Énergie échangée par un système au cours d'une transformation

Pour répondre à certaines questions de ce TD, on pourra avoir besoin d'écrire le premier principe sous la forme $Q = \Delta U - W$ *et d'utiliser que, pour un gaz parfait,* $\Delta U = C_V \Delta T$ *avec* $C_V = nR/(\gamma - 1)$.

1. Le travail depend du chemin suivi L'équation d'état d'un gaz réel est $P(V - nb) = nRT$. Quel est le travail reçu par le gaz si une compression isotherme lente double sa pression ? Même question si on arrive au même état final par une évolution à volume constant suivie d'une évolution à pression constante.

2. Évolution rectiligne Un gaz parfait passe d'un état initial (P_0, V_0, T_0) à un état final $(kP_0, V_0/k)$ lors d'une évolution réversible rectiligne sur le diagramme de Clapeyron. Calculer le travail reçu W, le transfert thermique reçu Q. Montrer graphiquement que la température passe par un maximum.

3. Transformation polytropique On considère un gaz parfait subissant une transformation quasi-statique telle que $PV^k = C^{te}$, P étant la pression du gaz, V son volume et k une constante.

1. À quelle transformation correspond le cas $k = 1$?
2. Dans le cas où $k \neq 1$, calculer le travail reçu par le gaz au cours de cette transformation, en fonction des pressions et volume initiaux et finaux et de k.
3. Montrer que pour une valeur particulière de k, la chaleur reçue par le gaz sera nulle durant cette transformation.

4. Compression isotherme et détente adiabatique*

1. Une mole d'un gaz parfait est comprimée de façon isotherme de la pression P_0 à la pression $P' = 2P_0$. Sa température est la température ambiante $T_0 = 15°C$. Calculer le travail reçu par le gaz pendant cette compression. En déduire la quantité de chaleur échangée et interpréter son signe.
2. On fait ensuite détendre le gaz de manière adiabatique quasi-statique en mettant le cylindre en communication avec un espace indéfini où règne la pression P_0. A quelle condition peut-on considérer cette transformation comme quasi-statique ? Quelle est la température finale du gaz ? Quelle est la variation de son énergie interne ?
3. Représenter en coordonnées de Clapeyron les deux transformations précédentes. On donne le coefficient de Laplace $\gamma = C_P/C_V = 1{,}40$.

5. Cycle thermodynamique* Une masse constante de gaz parfait, dont le rapport des capacités thermiques à pression et volume constants est $\gamma = 1{,}40$ parcourt un cycle à trois points ABC. Le gaz initialement dans l'état d'équilibre thermodynamique A caractérisé par une pression $P_A = 1{,}00.10^5$ Pa, une température $T_A = 144{,}4$ K et un volume $V_A = 4{,}14.10^{-4}$ m^3 subit une évolution isentropique qui l'amène à la température $T_B = 278{,}8$ K.

1. Calculer la pression P_B du gaz dans ce nouvel état d'équilibre B.
2. Calculer V_B.
3. Le gaz est mis en contact avec une source à la température T_B et subit une détente isotherme réversible qui ramène son volume à sa valeur initiale V_A. Calculer la valeur P_C de la pression dans ce nouvel état d'équilibre.
4. Le gaz retourne au point A par une détente isochore. Dessiner le cycle et calculer le transfert thermique Q_{CA} échangée lors du passage CA.

6. Différents chemins* On comprime une mole de dioxygène, assimilé à un gaz parfait diatomique, de température $T_i = 300$ K et de pression $P_i = 1{,}00$ bar jusqu'à une température $T_f = T_i$ et une pression $P_f = 5{,}00$ bar. La compression peut se produire de deux façons différentes : la première A_iIA_f est isotherme et la seconde est isochore de A_i à E puis isobare de E à A_f.

1. Dessiner les deux transformations dans le diagramme (P, V).
2. Calculer le travail que le gaz reçoit au cours de l'évolution A_iIA_f. En déduire la quantité d'énergie reçue par transfert thermique.
3. Mêmes questions pour l'évolution A_iEA_f.

