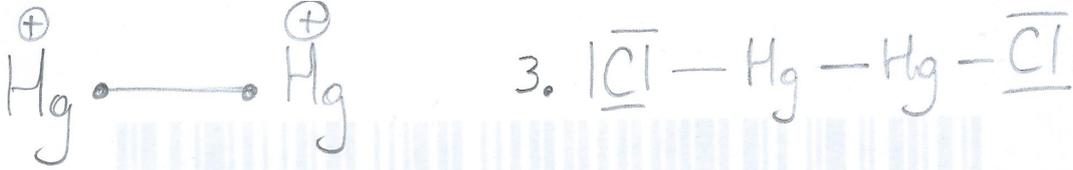


PROBLEME 1 : cinétique chimique (d'après Agro/veto 2009)

1. Le mercure appartient au groupe des métaux de transition. Sa particularité physique est que c'est le seul métal liquide à température et pression ambiantes.

2. On peut envisager 2 cations, en perdant 1 ou 2 électrons de valence :  $Hg^+$  et  $Hg^{2+}$ . Avec une formule de Lewis, on peut justifier l'existence de  $Hg_2^{2+}$  :



4. L'intérêt de travailler avec les proportions stoechiométriques est qu'à tout instant  $[Fe^{2+}] = [Hg^{2+}]$  ainsi on aura accès à l'ordre global grâce à la loi de vitesse

$$v = k[Fe^{2+}]^\alpha [Hg^{2+}]^\beta = k[Hg^{2+}]^{\alpha+\beta}$$

L'intérêt de travailler en excès de  $Fe^{2+}$  est d'avoir une dégénérescence d'ordre grâce  $[Fe^{2+}] \simeq [Fe^{2+}]_0 = \text{cste}$  et ainsi accéder à l'ordre partiel de  $Hg$

$$v = k[Fe^{2+}]_0^\alpha [Hg^{2+}]^\beta = k_{app}[Hg^{2+}]^\beta$$

où  $k_{app} = k[Fe^{2+}]_0^\alpha$

5. Si l'ordre global est 2 *i.e.*  $\alpha + \beta = 2$ , on a

$$v = -\frac{d[Hg^{2+}]}{dt} = k[Fe^{2+}]^\alpha [Hg^{2+}]^\beta = k[Hg^{2+}]^2 \Rightarrow \frac{1}{[Hg^{2+}]} - \frac{1}{[Hg^{2+}]_0} = -kt$$

$t$	0	1	2	3	$\infty$
$\frac{[Hg^{2+}]_0}{[Hg^{2+}]}$	1	2	3	4	$\infty$

Dans l'expérience 1, il suffit donc de tracer  $1/[Hg^{2+}]$  en fonction de  $t$ , on constate alors qu'on a bien une droite ce qui valide l'ordre global 2

6. Dans l'expérience 2, il y a dégénérescence d'ordre. Si l'ordre partiel est  $\beta = 1$ , on a

$$v = -\frac{d[Hg^{2+}]}{dt} = k_{app}[Hg^{2+}] \Rightarrow [Hg^{2+}] = [Hg^{2+}]_0 \exp(-k_{app}t) \Rightarrow \ln\left(\frac{[Hg^{2+}]}{[Hg^{2+}]_0}\right) = -k_{app}t$$

$t$	0	1	2	4	$\infty$
$\ln\left(\frac{[Hg^{2+}]}{[Hg^{2+}]_0}\right)$	0	-0,4	-0,8	-1,6	$-\infty$

Il suffit donc de tracer  $\ln\left(\frac{[Hg^{2+}]}{[Hg^{2+}]_0}\right)$  en fonction de  $t$  pour obtenir une droite et valider l'ordre partiel  $\beta = 1$ . L'ordre global étant 2, on a bien entendu  $\alpha = 1$

**PROBLEME 2 : récupération d'énergie en discothèque (E3A 2018)**

**A.1)**  $\vec{F}_r = -k(x - l_0)\vec{e}_x$

**A.2)** A l'équilibre, on a

$$\sum \vec{F} = \vec{0} \Rightarrow \text{projeté sur } \vec{e}_x \quad -k(x - l_0) - mg = 0 \Rightarrow \boxed{x_{eq} = l_0 - \frac{mg}{k}}$$

**A.3)** Seule la masse est modifiée  $\boxed{x'_{eq} = l_0 - \frac{(m+M)g}{k}}$  et  $\boxed{\delta = \frac{Mg}{k}}$ .

**A.4)** En prenant  $M \simeq 80$  kg (masse par personne dans un ascenseur), on veut  $\delta \simeq 4$  mm (pour faire un compte rond) d'où  $\boxed{k = \frac{Mg}{\delta} \simeq 2.10^5 \text{ N.m}^{-1}}$

