

Durée 4h

*N.B. : Le candidat attachera la plus grande importance à la **clarté**, à la **précision** et à la **concision** de la **rédaction**. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.*

RAPPEL DES CONSIGNES

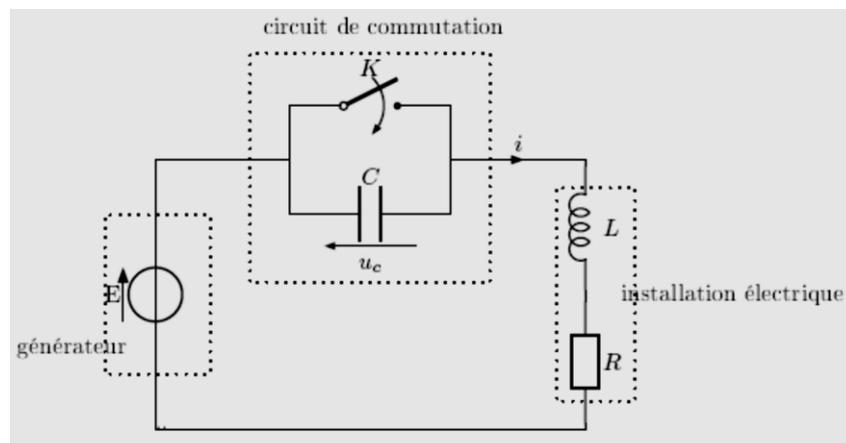
- Utiliser uniquement un **stylo noir ou bleu foncé non effaçable** pour la rédaction de votre composition ; **d'autres couleurs, excepté le vert**, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les **schémas** et la **mise en évidence des résultats**.
- **Ne pas utiliser de correcteur**.
- **Numéroter les copies** : "i/nombre total".
- **Respecter les notations** de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la **numérotation de la question posée**.
- **Écrire le mot FIN à la fin de votre composition**.

Le sujet comprend un document réponse p.12 à rendre avec la copie.

Ex 1 : Problèmes liés à la surtension aux bornes d'un circuit RL commuté

Une installation électrique à caractère inductif est modélisée par l'association série d'une bobine idéale d'inductance L et d'une résistance R . Elle est alimentée par un générateur assimilé à une source idéale de tension de force électromotrice E .

Le contact entre le générateur et l'installation électrique s'effectue par l'intermédiaire d'un circuit de commutation, constitué d'un interrupteur K , en parallèle avec un condensateur de capacité C .



On suppose que l'interrupteur K est ouvert depuis très longtemps et que le courant circulant dans l'installation est nul. A $t = 0$, on ferme l'interrupteur.

- 1) Que vaut u_C pour $t > 0$? Etablir l'équation différentielle régissant l'intensité $i(t)$ du courant circulant dans le circuit. Montrer que l'on peut le mettre sous la forme :

$$\frac{di}{dt} + \frac{i}{\tau} = \frac{i_0}{\tau}$$

Donner les expressions de τ et i_0 en fonction des données.

- 2) Résoudre soigneusement l'équation différentielle afin de déterminer totalement l'expression de l'intensité $i(t)$ pour $t > 0$.
- 3) Vers quelle valeur tend cette intensité pour $t \rightarrow \infty$? A quel instant $t_{99\%}$ la valeur de i est-elle égale à 99 % de la valeur finale ? Pour $t > t_{99\%}$, on peut alors assurer, à mieux que 1 % que le régime permanent est atteint.
- 4) Représenter graphiquement l'évolution de $i(t)$ en faisant figurer les valeurs particulières en abscisse et en ordonnée.
- 5) A partir de l'expression de $i(t)$, déterminer l'expression de la puissance instantanée $P(t)$ reçue par la bobine idéale. Fonctionne-t-elle en générateur ou en récepteur ?

Le nouveau régime permanent étant alors établi, on change d'origine des temps : on note maintenant $t = 0$ l'instant auquel on ouvre l'interrupteur K .

- 6) Montrer que l'équation différentielle régissant la tension u_C aux bornes du condensateur s'écrit :

$$\frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \cdot \frac{du_C}{dt} + \omega_0^2 u_C = \omega_0^2 U_0$$

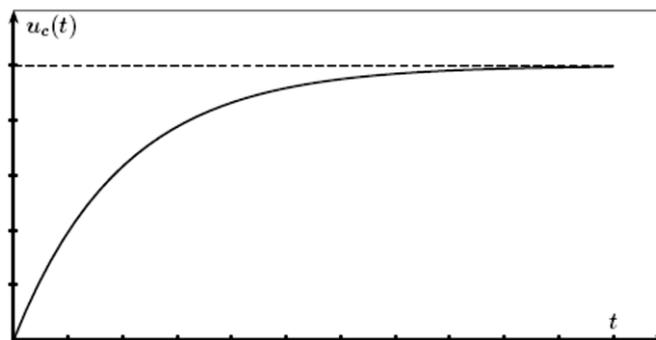
Et en déduire que celle régissant $i(t)$ s'écrit :

$$\frac{d^2 i}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \cdot \frac{di}{dt} + \omega_0^2 i = 0$$

Préciser les expressions de ω_0 , Q et U_0 .

