

# Devoir Surveillé 2

---

**L'emploi des calculatrices personnelles est interdit.**

## **Instructions générales**

Les candidats sont invités à porter une attention particulière à la rédaction. La présentation, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la rédaction, la clarté et la précision des raisonnements entreront pour une part importante dans l'appréciation des copies. En particulier, les résultats non encadrés et non justifiés ne seront pas pris en compte.

Toute application numérique ne comportant pas d'unité ne donnera pas lieu à attribution de points.  
Le candidat prendra soin de bien numéroter les questions et d'y répondre dans l'ordre sur sa copie.

Si au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble 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.

Toutes les données et aides aux applications numériques se trouvent en fin de sujet.

**ATTENTION :**

- La rédaction doit être faite à l'encre noire ou bleue. Les couleurs doivent être réservées à l'encadrement des résultats et/ou les schémas.
- Les encres vertes et violettes sont interdites.
- Sont interdits également : les stylos plumes, les correcteurs type « Typex » ou « blanco », les stylos à friction.

# 1 Etude d'une pompe à chaleur

Le réchauffement climatique s'est imposé comme un défi majeur pour notre société. Dans le cadre du développement durable, la pompe à chaleur est une machine thermique particulièrement intéressante en raison de son efficacité supérieure à un. Elle permet ainsi de diviser la consommation énergétique par ce même coefficient. La détermination de cette efficacité est l'objet principal de cette étude.

Si le principe de la pompe à chaleur est ancien (Thomson 1852), sa commercialisation a débuté dans les années 1950 aux États-Unis et se développa comme moyen de chauffage dans les années 1970 en France.

Une pompe à chaleur est une machine thermique comportant deux sources de chaleur (froide et chaude) entre lesquelles un fluide caloporteur subit des cycles de transformation. Afin de protéger la couche d'ozone, les fluides caloporteurs contenant du chlore (appelés CFC : chloro-fluoro-carbone) ont été interdits au niveau international par le protocole de Montreal en 1985. Le fluide utilisé dans la pompe à chaleur du laboratoire est le 1,1,1,2-tétrafluoroéthane  $C_2H_2F_4$  (fluide HFC référencé R134a) est sans effet destructeur pour la couche d'ozone. Notons que ce fluide, très utilisé dans l'industrie, présente toutefois un impact non négligeable sur l'effet de serre.

Nous allons étudier une pompe à chaleur pédagogique : nous aborderons l'étude de la machine thermique en considérant dans un premier temps le système fermé constitué par le fluide caloporteur R134a. Nous considérerons ensuite l'écoulement du fluide dans les différentes machines qui composent la pompe à chaleur.

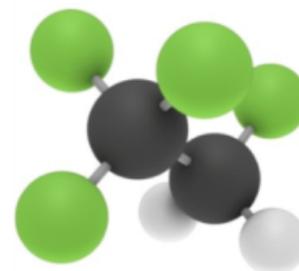


Figure 1 R134a

## I Étude thermodynamique du système fermé

Le dispositif comprend les différents organes mentionnés figure 2. Le fluide R134a est contenu dans un tuyau de cuivre parfaitement fermé. Sous forme gazeuse à la sortie du compresseur (point 2), il subit une liquéfaction au niveau du condenseur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de droite contenant de l'eau (figure 3). Le liquide subit ensuite une détente au niveau du détendeur (évolution de 4 à 5) avant de se vaporiser complètement au niveau de l'évaporateur : le tuyau de cuivre prend la forme d'un serpentin plongé dans le seau de gauche contenant de l'eau (figure 3). Il retourne à nouveau dans le compresseur (point 1) pour suivre un nouveau cycle.

On dispose de deux manomètres (basse pression et haute pression) permettant une mesure de pression relative ( $P_{rb}$  et  $P_{rh}$ ) ; pour obtenir la pression absolue on doit ajouter 1 bar. Ces manomètres présentent une double graduation pression relative et température.

On utilise un système d'expérimentation assistée par ordinateur afin de suivre l'évolution des températures  $T_i$  aux différents points et de la puissance  $\mathcal{P}$  consommée par le compresseur. Pour cette dernière, on utilise un wattmètre (figure 4) disposant d'une sortie en tension proportionnelle à la puissance mesurée.

On peut schématiser le fonctionnement de la pompe à chaleur sur le schéma d'ensemble donné figure 5.

On note les températures exprimées en °C avec la lettre  $\theta$  et celles exprimées en kelvin avec la lettre  $T$ .

### I.A – Modèle de Carnot

Dans cette sous-partie I.A, on modélise la pompe à chaleur par une machine cyclique réversible ditherme de Carnot : au cours d'un cycle le fluide R134a reçoit le transfert thermique  $Q_f$  de la part de la source froide (à la température  $T_f$ ), le transfert thermique  $Q_c$  de la part de la source chaude (à la température  $T_c$ ) et le travail  $W$  de la part du compresseur. On suppose que toutes les évolutions sont réversibles.

