

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

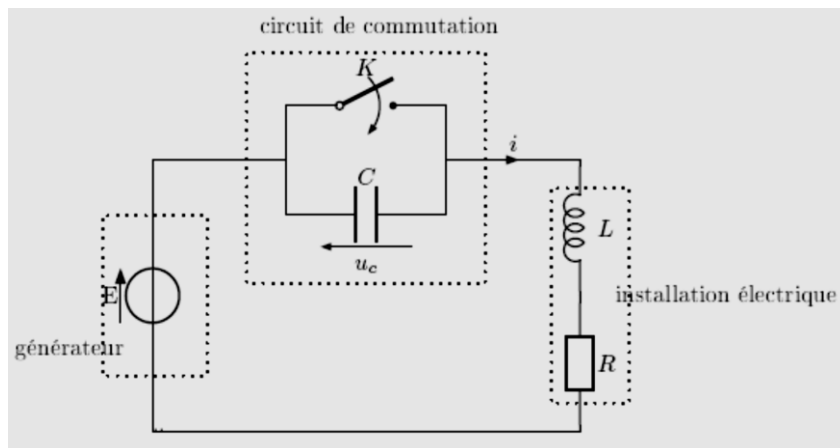
- Utiliser uniquement un **stylo noir ou bleu foncé non effaçable** pour la rédaction de votre composition ; **d'autres couleurs, excepté le vert**, peuvent être utilisées, mais exclusivement pour les **schémas** et la **mise en évidence des résultats**.
- **Ne pas utiliser de correcteur**.
- **Numéroter** 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.

La page 12 de ce sujet est à rendre avec la copie (graphiques à annoter).

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) 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 :

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

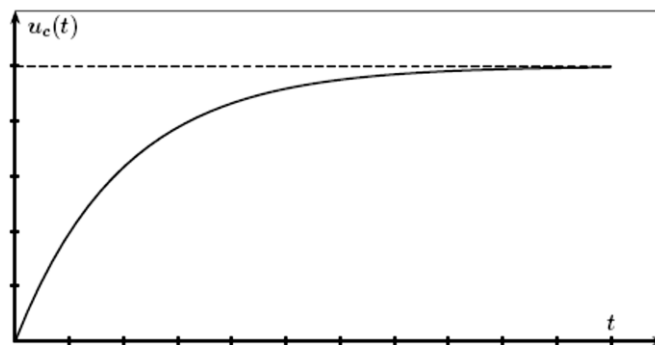
Et en déduire que celle régissant $i(t)$ s'écrit :

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

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 : L'internet par ADSL

Les prises des logements ayant l'internet par ADSL sont équipées d'un filtre ADSL pour pouvoir simultanément téléphoner et rester connecté à internet.

Dans le **document 7** est présentée la fiche technique d'un filtre ADSL classique de type « gigogne ».
La partie de filtre qui nous intéresse est comprise entre les branches 1 et 3 (voir schéma de la fiche technique).



Document 7 - Fiche Technique FILTRE Z-200FR (prises gigognes)