- 7) Déterminer l'expression C_0 de C telle que le courant $i(t)$ s'annule-t-il le plus rapidement ? Quel est le nom de ce régime ? Représenter graphiquement l'évolution de $i(t)$.

- 8) Si $C = C_0$, la courbe représentant l'évolution de $u_C(t)$ a l'allure suivante :



Quelle est la valeur finale de $u_C(t)$? Que vaut la pente de cette courbe à $t = 0$?

- 9) Le problème est que l'on ne peut pas avoir exactement cette valeur de C . Sachant que si la tension $u_C(t)$ aux bornes du circuit de commutation subit une surtension (elle admet alors un maximum), cela peut endommager le circuit, faut-il prendre une capacité C légèrement supérieure ou inférieure à C_0 ? Dans quel régime se trouve-t-on alors ?
- 10) Expliquer qualitativement pourquoi, si l'on ne met pas de condensateur en parallèle avec l'interrupteur, on observe une étincelle (appelée étincelle de rupture) lorsque l'on ouvre celui-ci.

Ex 2 : Quartz

Le quartz est une forme particulière de cristal de silice tel que :

- quand on comprime un morceau de quartz dans une direction particulière, une tension apparaît aux bornes du cristal (c'est l'effet piézo-électrique).
- quand on applique une tension aux bornes d'un quartz, ce dernier se déforme proportionnellement à la tension appliquée (c'est l'effet piézo-électrique inverse).

Ainsi, le quartz est très intéressant pour l'électronique car on parvient à réaliser des circuits oscillants, à base de résonateur à quartz, très stables dans le temps.

I-A) Modélisation d'un résonateur à quartz

I-A-1) Modèles mécanique et électrique du résonateur à quartz

Un cristal de quartz est taillé sous forme de **pastille cylindrique** mince. La base circulaire présente un diamètre $d = 1$ cm et l'épaisseur de la pastille est $e = 0,2$ mm. Des électrodes métalliques (en or généralement) sont déposées sur chacune des faces circulaires du quartz (on suppose que ces faces sont totalement métallisées) (figure 1). On parle d'électrodes de connexion. On a ainsi réalisé un condensateur plan.

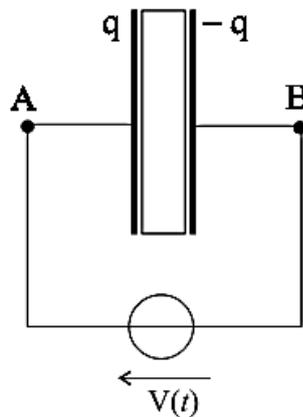


Figure 1 : schéma d'un quartz alimenté par une tension $V(t)$

D'un point de vue mécanique, lorsque l'on soumet le disque piézo-électrique à une tension sinusoïdale $V(t) = V \cdot \cos(\omega t)$, il va être, dans le cadre d'une approximation linéaire, le siège d'une vibration mécanique sinusoïdale sous l'effet d'une force extérieure proportionnelle à cette tension.

Modélisation proposée : un élément de masse m du corps piézo-électrique, placé à une distance x de son point de repos, est soumis aux forces suivantes, toutes orientées selon un axe (Ox) que l'on ne précise pas ici :

- une force de rappel type élastique $-k \cdot x$ ($k > 0$) qui a pour origine la rigidité du matériau,
- des frottements supposés proportionnels à la vitesse et de la forme $-h \cdot \frac{dx}{dt}$ ($h > 0$),
- une force due à l'effet piézo-électrique $\beta \cdot V(t)$ ($\beta > 0$),
- le poids est négligé.

I-A-1-a) En appliquant le principe fondamental de la dynamique au petit élément de masse m dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen, établir l'équation différentielle vérifiée par $x(t)$ en supposant que le mouvement se fasse selon l'axe (Ox) .

D'un point de vue électrique, la charge totale q apparaissant sur les électrodes planes a deux origines :

- les deux faces planes du disque forment un condensateur de capacité C_P , d'où une charge $q_1(t)$,
- l'effet piézo-électrique provoque l'apparition d'une charge q_2 proportionnelle à x : $q_2(t) = \gamma \cdot x(t)$.

I-A-1-b) On montre que la capacité d'un condensateur plan vaut $C_p = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e}$ où S est la surface d'une électrode, e l'épaisseur du condensateur, ϵ_0 la permittivité du vide (sa valeur est $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$) et ϵ_r une constante valant pour le quartz $\epsilon_r = 2,3$.

- Estimer alors la capacité C_p appelée capacité de connexion.
- Quelle est la relation entre la charge q_1 , la capacité C_p et la tension $V(t)$?

I-A-1-c) En reprenant l'équation différentielle obtenue pour $x(t)$, écrire l'équation différentielle vérifiée par la charge $q_2(t)$.

I-A-1-d) Considérons le circuit représenté sur la figure 2 ci-dessous.

