

**Thème III. L'énergie : conversions et transferts (Thermodynamique)**  
**TD n°18 Énergie échangée par un système.**  
**Premier principe. Bilans d'énergie. – Corrigé**

Exercice n°	1	2	3	4	5	6	7	8
Capacités								
Définir un système fermé et établir pour ce système un bilan énergétique faisant intervenir travail et transfert thermique.	☞	☞	☞	☞	☞	☞	☞	☞
Exploiter les conditions imposées par le milieu extérieur pour déterminer l'état d'équilibre final.	☞	☞	☞	☞	☞		☞	☞
Évaluer un travail par découpage en travaux élémentaires et sommation sur un chemin donné dans le cas d'une seule variable.		☞	☞					
Calculer le transfert thermique $Q$ sur un chemin donné.			☞		☞	☞	☞	
Utiliser le premier principe de la thermodynamique entre deux états voisins.		☞	☞		☞	☞		
Exploiter l'extensivité de l'énergie interne.								
Exprimer le premier principe sous la forme d'un bilan d'enthalpie dans le cas d'une transformation monobare avec équilibre mécanique dans l'état initial et l'état final.	☞			☞		☞	☞	☞
Réaliser des bilans énergétiques en prenant en compte des transitions de phase.	☞			☞			☞	☞
Exploiter l'extensivité de l'enthalpie.	☞			☞			☞	

**Parcours possibles**

- ☁ Si vous avez des difficultés sur ce chapitre : n°1, n°2
- ☁ Si vous vous sentez moyennement à l'aise, mais pas en difficulté : n°1, n°2, n°4, n°5
- ☀ Si vous êtes à l'aise : n°1, n°3, n°4, n°6, n°7, n°8

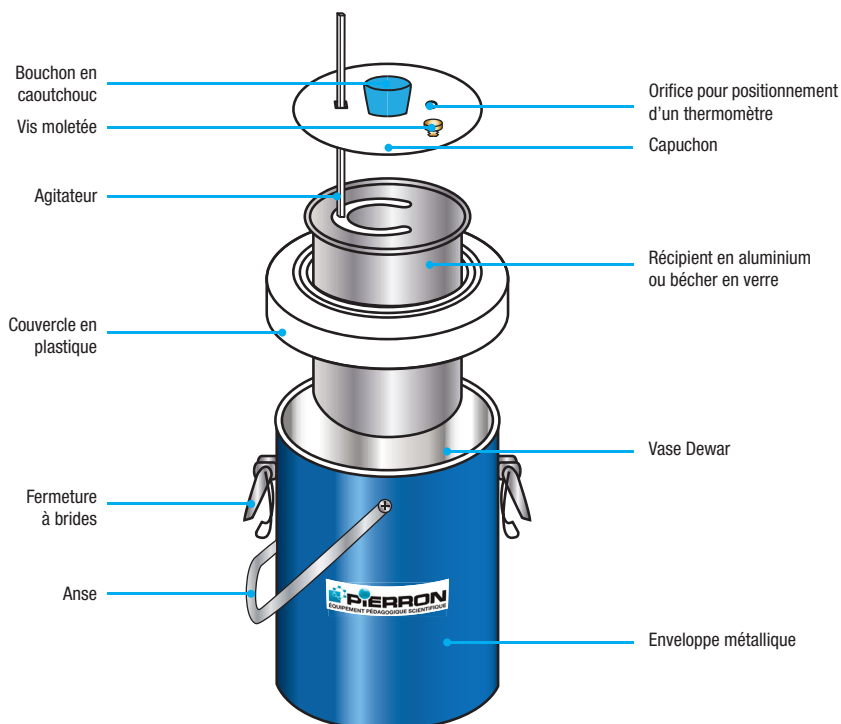
**I Exercices d'application directe du cours**

**Exercice n°1 Calorimétrie**

La calorimétrie est l'étude des propriétés calorimétriques des corps, en particulier les capacités thermiques et les enthalpies de changement d'état.

Le calorimètre est un récipient composé d'une paroi extérieure et d'une cuve intérieure, fermé par un couvercle percé de petites ouvertures permettant d'introduire un agitateur, un thermomètre, une résistance chauffante. La cuve intérieure étant séparée de la paroi extérieure par de l'air, le système  $\Sigma$  constitué de la cuve intérieure et de son contenu est relativement bien isolé et on peut négliger sur la durée d'une expérience de travaux pratiques les échanges thermiques avec l'extérieur.

