

3 – PREMIER PRINCIPE DE LA THERMODYNAMIQUE

Plan du chapitre

1 Transformations thermodynamiques d'un système	2
1.1 Système thermodynamique	2
1.2 Équilibre d'un système	2
1.3 Transformations thermodynamiques	4
2 Premier principe de la thermodynamique	6
2.1 Énergie d'un système	6
2.2 Premier énoncé	6
2.3 Second énoncé	6
2.4 Propriétés de l'énergie interne	7
2.5 Les deux modes de transfert d'énergie	7
Exercices	9
Travaux dirigés	11

Programme officiel – Premier semestre – **Thème E – énergie : conversion et transfert**

NOTIONS	CAPACITÉS EXIGIBLES
<p>E.2. Bilan d'énergie pour un système thermodynamique</p> <p>Transformations thermodynamiques.</p> <p>Transformations thermodynamiques d'un système. Transformation isochore, isobare et monobare. Thermostat, transformation monotherme et isotherme.</p>	<p>Identifier et définir un système ouvert, fermé, isolé. Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur au système pour déterminer l'état final.</p>
<p>Premier principe de la thermodynamique. Bilans d'énergie.</p> <p>Premier principe de la thermodynamique.</p>	<p>Citer les différentes contributions microscopiques et macroscopiques à l'énergie d'un système donné. Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états d'équilibre thermodynamique. Exploiter l'extensivité de l'énergie interne. Distinguer le statut de la variation d'énergie interne d'un système du statut des termes d'échange d'énergie avec le milieu extérieur.</p>

1 Transformations thermodynamiques d'un système

1.1 Système thermodynamique

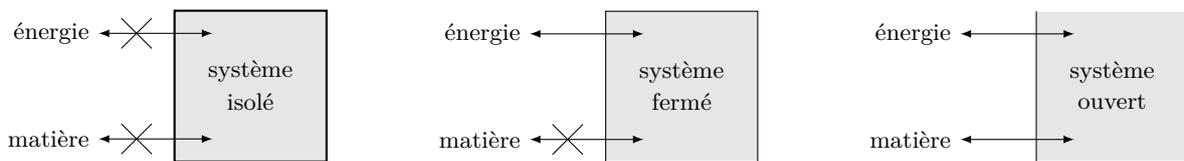
Rappel sur un système

Le système est la portion de matière qu'on étudie ; le reste de l'univers est le monde extérieur.

Échanges entre le système et le monde extérieur

Un système est :

- isolé s'il n'échange ni matière ni énergie avec le monde extérieur,
- fermé s'il échange de l'énergie mais pas de matière avec le monde extérieur,
- ouvert s'il échange matière et énergie avec le monde extérieur.



1.2 Équilibre d'un système

1.2.1 Définition de l'équilibre thermodynamique

Évolution spontanée d'un système

Abandonné à lui-même, un système évolue spontanément jusqu'à un état final appelé **état d'équilibre**.

État d'équilibre

À l'équilibre :

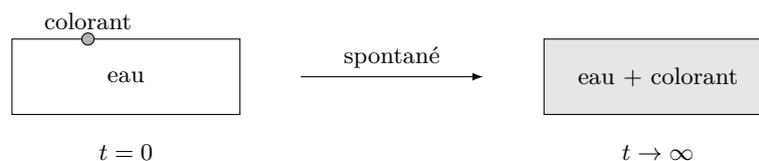
- tous les paramètres intensifs du système sont définis et constants au cours du temps en tout point,
- ET il n'y a aucune échange de matière et d'énergie au sein du système ou entre le système et le monde extérieur.

État stationnaire

L'état d'équilibre ne doit pas être confondu avec un état stationnaire, pour lequel :

- tous les paramètres intensifs du système sont définis et constants au cours du temps en tout point,
- mais il y a des échanges qui se compensent entre le système et le monde extérieur.

1.2.2 Équilibre de composition



Dans le cas simple d'un système de faible dimension contenant des substances électriquement neutres¹ :

1. Pour les systèmes de grande dimension : plus compliqués (stratification, ...) : il faut raisonner sur le potentiel chimique. Pour les systèmes contenant des substances ioniques : il faut raisonner sur le potentiel électrochimique.

