

THERMODYNAMIQUE

EXERCICES

2025-2026



C. Vouille, J. Biteau, N. Couchoud, C. Dudouit, M. Geoffroy, L. Ringuede

Données utiles

Accélération de la pesanteur : $g = 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Pression atmosphérique moyenne au-dessus de la mer : $P_{atm} = 1013 \text{ hPa}$.

Masses volumiques :

- $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (faible altitude)
- $\rho_{Hg} = 13590 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Masses Molaires :

	<i>H</i>	<i>C</i>	<i>N</i>	<i>O</i>	<i>Ne</i>	<i>Ar</i>
<i>M</i> ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)	1	12	14	16	20	40

Capacités thermiques :

- capacité thermique massique de l'eau : $c_{eau} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique massique de l'aluminium : $c_{Al} = 910 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique molaire à P constante de l'hélium : $c_p(\text{He}) = 20,79 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique molaire à V constant de l'hélium : $c_v(\text{He}) = 12,46 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- capacité thermique molaire à P constante de CO_2 : $c_p(\text{CO}_2) = 37,11 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Compressibilité isotherme du cuivre à 100 °C : $\chi_T(\text{Cu}, 100^\circ\text{C}) = 0,721 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$

Enthalpie de changement d'état de l'eau :

- enthalpie molaire de fusion de l'eau : $\Delta h_f(\text{eau}) = 6,018 \text{ kJ/mol}$
- enthalpie molaire de vaporisation de l'eau : $\Delta h_{vap}(\text{eau}) = 40,7 \text{ kJ/mol}$

TD1 - Notions fondamentales

- **Ce qu'il faut connaître**
 - **Dimensions, unités** : pression, température
 - **Loi de l'hydrostatique**
 - **Constantes** : nombre d'Avogadro (N_A), constante des gaz parfaits (R)
 - **Différence entre variable intensive et variable extensive**
 - **L'équation d'état du gaz parfait et les hypothèses du modèle**
 - **La loi de Dalton**

- **Ce qu'il faut savoir faire**
 - **Convertir pression et température dans les unités SI**
 - **Définir un système**
 - **Définir une transformation**
 - **Utiliser la loi de l'hydrostatique**
 - **Utiliser la loi des gaz parfaits et la loi de Dalton**

A. Questions de compréhension du cours

1. Pression, température

1.1. Pressions et températures : systèmes d'unité, ordres de grandeurs

- Quelle est l'unité de la pression dans le système international d'unités?
- Compléter le tableau suivant en faisant les bonnes conversions :

<i>bar</i>	0,503			
<i>Pa</i>		2.10^5		
<i>atm</i>			1	
<i>Torr</i>				80

- Quelle est l'unité de la température dans le système international d'unités?
- Compléter le tableau suivant en faisant les bonnes conversions :

$^{\circ}\text{C}$	25		
<i>K</i>		77	
$^{\circ}\text{F}$			451

- Déterminer la température à laquelle les échelles Fahrenheit et Celsius indiquent la même valeur.
- Rappeler les valeurs de P et T dans les Conditions Normales de Température et de Pression (CNTP).

1.2. Force et pression

Dans une même pièce, on verse de l'eau jusqu'à une même hauteur dans deux récipients A et B dont les surfaces des bases respectives sont telles que $S_A = 2S_B$. Que peut-on dire sur F_A et F_B les forces pressantes qui agissent sur les fonds des deux récipients :

- on ne peut rien dire
- $F_A = F_B$
- $F_A = 2F_B$
- $F_A = 1/2F_B$

1.3. Respirer avec un tuba

Un instrument très utile en plongée est le tuba, qui permet de respirer en gardant la tête sous l'eau. En utilisant le même principe, on pourrait imaginer prendre un tube de quelques mètres pour respirer au fond de l'eau. Expliquer pourquoi, en pratique, ce n'est pas une bonne idée.

2. Système, variables d'état

2.1. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

Un système thermodynamique est...

- un ensemble de particules séparé de l'extérieur par une paroi nécessairement réelle.
- « fermé » s'il ne peut échanger ni énergie ni matière avec l'extérieur.
- « ouvert » s'il peut échanger de la matière avec l'extérieur.
- « adiabatique » s'il est fermé et s'il ne peut pas échanger de travail avec l'extérieur.
- « adiabatique » s'il est fermé et si ses parois empêchent les transferts thermiques.
- « isolé » s'il ne peut échanger de l'énergie sauf avec son voisin le plus proche.
- « isolé » s'il ne peut échanger avec le milieu extérieur ni énergie ni matière.
- constitue avec le monde extérieur un système isolé que l'on nomme « Univers ».
- assimilable à l' « Univers » du point de vue thermodynamique s'il est fermé.

2.2. Parmi les systèmes définis ci-après, préciser s'il s'agit d'un système isolé, fermé ou ouvert :

- la matière solide d'une bougie allumée
- les haricots d'une boîte de conserve dans le placard
- un réveil matin en train de sonner
- l'eau liquide qui bout dans une casserole
- l'eau d'un circuit de radiateurs
- l'air contenu dans un piston étanche adiabatique
- du café dans une bouteille thermos fermée

2.3. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

Les paramètres d'état d'un système :

- sont des grandeurs nécessairement microscopiques
- sont éventuellement reliés entre eux par une ou plusieurs équations d'état
- sont intensifs s'ils restent identiques lorsqu'on réunit le système avec un système identique
- sont extensifs s'ils sont proportionnels à la quantité de matière

- e. sont extensifs dans le cas de la pression et de la température
- f. sont extensifs dans le cas du volume et du nombre de moles
- g. sont partout définis de façon uniforme au cours d'une transformation quelconque
- h. sont constants dans un système homogène
- i. ne sont pas nécessairement tous définis lorsque le système a retrouvé son état d'équilibre

3. Equilibres et Transformations

3.1. Equilibres

- a. Un barman prépare un diabolo-menthe en mélangeant du sirop de menthe et de la limonade. Définir le système et indiquer si un équilibre thermodynamique est possible.
- b. Le gaz (considéré comme parfait) dans un pneu de vélo à l'arrêt peut-il être considéré à l'équilibre ? Même question quand le vélo est en mouvement rectiligne uniforme avec une personne dessus. Même question quand le vélo freine.

