

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 : Détection des exoplanètes - Refroidissement

L'exploration de planètes lointaines a fourni à la littérature et au cinéma de science-fiction des œuvres parmi les plus célèbres; citons La planète des singes (Pierre Boulle, 1963), Avatar (James Cameron, 2009)... L'existence de ces planètes extra-solaires est longtemps restée incertaine jusqu'à une première découverte en 1995; la millième exoplanète a été confirmée en octobre 2013; un an plus tard ce nombre a doublé. Ce problème aborde le délicat enjeu de leur détection.

II. — Détection d'un signal faible

II.A. — Extraction d'un signal faible du bruit par effet de moyenne

Un détecteur enregistre un spectre en le décomposant sur plusieurs canaux numérotés de 1 à N . Chacun de ces canaux représente une bande de fréquence très étroite.

Lors d'une séquence d'acquisition, le détecteur enregistre une série de valeurs $x_k = s_k + b_k$ pour k variant de 1 à N . L'éventuel signal s_k est celui dont la détection est souhaitée. Le signal b_k est un parasite appelé bruit ; différents phénomènes physiques sont à l'origine du bruit, à commencer par l'agitation thermique des porteurs de charges.

Le bruit considéré, b_k , prend une valeur aléatoire de moyenne b indépendante de k . La dispersion autour cette moyenne est supposée gaussienne d'écart-type σ ; c'est-à-dire que pour un grand nombre n d'acquisitions indépendantes dont les résultats sont ajoutés canal par canal, la valeur moyenne du signal sommé sera nb et l'ordre de grandeur de la dispersion de chaque coté de cette valeur moyenne sera $\sqrt{n}\sigma$.

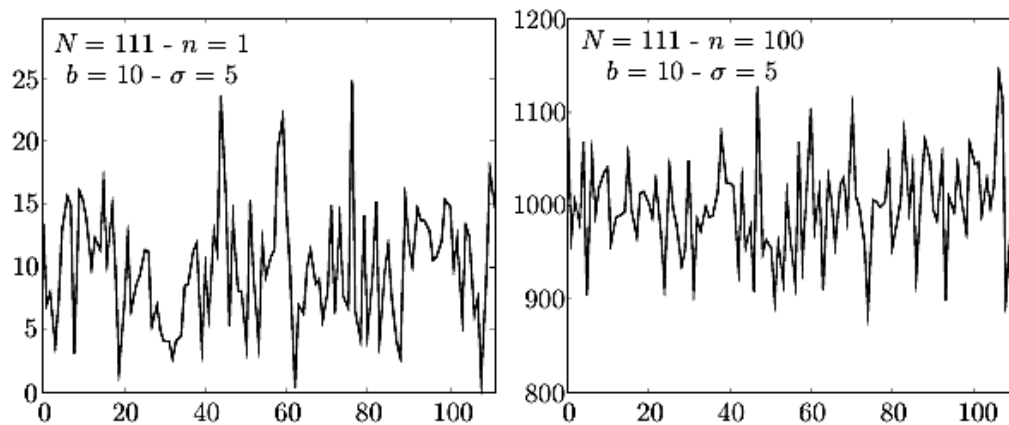


FIGURE 3 — Acquisition d'un bruit ($s_k = 0$ pour tout k) sur $N = 111$ canaux avec $b = 10$ et $\sigma = 5$. La figure de gauche représente 1 acquisition, celle de droite la somme canal par canal de 100 acquisitions indépendantes.

□ 13 — Représenter l'allure du graphe que l'on pourrait obtenir après 2500 acquisitions, l'axe des ordonnées étant clairement gradué dans sa partie utile.

On considère maintenant qu'en plus du bruit gaussien d'amplitude $b = 10$ et d'écart-type $\sigma = 5$ présent constamment sur chaque canal, un signal utile non nul, constant et d'amplitude 1 est présent uniquement sur les canaux 34 et 67 à chaque acquisition.

□ 14 — Le signal utile est-il détectable par une seule acquisition ? Représenter l'allure de la somme canal par canal de 2500 acquisitions. Le signal est-il devenu détectable ?

□ 15 — Dans le cadre d'un bruit de dispersion σ et d'amplitude b , estimer le nombre n d'acquisitions permettant de faire apparaître un signal constant d'amplitude s_p dans le canal p .

