

# CALORIMETRIE

## 1. ENERGIE THERMIQUE-TEMPERATURE-CHALEUR-CALORIMETRIE

L'**énergie thermique**  $E_\theta$  est due à l'agitation incessante, au niveau microscopique, des particules (*atomes, ions ou molécules*) qui composent le système (*solide, liquide ou gaz*).

Elle correspond à la somme ( $\sum e_{ci}$ ) des énergies cinétiques liées à l'agitation (*translation, rotation, vibration*) des particules du système.

Elle va en croissant quand la matière passe de l'état solide, puis à l'état liquide, puis à l'état gazeux car *l'agitation des particules est croissante elle aussi*.

La **température**  $\theta$  caractérise par un nombre l'état d'un système (*chaud ou froid*)... donc le degré d'agitation des particules.

La **chaleur**  $Q$  correspond à un transfert d'énergie thermique.

Par exemple dans le cas d'un contact entre deux systèmes de températures différentes... donc par des chocs des particules les plus agitées (zone chaude) sur les particules les moins agitées (zone froide).

La **calorimétrie** c'est la mesure de la quantité de chaleur  $Q$  échangée par un système.

$Q > 0$  quand un système **reçoit**

$Q < 0$  quand un système **donne**

## 2. CALORIMETRIE (relations)

### 2\_A Chaleur échangée sans changement d'état du système

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta$$

$\Delta\theta$  (ou  $\Delta T$ ) :  $\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}}$  ( $> 0$  ou  $< 0$ )

**c** : **capacité thermique massique** du corps (**J.kg<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>**) (ou chaleur massique)

m : masse du corps (kg)

**Q** : **quantité de chaleur échangée** avec d'autres corps (**joules, J**)

**c** : quantité de chaleur échangée par l'unité de masse du corps pour modifier sa température de 1 K (1°C)

$$Q = \mathcal{C} \cdot \Delta\theta$$

$\mathcal{C}$  : capacité thermique (J.K<sup>-1</sup>)

$$\mathcal{C} = m \cdot c$$

$\mathcal{C}$  : quantité de chaleur échangée par le corps de masse m (ou par un récipient)

(calorimètre par exemple... pour modifier sa température de 1 K)

$$Q = n \cdot C \cdot \Delta\theta$$

**C** : **capacité thermique molaire** du corps (**J.mol<sup>-1</sup>.K<sup>-1</sup>**)

$$C = M \cdot c$$

M (kg.mol<sup>-1</sup>) est la masse molaire du corps

**C** : quantité de chaleur échangée par 1 mol du corps pour modifier sa température de 1 K

n : quantité de matière (mol)

(Remarque : **c** ; **C** et  $\mathcal{C}$  sont positives, on les suppose constantes même si elles dépendent de  $\theta$ )

## 2<sub>B</sub> Chaleur échangée avec changement d'état du système

$$Q = m.L$$

$L > 0$  ou  $< 0$ .

**L : chaleur latente massique** de changement d'état du corps à température constante ( $J.kg^{-1}$ )

**L : quantité de chaleur échangée par l'unité de masse du corps pour passer d'un état à un autre.**

(Remarque :  $L_{molaire} = M.L$  ;  $L_{molaire}$  : chaleur latente molaire ( $J.mol^{-1}$ ) ;  $Q = n.L_{molaire}$ )

## 2<sub>C</sub> Tableaux de valeurs

### 2<sub>C1</sub> capacités thermiques massiques c

#### a- capacité thermique massique c des liquides et des solides

substance	c ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	substance	c ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	substance	c ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )
ammoniac	4700	benzène	1710	pierre, plâtre	800
bois	2500	fréon	1380	verre	800
alcool	2420	PVC	1000 à 1500	diamant	500
pétrole	2100	PS	1200	fer	460
PEhD	1900	béton	1000	cuivre, zinc	390
PTFE	1900	aluminium	920	plomb	130

#### b- capacité thermique massique c des gaz

##### b<sub>1</sub> capacité thermique massique à pression constante-c<sub>p</sub>

substance	c <sub>p</sub> ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	$\gamma$	substance	c <sub>p</sub> ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ )	$\gamma$
hélium	5200	1,66	dioxygène	920	1,39
dioxyde de carbone	1150	1,29	argon	520	1,66
diazote	1040	1,40	krypton	250	1,67
air	1000	1,40			

##### b<sub>2</sub> coefficient adiabatique- $\gamma$

Pour les gaz l'importance de la dilatation consécutive à une variation de température, la capacité thermique massique à volume constant c<sub>v</sub> (*transformation isochore*) diffère de la capacité thermique massique à pression constante c<sub>p</sub> (*transformation isobare*).

$$\gamma = \frac{c_p}{c_v} = \frac{C_p}{C_v}$$

$\gamma$  est un coefficient sans dimension.

#### c- retour aux solides et aux liquides

Pour les solides et les liquides, c<sub>p</sub> et c<sub>v</sub>, ayant des valeurs très proches, les coefficients de dilatation étant faibles, il est possible de les confondre : c.

C<sub>p</sub> et C<sub>v</sub> ( $J.mol^{-1}.K^{-1}$ ) représentent respectivement les capacités thermiques molaires à pression constante et à volume constant.

C<sub>p</sub> = M.c<sub>p</sub> et C<sub>v</sub> = M.c<sub>v</sub>, M ( $kg.mol^{-1}$ ) étant la masse molaire du gaz.