3.2. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

Une transformation d'un système :

- a. est isotherme si la température finale est égale à la température initiale.
- b. est adiabatique si aucun transfert thermique n'a lieu avec le milieu extérieur
- c. est isobare si le volume reste constant.
- d. est monochore si le volume reste constant tout au long de la transformation.
- e. est réversible si le système peut revenir dans son état initial sans qu'il demeure dans l'univers des traces de l'opération.
- f. est réversible si les paramètres internes du système varient de manière continue.
- g. est irréversible si elle fait intervenir des phénomènes dissipatifs.

4. Gaz Parfaits

4.1. Modèle du gaz parfait

- a. Rappeler l'équation des gaz parfaits et les conditions d'application de ce modèle.
- b. Donner des exemples de gaz pouvant être considérés comme parfaits et d'autres où le modèle ne s'applique pas.
- c. Que peut-on dire concernant le domaine d'application de la loi des gaz parfaits à une température donnée :
 - elle est valable pour des faibles valeurs de pression ($P \approx 1 \text{ bar}$)

- elle est valable pour de hautes valeurs de pression ($P \gg 1 \text{ bar}$)
 - elle reste valable quelle que soit la pression appliquée au gaz.
- d. On considère une bouteille fermée de volume V contenant une quantité n de gaz. On la fait chauffer. Comment varie sa pression?
- e. On considère une bouteille fermée de volume V contenant une quantité n de gaz. On augmente la pression (avec une pompe à vélo par exemple) en rajoutant n' quantité de gaz. Que se passe-t-il ? On provoque ensuite l'ouverture brutale de la bouteille (en considérant que seule la quantité n' de gaz s'échappe). Qu'arrive-t-il au gaz de quantité n ?
- f. Un ballon de baudruche de volume V (pouvant varier) contient un gaz de quantité n dans les CNTP. On met ce ballon au congélateur de température $T = -20 \text{ }^\circ\text{C}$. Comment va varier V ? Calculer le rapport $V_{\text{initial}} / V_{\text{final}}$.

4.2. Manipulation de l'équation d'état du gaz parfait

- a. Calculer le nombre de molécules par cm^3 dans un gaz parfait à 27°C sous une pression de 10^{-6} atm .
- b. Calculer le volume occupé par une mole d'un gaz parfait à la température de 0°C sous la pression atmosphérique. En déduire l'ordre de grandeur de la distance moyenne entre molécules.
- c. Calculer le nombre de molécules d'air dans 1m^3 dans les CNTP (avec l'hypothèse que l'air n'est constitué que d'un seul type de molécules, ce qui est inexact). Calculer la densité de cet « air » en nombre de molécules par m^3 . Comparer à la densité moyenne de l'Univers de 6 protons / m^3 .

B. Exercices d'application

1. Baromètre de Torricelli

En 1643, Evangelista Torricelli développe à Florence le premier baromètre. Il consiste en un tube rempli de mercure qu'il retourne dans un récipient rempli également de mercure. A l'équilibre, il obtient un tube rempli jusqu'à une hauteur h de mercure liquide et au-dessus de la vapeur de mercure. Pour simplifier les calculs, on considère que le haut du tube est vide.

- Quelle est la pression atmosphérique moyenne à Florence, située 50 m au-dessus du niveau de la mer ?
- Quelle est la hauteur h de mercure mesurée dans le tube ?
- Expliquer pourquoi l'inclinaison du tube n'influe pas sur la hauteur mesurée.
- Si on effectue la mesure non plus à Florence mais au sommet du Kilimanjaro (altitude 5892 m), on mesure $h = 0,380$ m. Quelle est alors la pression atmosphérique à cette altitude ?
- En considérant que le haut du tube est vide, est-ce que l'on surestime ou est-ce que l'on sous-estime la pression mesurée ?

2. Plongée

Un plongeur en apnée (la pression du corps est donc égale à la pression ambiante) se trouve à une profondeur z de la surface de l'eau. On note P_0 la pression atmosphérique. On utilisera un axe orienté vers le bas Oz , tel que la surface de l'eau se trouve en $z = 0$.

On note :

- m_p la masse du plongeur
- $V_p(z) = V_{p0} + V(z)$ le volume total occupé par le plongeur où V_{p0} est le volume du plongeur hors sa cage thoracique et $V(z)$ le volume de l'air contenu dans les poumons.

- Donner l'expression de la pression $P(z)$ que subit le plongeur.
- En déduire la pression qui s'exerce sur les tympans du plongeur. Calculer cette pression s'il se situe à une profondeur $z_1 = 180$ cm puis $z_2 = 5$ m.

Le plongeur bloque sa respiration juste avant de descendre ($z = 0$) et le volume d'air retenu est alors V_0 . On considère que la température de l'air contenu dans ses poumons est constante (on considère l'air comme un gaz parfait).

- Pourquoi le volume de l'air emmagasiné dans les poumons dépend-il de z ?
- Exprimer $V(z)$ en fonction de P_0 , $P(z)$ et V_0 . Calculer $V(z_1)$ et $V(z_2)$ (on prendra $V_0 = 6.10^{-3}$ m³).