#### I.A.1)

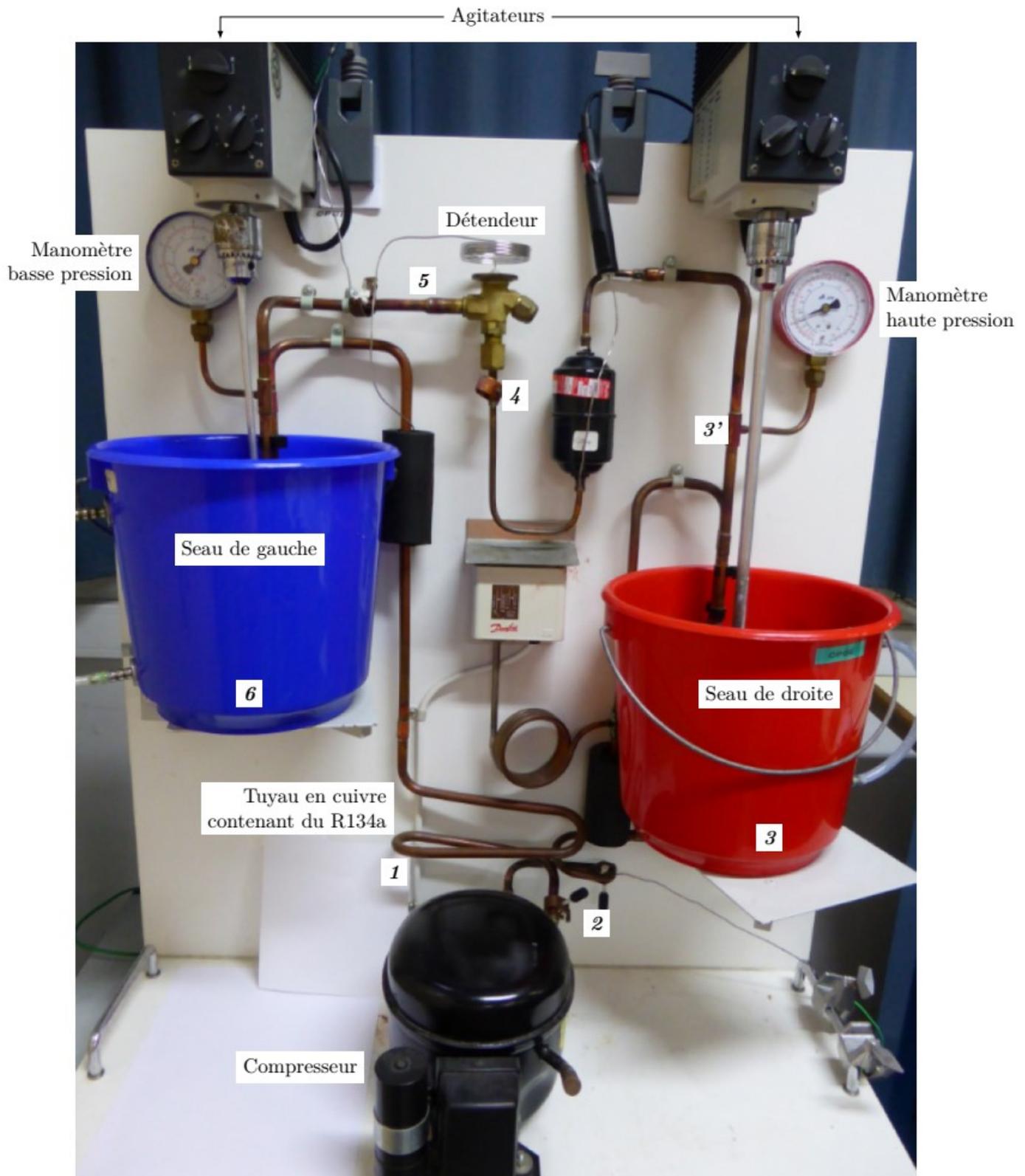
a) Appliquer le premier principe au fluide R134a sur un cycle. L'écriture obtenue dépend-elle du caractère réversible des évolutions ?

b) Appliquer le second principe au fluide R134a sur un cycle. L'écriture obtenue dépend-elle du caractère réversible des évolutions ?

#### I.A.2)

a) Donner, en le justifiant, le signe des grandeurs  $Q_f$ ,  $Q_c$  et  $W$ .

b) Comparer  $|Q_f|$  et  $|Q_c|$ . Commenter.



**Figure 2** Vue d'ensemble de la pompe à chaleur

**I.A.3)** La pompe à chaleur est utilisée ici comme un réfrigérateur.

- Définir l'efficacité  $\eta_{fc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources.
- Faire l'application numérique avec  $\theta_c = 26\text{ }^\circ\text{C}$  et  $\theta_f = 0\text{ }^\circ\text{C}$ .
- Commenter le résultat en se référant à un ordre de grandeur de l'efficacité d'une machine réelle actuelle.

**I.A.4)** La pompe à chaleur est utilisée ici comme un dispositif de chauffage.

- Définir l'efficacité  $\eta_{cc}$  de cette machine et l'exprimer en fonction des températures des sources.
- Faire l'application numérique avec  $\theta_c = 26\text{ }^\circ\text{C}$  et  $\theta_f = 0\text{ }^\circ\text{C}$ . Commenter.



Serpentin évaporateur



Serpentin condenseur

Manomètre basse pression ( $P_{rb}$ )Manomètre haute pression ( $P_{rh}$ )

Figure 3

### I.B – Modèle des pseudo-sources

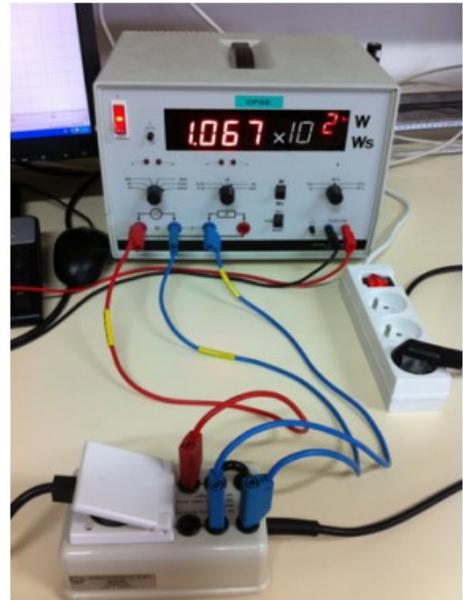
Dans cette sous-partie I.B, on considère que les températures des sources, constituées des masses d'eau  $m_e$  contenues dans les seaux en plastique, varient au cours de l'expérience. On suppose également que toutes les évolutions sont réversibles. À la date  $t = 0$ , on met en marche la pompe à chaleur alors que les deux seaux contiennent chacun  $m_e = 4 \text{ kg}$  d'eau à la même température  $T_0$ . On note  $c_e$  la capacité thermique massique de l'eau.

#### I.B.1)

- Appliquer le premier principe au fluide R134a pour un cycle infinitésimal.
- Appliquer le second principe au fluide R134a pour un cycle infinitésimal.



