

PROBLEME 1 : oscillateur

Pour générer des ultrasons, on utilise une plaquette de matériau piézoélectrique dont deux faces opposées sont métallisées. On applique une tension périodique électrique, de fréquence f , entre les surfaces métallisées. Pour une certaine valeur de la fréquence f_0 , la plaquette rentre en résonance mécanique. Les vibrations de la plaquette (de même fréquence f_0) sont ensuite communiquées au fluide qui l'entoure et génèrent des ondes ultrasonores.

I. GENERATEUR D'ULTRASONS : OSCILLATEUR

On se propose d'étudier d'abord le comportement électrique de la plaquette piézoélectrique, assimilable au dipôle MN de la figure 1, puis de s'intéresser à la façon dont on peut réaliser, à l'aide de la plaquette, un oscillateur dans le domaine des fréquences ultrasonores.

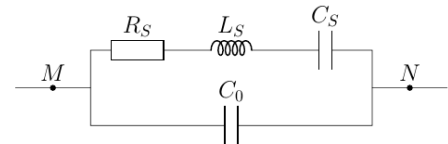


Figure 1

I.1) Etude simplifiée : on néglige d'abord les phénomènes dissipatifs (dissipation de puissance) représentés par la résistance R_s . Le schéma électrique équivalent de la plaquette piézoélectrique est alors celui de la figure 2.

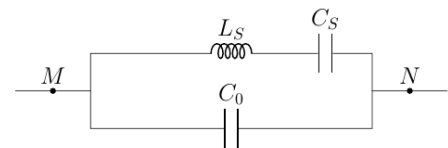


Figure 2

I.1.a) L'impédance Z_E de la plaquette est de la forme $Z_E = jX$. Montrer que X peut se mettre sous la forme

$$X = -\frac{1}{C\omega} \frac{1 - \frac{\omega^2}{\omega_s^2}}{1 - \frac{\omega^2}{\omega_p^2}}$$

On précisera les valeurs des pulsations ω_s et ω_p et du coefficient C .

I.1.b) Pour la plaquette utilisée, les éléments du schéma électrique équivalent sont les suivants : $L_S = 1000$ H ; $C_S = 0,4$ pF ; $C_0 = 60$ pF. Donner les valeurs des pulsations ω_s et ω_p et de l'écart relatif $(\omega_s - \omega_p)/\omega_s$.

I.1.c) Quels phénomènes physiques empêchent l'impédance de prendre des valeurs nulle ou infinie ?

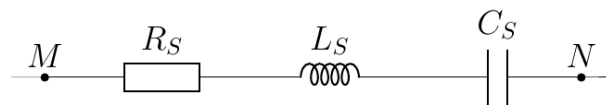


Figure 3

I.2) On prend en compte maintenant les phénomènes dissipatifs : on considère le montage de la figure 1 avec $R_s = 10 \Omega$. Montrer que compte-tenu des valeurs numériques, le schéma électrique équivalent se réduit, pour des fréquences voisines de $f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_S C_S}}$ au schéma simple de la figure 3 ($R_S L_S C_S$ série)

I.3) Oscillateur à résonance série.

On souhaite réaliser un oscillateur délivrant une tension sinusoïdale de fréquence f_s . Le montage de principe est celui de la figure 4. Z_S est l'impédance du circuit $R_S L_S C_S$ série. Le "convertisseur" est un convertisseur courant-tension idéal (impédances d'entrée et de sortie nulles, fonction de transfert $\underline{A} = \underline{V}_s / \underline{I}_e = A$ réelle).

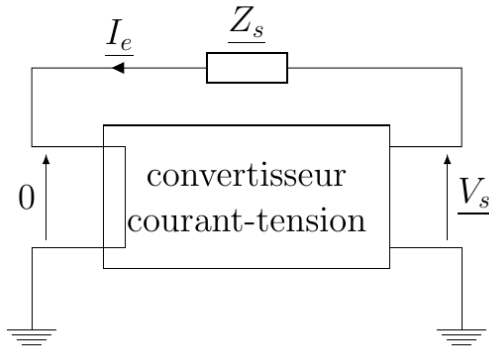


Figure 4

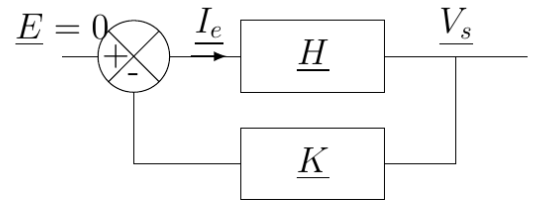


Figure 5

I.3.a) Le montage de la figure 4 peut être représenté par le système bouclé de la figure 5 pour lequel l'entrée E est nulle. Donner les expressions des fonctions de transfert \underline{H} (de la chaîne directe) et \underline{K} (de la chaîne de retour).

