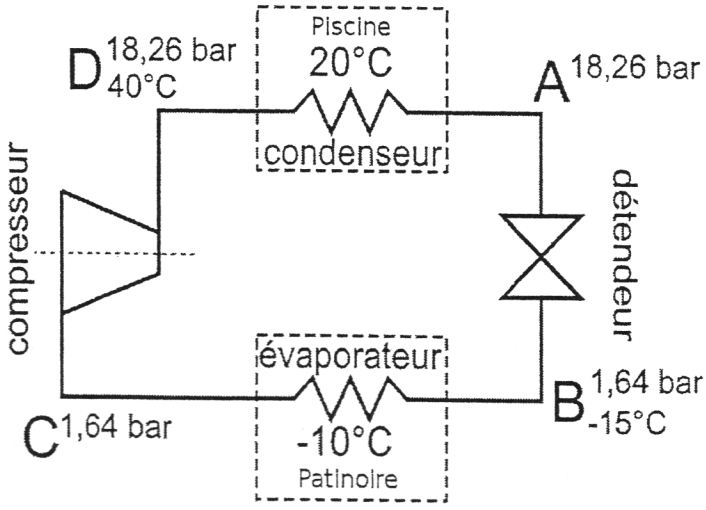
Problème de thermodynamique : Complexe sportif patinoire-piscine 102pts

On étudie une machine thermique fonctionnant entre deux sources de chaleur avec comme source froide l'eau d'une patinoire et comme source chaude l'eau d'une piscine. Le système contient une quantité donnée de fluide, le R134a. Le circuit est fermé et subit une série de transformations cycliques :



• Le fluide qui sort du condenseur sous forme liquide saturant (A) à la pression de 18, 26 bar est ramené à la pression de 1, 64 bar dans le détendeur (B). La détente (AB) est du type de Joule-Kelvin.

• Dans l'évaporateur, le fluide se vaporise partiellement à pression et température constante en recevant un transfert thermique de la source froide de température T_f = 263 K (transformation BC).

• Le fluide subit ensuite une compression dans un compresseur calorifugé. La compression (CD) est isentropique de 1, 64 bar jusqu'à la pression de 18, 26 bar.

• Dans le condenseur, le fluide se condense totalement en fournissant la chaleur à l'extérieur. L'eau est à environ à 293 K. La pression saturante est alors de 18, 26 bar et la température du fluide est T_A = 313 K.

On suppose que les conduites reliant les différents éléments sont calorifugées et que la pression qui y règne est constante. On négligera toutes les variations de vitesse du fluide et on raisonnera sur 1kg du fluide.

Données pour l'équilibre liquide-vapeur :

		LIQUIDE		VAPEUR	
P (bar)	T (K)	h_L $(kJ.kg^{-1})$	s_L $(J.kg^{-1}K^{-1})$	h_V $(kJ.kg^{-1})$	s_V $(J.kg^{-1}K^{-1})$
$P_1 = 1,64$	$T_1 = 258$	$h_{1L} = 178,2$	$s_{1L} =$	$h_{1V} = 360,4$	$s_{1V} = 730$
$P_2 = 18,26$	$T_2 = 313$	$h_{2L} = 264,1$	$s_{2L} =$	$h_{2V} = 387,7$	$s_{2V} = 680$

A- Préliminaires

A.1 Tracer l'allure du diagramme de Clapeyron (pression en ordonnée et volume massique en abscisse) pour un changement d'état en faisant apparaître les deux isothermes T_1 = 258 K et T_2 = 313 K ainsi que les pressions correspondantes P_1 et P_2 . 4

A.2 Déterminer l'enthalpie massique de vaporisation L_1 à la température T_1 = 258 K et l'enthalpie massique de liquéfaction L_2 à la température T_2 = 313 K. 2 2

A.3 Préciser la relation entre les enthalpies et entropies massiques lors d'un changement d'état. En déduire les entropies massiques du liquide à la température T_1 et à la température T_2 (valeurs manquantes du tableau ci-dessus). 3 3