Pompe à chaleur avec dispositif d'acquisition



Wattmètre

Figure 4

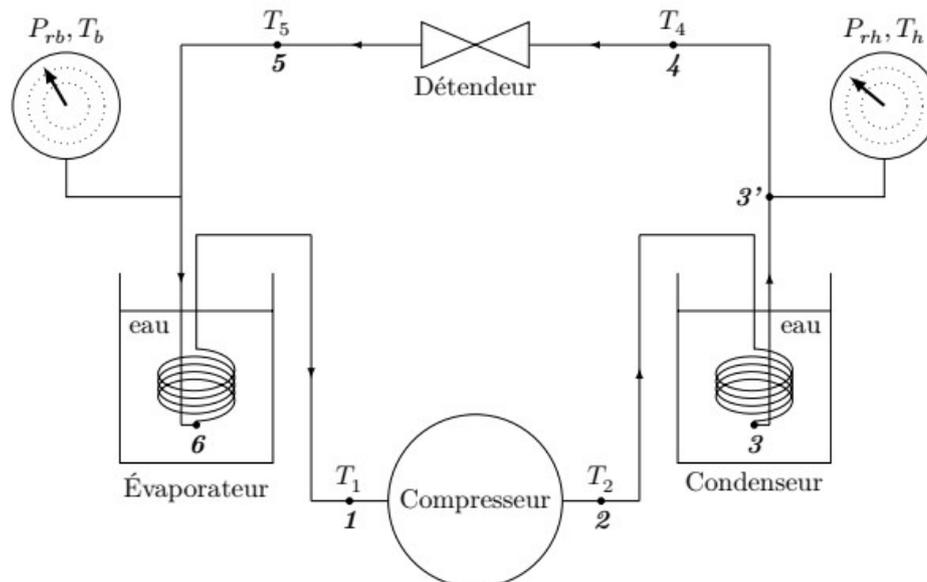


Figure 5 Schéma d'ensemble de la pompe à chaleur

**I.B.2)**

a) Exprimer le transfert thermique élémentaire  $\delta Q_f$  reçu par le fluide de la part de la source froide en fonction de  $m_e$ ,  $c_e$  et  $dT_f$ , où  $dT_f$  est la variation élémentaire de température de la source froide.

b) Exprimer le transfert thermique élémentaire  $\delta Q_c$  reçu par le fluide de la part de la source chaude en fonction de  $m_e$ ,  $c_e$  et  $dT_c$ , où  $dT_c$  est la variation élémentaire de température de la source chaude.

c) En déduire la relation :  $\frac{dT_f}{T_f} + \frac{dT_c}{T_c} = 0$ .

**I.B.3)** Lors de l'expérience, on obtient les tracés de la figure 6 avec  $\theta_0 = 17^\circ\text{C}$ , où  $\theta_0$  représente la température initiale commune des deux seaux.

a) Commenter l'allure des trois courbes du haut donnant les variations de  $T_c(t)$ ,  $T_f(t)$  et  $\sqrt{T_c(t)T_f(t)}$ . On commentera avec soin l'allure de cette dernière courbe.

b) Pour  $t > 1500$  s, on observe que la température  $T_f$  ne varie plus. Quel phénomène se produit-il à partir de cette date ? Proposer une expression pour le transfert thermique infinitésimal  $\delta Q_f$  pour  $t > 1500$  s ? Le candidat pourra introduire une ou plusieurs grandeurs qu'il définira soigneusement.

Dans la suite, on se place à  $t < 1500$  s.

**I.B.4)** On définit une efficacité théorique par :  $\eta_t = \left| \frac{\delta Q_c}{\delta W} \right|$  où  $\delta W$  est le travail reçu par le fluide de la part du compresseur au cours d'un cycle infinitésimal.

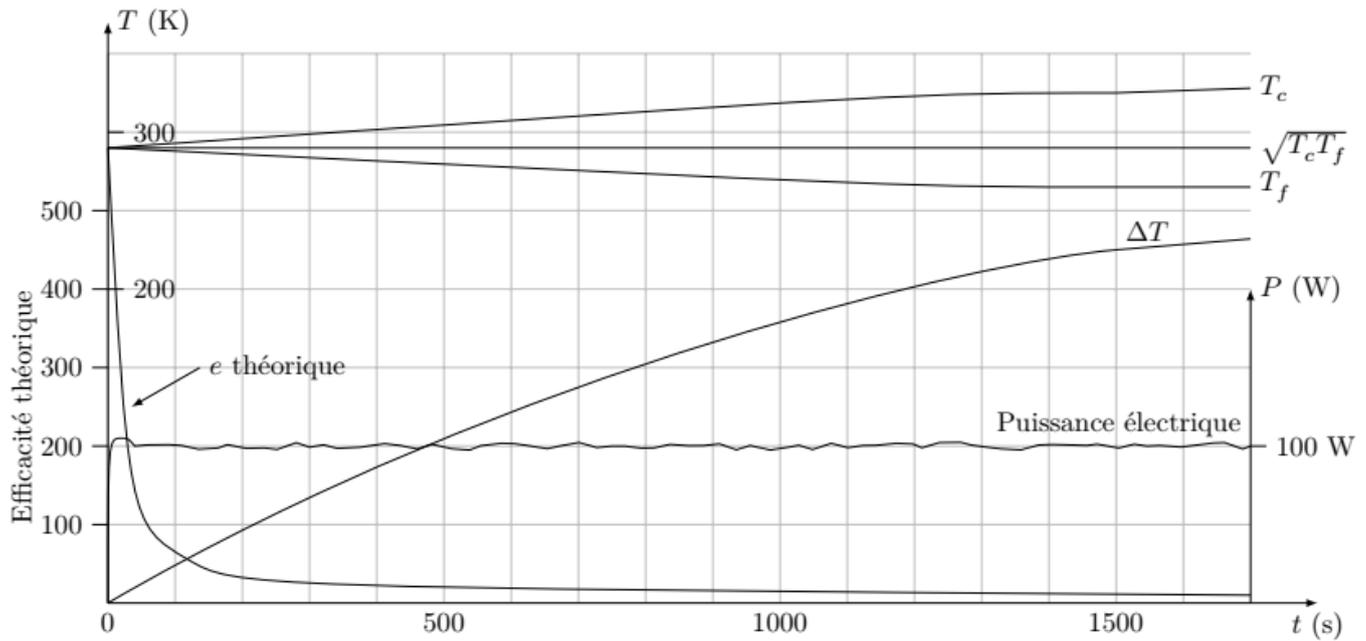


Figure 6 Courbes expérimentales

- a) Justifier la définition de  $\eta_t$ .
- b) Exprimer  $\eta_t$  à l'aide de  $T_c$  et  $T_f$ .
- c) En déduire :  $\eta_t = \frac{T_c^2}{T_c^2 - T_0^2}$ .
- d) En exprimant  $\Delta T = T_c - T_f$ , on peut montrer que l'efficacité théorique  $\eta_t$  de la pompe à chaleur à chaleur s'écrit :  $\eta_t = \frac{1}{2} + \sqrt{\frac{1}{4} + \left(\frac{T_0}{\Delta T}\right)^2}$ .

Commenter cette expression. La courbe nommée e théorique (figure 6) est-elle en accord avec cette expression ?