7. Compresseur d'air* On souhaite produire 1 m^3 d'air comprimé à la minute, sous la pression de 3 bar, à partir de l'air atmosphérique ($T_0 = 293$ K, $P_0 = 1$ bar), considéré comme un gaz parfait tel que $\gamma = 1{,}40$.

1. On suppose la transformation adiabatique quasi-statique. Calculer la puissance mécanique mise en jeu. Quelle est la température de l'air ainsi comprimé ?
2. On suppose la transformation isotherme quasi-statique. Calculer les puissances mécanique et calorifique mises en jeu.
3. Quels problèmes pratiques posent les deux solutions envisagées ?

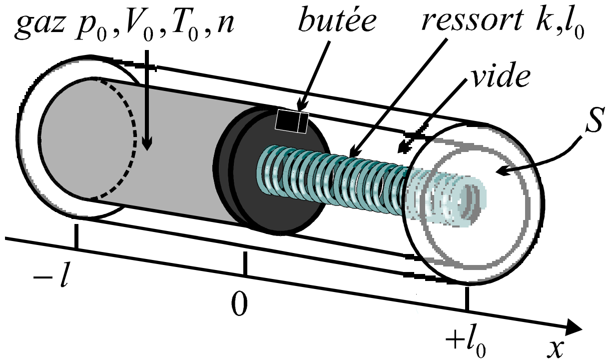
8. Gaz dans trois compartiments** Un récipient à parois rigides et calorifugées est divisé en trois compartiments étanches par deux cloisons mobiles (**P1**) et (**P2**) pouvant se déplacer sans frottement. La cloison (**P1**) est diathermane tandis que la cloison (**P2**) est adiabatique. Les compartiments (**1**), (**2**) et (**3**) contiennent chacun une mole d'un gaz parfait diatomique.

Un générateur électrique fournit de l'énergie au gaz du compartiment (**1**) par l'intermédiaire d'un résistor de résistance R_0, de capacité thermique négligeable, parcouru par un courant constant I_0 pendant une durée τ.

Dans l'état initial, les gaz sont à la même température T_0 et à la même pression P_0. Ils occupent alors chacun le même volume V_0. On désigne par R la constante des gaz parfaits et par $\gamma = c_P/c_V$ le rapport des capacités thermiques massiques à pression constante c_P et à volume constant c_V. On fait passer un courant suffisamment faible pour que le système évolue lentement. On arrête le chauffage lorsque la température du compartiment (**3**) vaut $T_{3f} = aT_0$ avec $a > 1$ donné.

1. Calculer la pression finale P_f en fonction de P_0, a et γ.
2. Calculer le volume V_{3f} du gaz dans le compartiment (**3**) en fonction de V_0, a et γ.
3. Exprimer le volume final V_{1f} du gaz dans le compartiment (**1**) en fonction de V_0, a et γ.
4. En déduire la température finale T_{1f} du gaz dans le compartiment (**1**) en fonction de T_0, a et γ.
5. Calculer le travail W_g fourni par le générateur en fonction de R, γ, T_{1f}, T_{3f} et T_0.

9. Détente contre un ressort** Un cylindre de longueur ℓ de section S contient n moles de gaz à la température T_0 sous la pression P_0. Le piston est bloquée par une butée et est en contact avec un ressort de constante de raideur k de longueur à vide ℓ_0. Dans l'état initial la longueur du ressort est égale à sa longueur à vide. On libère le piston en enlevant la butée. On pourra considérer que $x \ll \ell$. On suppose que les échanges thermiques entre le gaz et les parois sont suffisamment lents pour que l'on puisse considérer l'évolution adiabatique, mais pas forcément quasi-statique. Déterminez l'abscisse du ressort dans l'état final du système.



10. Travaux pour un liquide** De l'eau liquide dans les conditions (P_0, V_0, T_0) subit une transformation quasi-statique, son volume restant infiniment voisin de V_0. Les coefficients thermoélastiques α et χ_T de l'eau sont connus et supposés constants.