A.4 Montrer, en définissant soigneusement le système choisi, que la variation d'enthalpie massique h du fluide, à la traversée d'un système, est donnée en régime stationnaire par $\Delta h = w^* + q$ où w^* représente le travail massique autre que celui des forces pressantes reçu par le fluide de la part des parties mobiles du système et q représente le transfert thermique massique reçu par le fluide. 10

A.5 Montrer que l'expression de l'enthalpie massique $h(x,T)$ d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'enthalpie massique de la phase liquide $h_L(T)$, de l'enthalpie massique de la phase vapeur $h_V(T)$ ainsi que du titre massique en vapeur x s'écrit : $h(x,T) = h_L(T) + x(h_V(T) - h_L(T))$. 4

2 **A.6** Établir l'expression de l'entropie massique $s(x,T)$ d'un fluide diphasé (liquide, vapeur) en fonction de l'entropie massique de la phase liquide en équilibre avec la vapeur $s_L(T)$, de l'entropie massique de la phase vapeur en équilibre avec le liquide $s_V(T)$ ainsi que du titre massique en vapeur x.

B- Étude du compresseur

Le fluide subit dans le compresseur une compression adiabatique et réversible.

6 **B.1** À la sortie du compresseur, le fluide est une vapeur saturante à la température $T_2 = 313$ K. En déduire le titre massique en vapeur $x(C)$ au début de la compression à la température $T_1 = 258$ K.

1 3 **B.2** Préciser l'expression et la valeur de l'enthalpie massique au début et à la fin de la compression.

2 **B.3** En utilisant le résultat de la question A.4, calculer littéralement puis numériquement le travail w^* fourni par le compresseur.

C- Étude du condenseur

Dans le condenseur, le fluide est totalement liquéfié à la température $T_2 = 313$ K et à la pression $P_2 = 18,26$ bar.

3 **C.1** Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique massique q_{ch} reçu de la part de l'eau de la piscine, de température $T_{ch} = 293$ K. Justifier son signe.

3 3 3 **C.2** Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée lors de la condensation.

1

D- Étude du détendeur

Dans un détendeur parfaitement calorifugé et ne comportant pas de pièce mobile, le fluide subit une détente de Joule-Kelvin jusqu'à la pression P_1, détente au cours de laquelle une partie du fluide se vaporise.

2 **D.1** Justifier que la détente est isenthalpique.

4 **D.2** En déduire le titre massique en vapeur $x(B)$ à la fin de la détente à la température $T_1 = 258$ K.

5 **D.3** En déduire l'entropie créée dans le détendeur.

E- Étude de l'évaporateur

3 **E.1** Calculer littéralement et numériquement le transfert thermique massique q_{fr} reçu de la part de la patinoire, de température $T_{fr} = 263$ K. Justifier le signe de q_{fr}.

1

2 2 2 **E.2** Calculer littéralement puis numériquement la variation d'entropie, l'entropie échangée et l'entropie créée dans l'échangeur.

1

F- Bilan

4 **F.1** Tracer le cycle dans le diagramme de Clapeyron.

2 4 1 **F.2** Définir l'efficacité du système. Calculer numériquement cette efficacité.

6 2 **F.3** Établir l'expression de l'efficacité théorique maximale du système en fonction des températures T_{fr} et T_{ch}. Expliquer pourquoi cette efficacité n'est pas atteinte.

4 **F.4** Calculer l'entropie créée sur un cycle.

2 **F.5** Justifier le choix des valeurs $T_1 = 258$ K et $T_2 = 313$ K pour ce cycle.

PCSI

Interrogation

Le 14 mai

Changements d'état :

1) Chaleur latente et entropie de changement d'état d'un corps pur à la température T (expressions et démonstrations).

2) Une quantité d'eau vapeur de masse m sous la pression $P_0 = 5.10^{-3}$ bar à la température de 0,00°C est comprimée progressivement de manière isotherme jusqu'à une pression de 2 bar.
On donne la température du point triple : $T_T = 0{,}01°C$.
Décrire les phénomènes observés. Schématisez sur un diagramme (P, T) le chemin suivi par le système. Donnez l'allure de la courbe d'évolution de la pression en fonction du temps t pour cette transformation.