On étudie maintenant le phénomène de diffusion thermique dans l'eau des seaux. On modélise le serpentin par un conducteur de cuivre compris entre les cylindres de hauteur  $H$  et de rayons  $R'$  et  $R > R'$  (figure 7). L'intérieur ( $r < R'$ ) est rempli d'eau de conductivité thermique  $\lambda_e$ , de capacité thermique massique  $c_e$  et masse volumique  $\rho_e$  grandeurs supposées constantes. On suppose que la température dans le conducteur de cuivre est constante égale à  $T_c$ . L'eau est initialement à la température  $T_0$ . On suppose que le champ de température dans l'eau est fonction de la distance  $r$  à l'axe  $Oz$  et du temps  $t$ . La conductivité thermique de la glace est  $\lambda_g = 2,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$  et celle de l'eau liquide  $\lambda_e = 0,60 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ .

On donne  $R' = 4 \text{ cm}$ ,  $R = 4,2 \text{ cm}$ ,  $H = 15 \text{ cm}$ ,  $c_e = 4,2 \times 10^3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$  et  $\rho_e = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

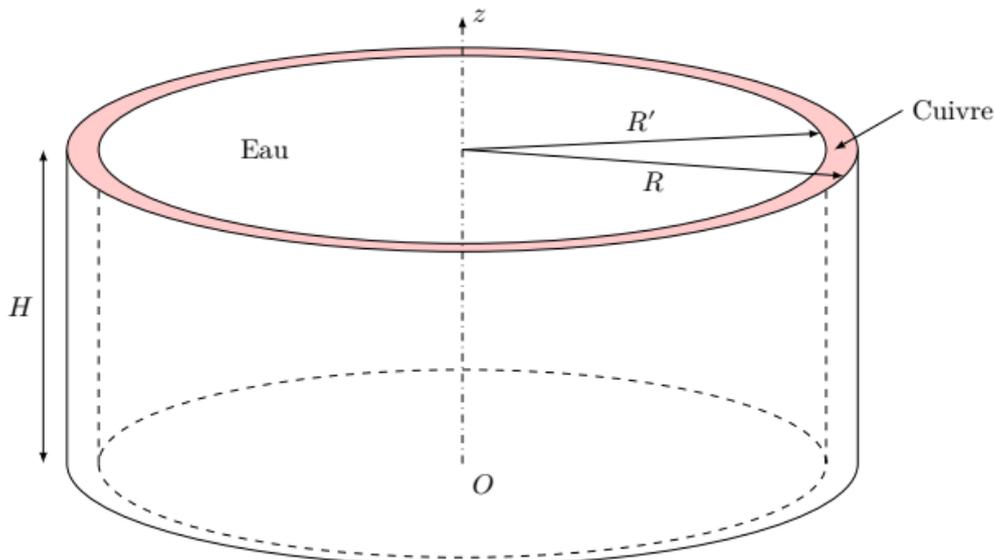


Figure 7 Diffusion thermique

**I.B.5)** Établir l'équation de diffusion thermique vérifiée par la température  $T(r, t)$  dans l'eau à partir d'un bilan enthalpique sur un système élémentaire que l'on précisera et de la loi de Fourier que l'on commentera. On ne prendra en compte ici que le phénomène de diffusion thermique.

**I.B.6)** En évaluant une durée caractéristique, justifier la nécessité de remuer l'eau.

## II Étude thermodynamique de l'écoulement stationnaire

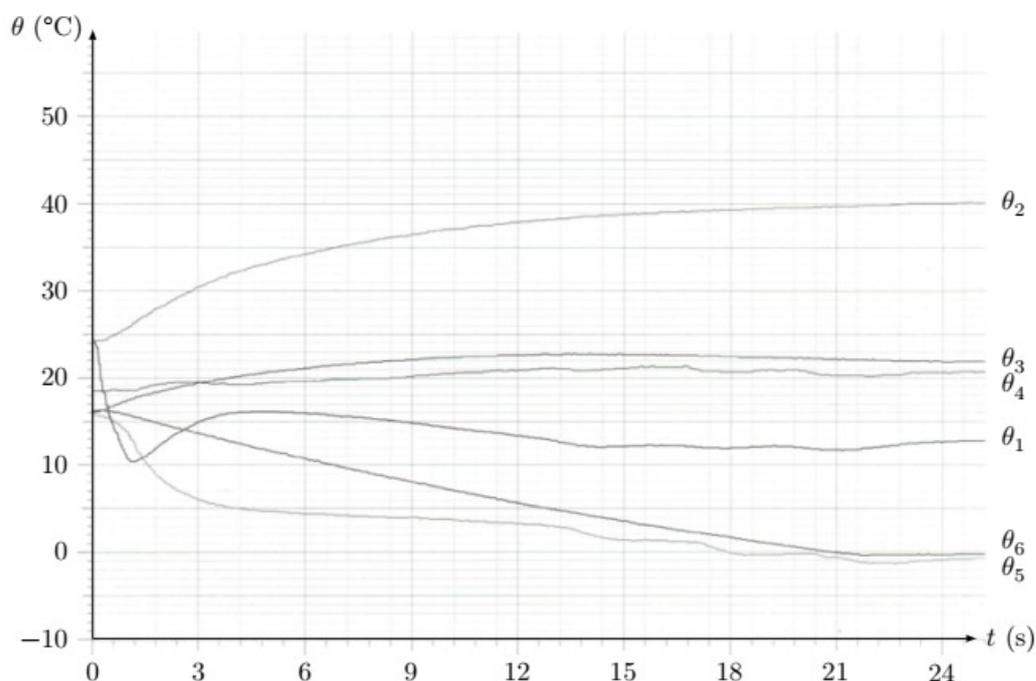
### II.A – Écoulements stationnaires à travers les différents composants

Dans cette sous-partie II.A, on considère cette fois que le fluide est en écoulement stationnaire à travers les différentes machines qui composent la pompe à chaleur (compresseur, condenseur, détendeur, évaporateur, tuyau). De plus, on réalise un écoulement d'eau dans le seau de droite (figure 8) : le seau de droite est alimenté en eau par un robinet et l'eau du seau s'évacue ensuite dans un évier.



**Figure 8** Pompe à chaleur avec dispositif de refroidissement

Au bout d'une vingtaine de minutes, la température de l'eau du seau de droite (notée  $\theta_3$ ) est constante. Il en va de même pour celle du seau de gauche. Les températures et pressions se stabilisent alors dans l'ensemble du dispositif comme le montre le relevé donné figure 9.