#### d- eau

Solide (*glace*) : c = 2100  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Liquide : c = 4185  $J.kg^{-1}.K^{-1}$

Gaz (vapeur d'eau) : c<sub>p</sub> = 1880  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  à pression constante

c<sub>v</sub> = 1350  $J.kg^{-1}.K^{-1}$  à volume constant

M(H<sub>2</sub>O) = 18.10<sup>-3</sup>  $kg.mol^{-1}$

$\gamma = 1,39$

## 2c2 chaleurs Latentes massiques L

températures de changement d'état et chaleur latente des solides, *liquides* et ...*gaz*...à 25°C

substance	<u>Fusion</u>		<u>Vaporisation</u>	
	$\theta_f (^{\circ}\text{C})$	$L_f (\text{kJ.kg}^{-1})$	$\theta_v (^{\circ}\text{C})$	$L_v (\text{kJ.kg}^{-1})$
<i>alcool</i>	-114,5	105	78	842
aluminium	660	330	2467	10800
<i>ammoniac</i>	-75	452	-33	1368
cuivre	1083	176	2567	4796
<i>diazote</i>			-196	200
<i>dioxygène</i>			-183	213
<b>Eau</b>	<b>0</b>	<b>335</b>	<b>100</b>	<b>2258</b>
fer	1535	277	2750	6095
mercure	-39	11,7	357	357
or	1063	67	2700	1758
plomb	327	23	1740	862

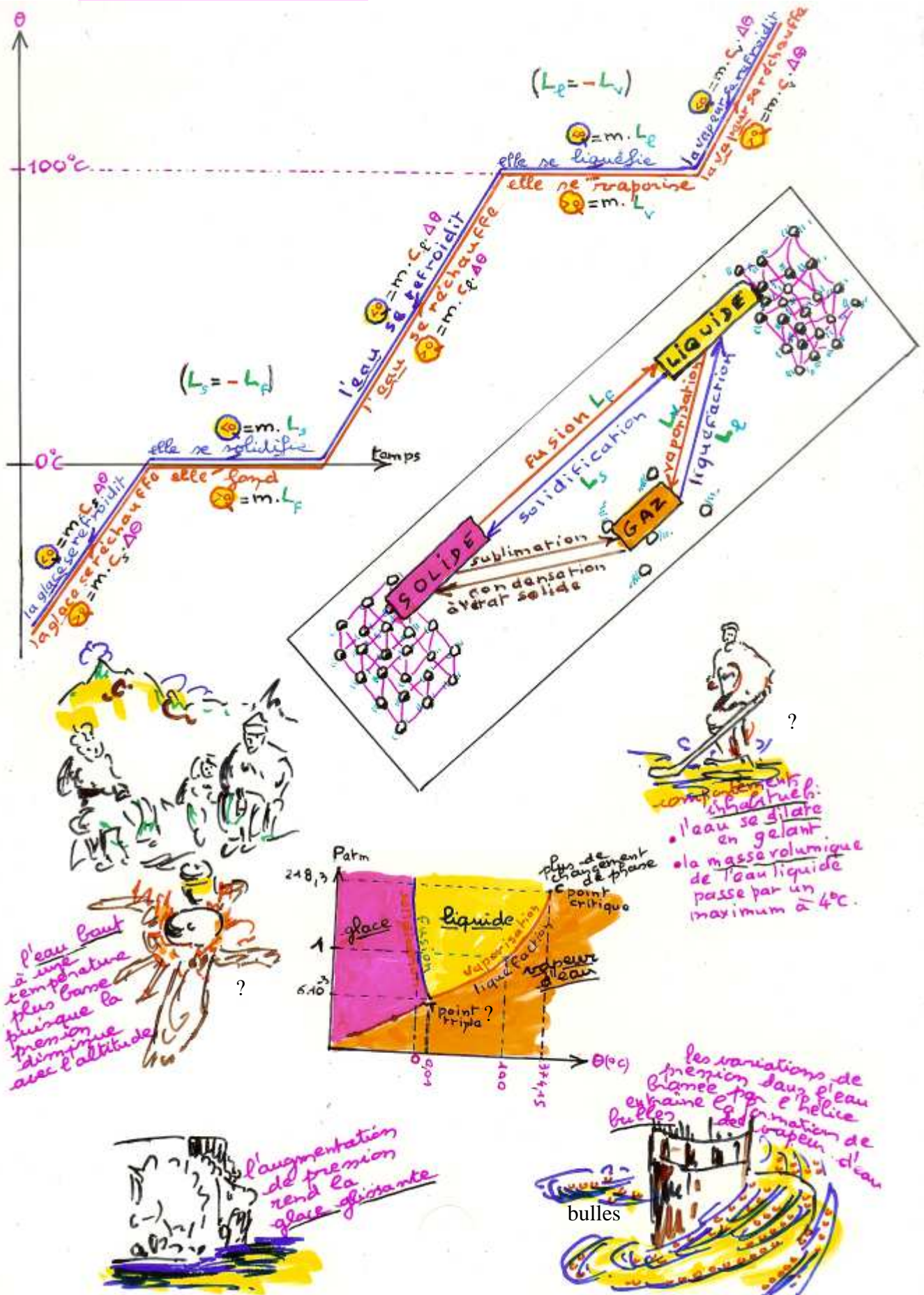
$L_{\text{solidifications}} = - L_{\text{fusion}}$  ;  $L_{\text{liquéfaction ou condensation}} = - L_{\text{vaporisation}}$

( $L_{\text{molaire}} = M \cdot L$ )

Exemple :

$L'_{\text{eau}} : L_{f \text{ molaire}} = M(\text{H}_2\text{O}) \cdot L_f = (18 \cdot 10^{-3} \text{ kg.mol}^{-1}) \times (335 \text{ kJ.kg}^{-1}) = 6,03 \text{ kJ.mol}^{-1}$

### 3. L'eau et la calorimétrie



#### 4. Exercices préliminaires

1) Quelle quantité de chaleur  $Q$ ...

a...doit-on fournir à 10 kg d'eau pour que la température passe de  $23^{\circ}\text{C}$  à  $57^{\circ}\text{C}$  ?

b...doit-on retirer à 1000 L d'eau pour que la température passe de  $21^{\circ}\text{C}$  à  $11^{\circ}\text{C}$  ?

c...devra recevoir un bloc de glace de masse 2,7 kg pour se réchauffer de  $-13^{\circ}\text{C}$  à  $-7^{\circ}\text{C}$  ?

d...doit recevoir, à pression constante, 30 kg de vapeur d'eau à  $130^{\circ}\text{C}$  pour être réchauffée à  $151^{\circ}\text{C}$  ?

e...doit céder, à volume constant, 1,7 kg de vapeur d'eau pour se refroidir de  $109^{\circ}\text{C}$  à  $101^{\circ}\text{C}$  ?

f...doit céder un récipient de capacité thermique  $215 \text{ J.K}^{-1}$  pour abaisser sa température de  $18^{\circ}\text{C}$  à  $15^{\circ}\text{C}$  ?