3) Exercice :

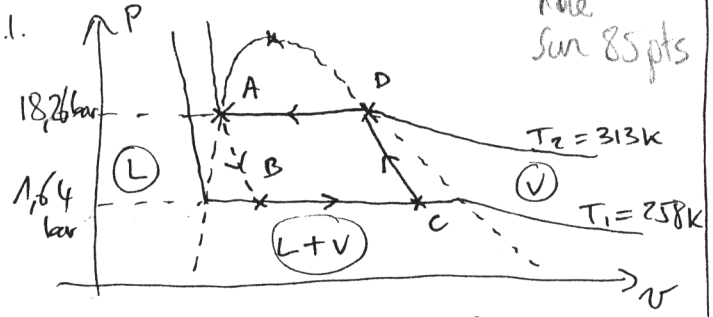
Détente isochore d'une vapeur d'eau saturante

Un récipient fermé et indéformable, de volume $V = 1{,}00$ litre, contient de la vapeur d'eau saturante dans l'état initial I ($T_I = 485$ K, $p_I = \Pi(T_I) = 20$ bars, $x_{VI} = 1$). On le met en contact avec un thermostat à température $T_0 = 373$ K. Déterminer l'état d'équilibre final F, le transfert thermique Q algébriquement reçu par l'eau, la variation d'entropie de l'eau, l'entropie échangée par l'eau et l'entropie créée au cours de l'évolution $I \rightarrow F$; commenter. On donne dans le tableau ci-dessous des extraits des tables thermodynamiques de l'eau.

		Liquide juste saturé $x_V = 0$			Vapeur saturante-sèche $x_V = 1$		
T	p	v_L	h_L	s_L	v_V	h_V	s_V
K	bar	$m^3.kg^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$	$kJ.K^{-1}.kg^{-1}$	$m^3.kg^{-1}$	$kJ.kg^{-1}$	$kJ.K^{-1}.kg^{-1}$
485	20	$1{,}18.10^{-3}$	909	2,45	0,0998	2 801	6,35
373	1	$1{,}04.10^{-3}$	418	1,30	1,70	2 676	7,36

Pb : Patinoire / Piscine 102 pts note sur 85 pts

A.1.



4

A.2. $L_1(258K) = h_{1V}(258K) - h_{1L}(258K)$

2 $\boxed{L_1 = h_{1V} - h_{1L} \overset{AN}{=} 182,2 \text{ kJ/kg}}$

2 $\boxed{L_2 = h_{2L} - h_{2V} \overset{AN}{=} -123,6 \text{ kJ/kg}}$

A.3. identité thermo : $du = Tds - Pdv$

$h = u + Pv \Rightarrow dh = Tds + v\,dP$

$\Rightarrow ds = \frac{dh}{T}$ sur un palier ($T = cste$) : $\Delta s = \int \frac{dh}{T}$

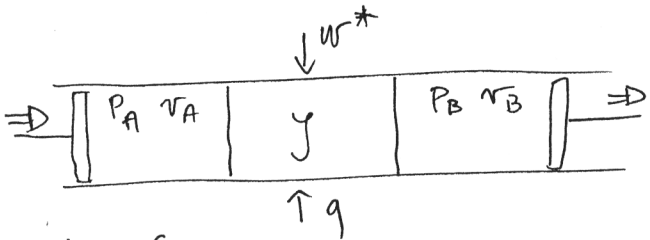
$\Rightarrow \Delta s = \frac{\Delta h}{T}$

3 $s_{1V} - s_{1L} = \frac{h_{1V} - h_{1L}}{T_1} \Rightarrow \boxed{s_{1L} = s_{1V} - \frac{L_1}{T_1} \overset{AN}{=} 23,8 \text{ J/kg/K}}$

idem : $\boxed{s_{2L} = s_{2V} + \frac{L_2}{T_2} = 285 \frac{J}{kg\,K}}$

3

A.4. (dem du type DJK)