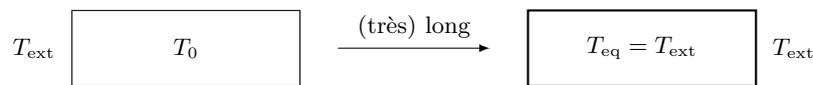
- la concentration de chaque substance est uniforme au sein du système,
- et si le système est ouvert, la composition de chaque substance est la même dans le système et le monde extérieur.

1.2.3 Équilibre thermique

Évolution au sein du système ?



Pour un système non isolé, évolution entre le système et le monde extérieur ?



Uniformation de la température

À l'équilibre thermique, la température d'un système est uniforme et constante dans le système :

$$T_{\text{système}} = \text{cte}$$

Équilibre thermique avec le monde extérieur

À l'équilibre thermique, la température d'un système non isolé est égale à la température du monde extérieur :

$$T_{\text{système non isolé}} = \text{cte} = T_{\text{ext}}$$

Vitesse de mise à l'équilibre thermique

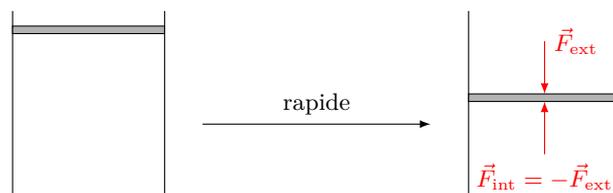
L'équilibre thermique, surtout à travers une paroi solide, est atteint lentement.

1.2.4 Équilibre mécanique

Évolution au sein du système fluide de faible dimension ² ?



Pour un système séparé du monde extérieur par une paroi mobile (ou sans paroi) ?



2. Plus compliqué pour un système de grande dimension : voir cours sur la statique des fluides.

Uniformisation de la pression

À l'équilibre mécanique, la pression d'un système fluide de faible dimension est uniforme et constante.

$$P_{\text{système}} = \text{cte}$$

Équilibre mécanique avec le monde extérieur

À l'équilibre mécanique d'un fluide entouré d'une paroi mobile, la force totale exercée sur la paroi est nulle.

$$P_{\text{ext}} = P_{\text{système}} \quad \text{avec} \quad P_{\text{ext}} = \frac{F_{\text{ext}}}{S} \quad \text{et} \quad P_{\text{int}} = \frac{F_{\text{int}}}{S}$$

Vitesse de mise à l'équilibre mécanique

L'équilibre mécanique est atteint beaucoup plus rapidement que l'équilibre thermique.

1.3 Transformations thermodynamiques

Transformation isochore

Une transformation est **isochore** si le volume du système reste constant pendant toute la transformation.

$$\text{isochore} \iff V = \text{cte}$$

Réalisation pratique d'une transformation isochore

Il faut opérer dans une enceinte aux parois rigides et immobiles.

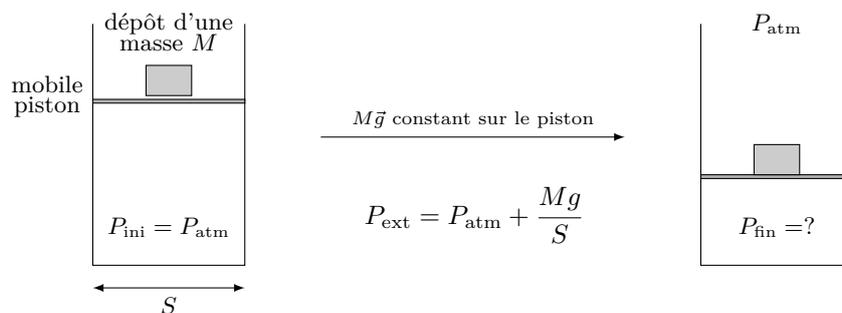
Transformation monobare

Une transformation est **monobare** si la pression totale exercée par le monde extérieur sur le système reste constante pendant la transformation.

$$\text{monobare} \iff P_{\text{ext}} = \text{cte}$$

Réalisation pratique d'une transformation monobare

Il faut que le système soit au contact mécanique avec le monde extérieur, et que celui-ci exerce une force constante sur la paroi mobile du système.

