

# Retour sur les principes thermodynamiques

-  Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
-  Difficulté technique et calculatoire ;
-  Exercice important.



Flasher ce code pour accéder au corrigé

Ceinture		Proposition de parcours d'entraînement
	Ceinture blanche	Questions de cours + exercices 1 à 5 puis 6, 10 et 11
	Ceinture jaune	Questions de cours + exercices 1 à 5 puis 6, 7, 10 et 11
	Ceinture rouge	Questions de cours (★) + exercices 1 à 5 puis 7, 8, 11, 12 et 13
	Ceinture noire	Questions de cours (★) + exercices 1 à 5 puis 7, 8, 9, 11 à 14

## Questions et applications de cours

Seuls les étudiants du groupe PT\* seront interrogés en colle sur les questions marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

(★) **3.1** - Établir l'expression des capacités thermiques d'un gaz parfait en fonction de  $R$  et  $\gamma$ . La relation de Mayer devra être redémontrée.

**3.2** - Rappeler les lois de Laplace et leurs hypothèses d'application. En déduire le travail  $W$  reçu au cours d'une compression d'un volume  $V_I$  à un volume  $V_F$  telle que les lois de Laplace s'appliquent.

**3.3** - Un glaçon, de masse  $m_1$  et température  $T_1$ , est sorti du congélateur pour être mis dans un verre contenant une boisson au choix de l'étudiant, de masse  $m_2$  et température  $T_2$  (la boisson, pas l'étudiant). On suppose que le glaçon fond totalement et rapidement, ce qui permet de négliger les transferts thermiques avec l'air. Déterminer la température finale  $T_F$  du breuvage. Comment déterminer la masse minimale du glaçon pour qu'il ne fonde pas totalement ? Le résultat sera donné en fonction de l'enthalpie de fusion  $\Delta_{\text{fus}}h$  de l'eau et des capacités thermiques massiques  $c_{\text{sol}}$  et  $c_{\text{liq}}$ , supposées égales pour le glaçon et la boisson.

*Pour déterminer la masse minimale à partir de laquelle le glaçon ne fond pas complètement, il faut être conscient que le calcul ci-dessus repose sur l'hypothèse que l'état final est complètement liquide, ce qui impose au final d'avoir  $T_F > T_{\text{fus}}$ . Si jamais le calcul numérique donne  $T_F < T_{\text{fus}}$ , alors il y a contradiction entre l'hypothèse initiale et le résultat final : la vraie température finale ne sera pas le  $T_F$  calculé de cette façon. Cela signifie que l'hypothèse initiale est fautive et que le résultat final n'a pas de sens. La masse limite est donc celle qui donne  $T_F = T_{\text{fus}}$ .*

**3.4** - Le même étudiant qu'à la question précédente souhaite toujours refroidir la même boisson de masse  $m_2$  et température  $T_2$  en y ajoutant des glaçons de masse  $m_1$  et température  $T_1$ . Sauf que cette fois ... il en met trop, si bien qu'à l'état final il reste de la glace dans sa boisson. Déterminer la masse  $m_f$  de glace qui a fondu en fonction des mêmes paramètres qu'à la question précédente. On négligera toujours les transferts thermiques avec l'air. Comment déterminer la masse minimale du glaçon pour qu'il ne fonde pas totalement ?

*Cette fois, on sait que le mélange est diphasé à l'état final, ce qui nous donne sa température : la coexistence n'est possible que si  $T_F = T_{\text{fus}}$ . Le bilan d'enthalpie s'écrit comme à la question précédente, sauf que :*

- ▷ seule la masse  $m_f$  fond ;
- ▷ comme  $T_F = T_{\text{fus}}$ , la glace fondue ne change pas de température.

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H = \underbrace{0}_{1^{\text{er}} P} + \underbrace{0}_{\text{transf}} + \underbrace{m_2 c_{\text{liq}} (T_{\text{fus}} - T_2)}_{\text{boisson}} + \underbrace{m_1 c_{\text{sol}} (T_{\text{fus}} - T_1) + m_f \Delta_{\text{fus}} h}_{\text{glaçon}}$$

Il reste alors à isoler  $m_f$  dans cette équation.

Cette fois, l'hypothèse est que l'état final est une coexistence solide-liquide, qui permet de calculer la masse de glace fondue. Or la masse de glace fondue ne peut évidemment pas être supérieure à la masse initiale du glaçon : si jamais le calcul numérique donne  $m_f > m_1$ , alors le résultat final n'a pas de sens, ce qui indique que l'hypothèse initiale est fautive. La masse limite est donc celle qui donne  $m_f = m_1$ . On retrouve la même masse limite qu'à la question précédente, ce qui est logique.

**3.5** - Considérons une casserole contenant une masse  $m$  d'eau à la température  $T$ . La plaque de cuisson lui transmet une puissance thermique constante  $\mathcal{P}_0$ , et elle est refroidie par contact avec l'air. On note  $R_{\text{th}}$  la résistance thermique décrivant ce refroidissement. Établir l'équation différentielle vérifiée par la température  $T$  de l'eau dans la casserole.