1. Justifier l'expression du travail élémentaire sous la forme

$$W = V_0 P \left(\chi_T \, dP - \alpha \, dT\right)$$

2. Préciser le travail échangé par l'eau avec le milieu extérieur lors des transformations suivantes :
   (a) transformation quasi-statique et isobare (on exprimera W en fonction de α, P_0, V_0, T_0 et T_1 la température atteinte) ;
   (b) transformation quasi-statique et isotherme (on exprimera W en fonction de χ_T, V_0, P_0 et P_1 la pression atteinte).

11. Cycle d'un gaz réel** Une mole de gaz réel monoatomique contenue dans un cylindre décrit de manière quasi-statique et mécaniquement réversible le cycle ABCA L'évolution AB est isotherme à la température $T_A = 301$ K; au point A on donne $V_A = 5{,}00$ L et au point B, $V_B = 0{,}500$ L. L'évolution BC est isobare à la pression P_B ; l'évolution CA est isochore. Ce gaz est décrit par son équation d'état et l'expression de son énergie interne :

$$\left(P + \frac{a}{V^2}\right) V = RT \qquad \text{et} \qquad U = \frac{3\,RT}{2} - \frac{a}{V}$$

avec $a = 0{,}135$ m^6.Pa.mol^{-1} (on prendra $R = 8{,}314$ J.K^{-1}.mol^{-1}).

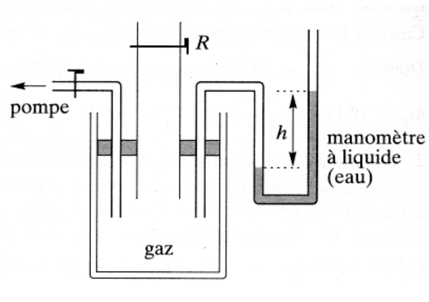
1. Dessiner le cycle dans le diagramme P, V.
2. Calculer P_A, P_B, P_C et T_C.
3. Calculer le travail et le transfert thermique reçus par le gaz au cours de chacune des évolutions AB, BC et CA. Calculer leur somme et commenter.

12. Oscillations adiabatiques d'un piston** Un gaz parfait est enfermé dans une enceinte cylindrique de longueur 2ℓ aux parois athermanes. Un piston de section S, de masse M et athermane sépare l'enceinte en deux compartiments de tailles initialement égales. Il est mobile selon l'axe Ox. On suppose l'absence de tout frottement. Initialement, pression et température du gaz dans les deux compartiments sont égales et valent respectivement P_0 et T_0.

Un opérateur extérieur déplace légèrement le piston puis l'abandonne. On note x la position du piston par rapport à sa position d'équilibre (on supposera $x \ll \ell$). Le rapport γ des capacités thermiques du gaz est supposé constant. On supposera que le gaz, dans chaque compartiment, subit des transformations quasi-statiques.

1. On nomme P_g la pression du gaz dans le compartiment de gauche. Déterminer P_g en fonction de P_0, γ, x et ℓ. On rappelle que $(1+\varepsilon)^\alpha = 1 + \alpha\varepsilon + o(\varepsilon)$.
2. On nomme P_d la pression du gaz dans le compartiment de droite. Déterminer P_d en fonction de P_0, γ, x et ℓ.
3. Montrer que le piston oscille autour de sa position d'équilibre à une pulsation ω_0 que l'on déterminera.

13. Expérience de Clément-Desormes** Un récipient d'un volume de quelques dm^3 est muni d'une pompe, d'un robinet R et d'un manomètre à eau. Initialement, ce récipient contient de l'air sous la pression atmosphérique P_0 et à la température T_0 de l'air extérieur. On comprime très légèrement ce gaz grâce à la pompe, puis on réalise la suite d'opérations suivantes :



Opération 1 On attend que l'équilibre thermodynamique soit atteint.

Opération 2 On lit la dénivellation h_1 du manomètre (h_1 est de l'ordre de quelques cm).

Opération 3 On ouvre le robinet R et on le ferme aussitôt.

Opération 4 On attend que l'équilibre thermodynamique soit atteint.

Opération 5 On lit la dénivellation $h_2 < h_1$. On suppose que l'air est un gaz parfait de γ constant.