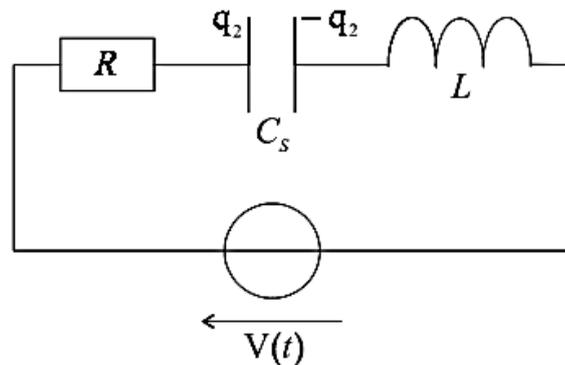


Figure 2 : circuit R, L, C_S série

Montrer que la charge $q_2(t)$ est équivalente à la charge d'un condensateur de capacité C_S dans le circuit série R, L, C_S dont la tension aux bornes est $V(t)$. On donnera alors les expressions de R, L et C_S en fonction de m, h, β, γ et k .

I-A-2) Etude de l'impédance équivalente du quartz

Dans cette partie, on néglige la résistance R du quartz. Le schéma électrique simplifié est alors donné sur la figure 3.

Pour les applications numériques, on prendra $L = 500 \text{ mH}$, $C_S = 0,08 \text{ pF}$ et $C_p = 8 \text{ pF}$.

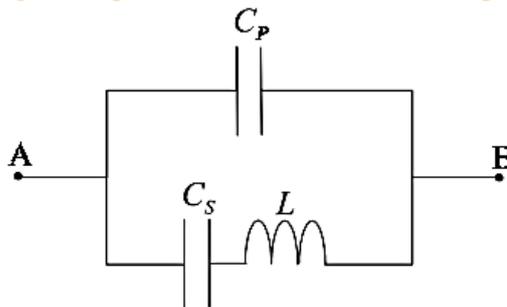


Figure 3 : modèle électrique d'un quartz

On se placera toujours en régime sinusoïdal forcé (les grandeurs dépendront de la pulsation ω).

I-A-2-a) Calculer alors l'impédance complexe du quartz, vue entre les bornes A et B. On

l'écrira sous la forme $Z_{AB} = \left(-\frac{j}{\alpha\omega} \right) \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_r^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_a^2}}$ où j est le nombre imaginaire pur tel que

$j^2 = -1$. On donnera, en fonction de L, C_p et C_S les expressions de α, ω_a^2 et ω_r^2 .

Montrer aussi que $\omega_a^2 > \omega_r^2$.

On pourra admettre les résultats de cette question pour poursuivre la résolution du problème.

I-A-2-b) Donner les valeurs numériques des fréquences f_a et f_r correspondant respectivement aux pulsations ω_a et ω_r .

I-A-2-c) Etudier le comportement inductif ou capacitif du quartz en fonction de la fréquence. On rappelle qu'un dipôle a un comportement inductif (respectivement capacitif) si la partie imaginaire de son impédance est positive (respectivement négative).

I-A-2-d) Tracer l'allure de $Z_{AB} = \|Z_{AB}\|$, module de l'impédance complexe du quartz, en fonction de la fréquence.

I-A-3) Etude expérimentale de la résonance d'un quartz

On veut tracer expérimentalement la courbe donnant l'impédance du quartz en fonction de la fréquence d'excitation. On dispose d'un générateur basses fréquences pouvant délivrer une tension sinusoïdale d'amplitude réglable. Le GBF possède une résistance interne R_g . On dispose d'une résistance R_v variable, d'un quartz et d'un oscilloscope.

Dans cette question, on néglige toujours la résistance du quartz sauf dans la question I-A-3-c.

On réalise alors le montage de la figure 4 suivante.

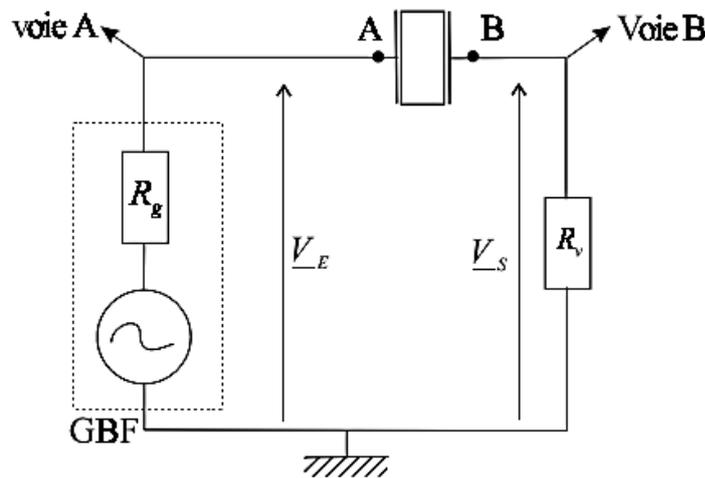


Figure 4 : montage expérimental pour l'étude de la résonance du quartz

I-A-3-a) Calculer le rapport de la tension de sortie V_s à celle d'entrée V_E : $H = V_s / V_E$ en fonction de R_v et de Z_{AB} .