(★) **3.6** - Considérons un gâteau (un moelleux au chocolat!) de capacité thermique  $C$ , sorti d'un four à la température  $T_{\text{four}}$  et laissé à refroidir dans la cuisine de température  $T_0$ . Procéder au bilan entropique de la transformation. Commenter le signe de l'entropie créée.

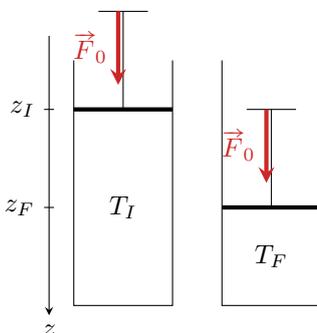
Donnée : inégalité de convexité du logarithme,  $\forall x > 0, \ln x \leq x - 1$  ; l'expression de l'entropie d'une phase condensée est à connaître par l'étudiant.

## Mise en pratique du cours

### Exercice 1 : Échauffement adiabatique d'un gaz par compression

💡 1 | ✂ 0 | Ⓞ

📈 ▷ Travail d'une force ;  
▷ Premier principe.



Le but de l'exercice est de modéliser l'expérience de compression brusque d'un gaz dont vous avez visionné la vidéo, afin d'estimer la température finale atteinte par le gaz. On considère que l'opérateur enfonce le piston sur une hauteur  $h = z_F - z_I = 30 \text{ cm}$  en exerçant une force  $F_0 = 800 \text{ N}$  constante<sup>1</sup>.

- 1 - Comment peut-on modéliser la transformation subie par le gaz ?
- 2 - Exprimer le travail  $W_0$  exercé par l'opérateur au cours de la compression.
- 3 - En déduire la température finale et l'estimer numériquement. On prendra pour l'air contenu dans le piston  $C_V = 0,5 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ .

### Exercice 2 : Mesure calorimétrique de l'enthalpie de fusion de l'eau

💡 2 | ✂ 1 | Ⓞ

📈 ▷ Calorimétrie ;  
▷ Changement d'état.

Cet exercice propose d'analyser une expérience permettant de mesurer l'enthalpie massique de fusion de l'eau. Les opérations suivantes sont réalisées dans un calorimètre :

- ▷ Mélanger une masse  $m_0 = 50 \text{ g}$  d'eau chaude ( $T_{\text{ch}} = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ ) avec la même masse  $m_0$  d'eau à température ambiante ( $T_{\text{amb}} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ).
- ▷ Après quelques minutes, la température de l'eau ne varie plus et vaut  $T_1 = 32 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- ▷ Ajouter un glaçon partiellement fondu. Le glaçon est pesé après séchage et juste avant d'être ajouté au calorimètre : on mesure  $m = 15 \text{ g}$ .
- ▷ Après quelques minutes, le glaçon a totalement fondu, la température de l'eau ne varie plus et vaut  $T_2 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Donnée : capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

1. Un boxeur confirmé frappe avec une force de l'ordre de 3000 N.

- 1 - Rappeler ce qu'est un calorimètre et les caractéristiques des transformations qui y ont lieu.
- 2 - Déterminer la température théorique  $T_{1,th}$  qui serait mesurée en fin de première étape si la capacité thermique du calorimètre était négligeable.
- 3 - En reprenant le raisonnement, déterminer la valeur en eau  $\mu$  du calorimètre, c'est-à-dire la masse d'eau équivalente qui aurait la même capacité thermique que le calorimètre.
- 4 - Justifier que faire fondre partiellement le glaçon (et le sécher) permet de considérer qu'il est formé uniquement de glace à température  $T_{fus} = 0^\circ\text{C}$ .
- 5 - En déduire l'enthalpie massique de fusion de l'eau.

### Exercice 3 : Glacière thermoélectrique

💡 1 | ✂ 1 | Ⓞ



- ▷ Transitoire thermique ;
- ▷ Loi d'Ohm thermique.



Une glacière thermoélectrique est un dispositif portable qui permet de refroidir ou conserver au frais des aliments, des médicaments, etc., lors de leur transport. L'intérieur de la glacière est constamment refroidi par un module Peltier, alimenté électriquement, qui prélève un flux thermique  $\Phi_0$  constant. On note  $R$  la résistance thermique des parois de la glacière.

La glacière est mise en marche alors qu'elle contient une masse  $m$  d'eau (capacité thermique massique  $c$ ) à la même température  $T_0$  que l'air extérieur.

- 1 - Représenter le diagramme des échanges et discuter les signes.
- 2 - Déterminer la température limite  $T_{lim}$  qu'atteindra l'eau en régime permanent.
- 3 - Établir l'équation différentielle vérifiée par la température  $T$  de l'eau et en déduire l'ordre de grandeur de la durée au bout de laquelle  $T_{lim}$  sera atteinte.