$dU = \delta w + \delta Q$

$U = U_A + U_{\mathcal{S}} + U_B$

$dU = dU_A + dU_{\mathcal{S}} + dU_B = u_A dm_A + u_B dm_B$

rég. station. $\leftarrow 0$ $= dm_B(u_B - u_A)$

$dm_{tot} = 0 = dm_A + dm_B$

$dm_B(u_B - u_A) = -P_A dV_A - P_B dV_B + \delta W^* + \delta Q$

$dm_B(u_B + P_B v_B - u_A - P_A v_A)$

$= \delta W^* + \delta Q \Rightarrow h_B - h_A = w^* + q$

10 $\Rightarrow \boxed{\Delta h = w^* + q}$ $w^* = \frac{\delta W^*}{dm_B}$; $q = \frac{\delta Q}{dm_B}$

A.5 $\mathcal{S}$ $H = H_L + H_V$

$\mathcal{S}_L$ $\mathcal{S}_V$ $mh = m_L h_L + m_V h_V$

$h = \underbrace{\frac{m_L}{m}}_{x_L} h_L + \underbrace{\frac{m_V}{m}}_{x_V} h_V$

$1 = \underbrace{x_V}_{x} + x_L$

$\Rightarrow h = (1-x)h_L + x h_V$

4 $\Rightarrow \boxed{h(x,T) = h_L(T) + x(h_V(T) - h_L(T))}$

A.6 idem : $S = S_L + S_V$ (grandeur additive)

2 $\Rightarrow \boxed{s(x,T) = s_L(T) + x(s_V(T) - s_L(T))}$

B.1 TF adiabatique ($\delta Q = 0$) et réversible ($S_c = 0$) :

$dS = \delta S_e + \delta S_c$, $\delta S_e = \frac{\delta Q}{T_{ext}} = 0$

$\delta S_c = 0 \Rightarrow dS = 0 \Rightarrow S = cste$

$\Rightarrow$ TF isentropique : $\Delta s_{CD} = 0$

$s_D = s_C = s_{1L} + x_C(s_{1V} - s_{1L}) = s_{2V}$

6 $\Rightarrow \boxed{x(C) = \frac{(s_{2V} - s_{1L})}{(s_{1V} - s_{1L})} \overset{AN}{=} 93\,\%}$

B.2. Fin : $h_D = h_{2V} = 387,7 \text{ kJ/kg}$

début : $h_C = x_C(h_{1V} - h_{1L}) + h_{1L}$

3 AN : $\boxed{h_C \simeq 347,5 \text{ J/g}}$

B.3. $\Delta h = h_D - h_C = w^*_{comp} + 0$

2 $\Rightarrow \boxed{w^*_{comp} = 40,24 \text{ kJ/kg}}$

C.1 $P = cste \Rightarrow \boxed{q_{ch} = \Delta h = L_2 \quad q_{ch} = -123,6 \text{ kJ/kg}}$

3 Le fluide caloporteur donne de manière effective, de la chaleur à la piscine.

C.2 $\delta e = \frac{\delta Q}{T_{ext}} \Rightarrow \delta e_{DA} = \frac{q_{ch}}{T_{amb}} \overset{AN}{=} \frac{-123600}{293} = -422$ J/K/kg

3 $(\Delta s)_{DA} = \delta e_{DA} + \delta c_{DA}$

3 $(\Delta s)_{DA} = s_A - s_D = s_{2L} - s_{2V} = -395$ J/K/kg

$s_{c\,DA} = (\Delta s)_{DA} - \delta e_{DA} = 26,8 \text{ J/K} > 0$ irrév

1 D.1. $w^*_{det} = 0$, $q_{det} = 0 \Rightarrow (\Delta h)_{AB} = 0$

2 $h_A = h_B \Rightarrow$ détente isenthalpique.

4 D.2 $h_A = h_{2L} = h_B = h_{L1} + x(B)(h_{V1} - h_{L1})$

$\boxed{x(B) = \frac{h_{2L} - h_{1L}}{h_{V1} - h_{1L}} \overset{AN}{=} 47,1\,\%}$

$(s_c)_{AB} = (\Delta s)_{AB} - (s_e)_{AB}$ $\quad s_{e\,AB} = \int \frac{\delta Q}{T_{ext}} = 0$

D.3 $= s_B - s_A$

5 $= s_{1L} + x_B(s_{1V} - s_{1L}) - s_{2L}$

AN : $(s_c)_{AB} = 71,4 \text{ J/K/kg} > 0 \Rightarrow$ TF irrév.