**A.5)** Le PFD projeté sur  $\vec{e}_x$  s'écrit (je respecte l'énoncé mais ça me chagrine de ne pas prendre en compte le poids du danseur!)

$$m\ddot{x} = -mg - k(x - l_0) - \alpha\dot{x} - D\dot{x} + F \Rightarrow \ddot{x} + \frac{\alpha + D}{m}\dot{x} + \frac{k}{m}\underbrace{\left(x - \left(l_0 - \frac{mg}{k}\right)\right)}_{=x_{eq}} = \frac{F}{m}$$

Bien entendu,  $x_{eq}$  étant constant on a  $\dot{X} = \dot{x}$  d'où la formule proposée avec  $a_0 = \omega_0^2 = \frac{k}{m}$  et  $b_0 = \frac{F}{m}$ .

**A.6)** Cela correspond bien entendu à un système linéaire (équation contenant seulement des dérivées) et il est stable (puisque pour ce système d'ordre 2 les coefficients sont tous de même signe).

**B.1)**  $Z_R = R$  et  $Z_L = jL\omega$ .

**B.2)** La fréquence pour une danse doit être de quelques Hz... 2-3 Hz pour la marche et une dizaine de Hz pour une danse un peu plus rapide ... soit  $\omega = 2\pi f \simeq 60 \text{ rad.s}^{-1}$ .

**B.3)**  $\boxed{|Z_L| = L\omega \simeq 0, 1 \Omega \ll R}$ . Donc il est raisonnable de négliger la bobine.

**B.4)** Par un pont diviseur de tension  $\boxed{v = \frac{R_L}{R + R_L}u}$

**B.5)**

$$P_L = \frac{v^2}{R_L} = \frac{R_L}{(R + R_L)^2}u^2 = \frac{R_L}{(R + R_L)^2}(K_t\gamma\dot{x})^2$$

donc  $\boxed{A = \frac{R_L}{(R + R_L)^2}}$ .

**B.6)** Il suffit de calculer le courant  $i = \frac{u}{R + R_L}$  et on peut alors en déduire

$$P_u = ui = \frac{u^2}{R + R_L} = (K_t \gamma \dot{x})^2 \frac{1}{R + R_L}$$

et

$$P_p = \frac{P_u}{\eta} = \frac{(K_t \gamma \dot{x})^2}{\eta} \frac{1}{R + R_L}$$

**B.7)** La puissance  $P_p$  est la puissance prélevée à la dalle qui est donc perdue par la dalle. Elle se traduit donc par une force non conservative donc la puissance serait  $P_{dis} = F v = F_v \dot{x} = -P_p$  d'où ...  $F_{dis} = -\frac{(K_t \gamma)^2}{\eta} \frac{1}{R + R_L} \dot{x}$ . On trouve bien la force proposée...

**B.8)** AN :  $\alpha = \frac{(K_t \gamma)^2}{\eta} \frac{1}{R + R_L} \dot{x} \simeq 3.10^4 \text{ N.s.m}^{-1} \gg D$ . Donc il est raisonnable de négliger l'atténuation due au frottement mécanique (c'est l'absorption d'énergie par la diode qui domine).

**D.1)**  $\omega_0$  est la pulsation propre en  $\text{rad.s}^{-1}$  et  $Q$  est le facteur de qualité sans dimension.

**D.2)**  $X_p = \frac{F_0}{k}$

**D.3)** Il s'agit d'un régime apériodique (deux exponentielles décroissantes). On a  $X(0) = 0$  (on part de l'équilibre) et

$$\dot{X} = \frac{F_0}{k(1 - Q^2)} \omega_0 (Q e^{-\omega_0 Q t} - e^{-\omega_0 t / Q})$$

On a donc bien  $\dot{X}(0) = 0$  (dalle immobile)...

**D.4)** On a

$$\dot{x} = \dot{X} = \frac{F_0}{k(1 - Q^2)} \omega_0 Q (e^{-\omega_0 Q t} - e^{-\omega_0 t / Q})$$

**D.5)** Il suffit de remplacer  $\dot{x}$  dans la formule donnant  $P_L$  pour trouver

$$P_L = \frac{R_L}{(R + R_L)^2} (K_t \gamma \dot{x})^2 = \frac{R_L}{(R + R_L)^2} (K_t \gamma)^2 \left( \frac{F_0}{k(1 - Q^2)} \omega_0 Q \right)^2 (e^{-\omega_0 Q t} - e^{-\omega_0 t / Q})^2$$

On trouve bien la forme proposée.

**D.6)** AN  $Q = \frac{\sqrt{km}}{\alpha} = 7,6.10^{-2} \ll 1$  donc  $\omega_0 t / Q \gg \omega_0 t Q$  donc c'est la seconde exponentielle qui décroît le plus vite et il ne reste donc très rapidement que la première soit

$$P_L \simeq K \exp(-2\omega_0 t)$$

Le temps caractéristique de décroissance est donc  $\tau = \frac{1}{2\omega_0 Q}$ . On a  $\omega_0 \simeq 65 \text{ rad.s}^{-1}$  et  $\tau \simeq 0,1 \text{ s}$ .