I.3.b) Quelle relation doivent vérifier \underline{H} et \underline{K} pour que le système bouclé fonctionne en oscillateur (I_e et V_s sinusoïdales) ?

I.3.c) Quelle relation existe alors entre A et Z_s ? Déterminer la valeur correspondante A_0 de A , ainsi que la fréquence d'oscillation.

I.3.d) Que se passe-t-il si $|A| > A_0$?

II. FILTRAGE D'UN SIGNAL SONORE

On quitte le domaine des ultrasons. Pour analyser les composantes fréquentielles d'un signal sonore (analyse des phonèmes du langage par exemple), on utilise un transducteur (microphone) qui convertit le signal en une tension v_e puis un filtre passe-bande qui extrait les composantes sinusoïdales de v_e de fréquences voisines d'une fréquence f_0 donnée. On note v_s la tension de sortie du filtre. Le filtre est un circuit linéaire dont la fonction de transfert s'écrit :

$$\underline{F} = \frac{v_s}{v_e} = \frac{F_0}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}$$

On se propose de déterminer les caractéristiques F_0 , Q et ω_0 du filtre à partir des oscillogrammes obtenus en régime périodique pour une tension d'entrée v_e rectangulaire pour deux valeurs de fréquences. On rappelle la décomposition en série de Fourier de $v_e(t)$ dans le cas où $v_e(t)$ est périodique de période T avec :

- pour $0 < t < T/2$: $v_e(t) = V_0$
- pour $T/2 < t < T$: $v_e(t) = 0$

$$v_e(t) = \frac{V_0}{2} + \frac{2V_0}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{2k+1} \sin((2k+1)\omega_1 t) \quad \text{où } \omega_1 = \frac{2\pi}{T}$$

Première expérience (oscillogramme de la figure 7) :

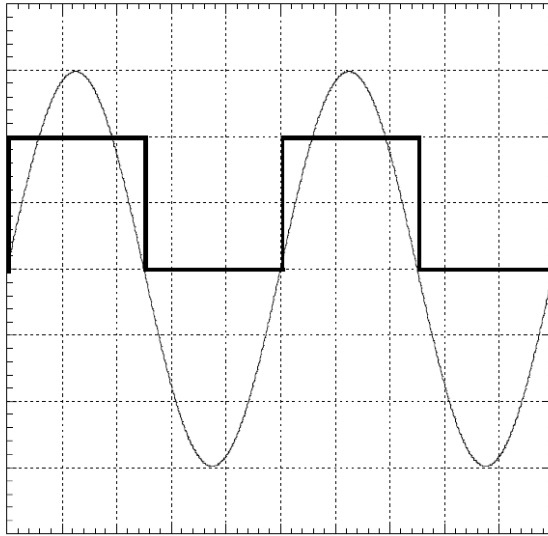


Figure 7

- voies 1 et 2 en position DC
- base de temps : 50 ps par carreau
- sensibilités :
 - voie 1 (en gras) : 0,5 V par carreau
 - voie 2 : 2V par carreau

Dans cette expérience :

- la tension v_s obtenue est quasi-sinusoidale
- si on augmente la fréquence de v_e par rapport à la valeur correspondant à cet oscillogramme, on constate que l'amplitude de v_s diminue
- si, par rapport à cette même fréquence, on diminue légèrement la fréquence de v_e , on constate que l'amplitude de v_s diminue également.

Deuxième expérience (oscillogramme de la figure 8) :

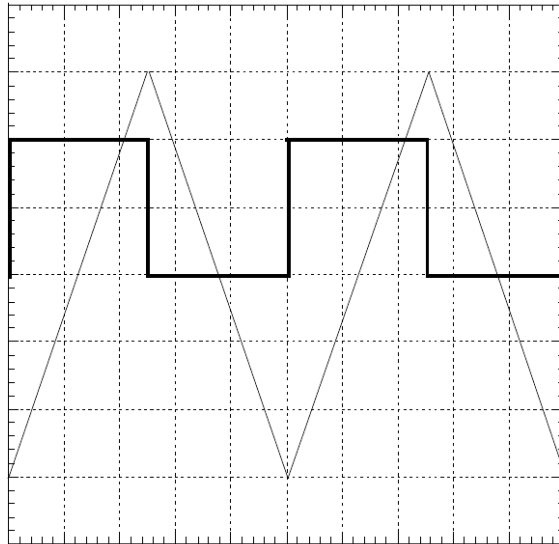


Figure 8

- voies 1 et 2 en position DC.
- base de temps : 5 ps par carreau
- sensibilités :
 - voie 1 (en gras) : 2V par carreau
 - voie 2 : 0,2V par carreau

Dans ce qui suit, on ne demande pas de calculs d'incertitudes mais les mesures devront être faites avec soin (tous

II.1) Pourquoi, dans chaque expérience, la tension de sortie v_s ne comporte-t-elle pas de composante continue contrairement à la tension d'entrée v_e ?