**Figure 9** Relevé de températures

Le régime permanent atteint, on effectue alors les mesures de température  $\theta_i$  et de pression  $P_i$  reportées dans le tableau 1.

	1	2	3	3'	4	5	6
$P_r$ (bar)	1,9	5,8	5,8	5,8	5,8	1,9	1,9
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ (°C)	12	44	26	26	19	0	0

Tableau 1

**II.A.1)** Pour quelle raison obtient-on une température constante dans le seau de gauche ?

**II.A.2)** Pour quelle raison a-t-on une double graduation pression relative  $P_r$  et température  $\theta$  sur les manomètres (figure 3) ?

En régime permanent d'écoulement, le fluide R134a subit les transformations suivantes (on peut se reporter à la figure 5)

- $1 \rightarrow 2$  : le fluide à l'état gazeux sous la pression  $P_b$  est comprimé dans un compresseur à piston. Il ressort à la pression  $P_h$ . On considère que cette compression est isentropique ;
- $2 \rightarrow 3$  : le gaz se refroidit de façon isobare jusqu'au condenseur (seau de droite contenant une masse d'eau  $m_e$ ). On parle de désurchauffe. Au point 3 le gaz est assimilé à de la vapeur saturante sèche ;
- $3 \rightarrow 3'$  : le gaz se condense au contact thermique de l'eau du condenseur (seau de droite) jusqu'au liquide saturé ;
- $3' \rightarrow 4$  : dans le tuyau de cuivre, le liquide se refroidit de façon isobare jusqu'au détendeur. On parle de sous-refroidissement ;
- $4 \rightarrow 5$  : le liquide subit une détente dans le détendeur ; il commence à se vaporiser ; la pression de sortie est  $P_b$  (manomètre de gauche). Cette détente peut être considérée comme adiabatique ;
- $5 \rightarrow 6$  : le fluide poursuit sa vaporisation à la pression  $P_h$  notamment dans le serpentin évaporateur baignant dans de l'eau (seau de gauche contenant une masse d'eau  $m_e$ ) ;
- $6 \rightarrow 1$  : dans le tuyau de cuivre, le gaz se réchauffe de façon isobare jusqu'à l'entrée du compresseur. On parle de surchauffe. Elle permet de s'assurer qu'aucune goutte de liquide ne pénètre dans le compresseur.

On obtient le tableau 2.

	1	2	3	3'	4	5	6
$P$ (bar)	2,9	6,8	6,8	6,8	6,8	2,9	2,9
$\theta$ (°C)	12	44	26	26	19	0	0
$T$ (K)	285	317	299	299	292	273	273
$x$	vapeur sèche	vapeur sèche	1	0	Liquide	$x_5$	1
$v$ (m <sup>3</sup> .kg <sup>-1</sup> )	0,073	0,033	0,030	$8,3 \times 10^{-4}$	$8,1 \times 10^{-4}$	0,012	0,070
$h$ (kJ.kg <sup>-1</sup> )	408	430	412	233	226	$h_5$	396
$s$ (kJ.K <sup>-1</sup> .kg <sup>-1</sup> )	1,76	$s_2$	1,72	1,13	1,09	1,08	1,72

Tableau 2

**II.A.3)** On considère une machine (M), présentant une entrée et une sortie, dans laquelle un fluide est en écoulement permanent unidimensionnel.

Établir le premier principe sous la forme :  $\Delta h + \Delta e_c + \Delta(gz) = w_i + q_e$ .

Dans toute la suite du problème, on négligera les variations d'énergies cinétique et potentielle massiques devant les variations d'enthalpie massique.

**II.A.4)** On s'intéresse au détendeur. Il s'agit d'un organe sans pièce mobile. La détente est supposée adiabatique.

- a) Quel(s) argument(s) permet(tent) de justifier l'adiabaticité de la transformation ( $4 \rightarrow 5$ ) dans le détendeur ?
- b) Montrer qu'une fonction d'état massique se conserve au cours de la transformation.

**II.A.5)** On s'intéresse au compresseur. L'évolution du fluide peut être considérée comme isentropique.

- a) Quels arguments permettent de justifier l'isentropicité de la transformation ( $1 \rightarrow 2$ ) dans le compresseur ?
- b) Calculer le travail massique indiqué  $w_{i12}$  reçu par le fluide de la part du compresseur. Commenter.

## II.B – Diagramme enthalpique

On considère le diagramme enthalpique (ou diagramme des frigoristes) fourni sur le document réponse. Sur ce diagramme, on peut identifier la courbe de saturation composée de la courbe d'ébullition (liquide saturé,  $x = 0$ ,

courbe de gauche) et de la courbe de rosée (vapeur saturante sèche,  $x = 1$ , courbe de droite). On peut également identifier les isotitres, les isothermes, les isentropiques et les isochores.

**II.B.1)** Commenter l'allure des isothermes dans chaque domaine (vapeur sèche, état diphasé, phase liquide).

**II.B.2)** Placer les points **1**, **2**, **3**, **3'**, **4**, **5** et **6** sur le diagramme des frigoristes et tracer le cycle parcouru par le fluide.

**II.B.3)**

a) Lors du changement d'état  $A \rightarrow B$  d'un corps pur à la température  $T$ , quelle relation a-t-on entre  $\Delta s_{AB}(T)$  et  $\Delta h_{AB}(T)$  ?

b) Vérifier numériquement cette relation pour  $T = 299$  K.

c) Déterminer graphiquement la valeur de l'enthalpie massique de vaporisation du fluide R134a pour  $T = 273$  K. Commenter l'ordre de grandeur en comparant à des ordres de grandeur connus.

**II.B.4)** Déterminer la valeur de la fraction massique  $x = m_g/m$  au point **5**.

### **II.C – Estimation du débit massique**

Cette sous-partie nécessite qu'on lui réserve un temps suffisant pour s'approprier le problème, établir une stratégie de résolution, la mettre en œuvre, critiquer les résultats et enfin communiquer l'ensemble de façon claire. Le barème prendra évidemment compte de l'ensemble et du temps passé à résoudre ce problème.

Le fluide caloporteur R134a fonctionne en système fermé dans un tuyau de cuivre parfaitement étanche. Il n'existe pas de prise de mesure de débit. Or la connaissance de la valeur du débit massique est nécessaire dans la détermination de certaines grandeurs.

À l'aide des documents fournis en annexe (description d'un compresseur), du verso du document réponse (données techniques du compresseur) et des données de l'énoncé, déterminer la valeur numérique du débit massique  $D_m$  en R134a dans la pompe à chaleur en régime de fonctionnement permanent.

