Thème III. L'énergie : conversions et transferts (Thermodynamique)

TD n°17 Descriptions microscopique et macroscopique d'un système à l'équilibre

Capacités \ Exercice n°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Connaître et utiliser l'équation d'état des gaz parfaits.	✏		✏				✏			
Comparer le comportement d'un gaz réel au modèle du gaz parfait sur des réseaux d'isothermes expérimentales en coordonnées de Clapeyron ou d'Amagat.							✏			
Calculer une pression à partir d'une condition d'équilibre mécanique.			✏			✏		✏		
Déduire une température d'une condition d'équilibre thermique.			✏			✏		✏		
Positionner les phases dans le diagramme (P, T).				✏						
Analyser un diagramme (P, T).				✏						
Positionner les phases dans un diagramme (P, v).					✏					
Déterminer la composition d'un mélange diphasé en un point d'un diagramme (P, v).					✏					
Utiliser la notion de pression partielle pour adapter les connaissances sur l'équilibre liquide-vapeur d'un corps pur au cas de l'évaporation en présence d'une atmosphère inerte.									✏	

Parcours possibles

- Si vous avez des difficultés sur ce chapitre : n°1, n°2, n°3, n°4 et n°5
- Si vous vous sentez moyennement à l'aise, mais pas en difficulté : n°1, n°3, n°5, n°6
- Si vous êtes à l'aise : n°6, n°7, n°8, n°9

I Exercices d'application directe du cours

Exercice n°1 Gonflage d'une chambre à air

Une chambre à air de volume constant $V_c = 6\ \text{dm}^3$ contient initialement de l'air (assimilé à un gaz parfait) sous une pression $P_0 = 1$ bar.
On souhaite porter la pression dans la chambre à air à la valeur $P_1 = 5$ bar à l'aide d'une pompe à main constituée d'un cylindre de volume $V_0 = 125\ \text{cm}^3$ et d'un piston coulissant permettant de refouler la totalité de l'air continue dans le cylindre à la pression P_0.
L'opération de gonflage a lieu à température constante $T_0 = 17\ °\text{C}$. On donne la masse volumique de l'air $\rho(T_0, P_0) = 1,3\ \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$.

Q1. Exprimer la quantité de matière initiale dans la chambre à l'air, et la quantité de matière finale.

Q2. Exprimer la quantité de matière que la pompe peut refouler dans la chambre à air au cours d'un coup de pompe.

Q3. En déduire le nombre de coups de pompe nécessaire pour mener la chambre à air jusqu'à la pression P_1, en fonction de P_0, P_1, V_c et V_0.

Q4. Quelle est la pression dans la roue après k coups de pompe ?

Q5. Quelle est la masse d'air contenue dans la chambre à air à l'état final en fonction de ρ_0, V_c, P_0 et P_1 ?

Exercice n°2 Variations d'énergie interne

Q1. Calculer la variation d'énergie interne de 25 cL d'eau liquide initialement à 15 °C et finalement à 100 °C.

Q2. Calculer la variation d'énergie interne d'une mole de vapeur d'eau dont la température passe de 115 °C à 200 °C, à volume constant.

Q3. Calculer la variation d'énergie interne d'une mole d'hélium initialement à 10 °C à 35 °C. On assimilera l'hélium à un gaz parfait.

Q4. À la fin de la descente du cycliste, les disques du vélo sont à une température de 220 °C (contre 20 °C initialement). Leur masse est de $m = 0,5$ kg et la capacité thermique massique de l'acier est $c_V \approx 1000$ J $\cdot$ K^{-1} $\cdot$ kg^{-1}. Calculer leur augmentation d'énergie interne.

Exercice n°3 Gaz parfait dans une enceinte

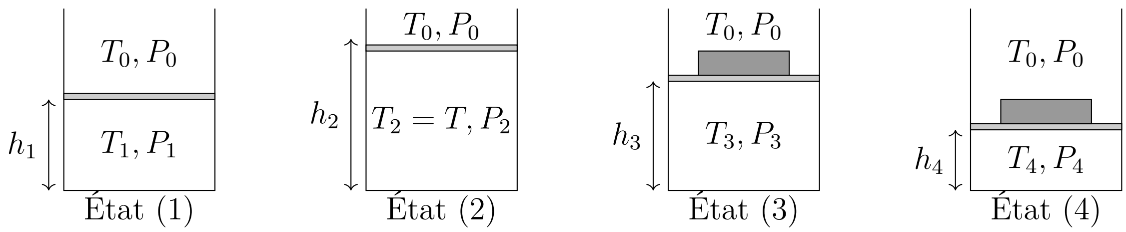
On enferme une quantité n de gaz parfait dans une enceinte fermée par une paroi mobile de section S et de masse m pouvant coulisser sans frottement. On considère que les parois sont diathermanes sur un temps long (permettent les échanges d'énergie thermiques). La pression de l'atmosphère extérieure est constante et notée P_0. On fait subir au système les transformations suivantes :