On définit la flottabilité d'un corps de masse m comme la résultante de la poussée d'Archimède et des forces de pesanteur : $\pi(z) - mg$.

e. Comment varie la flottabilité du plongeur quand la profondeur augmente ?

Afin de faciliter leur descente lors des premiers mètres, les plongeurs utilisent souvent un lest (on note m_l la masse du lest et on considère que le volume de la plaque de plomb est négligeable).

f. Exprimer $\vec{\pi}(z)$, la poussée d'Archimède subie par le plongeur.

g. Quelle relation doit-on avoir entre m_p , m_l , ρ_{eau} et $V_p(z_2)$ si, par sécurité, on souhaite que la flottabilité soit nulle en z_2 .

h. Déterminer m_l pour un plongeur de 80 kg et de volume $V_{p0} = 0,077 \text{ m}^3$.

3. Echelle absolue des températures

Un gaz quelconque peut être considéré comme presque parfait à faible pression, le gaz obéit alors à la loi des gaz parfaits (à haute pression le comportement du gaz obéit à une équation de type Van der Waals).

a. Représenter selon l'approximation des gaz parfaits les isothermes d'un gaz quelconque à basse pression dans un diagramme d'Amagat.

b. En extrapolant à $P = 0$ ces isothermes, on trouve $\frac{PV(100^\circ\text{C})}{PV(0^\circ\text{C})} = 1,3661$, indépendamment de la nature du gaz. En déduire la valeur de 0°C dans l'échelle thermodynamique de températures (échelle Kelvin).

4. Gaz parfait

On introduit $5,85 \text{ g}$ de néon (Ne) considéré comme gaz parfait dans un récipient indilatable, initialement vide de volume $V = 3,4 \text{ L}$ à $T_1 = -30^\circ\text{C}$. L'enceinte est ensuite portée à $T_2 = 700 \text{ K}$.

a. Définir le système.

b. Que peut-on dire de la transformation de (1) à (2) ?

c. Déterminer le nombre de moles de néon.

d. Déterminer P_1 puis P_2 .

5. Compresseur

Un compresseur aspire à température ambiante $4 \text{ m}^3/\text{mn}$ d'air à 1 bar et le refoule dans un réservoir de 5 m^3 . On cherche à évaluer le temps mis par le compresseur pour que le réservoir atteigne 8 bars.

- Définir le système contenu dans le réservoir avant et après la compression.
- Quel volume V' le compresseur doit-il aspirer et refouler dans le réservoir ?
- Quel est le temps mis par le compresseur ?

6. Loi de Dalton

- Définir x_i^{mol} , x_i^{vol} , x_i^{mas} les fractions molaire, volumique et massique du constituant i dans un mélange gazeux.
- Exprimer littéralement la fraction molaire, la fraction massique et la pression partielle de chaque constituant d'un mélange de gaz parfaits à partir de la fraction volumique.
- Application numérique*

La composition de l'air sec en % volumique est donnée dans le tableau ci-dessous :

Gaz	N_2	O_2	Ar
% volumique	78	21	1
% molaire			
% massique			
Pression partielle (bar)			

On se placera sous $P = 1 \text{ bar}$ à 20°C . On considère l'air et chacun de ses constituants comme des gaz parfaits. Compléter le tableau.

- Exprimer puis calculer le volume d'une mole de gaz parfait dans les conditions de la question précédente.
- A partir des fractions molaires, calculer la masse d'une mole d'air.
- En déduire la masse volumique de l'air dans ces conditions expérimentales.

C. Problèmes non détaillés

1. Volume d'une bulle d'air

Une bulle d'air, considérée comme un gaz parfait, prend naissance au fond d'un étang où la pression est $P_i = 3,03 \text{ atm}$ et la température $T_i = 7 \text{ }^\circ\text{C}$. Elle monte vers la surface dont la température est $T_f = 27 \text{ }^\circ\text{C}$ et qui est à la pression atmosphérique. Calculer le rapport des volumes de la bulle au fond de l'étang et à la surface.

2. Evaluer le risque d'intoxication au CO

Une concentration en monoxyde de carbone CO dans l'air de $0,4\%$ en volume suffit pour entraîner rapidement la mort. Un moteur de voiture de cylindrée moyenne produit facilement, surtout s'il est mal réglé, $0,6 \text{ moles}$ de CO par *minute* parmi ses gaz d'échappement.

Si l'on fait tourner imprudemment un tel moteur dans un garage supposé étanche dont les dimensions sont $5\text{m} \times 3,5\text{m} \times 2,5\text{m}$ et la température 25°C , au bout de combien de temps risque-t-on sa vie ? (On considérera que la pression totale reste constante et égale à 1 bar et l'on négligera la quantité de CO initialement présente dans le garage).

3. Hauteur des Montagnes

On imagine que l'on constitue en un point de la surface de la terre une colonne cylindrique verticale de hauteur h à partir de roches de masse volumique $\rho = 2.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

- En supposant que ces roches ne peuvent résister à une pression supérieure à $p_M = 2000 \text{ atm}$ sans se briser, calculer numériquement la valeur maximale de h . Comparer aux données géographiques concernant la hauteur des montagnes.
- Pour un astre grossièrement sphérique de rayon R qui serait constitué des roches décrites précédemment, montrer que la hauteur maximale des montagnes serait inversement proportionnelle à R .

Les données astronomiques sur la forme des planètes et des astéroïdes confirment-elles cette prédiction ?