1. Analyser le processus expérimental et proposer un type de transformation subie par le gaz qui reste à l'intérieur de la bouteille.
2. Compléter l'analyse précédente et tracer dans un diagramme de Watt (P,V) la suite de transformations que subit le gaz resté dans la bouteille à la fin de l'expérience. On notera p_1 la surpression correspondant à h_1, p_2 la surpression correspondant à h_2 et θ l'abaissement de température correspondant à l'opération.
3. On ne s'intéressera qu'aux opérations 3, 4 et 5. Calculer γ en fonction de h_1 et h_2. A.N. : $h_1 = 18{,}2$ cm et $h_2 = 5{,}0$ cm.

14. Compression et détente adiabatique (très classique!) d'un gaz parfait** Une mole d'un gaz parfait de capacité thermique à volume constant $C_{V,m} = 5R/2$ est contenue dans un cylindre vertical calorifugé comportant un piston mobile calorifugé de section $S = 0{,}01$ m^2 de masse négligeable, en contact avec une atmosphère extérieure à pression constante $P_0 = 1{,}0.10^5$ Pa. Initialement, le gaz est en équilibre et sa température vaut $T_0 = 300$ K. On donne $g = 10$ m.s^{-2} et $R = 8{,}31$ J.K^{-1}.mol^{-1}.

1. Évolution brutale
   (a) On pose sur le piston une masse $M = 100$ kg et on laisse le système évoluer.
      i. L'évolution est-elle réversible ?
      ii. Déterminer la pression P_1 et la température T_1 du gaz lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (**1**). On fera les applications numériques et on remarquera pour simplifier les calculs ultérieurs que, numériquement, $Mg/S = P_0$.
      iii. Évaluer le travail W_1 et le transfert thermique Q_1 reçus par le gaz au cours de la transformation. Applications numériques.

   (b) L'état d'équilibre (**1**) étant atteint, on supprime la masse M et on laisse le système évoluer.
      i. Déterminer la pression P_2 et la température T_2 lorsqu'on atteint un nouvel état d'équilibre (**2**). Applications numériques.
      ii. Évaluer le travail W_2 et le transfert thermique Q_2 reçus par le gaz au cours de la transformation. Applications numériques.
      iii. A-t-on $T_2 = T_0$? Pourquoi ?
2. Évolution quasi-statique
   (a) Plutôt que de comprimer le gaz par le poids de masse M, on le fragmente en grains très petits que l'on pose un à un sur le piston de «façon très lente» (c'est-à-dire de manière quasi-statique) jusqu'à obtenir un état d'équilibre (**1′**).
      i. Calculer la température T_1' du gaz à l'équilibre.
      ii. Évaluer le travail W_1' et le transfert thermique Q_1' reçus par le gaz au cours de la transformation. Applications numériques.

   (b) Les grains sont enlevés un à un de façon très lente. Calculer la température T_2' du gaz à l'équilibre. A-t-on $T_2' = T_0$? Pourquoi ?

15. Gaz confinés par un fluide** On verse un liquide de masse volumique ρ dans un tube en U sans le remplir. Il subsiste donc deux colonnes d'air (assimilé à un gaz parfait pour lequel le rapport γ des capacités thermiques à pression constante et volume constant est connu et constant) A et B de hauteur ℓ_0, de volume V_0, de pression P_0 et de température T_0. On ferme alors la partie supérieure de ces colonnes, B par un obturateur simple et diathermane (en contact avec le milieu extérieur de température T_0 constante), A par un obturateur traversé par une résistance. Les parois du compartiment A sont athermanes. On fait passer du courant dans la résistance jusqu'à ce que la dénivellation entre les deux surfaces libres du liquide soit égale à ℓ_0. On négligera tout transfert thermique gaz/liquide.

1. Exprimer pour chacun des compartiments la pression et la température dans l'état d'équilibre final en fonction des données de l'énoncé.
2. Exprimer le transfert thermique Q_B reçu par l'air situé dans le compartiment B.
3. Exprimer le transfert thermique Q_A reçu par l'air situé dans le compartiment A.

