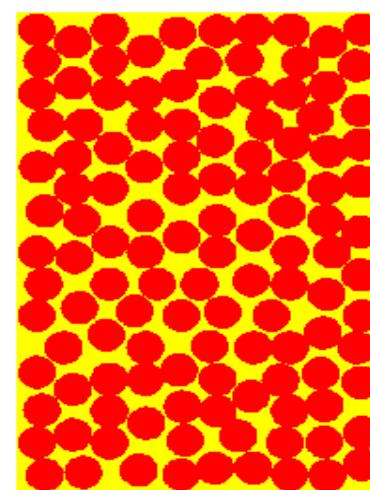
COMPOSÉ	Cal/(g. °C)	kJ/(kg.K)
Air	0,24	1,01
Aluminium	0,22	0,90
Argent	0,06	0,24
Acier inoxydable	0,12	0,51
Eau (liquide)	1,00	4,18
Bois	0,42	1,76

États de la matière

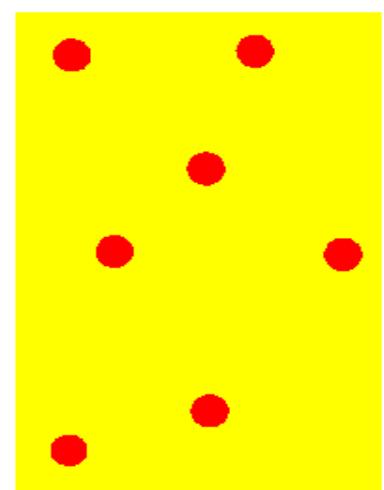
En physique, un état de la matière correspond à un certain degré de cohérence de la matière(densité, structure cristalline, indice de réfraction,...) qui se traduit par des comportements définis par les lois de la physique(viscosité, conductivité, loi des gaz parfaits, etc..)



SOLIDE



LIQUIDE



GAZ

États de la matière

Les trois états les plus classiques de la matière sont :

l'état gazeux ;

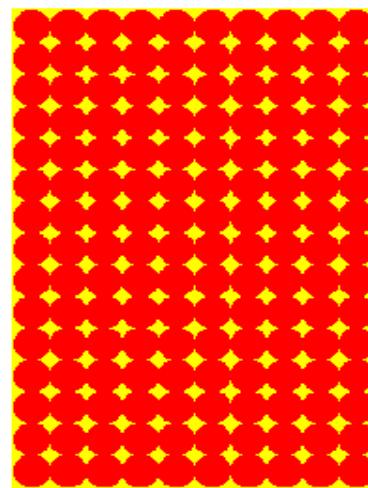
l'état liquide ;

l'état solide ;

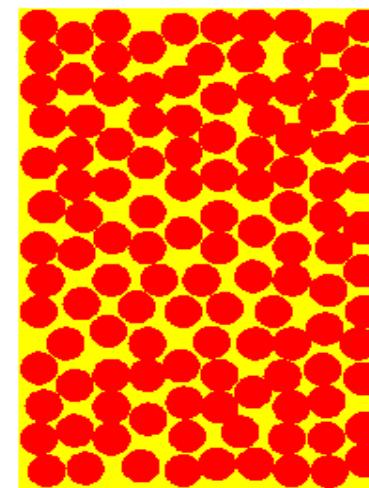
Cette classification est cependant incomplète. On peut y ajouter différents états plus exotiques :

l'état plasma (gaz ionisé) ;

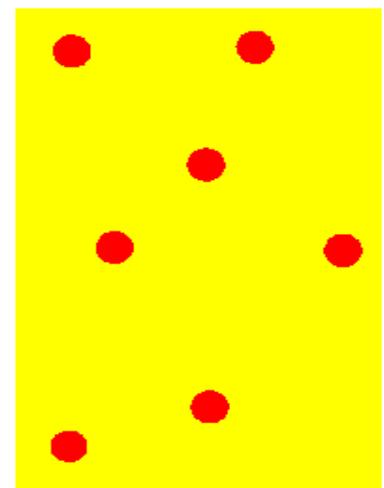
l'état supercritique (indistinction liquide-gaz obtenu par augmentation de la pression) ;



SOLIDE



LIQUIDE

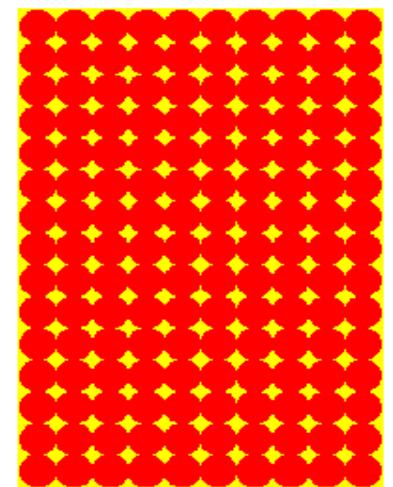


GAZ

État solide

À l'échelle macroscopique, un solide : possède un volume propre (il est très difficilement compressible ; son volume ne dépend quasiment que de la température par effet de dilatation thermique, généralement faible) ; possède une forme propre (mais il peut se déformer sous l'effet de contraintes, en fonction de son élasticité).

À l'état solide, les particules (atomes, molécules ou ions) sont liées les unes aux autres par des liaisons chimiques qui fixent leurs positions relatives.



SOLIDE

État liquide

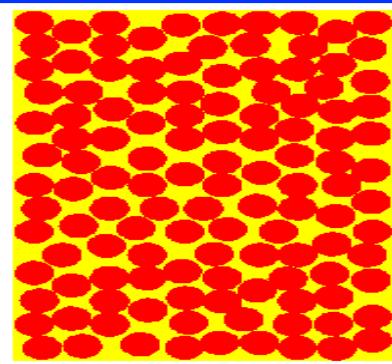
À l'échelle macroscopique, :

un liquide possède un volume propre ;

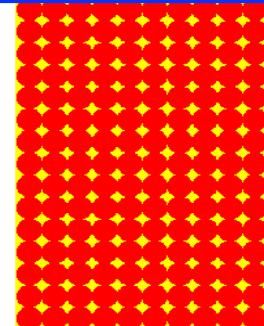
il ne possède pas de forme propre : il prend la forme du récipient qui le contient ;
la surface libre d'un liquide au repos est plane et horizontale (dans un champ de pesanteur uniforme)

À l'état liquide, les particules sont faiblement liées : contrairement à l'état solide, elles peuvent se déplacer spontanément les unes par rapport aux autres (déformabilité) mais, contrairement à l'état gazeux, elles ne sont pas indépendantes (incompressibilité). On peut également dire que leur énergie thermique est suffisante pour leur permettre de se déplacer mais pas de s'échapper...

L'état liquide est un état fluide, c'est-à-dire parfaitement déformable.



LIQUIDE



SOLIDE

État gazeux

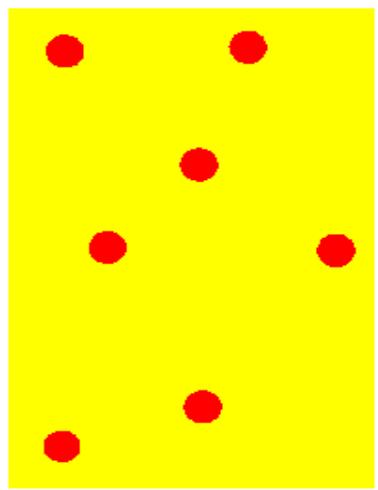
À l'échelle macroscopique :

un gaz ne possède ni forme propre, ni volume propre ;
il tend à occuper tout le volume disponible.