TD2 – Outils mathématiques autour des variations de fonctions thermodynamiques

- **Ce qu'il faut connaître**
 - la différence entre différentielle et dérivées partielles
 - les expressions des coefficients thermométriques et leurs dimensions

- **Ce qu'il faut savoir faire**
 - Calculer une dérivée partielle
 - Vérifier si une forme différentielle est une différentielle totale exacte
 - Exprimer une fonction d'état à partir de sa différentielle

A. Questions de compréhension du cours

1. Différentielles, dérivées partielles

1.1. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

- la forme différentielle $\delta f = A(x, y)dx + B(x, y)dy$ représente la façon dont la grandeur f varie quand x et y varient d'une valeur infiniment petite.
- dans la forme différentielle $\delta f = A(x, y)dx + B(x, y)dy$, $A(x, y)$ et $B(x, y)$ représentent nécessairement les dérivées partielles de $f(x, y)$ par rapport à x et y .
- une dérivée partielle est une fonction de plusieurs variables.
- pour calculer une dérivée partielle on dérive par toutes les variables à la fois.
- pour calculer une dérivée partielle par rapport à une des variables, les autres sont considérées constantes.
- si la forme différentielle $\delta f = A(x, y)dx + B(x, y)dy$ est une différentielle totale exacte, il existe alors une fonction $f(x, y)$ appelée fonction d'état.
- si la forme différentielle $\delta f = A(x, y)dx + B(x, y)dy$ est une différentielle totale exacte, toutes les dérivées partielles secondes de f sont égales.
- si la forme différentielle $\delta f = A(x, y)dx + B(x, y)dy$ est une différentielle totale exacte alors

$$\frac{\partial A(x, y)}{\partial x} = \frac{\partial B(x, y)}{\partial y}$$

- la variation d'une fonction d'état sur un chemin fermé est non nulle.

1.2. Préciser pour chacune des expressions suivantes, si elles sont correctement écrites. Dans ce cas préciser si ce sont des formes différentielles ou des dérivées partielles. Si elles ne sont pas correctement écrites, proposer une correction pour qu'elles deviennent correctes :

- $\delta f = 3dx + 2x$
- $f = (x + y)dx + 5xydy$
- $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = dz$
- $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} = x + z$
- $\frac{\partial f(x, y)}{\partial x} dz = x + z$
- $\frac{\delta f}{f} = 3dx + 2xdy$

2. Représentations graphiques

Soit une fonction une fonction d'état $f(x, y) = 2x^2 + 2y$

- Écrire la différentielle de f
- Que doit-on faire pour représenter graphiquement f ?
- Représenter la variation de f en fonction de x pour $y = y_l = l$.
- Représenter en un point quelconque df pour une variation dx . Que représentent ces grandeurs ?
- Que représente $\frac{\partial f}{\partial x}$ sur la figure ?
- Que faut-il faire pour visualiser graphiquement $\frac{\partial f}{\partial x}$?

B. Exercices d'application

1. Différentielles, dérivées partielles

1.1. Soit la forme différentielle suivante :

$$\delta f = (x - y)dx + (x + y)dy$$

- Expliquer pourquoi le symbole δ a été utilisé de préférence au symbole d et le vérifier par le calcul.
- Calculer les intégrales de δf de $(0,0)$ à $(1,1)$ le long des trois chemins suivants :
 - $x = y$
 - $x = 0$ et $y: 0 \rightarrow 1$ puis $y = 1$ et $x: 0 \rightarrow 1$
 - $y = 0$ et $x: 0 \rightarrow 1$ puis $x = 1$ et $y: 0 \rightarrow 1$

1.2. Variation relative

- A partir de l'équation d'état d'un gaz parfait déduire une expression reliant les variations relative de la pression, du volume et de la température pour un gaz parfait.
- A partir d'un état d'équilibre du gaz parfait, la pression augmente de 1 % et la température de 2 %. Déterminer la variation relative du volume.

1.3. Coefficients thermo-élastiques

On définit les coefficients thermoélastiques par :

$$\alpha = \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P, \beta = \frac{1}{P} \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V \text{ et } \chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$$

- Ces coefficients sont-ils intensifs ou extensifs ? Que représentent-ils ?
- Exprimer $\left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P$ en fonction de $\left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_V$ et de $\left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T$.
- Montrer que $\alpha = \beta \chi_T P$
- Déterminer α , β et χ_T pour un gaz parfait. Le résultat sera-t-il différent si on les calcule pour 1 mole ou pour 1 kg ?

1.4. Equation d'état

On considère un système fermé dont l'état est décrit par les variables P , V et T (pression, volume et température). Celles-ci satisfont une équation d'état dont la forme différentielle peut s'écrire :

$$\frac{dV}{V} = \frac{A}{PV} dT - \left(\frac{1}{P} + \frac{a}{V} \right) dP \quad (1)$$

où a et A sont des constantes.

- Quelles sont les dimensions de a et A ?
- Montrer que l'expression (1) peut s'écrire pour ce gaz sous la forme :

$$AdT = d(PV) + aPdP .$$

- En déduire l'équation d'état.

2. Représentation graphique des états d'un gaz parfait dans un diagramme P(V)

- Comment s'appelle le diagramme représentant la variation de la pression d'un système en fonction du volume molaire ou massique ?
- Un gaz parfait subit une transformation entre un état (1) défini par P_1, T_1, V_1 à un état (2) défini par $P_2, T_1, 2V_1$. Représenter les états (1) et (2) dans un diagramme de Clapeyron.
- Sachant que la transformation entre les deux états est considérée comme réversible, représenter la variation de la pression tout au long de la transformation entre les deux états. Comment qualifie-t-on ce genre de courbe ?
- Comment peut-on retrouver graphiquement la valeur de χ_T défini dans l'exercice précédent ?
- Que devient le diagramme de la question (c) si la transformation est irréversible ?