L'expression obtenue montre qu'une réduction du bruit permet de diminuer de façon importante les durées d'intégration nécessaires. Dans le cas du bruit thermique, dont l'amplitude est proportionnel à la température absolue, il importe donc de refroidir fortement le système.

II.B. — Refroidissement d'un capteur à bord d'un satellite

Dans le vide interplanétaire, un satellite d'observation astrophysique reçoit le rayonnement solaire et se refroidit également par rayonnement. Son électronique de commande doit travailler autour de 300 K, tandis que des capteurs doivent être refroidis à quelques Kelvins voire une fraction de Kelvin. La configuration du satellite, la mise en place d'isolants ou de radiateurs, son positionnement par rapport au rayonnement, permettent de contrôler grossièrement la température de ses différentes parties, ce qui limite l'utilisation énergivore de systèmes de chauffage ou de refroidissement.

L'étude et les calculs que nous allons mener sont basés sur les informations disponibles pour le satellite PLANCK, qui de 2009 à début 2012 a cartographié les infimes fluctuations du rayonnement de fond cosmologique, dans le domaine des micro-ondes.

Des systèmes d'écrans et de radiateurs passifs permettent d'abaisser la température, du côté des instruments, à une température T de l'ordre de 50 K ; il convient alors de refroidir les capteurs à une température beaucoup plus basse pour augmenter leur sensibilité.

Envisageons tout d'abord des systèmes frigorifique de type réfrigérateur ditherme fonctionnant de manière cyclique entre deux températures T_c et $T_f < T_c$ grâce à un travail reçu W .

□ 16 — Définir le fonctionnement d'un réfrigérateur ditherme à l'aide d'un cycle modélisé. Analyser ce cycle à partir des principes de la thermodynamique. En déduire l'expression de l'efficacité maximale théorique d'un tel réfrigérateur.

A bord du satellite PLANCK, un premier réfrigérateur, d'une puissance frigorifique de 1 W, travaille entre 50 K et 20 K, puis un deuxième, d'une puissance frigorifique de 15 mW, abaisse la température de certains équipements à 4 K.

□ 17 — Calculer la puissance électrique minimale consommée par chacun de ces appareils.

□ 18 — Dans une note descriptive sur le satellite PLANCK on peut lire « *Les puissances cryogéniques peuvent sembler faibles au premier abord. L'objectif de ces réfrigérateurs est en fait ambitieux : le réfrigérateur qui équipe notre cuisine doit évacuer seulement 7% environ de l'énergie thermique de son contenu. Ici l'étage à 20 K doit évacuer 60% de l'énergie thermique initiale, et 80% de cette énergie pour l'étage à 4 K* ». Vérifier par le calcul les valeurs annoncées.

Un autre moyen pour maintenir la température d'un instrument à quelques Kelvins est d'utiliser un cryostat à circulation d'hélium liquide, en circuit ouvert : l'hélium se vaporise progressivement et s'échappe dans l'espace. Pour abaisser encore la température, on utilise même la dilution de ^3He dans ^4He ; le principe est le même (évaporation en circuit ouvert) et cela permet de travailler autour de 0,1 K.

□ 19 — Rappeler l'allure générale de la courbe d'équilibre entre liquide et gaz, en coordonnées (T, P) . Pourquoi l'hélium circulant dans un serpentin en contact avec un instrument se vaporise-t-il ? Comment peut-on obtenir une température contrôlée d'un mélange liquide-gaz ? Quel appareillage supplémentaire serait-il nécessaire de prévoir si l'hélium liquide circulait en circuit fermé ?

Avant le développement des systèmes à compression et dans des domaines autres que celui du refroidissement à très basse température, d'autres techniques peuvent être utilisées. Dans la suite, on s'intéresse aux techniques de refroidissement pour la conservation des aliments et en particulier à la machine frigorifique à absorption.

De l'avis de l'historien Hugo Obermaier (1877–1946), dès le paléolithique inférieur (100 000 ans avant Jésus-Christ), les hommes ont commencé à utiliser le froid existant dans les grottes pour conserver le gibier. Sans comprendre ces phénomènes, ces hommes utilisaient sans doute l'abaissement de température produit en partie par l'évaporation de l'eau, en partie par la détente de l'air dans les crevasses communiquant avec l'extérieur.

Q 20 – À partir de considérations simples, expliquer ces deux hypothèses. On pourra raisonner sur l'humidité de l'air et préciser le modèle de détente.