En déduire sa capacité thermique massique si sa masse est de 551 g.

Quelle est la matière constituant ce récipient ?

g...doit-on fournir à 1,8 kg d'eau à  $40^{\circ}\text{C}$  pour se vaporiser à  $100^{\circ}\text{C}$  ?

h...souhaite obtenir un homme sur la banquise pour obtenir 3 L d'eau chaude à  $70^{\circ}\text{C}$ , en faisant fondre la masse correspondante de glace à  $-30^{\circ}\text{C}$  ?

Quelle quantité de chaleur son réchaud doit-il fournir sachant que seulement 50% de cette énergie thermique sert à chauffer puis faire fondre la glace ?

i...doit-on fournir à 3 mol d'air pour que la température passe de  $10^{\circ}\text{C}$  à  $19^{\circ}\text{C}$  :

$i_1$ - à volume constant ?

$i_2$ - à pression constante ? ( $M_{\text{air}} = 29 \text{ g.mol}^{-1}$ )

2) Après avoir rappelé les unités du système international de l'unité « joule », exprimer les unités des grandeurs suivantes dans ce système international.

a- capacité thermique massique :  $c$

b Capacité thermique molaire :  $C$

c- Capacité thermique :  $\mathcal{C}$

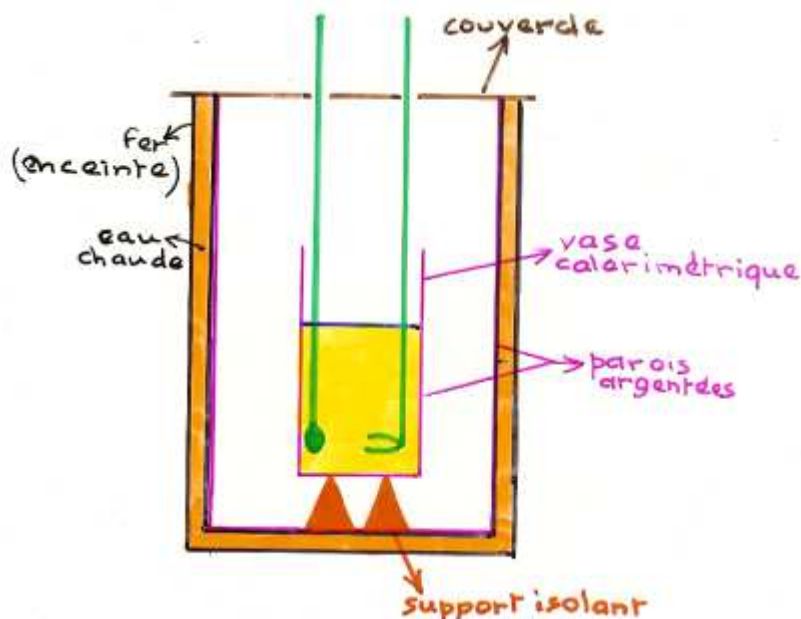
d- chaleur Latente massique :  $L$

e- chaleur Latente molaire :  $L_{\text{molaire}}$



## 5. Calorimètre de Berthelot

(1827 – 1907, chimiste français)



Il offre une isolation parfaite.

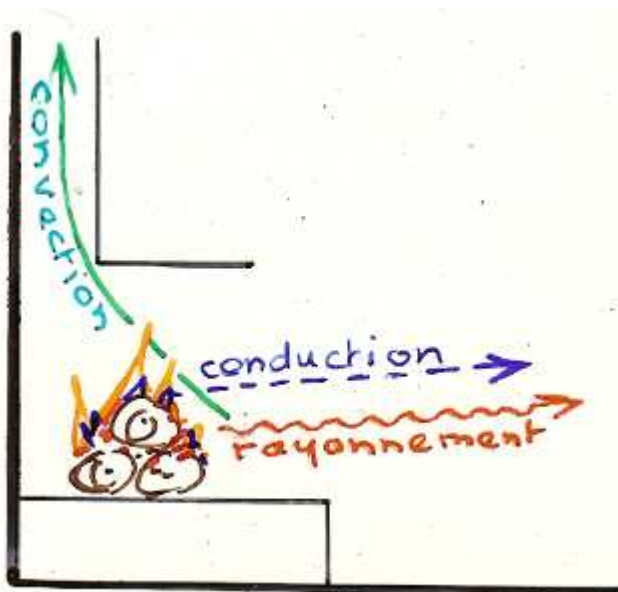
Le vase calorimétrique et ses accessoires (*thermomètre et agitateur*) participent aux échanges de chaleur avec les corps placés dans le vase,...aussi pour en tenir compte dans l'équation calorimétrique on va leur attribuer une **capacité thermique**  $\mathcal{C}$

(exemple :  $260 \text{ J.K}^{-1}$ )

- Le **couvercle** évite les phénomènes de convection dans l'air ambiant.
- Les **parois argentées** évitent les échanges par rayonnement (réflecteur)
- Les **supports isolants**, cales de liège, évitent les phénomènes de conduction.

## 6. Foyer ouvert

Environ 80 % de la chaleur produite par la combustion est entraînée par la convection et 20 % est véhiculée par le rayonnement, l'air étant un très mauvais conducteur.