16. Cylindre et piston** De l'air, à la température T_0, est contenu dans un cylindre aux parois diathermes, fermé par un piston également diathermane, de section S et de masse M. L'ensemble est placé dans l'air à la pression P_0. À l'équilibre, le piston se trouve à la distance h_1 du fond du récipient. L'air du cylindre subit une transformation monotherme, car il n'échange de l'énergie par transfert thermique qu'avec l'atmosphère extérieure dont la température T_0 est supposée constante. Dans l'état initial, l'air enfermé dans le cylindre est dans l'état (P_1, T_0, h_1).

1. On pose sur le piston la masse M_0. Après un certain temps, l'air du récipient se retrouve à la température T_0 et le piston se stabilise à la hauteur h_2 . Calculer le travail W_T échangé entre l'air intérieur et le milieu extérieur ainsi que l'état final (P_2, T_0, h_2). Faire l'application numérique.
2. On pose successivement sur le piston des masses m ($m \ll M_0$) en attendant à chaque fois que la température de l'air intérieur se stabilise (à la valeur T_0) et que le piston s'immobilise ; on répète l'opération jusqu'à ce que la surcharge totale soit égale à M_0. Calculer le travail W'_T échangé ainsi que l'état final (P_2, T_0, h'_2). Faire l'application numérique. Commentaire.

Données : $P_0 = 1{,}0.10^5$ Pa ; $g = 9{,}81$ m.s^{-2} ; $S = 0{,}10$ m^2 ; $M = M_0 = 100$ kg ; $h_1 = 1{,}0$ m ; $T_0 = 300$ K ; $\gamma = 1{,}4$.

17. Cycle de Lenoir** Un des premiers moteurs à deux temps à combustion interne fonctionne de la manière suivante :

— l'air et le carburant sont admis dans le cylindre ; à la fin de la phase d'admission, l'air se trouve dans l'état A (P_1, V_1, T_1) ;

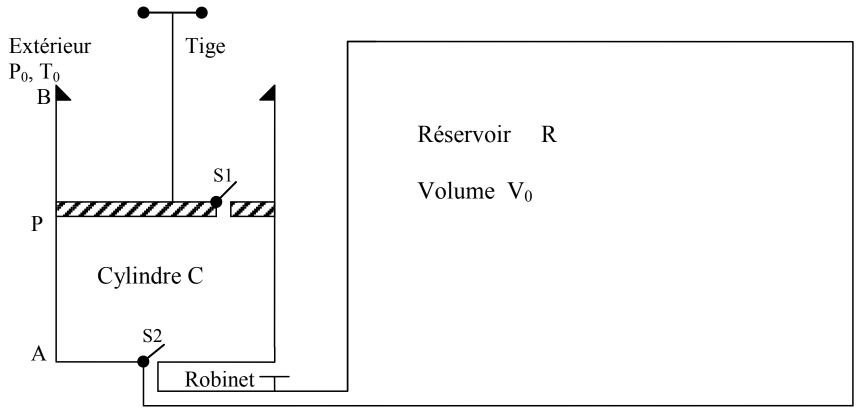
— la combustion du carburant (phase d'explosion) provoque une augmentation brutale de la pression à volume constant et fournit un transfert thermique Q_1 ; à la fin de la phase, les gaz résiduels sont dans l'état B (P_2, V_1, T_2) ;

— ils se détendent ensuite de manière adiabatique jusqu'à l'état C (P_1, V_2, T_3), les paramètres étant en permanence connus (état d'équilibre thermodynamique interne) ;

— enfin les gaz s'échappent du cylindre à pression constante P_1 et un nouveau cycle commence. Dans cet exercice, on néglige la quantité de matière de carburant liquide et on assimile l'air et les gaz brûlés à des gaz parfaits dont le coefficient $\gamma = c_P / c_V$ vaut $\gamma = 1{,}4$.