I-A-3-b) On choisit, pour chaque fréquence, la résistance R_v de telle façon que $\|H\| = 1/2$. Que vaut alors le module de l'impédance du quartz en fonction de R_v ?

I-A-3-c) Autour du pic de résonance d'intensité situé vers 796 kHz, on mesure une bande passante de 50 Hz. Quelle est la valeur numérique du facteur de qualité Q du quartz défini comme le rapport de la largeur de la bande passante à la fréquence de résonance? Commenter cette valeur. En supposant que le facteur de qualité soit donné par la relation $Q = \frac{L\omega_0}{R}$ (ω_0 étant la pulsation de résonance), estimer la valeur de la résistance R du quartz.

Ex 3 : Etude d'un filtre sélectif

On applique une tension $u_e(t)$ sinusoïdale de pulsation ω à l'entrée du filtre RLC représenté sur la figure 3 avec $R = 20 \text{ k}\Omega$, $C = 2,0 \text{ }\mu\text{F}$ et $L = 20 \text{ mH}$.

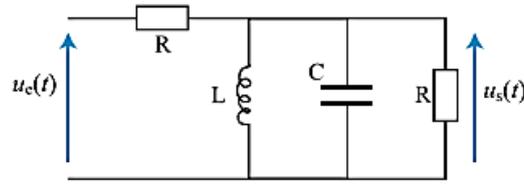


Figure 3

1. Déterminer la fonction de transfert complexe $\underline{H}(j\omega)$ du filtre, sous forme normalisée. Quels sont sa pulsation propre ω_0 et son facteur de qualité Q ? Donner leurs valeurs numériques.
2. Déterminer le gain $G(\omega) = |\underline{H}(j\omega)|$ et le déphasage $\Phi(\omega) = \arg(\underline{H}(j\omega))$ introduits par le filtre.
3. Que vaut la largeur $\Delta\omega$ de la bande passante à -3 dB de ce filtre? Une démonstration précise est attendue.

Pour tout la suite du problème, la tension $u_e(t)$ appliquée à l'entrée du filtre RLC est désormais un signal triangle de période $T = 3,77 \text{ ms}$, de pulsation associée ω_f et d'amplitude $A = 10,0 \text{ V}$ (voir figure 4).

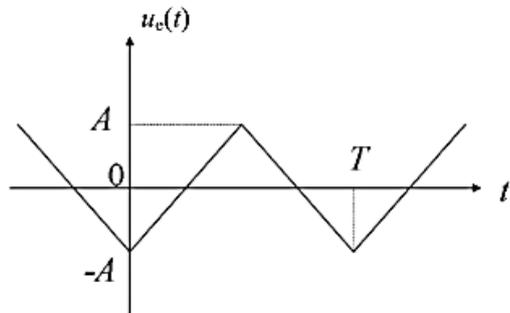


Figure 4

On donne la série de Fourier associée à ce signal :

$$u_e(t) = \sum_{p=0}^{+\infty} \frac{(-1)^p 8A}{\pi^2(2p+1)^2} \sin[(2p+1)\omega_f t]$$

4. Comparer numériquement les valeurs de ω_0 et ω_f .
5. On cherche $u_s(t)$ sous la forme :

$$u_s(t) = A_0 \sin(\omega_f t + \Phi_0) + \frac{A_1}{3^2} \sin(3\omega_f t + \Phi_1) + \dots + \frac{A_p}{(2p+1)^2} \sin[(2p+1)\omega_f t + \Phi_p] + \dots$$

Déterminer l'amplitude A_p et le déphasage Φ_p du terme de rang $k = 2p+1$ en fonction de Q , ω_f , ω_0 et A .

6. AN : calculer A_p et Φ_p pour les termes de pulsation ω_f , $3\omega_f$ et $5\omega_f$. Quel est le terme prépondérant? Comment s'écrit approximativement $u_s(t)$? Pouvait-on prévoir ce résultat sans calculs?
7. Représenter soigneusement sur le même schéma $u_e(t)$ et $u_s(t)$. Quel est l'intérêt de ce dispositif?

Ex 4 : Moteur Stirling

Le projet KRUSTY, dont le nom est l'acronyme de « Kilopower Reactor Using Stirling Technology », est un projet de la NASA qui vise à développer des réacteurs nucléaires pour l'exploration spatiale

Au début du XIX^e siècle, les chaudières des machines à vapeur, soumises à de trop fortes pressions, explosent assez souvent. Robert Stirling a ainsi imaginé en 1816 un moteur dépourvu de chaudière où la chaleur est apportée de l'extérieur de la machine (moteur à « air chaud »). L'utilisation de ce moteur restera limitée, en particulier en raison de la trop faible puissance des modèles proposés, insuffisante pour concurrencer la machine à vapeur et le moteur à combustion interne.

Le moteur Stirling bénéficie actuellement d'un nouvel intérêt car il présente de nombreux avantages. Il peut utiliser n'importe quelle source d'énergie produisant de la chaleur, combustion de tout matériau mais également énergie solaire, nucléaire, géothermique, etc. Il produit peu de vibrations et est silencieux (pas d'explosion interne ni d'échappement gazeux, absence de valves et soupapes). Grâce à l'utilisation de matériaux modernes qui supportent de grands écarts de température et qui améliorent les transferts thermiques, son rendement est comparable, voire supérieur à celui des moteurs à combustion interne. Son entretien est facile et il s'use moins que les moteurs à explosion.