## Analyse de corrigés

### Exercice 4 : De la glace qui fond

💡 2 | ✂ 1 | Ⓞ



- ▷ Changement d'état ;
- ▷ Validation d'hypothèses.

Dans un calorimètre aux parois calorifugées et de capacité thermique négligeable, on introduit une masse  $m_{liq} = 1,00 \text{ kg}$  d'eau liquide initialement à  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ . On y ajoute une masse  $m_{gl} = 0,50 \text{ kg}$  de glace à  $T_2 = 0^\circ\text{C}$ .

Données : enthalpie massique de fusion de l'eau  $\Delta_{fus}h = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  et capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 1 - On suppose qu'à l'état final l'eau est entièrement sous forme liquide. Déterminer sa température  $T_F$ . Conclure.
- 2 - On suppose maintenant qu'à l'état final l'eau est présente sous forme d'un mélange solide et liquide. Que peut-on dire sans calcul sur l'état final ? Déterminer la composition du mélange, c'est-à-dire la masse de chaque phase.

✍ **Correction** — Le système sur lequel on raisonne est constitué de toute l'eau (liquide + glace) contenue dans le calorimètre. Il n'échange clairement aucun travail avec l'extérieur, et comme les parois du calorimètre sont calorifugées il n'échange pas non plus de transfert thermique. La transformation étant monobare avec équilibre mécanique, on travaille en enthalpie.

#### Question d'analyse 1 - Pourquoi la transformation est-elle monobare ?

- 1 - Au cours de cette transformation,
  - ▷ la température de l'eau liquide passe de  $T_1$  à  $T_F$  ;
  - ▷ la glace fond et se réchauffe, ce que l'on décompose comme la succession de deux transformations élémentaires :
    - d'abord, la glace fond totalement de manière isobare isotherme ;
    - ensuite, « la glace » est liquide et sa température passe de  $T_{fus}$  à  $T_F$ .

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } P}}{0} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{0} = \underbrace{m_{\text{liq}} c (T_F - T_1)}_{\text{liquide}} + \underbrace{m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h + m_{\text{gl}} c (T_F - T_{\text{fus}})}_{\text{glace}}$$

**Question d'analyse 2** - Pourquoi peut-on décomposer en deux étapes successives la transformation subie par la glace, alors qu'en réalité les deux phénomènes ont lieu simultanément ?

**Question d'analyse 3** - Pourquoi le transfert thermique fourni par l'eau liquide à la glace n'apparaît-il pas dans le bilan d'enthalpie ?

On en déduit alors

$$T_F = \frac{m_{\text{gl}} c T_2 + m_{\text{liq}} c T_1 - m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h}{(m_{\text{gl}} + m_{\text{liq}}) c} = 260 \text{ K} = -13 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Il y a donc une contradiction : l'eau est supposée liquide, et pourtant à la température trouvée elle devrait être solide. **L'hypothèse d'eau complètement liquide est donc fautive.**

2 - Si l'eau est présente à la fois sous forme liquide et solide, alors la température finale est forcément

$$T_F = T_{\text{fus}} = 0 \text{ }^\circ\text{C}.$$

**Question d'analyse 4** - Pourquoi la température finale ne peut-elle pas valoir autre chose que  $T_{\text{fus}}$  ?

La transformation se décompose cette fois de la façon suivante :

- ▷ la température de l'eau liquide passe de  $T_1$  à  $T_{\text{fus}}$  ;
- ▷ une masse  $x m_{\text{gl}}$  ( $0 < x < 1$ ) de glace fond, mais sa température ne varie pas.

Le bilan d'enthalpie s'écrit donc :

$$\Delta H = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } P}}{0} + \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{0} = \underbrace{m_{\text{liq}} c (T_F - T_{\text{fus}})}_{\text{liquide}} + \underbrace{x m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h}_{\text{glace}}$$

**Question d'analyse 5** - Pourquoi  $x$  apparaît-il dans le terme associé à la glace et pas dans celui associé à l'eau liquide ?

On en déduit

$$x = \frac{m_{\text{liq}} c (T_1 - T_{\text{fus}})}{m_{\text{gl}} \Delta_{\text{fus}} h} = 0,51.$$

Cette valeur est physiquement acceptable : on en déduit que l'hypothèse est validée. Ainsi, dans l'état final, le calorimètre contient 1,25 kg d'eau liquide et 0,25 kg de glace, le tout à  $0 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**Question d'analyse 6** - Quelles auraient été les valeurs de  $x$  qui auraient donné lieu à une contradiction entre l'hypothèse faite et le résultat ?

Attention à la cohérence physique des hypothèses lors de la construction de la transformation auxiliaire : si l'eau liquide refroidit, alors pour conserver l'enthalpie il faut nécessairement que de la glace fonde. Ceci étant, dans le cas où vous auriez supposé que l'eau refroidissait puis gelait, vous auriez abouti à une contradiction.

## Exercice 5 : Sorbet fait maison



-  ▷ Transitoire thermique ;
-  ▷ Changement d'état.