— Dans l'état (1), le système est au repos depuis suffisamment longtemps pour avoir atteint l'équilibre thermique et mécanique ;

— Le gaz est chauffé jusqu'à ce qu'il atteigne la température $T > T_0$, plaçant le système dans l'état (2) ;

— Une masse supplémentaire M est brusquement placée par dessus le piston : avant tout transfert thermique, le système est dans l'état (3) ;

— Enfin, l'équilibre thermique est atteint, le système est alors dans l'état (4).



Q1. Déterminer la température du gaz dans l'état (1) et l'état (4).

Q2. En étudiant l'équilibre du piston, exprimer la pression qui règne dans l'enceinte dans les états (1) et (2). Faire de même pour les états (3) et (4)

Q3. Exprimer les hauteurs h_i dans les quatre états, en fonction de n, S, m, M, T_0, T, T_3, P_0, g et R.

Exercice n°4 Lecture d'un diagramme (P, T)

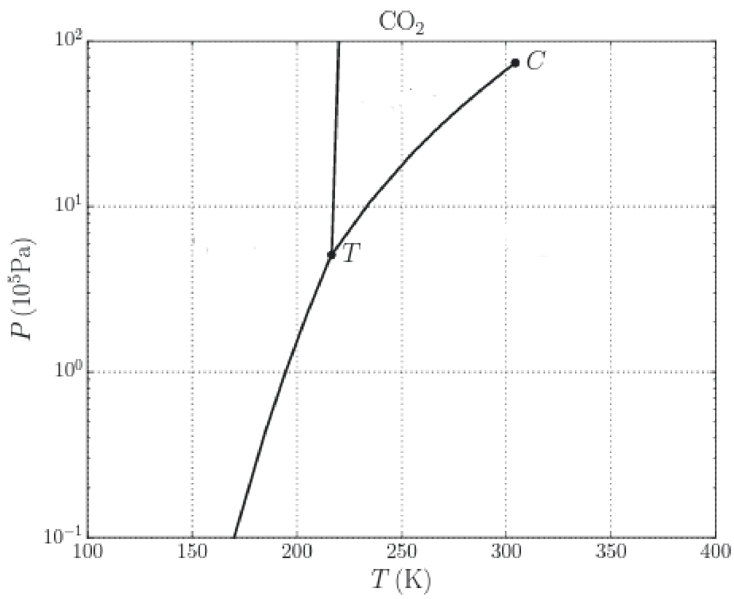
La figure ci-contre montre le diagramme (P, T) du dioxyde de carbone.

Q1. Placer les phases sur le diagramme.

Q2. On se place dans les conditions initiales suivantes $T_i = 250$ K, $P_i = 10$ bar.
Placer ce point dans le diagramme (P, T) et en déduire dans quelle phase se trouve le dioxyde de carbone dans l'état initial.

Q3. Partant de cet état, on comprime lentement le dioxyde de carbone à température constate, pour terminer à la pression $P_f = 50$ bar. Placer le point final sur le graphe, en déduire dans quelle phase se trouve le dioxyde de carbone dans l'état final. Décrire alors les différentes étapes de cette compression.

Q4. Tracer l'allure du graphe qui représente la pression du CO_2 en fonction du temps.



Q5. Faire la même analyse si à la place d'une compression isotherme, on réalise un refroidissement lent à pression constante amenant le CO_2 dans l'état final $T'_f = 200$ K, $P'_f = 10$ bar. On tracera cette fois l'évolution de la température avec le temps.