La conception d'un moteur Stirling est cependant délicate, en raison des gros écarts de température qu'il doit supporter et de la nécessité d'une excellente étanchéité ; son prix reste donc élevé. Par ailleurs, il est difficile de faire varier son régime. Son emploi reste ainsi cantonné à des utilisations de niches : générateur d'électricité en milieux extrêmes, propulseur pour sous-marins, etc. Sa réversibilité conduit à l'utiliser comme pompe à chaleur capable de refroidir à $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ou de chauffer à plus de $700\text{ }^{\circ}\text{C}$.

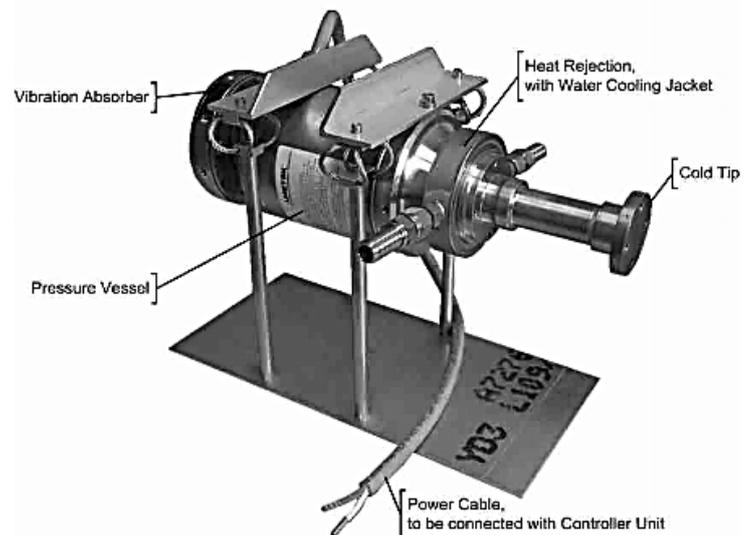
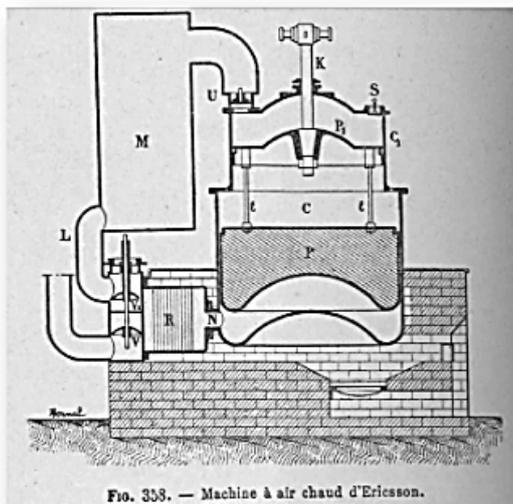


Figure 7 Gravure de 1899 d'un Moteur Ericsson M1851 avec régénérateur type Stirling (Wikipedia) et moteur Stirling de l'entreprise Sunpower fournissant le projet KRUSTY (ResearchGate)

III.A – Description du moteur

Une enceinte étanche est séparée en deux chambres, une chambre chaude (chauffée par l'extérieur), de volume maximal V_1 , et une chambre froide équipée d'un dissipateur thermique (ailettes), de volume maximal V_2 . Chaque chambre est dotée d'un piston permettant de faire varier son volume et le fluide peut circuler librement d'une chambre à l'autre. Le piston de la chambre froide est le piston de travail, il entraîne le piston de la chambre chaude appelé « déplaceur » car son rôle est de faire circuler le fluide entre les deux chambres. Lors du transvasement, le fluide passe de la chambre chaude à la température T_3 à la chambre froide à la température $T_1 < T_3$ et réciproquement.

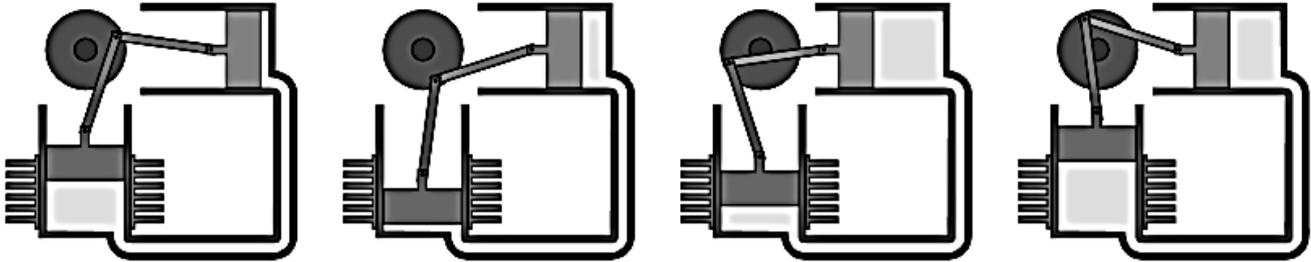


Figure 8 Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (d'après Wikipedia)