## 7. EXERCICES

### 7A Deux sortes d'exercices A et B

#### 7A1 description

Il y a deux sortes de problèmes en **calorimétrie** (**A** ou **B**) :

**A1. On produit** de la chaleur  **$Q = ?$** ...

...grâce à un procédé **chimique** (combustion) ou à un procédé **physique** (effet joule, frottements, vitesse, rayonnement, liquéfaction...)

**A2. On retire** de la chaleur (enceinte réfrigérée...)

**$Q = ?$**

**B On mélange** des corps chauds et des corps froids, il y a échange de chaleur entre eux.

Les mesures calorimétriques sont basées sur le « **principe de la conservation de l'énergie** ».

On utilise alors un **calorimètre** (récipient adiabatique) qui évite les échanges thermiques avec l'extérieur.

$$\sum Q_i = 0 \quad (\text{équation calorimétrique})$$

#### 7A2 exercices A : **$Q = ?$**

##### 1- effet Joule

**Effet Joule** (le passage d'un courant électrique d'intensité  $I$ , dans un résistor de résistance  $R$ , pendant un temps  $t$ , se traduit par une consommation d'énergie électrique  $E_e$ , qui est transformée en énergie thermique  $E_b$ , sous forme de chaleur  $Q$ )

$$E(Q) = R.I^2.t \quad (U = R.I, P = U.I, E = P.t)$$

Trois litres d'eau sont chauffées de  $18^\circ\text{C}$  à  $57^\circ\text{C}$  à l'aide d'un thermoplongeur, conducteur ohmique de résistance  $R = 17 \, \Omega$ , traversé par un courant électrique d'intensité  $I = 2,3 \, \text{A}$ .

On suppose qu'il n'y a aucune perte de chaleur.

Quelle est la durée du chauffage en secondes puis en heure ? (unités : J, kg, A,  $\Omega$ , K et s)

##### 2- combustion

**Combustion** (un combustible a un **pouvoir calorifique** : quantité de chaleur  $Q$  obtenue par la combustion de 1 kg ou 1 mol d'un combustible... ou de  $1 \, \text{m}^3$  s'il est gazeux)

a- La combustion de 20 g de coke permet « théoriquement » d'élever la température de 4 L d'eau de  $20^\circ\text{C}$  à  $50^\circ\text{C}$ .

Calculer le pouvoir calorifique (en  $\text{J.kg}^{-1}$ ) du coke.

b- Quelle masse d'eau, passant de  $18^\circ\text{C}$  à  $60^\circ\text{C}$ , peut « théoriquement » chauffer les 250 kg de propane  $\text{C}_3\text{H}_8$  (masse molaire  $M(\text{C}_3\text{H}_8) = 44 \, \text{g.mol}^{-1}$ ) d'une citerne, sachant que le pouvoir calorifique du propane est égal à  $2220 \, \text{kJ.mol}^{-1}$ ?

##### 3- chaudière à condensation

**Chaudière à condensation** (on récupère la chaleur latente de liquéfaction  $L_\ell$  de l'eau, en liquéfiant la vapeur d'eau produite par la combustion du combustible)

La combustion de  $1 \, \text{m}^3$  de butane, combustible gazeux, produit  $m = 4 \, \text{kg}$  de vapeur d'eau.

Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du butane est égal à  $127,7 \, \text{MJ.m}^{-3}$  (en valeur absolue).

a- Calculer la quantité de chaleur supplémentaire que l'on peut récupérer lors de la combustion de  $1 \, \text{m}^3$  de butane.

En déduire le pourcentage de chaleur ainsi obtenu.

b- Calculer le pouvoir calorifique supérieur (PCS en  $\text{MJ.m}^{-3}$ ) du butane en valeur absolue.

$$\text{PCS} = \text{PCI} + m \cdot |L_\ell|$$

#### 4- renouvellement d'air

##### Renouvellement d'air dans un local

- a- Exprimer en fonction de la capacité thermique massique  $c$  de l'air, de la masse volumique  $\rho$  de l'air, du volume  $V$  du local, et des températures extérieures  $\theta_e$  et intérieure  $\theta_i$ , la quantité de chaleur  $Q$  nécessaire...*par heure*, pour chauffer l'air froid pris à l'extérieur du studio, sachant que le taux de renouvellement d'air est de 90%...*par heure*.
- b- Calculer la valeur de cette quantité de chaleur...en joules J, en kJ, en MJ.  
(données numériques :  $c = 940 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  ;  $\rho = 1,29 \text{ kg.m}^{-3}$  ;  $V = 87,5 \text{ m}^3$  ;  $\theta_e = -1^\circ\text{C}$  ;  $\theta_i = 19^\circ\text{C}$ )
- c- Calculer la P puissance mise en jeu.
- d- Exprimer la quantité de chaleur (b) en Wh et kWh.

#### 5- énergie cinétique et chaleur

##### Energie cinétique et chaleur (unités : J, kg, m, K et s)

(l'énergie cinétique ( $E = \frac{1}{2} . m . v^2$ ) d'un corps en mouvement peut être transformée en énergie thermique sous forme de chaleur  $Q$ )

5<sub>1</sub>- Une **auto** roule à la vitesse  $V$ .

Elle s'arrête...*brusquement* à l'aide de ses 4 freins à disques.

En assimilant ces derniers à des cylindres de rayon  $R$ , d'épaisseur  $e$ , de masse volumique  $\rho$  et de capacité thermique massique  $c$ , calculer leur élévation de température  $\Delta\theta$ , en supposant que toute la chaleur est absorbée par les disques.

Données numériques :

$$M = 936 \text{ kg} ; v = 72 \text{ km.h}^{-1} ; R = 10 \text{ cm} ; e = 1 \text{ cm} ; \rho = 8 \text{ g.cm}^{-3} ; c = 0,42 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

5<sub>2</sub>- Une **carabine** tire une balle de plomb

Juste avant de toucher la cible, la balle de masse  $m = 5 \text{ g}$ , est à la température  $\theta_1 = 27^\circ\text{C}$ , sa vitesse est  $v = 300 \text{ m.s}^{-1}$ .