Exercice n°5 Règle des moments

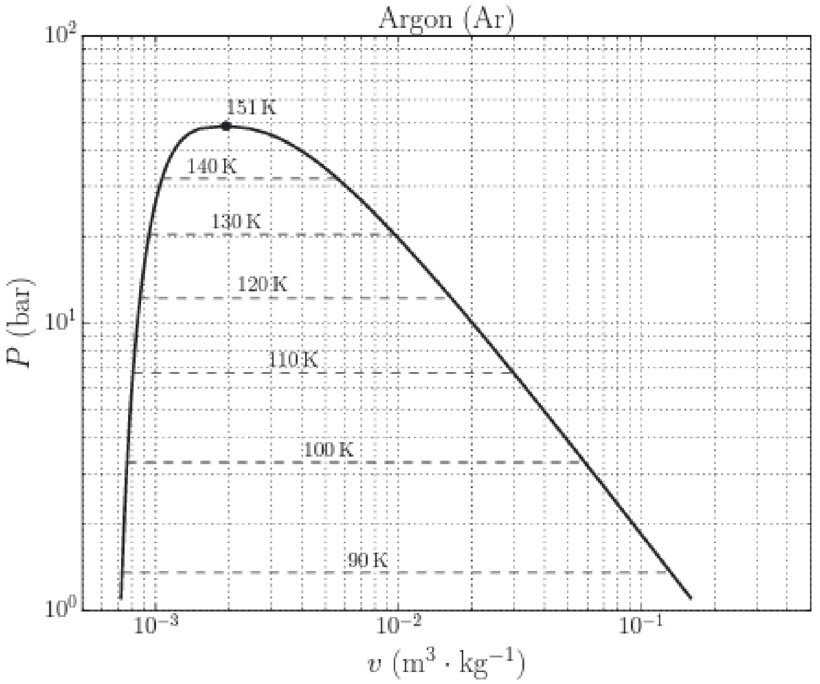
On considère une masse $m = 1,0$ kg d'argon enfermée dans une enceinte indéformable de volume $V_0 = 1,0.10^{-2}$ m^3, à la température $T_i = 90$ K. La figure ci-dessous montre le diagramme de Clapeyron de l'argon, de masse molaire $M_{Ar} = 40$ g $\cdot$ mol^{-1}.

Q1. Indiquer sur ce diagramme les zones correspondant à l'argon liquide, gazeux, et diphasé.

Q2. Compléter ce diagramme en traçant l'allure des isothermes $T = 90$ K et $T = 120$ K.

Q3. Placer sur le graphe le point I correspondant aux conditions de température et de volume données ci-dessus. En déduire la fraction massique $x_{I,\ell}$ en argon liquide présent initialement dans l'enceinte, ainsi que la pression de vapeur saturante de l'argon à 90 K.

Q4. On chauffe à présent l'enceinte jusqu'à la température de 120 K. Indiquer sur le graphe la position du point final F, et le chemin suivi pour aller de I à F. Déterminer la fraction massique $x_{F,\ell}$ en argon liquide présent dans l'enceinte dans l'état final, ainsi que la valeur de la pression de vapeur saturante de l'argon à 120 K. Le mélange s'est-il appauvri ou enrichi en liquide ?



Q5. Déduire du graphe la température minimale à imposer à l'enceinte pour que l'argon soit entièrement sous forme gazeuse. À quelle pression correspond-elle ?

II Exercices d'approfondissement

Exercice n°6 Équilibre d'un piston *(d'après oral CCP)*

Un récipient aux parois diathermane (permettant l'équilibre thermique avec l'extérieur) est fermé par un piston lui-même diathermane, dont la masse sera négligée.
Le récipient contient une mole d'eau dont la fraction en vapeur sera considérée comme un gaz parfait.
À l'état initial d'équilibre, le piston est bloqué de telle sorte que le volume du récipient soit égal à $V_i = 0,10$ m^3.
On note T_i, P_i respectivement la température initiale et la pression initiale de l'eau dans le récipient.
La température et la pression extérieures valent respectivement $T_0 = 373$ K et $P_0 = 1,01$ bar.
Le piston est lâché à l'instant $t = 0$, puis bloqué de telle sorte que le volume du récipient soit égal à $V_f = 0,010$ m^3. On note P_f, T_f respectivement la pression et la température finales de l'eau dans le récipient.

Q1. Dans quel état se trouve initialement l'eau ?

Q2. Montrer que l'eau est sous deux phases à l'état final et calculer la fraction massique en vapeur d'eau.

Données de la vapeur saturée :

T (°C)	P (bar)	v'' (m^3 $\cdot$ kg^{-1})
100	1,01	1,7

Le volume massique v' de l'eau liquide saturant sera pris égal à $1,0$ L $\cdot$ kg^{-1} aux deux températures envisagées.