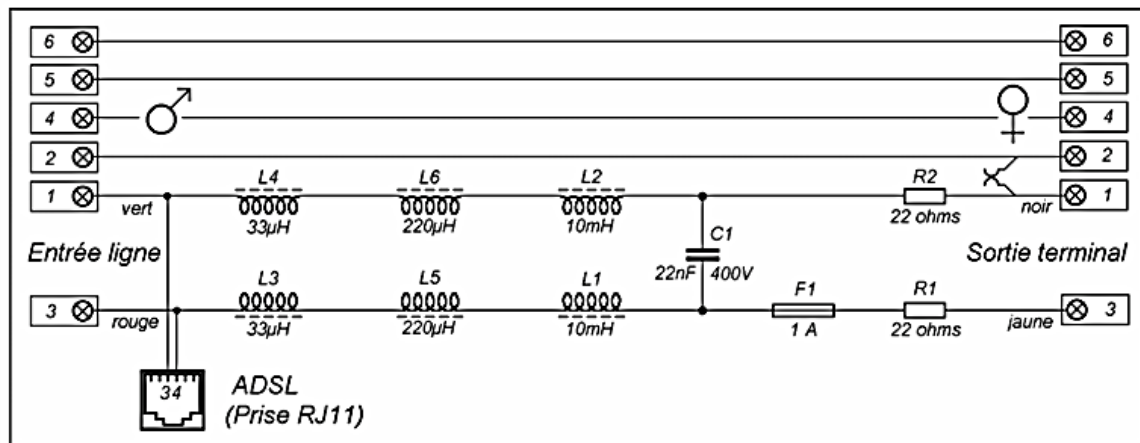


Figure 7 – Schéma technique du cablage électrique.

Description des composants

L1, L2 : enroulements réalisés sur des bobinettes de ferrite dont les plus grandes dimensions sont $d = 8 \text{ mm}$ et $l = 10 \text{ mm}$.

Résistance : 21Ω ; Nombre de spires : 500 environ.

L5, L6 : enroulements réalisés sur des bobinettes de ferrite dont les plus grandes dimensions sont $d = 4,5 \text{ mm}$ et $l = 5,5 \text{ mm}$.

Résistance : 2Ω ; Nombre de spires : 110 environ.

L3, L4 : enroulements de 15 ou 16 spires sur de minuscules tores de ferrite dont le plus grand diamètre n'atteint pas 5 mm .

Résistance : négligeable.

Réponse en fréquence

L'affaiblissement d'insertion mesuré, soit l'opposé du gain, entre un générateur d'impédance de 600 ohms et une résistance de charge de 600 ohms , en l'absence de courant continu est donné sur la **figure 8**.

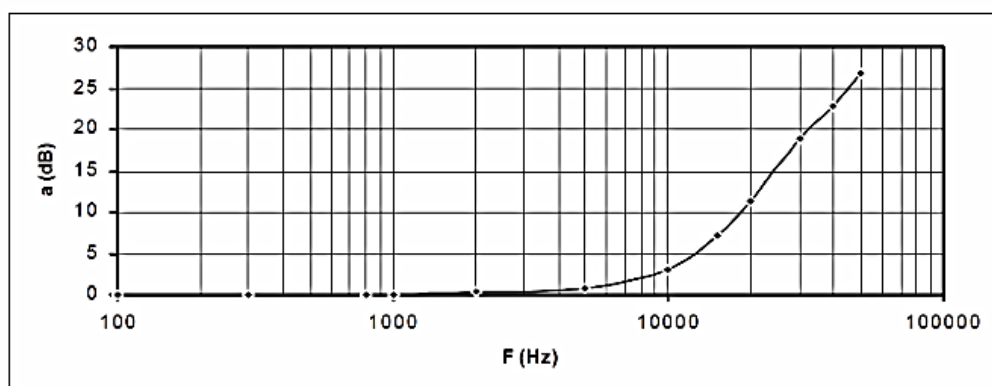


Figure 8 – Diagramme de Bode représentant l'affaiblissement d'insertion mesuré

Q54. En utilisant la notion d'impédance, justifier que les bobines peuvent s'associer en série ou en parallèle sur le même principe que des résistances.

On a représenté sur la **figure 5** une version simplifiée du filtre qui nous intéresse.

Q55. À l'aide de la fiche technique du **document 7**, donner les valeurs numériques des différents composants présents dans le schéma simplifié de la **figure 5**.

Q56. Par une étude basses et hautes fréquences du schéma simplifié, déterminer le comportement de ce filtre à vide et en déduire le type du filtre.

Ce comportement est-il modifié si le filtre est en charge sur une résistance de $600\ \Omega$, qui est la résistance d'un téléphone ?

Q57. Cela est-il en accord avec le diagramme de Bode proposé dans la fiche technique présentée dans le **document 7** ?