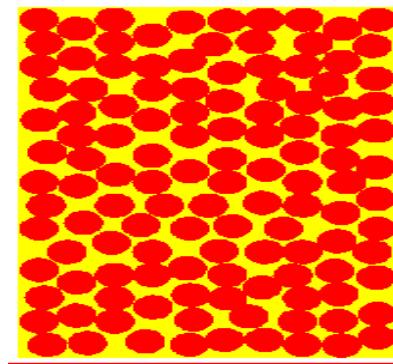
À l'état gazeux, les particules sont très faiblement liées, quasiment indépendantes (on les considère indépendantes dans le modèle des gaz parfaits, qui décrit bien le comportement des gaz basse pression).

Comme l'état liquide, l'état gazeux est un état fluide.

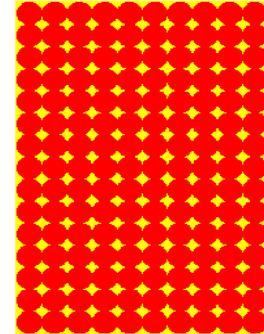
Un corps à l'état gazeux n'est constitué que d'atomes et de molécules. Un gaz ionisé est appelé plasma.



GAZ



LIQUIDE

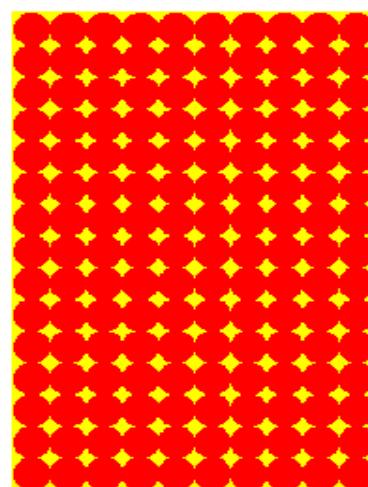


SOLIDÉ

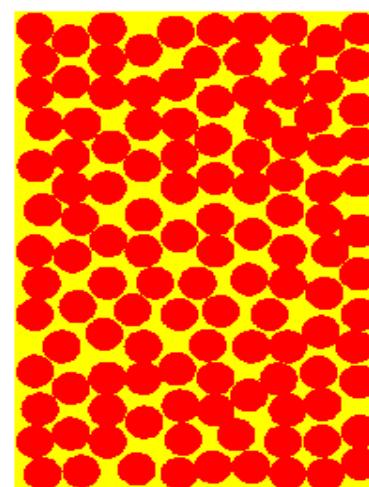
Chauffage d'un Solide ou d' un Liquide

Si on considère un corps solide ou un fluide de masse **m** (kg) et de capacité thermique massique **c** J/(kg.K) , et si on lui apporte une quantité de chaleur **Q**, l' accroissement de la chaleur contenue par le corps ou le fluide est responsable d' une élévation de température **ΔT**, donnée par la relation :

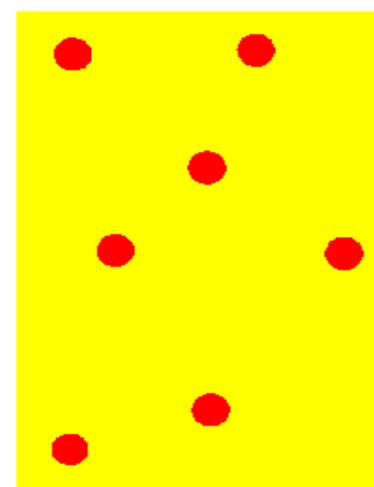
$$Q = m \ c \ \Delta T$$



SOLIDE

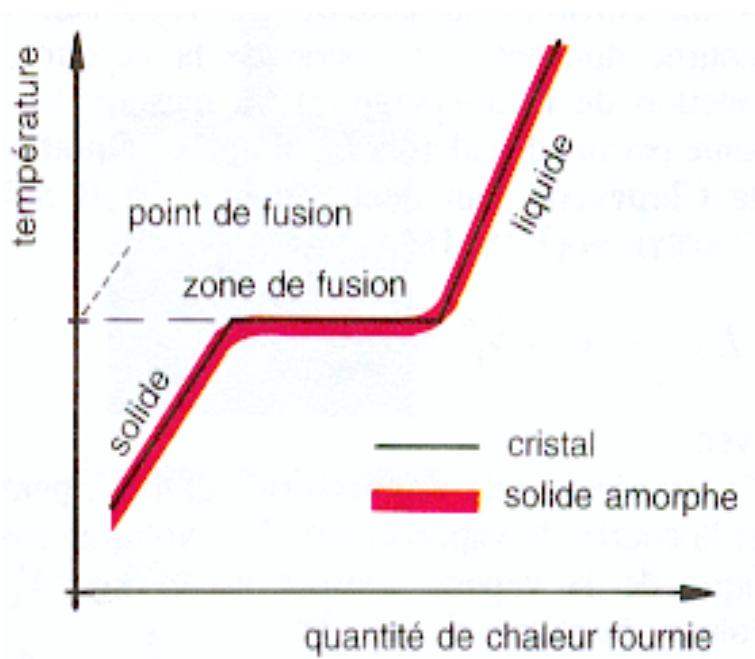


LIQUIDE



GAZ

Chaleur Latente de Changement d'état



Variation de la température en fonction de la quantité de chaleur fournie à un corps solide

Pendant le changement d'état, la température ne varie plus.

Mais on doit continuer à fournir de la chaleur.

Chaque kg de matière solide requiert pour opérer sa fusion la fourniture d'une quantité d'énergie L