On devra tenir compte de la capacité thermique du calorimètre parce qu'elle n'est pas négligeable en général devant la capacité thermique de ce qu'il contient.



Les expériences dans un calorimètre se font à pression extérieure constante, le système étant en contact avec l'atmosphère par les petites ouvertures laissant passer le thermomètre et l'agitateur.

On donne la capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_\ell = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

R1. Quelle version du premier principe est-il pertinent d'utiliser ici ?

### Mesure de la capacité du calorimètre

Avant toute mesure, il est nécessaire de déterminer la capacité thermique du calorimètre  $C_{\text{calo}}$ , c'est-à-dire du vase et des instruments (thermomètre et agitateur). Pour cela, on utilise souvent la méthode dite « des mélanges ». On place  $m_1 = 95 \text{ g}$  d'eau dans le calorimètre et on attend que l'équilibre thermique ait lieu avec le vase intérieur et les instruments à  $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Puis on ajoute  $m_2 = 69 \text{ g}$  d'eau à  $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$  dans le calorimètre et on mesure la température du système.

Expérimentalement on mesure la température d'équilibre  $T_F = 31,3 \text{ }^\circ\text{C}$ .

R2. Par application du premier principe déterminer la valeur de  $\Delta H$ .

**Solution: La définition du système doit être faite avant toute chose.**

Système  $\Sigma$  : {calorimètre + instruments + 2 masses d'eau}

	EI	$\xrightarrow[\text{isobare}]{\text{adiabatique}}$	EF
Calorimètre	$T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$		$T_F = 31,3 \text{ }^\circ\text{C}$
[1]	eau( $\ell$ ) $m_1 = 95 \text{ g}$ $T_1 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$		$m_1$ $T_F = 31,3 \text{ }^\circ\text{C}$
[2]	eau( $\ell$ ) $m_2 = 71 \text{ g}$ $T_2 = 50 \text{ }^\circ\text{C}$		$m_2$ $T_F = 31,3 \text{ }^\circ\text{C}$

On applique le premier principe au système  $\Sigma$  :  $\Delta H = W' + Q$ ,

où  $W'$  est le travail des forces autres que celle des forces de pression, ici il n'y en a pas, donc  $W' = 0$

et  $Q = 0$  car le calorimètre est isolé thermiquement

Ainsi  $\Delta H = 0$

R3. Quelle propriété de l'enthalpie permet d'exprimer l'enthalpie de ce système constitué de plusieurs sous-systèmes ?

Exprimer la variation de la fonction d'état en fonction des masses  $m_1$  et  $m_2$ , de la capacité thermique massique de l'eau, de la capacité thermique du calorimètre  $C_{\text{calo}}$  et des températures  $T_1$ ,  $T_2$ ,  $T_F$ .

**Solution:**

L'enthalpie est une fonction d'état extensive, donc  $\Delta H = \Delta H_{\text{calo}} + \Delta H_1 + \Delta H_2$ , avec :

— Variation de l'enthalpie du calorimètre :  $\Delta H_{\text{calo}} = C_{\text{calo}}(T_F - T_1)$

— Variation de l'enthalpie de l'eau 1 :  $\Delta H_1 = m_1 c_\ell (T_F - T_1)$

— Variation de l'enthalpie de l'eau 2 :  $\Delta H_2 = m_2 c_\ell (T_F - T_2)$

Ainsi  $\Delta H = C_{\text{calo}}(T_F - T_1) + m_1 c_\ell (T_F - T_1) + m_2 c_\ell (T_F - T_2)$

R4. En déduire l'expression puis la valeur de  $C_{\text{calo}}$ .

**Solution:** Or  $\Delta H = 0$

Ainsi  $C_{\text{calo}} = -c_\ell \left( m_2 \frac{T_F - T_2}{T_F - T_1} + m_1 \right) = 80 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

Parfois on donne plutôt la valeur en eau du calorimètre, notée  $\mu$ , souvent donnée en grammes, définie comme la masse d'eau qui aurait la capacité thermique totale  $C_{\text{calo}}$ , ainsi on écrit  $C_{\text{calo}} = \mu c_\ell$ .

R5. En déduire la valeur en eau du calorimètre ici utilisé.

**Solution:** Valeur en eau du calorimètre :  $\mu = \frac{C_{\text{calo}}}{c_{\ell}} = 19 \text{ g}$

### Mesure de la capacité thermique massique d'un solide

On souhaite déterminer la capacité thermique massique  $c_{\text{Fe}}$  d'un échantillon de fer.