Exercice n°7 Gaz de Clausius

Q1. Donner l'équation d'état d'un gaz parfait et rappeler les hypothèses qui permettent définissent un tel gaz, à l'échelle microscopique.

L'Argon est un gaz noble qui peut être caractérisé par l'équation d'état suivante, à l'équilibre : $P\,(V_m - b) = RT$, où P est la pression du gaz, V_m sont volume molaire, b une constante propre au gaz, R la constante des gaz parfaits et T la température.

Q2. Quelle est la dimension de b ? Donner son unité en système international.

Le diagramme d'Amagat prend en ordonnée le produit PV_m et en abscisse P.

Q3. Tracer l'allure de deux isothermes de l'Argon dans le diagramme d'Amagat. Vous préciserez laquelle correspond à la température la plus haute.

Q4. Si l'on arrive à tracer de telles courbes expérimentalement, comment en extraire la valeur de b ?

Q5. Que devient l'équation d'état lorsque P tend vers zéro ? Commenter.

Exercice n°8 Cocotte minute

Au voisinage de 100 °C, la pression de vapeur saturante de l'eau vaut : $P_s = P_0 \left(\frac{t}{100}\right)^4$ où $P_0 = 1$ bar et t la température en °C.

On considère une cocotte-minute dont la soupape a une masse de 40 g et le tuyau de soupape une section de 4 mm^2. On met de l'eau dans la cocotte-minute et on ferme hermétiquement le couvercle. L'ensemble est ensuite placé sur un brûleur de cuisinière. Au bout d'un certain temps, la soupape se met en rotation.

Quelle est la température à l'intérieur de la cocotte-minute ? Commentaire.

Exercice n°9 Bassine d'eau

On entend parfois qu'il peut être bien de placer une bassine d'eau dans sa chambre pour dormir, lorsque l'air de celle-ci est trop sec.

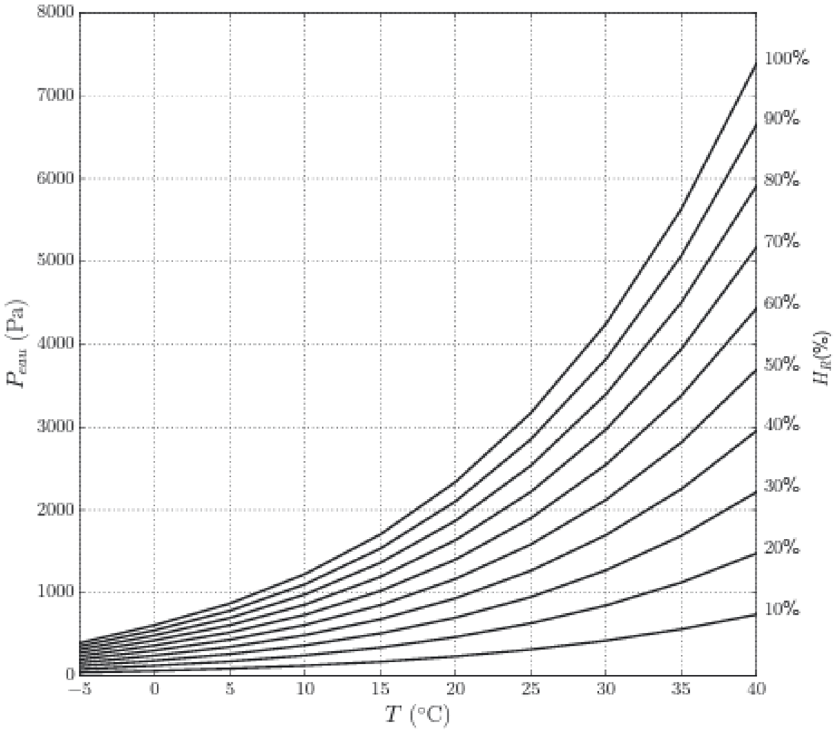
On considère une chambre de 12 m^2 au sol, et de hauteur de plafond de 2,5 m. La bassine utilisée contient 2,0 L d'eau, de masse volumique à température ambiante $\rho = 1,0\ \text{kg} \cdot \text{L}^{-1}$, et de masse molaire $M_{\text{eau}} = 18\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$.

