Théorie cinétique des gaz. Notions et mesures de température et de pression

Niveau : L3

Prérequis

- Statique des fluides
- Jauges de contrainte
- Mise en équation du condensateur
- Ensemble canonique, statistique de l’ensemble canonique

Hypothèses du modèle

Modèle du gaz parfait :

- Les molécules de gaz sont assimilées à des sphères dures de diamètre négligeable devant la distance qui les sépare
- Les molécules de gaz subissent des collisions élastiques

Hypothèses statistiques :

- Indépendance des composantes des vitesses (la répartition des vitesses suivant une direction ne dépend que de la vitesse suivant cette direction)
- Isotropie des vitesses (équivalence des directions des vitesses)
- Uniformité de la répartition des molécules en l'absence de champ extérieur (le nombre de particules est le même en tout point du volume de gaz), on définit la densité :

$$n = \frac{N}{V}$$

Distribution statistique d'une composante de la vitesse

Suivant l'axe (Ox) : $dN(v_x) = N\sqrt{\frac{m}{2\pi kT}}\exp\left(-\frac{mv_x^2}{2kT}\right)dv_x$ $\varphi(v_x) = \frac{1}{N}\frac{dN(v_x)}{dv_x}$

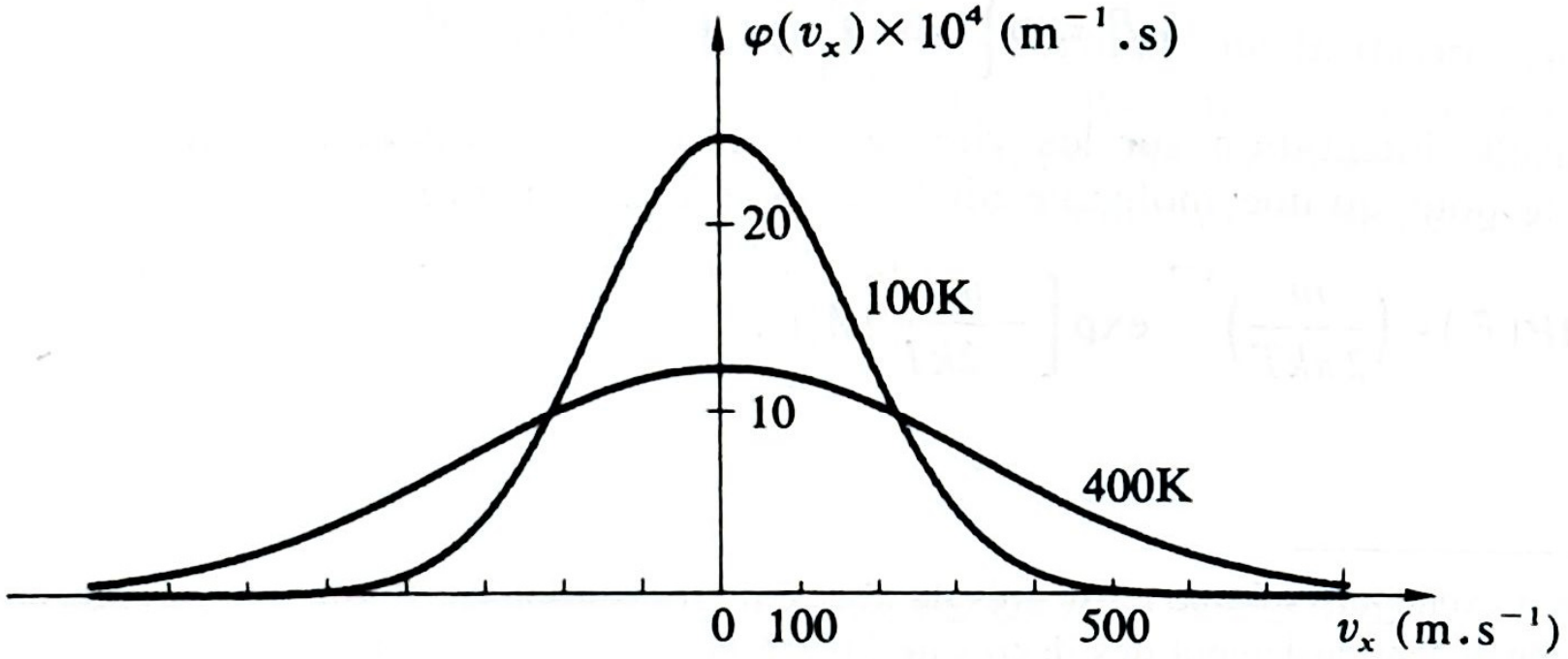


FIGURE 1

Distribution statistique d'une composante de la vitesse pour deux valeurs de la température ($T_1 = 100$ K; $T_2 = 400$ K), dans un gaz d'oxygène ($m = 32 \times 1{,}66 \times 10^{-27}$ kg).

Distribution statistique d'une composante de la vitesse

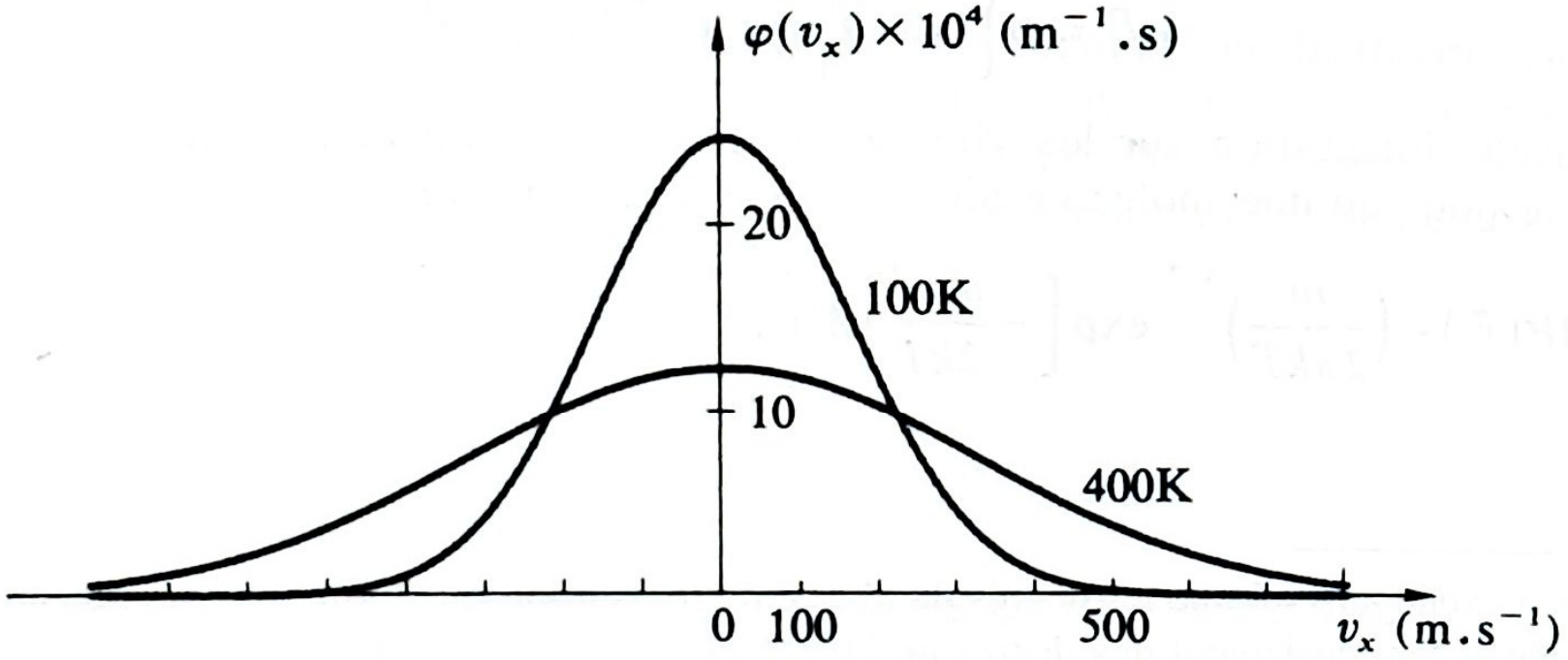
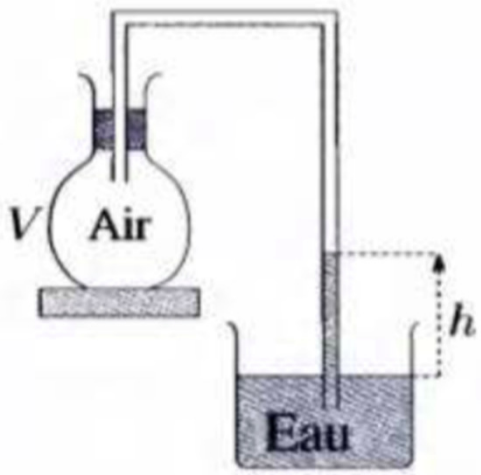