Au début du XIX^e siècle, des procédés d'obtention de froid artificiel ont vu le jour. La première machine à atteindre une importance industrielle généralisée fut celle du français Ferdinand Carré qui, en 1859, déposa un brevet pour un réfrigérateur à absorption utilisant l'ammoniac comme fluide frigorigène. Son principe est schématisé figure 1.

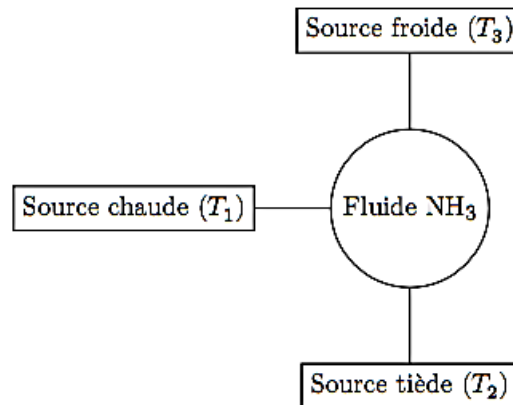


Figure 1

Une réfrigérateur à absorption est un récepteur thermique fonctionnant par contact avec trois « thermostats », sans recevoir de travail mécanique. La source chaude à la température T_1 est constituée par le système de chauffage de la machine (un brûleur par exemple). La source tiède à la température T_2 est constituée par la salle dans laquelle se trouve la machine. La source froide à la température T_3 est constituée par l'enceinte à refroidir. On a $T_1 > T_2 > T_3$.

On désigne par Q_1 , Q_2 et Q_3 les transferts thermiques reçus par le fluide au cours d'un cycle de la machine, respectivement lors des contacts avec les sources chaude, tiède et froide.

Q 21 – Déterminer les signes des transferts thermiques Q_1 , Q_2 et Q_3 .

Q 22 – Comparer les valeurs absolues $|Q_1|$ et $|Q_2|$. Commenter.

Q 23 – Définir le coefficient de performance (noté COP) de cette machine et donner son expression littérale.

Q 24 – En utilisant les deux principes de la thermodynamique sur un cycle, montrer que $\text{COP} \leq \text{COP}_{\max}$. On exprimera $\text{COP}_{\max}$ en fonction de T_1 , T_2 et T_3 .

Q 25 – Étudier la limite de $\text{COP}_{\max}$ lorsque la température T_1 du système de chauffage de la machine devient très grande. Interpréter l'expression obtenue.

Q 26 – Quel avantage de ce type de machine peut-on prévoir par rapport à une machine à compression de fluide ?

À partir de 1885, le système à compression de vapeurs liquéfiables commença à prendre le net avantage qui est devenu éclatant au cours du XX^e siècle.

Ex 2 : 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 $L = 20 \text{ mH}$.

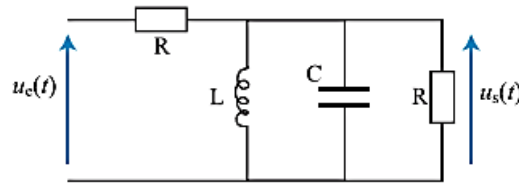


Figure 3

1. Montrer que la fonction de transfert de ce filtre peut s'écrire sous la forme normalisée suivante :

$$\underline{H} = \frac{\frac{1}{2}}{1 + j \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} \left(\sqrt{LC} \omega - \frac{1}{\sqrt{LC} \omega} \right)}$$

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).

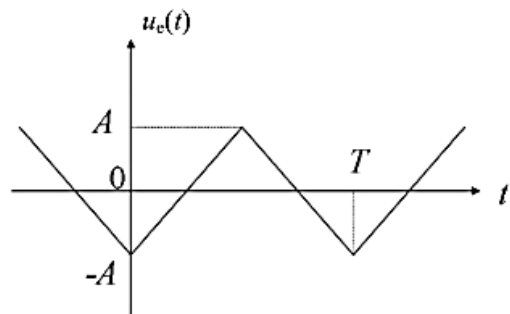


Figure 4

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 $u_s(t)$? Pourrait-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 3 : 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 .