C. Problèmes non détaillés

1. Une ampoule de verre est emplies de liquide puis scellée. Quelle variation de température peut-elle supporter si elle ne peut résister à une surpression de 10 bars ?

On donne pour le liquide : $\alpha = 6.810^{-4} K^{-1}$ et $\chi = 8.510^{-10} Pa^{-1}$.

2. Montrer que pour une substance quelconque le coefficient de dilatation isobare et le coefficient de compressibilité isotherme satisfont à la relation :

$$\left(\frac{\partial \alpha}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial \chi}{\partial T}\right)_P$$

3. Soient deux fonctions $H(T,P)$ et $V(T,P)$.

Montrer que :

$$\left(\frac{\partial H}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_T \text{ et } \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_V = \left(\frac{\partial H}{\partial T}\right)_P + \left(\frac{\partial H}{\partial P}\right)_T \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$$

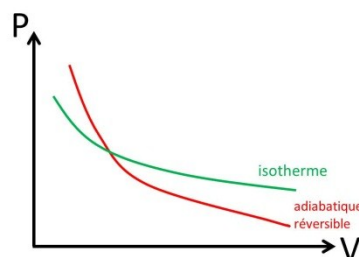
4. A quelle condition l'expression

$$dH = \left(A + \frac{3BP}{T^4}\right) dT - \frac{C}{T^3} dP$$

où A, B et C sont des constantes non-nulles, peut-elle être intégrée ? En supposant cette condition satisfaite, effectuer l'intégration entre les points (P_1, T_1) et (P_2, T_2) .

5. On appelle χ_T et χ_S les coefficients de compressibilité isotherme et adiabatique réversible (isentropique ou isoS) définis de façon suivante :

$$\chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_T \text{ et } \chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P}\right)_S$$



Les courbes isothermes et isentropiques sont représentées sur le diagramme ci-dessus. Que peut-on dire des coefficients χ_T et χ_S ?

TD3 – Travail, chaleur premier principe

- **Ce qu'il faut connaître**
 - **Dimensions-unités : énergie**
 - **définition du travail élémentaire**
 - **condition sur la pression dans le cas d'une transformation réversible**
 - **définition de la chaleur élémentaire**
 - **définition de l'énergie interne**
 - **définition de l'enthalpie**
 - **différence fondamentale entre travail et chaleur et énergie interne et enthalpie**
 - **la variation d'énergie interne de l'enthalpie au cours une transformation cyclique**
 - **les dimensions et unités du travail, de la chaleur, de l'énergie interne et de l'enthalpie**

- **Ce qu'il faut savoir faire**
 - **exprimer le travail échangé au cours d'une transformation**
 - **exprimer la chaleur échangée au cours d'une transformation**
 - **écrire et utiliser le premier principe**
 - **exprimer la variation d'enthalpie entre deux états**

A. Questions de compréhension du cours

1. Energie : systèmes d'unité, ordres de grandeurs

Compléter le tableau suivant en faisant les bonnes conversions et indiquer quelle est l'unité du système international (SI) :

	Énergie ingérée par jour (nourriture)	Énergie libérée par la combustion d'une mole de méthane	Énergie potentielle électrique d'un électron dans un potentiel de 1 V	Consommation électrique journalière moyenne d'un ménage français
kcal	2000			
Joules		$891 \cdot 10^3$		
eV			1	
kWh				12

2. Travail, Chaleur

2.1. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

- Le travail des forces de pression est négligeable pour un système condensé.
- Le travail élémentaire n'est pas une différentielle totale exacte.
- Le travail échangé au cours d'une transformation cyclique est toujours nul.
- La chaleur est une fonction d'état.
- Si le travail échangé par un système est négatif alors le travail est moteur.
- Un thermostat est un système qui n'échange pas d'énergie.
- Un thermostat est un système dont la température ne varie pas.

3. Energie interne et premier principe

Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

- L'énergie interne est une grandeur extensive.
- L'enthalpie est une grandeur intensive.
- L'enthalpie est une énergie.
- D'après le premier principe, l'énergie interne est égale à la somme du travail et de la chaleur échangés.
- Au cours d'une transformation, ΔU ne dépend pas du chemin suivi.
- L'enthalpie est une fonction d'état.
- Pour une transformation cyclique $dU = 0$.
- Pour un système isolé $\Delta U = 0$.

B. Exercices d'application

1. Ordres de grandeurs, dimensions

- a. Calculer l'ordre de grandeur du travail de gonflage d'un ballon :
 - i. dans le cas d'une montgolfière sphérique de rayon 10 m
 - ii. dans le cas d'un petit ballon de baudruche de rayon 10 cm .
 - iii. dans chacun des cas précédents trouver une énergie potentielle de pesanteur équivalente (en fixant soit une masse, soit une hauteur d'élévation).
- b. Une résistance chauffante de 50 W est immergée dans un récipient contenant $1,0\text{ L}$ d'eau à 20°C . Combien de temps faut-il pour élever la température de l'eau à 100°C ?
- c. Un bloc d'aluminium à 200°C est immergé dans 5 kg d'eau à la température ambiante (20°C). L'ensemble atteint une température d'équilibre de 300 K . Quelle est la masse du bloc de métal ?

2. Travail, chaleur

2.1. Travail d'un gaz dans un piston

Un gaz est placé dans un cylindre fermé par un piston d'abord maintenu immobile. Il occupe alors un volume V_1 et sa pression P_1 est supérieure à la pression atmosphérique P_a qui s'exerce sur la face extérieure du piston. Le piston est soudainement lâché et le gaz occupe alors un volume V_2 à une pression P_2 .