1. Représenter, dans le diagramme de Watt, le cycle de transformation ABCA des gaz (air ou gaz brûlés) dans le cylindre.
2. Calculer le travail W échangé par n moles de gaz au cours d'un cycle en fonction de R (constante des gaz parfaits), γ et des températures T_1, T_2 et T_3.
3. Le rendement r est défini par $r = |W/Q_1|$. Exprimer r d'abord en fonction de γ, T_1, T_2 et T_3 puis en fonction de γ et du rapport $a = V_2/V_1$.
4. Calculer r pour $a = 4$.

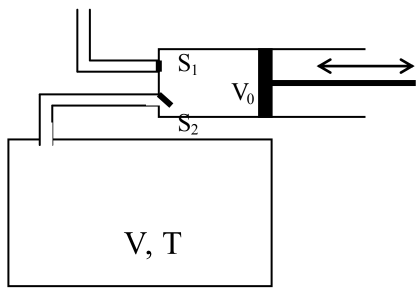
18. Pompe à vide** Le schéma suivant représente, en coupe, un réservoir R, un cylindre C (leurs parois sont diathermanes, c'est-à-dire perméables à la chaleur) et un piston P dont la course est limitée par le fond A et la cale B.



Quand le piston est en A, le volume du cylindre limité par le piston est V_A, quand il est en B, il vaut V_B. Le système est de plus muni de deux soupapes : S_1 permettant le passage du gaz uniquement de C vers l'extérieur et S_2 uniquement de R vers C, et ce, dès que la différence de pression entre les parties inférieure et supérieure de la soupape est positive. Le cylindre est relié, par un tube de volume négligeable devant les autres volumes du système, au réservoir R de volume V_0, très supérieur à V_B, contenant de l'air, supposé gaz parfait, dans lequel on souhaite «faire le vide».

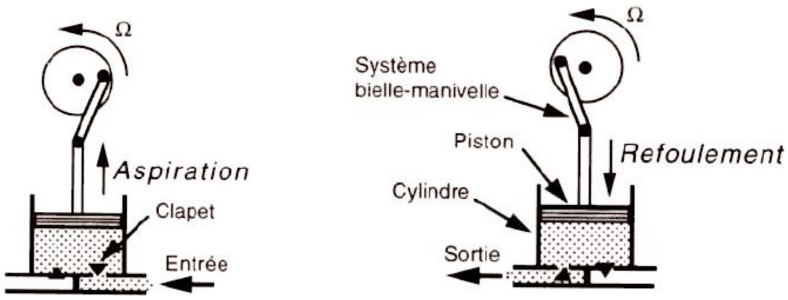
1. Dans l'état initial, le piston est en B, le cylindre et le réservoir contiennent de l'air à la pression atmosphérique P_0 et à la température T_0. On pousse le piston jusqu'en A exactement contre le fond (on considère qu'ici $V_A = 0$) et on le ramène en B assez lentement pour que la température reste T_0.
   (a) Expliquer les différents transferts de gaz au cours de cet aller-retour.
   (b) Montrer que la pression P_1 dans R quand le piston revient en B est $P_1 = P_0 \dfrac{V_0}{V_0 + V_B}$.
2. Si les transferts de gaz s'effectuent encore de la même façon, exprimer littéralement la pression P_2 après un deuxième aller-retour du piston.
3. Donner, dans ce cas, la forme générale de P_n après le n^e aller-retour.
   Quelle est la limite de P_n quand n tend vers l'infini ?
4. En réalité, quand le piston est en A, le volume V_A entre le piston et le fond n'est pas nul. La limite théorique précédente ne peut pas être atteinte. Pourquoi ? Déterminer la véritable limite théorique de cette pompe à vide. Pourquoi appelle-t-on V_A le «volume nuisible» ?
5. Quel est, en supposant disposer d'une pompe idéale ($V_A = 0$), le travail théorique minimum nécessaire pour faire le vide parfait dans R ? (On ne demande pas de calculs compliqués.)