L , en Joules/kg, est la chaleur latente de fusion

Flux de Chaleur

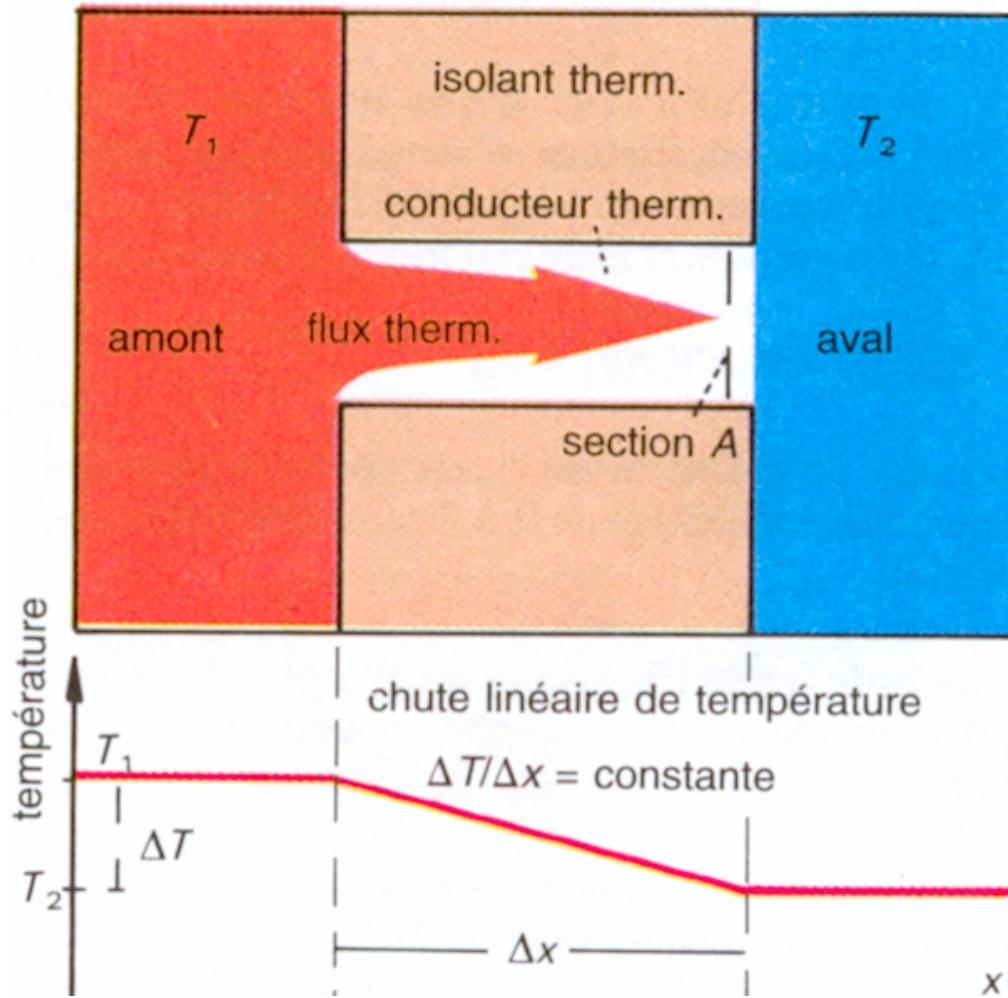
Quantité de chaleur transférée par unité de temps

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Un flux de chaleur est une puissance.

Il s'exprime Watt (W)

Flux de Chaleur



Noter l'analogie avec la mécanique des fluides:

Un débit fluide est un flux de matière (des m³) par seconde.

Pour obtenir un débit d'un fluide, il faut une force motrice:

Elle s'obtient par une différence de pression.

Différences de pression et différence de températures sont équivalentes:

Ce sont des différences de potentiel moteur.

Densité de Flux de Chaleur

La quantité de chaleur transmise par unité de temps et par unité d'aire de la surface isotherme est appelée densité de flux de chaleur

$$\varphi = \frac{\Phi}{S}$$

φ s'exprime **W/m².**

Champ de Température

Les transferts de chaleur sont déterminés à partir de l'évolution dans l'espace et dans le temps de la température $T = f(x, y, z, t)$. **La valeur instantanée de la température en tout point de l'espace est un scalaire appelé champ de température.** Nous distinguerons deux cas :

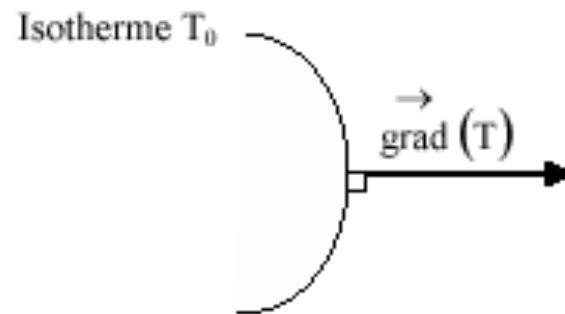
- Champ de température indépendant du temps : le régime est dit **permanent ou stationnaire,**
- Evolution du champ de température avec le temps : le régime est dit **variable ou instationnaire.**

Gradient de Température

Si l'on réunit tous les points de l'espace qui ont la même température, on obtient une surface dite surface **isotherme**.

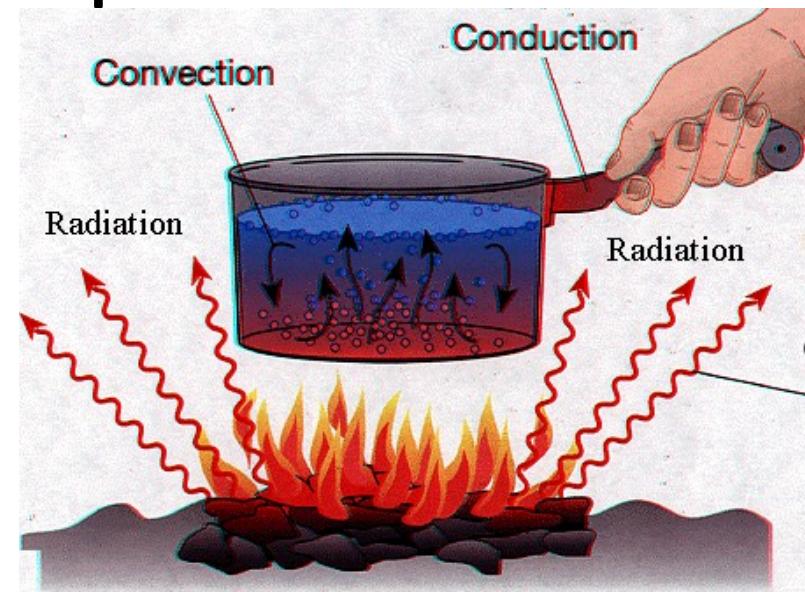
La variation de température par unité de longueur est maximale le long de la normale à la surface isotherme. Cette variation est caractérisée par le gradient de température :

$$\vec{\text{grad}} T = \vec{n} \frac{\partial T}{\partial n}$$



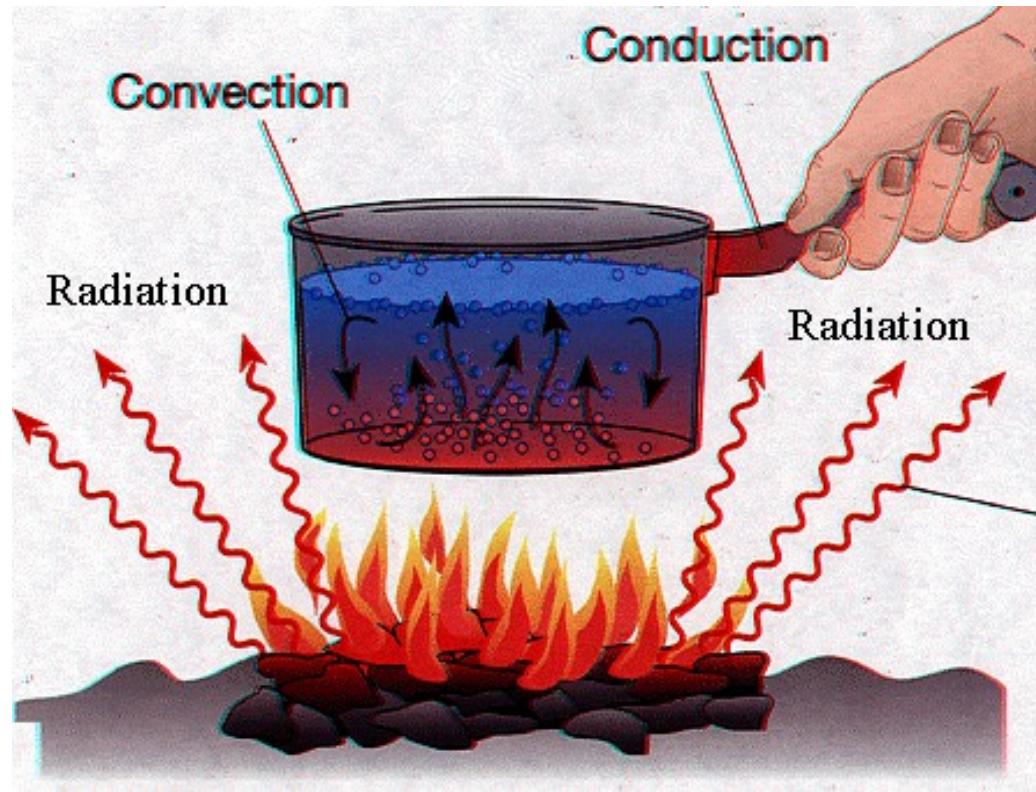
Les 3 Modes de Transfert de Chaleur

- Conduction thermique
- Convection de chaleur
- Rayonnement thermique



Les transferts de chaleur peuvent être provoqués par:

- Différence de température
- Chaleur migre vers les zones plus froides



CONDUCTION

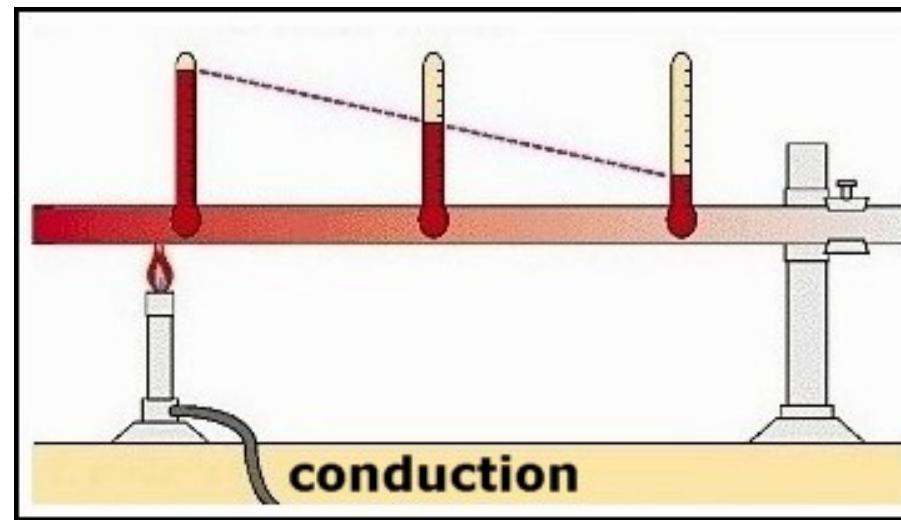
Conduction:

La chaleur peut être conduite au travers:

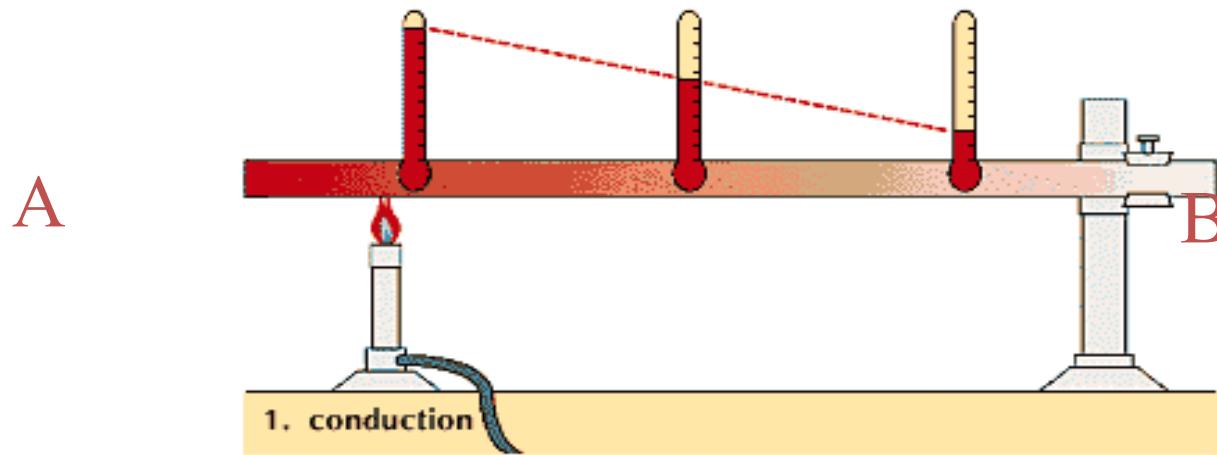
Solides, liquides, gaz

Comment?

Transfert de l'énergie de mouvement entre les molécules



Conduction Thermique



Dans cette barre métallique chauffée en son extrémité A, on observe un gradient longitudinal de température $T(x)$: $T(A) > T(B)$

En 1822, le mathématicien français **Joseph Fourier** donna une définition mathématique précise de la conduction.

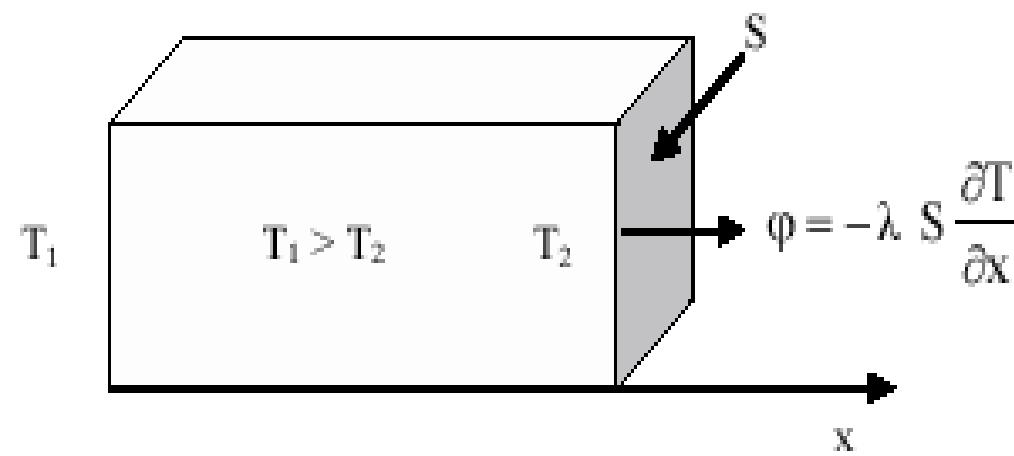
D'après la loi de Fourier, la vitesse à laquelle la chaleur est conduite dans un corps par unité de section est proportionnelle à l'opposé du gradient de la température du corps. Le facteur de proportionnalité est la conductivité thermique du matériau.

Loi de Fourier

La théorie de la conduction repose sur l' hypothèse de Fourier : la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température.