Une sorbetière est une machine permettant de fabriquer des glaces faites maison. La préparation (basiquement fruits, eau et sucre), sortie du réfrigérateur, est versée dans un bol sorti du congélateur. Ce bol contient une solution saline dont la fusion progressive permet de récupérer une grande quantité d'énergie à basse température<sup>2</sup>, et donc de refroidir efficacement la préparation. Un petit moteur fait tourner une pale qui agite le mélange, jusqu'à la prise en glace.

2. Exactement comme les blocs bleus que vous emmenez en pique-nique.

On modélise l'ensemble de la façon suivante :

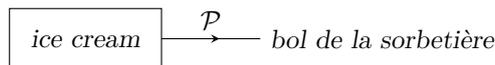
- ▷ la préparation de masse  $m$  est initialement liquide à  $0^\circ\text{C}$ , elle commence à solidifier dès qu'elle est versée ;
- ▷ le bol de la sorbetière demeure à température constante  $T_0 = -15^\circ\text{C}$  ;
- ▷ la température  $T$  du mélange est uniforme ;
- ▷ la puissance thermique échangée entre le mélange et le bol de la sorbetière s'écrit  $\mathcal{P} = \alpha(T - T_0)$  ;
- ▷ les échanges thermiques avec l'air sont négligés pour simplifier.

On note  $c$  la capacité thermique massique de la glace, et  $\Delta_{\text{fus}}h$  son enthalpie de fusion.

1 - Quelle est la durée nécessaire à ce que le mélange solidifie complètement ?

2 - La glace est meilleure à déguster à  $T^* = -8^\circ\text{C}$ . Combien de temps supplémentaire faudra-t-il patienter une fois la glace totalement solidifiée avant de se régaler ?

 **Correction** — Notre système est la préparation qui prend en glace, qui solidifie puis refroidit en cédant une puissance  $\mathcal{P}$  au bol de la sorbetière.



**Question d'analyse 1** - Pourquoi est-on ici certain du sens d'algrébrisation de  $\mathcal{P}$  ?

1 - Pendant toute la durée  $\Delta t_{\text{sol}}$  de la solidification, la puissance  $\mathcal{P}$  est constante : on peut donc procéder à un bilan d'enthalpie global.

**Question d'analyse 2** - Justifier que  $\mathcal{P}$  est constante.

Ce bilan s'écrit

$$\Delta H \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } \mathcal{P}}}{=} -\mathcal{P} \Delta t_{\text{sol}} = -\alpha(T_{\text{fus}} - T_0) \Delta t_{\text{sol}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{transf}}}{=} -m \Delta_{\text{fus}}h \quad \text{d'où} \quad \Delta t_{\text{sol}} = \frac{m \Delta_{\text{fus}}h}{\alpha(T_{\text{fus}} - T_0)}.$$

**Question d'analyse 3** - Justifier le signe  $\ominus$  dans l'expression de  $\Delta H$  fournie par le premier principe.

**Question d'analyse 4** - Même question pour celle impliquant l'enthalpie de changement d'état.

**Question d'analyse 5** - Proposer deux tests de vraisemblance sur les dépendances en  $m$  et  $T_0$ .

2 - Cette fois, la température de la glace varie donc  $\mathcal{P}$  n'est plus constante : il va falloir passer par une équation différentielle. On procède à un bilan d'enthalpie en puissance, qui s'écrit

$$\frac{dH}{dt} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er } \mathcal{P}}}{=} -\mathcal{P} = -\alpha(T - T_0) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Joule}}}{=} mc \frac{dT}{dt}$$

d'où on déduit l'équation différentielle

$$\frac{dT}{dt} + \frac{\alpha}{mc}T = \frac{\alpha}{mc}T_0$$

**Question d'analyse 6** - Pourquoi le bilan enthalpique ne fait-il plus apparaître l'enthalpie de fusion ?

En posant  $\tau = mc/\alpha$ , cette équation différentielle se résout en

$$T(t) = A e^{-t/\tau} + T_0,$$

avec à l'instant initial

$$T(t=0) \underset{\substack{\uparrow \\ \text{CI}}}{=} T_{\text{fus}} \underset{\substack{\uparrow \\ \text{expr}}}{=} A + T_0 \quad \text{soit} \quad A = T_{\text{fus}} - T_0$$

et ainsi

$$T(t) = (T_{\text{fus}} - T_0) e^{-t/\tau} + T_0.$$

Maintenant que vous savez bien faire, il est inutile voire contre-productif de sur-rédiger les résolutions d'équation différentielle en détaillant solution homogène, etc. : la solution particulière s'affirme sans démonstration, et vous pouvez/devez donner directement la solution complète. Seul la condition initiale mérite une ligne de calcul.

