

Chapitre B Pression, température et gaz parfait

I-Pression dans un fluide

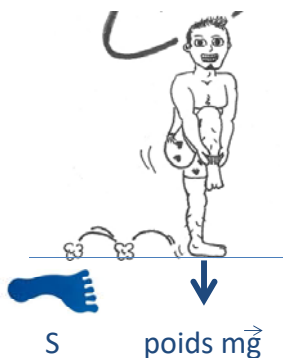
II-Température thermodynamique

Ce chapitre est dédié à deux variables d'états intensives, la pression P et la température T . Une interprétation microscopique en sera donnée à travers le modèle du gaz parfait.

PRESSION sur une SURFACE

Les fluides exercent sur les surfaces avec lesquels ils sont en contact des **forces pressantes**, normales en tout point à ces surfaces, dirigées du fluide vers la surface.

Force pressante



pression = force/surface

$$P = mg/S$$



Unité dérivée du système international (S.I.) : **Pascal (Pa)**
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-2}$

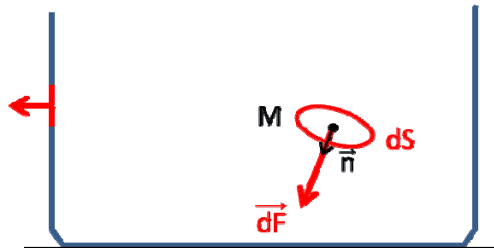
Autres unités courantes

$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa}$

$1 \text{ atm} = 1.013 \text{ bar}$ (pression atmosphérique moyenne)

$1 \text{ torr} = 1/760 \text{ atm}$

PRESSION en un point M à l'intérieur du fluide



$$p = \frac{|\vec{dF}|}{dS} \geq 0$$

Expérimentalement, vous constaterez en TP que la pression est la même

- * quelque soit l'orientation de la surface dS autour du point M
- * en tout point d'un plan horizontal.

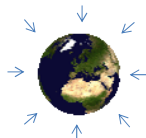
Vous mesurerez son augmentation avec la profondeur

TP 1

A l'échelle du laboratoire **P(z)**
fonction d'une seule variable z

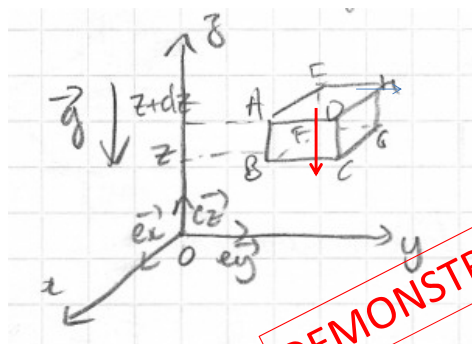
3

Pression d'un fluide DANS LE CHAMP DE PESANTEUR



A l'échelle d'une expérience de laboratoire, la Terre est \approx plate.
L'accélération de pesanteur \vec{g} est uniforme.

Bilan des forces exercées par le fluide sur un petit élément
parallélépipédique ABCDEFGH de hauteur dz et de surface de base S



Le poids $\vec{P} = m\vec{g} = \underset{\text{masse volumique}}{\rho(z)} S dz \vec{g}$

Les forces pressantes sur chacune des
facettes

$$\vec{F} = \vec{F}_{ABCD} + \vec{F}_{EFGH} + \vec{F}_{ADHE} + \vec{F}_{BCGF} + \vec{F}_{ACDH} + \vec{F}_{BDEG}$$

A l'équilibre, $\sum \vec{F} = \vec{0}$

$$dP = - \rho g dz$$

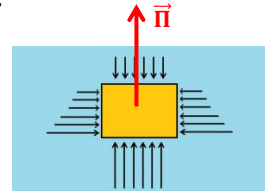
DEMONSTRATION A LA CRAIE

4

Poussée d'Archimède

C'est la résultante $\vec{\Pi}$ des forces de pression exercée par le fluide environnant sur un solide.