On définit l'humidité relative H_R comme le rapport de la pression partielle en vapeur d'eau dans l'air sur la pression de vapeur saturante de l'eau, à la même température :

$H_R = \dfrac{P_{\text{eau}}}{P_{\text{sat, eau}}(T)}$.

Le diagramme ci-contre représente un abaque définissant la valeur de la pression partielle en vapeur d'eau en fonction de la température et de l'humidité relative.

Avant de mettre la bassine, l'humidité relative de la chambre est de 30%, la pression totale est de 1,0 bar et la température est de 17 °C.



Q1. Déterminer, à partir du diagramme, la pression de vapeur saturante de l'eau à la température de la chambre, ainsi que la pression partielle initiale en vapeur d'eau.

Q2. En déduire la quantité d'eau vapeur en moles initialement présente dans la chambre et la masse correspondante.

Q3. Pourquoi l'eau liquide contenue dans la bassine s'évapore-t-elle ? Jusqu'à quand ce phénomène se produira-t-il ?

Q4. Déterminer la quantité d'eau en moles qui s'évaporera de la bassine, ainsi que la masse et le volume qui correspondent. Restera-t-il de l'eau dans la bassine ?

III Résolutions de problème

Exercice n°10 Existence d'une atmosphère ?

On donne les caractéristiques de trois planètes telluriques du système solaire.

Système solaire	Mercure	Vénus	Terre
Diamètre	4 880 km	12 100 km	12 700 km
Masse	$3,30.10^{23}$ kg	$4,87.10^{24}$ kg	$5,97.10^{24}$ kg
Température maximale à sa surface	430°C	470°C	40°C

Expliquer l'existence ou non d'atmosphère sur ces planètes.

THM01 — Fiche d'entraînement n° 18 — Thermodynamique

Gaz parfaits

Prérequis
La loi des gaz parfaits s'écrit $PV = nRT$, avec P en pascals, V en mètres cubes, n en moles et T en kelvins.

Constantes utiles

→ constante des gaz parfaits : $R = 8{,}314\,\mathrm{J\cdot K^{-1}\cdot mol^{-1}}$

→ définition du bar : $1\,\mathrm{bar} = 1\times10^5\,\mathrm{Pa}$

→ conversion entre kelvins et degrés Celsius : $T\,(\mathrm{K}) = \theta\,(°\mathrm{C}) + 273{,}15$

Entraînement au calcul

Entraînement 18.1 — Quelques calculs de volume.

Calculer le volume (en L) occupé à $T = 25\,°\mathrm{C}$ et sous une pression $P = 1{,}0\,\mathrm{bar}$ pour les gaz suivants.

a) 100 g d'argon ($M_{\mathrm{Ar}} = 40\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) ....

b) 32 g de dioxygène O_2 ($M_{\mathrm{O}} = 16\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) ....

c) 1,2 kg de dioxyde de carbone CO_2 ($M_{\mathrm{C}} = 12\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) ....

Entraînement 18.2 — Bouteille de butane.

Une bouteille de 30,6 L, maintenue à 20 °C, contient du butane (C_4H_{10}) qui est sous la forme d'un mélange liquide/gaz comprimé. Le contenu de la bouteille présente une masse m de 13 kg.

On donne $M_{\mathrm{H}} = 1\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$ et $M_{\mathrm{C}} = 12\,\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$.

a) Combien vaut la masse molaire (en $\mathrm{g\cdot mol^{-1}}$) du butane ? ....

b) Quelle serait la pression à l'intérieur de la bouteille si tout le butane était à l'état gazeux ?

....

c) Quel volume occuperait le contenu de la bouteille, s'il était entièrement à l'état gazeux, sous une pression de 1,0 bar et à la température de 20 °C ? ....

Entraînement 18.3 — Volume molaire.

Calculer le volume molaire (en $\mathrm{L\cdot mol^{-1}}$) d'un gaz parfait :

a) sous 1,00 bar et à 25,0 °C ....

b) sous 2,00 bar et à 50,0 °C ....

Entraînement 18.4 — Surchauffe ?

Un pneu de voiture, de volume supposé constant, est gonflé à froid, à la température $T_1 = 20\,°\text{C}$, sous la pression $P_1 = 2{,}0\,\text{bar}$. Après avoir roulé un certain temps, le pneu affiche une pression $P_2 = 2{,}3\,\text{bar}$.

Quelle est alors sa température (en °C) si l'on assimile l'air à un gaz parfait ? . . . .