II.2) Première expérience : pourquoi peut-on obtenir une tension de sortie v_s quasi-sinusoidale alors que la tension v_e est rectangulaire ?

II.3) Déduire de l'oscillogramme de la première expérience et du commentaire qui l'accompagne :

- a) a pulsation ω_0
- b) la valeur de F_0 .

II.4) Dans la deuxième expérience, v_s est triangulaire alors que v_e est rectangulaire. Le filtre a un comportement intégrateur.

- a) Donner l'expression approchée de $\underline{F}(j\omega)$ dans le domaine de fréquence correspondant à la deuxième expérience.
- b) En utilisant l'oscillogramme de la deuxième expérience, déterminer, en justifiant précisément la méthode utilisée, le rapport $F_0\omega_0/Q$ (on se souviendra que la composante continue de v_e n'est pas intégrée!). En déduire la valeur de Q .

PROBLEME 2 : ailette de refroidissement

Certaines questions, peu ou pas guidées, demandent de l'initiative de la part du candidat. Leur énoncé est repéré par une barre en marge. Il est alors demandé d'explicitier clairement la démarche, les choix et de les illustrer, le cas échéant, par un schéma. Le barème valorise la prise d'initiative et tient compte du temps nécessaire à la résolution de ces questions.

Certaines données numériques sont regroupées en fin d'énoncé ; d'autres relèvent de l'initiative du candidat.

I Refroidir les centres de données, quelques solutions techniques contemporaines

I.A – À l'échelle des composants

À l'échelle des composants, il est nécessaire d'évacuer la chaleur dégagée, par les transistors des microprocesseurs notamment. Pour ce faire, des ventilateurs sont installés afin de renouveler en permanence l'air au contact des composants. De plus, des ailettes de refroidissement sont assemblées directement sur la surface des composants afin de pouvoir dissiper le plus possible de chaleur vers l'extérieur par transfert conducto-convectif.

On modélise une de ces ailettes par un cylindre d'axe (Ox) , de rayon a , de longueur $b \gg a$ et de conductivité thermique λ . Elle est accolée en $x = 0$ au composant de température T_d ; le contact thermique en $x = 0$ est supposé parfait. Le reste de l'ailette est au contact de l'air que l'on suppose de température T_a uniforme.

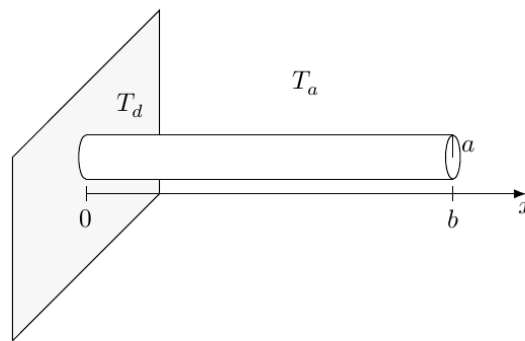


Figure 1 Modélisation de l'ailette

En régime stationnaire, supposé atteint dans toute cette sous-partie, la température $T(x)$ est considérée comme uniforme sur la section droite de l'ailette située à l'abscisse x pour tout $x \in [0, b]$.

Q 1. Énoncer la loi de Fourier relative au vecteur densité de flux thermique \vec{j}_Q qui caractérise le phénomène de conduction thermique le long de l'axe de l'ailette.

L'air qui entoure le solide, constamment renouvelé et de température uniforme T_a , échange avec l'ailette un transfert conducto-convectif. Dans une fine couche de fluide au contact de la surface du solide, ce transfert latéral peut-être modélisé par la loi de Newton :

$$\vec{j}_{cc}(x) = h(T(x) - T_a) \vec{n}$$

où \vec{j}_{cc} correspond à la densité de flux conducto-convectif et \vec{n} est un vecteur unitaire, normal à la surface d'échange et orienté du solide vers l'air. Le coefficient h , dont certaines valeurs numériques sont disponibles en fin d'énoncé, est appelé coefficient de transfert thermique de surface.