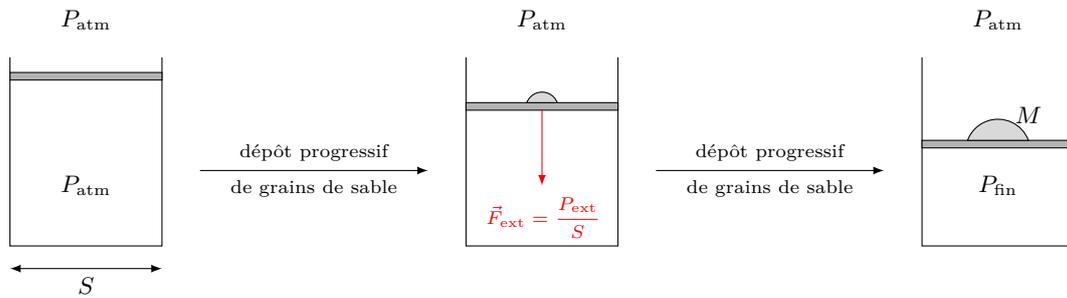


Transformation en quasi-équilibre mécanique

Une transformation est en **quasi-équilibre mécanique** si la pression du système varie mais reste égale à la pression extérieure pendant toute la transformation.

Réalisation pratique d'une transformation en quasi-équilibre mécanique

Cela implique que la pression extérieure varie, et que le système soit à l'équilibre mécanique en permanence. Il faut opérer lentement dans une enceinte avec une paroi mobile.



À chaque instant : $P_{\text{système}} = P_{\text{atm}} + \frac{mg}{S}$, avec m variant progressivement de 0 à M .

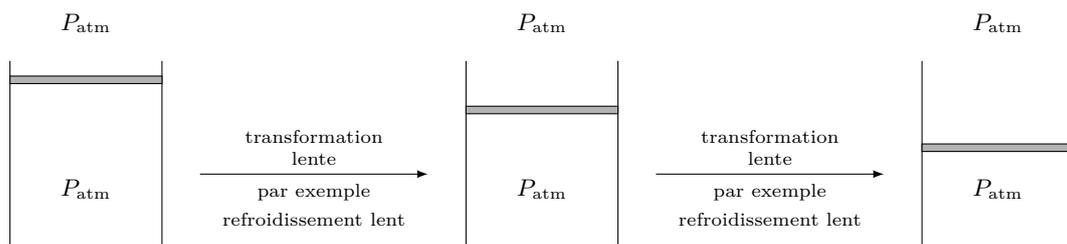
Transformation isobare

Une transformation est **isobare** si la pression du système reste constante pendant toute la transformation.

$$\text{isobare} \iff P_{\text{système}} = \text{cte}$$

Réalisation pratique d'une transformation isobare

Une transformation isobare est une transformation monobare et en quasi-équilibre mécanique. Il faut opérer lentement dans une enceinte avec une paroi mobile au contact de pression avec un monde extérieur de pression constante.



Transformation monotherme

Une transformation est **monotherme** si la température du monde extérieur reste constante pendant la transformation.

$$\text{monotherme} \iff T_{\text{ext}} = \text{cte}$$

Transformation isotherme

Une transformation est **isotherme** si la température du système reste constante pendant toute la transformation.

$$\text{isotherme} \iff T_{\text{système}} = \text{cte}$$

2 Premier principe de la thermodynamique

2.1 Énergie d'un système

Énergie d'un système

Avec E_c l'énergie cinétique macroscopique, E_p l'énergie potentielle macroscopique et U l'énergie interne :

$$E = E_c + E_p + U$$

2.2 Premier énoncé

Premier principe de la thermodynamique

Pour un **système isolé**, l'énergie est **conservative**, c'est-à-dire que l'énergie totale E d'un système isolé est constante.

- Pour le système étudié : $\{\text{univers}\} = \{\text{système}\} \cup \{\text{extérieur}\}$.
- Donc $E_{\text{univ}} = E_{\text{syst}} + E_{\text{ext}}$.
- L'univers est isolé : E_{univ} est constante. Pour une transformation quelconque : $\Delta E_{\text{univ}} = 0$.
- En conséquence : $\Delta E_{\text{syst}} + \Delta E_{\text{ext}}$, soit $\Delta E_{\text{syst}} = -\Delta E_{\text{ext}}$.