E.1 $(\Delta h)_{BC} = \underbrace{w^*_{BC}}_{0} + q_{fr} = h_C - h_B$

$q_{fr} = \cancel{h_{1L}} + x_C(\underbrace{h_{1V} - h_{1L}}_{L_1}) - \cancel{h_{1L}} - x_B(h_{1V} - h_{1L})$

3 $q_{fr} = (\Delta x)_{BC} L_1 \overset{AN}{=} (0{,}929 - 0{,}471)(360{,}4 - 178{,}2)k$

1 $\boxed{q_{fr} = 83{,}4 \text{ kJ/kg}}$ > 0 chaleur extraite de la patinoire.

2 E.2. $(\Delta s)_{BC} = s_C - s_B = (\Delta x)_{BC}(s_{1V} - s_{1L}) = 323 \frac{J}{K \cdot kg}$

2 $(s_e)_{BC} = \int \frac{\delta Q}{T_{patin.}} = \frac{q_{Fr}}{T_{pat}} = \frac{83\,400}{263} = 317 \text{ J/(K.kg)}$

2 $(s_c)_{BC} = (\Delta s)_{BC} - (s_e)_{BC} \simeq 6 \text{ J/(K.kg)} > 0$ irrev

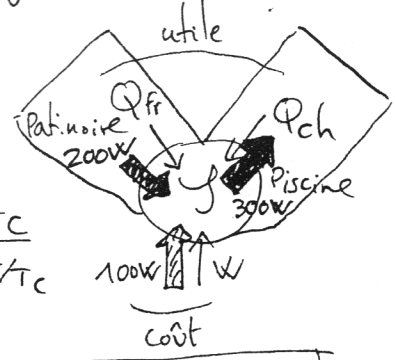
1

F.1 cf A.1 F.2. $e = \frac{\text{utile}}{\text{coût}} = \frac{|q_{ch}| + |q_{Fr}|}{w^*} = \frac{-q_{ch} + q_{fr}}{w^*}$

4

24,1

AN : $e = \frac{123{,}6 + 83{,}4}{40{,}24} \Rightarrow e \simeq 5{,}1$



6 F.3. $e = \frac{-Q_C + Q_F}{W} = \frac{-Q_C + Q_F}{-Q_C - Q_F} = \frac{-1 - T_F/T_C}{-1 + T_F/T_C}$

$\Delta U \overset{cycle}{=} 0 = W + Q_C + Q_F$

$\Delta S = 0$ $\frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} \overset{rév}{=} 0 \Rightarrow \frac{Q_F}{Q_C} = -\frac{T_F}{T_C} \Rightarrow \boxed{e_{max} = \frac{T_C + T_F}{T_C - T_F}}$

AN : $e_{max} = 10{,}38$

2 $e < e_{max}$ car le cycle n'est pas réversible

$\Rightarrow \frac{Q_F}{T_F} + \frac{Q_C}{T_C} = S_e = -S_c < 0$ ($S_c > 0$ si irrév)

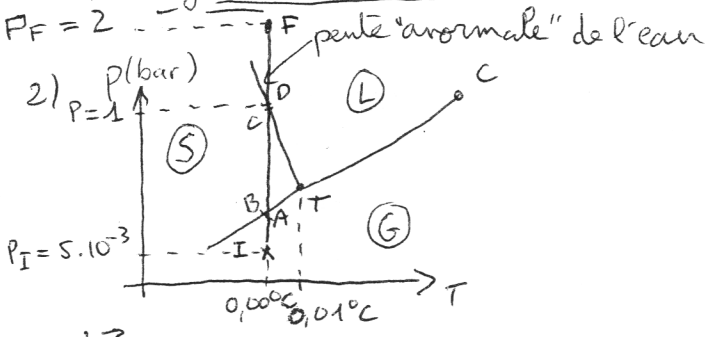
$e_{max} \simeq 18{,}5$ avec T_{Pisc} et T_{Pat} plus juste !