Q 2. En réalisant un bilan de puissance thermique sur une tranche de longueur dx de l'ailette, montrer que la température suit l'équation différentielle

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{1}{\delta^2}T = -\frac{1}{\delta^2}T_a \quad \text{avec} \quad \delta = \sqrt{\frac{\lambda a}{2h}}. \quad (\text{I.1})$$

Q 3. Vérifier l'homogénéité de l'expression du paramètre δ introduit dans la question précédente. Estimer sa valeur numérique dans le cas d'une ailette en silicium de rayon $a = 1$ mm.

Q 4. Expliciter les conditions aux limites que doit vérifier le champ de température $T(x)$ en $x = 0$ et en $x = b$.

Sur la figure 2 est représentée la solution « normalisée » de l'équation (I.1), définie par $\frac{T(x) - T_a}{T_d - T_a}$, en fonction de l'abscisse adimensionnée x/b , pour différentes valeurs du rapport b/δ .

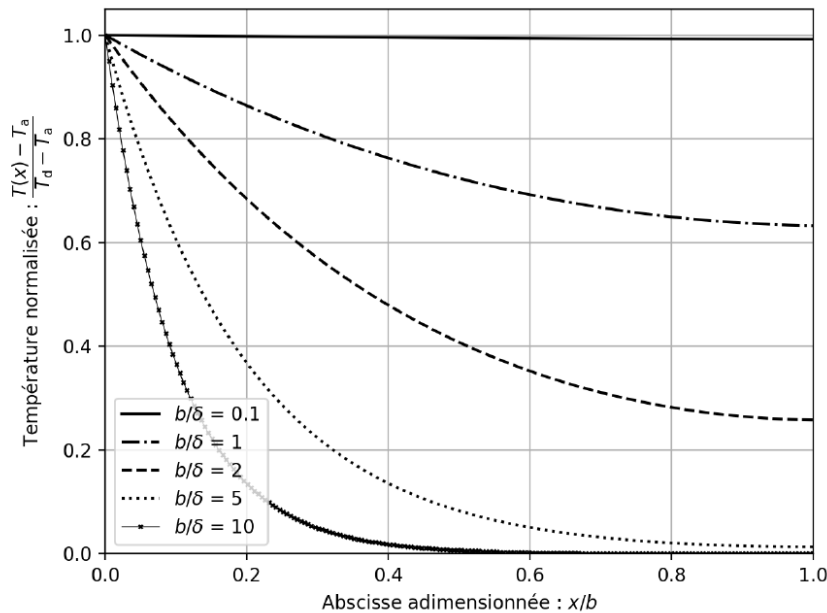


Figure 2 Représentation graphique du champ de température dans une ailette en silicium (solution de l'équation (I.1)) pour différentes valeurs du rapport b/δ

Q 5. En précisant les approximations effectuées, obtenir une expression analytique approchée de $T(x)$ dans le cas où $b \gg \delta$. Vérifier la cohérence de cette expression avec la figure 2.

On définit la résistance thermique R_{th} de l'ailette de refroidissement par $R_{th} = \frac{T_d - T_a}{\mathcal{P}}$, où \mathcal{P} désigne la puissance thermique totale évacuée par l'ailette dans l'air.

Q 6. La figure 3 donne une représentation graphique de l'évolution de la résistance thermique d'une ailette cylindrique en fonction du rapport b/δ , pour différents matériaux. Interpréter physiquement l'existence d'une valeur asymptotique de R_{th} commune aux différents matériaux lorsque $b \ll \delta$; justifier sa valeur numérique.

Q 7. Retrouver, par le calcul, la valeur asymptotique de la résistance thermique R_{th} de l'ailette en silicium dans le cas où $b \gg \delta$.

Q 8. En pratique, les ailettes sont réalisées en aluminium et leur longueur est fixée à $b = 2$ cm. En vous appuyant sur la figure 3, justifier ces choix, puis estimer le nombre d'ailettes (de rayon $a = 1$ mm) à associer à un microprocesseur dissipant une puissance thermique de 200 W pour que la température de ce dernier n'excède pas 60°C en régime stationnaire de fonctionnement. Commenter.

I.B – À l'échelle des locaux

Dans toute cette sous-partie, on s'intéresse au système de refroidissement d'une salle informatique de 25 m^3 , située dans le sud de la France, dans laquelle sont placés plusieurs serveurs de données. L'objectif est de maintenir la température de la salle à une valeur inférieure ou égale à $T_{\max} = 35^\circ\text{C}$, sachant que les serveurs de données dégagent une énergie thermique de $100\text{ kW}\cdot\text{h}$ chaque jour.