Entraînement 18.5

Un récipient de volume V_1 enferme de l'air (assimilé à un gaz parfait) à la température $T_1 = 20\,°\text{C}$ et sous une pression $P_1 = 1{,}20\,\text{bar}$.

Que vaut la pression finale (en bar) si l'on augmente :

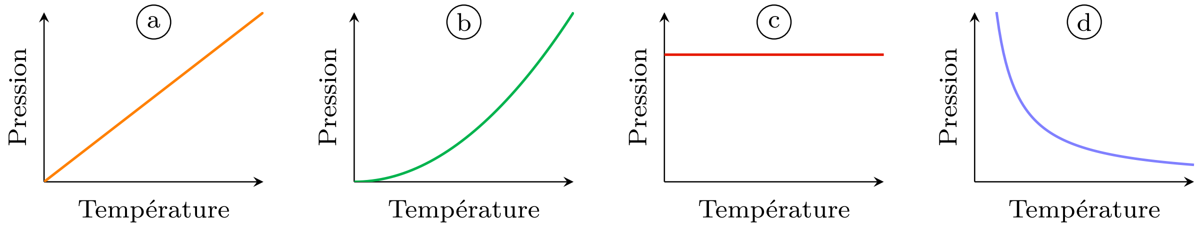
a) le volume de 20 % ? . . . .

b) la température de 10 °C ? . . . .

Manipulations algébriques

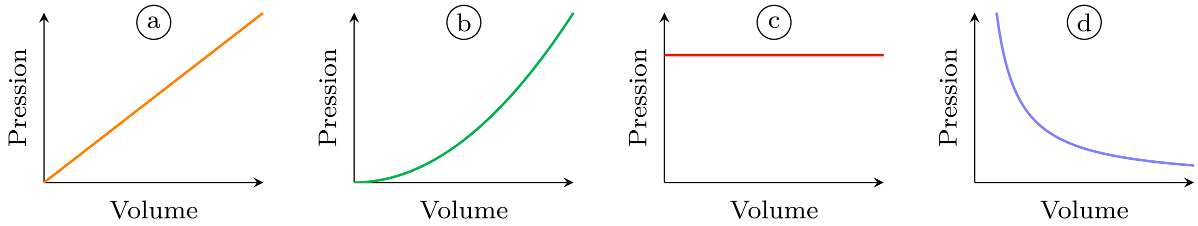
Entraînement 18.6 — Faire le lien entre une formule et un graphe.

a) Lequel de ces graphes représente la relation entre pression et température lorsque n et V sont fixés ?



. . . .

b) Lequel de ces graphes représente la relation entre pression et volume lorsque n et T sont fixés ?



. . . .

Entraînement 18.7 — Masse volumique de l'eau.

On considère un gaz parfait de masse molaire M, à la pression P et à la température T.

a) Exprimer sa masse volumique ρ en fonction de M, P et T. ....

b) La vapeur d'eau a pour masse volumique $\rho = 0{,}595\,\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^{-3}$ à $100\,°\mathrm{C}$ et $1\,013\,\mathrm{hPa}$. Sa masse molaire est $M_{\mathrm{H_2O}} = 18\,\mathrm{g}\cdot\mathrm{mol}^{-1}$.

Est-ce compatible avec le modèle du gaz parfait ? ....

Entraînement 18.8 — Compression d'un gaz.

Un gaz, initialement à la pression P_1 et à la température $T_1 = 25\,°\mathrm{C}$, est comprimé jusqu'à une pression valant $P_2 = 4P_1$. Sa masse volumique initiale est de ρ_1.

Exprimer sa masse volumique finale ρ_2 en fonction de ρ_1 si sa température T_2 vaut :

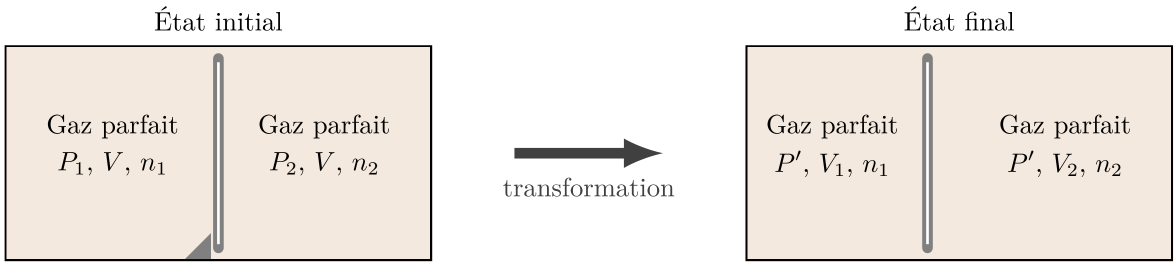
a) $T_2 = T_1$ ....

b) $T_2 = 50\,°\mathrm{C}$ ....