**Question d'analyse 7** - Justifier la condition initiale.

La température de la glace est égale à  $T^*$  au bout d'une durée  $t$  telle que

$$(T_{\text{fus}} - T_0)e^{-t/\tau} + T_0 = T^* \quad \text{soit} \quad e^{-t/\tau} = \frac{T^* - T_0}{T_{\text{fus}} - T_0}$$

et ainsi

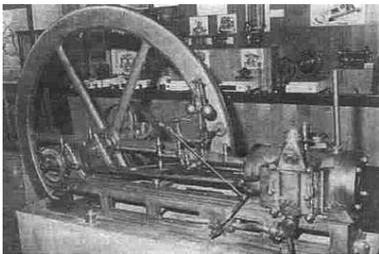
$$t = \tau \ln \frac{T_{\text{fus}} - T_0}{T^* - T_0}.$$

## Transformations finies

### Exercice 6 : Cycle de Lenoir



-   $\triangleright$  Gaz parfait ;  
 $\triangleright$  Premier principe.



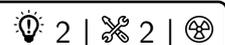
Le cycle de Lenoir est un modèle idéalisé de cycle moteur à deux temps, proposé par Étienne Lenoir en 1860 pour décrire le fonctionnement du moteur à gaz qu'il avait mis au point l'année précédente. On raisonne sur le mélange air-carburant présent dans la chambre de combustion du moteur, modélisé par un gaz parfait d'exposant adiabatique  $\gamma$  formant un système fermé de quantité de matière  $n_0$ . Après l'admission d'air dans la chambre de combustion, l'état du mélange ( $P_1, V_1, T_1$ ) est supposé connu. Le cycle qu'il subit se compose des étapes suivantes :

- $\triangleright$  1  $\rightarrow$  2 : explosion isochore jusqu'à la pression  $P_2$  ;
- $\triangleright$  2  $\rightarrow$  3 : détente isotherme jusqu'à un volume  $V_3 = 2V_1$  ;
- $\triangleright$  3  $\rightarrow$  1 : compression isobare modélisant le renouvellement du mélange (échappement, admission, injection de carburant, inflammation).

- 1 - Déterminer les caractéristiques des points ② et ③ du cycle en fonction uniquement de celles du point ①.
- 2 - Déterminer l'équation d'une isotherme d'un gaz parfait dans le diagramme de Watt ( $P, V$ ), c'est-à-dire une équation de la forme  $P = f(V)$ . En déduire la représentation du cycle.
- 3 - Calculer l'énergie  $Q_{\text{expl}}$  reçue par le mélange lors de l'explosion, à exprimer en fonction de  $P_1, V_1$  et  $\gamma$ . On rappelle que la capacité thermique molaire isochore d'un gaz parfait vaut  $C_{V,m} = R/(\gamma - 1)$ .
- 4 - Calculer le travail moteur  $W_m$  fourni au cours du cycle complet, à exprimer également en fonction de  $P_1$  et  $V_1$ .
- 5 - En déduire le rendement du cycle  $\eta = W_m/Q_{\text{expl}}$ .

**Remarque culturelle :** Un défaut majeur de ce modèle de cycle historique est la modélisation de la deuxième étape. Considérer la détente isotherme n'est pas l'hypothèse la plus pertinente, une modélisation adiabatique est plus conforme à la réalité ... mais en 1860 ces notions étaient encore en construction !

### Exercice 7 : Modèle de Mûzer d'une centrale solaire à concentration



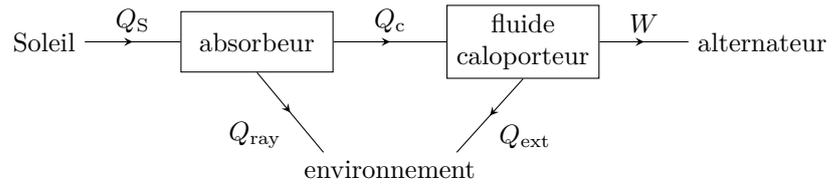
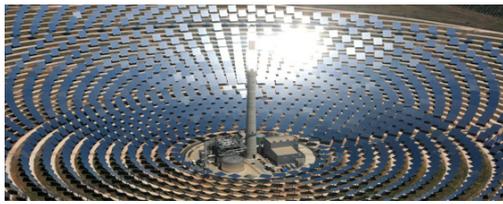
-   $\triangleright$  Machine thermique.

Convertir l'énergie solaire en électricité se fait généralement via des panneaux photovoltaïques, mais ce n'est pas la seule technologie possible. On s'intéresse ici au solaire thermodynamique à concentration : la lumière solaire chauffe un absorbeur, au contact duquel de l'eau est vaporisée. La détente de la vapeur dans une turbine permet de mettre en rotation un alternateur, presque comme dans une centrale électrique « traditionnelle ».