### **II.D – Efficacité de la pompe à chaleur**

Dans toute la suite du problème, on prendra comme valeur du débit massique en R134a :  $D_m = 2,12 \times 10^{-3} \text{ kg}\cdot\text{s}^{-1}$ .

**II.D.1)** Le wattmètre mesurant la puissance électrique consommée par le compresseur affiche une valeur moyenne  $\mathcal{P} = 110$  W. Déterminer le rendement  $r$  du compresseur. Commenter.

**II.D.2)** La pompe à chaleur est utilisée comme chauffage en hiver.

a) Donner le sens de tous les transferts énergétiques ; on s'aidera pour cela d'un schéma.

b) Définir l'efficacité  $\eta_c$  de la pompe à chaleur en tenant compte de la désurchauffe et du sous-refroidissement mais sans tenir compte du rendement  $r$  du compresseur.

c) Faire l'application numérique et comparer-la à l'efficacité  $\eta_{cc}$  de Carnot.

d) Quel est l'intérêt de la désurchauffe (**2**  $\rightarrow$  **3**) et du sous-refroidissement (**3'**  $\rightarrow$  **4**) ?

e) Que valent les efficacités calculées précédemment si l'on tient compte du rendement du compresseur ?

**II.D.3)** La pompe à chaleur est utilisée comme système de réfrigération en été.

Reprendre l'étude précédente : sens des échanges, efficacité  $\eta_f$ , application numérique, intérêt de la surchauffe (**6**  $\rightarrow$  **1**) et prise en compte du rendement du compresseur.

**II.D.4)** Le compresseur serait endommagé par une entrée de liquide (« liquid shock »). Quel nouvel avantage a-t-on en réalisant la surchauffe (**6**  $\rightarrow$  **1**) ?

**II.D.5)** Évaluer la puissance thermique reçue par le fluide lors de la surchauffe. Commenter le résultat.

## 2 A table !

### 2.1 Le réchaud

Pendant les travaux dans sa maison M. Dubois, n'ayant pas encore de cuisine équipée, a dû utiliser pendant plusieurs jours son réchaud de camping. On étudie ici son fonctionnement.

#### Données 2

Capacité thermique massique de l'eau liquide à pression constante :  $c_{eau} = 4,2 \text{ kJ}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$

Masse volumique de l'eau liquide :  $\mu_{eau} = 1,0 \text{ kg}\cdot\text{L}^{-1}$

Enthalpie massique de vaporisation de l'eau sous 1 bar :  $\ell_V = 2,3\cdot 10^3 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$

Constante des gaz parfaits :  $R = 8,3 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$

#### Données spécifiques à l'hexamine

Aspect : poudre blanche

Formule brute :  $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$

Masse molaire :  $M_h = 140 \text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$

Masse volumique supposée indépendante de la température :  $\mu_h = 1,33 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Les produits de combustion de l'hexamine dans l'air varient selon les conditions : diazote  $\text{N}_2$ , eau  $\text{H}_2\text{O}$  et dioxyde de carbone  $\text{CO}_2$  dans les conditions optimales.

#### Enthalpies standard de formation à 25 °C

Espèce	$\text{H}_2\text{O}(\text{gaz})$	$\text{CO}_2(\text{gaz})$	$\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4(\text{solide})$
$\Delta_f H^\circ \text{ en kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$	$- 2,5\cdot 10^2$	$- 4,0\cdot 10^2$	$1,23\cdot 10^2$

**Document 1 - Set de cuisson (extrait du site marchand « monrechaud.com »)**

Le set de cuisson Esbit® (popote/réchaud en aluminium anodisé dur, idéal pour les sorties en solo) comprend une casserole d'une capacité de 585 mL, un couvercle et un support de réchaud à combustible solide.

Le support de casserole permet de déposer une tablette de combustible solide Esbit® et fait office de pare-vent. Lors du transport, il se range à l'intérieur de la casserole.



L'ensemble est extrêmement léger et compact. Le set de cuisson Esbit® est livré avec un filet de rangement.

**Document 2 - Tablettes de combustible solide (d'après le site marchand « monrechaud.com »)**

Vingt tablettes de 4 g de combustible solide permettent de recharger les réchauds pliants Esbit®. Elles peuvent être également utilisées pour allumer un feu de camp, un barbecue ou une cheminée. Deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau en 5 minutes. Une tablette de 4 g brûle approximativement en 5 minutes.

Matériaux : substances non toxiques dont l'hexamine.

Informations complémentaires :

- Non explosif
- S'allume avec une allumette ou un briquet
- Pas d'étincelles
- Puissance de chauffe forte
- Pouvoir calorifique de l'hexamine :  $7 \cdot 10^3 \text{ kcal} \cdot \text{kg}^{-1} = 31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Ne laisse pas de cendres après la combustion
- Aucune fumée visible
- Léger et compact
- Lorsqu'il est bien entreposé, le combustible solide Esbit® conserve ses caractéristiques techniques pendant de nombreuses années
- Fonctionne également à des températures inférieures à 0 °C et à haute altitude.

Le but de cette sous-partie est de vérifier le pouvoir calorifique annoncé par le fournisseur.

**Q35.** La réaction de combustion dans l'air s'écrit



où  $a$ ,  $b$ ,  $c$  et  $d$  sont des coefficients stœchiométriques.

Déterminer  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ .

**Q36.** Que valent les enthalpies standard de formation du diazote gazeux et du dioxygène gazeux à 25 °C ? Justifier.

**Q37.** Déterminer numériquement l'enthalpie standard de réaction  $\Delta_r H^\circ$  de la réaction (5) à 25 °C. On suppose cette grandeur indépendante de la température.

Pourquoi la valeur trouvée est-elle cohérente avec le fait que la réaction est une combustion ?

Le pouvoir calorifique est le transfert thermique libéré lors de la combustion complète d'un kilogramme de combustible sous une pression de 1 bar et à une température de 25 °C.

**Q38.** Démontrer avec soin que le pouvoir calorifique de l'hexamine est :  $PC = - \frac{\Delta_r H^\circ}{M_h}$ . On précisera entre autres les conditions d'application des lois utilisées.

**Q39.** Calculer numériquement  $PC$ . La donnée fournisseur est-elle juste ?

**Q40.** Lorsque l'on monte en altitude, la pression diminue. On suppose que la réaction (5) reste un équilibre. Quel est l'effet de cette diminution de pression à température constante sur l'équilibre ? Le réchaud restera-t-il performant en altitude ?