**D.7)** La courbe en pointillé correspond à des décroissances en quelques 0,1 secondes ce qui est caractéristique de  $P_L$  donc celle en trait plein est la force. A noter qu'il y a deux "pics" de puissance car la dalle descend sous l'effet de la forme puis revient à l'équilibre, le retour génère alors aussi de l'énergie.

Il y a 3 "pics"

- premier pic  $F_0 \simeq 1600 \text{ N}$  et  $P_L = 50 \text{ W}$  (au max)
- second pic  $F_0 \simeq 800 \text{ N}$  et  $P_L = 15 \text{ W}$  (au max)
- troisième pic  $F_0 \simeq 400 \text{ N}$  et  $P_L = 5 \text{ W}$  (au max)

**D.8)** voir ma remarque précédente. La dalle retourne à l'équilibre et donc se déplace donc génère de l'énergie (on récupère une partie de l'énergie stockée dans le ressort). La puissance tend vers 0 en quelques 0,1 secondes donc très rapidement par rapport au temps mécanique.

**D.9)** On a prévu une dépendance en  $F_0^2$ . Donc si on divise  $F_0$  par deux on devrait diviser par 4  $P_L$  on est dans les bons ordres de grandeurs (aux erreurs de lecture près).

**D.10)** Le premier retour semble plus rapide que les autres ce qui semble montrer que le temps caractéristique diminue avec  $F_0$  ce que l'on a pas prévu. On est toutefois dans les bons ordres de grandeurs 0,1s à 0,2s pour le premier pic et 0,4s pour le dernier mais on est proches des  $3\tau$ ...

**E.1)**  $F_0$  correspond à la valeur moyenne soit  $F_0 \simeq 1000 \text{ N}$ .  
et  $F_1$  est l'amplitude de la sinusoïde  $F_1 \simeq 800 \text{ N}$ .  
La période vaut  $T \simeq 0,35 \text{ s}$  soit  $\omega = \frac{2\pi}{T} \simeq 20 \text{ rad.s}^{-1}$ .

**E.2)** On passe en complexe pour trouver

$$\underline{H} = \frac{\underline{X}}{\underline{F}} = \frac{1/k}{1 + \frac{jx}{Q} - x^2}$$

avec  $x = \omega/\omega_0$ .

On trouve alors l'amplitude d'oscillation (que j'aurais noté  $X_1$  mais bon ...)

$$X_0 = |\underline{X}| = |\underline{H}|F_1 = \frac{F_1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-x^2)^2 + x^2/Q^2}} = \frac{F_1}{m\omega^2} \frac{1}{\sqrt{(1-(\omega/\omega_0)^2)^2 + (\omega/\omega_0)^2/Q^2}}$$

**E.3)** On a  $v = \dot{x}$  soit en complexe  $\underline{V} = j\omega \underline{X}$  d'où en module  $V_0 = X_0\omega$ .

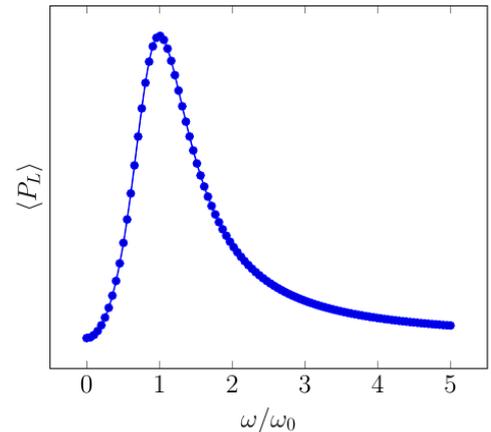
**E.4)** Le comportement asymptotique donne

$$\text{à basse fréquence } \langle P_L \rangle \propto (\omega/\omega_0)^2$$

$$\text{à haute fréquence } \langle P_L \rangle \propto (\omega_0/\omega)^2$$

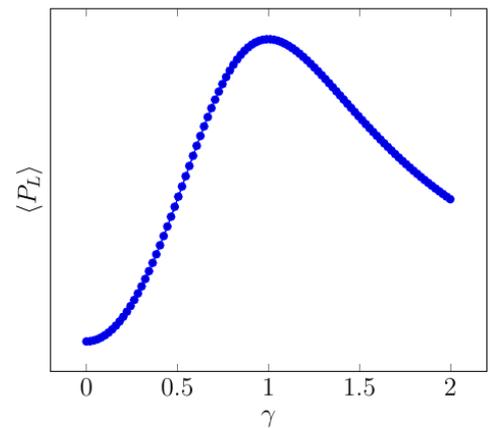
La puissance est maximale quand le dénominateur est minimal (puisque le numérateur est constant). Or c'est la somme de deux carrés dont un constant donc le dénominateur est minimal lorsqu'on annule le second terme soit  $\omega_{max} = \omega_0$ .