Q58. Déterminer graphiquement la fréquence de coupure à 3 dB de ce filtre.

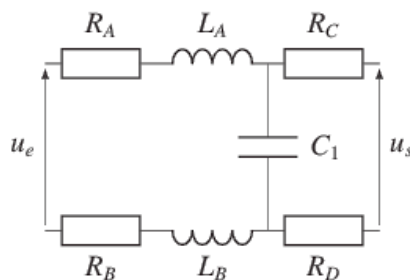


Figure 5 – Schéma simplifié du filtre

Le signal d'entrée est composé de fréquences correspondant à des sons audibles auxquelles sont superposées des fréquences élevées correspondant au signal ADSL, comme représenté de manière simplifiée sur la **figure 6**.

Le téléphone (résistance de $600\ \Omega$) branché en sortie de ce filtre ne doit récupérer que le signal correspondant aux sons audibles.

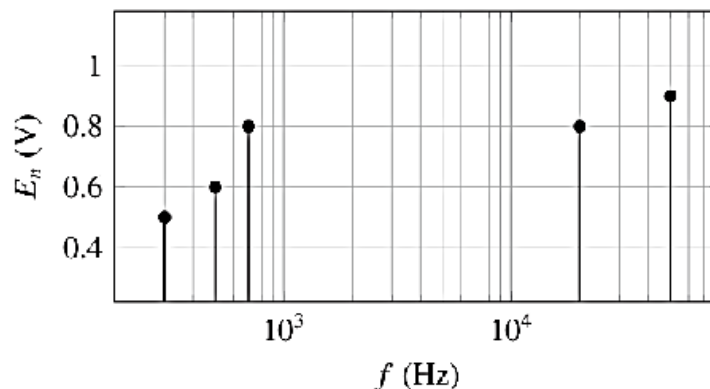


Figure 6 – Représentation spectrale d'un signal d'entrée en échelle semilog, avec E_n l'amplitude spectrale de la composante de fréquence f du signal d'entrée

Q59. Que peut-on dire du choix de la fréquence de coupure de ce filtre ? Justifier.

Q60. Donner l'allure de la représentation spectrale du signal obtenu en sortie du filtre ADSL.

Q61. On cherche à recréer ce type de filtre uniquement avec une résistance R et un condensateur $C = 1\ \text{nF}$. Proposer un montage correspondant en précisant les tensions en entrée et en sortie. On le justifiera par une étude basses et hautes fréquences.

Proposer une valeur numérique vraisemblable pour la résistance, compte tenu de la valeur du condensateur.

Q62. En quoi le filtre proposé dans le **document 7** (page 14) est-il meilleur que ce simple filtre RC ?

Ex 3 : Température de l'atmosphère

Toujours muni d'un ressort, Major Tom souhaite déterminer une façon de mesurer la température de l'atmosphère.

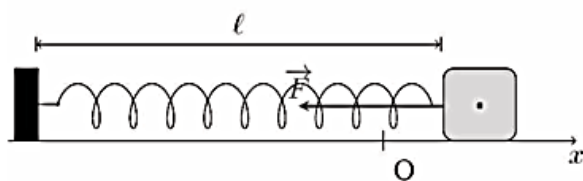


Figure 8 - Ressort horizontal

On considère un système masse-ressort horizontal, représenté sur la **figure 8**, en position étirée. On suppose que le déplacement de la masse sur le support horizontal se fait sans frottements.

On définit toujours :

- ℓ_0 la longueur à vide du ressort,
- ℓ la longueur du ressort,
- m la masse accrochée à l'extrémité du ressort,
- $\vec{F}$ la force de rappel exercée par le ressort sur la masse m .

On considère n moles de gaz parfait dont la variation infinitésimale d'entropie dS s'écrit en fonction de la pression P , la température T , le volume V , la constante des gaz parfaits R et du coefficient adiabatique $\gamma = 1,4$: $dS(T, V) = \frac{nR}{\gamma - 1} \frac{dT}{T} + \frac{P}{T} dV$.