Le mouvement du gaz peut être décrit par 4 phases plus ou moins distinctes (figure 8) :

- une phase de compression, pendant laquelle le volume de la chambre chaude est minimal, le fluide, entièrement situé dans la zone froide, est comprimé par le piston de travail dans sa course vers le bas ;
- une fois le piston de travail au point mort bas, le déplaceur est ramené à gauche, ce qui a pour effet de transvaser le fluide comprimé, qui passe de la zone froide vers la zone chaude et reçoit un transfert thermique de la source externe ;
- une phase de détente, pendant laquelle le fluide se détend dans le volume d'expansion où il continue d'être chauffé. Cette détente a pour effet de repousser le déplaceur et le piston de travail ;
- une fois que le piston de travail a atteint le point mort haut, le déplaceur est ramené à droite, ce qui a pour effet de transvaser le fluide de la zone chaude (volume d'expansion) vers la zone froide (volume de compression). Au cours de ce transfert, le fluide cède de la chaleur au refroidisseur.

Un cycle réel d'un moteur de Stirling est représenté dans le diagramme (p, V) en figure B du document réponse.

Q 30. Justifier que ce cycle est celui d'un moteur.

Q 31. Estimer la valeur du travail fourni par le moteur pendant un cycle.

III.B – Modélisation du cycle

On étudie le cycle de Stirling idéal. Au cours de celui-ci, n moles de gaz parfait de coefficient adiabatique γ subissent les transformations suivantes :

- une compression $(1 \rightarrow 2)$ isotherme réversible à la température T_1 ,
- un échauffement $(2 \rightarrow 3)$ isochore jusqu'à l'état 3 de température T_3 ,
- une détente $(3 \rightarrow 4)$ isotherme réversible à la température T_3 ,
- un refroidissement $(4 \rightarrow 1)$ isochore jusqu'à l'état 1.

Il n'y a pas d'autre travail que celui des forces de pression.

Q 32. Représenter sur la figure B du document réponse, à rendre avec la copie, l'allure du diagramme correspondant au cycle idéal.

On note $r = \frac{V_1}{V_2}$ le rapport de compression entre les volumes fixés par construction. On rappelle que la capacité thermique à volume constant d'un gaz de n moles de gaz parfait vaut $C_V = \frac{nR}{\gamma - 1}$ où R est la constante des gaz parfaits.

Q 33. Exprimer W_{12} , le travail reçu par le fluide au cours de la compression, en fonction de n , R , T_1 et r . En déduire le transfert thermique Q_{12} reçu par le fluide au cours de cette compression en fonction de n , R , T_1 et r . Préciser les signes de W_{12} et de Q_{12} .

Q 34. Exprimer Q_{23} , le transfert thermique reçu par le fluide au cours de l'échauffement isochore, en fonction de n , R , T_1 , T_3 et γ . Préciser son signe.

Q 35. Exprimer W_{34} , le travail reçu par le fluide au cours de la détente, en fonction de n , R , T_3 et r . En déduire le transfert thermique Q_{34} reçu par le fluide au cours de cette détente en fonction de n , R , T_3 et r . Préciser les signes de W_{34} et Q_{34} .

Q 36. Exprimer le transfert thermique Q_{41} reçu par le fluide au cours du refroidissement en fonction de n , R , T_1 , T_3 et γ . Préciser son signe.

III.C – Rendement du moteur

Q 37. Définir puis exprimer le rendement idéal du moteur en fonction de T_1 , T_3 , r et γ .

Q 38. Définir et exprimer le rendement de Carnot en fonction de T_1 et T_3 .

En réalité, le moteur de Stirling utilisé dans le projet KRUSTY contient un régénérateur. Dans ce cas, la chaleur perdue par le gaz lors du refroidissement isochore ($4 \rightarrow 1$) est récupérée par le gaz lors du chauffage isochore ($2 \rightarrow 3$). Si le régénérateur est idéal, cette récupération est totale.

Q 39. Que devient le rendement du cycle idéal dans ce cas ?

Dans les conclusions du test de la NASA du dispositif KRUSTY réalisé en 2018, les ingénieurs indiquent que l'efficacité des moteurs a évolué pendant l'expérience entre 30 % et 50 % de l'efficacité de Carnot. De plus, pour les deux moteurs combinés, la puissance électrique obtenue est d'environ 180 W.

Q 40. En prenant une température chaude de 640°C et une température froide de 60°C et en supposant la conversion du travail mécanique en travail électrique parfaite, estimer numériquement la puissance thermique fournie par la source chaude aux deux moteurs de Stirling combinés.

Ex 5 : Transformations d'un fluide

- 1) Question préalable : On considère dans cette question un gaz parfait de température T , de volume V et de quantité de matière n . Montrer que l'entropie S d'un tel système peut s'exprimer ainsi :

$$S(T, V) = \frac{nR}{\gamma - 1} \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + nR \ln\left(\frac{V}{V_0}\right) + S_0$$

avec R la constante des gaz parfaits, $\gamma = \frac{C_P}{C_V}$ et $S_0 = S(T_0, V_0)$.