La puissance est donc une courbe en cloche ...

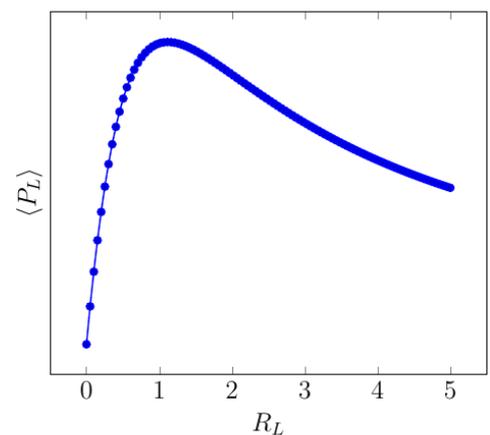


**E.5)** C'est l'équipe la plus proche de  $f_0 = \frac{\omega_0}{2/\pi} \simeq 10,4 \text{ Hz}$  qui a gagné donc. C'est donc celle à 125 battements par minute soit  $f_2 \simeq 2 \text{ Hz}$ ...

**E.6)** On regarde le comportement asymptotique. Pour  $\gamma$  "grand", on trouve que  $P_L \propto 1/\gamma^2$  et pour  $\gamma$  "petit", on a  $P_L \propto \gamma^2$ . D'où l'allure ci-contre (j'avoue c'est plus facile avec un ordinateur ...)



**E.7)** On regarde maintenant le comportement asymptotique en  $R_L$ . Pour  $R_L$  "grand", on trouve que  $P_L \propto 1/R_L$  et pour  $R_L$  "petit", on a  $P_L \propto R_L$ . D'où l'allure ci-contre (j'avoue c'est plus facile avec un ordinateur ...)



**E.8)** L'allure en  $\gamma$  a l'air correct. Celle en  $R_L$  en revanche un peu moins... je ne vois pas la décroissance pour  $R_L$  grand mais peut être n'est-on jamais dans ce régime tout simplement ...

**E.9)** L'optimum semble être pour  $R_L \simeq 300 \Omega$  et  $\gamma \simeq 2.10^4 \text{ rad.m}^{-1}$  sur la courbe en 3D. Sinon il faut dériver par rapport aux deux paramètres mais je refuse!

**PROBLEME 3 : étude d'un réfrigérateur domestique (Banque PT 2019)****A - Modélisation d'une machine réfrigérante ditherme**

1 Un réfrigérateur a pour but de **refroidir le compartiment réfrigéré**. Ainsi, le fluide frigorigène doit prélever de l'énergie à la source froide ( $Q_f > 0$ ) et la rendre à la source chaude ( $Q_c > 0$ ), ce qui nécessite de lui fournir du travail ( $W > 0$ ).

2 L'efficacité d'un réfrigérateur est définie par

$$e_f = \frac{Q_f}{W}.$$

Raisonnons sur la totalité du fluide frigorigène contenu dans la machine, au cours d'un cycle complet. D'après le premier principe,

$$\Delta U \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} W + Q_f + Q_c \underset{\substack{\uparrow \\ \text{cycle}}}{=} 0.$$

Par ailleurs, le second principe donne

$$\Delta S \underset{\substack{\uparrow \\ \text{2nd P}}}{=} \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} + S_c \underset{\substack{\uparrow \\ \text{cycle}}}{=} 0 \quad \text{d'où} \quad \frac{Q_c}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} = -S_c \leq 0.$$

On en déduit

$$\begin{aligned} -\frac{W - Q_f}{T_c} + \frac{Q_f}{T_f} &\leq 0 \\ \left(\frac{1}{T_f} - \frac{1}{T_c}\right) Q_f &\leq \frac{W}{T_c} \\ \frac{T_c - T_f}{T_c T_f} Q_f &\leq \frac{W}{T_c} \\ \frac{Q_f}{W} &\leq \frac{T_f}{T_c - T_f} \end{aligned}$$

ce qui donne

$$e_f \leq \frac{T_f}{T_c - T_f} = e_f^{\max}.$$

**B - Étude d'un cycle réfrigérant à compression de vapeur**

3 Voir figure 1. Dans le condenseur, il y a refroidissement, liquéfaction et sous-refroidissement, ce qui est un processus dans lequel le fluide cède de l'énergie : le condenseur doit donc être au contact de la source chaude. Réciproquement, il y a évaporation et surchauffe dans l'évaporateur, ce qui est processus au cours duquel le fluide doit recevoir de l'énergie : ainsi, l'évaporateur doit être au contact de la source froide.