19. Pompe à vide (bis)** Pour faire le vide dans une enceinte, contenant de l'air, de volume V, on utilise une pompe composée d'un cylindre à l'intérieur duquel se déplace, sans frottement, un piston. Le volume maximum d'air admissible dans le corps de pompe est v_0 (piston à l'extrême droite). Le piston peut atteindre le fond du cylindre (à l'extrême gauche). Un jeu de soupapes, S_1 et S_2, permet l'admission (ou le refoulement) de l'air venant de l'enceinte (vers l'atmosphère extérieur à P_0). Un moteur électrique déplace le piston, celui-ci fait un aller et un retour quand le moteur a fait un tour. On assimilera l'air à un gaz parfait et la température T, de l'air, reste constante lors du fonctionnement. Au départ la pression dans l'enceinte est $P_0 = 1{,}000.10^5$ Pa. On néglige le volume du tuyau reliant la pompe à l'enceinte.



1. Le piston est à gauche, il se déplace jusqu'à l'extrême droite, S_2 est ouverte et S_1 est fermée. Déterminer la pression P_1 à la fin de cette opération.

   Lors du retour du piston, à gauche, S_1 est ouverte et S_2 est fermée, l'air contenu dans le cylindre est refoulé vers l'extérieur. Ces opérations constituent un aller et retour du piston.
2. En reprenant le raisonnement précédent, déterminer la pression P_2, dans l'enceinte, à la fin du deuxième aller du piston.
3. En déduire la pression P_N, à l'intérieur de l'enceinte, au bout de N allers-retours.
4. La fréquence de rotation du moteur est de 300 tr.min^{-1}. Déterminer le temps t pour obtenir une pression de $0,001.10^5$ Pa. On donne $V = 10,0$ L et $v_0 = 50,0$ cm^3.



20. Puissance mécanique du cœur ** Le cœur est une double pompe (cœurs droit et gauche, chacun possédant deux cavités : oreillette et ventricule). Le but de cet exercice étant d'évaluer la puissance mécanique du cœur, on utilise une description très simple dans laquelle le cœur est assimilé à son ventricule gauche. Au cours d'un battement de cœur (pulsation), ce ventricule décrit le cycle suivant :

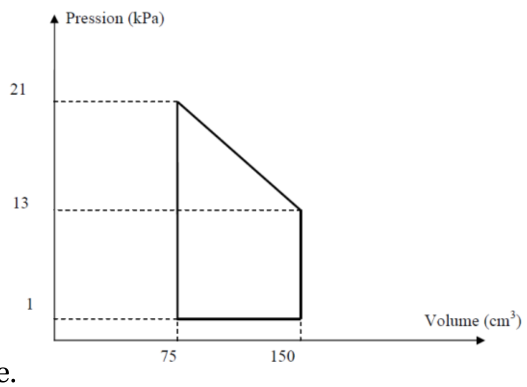
— Phase de remplissage isobare AB : le ventricule se remplit du sang provenant des veines, il double de volume à pression constante et faible.

— Phase de contraction isochore BC : la tension des fibres musculaires fait augmenter la pression dans la cavité sans variation de volume.

— Phase d'éjection CD : dès que la pression dans le ventricule dépasse 13 kPa, une partie du sang est éjectée dans l'aorte.

— Phase de relâchement isochore DA : le muscle relâche sa tension et la pression chute brutalement.

1. Indiquer sur le diagramme pression-volume du ventricule fournit en annexe le sens de parcours du cycle et reporter les points A, B, C et D.
2. Donner l'expression générale du travail échangé par le ventricule avec l'extérieur lors d'une transformation. Expliquer comment le travail fourni pendant un cycle par les muscles entourant le ventricule peut-être évalué à l'aide du diagramme pression-volume du ventricule.
3. À l'aide du diagramme, calculer numériquement les travaux W_{AB}, W_{BC}, W_{CD} et W_{DA} fournis par le ventricule dans chaque phase du cycle. Justifier à chaque fois le signe obtenu. On donnera les valeurs numériques en kPa.cm^3 puis en Joules.
4. En déduire le travail fourni par le ventricule au cours d'un cycle.



5. La fréquence cardiaque étant de $f = 70$ pulsations par minute, calculer la puissance mécanique $\mathscr{P}_{\text{méca}}$ du ventricule.
6. La puissance musculaire consommée pour la contraction des muscles du ventricule est $\mathscr{P}_{\text{muscles}} = 15$W. Comment définir le rendement mécanique du ventricule ? Donner sa valeur numérique en %.