On étudie deux détente de d'un gaz parfait et le changement d'état d'un corps pur. Ces études constituent des parties indépendantes les unes des autres.

Partie A – Détentes d'un gaz parfait

On étudie deux détente de n moles d'un gaz parfait.

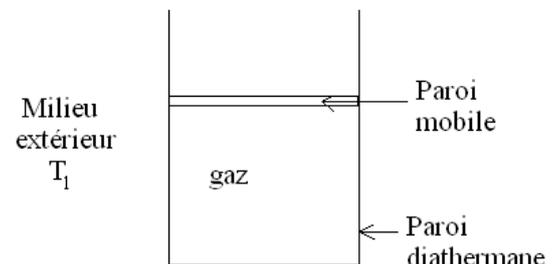
◆ Détente quasi-statique

On enferme le gaz dans une enceinte diathermane (permettant les échanges thermiques) dont une paroi horizontale (piston), de masse négligeable, est mobile verticalement sans frottement.

La température T_1 du milieu extérieur est constante. L'extérieur se comporte comme un thermostat.

A l'état initial, le gaz est caractérisé par une pression P_1 , un volume V_1 et une température T_1 et la paroi est bloquée.

On débloque la paroi et on la déplace de manière quasi statique jusqu'à une position, telles que le volume V_1' offert au gaz soit $V_1' = 2V_1$, et on la bloque à nouveau.



- Déterminer la pression P_1' du gaz dans l'état final en fonction de P_1 .
- Déterminer l'expression du travail W reçu par le gaz au cours de cette transformation en fonction de n , R et T_1 .
- Déterminer l'expression du transfert thermique Q reçu par le gaz en fonction de n , R et T_1 .
- Déterminer l'expression de la variation d'entropie ΔS au cours de cette transformation.
- Déterminer l'expression de l'entropie créée S_c et commenter.

◆ Détente de Joule Gay-Lussac

Au XIX^e siècle, Joule et Gay-Lussac imaginaient le dispositif suivant pour étudier les propriétés des gaz réels. Deux compartiments aux parois athermanes (= calorifugées) et indéformables communiquent par un robinet. Ce robinet, initialement fermé, sépare le compartiment (1), de volume V_0 , initialement rempli d'une quantité n de gaz en équilibre à la température T_1 , du compartiment (2), de volume V_0 , dans lequel on a fait le vide.

On ouvre le robinet et on attend l'établissement d'un nouvel équilibre du gaz à la température T_F .

- En appliquant le premier principe de la thermodynamique, déterminer la variation d'énergie interne ΔU du gaz au cours de cette transformation.
- Si le gaz étudié est un gaz parfait, déterminer T_F puis l'entropie créée S_c et commenter.
- On suppose maintenant que le gaz étudié est un gaz de Van der Waals d'énergie interne :

$U = nC_{Vm}T - \frac{n^2a}{V}$ avec $C_{Vm} = 12 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ et a une constante positive caractéristique du gaz étudié.

Expérimentalement, on constate que la température du gaz diminue au cours de la détente : $\Delta T = -5,4^\circ\text{C}$ pour $V_0 = 1,0\text{ L}$ et $n = 1,0\text{ mol}$. En déduire la valeur du coefficient a du gaz étudié.

Partie B – Changements d'états d'un fluide

Le document réponse p. 12 (à rendre avec la copie) donne le diagramme de Clapeyron (P, v) d'un corps pur.

◆ Analyse du diagramme de Clapeyron

- 10) Repérer la courbe de saturation, les domaines L, L+G et G et le point critique sur le diagramme du document réponse p.12 (à rendre avec la copie).
- 11) Justifier l'allure des courbes isothermes (tracées en trait plein) dans les différents domaines.

◆ Echauffement isochore de 280 K à 300 K

Une masse m de ce corps est stockée dans une cuve fermée, indéformable de volume $V = 200\text{ L}$. Ce corps, à la température initiale $T_i = 280\text{ K}$, subit un échauffement isochore jusqu'à obtenir de la vapeur saturante sèche à la température $T_f = 300\text{ K}$.

- 12) Déterminer le volume massique du fluide v .
- 13) Déterminer la pression finale du fluide.
- 14) Déterminer le titre massique initial x_{vi} en vapeur du fluide.
- 15) En considérant que la vapeur d'eau sèche et saturante est assimilable à un gaz parfait, déterminer l'expression de la variation d'entropie massique du fluide lors de la transformation en fonction de R , x_i , γ , de M la masse molaire du corps pur et des grandeurs du tableau ci-dessous.

T	Volume massique de la vapeur saturante ($x_v = 1$)	Enthalpie massique de vaporisation
T_i	$v_G(T_i)$	$l_{vap}(T_i)$
T_f	$v_G(T_f)$	$l_{vap}(T_f)$

◆ Echauffement accidentel de 280 K à 320 K

- 16) Dans la même cuve, on stocke une masse m' de ce corps initialement à $T_i = 280\text{ K}$. Pour éviter le risque d'explosion, en cas d'échauffement accidentel jusqu'à $T_f' = 320\text{ K}$, justifier qu'il faut que le volume massique initial du fluide soit assez supérieur au volume massique critique.