4 F.4. $s_{c\,cycle} = (s_c)_{AB} + (s_c)_{BC} + \overset{>0}{(s_c)_{CD}} + (s_c)_{DA} = 71{,}4 + 6 + 26{,}8 \simeq 104 \text{ J/(K.kg)}$ > 0

2 F.5 40° (313K) pour que le fluide caloporteur fournisse un transfert vers la source chaude, l'eau de la piscine à 20°C et se liquéfie (La source chaude est plus froide que le fluide. A l'inverse le fluide doit se vaporiser au contact avec la patinoire, à -10°C, d'où -15°C (258K), la patinoire est chaude pour le fluide qui lui extrait ainsi de la chaleur.

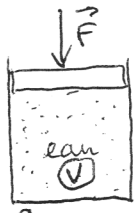
Interrogation - Correction

A- Changements d'état :



Nous savons que la pression de fusion de l'eau à 0,00°C est de 1 bar. A 2 bar l'eau est donc liquide.

I :



parois diatherme

I → A : compression isotherme de l'eau vapeur, le volume diminue

A : apparition du premier cristal de glace (condensation)

A → B : Système diphasé solide/gaz ⇒ T fixée ⇒ P fixée et le volume continue à diminuer.

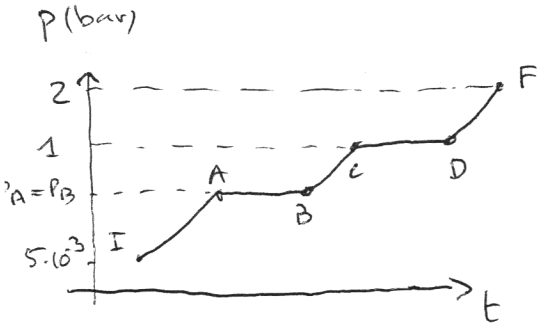
B → C : compression isotherme de la glace : solide ⇒ faible compressibilité ⇒ volume diminue peu.

C : apparition de la première goutte d'eau (fusion)

C → D : système diphasé, P et T fixées
V ↘

F :

D → F : compression isotherme de l'eau liquide.
V ↘



2 paliers : AB et CD (systèmes diphasés)

– Dans l'état final, l'eau doit être en équilibre thermique avec le thermostat ; on doit donc avoir $T_F = T_0$. L'examen d'un diagramme de Clapeyron de l'eau nous incite alors à supposer que dans l'état final, nous avons un système diphasé liquide-vapeur, dont nous notons x_{VF} le titre en vapeur. Dans ces conditions, le système est monovariant : la pression finale p_F est égale à la pression de vapeur saturante $\Pi(T_F)$= 1 bar.

– Le volume V occupé par l'eau est constant car le récipient est indéformable ; la masse m d'eau contenue dans le récipient est constante puisque le récipient est fermé ; donc le volume massique $v = \frac{V}{m}$ est constant.

Pour déterminer le titre en vapeur x_{VF}, traduisons donc la conservation du volume massique de l'eau. Dans l'état initial, les tables fournissent pour $x_{VI} = 1$, T_I= 485 K et $p_I = \Pi(T_I)$= 20 bars : v_I= 0,099 8 m^3.kg^{-1}. Dans l'état final diphasé, le volume massique v_F s'exprime en fonction des volumes massiques v_{VF}= 1,70 m^3.kg^{-1} de la vapeur et v_{LF}= 1,04.10^{-3} m^3.kg^{-1} du liquide :

$$v_F = x_{VF}\ v_{VF} + (1 - x_{VF})\ v_{LF}$$

Avec $v_F = v_I$, nous obtenons : :

$$x_{VF} = \frac{v_I - v_{LF}}{v_{VF} - v_{LF}} = 5,81.10^{-2}$$

Nous obtenons un titre en vapeur compris entre 0 et 1, ce qui valide a posteriori l'hypothèse du caractère diphasé du système dans l'état final.