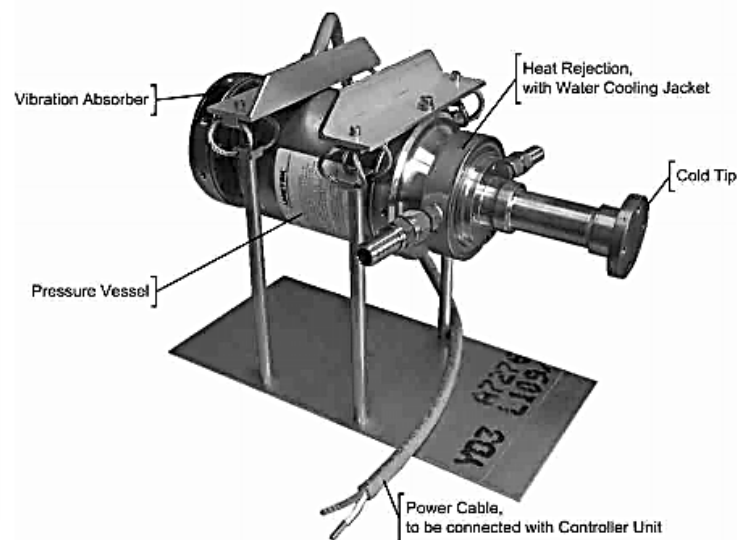
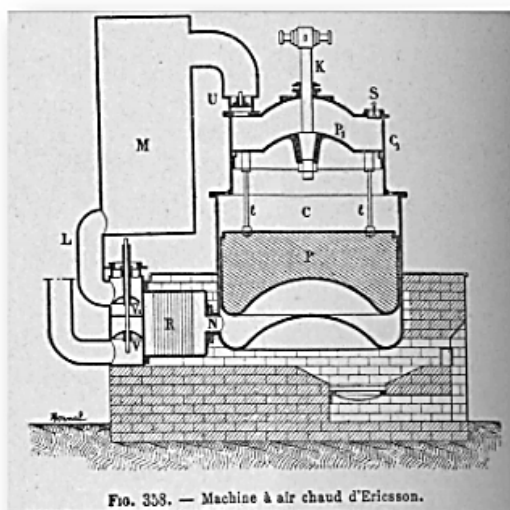


Figure 7 Gravure de 1899 d'un Moteur Ericsson M1851 avec régénérateur type Stirling (Wikipedia) et moteur Stirling de l'entreprise Sunpower fournissant le projet KRUSTY (ResearchGate)

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.

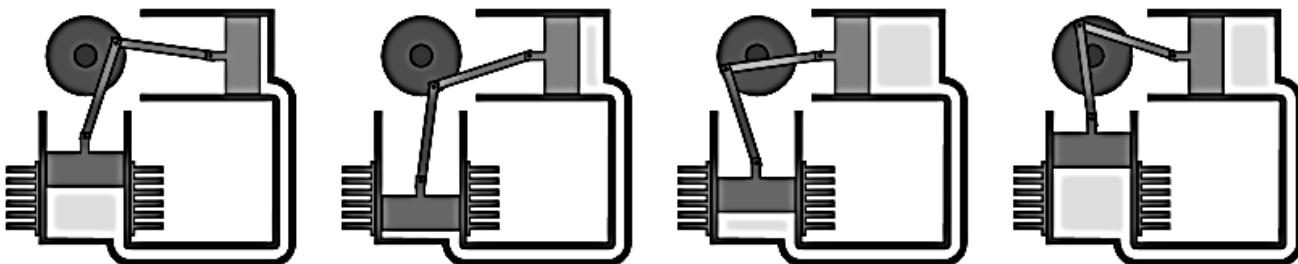


Figure 8 Phases de fonctionnement d'un moteur Stirling de type alpha (d'après Wikipedia)

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 4 : 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.