NOM :

Ex 4 – Moteur de Stirling

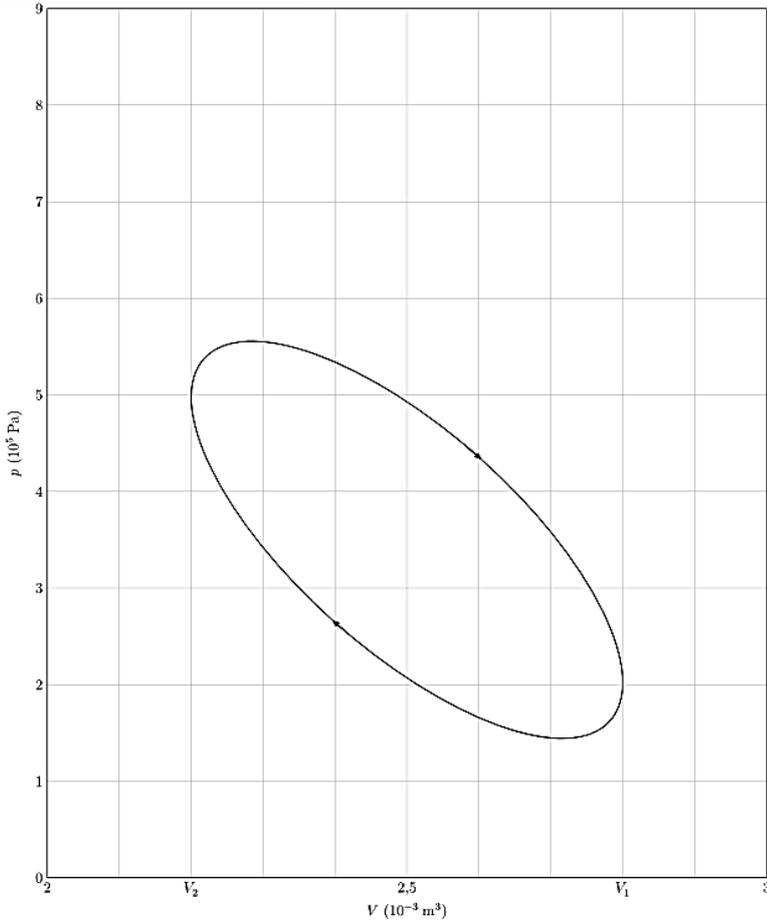
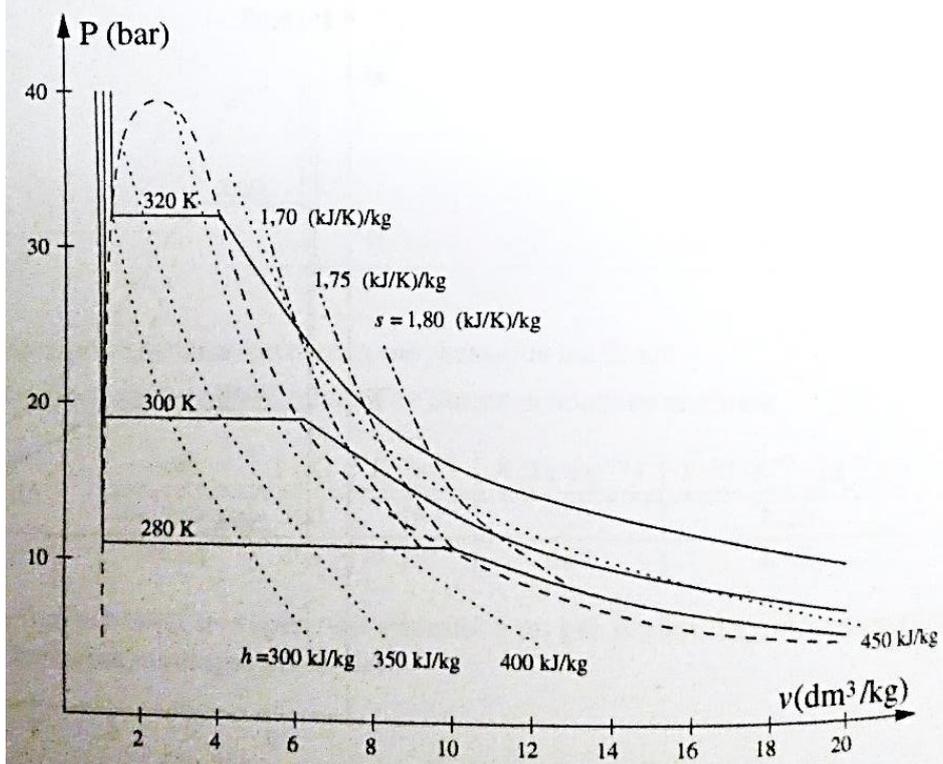


Figure B Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme (p, V)

Ex 5 – Transformations d'un fluide (partie B)



-- FIN DE L'ENONCE --