Le principe de l'expérience consiste à mesurer la température obtenue en mettant en contact thermique l'échantillon et une quantité connue d'eau.

On verse dans le calorimètre  $m_{\text{eau}} = 400 \text{ g}$  d'eau très froide et on mesure la température qui se stabilise après quelques instants. On trouve  $T_0 = 2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . On introduit dans le calorimètre l'échantillon de fer, que l'on a préalablement pesé (sa masse est  $m_{\text{Fe}} = 200 \text{ g}$ ) et qui est initialement à la température d'une étuve thermostatée,  $T_1 = 85,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ . On vérifie que l'échantillon est bien entièrement recouvert d'eau. On attend que la température se stabilise et on mesure la température finale  $T_F = 6,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ .

R6. Établir l'expression de la capacité thermique massique du fer en fonction de la masse d'eau, de la masse du fer, des températures, de la capacité thermique massique de l'eau et de la capacité thermique du calorimètre.

**Solution:** La définition du système doit être faite avant toute chose.

Système  $\Sigma$  : {calorimètre + instruments + eau liquide + fer}

	EI	$\xrightarrow[\text{isobare}]{\text{adiabatique}}$	EF
Calorimètre	$T_0 = 2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$T_F = 6,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
eau( $\ell$ )	$m_{\text{eau}} = 400 \text{ g}$ $T_0 = 2,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$m_{\text{eau}} = 400 \text{ g}$ $T_F = 6,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$
fer	$m_{\text{Fe}} = 200 \text{ g}$ $T_1 = 85,0 \text{ }^{\circ}\text{C}$		$m_{\text{Fe}} = 200 \text{ g}$ $T_F = 6,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$

De la même façon que précédemment, on obtient :  $\Delta H = 0$

Par additivité de l'enthalpie :

$$\Delta H = \Delta H_{\text{calo}} + \Delta H_{\text{eau}} + \Delta H_{\text{Fe}} = C_{\text{calo}}(T_F - T_0) + m_{\text{eau}}c_{\ell}(T_F - T_0) + m_{\text{Fe}}c_{\text{Fe}}(T_F - T_1)$$

Ainsi  $c_{\text{Fe}} = -\frac{C_{\text{calo}} + m_{\text{eau}}c_{\ell}}{m_{\text{Fe}}} \times \frac{T_F - T_0}{T_F - T_1} = 4,9.10^2 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

La valeur tabulée est de  $452 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

## Exercice n°2 Compression d'un gaz

Un gaz, supposé parfait, de capacité thermique molaire à volume constant  $C_{V_m} = \frac{5}{2}R$  est enfermé dans une enceinte. Il est comprimé brutalement en enfonçant le piston, de  $h = 30 \text{ cm}$  en exerçant une force  $F_0 = 800 \text{ N}$  constante.

R1. Pourquoi peut-on modéliser cette transformation par une transformation monobare et adiabatique ?

R2. Exprimer le travail  $W_0$  reçu par le gaz (et donc exercé par l'opérateur) au cours de la compression.

R3. En déduire la température finale et l'estimer numériquement.

Afin d'obtenir le même état final, la compression est effectuée en ajoutant grain de sable par grain de sable. L'enceinte est en contact avec l'atmosphère extérieure assimilée à un thermostat.

R4. Pourquoi peut-on modéliser cette transformation par une transformation quasi-statique et isotherme ? Que peut-on dire de la température finale du système ?

R5. Exprimer le travail  $W$  reçu par le gaz (et donc exercé par l'opérateur) au cours de la compression.

R6. Déterminer le transfert thermique  $Q$  reçu par le gaz. Commenter le signe.

## II Exercices d'approfondissement

### Exercice n°3 Café buvable ?

Je viens de préparer 50 cL de café soluble à partir d'eau bouillante. Je voudrais le boire tout de suite, mais il est trop chaud.

- R1. J'ajoute 20 cL d'eau du robinet à 20 °C. On suppose que cet ajout est assez rapide. Déterminer la température finale du mélange en effectuant les hypothèses nécessaires sur la transformation. On prendra  $c = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$  pour l'eau liquide.
- R2. Pour pouvoir boire sans se brûler, il faut que la température du breuvage ne dépasse pas les 40 °C. Quelle quantité d'eau du robinet faut-il ajouter ?