Entraînement 18.9 — Mouvement d'un piston.

Une enceinte maintenue à une température T est divisée en deux parties d'égal volume V, par un piston mobile sans frottement.

Initialement, le piston est bloqué, et chaque compartiment contient un gaz parfait de pressions respectives P_1 et P_2. On note n_1 et n_2 les quantités de matière dans chaque compartiment.



Une fois débloqué, le piston se déplace librement de façon à ce que les pressions dans chaque compartiment deviennent égales.

Déterminer :

a) la relation entre n_1, n_2, P_1 et P_2 ....

b) le volume V_1 en fonction de V, P_1 et P_2 ....

Mélange de gaz parfaits

Tous les mélanges de gaz seront considérés parfaits.

Entraînement 18.12 — Un gaz sous pression.

Un gisement donné fournit du gaz naturel dont la composition (en fractions molaires) est :

- 81,3 % méthane (CH_4)
- 2,9 % éthane (C_2H_6)
- 0,4 % propane (C_3H_8)
- 0,2 % butane (C_4H_{10})
- 14,3 % diazote (N_2)

On donne $M_H = 1\,g\cdot mol^{-1}$, $M_C = 12\,g\cdot mol^{-1}$ et $M_N = 14\,g\cdot mol^{-1}$.

Calculer :

a) la masse molaire du mélange ....

b) la fraction massique de l'éthane .

Entraînement 18.13 — Composition d'un mélange.

Un mélange de diazote N_2 ($M_N = 14\,g\cdot mol^{-1}$) et de dioxygène O_2 ($M_O = 16\,g\cdot mol^{-1}$) présente une masse volumique de $1{,}00\,g\cdot L^{-1}$ à 100 °C et sous une pression de 1 013 hPa.

a) Calculer la masse molaire du mélange ....

b) En déduire la fraction molaire en dioxygène ....

Entraînement 18.14 — Air humide.

L'humidité relative (ou *taux d'hygrométrie*) est le rapport

$$H = \frac{\text{pression partielle de vapeur d'eau}}{\text{pression de vapeur saturante}}.$$

La pression de vapeur saturante de l'eau à 25 °C vaut 3 166 Pa.

Quelle est la masse de vapeur d'eau (on donne $M_{H_2O} = 18\,g\cdot mol^{-1}$) présente dans une pièce de $400\,m^3$ contenant de l'air à 25 °C un jour où l'humidité relative est de 60 % ? ....

Entraînement 18.15 — Ajout d'un gaz.

Un récipient clos de volume V enferme un mélange gazeux contenant deux espèces A et B à une température T fixée. La pression totale vaut $P = 1\,500\,hPa$ et la pression partielle de A est de 1 100 hPa.

a) Quelle est la pression partielle de B ? ....

b) On ajoute une espèce C au système de sorte que la pression totale augmente jusqu'à 1 800 hPa.

Réponses mélangées

64 °C	$\dfrac{4\pi P_0 r^3 + 16\pi\gamma r^2}{3RT_0}$	62 L	$5{,}5\,m^3$	(a)	$\dfrac{2P_1}{P_1+P_2}V$	65,6 %	
$6{,}8\times10^2\,L$	$18{,}2\,g\cdot mol^{-1}$	$4\rho_1$	$58\,g\cdot mol^{-1}$	$\dfrac{n_2}{n_1} = \dfrac{P_2}{P_1}$	400 hPa	$3{,}7\rho_1$	
$\dfrac{4}{3}\pi r^3$	400 hPa	non	1,00 bar	$1{,}8\times10^2$ bar	25 L	4,79 %	1,24 bar
$24{,}8\,L\cdot mol^{-1}$	$\dfrac{M_A}{M_{air}}$	(d)	5,5 kg	$\dfrac{MP}{RT}$	$30{,}6\,g\cdot mol^{-1}$	$13{,}4\,L\cdot mol^{-1}$	

► Réponses et corrigés page 295