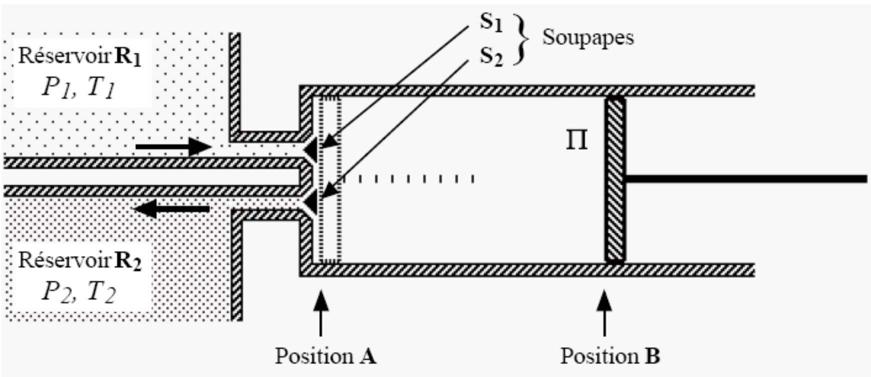
21. Travail de refoulement** *Cet exercice a pour but de montrer la différence entre un système fermé (ses évolutions sont alors suivies dans un diagramme de Clapeyron* (P, v) *où* v *désigne le volume massique du fluide étudié) et un système ouvert de masse variable (ses évolutions sont suivies dans un diagramme de Watt* (P, V) *où* V *désigne le volume du cylindre offert au fluide dont la masse varie). Dans le premier cas, le système est le fluide ; dans le second cas, le système est la machine.*

On étudie la compression réversible d'un gaz dans un compresseur parfaitement calorifugé. Il s'agit de prélever du gaz situé dans un réservoir R_1, de grandes dimensions, maintenu à la pression P_1 et à la température T_1 constantes, de le comprimer, puis de le refouler dans un second réservoir R_2, lui aussi de grandes dimensions, maintenu à P_2 et T_2 constantes. Le gaz est parfait, de masse molaire M et de caractéristique énergétique $\gamma = C_{P,m}/C_{V,m}$ (rapport des coefficients thermiques molaires, respectivement isobare et isochore) constante. La transformation s'effectue en trois étapes :

(I) Étape d'admission La soupape d'admission S_1 est ouverte, et la soupape de refoulement S_2 est fermée. Le piston Π est initialement au fond du cylindre (position extrême A) : le volume interne V_i du cylindre est alors considéré comme nul (volume résiduel). Par déplacement du piston, une masse m de gaz, initialement stockée dans le réservoir R_1, est aspirée dans le cylindre à pression P_1 et température T_1 constantes. Lorsque Π est en bout de course (position extrême B), le volume interne du cylindre est $V_i = V_1$.

(II) Étape de compression Les deux soupapes sont fermées. La masse m de gaz est alors comprimée, par déplacement du piston, de l'état (P_1, V_1, T_1) à l'état (P_2, V_2, T_2), avec $0 < V_2 < V_1$. On suppose que le gaz est parfait et qu'il subit une transformation polytropique d'indice k (c'est-à-dire qu'au cours de la transformation $PV^k = C^{te}$).

(III) Étape de refoulement La soupape S_1 reste fermée, mais la soupape S_2 s'ouvre. Le gaz est refoulé à P_2 et T_2 constantes, dans le second réservoir R_2. Le piston Π se retrouve finalement dans sa position A initiale. Le volume du cylindre est revenu à zéro (la machine a effectué un cycle, pas le fluide !).



1. Tracer le diagramme de Watt de la machine.
2. (a) Calculer le travail de la force de pression extérieure au cours du cycle W_{ext}.
   (b) Calculer le travail fourni par l'opérateur ou le moteur actionnant le compresseur W_{op}.
   (c) En déduire le travail de transvasement W_{tr} défini comme étant l'énergie nécessaire pour faire passer le fluide de l'état initial (P_1, T_1) à l'état final (P_2, T_2).

♫