Q22. a) Préciser combien vaut dS pour une transformation adiabatique réversible.

b) Montrer que pour une telle transformation, on obtient : $\frac{dT}{T} + (\gamma - 1) \frac{dV}{V} = 0$.

c) En déduire la relation entre volume et température pour une telle transformation et préciser sous quel nom est connue cette loi.

Les mesures effectuées par Major Tom sur un système masse-ressort lui ont permis préalablement de mettre en évidence la dépendance en température des paramètres suivants :

- k décroît de façon affine avec la température : $k(T) = k_0 - DT$, avec k_0 et D des constantes réelles positives,
- ℓ_0 est indépendante de T .

Ainsi, la variation infinitésimale d'entropie dS du ressort s'écrit : $dS(T, \ell) = C_\ell \frac{dT}{T} + D(\ell - \ell_0) d\ell$ avec C_ℓ une grandeur positive indépendante de la température.

On raisonnera par analogie avec le gaz parfait précédent.

Q23. a) Donner la signification physique de C_ℓ .

b) De façon isentropique, le système passe de (T_i, ℓ_i) à (T_f, ℓ_f) . Exprimer T_f en fonction de T_i , ℓ_i , ℓ_f , C_ℓ et de D .

c) Proposer à Major Tom un protocole pour mesurer la température compte tenu du résultat précédent.

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°C ou de chauffer à plus de 700°C .

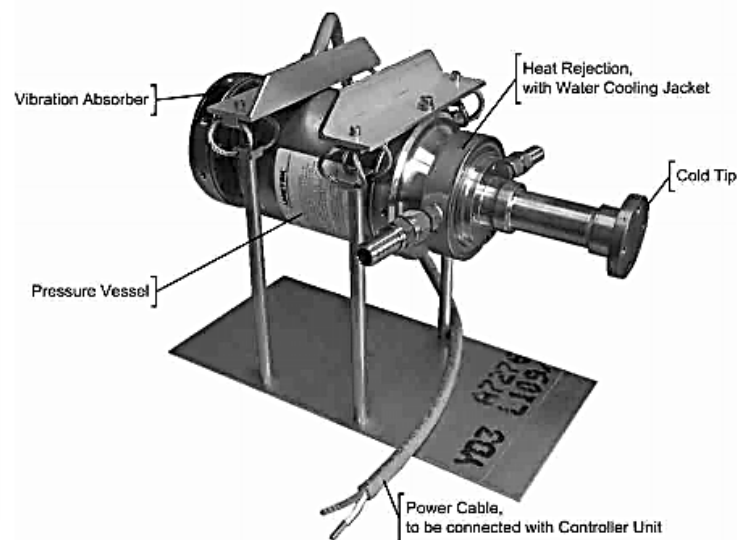
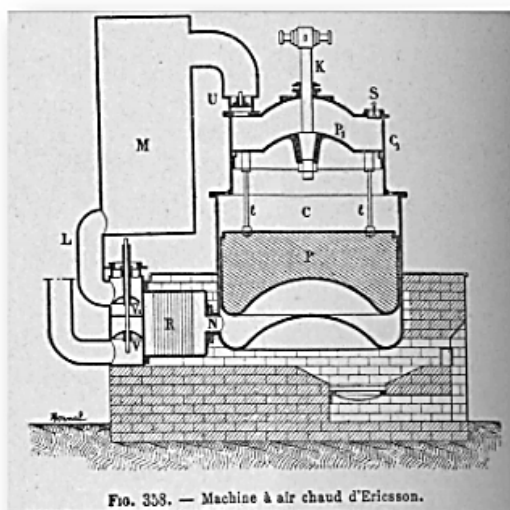


Figure 7 Gravure de 1899 d'un Moteur Ericsson M1851 avec régénérateur type Stirling (Wikipedia) et moteur Stirling de l'entreprise Sunpower fournissant le projet KRUSTY (ResearchGate)

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.