– Pour calculer le transfert thermique Q, appliquons le premier principe à l'eau en remarquant que le travail W est nul car l'évolution est isochore :

$$U_F - U_I = W + Q = Q$$

Pour calculer l'énergie interne U de l'eau dans l'état initial et l'état final, il faut d'abord calculer la masse m d'eau. Avec un volume V= 1,00 litre, et un volume massique v_I= 0,0998 m^3.kg^{-1} dans l'état initial, nous obtenons :

$$m = \frac{V}{v_I} = 10,0 \text{ g}$$

Avec $H = U + pV$, nous obtenons :

$$U_I = H_I - p_I\ V = mh_I - p_I\ V = mh_{VI} - p_I\ V = 26,0 \text{ kJ}$$

De même dans l'état final :

$$\begin{aligned} U_F &= H_F - p_F\ V = mh_F - p_F\ V \\ &= m(x_{VF}\ h_{VF} + (1 - x_{VF})\ h_{LF}) - p_F\ V = 5,39 \text{ kJ} \end{aligned}$$

En définitive le transfert thermique reçu par l'eau vaut :

$$Q = U_F - U_I = -20,6 \text{ kJ}$$

Ce transfert thermique est négatif ; il s'effectue donc en réalité de l'eau vers le thermostat, ce qui n'est pas étonnant puisque la température initiale de l'eau est plus élevée que celle du thermostat.

– Nous en déduisons immédiatement l'entropie échangée par l'eau lors de l'évolution $I \rightarrow F$:

$$S_e = \frac{Q}{T_0} = -55,3 \text{ J.K}^{-1}$$

– Nous lisons l'entropie de l'eau dans l'état initial directement dans les tables et nous calculons l'entropie de l'eau dans l'état final à l'aide de ces tables :

$$S_I = ms_I = ms_{VI} = 63,5 \text{ J.K}^{-1}$$

$$S_F = ms_F = m(x_{VF}\ s_{VF} + (1 - x_{VF})\ s_{LF}) = 16,5 \text{ J.K}^{-1}$$

Nous obtenons ainsi la variation d'entropie :

$$S_F - S_I = -47,0 \text{ J.K}^{-1}$$

– Par soustraction,nous obtenons l'entropie créée :

$$S_c = S_F - S_I - S_e = +8,3 \text{ J.K}^{-1} > 0$$

L'entropie créée est strictement positive, en accord avec une irréversibilité de l'évolution. Ceci n'est pas étonnant car la température de l'eau est différente de la température de la source ; l'échange thermique est donc irréversible.

Moteur d'itherme : avec une pseudosource — fonctionnement réversible

E_I : source froide : eau(s) à 0°C (1bar)
source chaude : eau(l) à 100°C = $(T_c)_i$ (1bar)

E_F : source froide : eau(s) à 0°C (1bar)
source chaude : eau(l) $(T_c)_f$ (1bar)

Le moteur fonctionne entre de la glace et de l'eau bouillante.

1) Que vaut Q_F quand la glace a totalement fondue (fin de l'expérience) ?

2) $(T_c)_f$?

2) W, Q_c, r ?

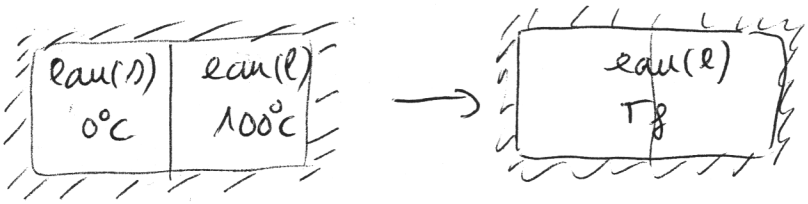
4) température finale T_f à l'égalisat° des température des sources ?