- a. Décrire le système, l'état 1 et l'état 2 : comparer P_1 et P_2 ainsi que V_1 et V_2 et représenter ces deux états dans un diagramme de Clapeyron.
- b. Déterminer le travail échangé par le système. Est-il moteur ou résistant ?

2.2. Travail d'une mole de gaz réel

Une mole de gaz réel d'équation d'état

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right)V = RT$$

subit une transformation isotherme réversible entre un état (A) et un état (B).

On donne $T_A = 301\text{ K}$; $V_A = 5,0\text{ L}$; $V_B = 0,50\text{ L}$ et $a = 0,135\text{ m}^6\text{Pa}\cdot\text{mol}^{-2}$.

- a. Exprimer P_A et P_B en fonction des données, puis les calculer.
- b. Exprimer puis calculer le travail W_{AB} .
- c. Comparer avec le travail qu'on obtiendrait pour une mole de gaz parfait.

2.3. Equilibre thermique

On cherche à déterminer la capacité thermique d'un solide. Pour cela on l'immerge dans une grande quantité d'eau maintenue à $T_1 = 100\text{ }^\circ\text{C}$. Lorsque l'équilibre est atteint, on le retire et on l'immerge dans $m_e = 100\text{ g}$ d'eau à $T_2 = 20,00\text{ }^\circ\text{C}$. On considère que les échanges thermiques n'ont lieu qu'entre le solide et l'eau. Lorsque l'équilibre est atteint, la température de l'eau est à $T_3 = 22,41\text{ }^\circ\text{C}$.

- Quel rôle l'eau maintenue à $100\text{ }^\circ\text{C}$ joue-t-elle ? Comment appelle-t-on un tel système ?
- Quelle est la température du solide lors du premier équilibre ?
- Quelle est la température du solide lors du deuxième équilibre ?
- Exprimer la chaleur échangée par le solide au cours de la deuxième transformation (préciser les signes).
- On considère le système $\{m_e + \text{solide}\}$. Quelle est la chaleur échangée par le système ?
- En déduire l'expression de C_s , la capacité thermique du solide en fonction de T_1 , T_2 et T_3 et de c_e , la capacité calorifique massique de l'eau. Faire l'application numérique.

2.4. Capacité thermique dépendante de la température

Aux faibles pressions, la capacité thermique massique à pression constante d'un gaz diatomique peut s'exprimer par la relation empirique

$$C_p = A_0 - \frac{A_1}{T} + \frac{A_2}{T^2}.$$

- Quelles sont les dimensions de A_0 , A_1 et A_2 ?
- Exprimer la quantité de chaleur δQ échangée par une masse m de ce gaz s'il subit une variation de température dT à faible pression P constante.
- En déduire l'expression de la quantité de chaleur Q_{12} qu'il faut fournir à n moles d'un tel gaz, de masse molaire M , pour porter sa température de T_1 à T_2 .
- Application numérique :

Calculer Q_{12} pour une mole de monoxyde de carbone.

On donne : $T_1 = 27\text{ }^\circ\text{C}$ et $T_2 = 127\text{ }^\circ\text{C}$ avec $A_0 = 1,4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$, $A_1 = 492\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$ et $A_2 = 16\text{ }10^4\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}$.

3. Energie interne et premier principe

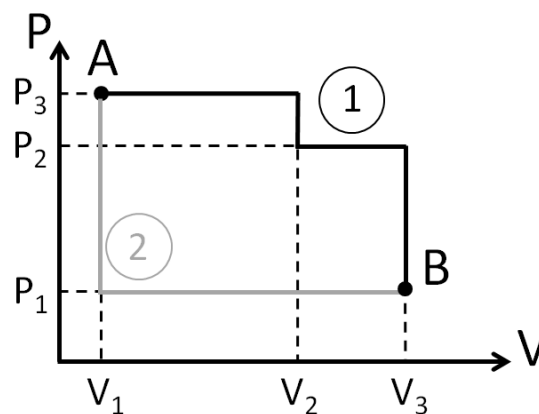
3.1. Premier principe

- Un système reçoit une quantité de chaleur de 500 J et exécute un travail de 250 J sur son environnement. Quelle est la variation de son énergie interne ?
- Un système reçoit 150 J de travail tandis que son énergie interne diminue de 300 J . Déterminer la chaleur échangée par le système (on précisera s'il s'agit de chaleur transférée ou reçue).
- Un échantillon de gaz de 100 g est contenu dans un réservoir scellé, indéformable et isolé. De la chaleur est lentement transférée à ce gaz (par un chauffage électrique) et son énergie interne augmente de 500 J . Déterminer la quantité de chaleur qu'il a reçue.

3.2. Fonctions d'état et grandeurs de parcours

On veut comparer les échanges d'énergie pour un système qui évolue d'un état (A) vers un état (B) selon deux chemins représentés sur la figure ci-dessous. La transformation (AB) est adiabatique sur le chemin (1).

- Comment s'appelle le diagramme représenté par la figure ?
- Donner l'expression de W_1 et W_2 , les travaux correspondant respectivement au chemin (1) et au chemin(2) pour aller de A vers B.
- Comment peut-on visualiser ces travaux sur le diagramme $P(V)$?
- Quel est le travail fourni si le système retourne à l'état (A) en reprenant le même chemin dans le sens inverse ?
- Quelle est la variation de l'énergie interne si la transformation A-B est effectuée de manière adiabatique par le chemin 1 ?
- Le retour de l'état (B) à l'état (A) par le chemin (2) est-il adiabatique ?
- Quelle est la variation d'enthalpie entre les états (A) et (B) ?