Q 9. La solution première de refroidissement de la salle repose sur l'utilisation d'un système de conditionnement d'air (parfois désigné « climatiseur » par abus de langage). Estimer le coût annuel, en euros, de cette solution en considérant que le système de conditionnement d'air fonctionne en permanence et que son efficacité — ou COP (Coefficient de Performance) — est égale à 3.

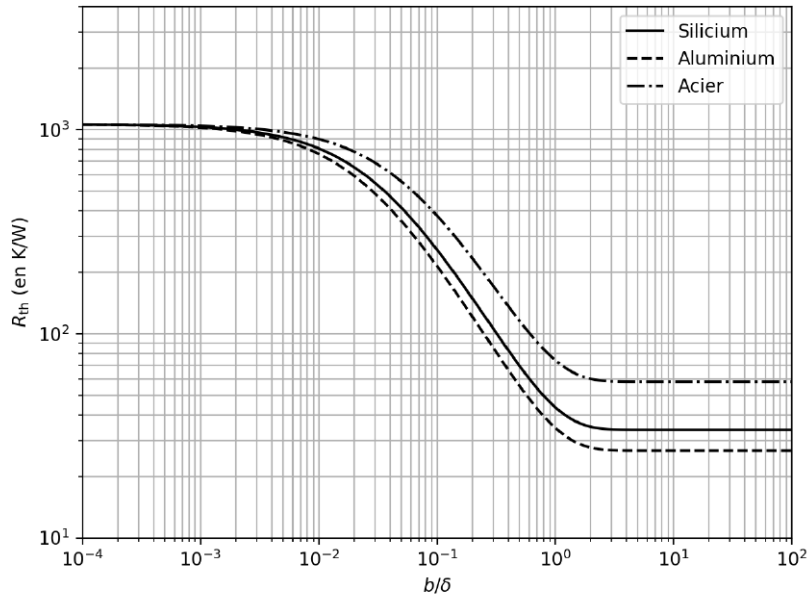


Figure 3 Évolution de la résistance thermique d'une ailette de rayon $a = 1$ mm, en présence de ventilation, en fonction du rapport b/δ

Afin de réduire les dépenses engagées pour le refroidissement de la salle, une alternative intéressante est celle du *free-cooling*, qui consiste à ventiler la salle tout en exploitant la fraîcheur de l'air extérieur. Pour ce faire, on a recours à l'installation d'un ventilateur pouvant remplacer l'air de la pièce avec le débit de volume $D_v = 830 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. La puissance absorbée par le ventilateur est $\mathcal{P}_v = 60 \text{ W}$.

Q 10. L'air de la pièce est modélisé par un gaz parfait diatomique, à la pression atmosphérique et à la température T_{\max} . Exprimer, puis évaluer numériquement, la masse volumique ρ_{air} de l'air dans ces conditions. En déduire le débit de masse d'air D_m , en $\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, brassé par le ventilateur dans ces mêmes conditions.

Les relevés annuels de température à l'extérieur de la salle sont présentés sur la figure 4.