Juste après le choc, sa vitesse est nulle, et on admet que toute l'énergie cinétique a été transformée en énergie thermique, dissipée dans la balle sous forme de chaleur.

- a- Montrer que la balle subit une fusion partielle au cours du choc.
- b- Calculer la masse  $m'$  de plomb fondu, et déterminer la température  $\theta_2$  de la balle.
- c- Quelle devrait-être la vitesse minimale  $v_0$  de la balle pour qu'elle fonde complètement au point d'impact ?

#### 6- divers

6<sub>1</sub>- On considère une surface d'**océan** de  $10000 \text{ km}^2$  recevant de manière uniforme, grâce au rayonnement solaire, une puissance de  $1350 \text{ W par m}^2$ .

En supposant que 50% de cette énergie thermique sert à évaporer l'eau, calculer la *masse d'eau qui s'évapore* en une heure. ( $L_v = 2460 \text{ kJ.kg}^{-1}$  à  $15^\circ\text{C}$ ).

6<sub>2</sub>- Un **réacteur nucléaire** de puissance thermique  $4000 \text{ MW}$ , fournit une puissance électrique de  $1300 \text{ MW}$ .

Le système de refroidissement est alimenté par de l'eau ayant un débit de  $50 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ .

Calculer l'élévation de température.

6<sub>3</sub>- Mesure de la chaleur qui accompagne une réaction chimique (à pression constante)

Dans un calorimètre de capacité thermique  $200 \text{ J.K}^{-1}$ , on verse  $200 \text{ cm}^3$  d'une solution d'acide chlorhydrique molaire de température  $\theta = 18^\circ\text{C}$  et  $200 \text{ cm}^3$  d'une solution d'hydroxyde de sodium molaire de température  $\theta = 18^\circ\text{C}$ .

La température finale étant de  $24^\circ\text{C}$ , calculer la chaleur de cette réaction.

Données : capacités thermiques massiques de chaque solution :  $c = 4,2 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$  et masse volumique de chaque solution :  $\rho = 1002 \text{ kg.m}^{-3}$ .

(réactions.. exothermique ( $Q < 0$ ) elle donne de la chaleur...athermique ( $Q = 0$ )...endothermique ( $Q > 0$ ))



## 7- séchage du bois

### Séchage du bois de masse m...

Naturel :  $Q = m_e \cdot L_v$

$m_e$  est la masse d'eau contenue dans le bois

$L_v$  est la chaleur latente massique de vaporisation de l'eau

Artificiel :  $Q = m_a \cdot c_a \cdot \Delta\theta + m_e \cdot c_e \cdot \Delta\theta + m_e \cdot L_v$

$m_a$  est la masse du bois anhydre

$c_e$  est la capacité thermique massique de l'eau

$c_a$  est la capacité thermique massique du bois

$$\text{Taux d'humidité du bois} = \frac{m - m_a}{m_a} \times 100 = \frac{m_e}{m_a} = H$$

On entrepose 30 t de bois ayant un taux d'humidité moyen de 60% sous abri à l'air atmosphérique.

La température d'évaporation de l'eau est supposée constante (25°C).

Dans ces conditions  $L_v = 2442.10^3 \text{ J.kg}^{-1}$ .

Le séchage final (naturel) permet d'obtenir un taux d'humidité moyen de 15%.

a- Calculer la masse d'eau  $m_e$  qui s'évapore.

b- Calculer la quantité de chaleur absorbée par cette eau lors de l'évaporation.

Ce bois ( $H = 15\%$  à 25°C) est ensuite placé dans une étuve (séchage **artificiel**) à circulation d'air à 100°C.

Le séchage est arrêté quand le taux d'humidité est égal à 10%.

c- Calculer la masse ( $m'_e$ ) d'eau qui s'évapore.

d- Calculer la quantité de chaleur <<théorique>> pour obtenir ce résultat.

(on néglige les quantités de chaleur échangées par les parois intérieures de l'étuve, par l'air qui circule et avec l'air extérieur).

$$(c_a = 2,4 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} ; c_e = 4,185 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} ; L_v = 2257.10^3 \text{ J.kg}^{-1})$$

On tient compte maintenant du chauffage des parois de l'étuve, de l'air et des pertes thermiques avec l'extérieur. (Le résultat précédent est majoré de 5%).

e- Calculer la puissance thermique  $P$  de l'étuve nécessaire pour que le séchage s'effectue en 8 heures.

f- Avec cette puissance thermique, calculer le temps de séchage de 30 t de bois ayant un taux moyen d'humidité de 60% (le bois n'étant pas au préalable séché naturellement)

### 7A3 Exercices B :

$$\sum_{i=1}^n Q_i = 0$$

#### 1. Détermination de la capacité thermique massique d'un solide.

Un calorimètre contient une masse d'eau  $m_1$  à une température  $\theta_1$ .

On ajoute une masse d'eau  $m_2$  à une température  $\theta_2$ .

a- Montrer que la relation littérale donnant la température d'équilibre  $\theta_e$  de l'eau obtenue, si l'on pouvait négliger la capacité thermique du vase calorimétrique et des accessoires du calorimètre est :

$$\theta_e = \frac{m_1 \cdot \theta_1 + m_2 \cdot \theta_2}{m_1 + m_2}$$

La température d'équilibre est...en fait  $\theta'_e$ .

b- Calculer la capacité thermique  $\mathcal{C}$  du calorimètre (le vase et les accessoires participent aux échanges de chaleur).

Le même calorimètre contient maintenant une masse d'eau  $m'_1$  à la température  $\theta'_1$ .

On y plonge un échantillon métallique de masse  $m$  sortant d'une étuve à la température  $\theta'_2$ .