Cette hypothèse s' écrit sous la forme vectorielle :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \vec{grad} T$$

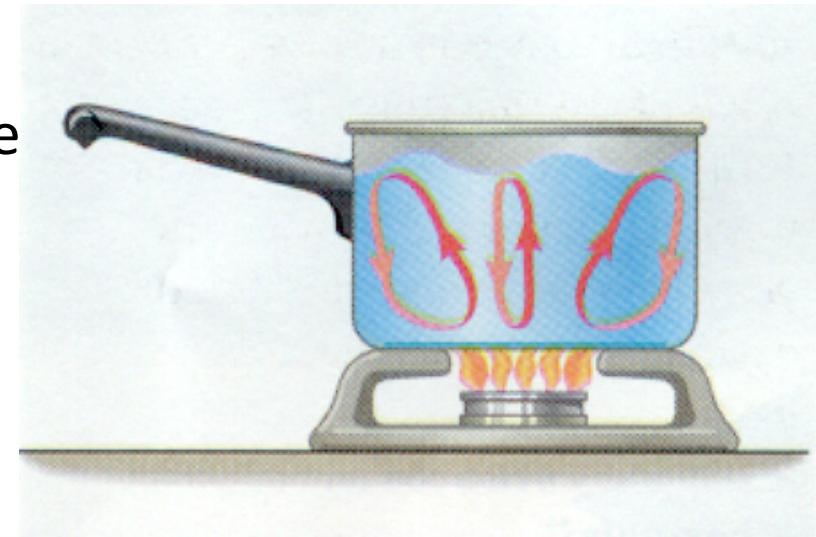


Conductivités de Certains Matériaux

Matériaux	λ ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)	Matériaux	λ ($\text{W m}^{-1} \text{°C}^{-1}$)
Argent	419	Plâtre	0,48
Cuivre	386	Amiante	0,16
Aluminium	204	Coton	0,059
Acier doux	45	Liège	0,044-0,049
Acier inox	14,9	Laine de roche	0,038-0,041
Glace	1,88	Laine de verre	0,035-0,051
Béton	1,4	Polystyrène expansé	0,036-0,047
Bois (feuillu-résineux)	0,12-0,23	Polyuréthane (mousse)	0,030-0,045
Brique terre cuite	1,1	Polystyrène extrudé	0,027
Verre	0,78	Air	0,026

CONVECTION

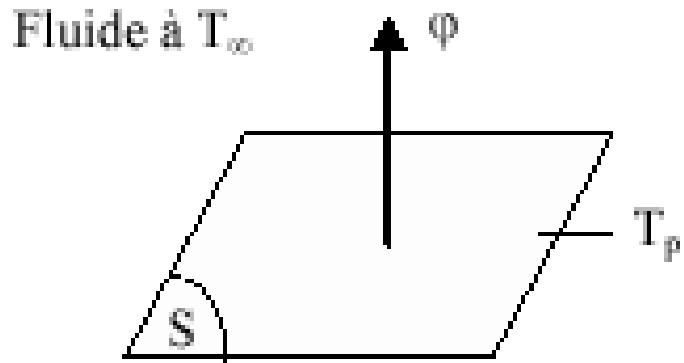
- **Transfert de chaleur:**
 - En grande quantité
 - En mélangeant des éléments plus chaud
 - Avec des portions + froides d'un gaz ou liquide
- **Souvent relaté à:**
 - L'échange de chaleur entre une solide et un fluide



Loi de Newton

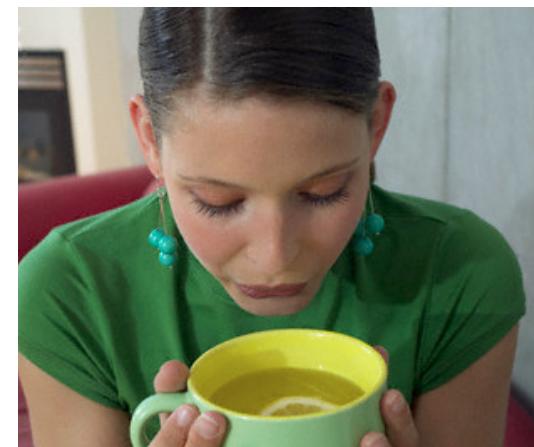
Le mécanisme de transfert par convection est régi par la loi de Newton

$$\varphi = h (T_p - T_\infty)$$



Deux types de convection

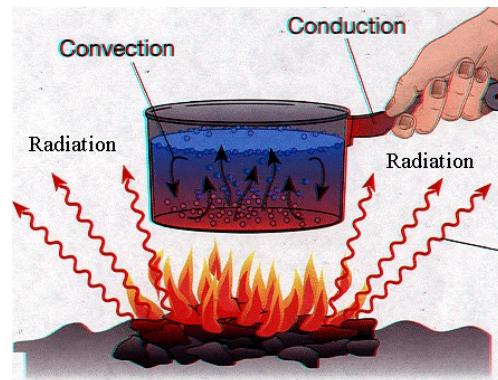
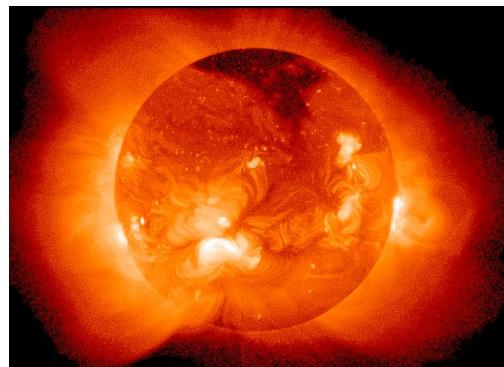
- **Convection forcée:**
 - Lorsqu'un fluide est forcé à passer par l'effet d'une pompe ou un ventilateur
- **Convection naturelle:**
 - Où un fluide plus chaud ou plus froid adjacent à une surface solide cause une circulation en raison de la différence de densité résultant de la différence de température dans le fluide.
- **Exemple:**
 - Souffler sur une tasse de café pour la refroidir

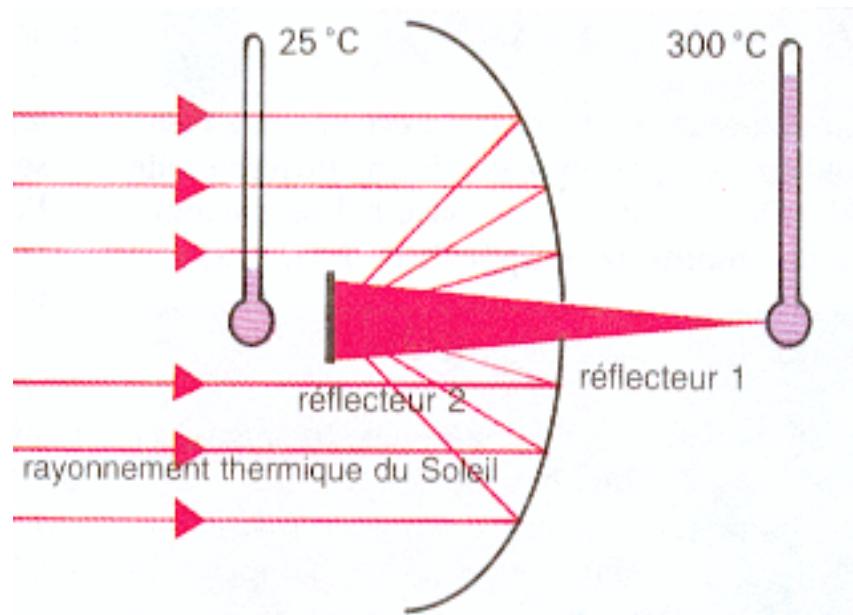


RADIATION

- **Diffère des deux précédentes:**
 - Aucun médium physique n'est nécessaire pour sa propagation
- **Transfert d'énergie dans l'espace:**
 - Sous l'effet de radiations électromagnétiques
- **Ressemble beaucoup:**
 - Les longueurs d'ondes électromagnétiques de la lumière
 - Les solides et liquides absorberont cette radiation

- **Les phénomènes de radiation:**
 - Principalement important pour le transfert au travers de l'espace et des gaz
- **Exemple important:**
 - Transfert d'énergie du soleil vers la terre
- **Aussi:**
 - Cuisson des aliments sous un système de chauffage électrique (comme un four)





Principe d'un four solaire:

Le rayonnement solaire concentré par le miroir parabolique élève la température du récepteur jusqu'à 300 °C

Cette forme de transfert d'énergie n'a besoin d'aucun véhicule de transport.