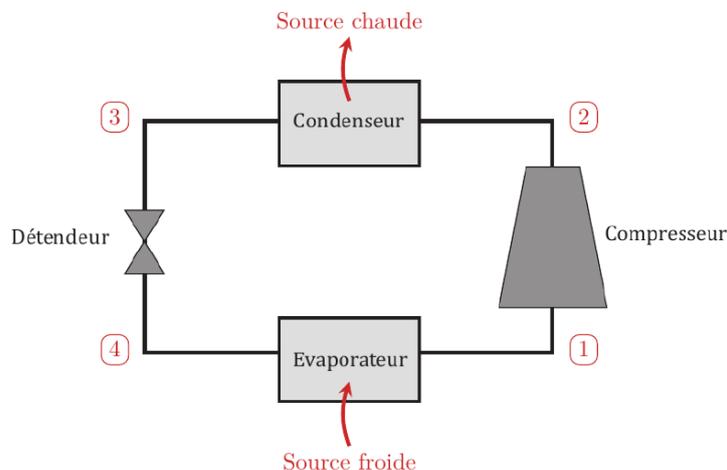


Figure 1 – Structure interne du réfrigérateur.

**Cycle avec compression réversible**

4 Voir figures 3 et 4, page 9.

5 Voir figure 2.

Point	1	2s	2	3	4	1'	2'
$P$ (bar)	2,9	10	10	10	2,9	1,3	10
$T$ (°C)	10	53	58	30	0	0	80
État du fluide	v.sèche	v.sèche	v.sèche	liq	diphasé	v.sèche	v.sèche
$h$ (kJ · kg <sup>-1</sup> )	407	432	440	242	242	402	465

Figure 2 – Paramètres d'état du fluide aux différents points du cycle.

6 L'évaporateur et le condenseur sont des échangeurs thermiques, dans lesquels les échanges énergétiques se font du plus chaud vers le plus froid. Ainsi, pour que le fluide reçoive de l'énergie dans l'évaporateur, au contact de la source froide, il faut que la température d'évaporation  $T_{\text{évap}}$  soit inférieure à  $T_f$  ; et réciproquement, pour que le fluide cède de l'énergie dans le condenseur, au contact de la source chaude, il faut que la température de condensation soit supérieure à  $T_c$ .

7 Supposer les échangeurs isobares signifie que les pertes de charge  $y$  sont négligées, le fluide est donc considéré comme un **fluide parfait**.

8 Un gaz parfait vérifie la loi de Joule,  $dh = c_P dT$ , ce qui implique que ses isothermes sont confondues avec ses isenthalpes, c'est-à-dire qu'elles sont **verticales** dans le diagramme des frigorigères. On constate que **ce n'est pas le cas** pour le R134a, qui ne peut donc pas être assimilé à un gaz parfait.

**Cycle avec compression non réversible**

9 D'après la définition du rendement isentropique,

$$h_2 - h_1 = \frac{h_{2s} - h_1}{\eta}.$$

Numériquement,

$$h_2 - h_1 = \frac{432 - 407}{0,75} = \frac{4}{3} \times 25 \quad \text{soit} \quad h_2 - h_1 = 33 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

ce qui donne  $h_2 = 440 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ . Le cycle est tracé en violet sur la figure 3, page 9.

10 Voir figure 2, page 2.

11 Voir figure 4, page 9.

12 Qualitativement, comme la compression est adiabatique alors le fluide n'échange pas d'entropie avec son environnement, si bien qu'il conserve toute l'entropie créée au cours de la compression. Pour une approche quantitative, appliquons le second principe industriel à la compression  $1 \rightarrow 2$ . Si elle est réversible, alors

$$s_{2s} - s_1 = \underbrace{s_{\text{éch},12s}}_{\text{adiab}} + \underbrace{s_{c,12s}}_{\text{réversible}} \quad \text{d'où} \quad s_{2s} = s_1.$$

Si elle est irréversible, alors

$$s_2 - s_1 = \underbrace{s_{\text{éch},12}}_{\text{adiab}} + s_{c,12} \quad \text{donc} \quad s_2 = s_1 + s_{c,12} = s_{2s} + s_{c,12} \quad \text{d'où} \quad s_2 > s_{2s}$$

car l'entropie créée est nécessairement positive.

**13** Le premier principe industriel, appliqué à un fluide en écoulement au travers d'un composant thermodynamique dont l'entrée est notée  $e$  et la sortie  $s$ , s'écrit

$$(h_s - h_e) + \left( \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} \right) + (gz_s - gz_e) = w_i + q \quad \text{ou} \quad D \left[ (h_s - h_e) + \left( \frac{v_s^2}{2} - \frac{v_e^2}{2} \right) + (gz_s - gz_e) \right] = \mathcal{P}_i + \mathcal{P}_{th}$$

- ▷  $D$  débit massique de fluide ;
- ▷  $h_{e/s}$  enthalpie massique du fluide en entrée/sortie du composant ;
- ▷  $v_{e/s}$  vitesse débitante de l'écoulement ;
- ▷  $z_{e/s}$  altitude de la section d'entrée/sortie du composant ;
- ▷  $w_i$  travail indiqué ( $\mathcal{P}_i$  puissance indiquée) algébriquement reçu par le fluide de la part des pièces mobiles du composant exprimé par unité de masse traversant ;
- ▷  $q$  transfert thermique ( $\mathcal{P}_{th}$  puissance thermique) algébriquement reçu par le fluide exprimé par unité de masse traversant.