L'objectif de l'exercice est d'estimer le rendement maximal de l'installation dans un modèle de type machine ditherme, appelée machine de Mûzer. La difficulté vient du fait que la chaleur est reçue par l'absorbeur sous forme de rayonnement, or tout corps ne fait pas que recevoir mais émet également de la chaleur par rayonnement : l'énergie transmise au fluide n'est donc pas directement l'énergie reçue par l'absorbeur, puisque celui-ci en rayonne une partie dans l'environnement. La loi de Stefan-Boltzmann indique que la puissance surfacique (en  $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$ ) rayonnée par un corps à la température  $T$  est donnée par

$$\phi = \sigma T^4 \quad \text{avec } \sigma \text{ une (combinaison de) constantes fondamentales.}$$

On raisonne avec les notations de la figure 1, toutes les énergies échangées étant positives.



**Figure 1 – Centrale solaire à concentration.** Gauche : La lumière solaire est déviée par les miroirs vers un absorbeur se trouvant au sommet de la tour centrale. Droite : Schéma de principe des échanges énergétiques, le fluide caloporteur étant généralement de l'eau.

1 - On note  $d$  la distance Terre-Soleil et  $R_S$  le rayon du Soleil. Justifier que la puissance surfacique solaire reçue sur Terre vaut

$$\phi_S = \frac{R_S^2}{d^2} \sigma T_S^4.$$

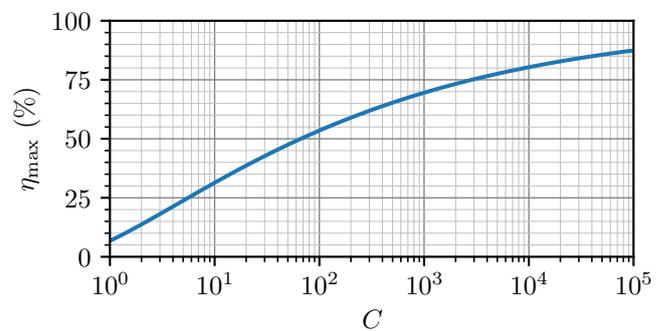
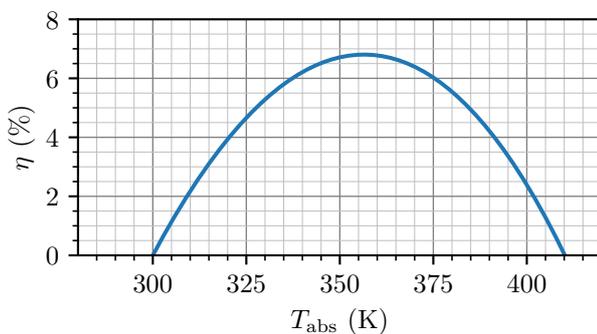
2 - En raisonnant sur un absorbeur de surface  $S$  et température  $T_{\text{abs}}$ , montrer que le rapport entre l'énergie  $Q_c$  transmise au fluide caloporteur et l'énergie solaire reçue  $Q_S$  vaut

$$\frac{Q_c}{Q_S} = 1 - \frac{d^2}{R_S^2} \frac{T_{\text{abs}}^4}{T_S^4}$$

3 - Exprimer les principes thermodynamiques appliqués au fluide caloporteur pour un cycle de fonctionnement.

4 - Le rendement de l'installation est défini par  $\eta = W/Q_S$ . Justifier qualitativement la définition, et montrer que

$$\eta = \frac{W}{Q_S} \leq \left(1 - \frac{T_{\text{ext}}}{T_{\text{abs}}}\right) \left(1 - \frac{d^2}{R_S^2} \frac{T_{\text{abs}}^4}{T_S^4}\right)$$



**Figure 2 – Rendement d'une machine de Mûzer.** Gauche : rendement maximal d'une machine de Mûzer en fonction de la température de l'absorbeur. Droite : optimum de rendement d'une machine de Mûzer en fonction du facteur de concentration  $C$ .

5 - La courbe de gauche de la figure 2 représente le rendement de Mûzer  $\eta$  en fonction de la température de l'absorbeur. Commenter l'ordre de grandeur des valeurs obtenues en comparant à d'autres valeurs de rendement que vous connaissez. Expliquer qualitativement pourquoi le rendement de la machine de Mûzer s'annule si la température de l'absorbeur est trop faible ou trop élevée.

Pour améliorer le rendement, une solution consiste à concentrer la lumière solaire sur l'absorbeur à l'aide de dispositifs optiques, généralement des miroirs comme on peut le voir sur la figure 1. Ainsi, seule la surface  $S$  de l'absorbeur rayonne mais tout se passe comme s'il absorbait l'énergie solaire reçue sur une surface  $S' > S$  correspondant approximativement à la surface des miroirs. Le rapport  $C = S'/S$  est appelé facteur de concentration.

6 - Comment le résultat de la question 4 est-il modifié en fonction de  $C$  ?

7 - La courbe de droite de la figure 2 représente l'optimum de rendement en fonction du facteur de concentration  $C$ . Commenter les valeurs obtenues, sachant que  $C \simeq 100$  dans les installations actuelles et atteindra 1000 dans les projets en développement. La limite théorique dans laquelle l'absorbeur recevrait de la lumière issue de toutes les directions donne  $C \simeq 45\,000$ .