La température d'équilibre est alors  $\theta$ .

c- Calculer la capacité thermique massique  $c$  du métal.

Données :  $m_1 = 95 \text{ g}$  ;  $\theta_1 = 20^\circ\text{C}$  ;  $m_2 = 71 \text{ g}$  ;  $\theta_2 = 50^\circ\text{C}$  ;  $\theta_e = 31,3^\circ\text{C}$  ;  $m'_1 = 100 \text{ g}$  ;  $\theta'_1 = 15^\circ\text{C}$  ;  $m = 25 \text{ g}$  ;  $\theta'_2 = 95^\circ\text{C}$  ;  $\theta = 16,7^\circ\text{C}$ .

2. Un calorimètre est à la température de  $16^{\circ}\text{C}$ . Il contient 400 g d'eau à  $16^{\circ}\text{C}$ .

On ajoute 60 g d'alcool à  $43^{\circ}\text{C}$ .

La température finale est de  $18^{\circ}\text{C}$ .

a- Calculer la capacité thermique du vase et des accessoires du calorimètre.

b- En déduire la capacité thermique massique du métal composant le calorimètre sachant qu'il a une masse de 400 g.

3. Une bouteille de volume  $V = 1\text{ L}$ ... dont on néglige la capacité thermique contient de l'eau à la température  $\theta = 30^{\circ}\text{C}$ .

Pour la refroidir on dispose de trois procédés :

a- On l'entoure d'un linge imbibé d'une masse d'eau  $m_1 = 50\text{ g}$ , qui s'évapore à la température  $\theta$ .

- que ressentez-vous quand on met de l'éther sur votre bras avant une piqûre ?

- que ressentez-vous à l'instant où vous sortez de la piscine ?...pourquoi ?

En supposant que toute la chaleur d'évaporation est prise à l'eau ( $L_v = 2\,437\text{ J.g}^{-1}$ ) de la bouteille, quelle est la température finale  $\theta_1$  de l'eau ?

b- On ajoute de l'eau liquide à la température  $\theta_0 = 0^{\circ}\text{C}$ .

Quelle est la masse d'eau  $m_2$  à ajouter pour atteindre la même température  $\theta_1$  ?

c- On ajoute de la glace à  $\theta_0 = 0^{\circ}\text{C}$ .

Quelle masse de glace  $m_3$  faut-il ajouter pour atteindre  $\theta_1$  ?

•4. Un calorimètre...adiabatique... en cuivre de masse 120 g contient 300 g d'eau à une température de  $18^{\circ}\text{C}$ .

On y introduit 25 g de glace à  $0^{\circ}\text{C}$ .

Sachant qu'on obtient de l'eau...liquide à une température supérieure à  $0^{\circ}\text{C}$ , quelle est la température d'équilibre obtenue ?

•5. Quelle masse minimum...

a-...d'eau à  $+10^{\circ}\text{C}$  faut-il mettre avec 100 g de glace à  $-10^{\circ}\text{C}$  pour faire fondre toute la glace ?

b-...de vapeur d'eau à  $100^{\circ}\text{C}$  faut-il mettre avec une certaine masse d'eau à  $5^{\circ}\text{C}$  pour obtenir 100 kg d'eau à  $50^{\circ}\text{C}$  ?

## 7\_B Mélange de fluides

Mélange de plusieurs liquides :

$c_i$  : capacité thermique massique de chaque liquide

$m_i$  : masse de chaque liquide

$\theta_i$  : température de chaque liquide

$$C = \sum_{i=1}^n m_i \cdot c_i \quad (C : \text{capacité thermique du mélange})$$

$$c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot c_i}{\sum_{i=1}^n m_i} \quad (c : \text{capacité thermique massique du mélange})$$

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \cdot c_i \cdot \theta_i}{\sum_{i=1}^n m_i \cdot c_i} \quad (\theta : \text{température du mélange})$$

6. On mélange deux liquides respectivement de masses  $m_1$  et  $m_2$ , de températures  $\theta_1$  et  $\theta_2$  et de capacités thermiques massiques  $c_1$  et  $c_2$ .

Soient  $\theta$  la température, et  $c$  la capacité thermique massique, du mélange obtenu.

a- Etablir la relation :  $\theta = \frac{m_1 \cdot c_1 \cdot \theta_1 + m_2 \cdot c_2 \cdot \theta_2}{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}$

b- Retrouver la relation de exercice 1) a.

Soit 100 g d'alcool à 18°C avec 320 g d'eau à 47°C.

c- Quelle est la température finale du mélange ?

Le mélange ainsi obtenu, est chauffé (élévation de température  $\Delta\theta = 2,3^\circ\text{C}$ ).

d- Calculer la quantité de chaleur reçue par ce mélange.

e- Etablir les relations donnant la capacité thermique massique  $c$  et la capacité thermique  $\mathcal{C}$  de ce mélange :

$$c = \frac{m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2}{m_1 + m_2} \text{ et } \mathcal{C} = m_1 \cdot c_1 + m_2 \cdot c_2$$

## 8. Sujets BTS...X

**X<sub>1</sub>** Dans une étuve de séchage, on introduit une masse  $m_1 = 20 \text{ t}$  de bois à la température  $\theta_1 = 10^\circ\text{C}$ . Ce bois est porté à la température  $\theta_2 = 100^\circ\text{C}$  dans l'étuve.

Le séchage est terminé lorsque la masse d'eau éliminée est égale à 20% de  $m_1$ .

Il s'effectue sous la pression atmosphérique avec circulation d'air.

Données :

Masse volumique de l'eau :  $\rho = 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$

capacité thermique massique de l'eau :  $c = 4185 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

chaleur Latente massique de vaporisation de l'eau à  $100^\circ\text{C}$  :  $L_v = 2,26.10^6 \text{ J.kg}^{-1}$

1) Calculer la masse d'eau  $m_e$  à éliminer.