2.3 Second énoncé

- Si $\Delta E_{\text{syst}} = -\Delta E_{\text{ext}}$, le système a échangé de l'énergie avec le monde extérieur
- $\Delta E_{\text{syst}} = E_{\text{reçue}}$ par le système à travers sa paroi le séparant du monde extérieur.
- Il y a deux modes d'échange de l'énergie : le travail $W_{\text{reçu}}$ et le transfert thermique (chaleur) $Q_{\text{reçue}}$.

Écriture du premier principe

Lors d'une transformation macroscopique entre l'état initial et l'état final :

$$\Delta E_c + \Delta E_p + \Delta U = (E_c + E_p + U)_{\text{fin}} - (E_c + E_p + U)_{\text{ini}} = W_{p \text{ reçu}} + W_{\text{reçu}}^* + Q_{\text{reçue}}$$

Lors d'une transformation infinitésimale (si évolution compliquée qu'on ne peut étudier globalement) :

$$dE_c + dE_p + dU = \delta W_{p \text{ reçu}} + \delta W_{\text{reçu}}^* + \delta Q_{\text{reçue}}$$

2.4 Propriétés de l'énergie interne

U est additive

L'énergie interne est une fonction extensive et additive.

U est une fonction d'état

La variation de l'énergie interne d'un système entre un état initial et un état final est $\Delta U = U_{\text{fin}} - U_{\text{ini}}$, quelle que soit la transformation qui a mené de l'état initial à l'état final.

U dépend de T

Pour un gaz supposé parfait ou une phase condensée supposée indilatable et incompressible, U ne dépend que de T .

Variation de U avec la variation de T

Pour une variation de température $\Delta T = T_{\text{fin}} - T_{\text{ini}}$: $\Delta U = C_v \Delta T$

Pour une variation infinitésimale de température dT : $dU = C_v dT$

Capacité thermique à volume constant d'un gaz

C_v est la capacité thermique à volume constant. Pour une quantité de matière n ou une masse m d'un gaz donné :

$$C_v = n \times C_{vm} = m \times c_v$$

avec C_{vm} la capacité thermique molaire à volume constant, et c_v la capacité thermique massique à volume constant de ce gaz.

Capacité thermique d'une phase condensée

On note simplement C la capacité thermique, C_m la capacité thermique molaire, et c la capacité thermique massique de cette phase condensée.

2.5 Les deux modes de transfert d'énergie

Transfert d'énergie sous forme de travail

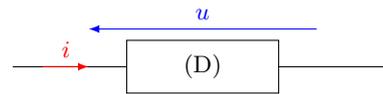
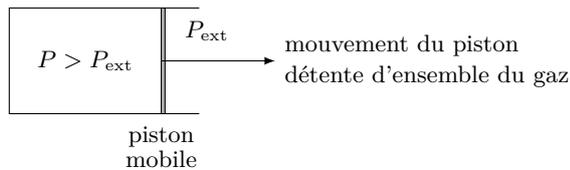
Le **travail** est un échange d'énergie **associé à des modifications macroscopiques** du système, qui déplacent en bloc l'édifice moléculaire.

Exemples classiques de travail

- Le travail électrique est un transfert d'énergie associé au déplacement collectif des électrons dans un conducteur (courant électrique).
- Le travail des forces pressantes est associé à un mouvement d'une paroi du système qui **modifie le volume** de celui-ci.

Cas classique d'absence de travail

Un système dont toutes les parois sont rigides ne reçoit aucun travail de forces pressantes.



Transfert d'énergie thermique

Le transfert thermique est un transfert d'énergie par des **mouvements désordonnés**, non maîtrisable par l'expérimentateur.

Modes de transfert thermique

- La **conduction thermique** est propagation d'énergie à travers un milieu matériel séparant deux zones de températures différentes.
- La **convection thermique** est un transfert thermique associé à un transfert de matière dont la température est différente de celle de son environnement.
- Le rayonnement électromagnétique permet un transfert d'énergie transportée par les photons.