C. Exercices non détaillés

1. Chauffage par agitation

Un réservoir rigide et calorifugé contient $m = 1\text{ kg}$ d'hélium gazeux à la température $T_1 = 300\text{ K}$ et à la pression $P_1 = 3\ 105\ \text{Pa}$. L'hélium est brassé à l'aide d'un agitateur de puissance utile 15 W . On le fait fonctionner pendant $\tau = 30\ \text{min}$.

Déterminer la température finale de l'hélium.

2. Freinage d'une voiture

Une voiture de $836\ \text{kg}$ roulant à $72\ \text{km/h}$ s'arrête brusquement à l'aide de ses quatre freins à disques. En assimilant ces derniers à des cylindres de $10\ \text{cm}$ de rayon et de $1\ \text{cm}$ d'épaisseur, de masse volumique $\delta\ \text{g/cm}^3$, de capacité calorifique massique $0.42\ \text{J. g}^{-1}.\text{K}^{-1}$, calculer leur élévation de température en supposant que toute la chaleur est absorbée par les disques.

3. Puissance d'un corps humain

En faisant l'hypothèse qu'un humain moyen consomme $3000\ \text{kcal}$ par 24 h de nourriture et qu'il les convertit intégralement en chaleur constante, calculer la puissance émise en W .

4. Travail de compression d'un solide (difficile)

Un solide a une compressibilité isotherme χ_T constante. Il subit une transformation isotherme et quasi statique telle que la pression passe de la valeur P_1 à la valeur $P_2 > P_1$.

Exprimer le travail reçu de l'extérieur en fonction de P_1 et de P_2 .

Application : Calculer le travail nécessaire pour comprimer $1\ \text{dm}^3$ de cuivre de 1 à $100\ \text{bars}$ à la température constante $T = 100^\circ\text{C}$.

TD4 – Application du premier principe aux gaz parfaits et aux changements d'états

- **Ce qu'il faut connaître**
 - les deux lois de Joule
 - la relation de Mayer
 - les valeurs des capacités thermiques molaires et massiques des gaz parfaits monoatomiques et diatomiques.
 - les lois de Laplace
 - l'expression des variations d'énergie de changement d'état d'un corps pur

- **Ce qu'il faut savoir faire**
 - définir les paramètres d'états et les échanges d'énergie d'un gaz parfait en fonction des transformations subies
 - exprimer les variations d'énergie au cours d'un changement d'état

A. Questions de compréhension du cours

1. Parmi les affirmations suivantes, repérer les affirmations erronées et expliquer pourquoi elles ne sont pas correctes :

- a. Au cours d'une transformation d'un gaz parfait, le travail ne dépend que de la température.
- b. Au cours d'une transformation isotherme d'un gaz parfait, la chaleur est nulle.
- c. Au cours d'une transformation d'un gaz parfait, l'énergie interne ne dépend que de la température.
- d. Au cours d'une transformation d'un gaz parfait, l'enthalpie ne dépend ni de la pression, ni du volume.
- e. Au cours d'une transformation isochore d'un gaz parfait, le travail est nul.
- f. Au cours d'une transformation adiabatique réversible d'un gaz parfait, la variation de l'énergie interne d'un gaz parfait est nulle.
- g. Les lois de Laplace s'appliquent pour n'importe quel gaz soumis à une transformation adiabatique réversible.
- h. La chaleur nécessaire pour faire fondre un solide est la même que celle nécessaire pour le solidifier.
- i. Sur un diagramme de phase d'un corps pur, le point critique est le point où coexistent les trois phases.
- j. Au cours d'un changement de phase d'un corps pur, la pression et la température sont constantes.

2. Expression des chaleurs molaires d'un gaz parfait en fonction du coefficient γ

Soient c_p la capacité thermique molaire à pression constante et c_v la capacité thermique molaire à volume constant d'un gaz parfait.

- a. Rappeler l'expression du coefficient γ en fonction de c_p et c_v .
- b. Rappeler la relation de Mayer entre c_p et c_v .
- c. Dédurre de ces deux relations, les expressions de c_p et c_v en fonction de γ et de R .

B. Exercices d'application

On supposera que les capacités thermiques molaires sont indépendantes de la température dans une phase donnée.

1. Echauffement d'un gaz parfait

On chauffe progressivement 110 g de CO_2 (que l'on considérera comme un gaz parfait) de 300 K (état 1) à 500 K (état 2) à pression ambiante.

- Définir le système, les paramètres d'état et la transformation subie par le gaz.
- Déterminer le travail et la chaleur échangés par le gaz au cours de la transformation.
- Même question que précédemment si maintenant le gaz est contenu dans une ampoule scellée, indéformable avec les mêmes conditions initiales.
- Pour chacun des cas précédents déterminer la variation d'énergie interne.

2. Transformation isotherme, transformation monotherme

On considère n mole de gaz parfait enfermées dans un cylindre fermé par un piston (qui glisse sans frottement dans le cylindre). On veut calculer le travail et la chaleur échangés lors de la détente de ce gaz parfait depuis un état 1 ($P_1 = 2 \text{ bar}$, $V_1 = 1 \text{ litre}$, $T_1 = 298 \text{ K}$) à un état 2 ($P_2 = 1 \text{ bar}$, $V_2 = 2 \text{ litres}$, $T_2 = 298 \text{ K}$). Le piston est initialement bloqué.