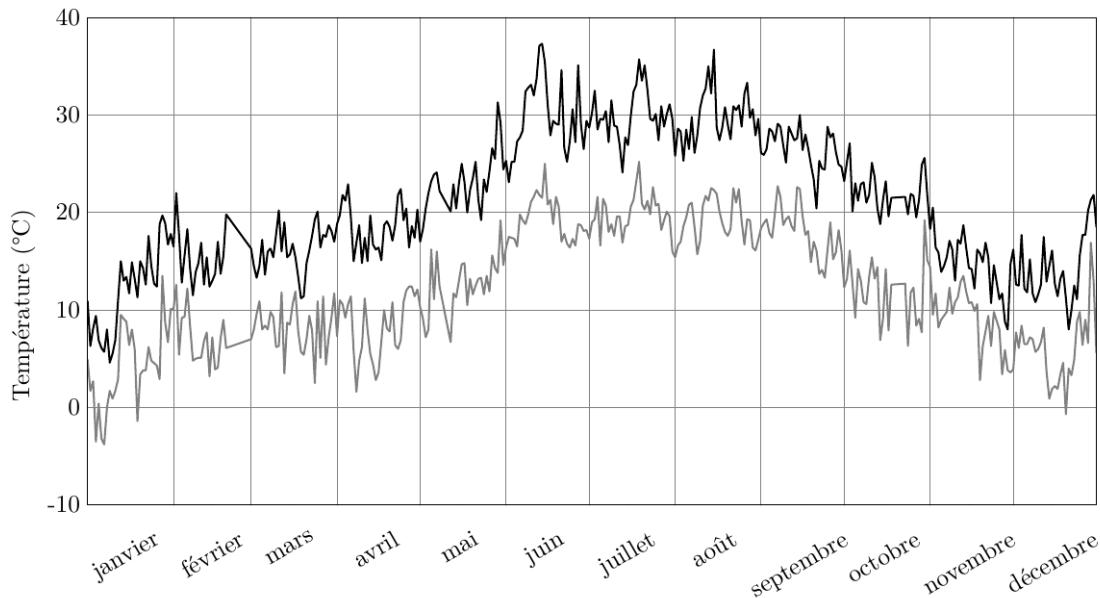


Figure 4 Relevé des températures journalières minimales et maximales à l'extérieur de la salle pour l'année 2021 (source infoclimat.fr)

Lorsque le système de *free-cooling* ne permet pas de maintenir la température de la salle à une température inférieure ou égale à T_{\max} , le système de conditionnement d'air prend le relais et le système de *free-cooling* s'arrête.

Q 11. À l'aide d'un modèle simple, estimer la période de l'année sur laquelle le système de *free-cooling* est fonctionnel. En déduire le gain annuel en euros obtenu grâce à l'installation du système de *free-cooling* dans cette salle informatique.

Données

Conductivité thermique du silicium	$\lambda_{\text{Si}} = 148 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'aluminium	$\lambda_{\text{Al}} = 237 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Conductivité thermique de l'acier	$\lambda_{\text{acier}} = 50 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
Coefficient conducto-convectif air-métal (air statique)	$h_s = 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Coefficient conducto-convectif air-métal (air renouvelé)	$h_r = 300 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$
Prix du kW·h	0,17 €
Constante des gaz parfaits	$R = 8,314 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

PROBLEME 3 : élaboration d'un béton routier

Données : Constante du gaz parfait $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Atome	Hydrogène H	Carbone C	Oxygène O	Silicium Si	Calcium Ca
Masse atomique ($\text{g}\cdot\text{mol}^{-1}$)	1	12	16	28	40

Constituant	CO_2, gaz	$\text{CaCO}_3, \text{solide}$	$\text{SiO}_2, \text{solide}$	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5, \text{solide}$
Enthalpie molaire de formation ($\text{kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$)	-393	-1 206	-910	-2 930
Entropie standard molaire ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	213,6	92,29	41,28	130,5

Constituant	N_2, gaz	O_2, gaz	$\text{H}_2\text{O}, \text{gaz}$	CH_4, gaz	CO_2, gaz
Capacité thermique molaire isobare standard ($\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	29,1	29,4	33,6	35,3	37,1

Consignes : on supposera l'enthalpie et l'entropie standards de réaction comme des grandeurs indépendantes de la température.

Une chaussée en béton dure plusieurs décennies de plus que son équivalent en asphalte. Elle nécessite moins d'entretien et de réhabilitation et sa surface rigide donne naissance à moins d'ornières ou nids de poule. Le béton est obtenu par mélange de ciment, d'eau, de sable et autres granulats. En usine, on produit du « clinker » qui, mis en poudre très fine avec des ajouts, constitue le ciment. Le ciment Portland est le plus utilisé au monde. Son « clinker » est fabriqué dans un four à 1 700 K par la réaction entre du calcaire CaCO_3 et de l'argile assimilée à de la silice SiO_2 . Il y a formation de gaz carbonique CO_2 .

Q32. Écrire le bilan réactionnel (réaction (1)) entre la silice et le carbonate qui engendre une mole du constituant solide principal du ciment, c'est-à-dire une mole de silicate de calcium Ca_3SiO_5 .

Q33. Calculer, à partir des données, l'enthalpie standard de réaction ΔH_{r1}^0 pour une mole de silicate formée.

Q34. a) Calculer, à partir des données, l'entropie standard de réaction ΔS_{r1}^0 pour une mole de silicate formé.

b) Commenter son signe.

Q35. a) En déduire que l'expression de l'enthalpie libre standard de réaction $\Delta G_{r1}^0(T)$ peut s'écrire :

$$\Delta G_{r1}^0(T) = 419 \cdot 10^3 \left(1 - \frac{T}{T_i} \right).$$

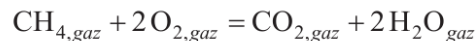
b) Quelle est la valeur de T_i ?

c) Commenter le choix industriel.

d) Évaluer la constante d'équilibre de la réaction (1) à 1 700 K.