Dans une telle question de récitation de résultat connu par cœur, la définition précise de toutes les notations utilisées est indispensable (je ne serais pas étonné qu'il n'y ait aucun point ou presque sur la formule elle-même).

**14** Un réfrigérateur domestique a une hauteur maximale  $H \sim 2$  m, ce qui correspond à un écart d'énergie potentielle de pesanteur massique de  $gH \sim 20 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 0,02 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , ce qui est effectivement négligeable devant les variations d'enthalpie massique au cours des étapes du cycle qui sont de l'ordre au moins de quelques dizaines de  $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , d'après le tableau figure 2, page 2.

**15** Si la vitesse est uniforme sur une section droite, alors

$$D_V = \iint \vec{V} \cdot d\vec{S} = V S,$$

d'où on déduit le débit massique  $D = \rho D_V$  ( $\rho$  masse volumique),

$$D = \frac{VS}{v}.$$

**16** Le volume massique d'un gaz est supérieur à celui d'un liquide, le volume massique maximal est donc atteint au point 1 ou au point 2. Si le gaz était parfait, on aurait d'après l'équation d'état appliqué à une masse  $m$  de gaz

$$P \frac{V}{m} = \frac{n}{m} RT \quad \text{soit} \quad P v = \frac{RT}{M} \quad \text{et} \quad v = \frac{RT}{MP},$$

ce qui donnerait

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{T_2}{T_1} \times \frac{P_1}{P_2} = \frac{320}{283} \times \frac{3}{10} < 1$$

Même si le gaz n'est pas parfait, on peut néanmoins en conclure que **le volume massique est très probablement maximal au point 1.**

**17** D'après les deux questions précédentes,

$$V^{\max} = \frac{D v^{\max}}{S} = \frac{1 \cdot 10^{-2} \times 7 \cdot 10^{-2}}{(1 \cdot 10^{-2})^2} \quad \text{soit} \quad V^{\max} = 7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

**18** Si le fluide passait d'une vitesse nulle (cas extrême!) à la vitesse  $V^{\max}$ , on aurait

$$\Delta e_c = \frac{(V^{\max})^2}{2} = 25 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} = 0,025 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1},$$

ce qui est de nouveau négligeable devant les variations typiques d'enthalpie massique au cours des différentes étapes du cycle.

**19** Il n'y a d'échange avec la source froide que dans l'évaporateur, au cours de l'étape 41. Comme un échangeur ne compte pas de pièce mobile, le premier principe industriel donne

$$h_1 - h_4 = w_{41} + q_f.$$

De même, le fluide ne reçoit du travail que dans le compresseur, au cours de l'étape 1-2. Comme celui-ci est adiabatique, le premier principe industriel donne

$$h_2 - h_1 = w_{\text{compr}} + q_{12}.$$

On en déduit

$$e_f = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{déf}}}{\frac{q_f}{w_{\text{compr}}}} = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}.$$

**20** Numériquement, avec les données reportées dans le tableau figure 2 page 2,

$$e_f = \frac{407 - 242}{440 - 407} = \frac{165}{33} \quad \text{d'où} \quad e_f \simeq 5.$$

**21** En identifiant les deux écritures du premier principe industriel,

$$\mathcal{P}_{\text{th}}^f = D(h_1 - h_4) = 1,65 \text{ kW} \quad \text{et} \quad \mathcal{P} = D(h_2 - h_1) = 0,33 \text{ kW}.$$

**22** Un compresseur ne peut aspirer que de la **vapeur sèche**, sous peine d'être endommagé. La surchauffe permet de garantir qu'il n'y a plus du tout de liquide dans l'état 1, y compris en cas de petite perturbation du cycle.

*La surchauffe permet également d'augmenter  $q_f$ , mais comme elle augmente également  $w_{\text{compr}}$ , le gain sur l'efficacité est minime en pratique.*

**23** Le sous-refroidissement a pour effet de décaler le point 3, et donc le point 4, vers la gauche du diagramme des frigoristes, ce qui permet d'augmenter la longueur 41, ce qui signifie une augmentation de  $q_f$  tout en laissant  $w_{\text{compr}}$  inchangé. Le sous-refroidissement permet donc d'**augmenter l'efficacité**. Le sous-refroidissement n'est pas poursuivi jusqu'à 20 °C pour des questions de longueur de conduite : pour une température de sortie plus basse, il doit y avoir plus d'échange énergétique au sein du condenseur, et donc celui-ci doit être plus long.