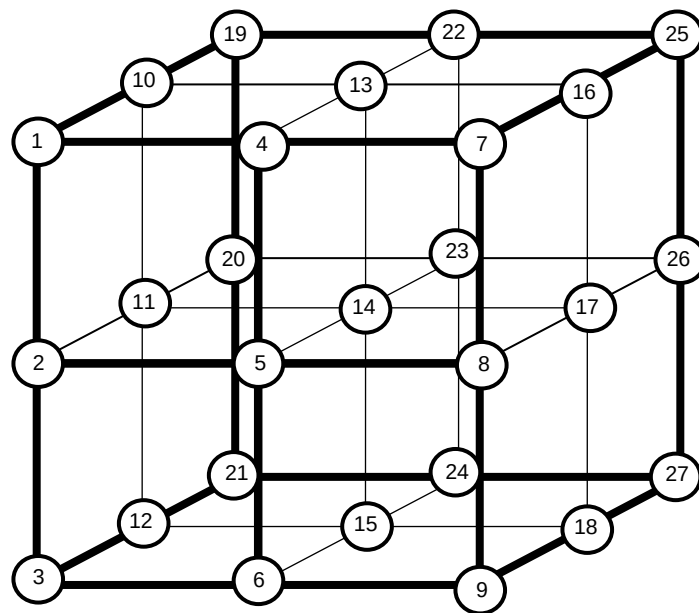


Figure 10. Structure cubique faces centrées

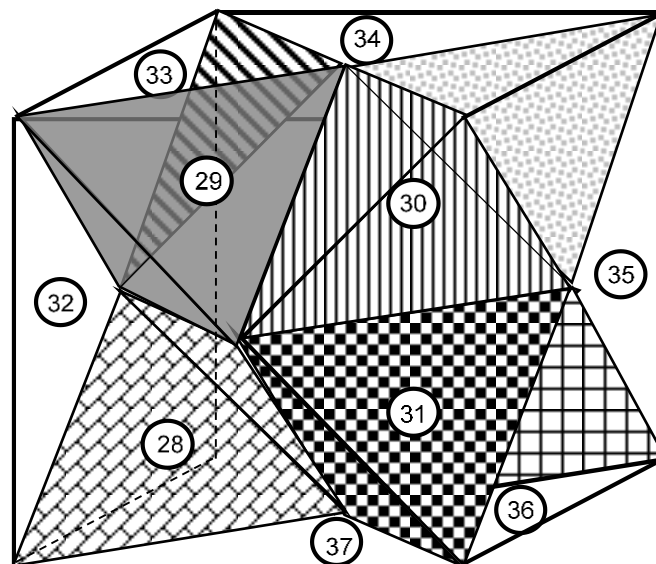


Figure 10 bis. Structure cubique faces centrées

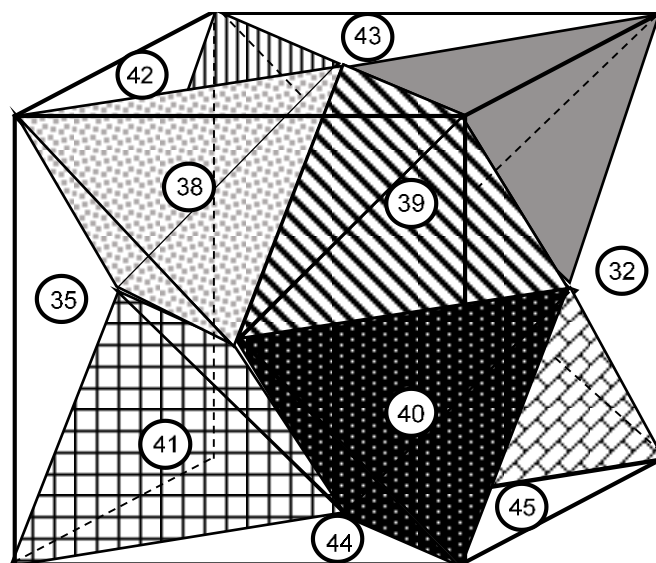


Figure 10 ter. Rotation de 180° de la figure 10 bis

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 5 : 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 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 $T_f = 300 \text{ K}$.