FIGURE 1

Distribution statistique d'une composante de la vitesse pour deux valeurs de la température ($T_1 = 100$ K; $T_2 = 400$ K), dans un gaz d'oxygène ($m = 32 \times 1{,}66 \times 10^{-27}$ kg).

Thermomètre à gaz



Un gaz assimilé à un gaz parfait occupe le volume constant V d'un ballon en verre. En mesurant sa pression P grâce à la hauteur h d'une colonne de mercure ($P = P_a + \rho gh$ où P_a est la pression atmosphérique) on en déduit la température T.

Gaz généralement utilisés dans ces dispositifs :

- Hydrogène
- Hélium : permet de mesurer des températures plus basses que que l'hydrogène puisque sa température d'ébullition à pression atmosphérique vaut 4,2K contre 20K pour l'hydrogène

Inconvénient : très délicat à utiliser, il est principalement utilisé dans des laboratoires spécialement équipés

Thermomètres à liquide

Principe : dilatation apparente du liquide dans son enveloppe : dilatation du liquide à laquelle on a retranché celle de son enveloppe.

Domaines d'utilisation :

- Mercure : 235-823 K
- Toluène : 183-373K
- Éthanol : 173-373K
- Pentane : 123-293K

La température minimale d'utilisation correspond au point de congélation du liquide et la température maximale est limitée par le ramollissement de l'enveloppe.

Inconvénients : thermomètres assez peu précis en raison de la correction de dilatation de l'enveloppe, de l'erreur de parallaxe dans la lecture lorsque la visée n'est pas faite au niveau de la graduation

Différents thermomètres de précision

- **T < 19K :** on mesure la vitesse la plus probable des atomes et on détermine la température à l'aide de la distribution des vitesses de Maxwell

- **De 19 jusqu'à 293K :** utilisation du thermomètre à résistance de platine, dont le fonctionnement repose sur la variation de la résistance d'un fil de platine en fonction de la température

- **907K – 1337K :** utilisation de thermocouples. Dans ces instruments on s'appuie sur la relation entre la température et la force électromotrice du couple thermoélectrique platine-platine rhodié (10% de rhodium), dont la source froide est maintenue à 273,15K et la source chaude est la température à mesurer.

- **T>1337K :** il n'existe aucun point fixe qui permette d'étendre l'échelle. On extrapole à l'aide de pyromètres optiques dont le fondement est la relation entre la puissance électromagnétique rayonnée et la température.

Premiers appareils de mesure de pression : les colonnes à liquide

- 17^{e} siècle : invention du baromètre à colonne de Mercure par Torricelli

Le mercure est très utilisé car sa densité est élevée, ce qui permet de réaliser des appareils de taille raisonnable même pour des pressions importantes. Ces appareils ont été abandonnés assez vite car la densité d'un fluide et le champ de gravité varie d'une expérience à une autre en fonction du lieu dans lequel on se trouve .

- En statique des fluides :

$$\Delta P = \rho g h$$

Manomètres anéroïdes

Ces manomètres utilisent l'élasticité d'une pièce métallique : sa déformation permet de remonter de manière fidèle à la différence de pression appliquée.
Ils sont indifférents de la nature du gaz dont on cherche à déterminer la pression et contrairement aux colonnes de liquide ne risquent pas de contaminer le mesurande.