**Exercice 8 : Bilan d'entropie**

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2



- ▷ *Changement d'état ;*
- ▷ *Second principe.*

On dispose d'un litre d'eau à 20°C que l'on met en contact avec un thermostat à 100°C pour le vaporiser. Le thermostat est idéal et évolue de façon réversible. On rappelle qu'au cours d'une transformation 1 → 2, l'entropie d'un liquide de capacité thermique  $C$  varie de

$$\Delta S = C \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

- 1 - Calculer la variation d'entropie de l'eau et du thermostat et l'entropie créée.
- 2 - Reprendre la question si l'opération est réalisée en deux temps en commençant par un thermostat intermédiaire à 60°C. Comparer les résultats obtenus pour les deux transformations.

Données :

- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- ▷ enthalpie de vaporisation de l'eau :  $\Delta_{\text{vap}}h = 2,26 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

**Exercice 9 : Masse posée sur un piston**

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 3



- ▷ *Bilan d'entropie ;*
- ▷ *Approche de la réversibilité.*

Considérons une enceinte hermétique, diatherme, fermée par un piston de masse négligeable pouvant coulisser sans frottement. Cette enceinte contient un gaz supposé parfait. Elle est placée dans l'air, à température  $T_0$  et pression  $P_0$ .

- 1 - On place une masse  $m$  sur le piston. Déterminer les caractéristiques du gaz une fois l'équilibre thermique et mécanique atteint.
- 2 - Déterminer le transfert thermique échangé  $Q$  et l'entropie créée.
- 3 - On réalise la même expérience, mais en  $N$  étapes successives, par exemple en ajoutant du sable « grain à grain ». Déterminer l'entropie créée dans la limite  $N \rightarrow \infty$ .

**Transitoires thermiques****Exercice 10 : Chauffage isobare d'un gaz parfait**

💡 1 | ✂ 1



- ▷ *Transitoire thermique.*

On considère une enceinte calorifugée, fermée par un piston libre de coulisser sans frottements, contenant un gaz parfait. La pression extérieure est notée  $p_0$ . Initialement, le volume de l'enceinte est  $V_0$ , la température et la pression du gaz  $T_0$  et  $p_0$ . Cette enceinte renferme une résistance, alimentée par un générateur de courant idéal délivrant l'intensité  $I$ . La résistance varie avec la température selon la loi  $R(T) = R_0 T / T_0$ .

- 1 - Déterminer l'évolution de la température du gaz au cours du temps.
- 2 - En déduire l'expression de l'évolution du volume au cours du temps.

**Exercice 11 : Canon à neige**

oral banque PT | 💡 2 | ✂ 2 | 🌀



- ▷ *Transitoire thermique ;*
- ▷ *Changement d'état.*

La neige artificielle est obtenue en pulvérisant de fines gouttes d'eau liquide à  $T_0 = 10^\circ\text{C}$  dans l'air ambiant à  $T_a = -15^\circ\text{C}$ . Le déplacement dans l'air soumet chaque goutte à une perte thermique modélisée par la loi de Newton,

$$\phi = h(T - T_a)S,$$

où  $\phi$  est le flux thermique cédé par la goutte d'eau,  $T$  sa température,  $h$  un coefficient constant et  $S$  l'aire de la surface au travers de laquelle a lieu l'échange.

1 - En supposant la goutte indéformable de rayon  $R$  et à l'équilibre mécanique, établir la relation

$$\mu c R \frac{dT}{dt} = -3h(T - T_a).$$

2 - En déduire que

$$\frac{T - T_a}{T_0 - T_a} = e^{-t/\tau}$$

en exprimant  $\tau$  en fonction de  $\mu$ ,  $R$ ,  $c$  et  $h$ . En déduire l'instant  $t_1$  au bout duquel la goutte d'eau atteint une température  $T_1 = -5,0^\circ\text{C}$ .

À cet instant, la goutte est toujours liquide alors même qu'elle devrait être solide compte tenu de sa température : ce phénomène est appelé surfusion. On suppose qu'à l'instant  $t_1$  une petite perturbation fait cesser la surfusion, la goutte solidifie partiellement instantanément.

3 - Calculer la fraction massique  $x$  de liquide restant à solidifier.

4 - Au bout de combien de temps la goutte est-elle totalement solidifiée ?

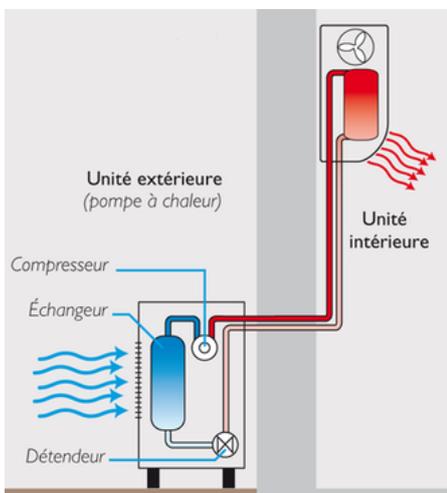
Données :

- ▷ rayon de la goutte d'eau  $R = 0,20$  mm,
- ▷ coefficient conducto-convectif  $h = 65 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ,
- ▷ masse volumique de l'eau liquide  $\mu = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide  $c = 4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,
- ▷ chaleur latente de fusion de la glace  $\ell_{\text{fus}} = 330 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

## Exercice 12 : Chauffage par une pompe à chaleur



- ▷ Transitoire thermique ;
- ▷ Machine thermique.