Elle est égale au poids du volume de fluide déplacé (théorème de la Poussée d'Archimède)



Flottabilité dans l'eau $\rho_{Fe}=7900 \text{ kg.m}^{-3} > \rho_{eau}=1000 \text{ kg.m}^{-3} > \rho_{liège}=200 \text{ kg.m}^{-3}$

Fer dans l'eau ? $\Pi_{Fe}=\rho_{eau} Vg < \rho_{Fe} Vg=\text{poids} \Rightarrow$ coule

Liège dans l'eau ? $\Pi_{Liège}=\rho_{eau} Vg > \rho_{Liège} Vg=\text{poids} \Rightarrow$ flotte

FILM : bateau qui flotte sur un gaz

5

Equation fondamentale de la statique des fluides

$$dP = - g \rho dz \quad \uparrow$$

Conséquences

$z \uparrow \Rightarrow dz > 0 \Rightarrow dP < 0 \Rightarrow P \downarrow$

La pression dans l'air diminue avec l'altitude.



Attention à l'orientation de l'axe vertical (altitude/profondeur)

S'il est orienté vers le bas $dP = + g \rho dz$

La pression dans l'eau augmente avec la profondeur.

6

Cas particulier important

Corps de masse volumique ρ constante

$$dP = -g \rho dz \text{ avec } g \text{ et } \rho \text{ constantes}$$

$$\Delta P = P(z_f) - P(z_i) = -g \rho \Delta z = -g \rho (z_f - z_i)$$

$$\Delta P = -g \rho \Delta z$$

Valable pour un gaz ? Un liquide ?

7

Compressible / incompressible ($V=\text{cst}$)



Air

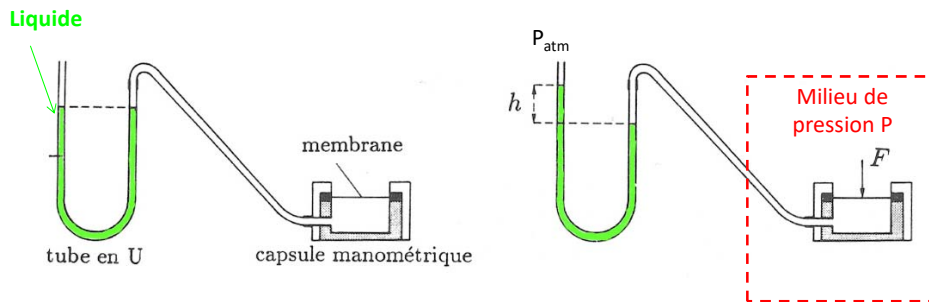
Liquide

En première approximation, un liquide peut être considéré incompressible : $\rho \approx \text{constante}$

8

Mesurer la pression

Equilibre mécanique entre deux systèmes A et B
L'équilibre des forces à l'interface $\Rightarrow P_A = P_B$



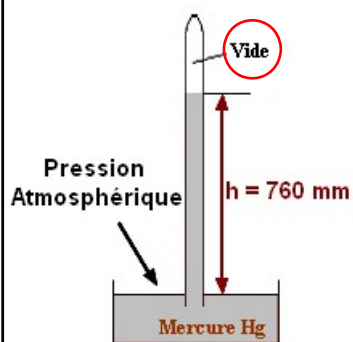
TD2
TP1

$$P - P_{atm} = \rho gh$$

Manomètre différentiel

9

Baromètre de Torricelli (1644)



$$P - 0 = \rho gh$$

Manomètre absolu



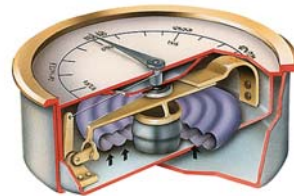
Unité de pression historique
1 torr = 1 mm de mercure = 1/760 atm

TP 1

10

Capteurs de pression

Aujourd'hui manomètres sans liquide
à capsule déformable : Bourdon 1849



Mais aussi capteurs de pression électroniques
à membrane capacitive, piezo, etc...