Transformation adiabatique

Une transformation est **adiabatique** s'il n'y a aucun transfert thermique entre le système et le monde extérieur pendant toute la transformation.

$$\text{adiabatique} \iff Q_{\text{reçue}} = 0$$

Réalisation pratique d'une transformation adiabatique

On admet qu'une transformation peut être considérée comme adiabatique si

- le système est enfermé dans une enceinte dont les parois sont **calorifugées = athermanes** (comme les parois d'un thermos),
- OU si la transformation est très rapide.

Parois diathermanes

On appelle **parois diathermanes** des parois qui permettent les échanges thermiques.

Les conditions opératoires pour réaliser une transformation adiabatique ou isotherme seront détaillées au chapitre 5.

- Le travail sera détaillé au chapitre 4.
- Le transfert thermique sera détaillé au chapitre 5.

Exercices

Application directe du cours

Exercice 1 : état final d'un verre d'eau

Une masse de 100 g d'eau liquide sortant d'une source à 16 °C est placée dans un verre. Celui-ci est laissé au contact de l'air ambiant à $1 \cdot 10^5$ Pa et 40 °C.

Déterminer les grandeurs d'état de l'eau à l'état final.

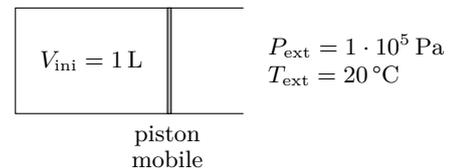
Exercice 2 : état final d'une soupe

Une masse de 0,20 kg d'eau est contenue dans une boîte en plastique souple qui est restée deux heures au contact de l'atmosphère sous $1 \cdot 10^5$ Pa et à 20 °C. La boîte est mise au congélateur, maintenu à une pression de $1,05 \cdot 10^5$ Pa et où règne une température de -18 °C.

Déterminer les grandeurs d'état de l'eau, à l'état final. La densité de la glace est de 0,92.

Exercice 3 : détente d'un gaz parfait

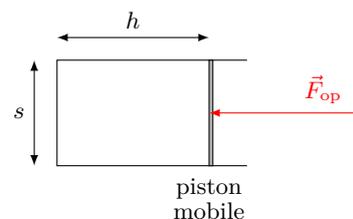
Un gaz parfait se trouve dans un cylindre de volume 1 L, fermé par un piston mobile horizontalement. Les parois du cylindre sont diathermanes et le piston est immobile. L'atmosphère extérieure est à la température de 20 °C et sous la pression de $1 \cdot 10^5$ Pa. L'ensemble est placé dans un four où règne une température de 200 °C sous la pression atmosphérique.



1. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état initial.
2. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état final.

Exercice 4 : compression d'un gaz parfait

Un gaz parfait se trouve dans un cylindre cylindrique de section $s = 10 \text{ cm}^2$ et de hauteur $h = 30 \text{ cm}$, fermé par un piston mobile horizontalement. Les parois du cylindre sont diathermanes et le piston est immobile. L'atmosphère extérieure est à la température de 20 °C et sous la pression de $1 \cdot 10^5$ Pa. À l'aide d'un dispositif approprié, un opérateur exerce une force sur la face extérieure du piston jusqu'à diviser le volume par un coefficient a . Lorsque le système est parvenu à l'équilibre, la force que l'opérateur exerce pour maintenir le piston immobile est de 50 N.



1. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état initial.
2. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état final.
3. Que vaut le facteur de compression a ? De combien le piston s'est-il déplacé?

Exercice 5 : échauffement d'un gaz parfait

On considère une masse $m = 20 \text{ g}$ d'un gaz parfait monoatomique de masse molaire $M = 40 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ et de capacité thermique molaire à volume constant $C_{vm} = 3R/2$. On chauffe le gaz de la température $T_1 = 10 \text{ °C}$ à la température $T_2 = 20 \text{ °C}$.

1. Calculer la variation d'énergie interne du gaz.
2. Sachant que le gaz a reçu un transfert thermique $Q = 150 \text{ J}$, calculer le travail qu'il a reçu. Quel est le sens de l'échange d'énergie sous forme de travail?