Manomètre à membrane

Cellule élastique : diaphragme , tube de Bourdon (passage d'un tube cylindrique à un tube circulaire), manomètre à soufflet, …
La déformation de la cellule est soit lue sur un cadran à aiguille par un mécanisme, soit convertie grâce à des jauges de déformation combinées à un pont de Wheatstone.

Tube de Bourdon

TABLEAU VII.3. — *Energie interne et capacités calorifiques molaires des gaz* **parfaits** *en théorie classique.*

Type des molécules	U_M	Mc_v	Mc_p	γ
Monoatomiques.....	$\frac{3}{2}$ RT	$\frac{3}{2}$ R	$\frac{5}{2}$ R	$\frac{5}{3}$
Polyatomiques linéaires indéformables	$\frac{5}{2}$ RT	$\frac{5}{2}$ R	$\frac{7}{2}$ R	$\frac{7}{5}$
Polyatomiques non linéaires indéformables	3 RT	3 R	4 R	$\frac{4}{3}$
Polyatomiques linéaires déformables.....	$\frac{6a-5}{2}$ RT	$\frac{6a-5}{2}$ R	$\frac{6a-3}{2}$ R	$\frac{6a-3}{6a-5}$
Polyatomiques non linéaires déformables ..	$(3a-3)$RT	$(3a-3)$R	$(3a-2)$R	$\frac{3a-2}{3a-3}$

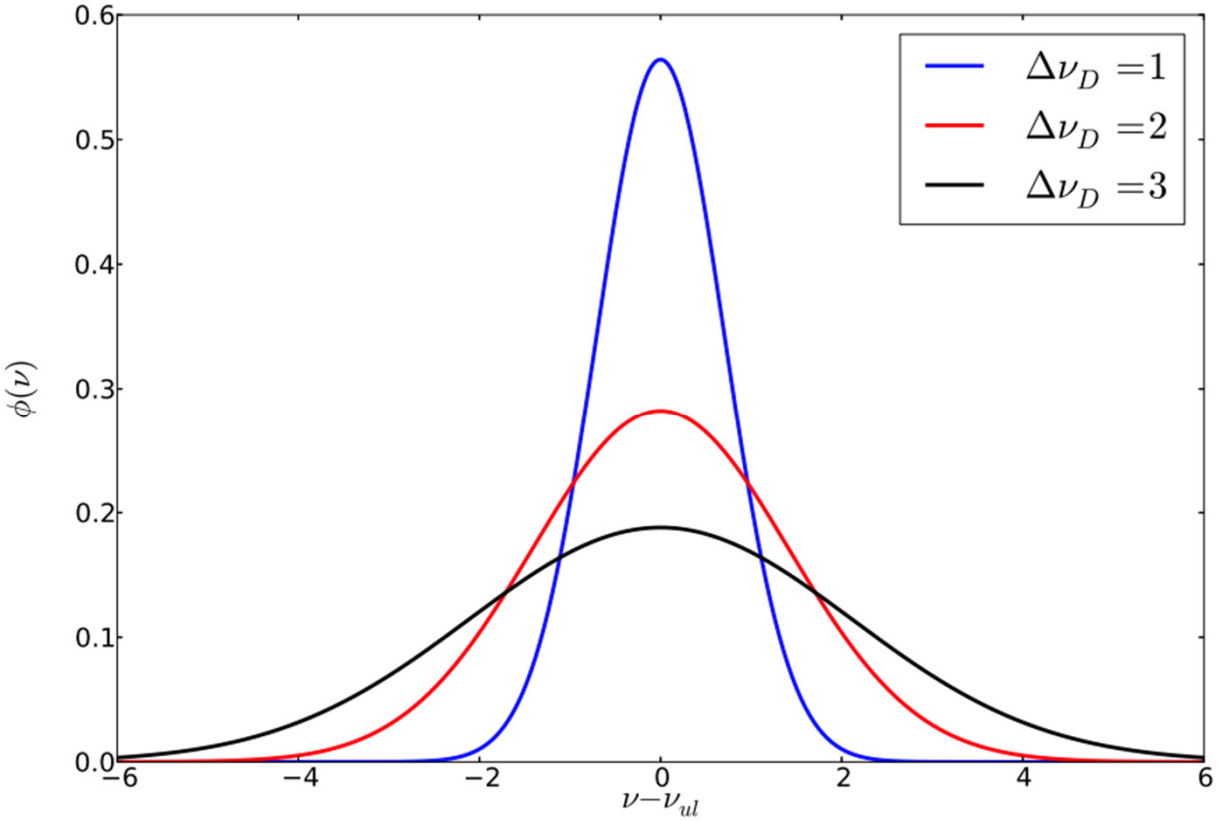
TABLEAU VII.4. — *Capacités calorifiques molaires des gaz parfaits (à 20 °C, extrapolées pour $p = 0$).*