Une pompe à chaleur (abrégée PAC) est une machine thermique permettant d'effectuer un transfert thermique effectif de sens opposé au sens naturel, c'est-à-dire « du froid vers le chaud ». Dans une PAC, un fluide caloporteur est en écoulement dans un circuit passant alternativement à l'extérieur et à l'intérieur de la maison à chauffer. Rappelons que dans ce contexte l'extérieur de la maison est qualifié de « source froide » et l'intérieur de « source chaude ». À l'extérieur de la maison, le fluide reçoit une puissance thermique  $\mathcal{P}_f > 0$  ainsi qu'une puissance mécanique  $\mathcal{P}_m > 0$  au sein du compresseur, et à l'intérieur il reçoit une puissance thermique algébrique  $\mathcal{P}_c < 0$ , ce qui revient à dire que le fluide restitue un transfert thermique à l'intérieur de la maison.

Cet exercice s'intéresse à l'évolution de la température intérieure  $T_c$  lorsque la PAC est mise en marche alors que la température extérieure  $T_f$  est constante.

Hypothèses de travail :

- ▷ Puissance du compresseur  $\mathcal{P}_m = \text{cte}$  ;
- ▷ Le démarrage de la PAC est de durée négligeable : celle-ci est toujours supposée en régime permanent ;
- ▷ Les pertes thermiques au travers des murs de la maison sont également négligées ;
- ▷ Toutes les évolutions thermodynamiques de la PAC sont considérées réversibles.

1 - Par application des principes de la thermodynamique au fluide caloporteur de la PAC pendant une durée infinitésimale  $dt$ , établir deux relations entre les puissances échangées et les températures des sources.

2 - Établir une relation supplémentaire en appliquant le premier principe à l'intérieur de la maison, de capacité thermique totale  $C$ , incluant l'air, les murs, le mobilier, etc.

3 - En déduire que la température  $T_c$  de la source chaude vérifie la relation

$$\left(1 - \frac{T_f}{T_c}\right) \frac{dT_c}{dt} = \frac{\mathcal{P}_m}{C}.$$

4 - En déduire la durée de chauffage  $\tau$  nécessaire pour que la température intérieure s'élève de  $T_0$  à  $T_0 + \Delta T$ .

**Exercice 13 : Moteur avec pseudo-source**

oral banque PT | 💡 2 | ✂️ 2



- ▷ Transformations infinitésimale ;
- ▷ Moteur ditherme.

On étudie un moteur ditherme réversible dont la source chaude est un réservoir contenant 1 kg d'eau liquide à température initiale 100 °C et la source froide l'atmosphère à température constante 20 °C. On suppose que la source chaude échange uniquement avec le moteur.

Donnée : capacité thermique de l'eau  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

- 1 - Donner le rendement d'un moteur ditherme réversible.
- 2 - Pendant un cycle infinitésimal, la température du réservoir varie de  $dT_c$ . Déterminer la chaleur  $\delta Q_c$  reçue par le moteur lors de ce cycle. Déterminer le travail fourni par le moteur lors du cycle infinitésimal.
- 3 - Quand et pourquoi le moteur s'arrêtera-t-il de fonctionner ? Calculer le travail total fourni par le moteur.
- 4 - Ce moteur sert à entraîner un treuil qui soulève une masse de 10 kg. De quelle hauteur la masse est-elle soulevée pendant la durée totale de fonctionnement du moteur ?

**Problème ouvert**

*Un problème ouvert demande de l'initiative dans le raisonnement mené. Pour aborder un tel exercice, il peut notamment être utile de faire un schéma modèle, d'identifier et nommer les grandeurs pertinentes, de proposer des hypothèses simplificatrices, de décomposer le problème en des sous-problèmes simples, etc. Le candidat peut également être amené à proposer des valeurs numériques raisonnables pour les grandeurs manquantes ... et à l'inverse toutes les valeurs données ne sont pas forcément utiles. Le tout est évidemment à adapter à la situation proposée !*

**Exercice 14 : Combien de glaçons dans le jus de fruits ?**

💡 3 | ✂️ 1



- ▷ Problème ouvert ;
- ▷ Changement d'état.

Par une chaude journée d'été, vous avez oublié de mettre au frigo le jus de fruits de l'apéritif. Combien de glaçons devez-vous y ajouter pour qu'il soit aussi rafraîchissant ?

Données :

- ▷ enthalpie massique de fusion de l'eau :  $3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau liquide :  $4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;
- ▷ capacité thermique massique de l'eau solide :  $2,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;