Ce transfert a également lieu dans le vide.

La différence de potentiel motrice est la différence entre les puissances quatrièmes des températures de la source et du récepteur.

Loi de Stefan

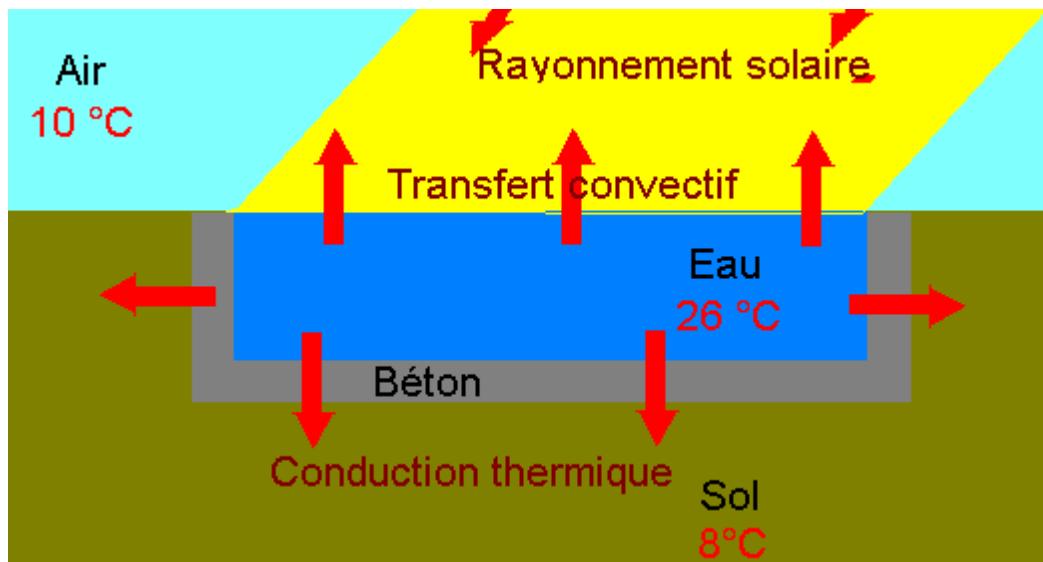
La densité de flux de chaleur émise par rayonnement est régie par la loi de Stéfan

$$\varphi = \varepsilon \sigma T^4$$

ε est l' émissivité globale de la surface émettrice et σ est la constante de Stéfan = $5,67 \cdot 10^{-8}$ (W/m².K⁴).

Exemple :

Apports Thermiques et Déperditions d'une Piscine



Grandeur	Symbol	Unité	Symbol	Appareil de mesure
Tension	U	Volt	V	Voltmètre
Intensité	I	Ampère	A	Ampèrmètre
Puissance	P	Watt	W	Wattmètre
Résistance	R	Ohm	Ω	Ohmètre
Capacité	C	Farad	F	Capacimètre
Inductance	L	Henry	H	Henrymètre
Période	T	Seconde	S	Périodemètre
Fréquence	F	Hertz	Hz	Fréquencemètre
Température	T	Degré celsius	°C	Thermomètre
Pression	P	Pascal	Pa(ou bar)	Baromètre
Chaleur	Q	Calorie	Cal	Calorimètre
Éclairement	E	Luxe	Lux	Luxmètre
Intensité	I	Candela	Cd	Candelamètre

Table1: Grandes et unités de base

Les différentes unités peuvent être subdivisées en multiples et sous multiples

Préfixe	Symbol	multiplicateur
Exa	E	10^{18}
Péta	P	10^{15}
Téra	T	10^{12}
Giga	G	10^9
Méga	M	10^6
Kilo	K	10^3
Hecto	h	10^2
Déca	da	10^1

Préfixe	Symbol	multiplicateur
déci	d	10^{-1}
centi	c	10^{-2}
milli	m	10^{-3}
micro		10^{-6}
nano	n	10^{-9}
pico	p	10^{-12}
femto	f	10^{-15}
alto	a	10^{-18}

Table2: multiples et sous multiples des unités

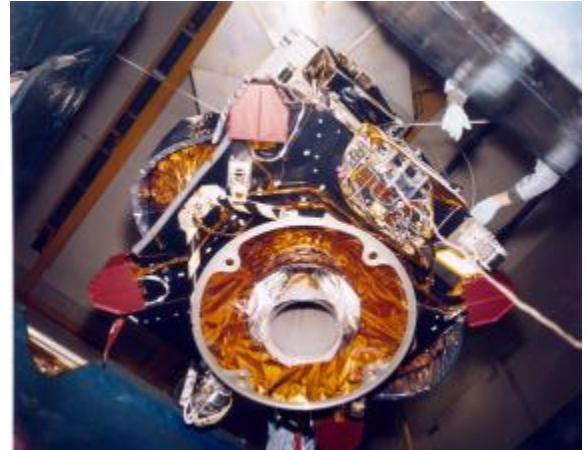
Grandes	Unités traditionnelles	Unités légales
Force	1 Kgf 0.102Kgf	9.8N 1N
Pression	1Kgf/m ² 0.102Kgf/m ² 1Kgf/cm ² 1.02Kgf/cm ²	9.8Pa 1Pa 0.98bar=98060Pa 1bar
Energie	1Kgm 0.102Kgm 1Kcal 0.2389Kcal 1Kcal 0.860Kcal	9.8J 1J 4.1855KJ 1KJ 1.163Wh 1Wh
Puissance	1Kgm/s 0.102Kgm/s 1Kcal/h 0.860Kcal/h	9.8W 1W 1.163W 1W

Table3: Equivalences des unités traditionnelles et les unités légales

Attention à la conversion des unités!!!

Mars Climate orbiter:

- Satellite devrait agir comme un station relais pour cinq ans
- Aider à la transmission de données vers et depuis la planète Mars
- Fournir des informations détaillées sur la température atmosphérique, la poussière, la vapeur d'eau, et des nuages sur Mars.
- Fournir des informations précieuses sur la quantité de dioxyde de carbone (CO_2) en Mars.

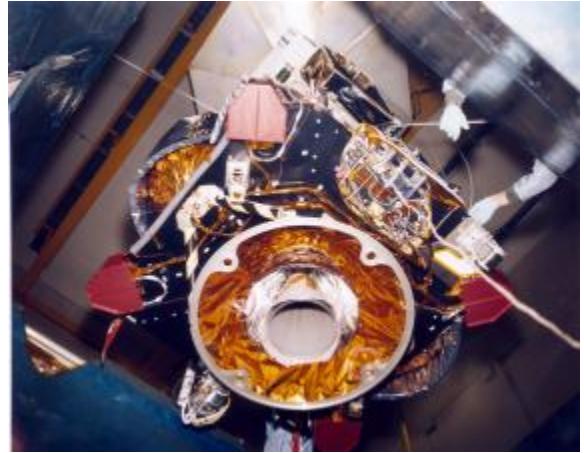


Attention à la conversion des unités!!!