11

Le vide absolu : 0 Pa

Pompe primaire



Pompe turbo-moléculaire



vide interstellaire ~ 1 particules/cm³

vide entre la Terre et la Lune ~ 2000 particules/cm³
 \approx le meilleur vide qu'on sait produire en laboratoire (ULTRA-VIDE)

$P \approx 10^{-11}$ Pa $\approx 10^{-16}$ atm

12

Le cas des gaz: rappel

Equation d'état du gaz parfait

$$PV=nRT$$

constante des gaz parfaits $R= 8.31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Bonne description du comportement expérimental des gaz
dès que la pression est suffisamment basse

Unités du système international (SI)

T température thermodynamique (**K**)
P pression (**Pa**)
V volume (**m³**)
n quantité de matière (**mol**)



Dans les conditions normales (pression atmosphérique et température ambiante)
volume molaire du gaz parfait $V/n= RT_0/P_{\text{atm}} = \mathbf{22,4 \text{ L}}$

Gaz compressibles avec masse volumique $\rho(P, T) = PM/RT$, où M masse molaire

13

Les gaz sont compressibles mais...

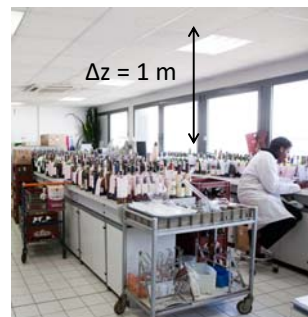
Supposons $\rho=\text{cste} \Rightarrow \Delta P = -g \rho \Delta z$

A.N. pour l'air ambiant ($\approx \text{N}_2$) considéré comme G.P. :
Dans les CNTP, $\rho_{\text{air}} = M/V_{\text{mol}} = 28 \text{ g.mol}^{-1} / 22,4 \text{ L.mol}^{-1}$

$$\rho_{\text{air}} \approx 1 \text{ kg/m}^3$$

L'air est ≈ 1000 x moins dense que l'eau

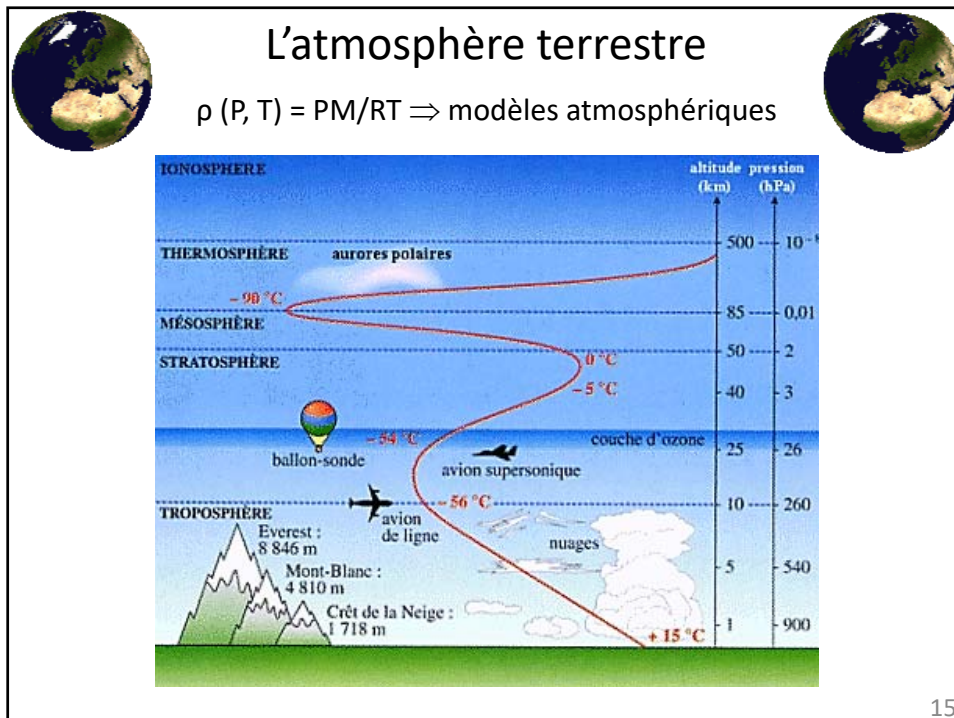
$$\Delta z = 1 \text{ m} \Rightarrow \Delta P = -12 \text{ Pa} \ll P_{\text{atm}} = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$



Pour les systèmes formés par de petits volumes de gaz, on pourra définir **LA pression P du gaz**, homogène à l'intérieur du système.