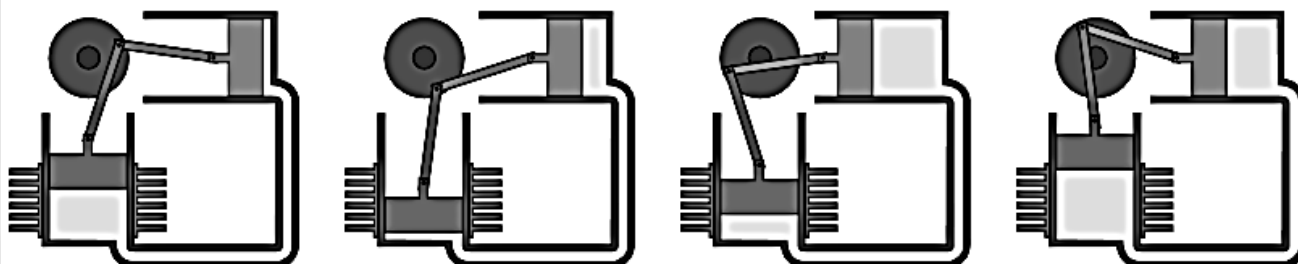


Figure 8 Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (d'après Wikipedia)

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 : Chimie de la pointe AFM

La microscopie en champ proche tire profit de phénomènes physiques qui ont un effet notable sur des gammes de distances inférieures au micromètre. Il est ici proposé l'étude de deux instruments permettant d'imager des surfaces avec une résolution inférieure à 10 nm : le microscope à force atomique (AFM pour Atomic Force Microscope) et le microscope à effet tunnel (STM pour Scanning Tunneling Microscope).

L'AFM peut être utilisé selon deux modes distincts. Le mode « non contact » et le mode « contact ». Le mode contact consiste à utiliser les forces répulsives : la pointe appuie sur la surface, elle est donc repoussée, et le levier est dévié. La rétroaction s'effectue sur la mesure de la direction de la déviation. Le but est de comparer les propriétés du silicium et du nitrure de silicium Si_3N_4 , deux matériaux durs, afin d'affecter à chacun de ces matériaux un mode d'utilisation.

Données thermodynamiques :

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante universelle des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Pression standard : $P^\circ = 1,00 \text{ bar} = 1,00 \cdot 10^5 \text{ Pa}$

Température de fusion du silicium sous 1 bar : $T_{\text{fus}}(\text{Si}) = 1687 \text{ K}$

Température de fusion du nitrure de silicium sous 1 bar : $T_{\text{fus}}(\text{Si}_3\text{N}_4) = 2173 \text{ K}$

Données spécifiques :

Numéro atomique du silicium : $Z = 14$

Masse volumique du silicium : $\rho = 2,33 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Masse molaire du silicium : $M = 28,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Rayon de l'ion nitrure N^{3-} : $r(\text{N}^{3-}) = 140 \text{ pm}$

Rayons de l'ion Si^{4+} : $r(\text{Si}^{4+}) = 27 \text{ pm}$ (si coordinence = 4) ou 40 pm (si coordinence = 6)

Énergie de liaison Si-Si : $D_{\text{Si-Si}} = 225 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$

Électronégativité : $\chi(\text{N}) = 3,04$ $\chi(\text{Si}) = 1,90$

Cristallographie du silicium et du nitrure de silicium

Le silicium forme une structure de type diamant, c'est à dire une structure cubique faces centrées d'atomes de silicium, avec occupation d'un site tétraédrique (noté T) sur deux par un atome de silicium.

Q3. Sur les figures 10, 10 bis et 10 ter ci-après quels sont les numéros correspondants aux sites T ? aux sites octaédriques d'une maille cubique faces centrées ?