$C = 4{,}18$ kJ/kg/K

$L_f = 330$ kJ/kg

$m = 1$ kg pour chaque source

Sans moteur en mettant directement les sources en contact :

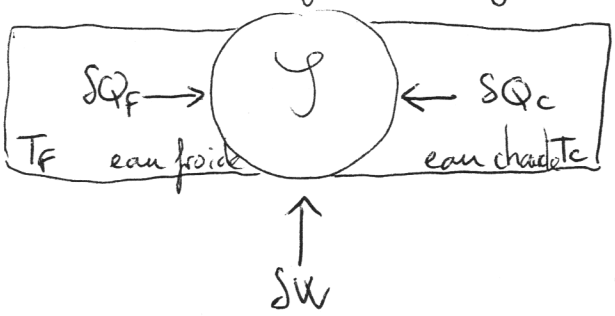


$$m L_f + m c (T_f - T_{0°C}) + (T_f - T_{100°C}) m c = 0$$

$$\Rightarrow 2T_f - T_{0°C} - T_{100°C} = -L_f / c$$

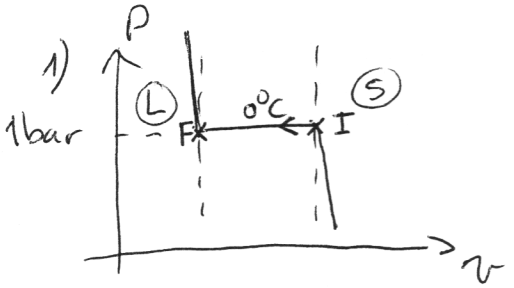
$$\Rightarrow T_f = \frac{1}{2}\left[T_{0°C} + T_{100°C} - L_f/c\right] \Rightarrow \underline{T_f \simeq 10{,}5°C}$$

Résolution : 1) Du début à la fin de la fusion de la glace, nous l'état diphasé sous d'où changement d'un corps pur pression constante sur un palier de d'état : $T_F = cste = 0°C$



La source chaude est une pseudo source : $T_C \neq cste$

1)



$$(\Delta H)_{IF} = \underset{\uparrow \text{ Seau chaude}}{Q} = m L_f = \underset{\uparrow \text{ Smoteur}}{-Q_F}$$

$$\Rightarrow \boxed{Q_F = -m L_f \overset{AN}{=} -330\,000 \text{ J}}$$

2) Sur un cycle les températures reste constantes :

$$dU = 0 = \delta W + \delta Q_F + \delta Q_C \; ; \quad \frac{\delta Q_C}{T_C} + \frac{\delta Q_F}{T_F} = 0 \text{ (car réversible)}$$

$$\Rightarrow \delta Q_F = -T_F \frac{\delta Q_C}{T_C}$$

$$\delta Q_C = -mc\,dT_C = -\delta Q_{\text{eau chaude}}$$

$$\Rightarrow Q_F = \int \delta Q_F = +T_F mc \int \frac{dT_C}{T_C}$$

$$\Rightarrow Q_F = T_F mc \ln\left(\frac{(T_C)_f}{(T_C)_i}\right)$$

$$\Rightarrow \ln\left(\frac{T_{Cf}}{T_{Ci}}\right) = -\frac{L_f}{cT_F} \Rightarrow \underline{(T_C)_f = (T_C)_i \exp(-L_f/cT_F)}$$

$$\overset{AN}{=} 373 \times \exp(-330/4{,}18 \times 273)$$

$$\Rightarrow \underline{(T_C)_f = 279{,}3\text{K} \simeq 6°C}$$

2) $\int \delta W = \int(-\delta Q_F) + \int(-\delta Q_C)$

$$\Rightarrow W = -Q_F + \int_{T_{Ci}}^{T_{Cf}} mc\,dT_C$$

$$\Rightarrow W = mL_f + mc(T_{Cf} - T_{Ci}) \Rightarrow \underline{W = m\left[L_f - c(T_C)_i\left(1 - e^{-\frac{L_f}{cT_F}}\right)\right]}$$

$$\underline{\text{AN } W = -61\,540 \text{ J}}$$

$$Q_C = -\int mc\,dT_C = mc(T_{Ci} - T_{Cf})$$

$$\boxed{Q_C \overset{AN}{=} 391\,540 \text{ J}}$$

$$\underline{r = \frac{-W}{Q_C} = 15{,}7\ \%}$$

4) à l'égalisation des température : $\underline{T_{finale} = \sqrt{(T_C)_f (T_F)_i} = 3°C}$