- On réalise cette transformation de manière isotherme, en faisant varier très lentement la pression de sorte que la pression extérieure est égale à la pression à l'intérieur de l'enceinte à chaque instant pour passer de l'état 1 à l'état 2 (le piston est lentement relâché). Exprimer en fonction des différentes variables d'état :
 - le travail,
 - la chaleur échangée et la variation d'énergie interne.
- On remplace la transformation isotherme précédente par une transformation monotherme au cours de laquelle la pression varie brusquement de P_1 à $P_2 = P_{ext}$ (le piston est brusquement lâché) à volume constant, puis le volume augmente à pression constante. Reprendre les 2 questions de la partie (a).
- Représenter les deux états et les parcours des questions (a) et (b) pour aller de (1) à (2).
- Comparer graphiquement les résultats obtenus : les transformations (a) et (b) sont-elles réversibles ?
- Comparer le travail échangé dans les deux cas (a) et (b). Que peut-on en conclure sur W ?

3. Transformation adiabatique

Un gaz parfait diatomique de volume $V_1 = 10$ litres à la pression P_1 se détend de manière adiabatique réversible jusqu'à $V_2 = 2V_1$ à la pression P_2 .

- Rappeler les valeurs de c_p et c_v molaires pour un gaz diatomique.
- Exprimer le travail de détente W_{12} du gaz en fonction de V_1, P_1, V_2, P_2 et γ .
- Exprimer P_2 en fonction de V_1, P_1, V_2 et γ et en déduire W_{12} en fonction de V_1 et P_1 .
- La détente produit un travail de 1kJ , quelle était la valeur de P_1 ?

4. Transformation cyclique de deux moles de dioxygène

On considère 2 moles de dioxygène (supposé gaz parfait) occupant le volume V_A à la température $T_A = 320\text{ K}$ sous la pression $P_A = 0,8\text{ bar}$.

Cette masse de gaz effectue le cycle suivant :

- étape $A \rightarrow B$: compression isotherme réversible jusqu'à $P_B = 8\text{ bar}$
 - étape $B \rightarrow C$: échauffement isobare réversible
 - étape $C \rightarrow A$: détente adiabatique réversible
- Pour chaque état, exprimer les paramètres d'état P, V et T en fonction des données P_A, P_B, V_A et T_A .
 - Reproduire les résultats dans le tableau ci-dessous en indiquant également les différentes valeurs calculées des pressions (*en bar*), volumes (*en litre*) et température (*en K*) des états (A), (B) et (C).

	Etat (A)	Etat (B)	Etat (C)
P			
$P(\text{bar})$			
V			
$V(\text{L})$			
T			
$T(\text{K})$			

- Représenter le cycle dans un diagramme de Clapeyron ainsi que dans un diagramme $T(V)$.

- d. Exprimer pour chaque étape du cycle : le travail, la chaleur, ΔU et ΔH en fonction des données P_A , P_B , V_A et T_A .
- e. Reporter les résultats obtenus ainsi que les valeurs numériques calculées dans le tableau suivant :

	<i>Etape A → B</i>	<i>Etape B → C</i>	<i>Etape C → A</i>	<i>Cycle</i>
W				
$W (J)$				
Q				
$Q (J)$				
ΔU				
$\Delta U (J)$				
ΔH				
$\Delta H (J)$				

5. Changements d'état de l'eau

5 g d'eau subissent à pression constante (1 bar) les transformations suivantes :

Etape (A) → (B) : glace à 0°C ; état final : liquide à 0°C

Etape (B) → (C) : liquide à 0°C ; état final : liquide à 100°C

Etape (C) → (D) : liquide à 100°C ; état final : vapeur à 100°C

Etape (A) → (D) : glace à 0°C ; état final : vapeur d'eau à 100°C

- Définir le système puis les paramètres d'états pour chaque état intermédiaire ainsi que les transformations successives subies par le système.
- Indiquer pour chaque étape comment varie le volume et si on peut négliger la variation de volume associée.
- Calculer pour chaque étape : W , Q , ΔU et ΔH .

C. Exercices non détaillés

1. Calculs de c_p et c_v massiques

La masse volumique d'un gaz parfait diatomique est de $1,25 \text{ kg.m}^{-3}$ dans les conditions normales. Calculer c_p et c_v massiques.

2. Transformation isobare

Calculer Q , W et ΔU pour élever de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ la température de 10g d'argon lors d'une transformation isobare.

3. Compression isotherme

$0,5 \text{ kg}$ d'air sont comprimés de manière isotherme de 1 à 10 bars , ce qui demande un travail de 103 kJ . La chaleur perdue au cours de cette transformation est ensuite restituée au fluide, à pression constante. Calculer la température et le volume dans l'état final.

4. Dégivrage d'un pare-brise

Une couche de glace d'épaisseur $1,0 \text{ mm}$ couvre le pare-brise d'une voiture. Que doit-être la puissance d'une résistance chauffante pour faire fondre cette glace en 2 mn quand la température de l'air est à 0°C ?

6. Vaporisation isotherme d'un liquide

Un récipient cylindrique, perméable à la chaleur, fermé par un piston de section σ , contient n moles d'un fluide. Le récipient est plongé dans un thermostat à la température T_0 .

A l'instant initial, le fluide est liquide mais on relève la présence d'une quantité négligeable de molécules sous forme vapeur.

A partir d'une hauteur $z = 0$, le piston se soulève lentement, jusqu'à une hauteur z suffisamment grande pour pouvoir négliger le volume initial du fluide devant le volume final. On observe que le liquide se vaporise à mesure que le volume augmente.

- Quelle est la pression du fluide tant que le liquide n'est pas entièrement vaporisé ?
- Exprimer la hauteur z_0 du piston correspondant à l'évaporation de la dernière goutte de fluide (on considérera que le fluide est un gaz parfait sous sa forme gazeuse).
- Quelle est la pression du fluide quand la hauteur du piston dépasse z_0 ?
- Exprimer les chaleurs échangées dans les deux cas $z < z_0$ et $z > z_0$.
- En déduire les variations d'enthalpie ΔH correspondantes.