Mars Climate orbiter:

Alors que des 328 millions de dollars ont été investis dans ce projet:

23 septembre 1999: La mission Mars Climate Orbiter a été perdue lors de son entrée dans l'atmosphère martienne sur une trajectoire plus faible que prévu.



C'était quoi le problème?

En raison d'une erreur de conversion dans lequel les commandes de l'engin ont été envoyés dans les unités anglaises (BTU) plutôt que des unités métriques(SI)

Officieusement, le problème avait été détecté, mais en raison de la politique entre l'équipe de développement et le JPL, une solution n'a jamais été déployé



Grandes	Unités françaises	Unités anglo-saxonnes
Longueur	1mm 25.4mm	0.0394 pouce 1 pouce
Volume	1dm ³ 3.79dm ³	0.264 gallon 1 gallon
Pression	1g/cm ² 70.3g/cm ² 1Pa 6889Pa 1bar	0.0142psi 1psi 1.4510 ⁻⁴ psi 1 psi 14.5 psi
Température	Température celsius t_c $T_c = (t_f - 32) / 1.8$	Température Fahrenheit t_f $T_f = 1.8t_c + 32$
Chaleur	1KJ 1.0548KJ 1KWh 0.7457KWh	0.948BTU 1BTU 1.341HPH 1HPH

Table4: Equivalence des unités anglo-saxonnes

La valeur obtenue par une mesure est elle la vraie valeur?

Toute mesure expérimentale, quelle qu'elle soit (électrique, mécanique, chimique...), ne correspond jamais à une valeur exacte.

La différence entre la valeur mesurée et la valeur exacte correspond à l'**erreur expérimentale**. Cependant la valeur exacte n'étant pas connue, l'erreur "*commise*" est difficilement quantifiable. Cette erreur provient principalement des incertitudes de mesure.

Quels sont les sources des erreurs systématiques

- L'expérimentateur
- Appareillages imparfaitement étalonnés
- Techniques de préparation des échantillons

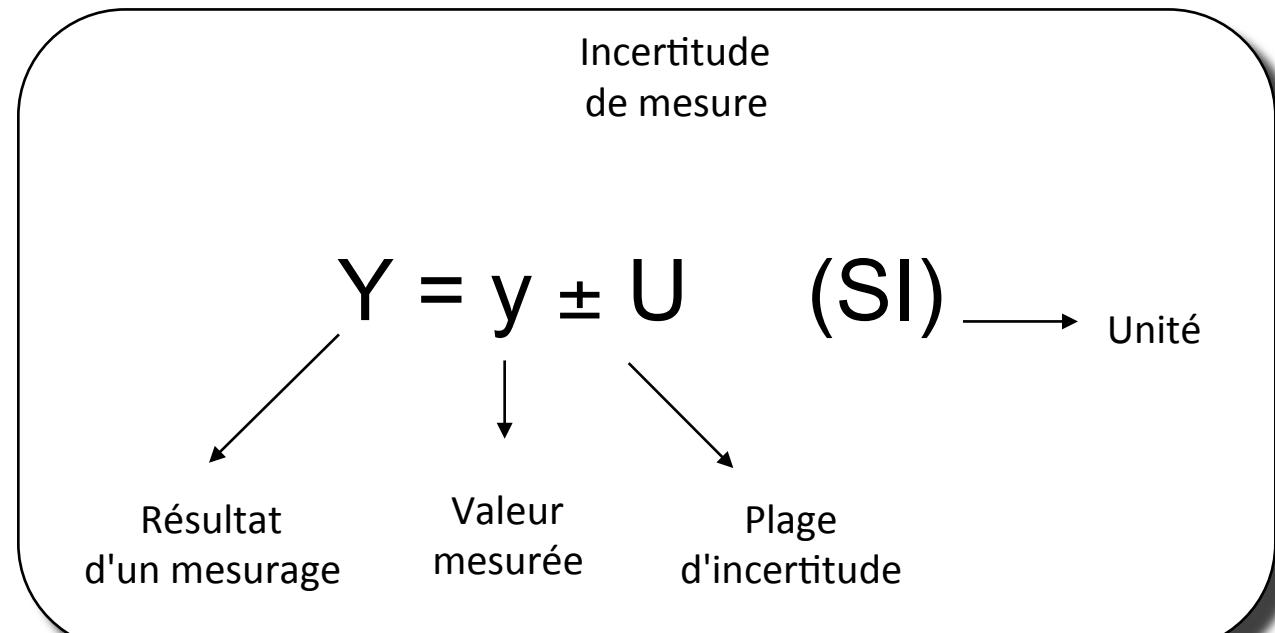
L'incertitude absolue

L'incertitude absolue correspond à l'estimation de l'erreur que fait l'expérimentateur lorsqu'il effectue une mesure.

On note une mesure ou un résultat **m** avec son incertitude absolue **Dm** de la façon suivante : **$m \pm Dm$ (unité)**

m est la **valeur probable** de la grandeur mesurée.

Dm est son **incertitude absolue**



**L'incertitude absolue = l' incertitude sur la lecture de l'instrument
+ l'incertitude sur d'autres facteurs**

L'incertitude de l'instrument

Appareil à graduation

En général, à moins d'indication contraire donnée par le fabricant, l'incertitude sur la lecture effectuée avec un instrument gradué de bonne qualité est donnée par : **la moitié de la plus petite division**

Par exemple, pour une règle graduée en mm , l'incertitude absolue sur la lecture sera de 0,5 mm ou 0,05 cm

**L'incertitude absolue = l' incertitude sur la lecture de l'instrument
+ l'incertitude sur d'autres facteurs**

L'incertitude de l'instrument

Appareil numérique

En général, à moins d'indication contraire donnée par le fabricant, l'incertitude sur la lecture effectuée avec un instrument numérique de bonne qualité est donnée par :
une unité sur le chiffre le moins significatif affiché

Exemple: pour un voltmètre indiquant 1,25 V, l'incertitude sur la lecture sera $\pm 0,01$ V

On écrira $1,25 \pm 0,01$ V soit $\pm 0,80\%$

Cependant, les fabricants des appareils numériques que nous utiliserons indique l'incertitude sur la lecture de l'appareil de la façon suivante:

Un pourcentage du chiffre affiché + une valeur vis-à-vis sur le chiffre le moins significatif.

Par exemple, 1,5 % du chiffre affiché + 2 vis-à-vis le chiffre le moins significatif

On obtient $1,25 \pm (0,01875 + 0,02) = 1,25 \pm 0,04$ V

On écrira $1,25 \pm 0,04$ V soit $\pm 3,1\%$

**L'incertitude absolue = l' incertitude sur la lecture de l'instrument
+ l'incertitude sur d'autres facteurs**

L'incertitude sur d'autres facteurs

L'expérience et le jugement de l'expérimentateur permet d'évaluer cette incertitude.