Q36. Calculer l'énergie thermique nécessaire Q_p pour produire une tonne de ciment assimilé à du silicate de calcium pur (à 1 700 K, 1 bar).

Q37. Cette énergie thermique est apportée par la réaction (2), de combustion du méthane, supposée totale :



dont l'enthalpie standard de réaction vaut $\Delta H_{r2}^0 = -830 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ à 298 K.

Elle est réalisée sous 1 bar entre le méthane et l'air pris à 298 K dans les proportions stœchiométriques pour la réaction (2). L'air est considéré comme un mélange d'un volume de dioxygène O_2 et de quatre volumes de diazote N_2 . Calculer la température atteinte en supposant que l'énergie thermique de la combustion n'a pas le temps de s'évacuer et en supposant que les capacités thermiques molaires standards sont indépendantes de la température.

Q38. On veut utiliser l'énergie thermique fournie par le retour à 1 700 K des constituants engendrés par la réaction (2).

a) Quelle est la quantité n de dioxyde de carbone CO_2 produite par tonne de ciment ?

b) Commenter sachant que la production de ciment dans le monde représente 4,6 milliards de tonnes par an (aucun calcul supplémentaire n'est requis).

PROBLEME 4 : principe de route chauffante**Données**

- La loi empirique de Fourier relative à la diffusion thermique permet d'écrire que le vecteur densité de courant thermique est de la forme $\vec{j}_Q = -\lambda \overrightarrow{\text{grad}} T$ avec λ la conductivité thermique.
- La loi de Newton relative à la conducto-convection permet d'écrire que le flux thermique est de la forme $\vec{j}_Q = h(T_{\text{solide}} - T_{\text{fluide}}) \vec{n}$ avec T_{solide} la température de surface du solide, T_{fluide} la température du fluide en écoulement sur le solide et \vec{n} le vecteur unitaire sortant de la surface.
- Le gradient d'une fonction $U(r)$ en coordonnées cylindriques (r, θ, z) est égal à :

$$\overrightarrow{\text{grad}} U(r) = \frac{dU}{dr} \vec{e}_r.$$

Document - Routes chauffantes

La technologie s'invite dans l'infrastructure routière. Une société française a testé une route auto-déneigeante. Celle-ci emmagasine la chaleur en période chaude et va la restituer pour faire fondre la neige et le verglas. Sous le revêtement sont placés des tuyaux dans lesquels peuvent circuler des fluides caloporteurs qui vont pouvoir stocker et/ou faire circuler l'énergie thermique. Lors d'une période neigeuse une pompe à chaleur va s'activer et les cristaux de glace vont fondre. Ces routes « radiateurs » sont actuellement en expérimentation dans le Doubs sur un parking de lycée et dans les Yvelines sur 500 m² de l'autoroute A10.

Extrait de l'émission de télévision BFM Business du 22/01/2019 (propos d'Anthony Morel)

Le fluide caloporteur est l'eau avec du glycol qui sert d'antigel. La quantité de glycol est suffisamment faible pour qu'on assimile le fluide caloporteur à de l'eau de masse volumique $\mu = 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et de capacité thermique massique $C = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ supposées indépendantes de la température.

Il y a deux réseaux de tubes dans lesquels le fluide circule : un réseau dit de surface et un réseau enfoui. Pour le réseau de surface, il y a un courant du fluide dans des tubes cylindriques de longueur $L = 60 \text{ m}$, de faible rayon et peu épais (rayon extérieur $R = 1 \text{ cm}$ et épaisseur $e = 0,5 \text{ mm}$), fabriqués en polymère recyclable et placés à environ 10 cm de profondeur dans le revêtement. Dans le second réseau (dit enfoui) les tubes (de plus grand diamètre et plus épais), aux parois isolées, sont placés à au moins 1 m sous terre. Les deux réseaux sont reliés.