A l'échelle du laboratoire : hypothèse $\rho=\text{cste}$ bien vérifiée pour un gaz.

14

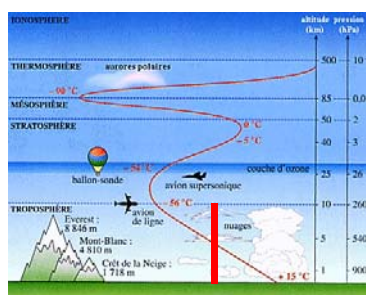


15

Grandes variations d'altitude

Troposphère: description simplifiée avec T supposée constante

$$dP = -\frac{PM}{RT} g dz \longrightarrow \frac{dP}{P} = -\frac{Mg}{RT} dz$$



$$d(\ln P) = -\alpha dz \quad \text{avec} \quad \alpha = \frac{Mg}{RT} = \text{cste}$$

$$\Delta(\ln P) = -\alpha \Delta z$$

$$\ln(P(z)) - \ln(P(0)) = -\alpha z$$

$$\ln\left(\frac{P(z)}{P(0)}\right) = -\alpha z$$

$$P(z) = P(0)e^{-\alpha z}$$

TD2

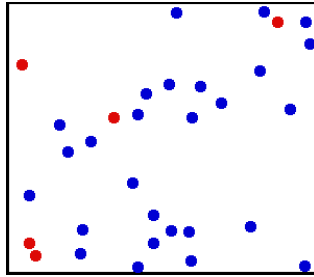
Applications aéronautiques : altimètres

16

Origine microscopique de la pression

Hypothèses du modèle du gaz parfait

- 1/ Les molécules sont des sphères dures **ponctuelles** (pas de volume propre)
- 2/ **Pas d'interactions** à distance entre elles, seulement des collisions
- 3/ Les directions et les vitesses des molécules sont distribuées **aléatoirement**



L. Boltzmann 1844-1906
fondateur de la Physique Statistique



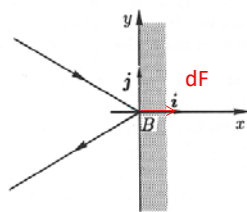
Avec ces hypothèses, on peut calculer en mécanique la force appliquée par **une seule collision** sur une paroi et en faire la **moyenne statistique** sur toutes les collisions.

17

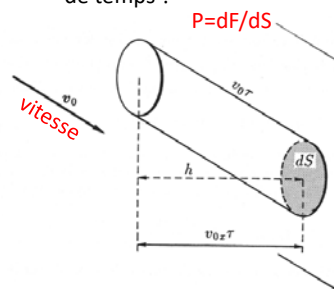
Pression issue des collisions microscopiques

démonstration complète : C. Lhuillier, J. Rous, *Introduction à la thermodynamique*, DUNOD

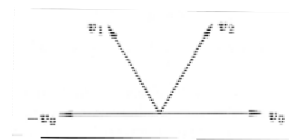
1/ Force exercée par la collision d'1 molécule de masse m sur la paroi ?



2/ Combien de molécules frappent la paroi par unité de temps ?



3/ Moyenne sur toutes les directions (iso-probables)



$$PV = \frac{N}{3} m \langle v^2 \rangle$$

$\langle v^2 \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\vec{v}_i|^2$ vitesse quadratique moyenne
agitation thermique

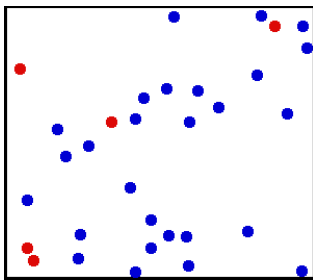
18

Mélange de gaz / Pressions partielles

Air sec = 78% N₂ + 21 % O₂ + 1% autres

Pour un mélange de gaz parfait constitué de deux molécules **A** et **B**, la pression totale vaut

$$P = \underbrace{\frac{1}{3} m_A \frac{N_A}{V} \langle v_A^2 \rangle}_{P_A} + \underbrace{\frac{1}{3} m_B \frac{N_B}{V} \langle v_B^2 \rangle}_{P_B}$$



P_A est appelée la **pression partielle** du gaz A dans le mélange. Par définition, c'est la pression qu'exercerait le gaz A s'il occupait **seul** le volume V

Loi de Dalton
 $P = \sum P_{\text{partielles}}$

19

Chapitre B Pression, température et gaz parfait

I-Pression dans un fluide

II-Température thermodynamique

Définitions

Système international

? La température thermodynamique T est une grandeur mesurable, qui quantifie le degré **d'agitation moléculaire** à l'échelle microscopique. ?