Entrainement

Exercice 6 : mélange de deux gaz parfaits

On considère un récipient à parois rigides et athermanes, compartimenté par une cloison isolante. Le premier compartiment contient $n_1 = 2,0$ mol d'un gaz parfait de capacité thermique à volume constant $C_{vm} = 3R/2$ à la température $T_1 = 300$ K et sous la pression $P_1 = 10$ bar ; le second contient $n_2 = 1,0$ mol du même gaz à la température $T_2 = 500$ K et sous la pression $P_2 = 1$ bar. On escamote la cloison, et on attend l'homogénéisation du système. On considère le système constitué par le gaz des deux compartiments.

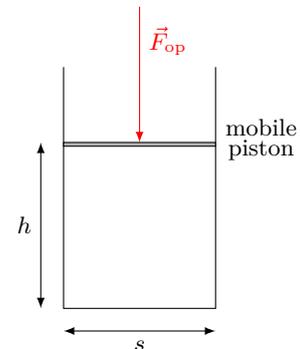


1. Calculer le volume total du récipient.
2. Exprimer la variation d'énergie interne du système constitué du gaz dans le premier compartiment. Même question pour le système constitué du gaz dans le second compartiment. En déduire l'expression de la variation d'énergie interne totale du système constitué par l'ensemble du gaz contenu dans le récipient, en fonction des températures des deux compartiments.
3. Quel est le transfert thermique reçu par le système lors de l'escamotage de la cloison ? le travail reçu ? En déduire sa variation d'énergie interne.
4. À l'aide des questions précédentes, calculer T_{fin} .
5. Calculer la pression finale P_{fin} .

Exercice 7 : compression adiabatique réversible d'un gaz parfait

Un gaz parfait est enfermé dans un cylindre de section s et de hauteur initiale h_{ini} , fermé par un piston mobile de masse m . Les parois du cylindre et le piston sont parfaitement calorifugés. L'atmosphère extérieure est à la pression P_{atm} et à la température T_{atm} . Au départ, l'intérieur du cylindre est à la température T_{atm} , et le piston est à l'équilibre.

Un opérateur exerce alors sur le piston une force qu'il augmente très progressivement, jusqu'à doubler la pression intérieure. On admet que, dans ces conditions (compression lente avec des parois calorifugées), le gaz obéit à l'équation de Laplace : le produit $P \times V^\gamma$ est constant au cours de la transformation, avec γ une constante caractéristique du gaz.



1. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état initial.
2. Déterminer complètement les grandeurs d'état du gaz à l'état final, ainsi que la hauteur finale h_{fin} du cylindre.
3. Calculer la force que l'opérateur doit exercer pour maintenir le piston immobile à l'état final.

Conditions atmosphériques : $P_{\text{atm}} = 1 \cdot 10^5$ Pa, $T_{\text{atm}} = 20$ °C

Caractéristiques géométries du cylindre : $s = 20$ cm² et $h_{\text{ini}} = 60$ cm

Masse du piston : $m = 200$ g

Coefficient de Laplace du gaz : $\gamma = 1,4$

Exercice 8 : élévation de température lors d'un impact

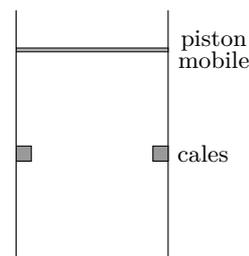
Évaluer l'élévation de température d'une balle de fusil qui accompagne son arrêt lorsqu'elle touche la cible. Indice 1³. Indice 2⁴. Indice 3⁵.

3. Quels sont les termes d'énergie à considérer ?
4. L'arrêt est-il un processus lent ou rapide ? Qu'en déduire ?
5. Une balle de fusil fait quelques grammes et est en métal.

Travaux dirigés

Exercice 1 : états d'un système

On considère un cylindre fermé par un piston mobile de masse négligeable, dans lequel se trouve un gaz parfait, initialement à l'équilibre thermique et mécanique avec l'extérieur ($P_{\text{atm}} = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ et $T_1 = 800 \text{ °C}$). Les parois du cylindre sont diathermanes. Deux cales destinées à bloquer le piston se trouvent à mi-hauteur du cylindre.