## C - Association réfrigérateur-congélateur

**24** Voir figure 3, page 9. La position des points 4' et 4'' est donnée par l'égalité des puissances. Le premier principe industriel appliqué à l'évaporateur se situant dans le réfrigérateur donne

$$D(h_{4'} - h_4) = \mathcal{P}_{\text{th,frigo}} + \mathcal{P}_{1,44'}.$$

car un évaporateur ne compte pas de pièce mobile. De même, pour le congélateur,

$$D(h_{1'} - h_{4''}) = \mathcal{P}_{\text{th,congel}} + \mathcal{P}_{1',4''}.$$

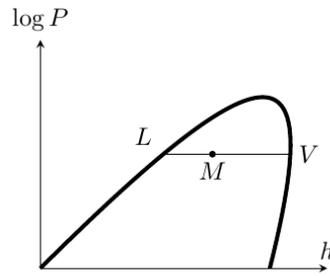
Comme on impose  $\mathcal{P}_{\text{th,congel}} = \mathcal{P}_{\text{th,frigo}}$ , et comme la détente 4'4'' est isenthalpique ( $h_{4'} = h_{4''}$ ), on en déduit

$$h_{4'} - h_4 = h_{1'} - h_{4'} \quad \text{soit} \quad h_{4'} = \frac{h_{1'} + h_4}{2} = \frac{402 + 242}{2} = 322 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

**25** Voir figure 3, page 9.

**26** Avec les notations de la figure ci-dessous, le titre en vapeur  $x$  est donné par le rapport des longueurs mesurées le long d'une isobare

$$x = \frac{LM}{LV}.$$



Ainsi, en raisonnant le long d'une isobare, plus le point est proportionnellement proche de la courbe de rosée, plus le titre en vapeur  $y$  est élevé. On constate sur la figure 3 que le point 4'' est plus proche de la courbe de rosée que le point 4'. On en déduit que le mélange diphasé comporte davantage de vapeur au point 4'' qu'au point 4'.

**27** Il faut cette fois considérer les deux échanges avec les deux sources froides. Par adaptation directe des questions précédentes,

$$e'_f = \frac{(h_{4'} - h_4) + (h_{1'} - h_{4'})}{h_{2'} - h_{1'}} = \frac{h_{1'} - h_4}{h_{2'} - h_{1'}} = \frac{402 - 242}{462 - 402} = \frac{160}{60}$$