Q4. En déduire, dans une structure cubique faces centrées (cfc), le nombre de sites T et de sites O appartenant en propre à la maille

Q5. En déduire la population de la maille de type diamant du silicium en détaillant le calcul. Préciser la coordinence de l'atome de silicium dans la structure.

Q6. Écrire la relation entre le paramètre de la maille a et le rayon $r(\text{Si})$ de l'atome de silicium dans la structure de type diamant.

Q7. A partir de la masse volumique fournie, établir que la valeur du rayon $r(\text{Si})$ est de 118 pm.

Q8. Calculer la compacité de la structure. Commenter.

Q9. Comment expliquer que le silicium soit un matériau très dur ? Pour ce faire, on détaillera la nature de la liaison Si-Si dans la structure.

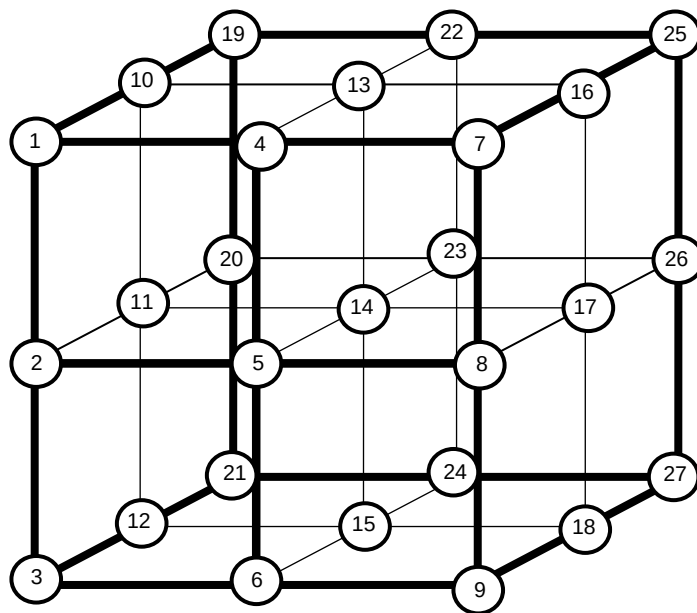


Figure 10. Structure cubique faces centrées

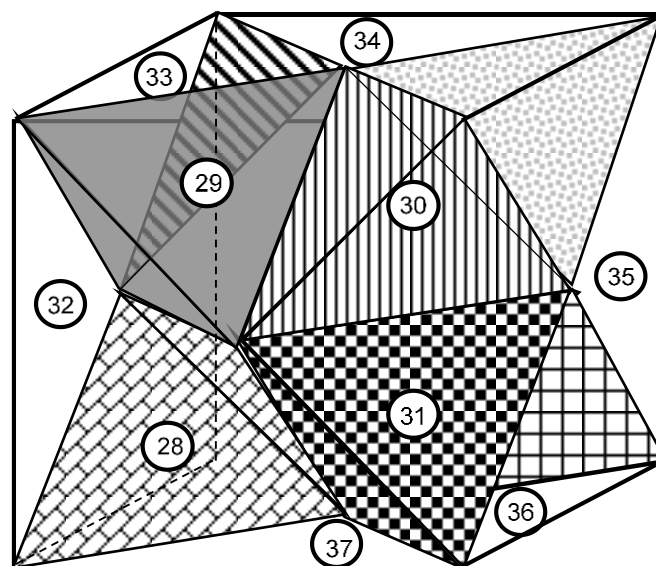


Figure 10 bis. Structure cubique faces centrées

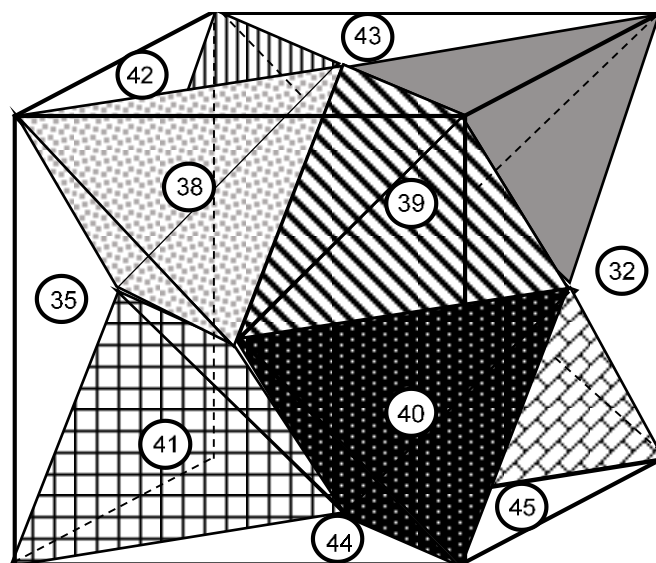


Figure 10 ter. Rotation de 180° de la figure 10 bis

Le nitrure de silicium, quant à lui, cristallise sous trois variétés dont l'une est appelée gamma. Cette dernière est une structure spinelle, c'est-à-dire une structure cubique faces centrées d'ions nitrure N^{3-} , dans laquelle les ions de Si^{4+} occupent $1/8^{ème}$ des sites tétraédriques (notés T) et la moitié des sites octaédriques (notés O).

Q10. Le nitrure de silicium peut exister à l'état solide sous différentes variétés cristallines. Comment appelle-t-on ce phénomène ?

Q11. L'occupation des sites T et O est-elle cohérente avec la stœchiométrie de Si_3N_4 ?

Q12. Dans une structure cfc, l'habitabilité des sites T est inférieure à celle des sites O. Déterminer l'habitabilité des sites T en détaillant le calcul. Sachant que les alliages Si_3N_4 sont des alliages d'insertion, en déduire le rayon maximal de l'ion Si^{4+} . Est-ce cohérent avec les données ?

Q13. Quelle est la nature de la liaison entre Si^{4+} et N^{3-} ? Proposer une justification à l'utilisation de la pointe en nitrure de silicium en mode « contact » de l'AFM.

Ex 6 : Changements d'état d'un fluide

On considère un gaz parfait de température T , de volume V et de quantité de matière n . 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 $S_0 = S(T_0, V_0)$.

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

- 1) 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).
- 2) Justifier l'allure des courbes isothermes (tracées en trait plein) dans les différents domaines.