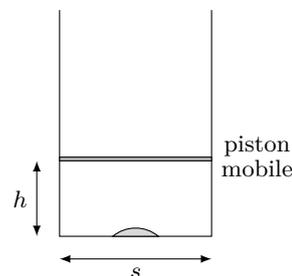


On place le cylindre dans une enceinte où la pression est P_{atm} , mais dont la température est $T_0 = 30 \text{ °C}$. Les parois du cylindre étant assez épaisses, le gaz intérieur se refroidit lentement.

1. Calculer la température du gaz lorsque le piston atteint les cales.
2. Calculer la pression du gaz à l'état final.

Exercice 2 : détente adiabatique d'un gaz parfait

De l'air, assimilé à un gaz parfait est enfermé dans un cylindre de section $s = 50 \text{ cm}^2$ et de hauteur initiale $h_{\text{ini}} = 20 \text{ cm}$, fermé par un piston mobile de masse négligeable. Le gaz a initialement la même température et est à la même pression que l'extérieur ($T_0 = 20 \text{ °C}$ et $P_0 = 1 \cdot 10^5 \text{ Pa}$). Les parois du cylindre et le piston sont parfaitement calorifugés.



Dans une première expérience, des réactifs en quantité négligeable, réagissent selon une réaction exothermique, ce qui élève la température intérieure. Lorsqu'un nouvel état d'équilibre est atteint, la température intérieure est de 70 °C .

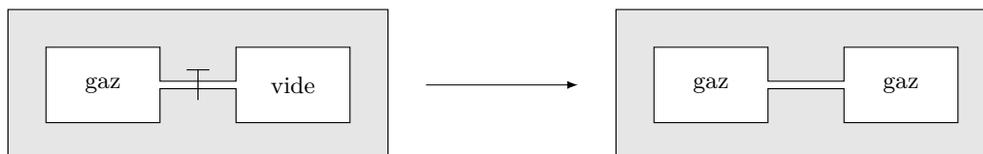
1. Calculer la pression finale et le volume final.
2. Calculer la variation d'énergie interne du gaz. Peut-on en déduire le travail reçu par le gaz ?

Dans une seconde expérience, un opérateur tire très lentement sur le piston jusqu'à doubler le volume. On admet que, dans les conditions opératoires (transformation lente dans des parois athermanes), le gaz intérieur obéit à la loi de Laplace : le produit $P \times V^\gamma$ est constant au cours de la transformation, avec $\gamma = 7/5$ pour l'air.

3. Montrer que, pour un gaz parfait, la loi de Laplace peut également s'écrire : $T \times V^{\gamma-1} = \text{constante}$.
4. Calculer la température finale, la variation d'énergie interne du gaz et le travail reçu par le gaz.

Exercice 3 : détente de Joule et Gay-Lussac

On s'intéresse à la détente de Joule et Gay-Lussac : un gaz, initialement dans un compartiment de volume $V_1 = 50 \text{ L}$ et à la température T_1 , se détend dans un compartiment de volume $V_2 = 9V_1$ initialement vide, après ouverture du robinet qui sépare les deux compartiments. L'ensemble est calorifugé, et les parois sont indéformables ; la température finale du gaz est T_2 . On considère le système constitué du contenu des deux compartiments. On précise que le travail des forces pressantes est proportionnel à la variation de volume du système.



1. Exprimer l'énergie interne du système à l'état initial. Exprimer l'énergie interne du système à l'état final.
2. Calculer la variation de température du gaz $T_2 - T_1$, en supposant qu'il s'agisse d'un gaz parfait.
3. Pour l'hélium, on observe $T_2 - T_1 \approx 0$, alors que pour $22,7 \text{ mol}$ de dioxyde de carbone, on observe une diminution de la température de $5,1 \text{ K}$. Que conclure ?

Temporary page !

\LaTeX was unable to guess the total number of pages correctly. As there was some unprocessed data that should have been added to the final page this extra page has been added to receive it.

If you rerun the document (without altering it) this surplus page will go away, because \LaTeX now knows how many pages to expect for this document.