Problème : définition thermodynamique macroscopique

$$T = \left(\frac{\partial U}{\partial S} \right)_V$$

?

21

Mesures de température

Equilibre thermique: Principe « 0 » de la thermodynamique

Les corps en équilibre possèdent une **même température**.

Equilibre thermique entre deux systèmes A et B $\Rightarrow T_A = T_B$

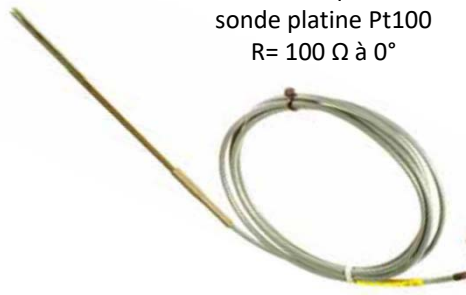
Thermomètre : système qui possède une grandeur mesurable dépendant de T

Utilisation : équilibre du thermomètre avec le corps de température inconnue

Dilatation L d'un métal



Résistance électrique des métaux
sonde platine Pt100
 $R = 100 \, \Omega$ à 0°



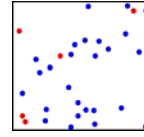
Thermomètre secondaire: calibration ? valeurs de référence ?

22

Agitation moléculaire à l'échelle microscopique

Pression issue des collisions micro

$$PV = \frac{N}{3} m \langle v^2 \rangle = \frac{2N}{3} \langle E_c \rangle$$



Agitation moléculaire quantifiée par la valeur moyenne de l'énergie cinétique $\langle E_c \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle$ sur l'ensemble des particules.

$$\text{Pour un gaz parfait monoatomique } \langle E_c \rangle = \frac{3}{2} kT$$

où la constante de Boltzmann $k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Théorème « d'équirépartition de l'énergie » de la physique statistique: l'énergie cinétique moyenne est de $\frac{1}{2} kT$ par degré de liberté.

23

Le gaz parfait : le thermomètre primaire

Modèle microscopique du gaz parfait

$$\underbrace{PV = \frac{1}{3} N m \langle v^2 \rangle}_{\text{collisions}} \quad \& \quad \underbrace{\langle E_c \rangle = \frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} kT}_{\text{vitesse moyenne}} \quad \longrightarrow \quad PV = N k T = \frac{N}{N_A} \underbrace{N_A k}_{n \quad R = N_A k} T$$

La physique statistique permet de démontrer l'équation d'état du gaz parfait à partir des comportements microscopiques

$$PV = nRT$$

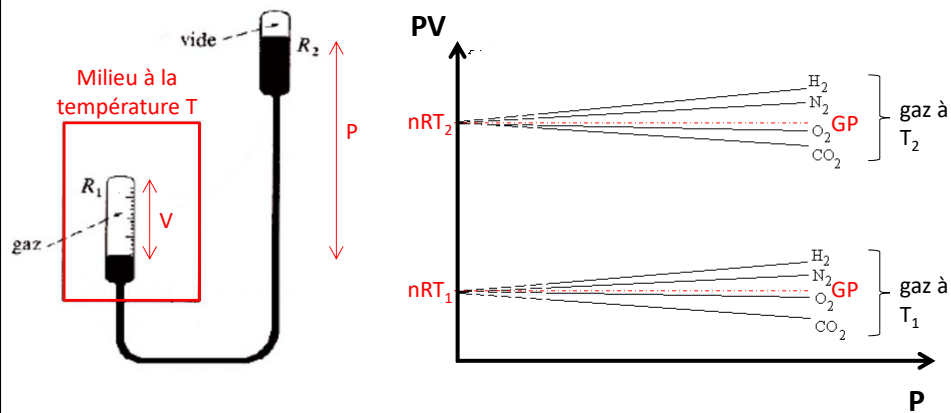


Les mesures de **P** et **V** d'un gaz à **basse pression** permet de déduire directement la température thermodynamique **T** du gaz

Tous les gaz sont décrits avec une grande précision par cette équation dès que la pression est suffisamment basse, indépendamment de la nature chimique des molécules.