*Question bonus si vous avez bien suivi de cours de cette semaine.*

On s'interroge maintenant sur l'affirmation lue sur le site du fournisseur : « Deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau en 5 minutes ».

**Q41.** Quelle est la valeur numérique de l'énergie délivrée lors de la combustion des deux tablettes de combustible sous 1 bar et à 25 °C ? On utilisera le pouvoir calorifique fourni dans le **document 2**, page 7.

**Q42.** On considère le système thermodynamique fermé constitué par un volume  $V = 0,25$  L d'eau liquide. On le chauffe de manière monobare (pression extérieure constante égale à 1 bar) depuis une température de  $T_1 = 20$  °C jusqu'à une température  $T_2 = 100$  °C (température d'ébullition sous 1 bar). Déterminer, en justifiant soigneusement, l'expression littérale du transfert thermique reçu par l'eau lors de ce chauffage. Faire l'application numérique.

**Q43.** En conséquence, quel est le rendement espéré par le fournisseur lorsqu'il affirme « deux tablettes de 4 grammes permettent de faire bouillir 0,25 litre d'eau » ?

Une fois l'eau portée à ébullition, il faut encore apporter de l'énergie au système contenu dans la casserole pour maintenir l'ébullition.

**Q44.** Déterminer, en justifiant soigneusement, l'expression littérale du transfert thermique reçu par l'eau lors de la vaporisation monobare d'un volume  $V' = 0,05$  L d'eau liquide déjà portée à 100 °C. Faire l'application numérique. Commenter.

**Q45.** Dans le set de cuisson, on dispose d'un couvercle. Quel est son rôle ? Nommer précisément un phénomène physique en partie évité grâce au couvercle.

Toute l'étude précédente se base sur la donnée de l'enthalpie standard de la réaction (5). On se propose ici de remonter à sa valeur d'une manière différente. On prend une tablette de 4g de combustible que l'on fait brûler sous pression constante dans un récipient calorifugé, donc selon la réaction totale (5).

On prendra la même valeur de capacité thermique molaire standard pour tous les gaz, soit :  $C_{p,m}^0 = 40 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$

**Q46.** On suppose que la réaction est réalisée dans les proportions stœchiométriques en partant d'une quantité de matière initiale  $n_0$  en hexamine et qu'elle se fait avec l'air contenu dans le récipient. Dresser un tableau d'avancement de la réaction à l'état initial, puis final. En déduire la valeur de l'avancement final.

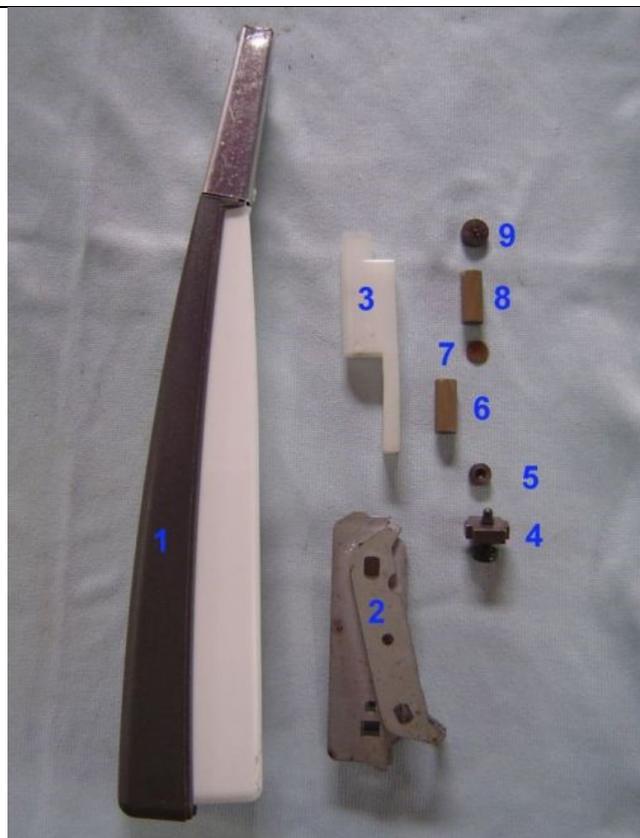
**Q47.** On suit l'évolution de la température pendant la réaction. En partant d'une température initiale de 25°C, on trouve une température de flamme de 2025°C. En déduire la valeur de l'enthalpie standard de cette réaction. Comparer à la valeur calculée en question 37.

## 2.2 L'allume-gaz

M. Dubois a enfin sa cuisine équipée et a installé une plaque de cuisson au gaz (oui il y a des gens qui préfèrent ça). Il se demande alors comment fonctionne l'allume-gaz qu'il utilise et qui contient un matériau piézoélectrique (Document 3).

Pour allumer un feu, l'homme préhistorique créait une étincelle en frappant deux silex l'un contre l'autre. Aujourd'hui, une simple pression sur le bouton d'un allume-gaz produit un arc électrique. Comment ? Grâce à une céramique piézo-électrique : soumis à une contrainte mécanique, ce matériau voit des charges électriques opposées apparaître sur ses faces. Cette propriété et sa réciproque – une modification des dimensions du matériau lorsqu'on lui applique une tension électrique – sont au cœur de multiples applications : montres à quartz, sonars... et même un nouveau type de mémoires d'ordinateur.

**Document 3.** « Etincelles sous pressions », *Pour la Science*, 30/11/99



- 1) Corps principal de l'allumeur piézoélectrique.
- 2) Système démultiplicateur en acier zingué permettant d'obtenir une pression forte sur le cristal.
- 3) Conteneur isolant du générateur piézo.
- 4) Butée d'appui en acier avec vis de réglage du générateur.
- 5) Coupelle de liaison - cristal / Butée
- 6) et 8) Cristaux de quartz (ici 2 petits barreaux de titanate de baryum).
- 7) Rondelle de liaison en laiton des 2 cristaux et point de collecte de la tension (fil soudé dessus).
- 9) Seconde butée et point d'appui de tout le système.

**Document 4.** Allume-gaz démonté et pièce constitutives, [25ansautourdumonde.blog4ever.com](http://25ansautourdumonde.blog4ever.com)

### 2.2.1 Mesure de l'intensité d'une force s'exerçant sur une lame piézoélectrique

Il se demande en particulier quelle est la force à exercer sur le matériau pour créer ces étincelles. Pour se faire, il réalise le montage suivant (Figure 1) avec une lame piézoélectrique différente et à l'aide d'un Amplificateur Linéaire Intégré (ALI).