Type de gaz	Gaz	Mc_v	Mc_p	Mc_p en J . mol^{-1} . K^{-1}	γ
Monoatomique	**He**	1,50 R	**2,50 R**	20,8	$\frac{5}{3}$
	A	1,50 R	2,50 R	20,8	$\frac{5}{3}$
	Hg (600 °C)	1.50 R	2,50 R	20,8	$\frac{5}{3}$
Diatomique, molécules indéformables	H_2	2,44 R	**3,44 R**	28,6	**1,41**
	O_2	2,53 R	**3,53 R**	29,3	**1,395**
	CO	2,50 R	**3,50 R**	29,1	**1,40**
Diatomique, molécules déformables	Cl_2	3,05 R	4,05 R	33,7	1,33
Polyatomique, molécules indéformables	H_2O	3,02 R	**4,02 R**	33,4	**1,33**
Polyatomique, molécules déformables	NH_3	3,29 R	4,29 R	35,7	1,30
	CO_2	3,50 R	**4,50 R**	37,4	**1,29**
	C_2H_2	4,20 R	5,20 R	43,2	1,24

Autres exemples

- Sondes capacitives : variation de capacité électrique due à l'expansion de l'intervalle diélectrique sous l'effet d'une dépression extérieure (système utilisé dans l'industrie du vide)
- Quartz piézoélectrique déformé par la pression appliquée produit une différence de potentiel dépendant de sa déformation

Elargissement par effet Doppler des raies spectrales émises par les molécules d'un gaz



Effet Doppler pour une particule en mouvement suivant l'axe (Oz) (axe d'observation) un observateur fixe :

$$\frac{\nu}{\nu_e} \simeq 1 - \frac{v_z}{c}$$

Les particules de gaz émettent toutes à la même fréquence et on suppose le gaz à l'équilibre thermique. Les vitesses suivant l'axe (Oz) se répartissent donc selon la distribution de Maxwell :

$$f_{v_z}(v_z) = \sqrt{\frac{m}{2\pi kT}} \exp\left(-\frac{mv_z^2}{2kT}\right)$$

$$v_z = c\left(1 - \frac{\nu}{\nu_{ul}}\right)$$

Donc : $\phi(\nu) = \frac{1}{\sqrt{\pi}\Delta\nu_D} \exp\left[-\left(\frac{\nu - \nu_{ul}}{\Delta\nu_D}\right)^2\right]$ où on définit la largeur Doppler thermique :

$$\Delta\nu_D = \frac{\nu_{ul}}{c}\sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

Echelle internationale pratique de température

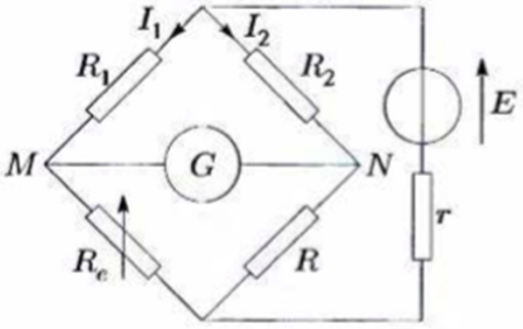
Points fixes	Température (K)
Point triple de l'hydrogène	13,81
Ébullition de l'hydrogène à 33 330,6 Pa	17,04
Ébullition de l'hydrogène	20,28
Ébullition du néon	27,10
Point triple de l'oxygène	54,36
Ébullition de l'oxygène	90,19
Point triple de l'eau	273,16
Ébullition de l'eau	373,15
Fusion du zinc	692,73
Fusion de l'argent	1 235,08
Fusion de l'or	1 337,58

Thermomètres à résistance de platine

Entre 273,15K et 903,89K : $R(T) = R_0[1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2]$ où R_0 est la résistance à 273,15K et A et B 2 constantes que l'on détermine en mesurant la résistance du fil de platine à 90K, 273,15K, 373,15K et 717,75K.