- Q39.** Dans l'épaisseur des tuyaux des réseaux, on suppose que la température ne dépend que de la variable r des coordonnées cylindriques (**figure 7**).
- On peut établir que la résistance thermique élémentaire $d\Gamma$, associée au phénomène de diffusion, d'un cylindre C (**figure 7**) de longueur L , compris entre les rayons r et $r + dr$ et de conductivité thermique λ vaut $d\Gamma = \frac{1}{2\pi\lambda L} \frac{dr}{r}$. En déduire la résistance thermique de diffusion d'un tuyau cylindrique creux de longueur L , de rayon extérieur R et d'épaisseur e .
 - En fait, au niveau du rayon intérieur des tuyaux du réseau de surface, le mouvement du fluide caloporteur entraîne une différence de température entre le rayon intérieur et le fluide caloporteur en obéissant à une loi de Newton de coefficient h . Exprimer la résistance thermique Γ d'un tuyau du réseau de surface (**figure 8**) en fonction de h, λ, R, L et e .
 - Calculer la valeur numérique de la conductance linéique G_l sachant que la conductivité thermique du polymère vaut $\lambda = 0,25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ et que le coefficient h du réseau de surface vaut $h = 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.
- Q40.** En période chaude, le revêtement routier peut être à une température uniforme de $\theta_{ext} = 70^\circ\text{C}$. L'eau en écoulement, dont la température ne dépend que de z , a une température d'entrée dans le réseau de surface égale à $\theta_e = 20^\circ\text{C}$ et une température de sortie du réseau de surface égale à $\theta_s = 65^\circ\text{C}$.
- Exprimer le premier principe pour l'écoulement en système ouvert qui correspond à la tranche comprise entre z et $z + dz$.
 - En déduire le débit massique D_m de l'eau en écoulement. Faire l'application numérique.
- Q41.** L'eau ainsi chauffée est envoyée dans le réseau enfoui dans le sol de température $\theta_{sol} = 5^\circ\text{C}$. On « stocke » ainsi son énergie thermique en remplissant le réseau enfoui.
- Les tuyaux du réseau enfoui (**figure 8**) doivent stocker l'eau après un mois ($t = 30$ jours) de forte température où le revêtement routier reste à $\theta_{ext} = 70^\circ\text{C}$. Quel volume d'eau doit contenir le réseau enfoui ?
 - Quelle résistance thermique minimale Γ'_m doit avoir le réseau enfoui pour que les pertes thermiques en 4 mois ne dépassent pas 1 % de l'énergie stockée. On peut admettre que la température de l'eau stockée reste pratiquement égale à $\theta_s = 65^\circ\text{C}$ et que le sol à 1 m de profondeur reste à température constante $\theta_0 = 15^\circ\text{C}$.



- Q42.** Quel est le principe d'une pompe à chaleur ditherme ? On répondra à cette question en indiquant sur un schéma les transferts énergétiques, leur nature et leur sens entre l'agent de la machine thermique et les sources.
- Q43.** Que pensez-vous de ce que dit le journaliste dans le **document** (page 11) ?

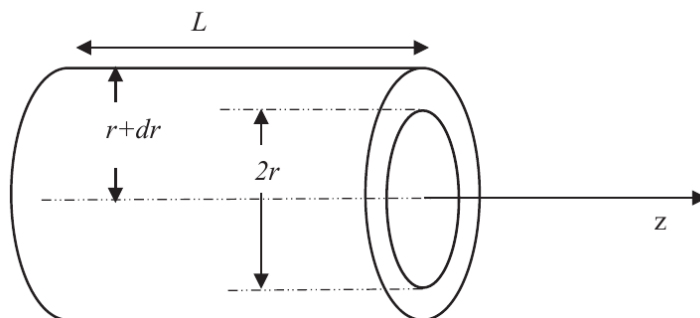
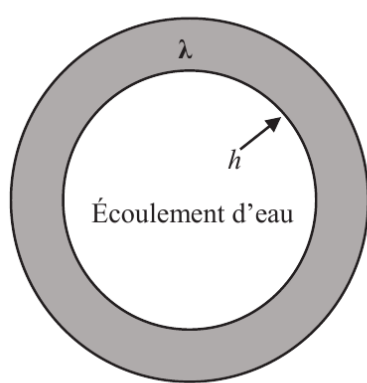
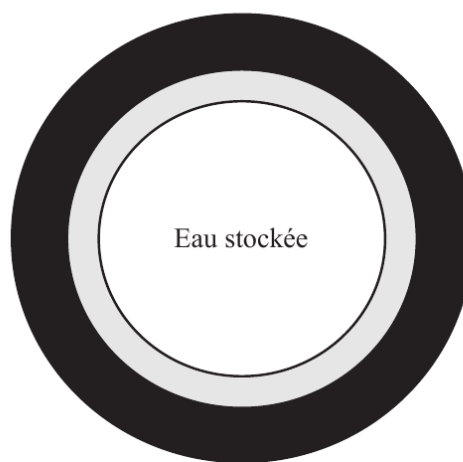


Figure 7 - Géométrie du cylindre C



Réseau de surface : polymère mince



Réseau enfoui : métal entouré de laine de verre

Figure 8 - Tuyauteries des réseaux

Les échelles ne sont pas respectées par commodité de représentation