2) Calcul des quantités de chaleur nécessaires à l'élimination de l'eau :

Pour simplifier on considère deux étapes :

-chauffage de l'eau de  $\theta_1$  à  $\theta_2$

-vaporisation de l'eau à la température  $\theta_2$

a- calculer la quantité de chaleur  $Q_1$  nécessaire pour porter la masse  $m_e$  de  $\theta_1$  à  $\theta_2$ .

b- calculer la quantité de chaleur  $Q_2$  nécessaire pour vaporiser cette masse d'eau à  $\theta_2$ .

c- calculer la quantité de chaleur totale  $Q$  nécessaire à l'élimination de la masse d'eau  $m_e$ .

3) Calcul de la puissance thermique  $P$  de l'étuve :

Pour tenir compte du chauffage du bois, des parois intérieures de l'étuve, de l'air circulant et des fuites thermiques diverses, il faut ajouter une quantité de chaleur  $Q'$  égale à 40% de  $Q$ .

a- calculer  $Q'$ .

b- calculer  $P$ , si le séchage doit se faire en 72 h.

**X<sub>2</sub>** Certains gisements de soufre sont effectués par le procédé Frasch.

La température du soufre étant initialement  $\theta_0 = 45^\circ\text{C}$ , on injecte dans le gisement sous forte pression de la vapeur d'eau à la température  $\theta_1 = 160^\circ\text{C}$ .

Pendant que cette vapeur d'eau se refroidit jusqu'à la température  $\theta_2 = 115^\circ\text{C}$ , puis se condense à cette même température  $\theta_2$ , le soufre se réchauffe puis fond car  $\theta_2$  est sa température de fusion.

Le soufre est ensuite remonté à la surface par injection d'air comprimé.

(remarque : la forte pression qui règne dans le gisement explique que la vapeur d'eau se condense à  $115^\circ\text{C}$  et non à  $100^\circ\text{C}$ )

1) En supposant que toute la chaleur cédée par l'eau est récupérée par le soufre, exprimer littéralement, puis calculer la masse d'eau  $m$  nécessaire pour extraire une masse  $M = 1000 \text{ kg}$  de soufre.

2) En déduire le volume  $V$  de vapeur d'eau à  $160^\circ\text{C}$  qu'il faut injecter pour extraire cette masse  $M$  de soufre.

Pour produire la vapeur d'eau à la température  $\theta_1$ , on puise de l'eau à la température  $\theta_3 = 15^\circ\text{C}$ .

On la chauffe sous pression jusqu'à  $\theta_1$ , puis on la vaporise à cette température.

La chaleur nécessaire est fournie par la combustion du gaz naturel dont le pouvoir calorifique est égale à  $41000 \text{ kJ.m}^{-3}$ .

La production journalière de soufre étant  $M' = 2000 \text{ t}$ .

3) Exprimer, puis calculer le volume  $V'$  de gaz naturel nécessaire quotidiennement.

Données :

capacité thermique massique de l'eau :  $c_e = 4,19 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

capacité thermique massique de la vapeur d'eau :  $c_v = 1,87 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

capacité thermique massique du soufre solide :  $c_s = 0,75 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{J}^{-1}$

Masse molaire de l'eau :  $M(\text{H}_2\text{O}) = 18 \text{ g.mol}^{-1}$

Volume molaire de la vapeur d'eau à  $160^\circ\text{C}$  sous la pression d'injection :  $V_0 = 2,0 \text{ L.mol}^{-1}$

chaleur Latente massique de vaporisation de l'eau liquide à  $160^\circ\text{C}$  :  $L_v = 2,070 \text{ kJ.kg}^{-1}$

chaleur Latente massique de liquéfaction de la vapeur d'eau à  $115^\circ\text{C}$  :  $L_l = -2200 \text{ kJ.kg}^{-1}$

chaleur Latente massique de fusion du soufre à  $115^\circ\text{C}$  :  $L_f = 41,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$

## 9. Extraits BTS

### SCBH 1993

On se propose de refroidir l'air contenu dans une enceinte E de longueur 4 m de largeur 2,2 m et de hauteur 2,5 m.

Un serpentin est fixé contre une des parois de E ; un fluide entre à l'état liquide dans ce serpentin, à la température de  $20^\circ\text{C}$  et sous la pression de  $5,7.10^5 \text{ Pa}$ , et en sort à la même température et sous la même pression, mais sous la forme de vapeur sèche.

La chaleur latente de vaporisation de ce fluide est, dans ces conditions, de  $144,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

Le débit massique du fluide est  $100 \text{ g.min}^{-1}$ .

L'air contenu dans E est initialement à la température de  $25^\circ\text{C}$ .

Données :  $\rho_{\text{air}} = 1,23 \text{ kg.m}^{-3}$  ; capacité thermique massique  $c = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

- 1) Calculer l'énergie nécessaire au changement d'état du fluide pour une durée de fonctionnement de une heure.
- 2) Calculer la puissance du dispositif de refroidissement.
- 3) D'où provient la chaleur permettant la vaporisation du fluide ?  
Quelle est la conséquence pour l'air contenu dans E ?
- 4) Si on ne tient pas compte des transferts de chaleur à travers les parois de E, quelle sera la durée nécessaire pour que la température de l'air soit de  $15^\circ\text{C}$  ?

### EEC 1996

Données :

capacité thermique massique de l'air  $c = 1000 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Masse volumique de l'air  $\rho = 1,29 \text{ kg.m}^{-3}$

La température intérieure d'un garage est maintenue à  $17^\circ\text{C}$  lorsque la température extérieure est de  $2^\circ\text{C}$ .

Le système de chauffage fournit une puissance moyenne donnée de  $12000 \text{ W}$  avant isolation, de  $5500 \text{ W}$  après isolation des parois.

Un garage n'est pas parfaitement hermétique.