soit finalement

$$e'_f = 2,7.$$

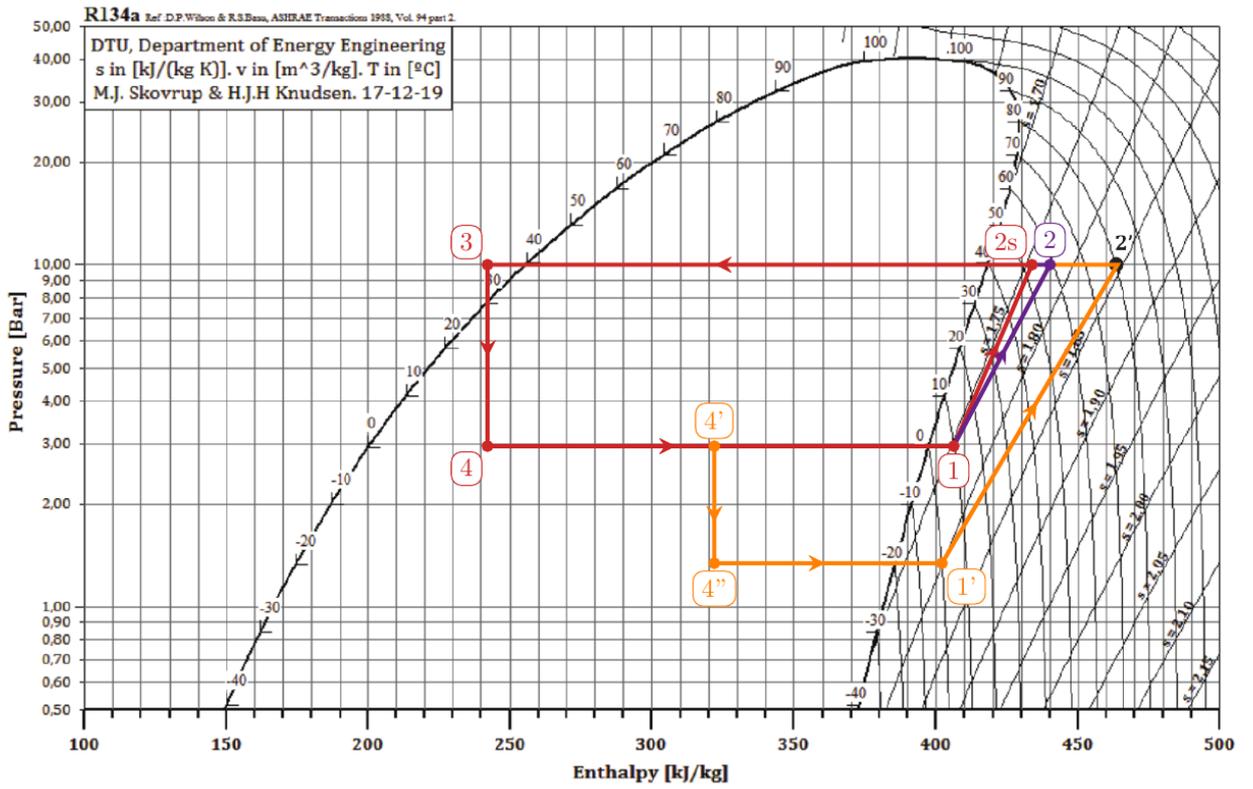


Figure 3 – Diagramme des frigoristes du R134a. Rouge : cycle avec compression réversible (Q4). Violet : cycle avec compression irréversible (Q9). Orange : cycle avec congélateur (Q25).

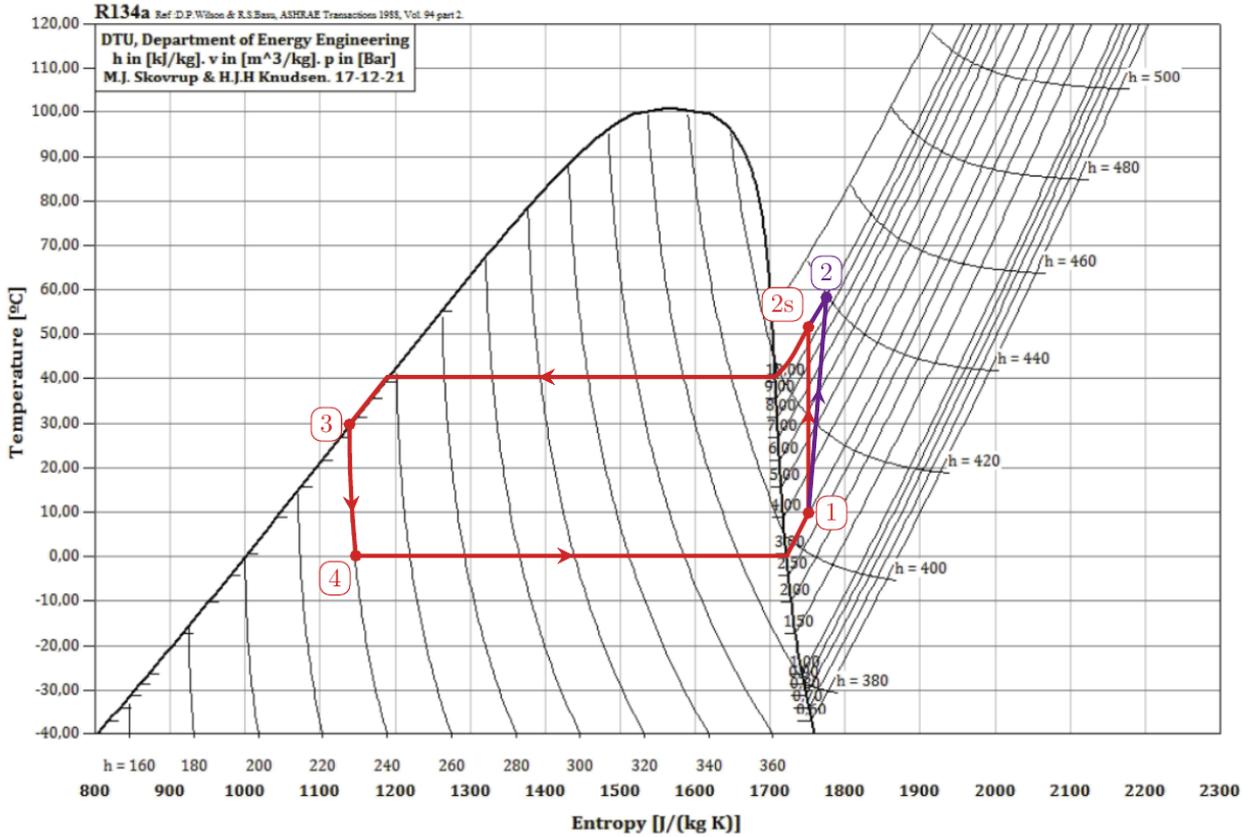


Figure 4 – Diagramme entropique du R134a. Rouge : cycle avec compression réversible (Q4). Violet : cycle avec compression irréversible (Q9).