24

Diagramme d'Amagat $PV=f(P)$ des gaz



Historiquement: problème de précision sur la connaissance de N_A et de R

Température absolue de la thermodynamique définie par rapport à une température de référence

$$\frac{T}{T_{\text{ref}}} = \frac{PV}{PV|_{\text{ref}}}$$

25

William Thomson (Lord Kelvin) 1824-1907



[*Cambridge Philosophical Society Proceedings for June 5, 1848 ;
Mag., Oct. 1848.*]

ART. XXXIX. ON AN ABSOLUTE THERMOMETRIC SCALE FOUNDED ON CARNOT'S THEORY OF THE MOTIVE POWER OF HEAT*, AND CALCULATED FROM REGNAULT'S OBSERVATIONS†.

THE determination of temperature has long been recognized as a problem of the greatest importance in physical science. It has accordingly been made a subject of most careful attention, and, especially in late years, of very elaborate and refined experimental researches‡; and we are thus at present in possession of as complete a practical solution of the problem as can be desired, even for the most accurate investigations. The theory of thermometry is however as yet far from being in so satisfactory a state. The principle to be followed in constructing a thermometric scale might at first

26

L'échelle centigrade de température

La température centigrade $\theta(L)$ est associée à l'unité Celcius ($^{\circ}\text{C}$).

$\theta(L)$ est définie à l'aide de la grandeur physique L du thermomètre étalonné avec 2 points de référence :

0°C à la fusion de la glace sous une pression de 1 atm
 100°C à l'ébullition de l'eau sous une pression de 1 atm

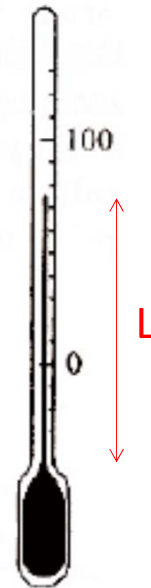
$$\theta(L) = 100 \times (L - L_{0^{\circ}\text{C}}) / (L_{100^{\circ}\text{C}} - L_{0^{\circ}\text{C}})$$

L'échelle centigrade est bien adaptée à la vie sur Terre.



$$\theta \neq T$$

Température thermodynamique T en Kelvin



27

degrés Kelvin et degrés Celsius

L'unité de la température thermodynamique, le Kelvin, a été définie de manière à conserver une cohérence avec l'échelle centigrade de la vie quotidienne. Cela impose :

- 1- une relation linéaire $T(K) = a \theta(^{\circ}\text{C}) + b$
 - 2- $\Delta T = 100\text{K}$ pour $\Delta \theta = 100^{\circ}\text{C} \Rightarrow a = 1$
- } b ?

Historiquement, la température de référence choisie est celle de la fusion de la glace sous 1 atm (0°C). Les mesures de PV sur les gaz donnent $PV_{100^{\circ}\text{C}}/PV_{0^{\circ}\text{C}} = (100 + b) / b = 1.36610$ dans la limite des basses pressions quelquesoit le gaz utilisé $\Rightarrow b = 273,15\text{ K}$

1948 Lord Kelvin « On an absolute thermometric scale ... »

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

0 K = -273.15°C correspond à la température thermodynamique du **zéro absolu**

Proche du zéro absolu (0K), apparaissent des propriétés de la matière tout à fait originales : superfluidité, supraconductivité, Pour en savoir plus : videos sur e-campus

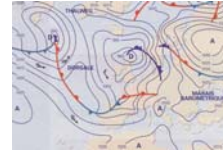
28

L'étalon de température thermodynamique

Pour la précision de l'étalon de température, le point triple est préféré aux points doubles

Point double => $T=f(P)$

Ex : l'eau bout à 85°C au sommet du Mont-Blanc (0,5 atm)
à 100°C au niveau de la mer (1 atm)



P_{atm} varie d'un jour sur l'autre.