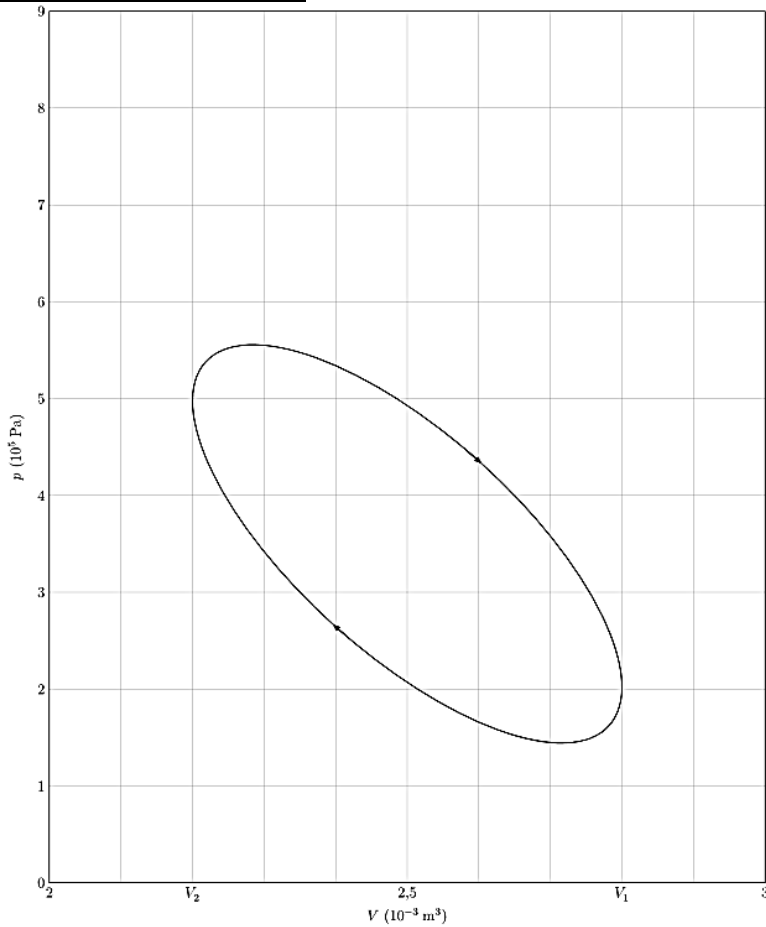
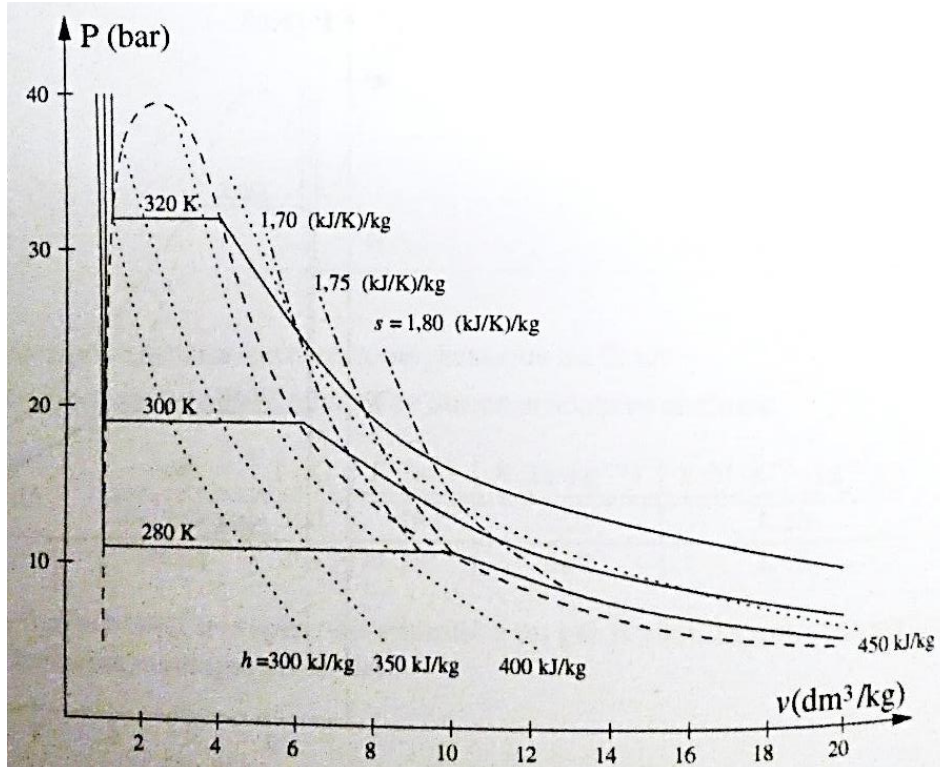
- 3) Déterminer le volume massique du fluide v .
- 4) Déterminer la pression finale du fluide.
- 5) Déterminer le titre massique initial x_{vi} en vapeur du fluide.
- 6) En considérant que la vapeur d'eau sèche et saturante est assimilable à un gaz parfait, déterminer l'expression de la variation d'entropie 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	$v_G(T_f)$	$l_{vap}(T_f)$

♦ Echauffement accidentel de 280 K à 320 K

- 7) 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 3 – Moteur de StirlingFigure B Allure du cycle réel d'un moteur Stirling dans le diagramme (p, V) **Ex 5 – Transformations d'un fluide**

-- FIN DE L'ENONCE --