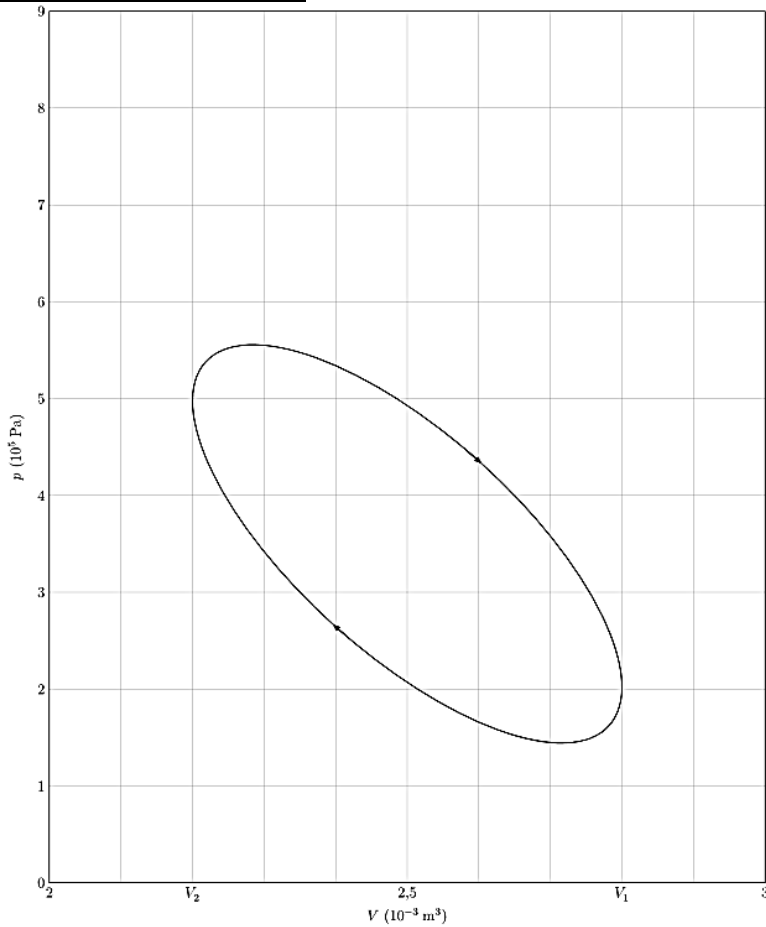
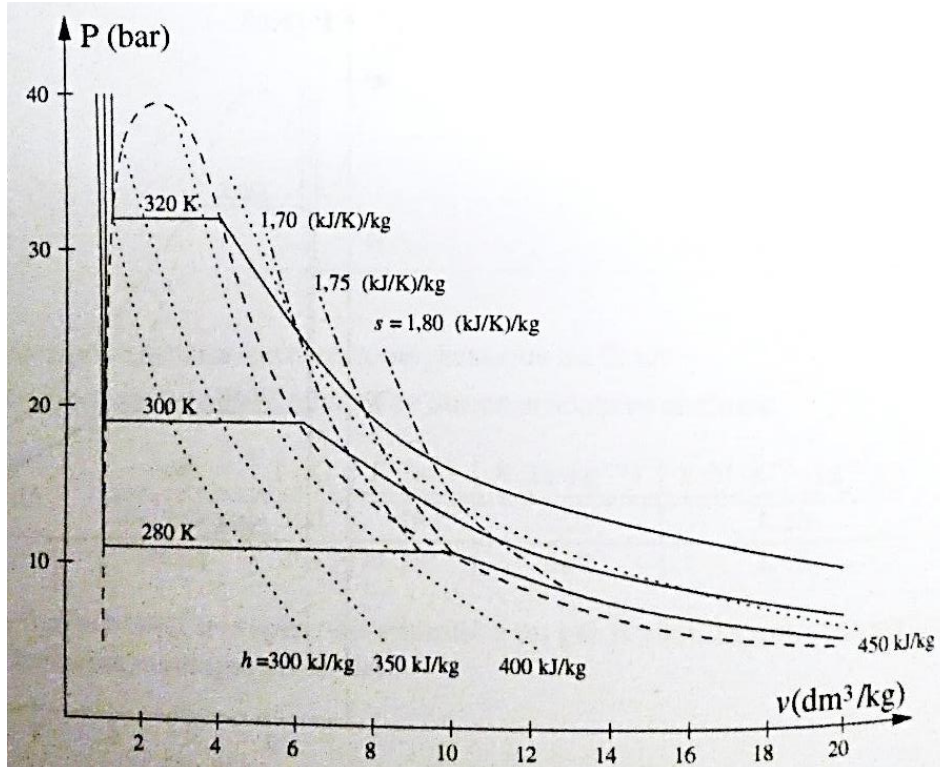
♦ Echauffement isochore de 280 K à 300 K

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 $T_f = 300 \text{ K}$.

- 3) Déterminer le volume massique du fluide v .
- 4) Déterminer la pression finale du fluide.
- 5) Déterminer le titre massique initial x_{vi} en vapeur du fluide.
- 6) 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	$v_G(T_f)$	$l_{vap}(T_f)$

NOM :

Ex 4 – Moteur de StirlingFigure B Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme (p, V) **Ex 6 – Transformations d'un fluide**

-- FIN DE L'ENONCE --