Les fluctuations des valeurs à mesurer, la difficulté à mesurer sont les principaux facteurs.

En conclusion, lorsque nous effectuons une ou quelques mesures d'une grandeur, l'incertitude absolue ne peut pas être plus petite que l'incertitude sur la lecture de l'instrument.

L'incertitude absolue indique le plus grand intervalle dans lequel la prochaine mesure effectuée sera située.

L'incertitude relative

Il est très important de toujours indiquer la précision d'une mesure ou d'un résultat.

Le pourcentage de précision correspond à l'**incertitude relative** exprimée en pourcentage.

On la calcule de la façon suivante: $100(Dm/m)$

Par exemple, si la longueur d'une feuille est $L = 27,9 \pm 0,1$ cm

alors son incertitude relative sera de $\pm 0,36\%$.

On notera que plus le pourcentage est petit, plus la mesure est précise.

Incertitudes statistiques (mesures répétitives)

Moyenne arithmétique

$$\bar{a}_{mes} = \frac{\sum_{i=1}^n a_{mes}^i}{n}$$

Ecart-type

$$\Delta a_{mes} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (a_{mes}^i - \bar{a}_{mes})^2}$$

Entre une incertitude ponctuelle et et statistique, on choisira celle dont le Δ englobe l'autre.

Grandeurs composés

Exemple $X = a \times \frac{(b-c)}{d}$

Comment déterminer l'incertitude ΔX à partir des incertitudes connues Δa , Δb , Δc et Δd ?

1 - Méthode des dérivées partielles
(la plus générale)

$$\Delta X = \left| \frac{\partial F}{\partial a} \right| \Delta a + \left| \frac{\partial F}{\partial b} \right| \Delta b + \left| \frac{\partial F}{\partial c} \right| \Delta c + \dots$$

$$\frac{\partial F}{\partial a} = \frac{\partial}{\partial a} \left(\frac{a(b-c)}{d} \right) = \frac{b-c}{d}$$

$$\frac{\partial F}{\partial c} = \frac{\partial}{\partial c} \left(\frac{a(b-c)}{d} \right) = -\frac{a}{d}$$

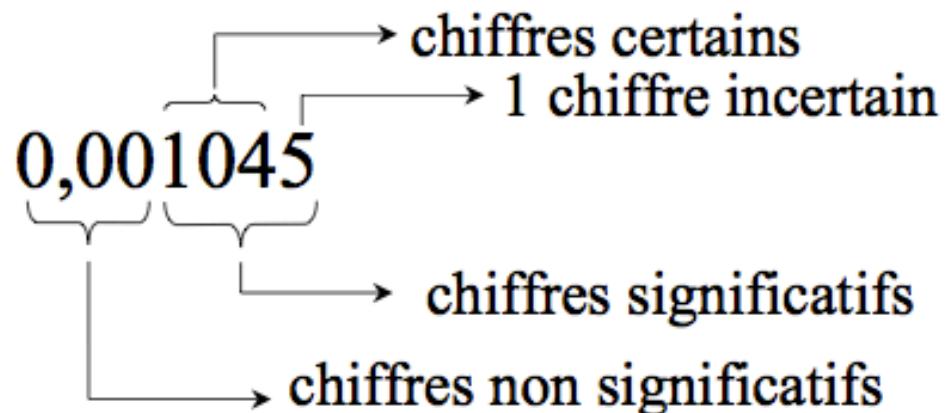
$$\frac{\partial F}{\partial b} = \frac{\partial}{\partial b} \left(\frac{a(b-c)}{d} \right) = \frac{a}{d}$$

$$\frac{\partial F}{\partial d} = \frac{\partial}{\partial d} \left(\frac{a(b-c)}{d} \right) = -\frac{a(b-c)}{d^2}$$

Représentation des résultats calculés

Chiffres significatifs

Définitions



1 - Incertitude connue

☞ le dernier chiffre significatif doit correspondre à l'incertitude

$$1,523418 \pm 0,0003 \Rightarrow 1,5234$$

2 - Incertitude inconnue

convention : le dernier chiffre écrit **est** significatif

Comment respecter la convention ?

a - sommes et différences

- ☞ le nombre de chiffre significatifs du résultat est défini par le terme qui compte le moins de décimale

$$\text{exemple : } 3,4 + 0,020 + 7,31 = 10,73 = 10,7$$

b – produits et quotients

- ☞ le nombre de chiffre significatifs du résultat équivaut à celui du terme qui en comporte le moins (marche pas toujours)
- ou ☞ prendre pour incertitude sur les termes, une unité sur le dernier chiffre et appliquer au résultat la plus grande

exemple

$$\frac{24 \times 4.52}{100.0} = 1.08$$

$$\frac{24 \times 4.02}{100.0} = 0.965$$

méthode 1 24 : 2 chiffres significatifs ☞ 1.1 et 0.96

méthode 2 $\max(1/24; 0.01/4.52; 0.1/100.0) = 0.04$ ☞ 1.08 et 0.96

c – logarithmes

- ☞ On conserve autant de chiffres à droite de la virgule qu'il y a de chiffres significatifs dans le nombre de départ

exemple : $\log(9,57 \times 10^4) = 4,981$

d – exponentielles

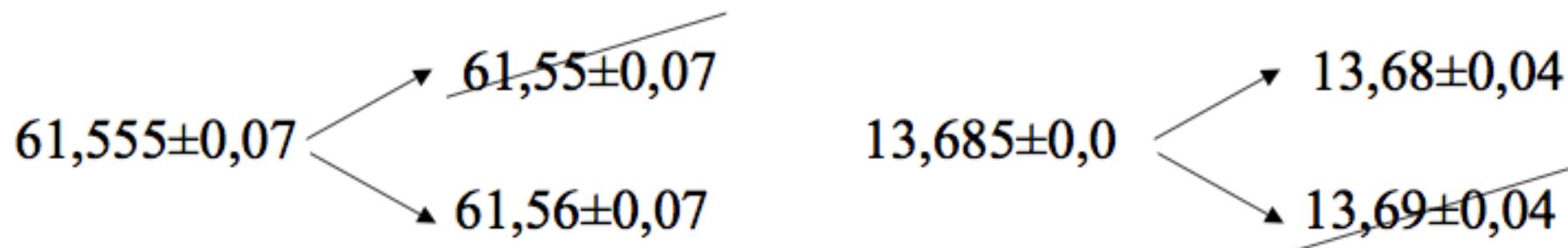
- ☞ On conserve autant de chiffres qu'il y a de chiffres à droite de la virgule dans le nombre de départ

exemple : $10^{12,5} = 3 \times 10^{12}$

Comment arrondir les valeurs numériques ?

Cas particulier

- ☞ On arrondi toujours un 5 au **nombre pair** le plus proche



Il faut toujours reporter les opérations d'arrondi pour le dernier

- ou mieux
- ☞ conserver un chiffre de sécurité pour les calculs intermédiaire
 - ☞ conserver la forme littérale de la grandeur physique

Questions

1. Expliquez en quelques mots quel est le but du calcul d'erreur.
2. Dans quels cas parle-t-on d'erreur ? d'incertitude ?
3. Définissez l'incertitude absolue et l'incertitude relative.

Exemple1:

Pour déterminer le volume d'une sphère, on mesure son rayon R avec une incertitude relative de 1%.

Quelle est alors l'incertitude relative sur le volume de la sphère?