On suppose qu'une force  $\vec{F}$  régulièrement répartie est exercée sur la face de la lame, celle-ci entraînant l'apparition d'une tension  $V_e$  à ses bornes et de deux charges opposées  $+q$  et  $-q$  sur les faces de la lame.

La charge  $q$  est liée à  $V_e$  ainsi qu'à la force  $\vec{F}$  exercée de sorte que  $q = CV_e = KF$  où  $C$ ,  $K$  et  $F$  représentent respectivement une capacité, une constante de proportionnalité et l'intensité de la force  $\vec{F}$ .

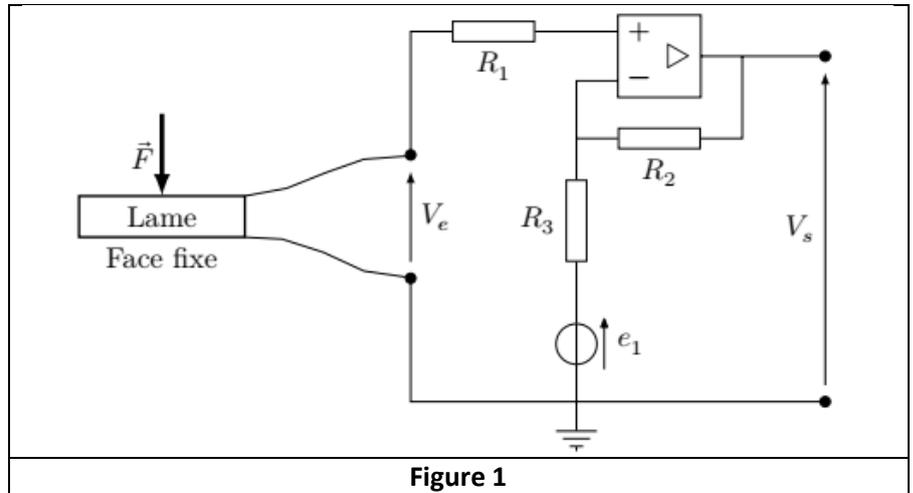


Figure 1

**Q48.** Rappeler les hypothèses du modèle de l'ALI. En particulier, que valent les courants entrant dans les entrées inverseuse et non-inverseuse de l'ALI ?

**Q49.** Tracer la caractéristique de l'ALI, soit sa tension de sortie en fonction de son entrée différentielle. Comment est-elle modifiée si on fait l'hypothèse d'un ALI idéal ?

**Q50.** On suppose maintenant l'ALI idéal et fonctionnant en régime linéaire. Montrer que la tension  $V_e$  s'exprime sous la forme suivante :

$$V_e = \frac{R_2}{R_2 + R_3} e_1 + \frac{R_3}{R_2 + R_3} V_s$$

**Q51.** On donne :  $R_1 = 10k\Omega$ ,  $R_2 = 4,0k\Omega$ ,  $R_3 = 1,0k\Omega$  et  $e_1 = 100mV$ . On mesure  $V_s = 5V$ . En déduire  $V_e$ . Quel est l'intérêt de ce montage ? Y a-t-il des limitations ?

**Q52.** Sachant que  $C = 8,0 \cdot 10^{-13}F$  et que  $K = 1,0 \cdot 10^{-12}C \cdot N^{-1}$ , déterminer l'intensité de la force  $\vec{F}$  s'exerçant sur la lame.

**Q53.** La tension de claquage de l'air est  $V_{cla} \approx 4 \cdot 10^3 kV$  pour 1m. L'étincelle produite par un allume-gaz fait environ 1 cm. Quelle est alors la tension  $V_e$  aux bornes du matériau piézoélectrique ? En supposant que le matériau est le même que celui étudié précédemment, quel devrait être alors l'ordre de grandeur de la force à appliquer pour l'obtenir ? Commenter.

### 2.2.2 Mesure de la fréquence d'une force excitatrice sinusoïdale s'exerçant sur une lame

Intéressé par l'étude de cette lame piézoélectrique, M. Dubois cherche maintenant à voir si en appliquant une force excitatrice sinusoïdale sur la lame, il peut remonter à sa fréquence. Pour cela, il utilise le montage de la Figure 2.

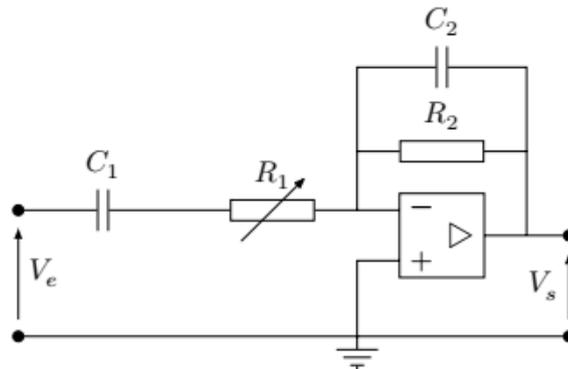


Figure 2

**Q54.** Déterminer l'expression de la fonction de transfert du filtre de la figure 2 et la mettre sous la forme :

$$\underline{H}(j\omega) = - \frac{A}{1 + j \left( \frac{\omega}{\omega_1} - \frac{\omega_2}{\omega} \right)}$$

En précisant les expressions de  $A$ ,  $\omega_1$  et  $\omega_2$  en fonction de  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $C_1$  et  $C_2$ .

**Q55.** Indiquer quelle est la nature de ce filtre.

**Q56.** Montre que le gain passe par un maximum pour une pulsation  $\omega$  que l'on exprimera en fonction de  $\omega_1$  et  $\omega_2$ .

On ajuste à présent la résistance  $R_1$  de manière à ce que les signaux d'entrée et de sortie soient en opposition de phase.

**Q57.** Comment peut-on vérifier expérimentalement que les deux signaux sont en opposition de phase ? Indiquer quel matériel peut être utilisé pour cette opération et comment le relier au montage.

**Q58.** Déterminer la fréquence de la contrainte s'exerçant sur la lame. Calculer sa valeur numérique sachant que  $R_2 = 1,0 \cdot 10^2 k\Omega$ ,  $C_1 = 50 nF$ ,  $C_2 = 5,0 nF$  et qu'il a fallu régler  $R_1$  à  $10 k\Omega$  de manière à ce que les deux signaux soient en opposition de phase.