### Exercice n°4 Mélange eau/glace (d'après Oral CCINP)

Dans un récipient parfaitement calorifugé, on place une masse  $M = 1 \text{ kg}$  d'eau liquide à  $T_1 = 293 \text{ K}$  et une masse  $m = 500 \text{ g}$  de glace à  $T_2 = 273 \text{ K}$ . On travaille à la pression constante de 1 bar.

- R1. Donner le principe de fonctionnement, faire un schéma, décrire le protocole expérimental et le dispositif pour réaliser des mesures par calorimétrie.

**Solution:** Nous étudions le système constitué d'une masse  $M$  d'eau liquide et d'une masse  $m$  de glace. Cf TP calorimétrie

- R2. Donner la définition d'une transformation adiabatique. Quelle fonction d'état faut-il utiliser pour étudier la transformation ? Justifier.

**Solution:** Une transformation adiabatique est une transformation au cours de laquelle le système n'échange aucun transfert thermique.

La pression étant constante, nous utiliserons l'enthalpie pour étudier la transformation du système, en écrivant le premier principe  $\Delta H = Q$ , soit  $\Delta H = 0$ . Cf *démo du cours*

- R3. Déterminer la composition et la température du mélange à l'équilibre.

**Solution:** Faisons l'hypothèse que l'eau est entièrement liquide à l'état final.

EI	$\xrightarrow{\text{transformation adiabatique et isobare}}$	EF
[1] eau ( $\ell$ )		eau ( $\ell$ )
$M$		$M$
$T_1 = 293 \text{ K}$		$T_F$
[2] eau (s)		eau ( $\ell$ )
$m = 0,50 \text{ kg}$		$m = 0,50 \text{ kg}$
$T_2 = 273 \text{ K}$		$T_F$

L'enthalpie est une grandeur additive, donc  $H = H_1 + H_2$ , avec :

- $\Delta H_1 = Mc_e(T_F - T_1)$
- Pour calculer la variation d'enthalpie de la glace, il est nécessaire de se ramener à un chemin fictif ne faisant intervenir que des transformations au cours desquelles la température varie et d'autres au cours desquelles l'état change et la température reste constante.

EI	$\xrightarrow{\text{fusion}}$	A	$\xrightarrow{\text{échauffement}}$	EF
[2] eau (s)		eau ( $\ell$ )		eau ( $\ell$ )
$m = 0,50 \text{ kg}$		$m$		$m$
$T_2 = 273 \text{ K}$		$T_2 = 273 \text{ K}$		$T_F = ??$

$\Delta H_2 = m_\ell \Delta h_{\text{fusion}}$

Alors, on en déduit que  $T_F = \frac{Mc_e T_1 + mc_e T_2 - m \Delta h_{\text{fusion}}}{mc_e + Mc_e}$

Pour  $M = 1,0 \text{ kg}$  :  $T_F = 260 \text{ K} < 273 \text{ K}$  : le système n'est pas entièrement à l'état liquide, il reste de la glace.

Il faut donc reprendre le raisonnement en faisant l'hypothèse d'un équilibre final liquide-solide. La température finale est donc  $T_F = 273 \text{ K}$ .

EI	$\xrightarrow{\text{transformation adiabatique et isobare}}$	EF
[2] eau (s)		eau (l)
$m = 0,50 \text{ kg}$		$m_s = ???$ et $m_\ell = ???$
$T_F = T_2 = 273 \text{ K}$		$T_F = T_2 = 273 \text{ K}$
$\Delta H_2 = m_\ell \Delta h_{\text{fusion}}$		

Ainsi  $M c_e (T_F - T_1) + m_\ell \Delta h_{\text{fusion}} = 0$ , soit  $m_\ell = \frac{-M c_e (T_F - T_1)}{\Delta h_{\text{fusion}}} = 0,25 \text{ kg}$  et  $m_s = m - m_\ell = 0,25 \text{ kg}$

On vérifie bien que  $m_\ell \in [0, m]$ .

R4. Reprendre la question pour  $M = 4,0 \text{ kg}$ .

**Solution:** Pour  $M = 4,0 \text{ kg}$  :  $T_F = 282 \text{ K} > 273 \text{ K}$  : le système est entièrement à l'état liquide.

On donne :

- Enthalpies massiques de changement d'état :  $\Delta h_{\text{fusion}} = 3,36 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$  ;  $\Delta h_{\text{vaporisation}} = 2,26 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$
- Capacité thermique massique de l'eau liquide :  $c_\ell = 4,20 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- Capacité thermique massique de la glace :  $c_g = 2,06 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .
- Capacité thermique massique de la vapeur d'eau :  $c_v = 1,85 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ .

### Exercice n°5 Apport d'énergie électrique

On considère une étuve calorifugée fermée et indéformable, de volume  $V_0 = 10,0 \text{ L}$ . L'enceinte contient  $n = 2$  moles d'un gaz parfait monoatomique. La température initiale est  $T_0 = 20 \text{ °C}$  et la pression initiale est  $P_0 = 1,0 \text{ bar}$ .

Il y a dans l'enceinte une résistance  $R_0 = 100 \Omega$ , alimentée par un générateur de courant idéal, de courant  $I = 0,25 \text{ A}$ , pendant 10 minutes.

R1. Donner l'expression de la puissance thermique dissipée par la résistance.

**Solution:** Puissance dissipée par effet Joule :  $\mathcal{P} = R_0 I^2$

R2. Déterminer l'expression de la température finale atteinte.

**Solution:** Système :  $n$  moles d'un gaz parfait monoatomique

EI	$\xrightarrow{\text{isochore}}$	EF
$V_0 = 10,0 \text{ L}$		$V_0 = 10,0 \text{ L}$
$T_0 = 20 \text{ °C}$		$T_f = ??$
$P_0 = 1,0 \text{ bar}$		$P_f = ??$

D'après le premier principe :  $\Delta U = W + Q$

$$\Delta U = n C_{V_m} (T_f - T_0) = \frac{3nR}{2} (T_f - T_0)$$

Le travail des forces de pression  $W_P = 0$  car l'enceinte est indéformable.

Le transfert thermique par l'étude est nul.

La résistance reçoit le travail électrique  $W_{\text{elec}} = R_0 I^2 \Delta t$ , qu'elle dissipe entièrement sous forme de transfert thermique.

D'après le premier principe :  $\frac{3nR}{2} (T_f - T_0) = R_0 I^2 \Delta t$

$$\text{Alors } T_f = T_0 + \frac{2R_0 I^2 \Delta t}{3nR} = 443 \text{ K}$$

### III Résolutions de problème

#### Exercice n°6 Estimation de la capacité thermique massique de l'eau liquide

J'utilise ma bouilloire de puissance 2300 W pour porter à ébullition 1 L d'eau liquide qui était initialement à 17 °C. Cela prend 2 minutes et 55 secondes.

En déduire une estimation de la capacité thermique massique de l'eau. On fera clairement apparaître les hypothèses effectuées.

**Solution:** Idée : 1er principe en supposant la bouilloire calorifugée, et sans évaporation.

$$c_\ell = \frac{\mathcal{P} \Delta t}{m(T_f - T_i)}, \text{ avec } T_f = 100 \text{ °C.}$$

#### Exercice n°7 Jus de fruit frais

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 ?

**Solution:** idée : même calcul que le dernier exemple du cours, mais on connaît cette fois-ci la température finale (celle d'un réfrigérateur : 5 °C environ), mais pas la masse de glaçon mise.

*Données :*

- enthalpie massique de fusion de l'eau à 0 °C :  $\Delta_{\text{fus}} h = 3,3 \cdot 10^2 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$
- capacité thermique massique de l'eau liquide  $c_\ell = 4,2 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$
- capacité thermique massique de l'eau solide  $c_g = 2,1 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$

#### Exercice n°8 Transpiration

Quel volume d'eau devez-vous éliminer par transpiration pour débarrasser votre corps des 75 W de puissance thermique correspondant à votre métabolisme lorsque vous êtes au repos ?

On prendra la température de la peau égale à 33 °C et l'enthalpie massique de vaporisation de l'eau à cette température égale à 2420 kJ · kg<sup>-1</sup>.

Commenter, sachant qu'un être humain évacue en moyenne par transpiration environ 0,5 L d'eau par jour. Le fait de s'essuyer avec une serviette aide-t-il au refroidissement du corps ?

**Solution:**

La puissance thermique dégagée par votre corps permet à la transpiration de s'évaporer :  $\mathcal{P} \Delta t = \rho V \Delta_{\text{vap}} h$

$$\text{Soit } V = \frac{\mathcal{P} \Delta t}{\rho \Delta_{\text{vap}} h} = 2,7 \text{ L, à calculer pour } \Delta t = 1 \text{ jour (pour comparer aux 0,5 L transpiré).}$$