Entre 13,81K et 273,15K : $R = R_0[1 + A(T - T_0) + B(T - T_0)^2 + C(T - T_0)^3]$ où C est déterminée à 90K

La résistance du thermomètre est mesurée à l'aide d'un pont de Wheatstone équilibré (le courant dans la branche MN est nul) :

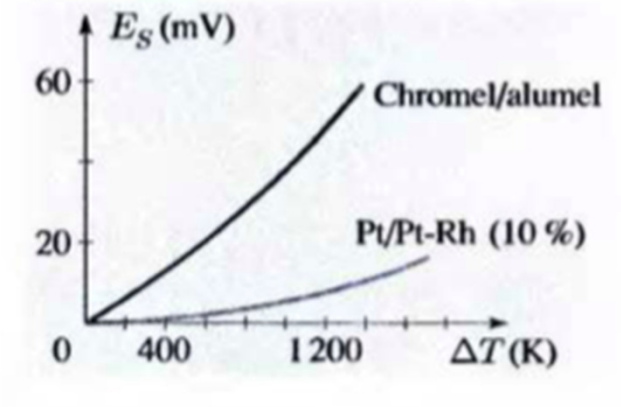


$V_M = V_N$

Donc : $R_1 I_1 = R_2 I_2$ et $R = R_2 * R_e / R_1$

Thermomètre à thermocouple

On commence par déterminer expérimentalement la loi d'évolution de la force électromotrice thermoélectrique en fonction de la variation de température. Cette force électromotrice est mesurée soit à l'aide d'une méthode d'opposition, soit par un voltmètre de très haute impédance d'entrée.



Le couple thermoélectrique étalon est le couple platine-platine rhodié à 10% .
Entre 903,65K et 1337,58K :

$$E_S(\Delta T) = a_0 + a_1\Delta T + a_2\Delta T^2$$

Où a_0, a_1 et a_2 sont déterminés à partir de la mesure de la fem aux températures de 3 points fixes.

Inconvénient : nécessité d'utiliser une température de référence. Ils présentent cependant l'avantage de pouvoir mesurer localement des températures.

Pyromètres optiques

Pour des températures supérieures à 1336K on utilise les relations entre la température d'un corps et le rayonnement que ce corps émet. Cette méthode présente l'avantage de déterminer sans contact la température d'un corps, celui-ci pouvant être situé à grande distance, comme en astronomie.

La formule de Planck décrit le rayonnement monochromatique du corps noir. On en déduit le rayonnement du corps considéré en multipliant le rayonnement du corps noir, à la même température, par son émissivité ε(λ, T). Le détecteur ne reçoit qu'une fraction K(λ) de cette puissance en raison du système optique placé entre la source et le détecteur et de l'absorption du rayonnement par les différents milieux traversés. Sa réponse se présente généralement sous la forme d'un signal électrique d'expression, si on désigne par s(λ) la sensibilité du détecteur :

$$\mathrm{d}\Phi_s = s(\lambda)\,K(\lambda)\,\varepsilon(\lambda,T)\,M_\lambda(\lambda,T)\,\mathrm{d}\lambda = s(\lambda)\,K(\lambda)\,\varepsilon(\lambda,T)\,\frac{c_1}{\lambda^5}\,\frac{\mathrm{d}\lambda}{\exp[c_2/(\lambda T)]-1}$$

Bibliographie

- Manomètre à membrane : wikipédia
- Baromètre à colonne de mercure : voilec.com
- Manomètre tube en U : wikipédia
- Raies spectrales d'un gaz : Ira.ens.fr
- Thermomètre à gaz : Perrez, thermodynamique
- Echelle internationale pratique de température : Perrez, thermodynamique
- Thermomètre à liquide : moineau-instrument.com
- Thermomètre à résistance variable : Perrez, thermodynamique
- Thermocouple : Perrez, thermodynamique