Température d'ébullition = mauvais étalon de température

Point de fusion meilleur étalon mais reste un point double $T_{fusion}=f(P)$

Historiquement, la valeur **étalon** choisie pour l'unité de température est celle du **point triple** de l'eau, obtenu à

$$P_t = 613 \text{ Pa} \text{ et } T_t = 273,16 \text{ K} (\theta_t = 0,01^\circ\text{C})$$

Unité S.I. (avant 2019) : le Kelvin, noté K, est défini comme 1/273,16 de la température thermodynamique **du point triple de l'eau**.

29

L'échelle internationale de température EIT

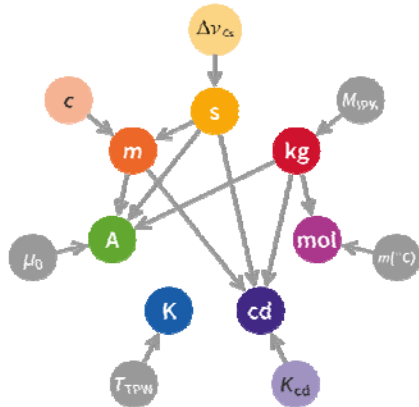
entrée en vigueur le 1^{er} janvier 1990

Corps pur	Type de point	T en K	T en °C
Hydrogène	point triple	13,8033	- 259,3467
Néon	point triple	24,5561	- 248,5939
Oxygène	point triple	54,3584	- 218,7916
Argon	point triple	83,8058	- 189,3442
Mercure	point triple	234,3156	- 38,8344
Eau	point triple	273,16	0,01
Gallium	point de fusion	302,9146	29,7646
Indium	point de congélation	429,7485	156,5985
Etain	point de congélation	505,078	231,928
Zinc	point de congélation	629,677	419,527
Aluminium	point de congélation	933,473	660,323
Argent	point de congélation	1234,93	961,78
Or	point de congélation	1337,33	1064,18
Cuivre	point de congélation	1357,77	1084,62

30

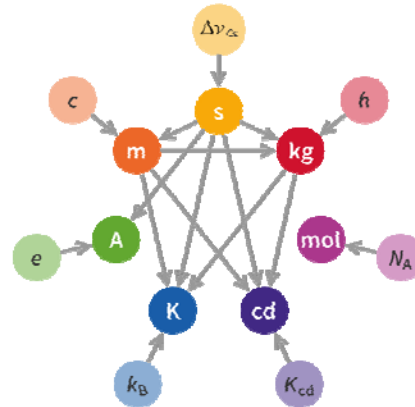
Reforme des unités du système international

Avant 2019



valeurs exactes de 7
constantes fondamentales

En vigueur aujourd'hui



$$\begin{aligned} \Delta\nu_{Cs} &= \Delta\nu(^{133}\text{Cs})_{\text{hfs}} = 9192631770 \text{ s}^{-1} \\ c &= 299792458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1} \\ h &= 6.62607015 \times 10^{-34} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1} \\ k &= 1.380649 \times 10^{-23} \text{ kg}\cdot\text{m}^2\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{s}^{-2} \\ e &= 1.602176634 \times 10^{-19} \text{ A}\cdot\text{s} \\ N_A &= 6.02214076 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \\ K_{cd} &= 683 \text{ cd}\cdot\text{sr}\cdot\text{s}^3\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{m}^{-2} \end{aligned}$$

33

La nouvelle définition du Kelvin

Le **kelvin**, symbole K, est l'unité de température thermodynamique du SI. Il est défini en prenant la valeur numérique fixée de la constante de Boltzmann, k , égale à $1,380\,649 \times 10^{-23}$ lorsqu'elle est exprimée en J K^{-1} , unité égale à $\text{kg m}^2 \text{s}^{-2} \text{K}^{-1}$, le kilogramme, le mètre et la seconde étant définis en fonction de h , c et $\Delta\nu_{Cs}$.

Pour en savoir plus sur l'unification des unités de mesure :



Résumé (5 pages) du rapport du BIPM 2019

A télécharger sur e-campus2.

34