En réalité, il existe une entrée d'air froid et une sortie d'air chaud correspondant à un renouvellement de l'air intérieur de  $90 \text{ m}^3$  à chaque heure.

- 1) Calculer la puissance dépensée par le système de chauffage pour amener l'air froid entré jusqu'à  $17^\circ\text{C}$ .
- 2) En déduire la puissance moyenne réellement transmise par les parois avant et après isolation.

**B 1999**

*Le but de l'exercice est de vérifier la validité de l'indication que portent certains sacs plastiques distribués par une grande surface.*

Ces sacs sont en polyéthylène (polyéthène) de formule  $C_{500}H_{1000}$  et sont utilisés comme combustible dans certaines usines, dans le but de produire de l'énergie électrique.

Le pouvoir calorifique d'une mole de polyéthylène de formule  $C_{500}H_{1000}$  est de  $305,7 \cdot 10^3 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ .

La masse d'un sac est de 5,00 g.

La transformation de l'énergie issue de la combustion de ce sac en énergie électrique se fait avec un rendement de 30%.

- 1) Calculer l'énergie produite par sa combustion complète.
  - 2) Pendant quelle durée cette énergie peut elle alimenter une ampoule de 60W ?
- Conclure en essayant de justifier la différence entre la durée calculée et celle affichée sur le sac.

**EB 2000**

- 1) Exprimer la masse  $m$  du béton constituant une paroi en fonction de ses caractéristiques  $\rho$ ,  $S$ ,  $e$ . Calculer  $m$ .
- 2) Calculer la quantité de chaleur  $Q$  nécessaire pour élever sa température de  $1,5^\circ\text{C}$ . Pour réaliser cet apport on dispose d'un flux thermique moyen  $\Phi = 500 \text{ W}$  fournit par une chaudière.
- 3) Calculer la durée  $\Delta t$  nécessaire pour cette opération.

Données :

Surface de la paroi  $S = 10 \text{ m}^2$

Pour le béton : masse volumique  $\rho = 2400 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , épaisseur  $e = 15 \text{ cm}$  et capacité thermique massique  $c = 920 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**AF 2002 (AF 2011)**

On désire maintenir dans un atelier une température  $\theta_2 = 18^\circ\text{C}$  alors que la température extérieure  $\theta_1 = -2^\circ\text{C}$ .

Cet atelier n'est pas hermétique et permet une entrée d'air froid et une sortie d'air chaud correspondant à un renouvellement de l'air intérieur.

Le volume d'air de l'atelier est entièrement renouvelé au bout d'une heure.

Calculer :

- 1) La quantité de chaleur nécessaire par heure pour chauffer l'air froid pénétrant dans l'atelier.
- 2) La puissance thermique mise en jeu.

Données :

Dimensions intérieures de l'atelier  $L = 10 \text{ m}$  ;  $l = 5 \text{ m}$  ; hauteur sous plafond  $h = 3 \text{ m}$

Masse volumique de l'air  $\rho = 1,293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

capacité thermique massique de l'air  $c = 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

**B 2002**

L'air et les parois d'un local (murs, plafond et sol) sont à la température de  $0^\circ\text{C}$ .

Calculer la quantité de chaleur...

- 1).  $Q_a$ , nécessaire pour porter à  $20^\circ\text{C}$  la température de l'air du local.
- 2).  $Q_b$ , nécessaire pour porter à  $10^\circ\text{C}$  la température des parois en béton.

Conclure.

Données :

Dimensions intérieures du local en mètres  $L \times l \times h = 11,0 \times 7,0 \times 3,0$

Epaisseur du béton  $e = 20 \text{ cm}$ , masse volumique du béton  $\rho = 2,30 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Masse volumique de l'air  $\rho = 1,25 \text{ kg.m}^{-3}$

capacité thermique massique de l'air  $c_a = 1,00.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

capacité thermique massique du béton  $c_b = 0,80.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

### B 2004

On retrouve ce genre de questions en **EB 2001, EEC 1999 et TP 1999, 2002, 2004, 2006, 2007, 2008.**

On considère un volume d'air (gaz supposé parfait) dans un état A :

$$(V_A = 40 \text{ L} ; \theta_A = 27^\circ\text{C} ; P_A = 1,5.10^5 \text{ Pa})$$

1) Calculer la quantité de matière (en moles) correspondante.

On effectue les transformations suivantes sur ce gaz :

- Une transformation adiabatique (*sans échange de chaleur*) de l'état A à l'état B telle que  $\theta_B = 299,5^\circ\text{C}$ .

- Une transformation isobare (*à pression constante*) de l'état B à l'état C telle que  $\theta_C = 627^\circ\text{C}$ .

- Une transformation adiabatique réversible de l'état C à l'état D telle que  $\theta_D = 305^\circ\text{C}$

- Une transformation isochore (*à volume constant*) de l'état D à l'état A.

2) Calculer la quantité de chaleur totale échangée au cours de chaque transformation.

3) En déduire la quantité de chaleur totale échangée au cours d'un cycle ABCA.

Données :

$$R = 8,31 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1}$$

$$C_p = 29,1 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} ; C_v = 20,8 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} ; (\gamma = \frac{C_p}{C_v})$$

### EEC 2004

Un véhicule fonctionne au GPL (gaz de pétrole liquéfié).

Le volume intérieur du réservoir est 100 L.

Lors du remplissage du réservoir à la température  $\theta = 15^\circ\text{C}$ , le GPL occupe 85% du réservoir sous forme liquide et le reste sous forme gazeuse.

La pression  $P_1$  du gaz est alors de  $4,5.10^5 \text{ Pa}$ .

1) a- Dans ces conditions, le GPL liquide a une masse volumique  $\rho_{\text{GPL}} = 560 \text{ kg.m}^{-3}$ , calculer la masse de GPL liquide obtenu dans le réservoir.

b- La phase gazeuse du GPL est assimilée à un gaz parfait de masse molaire  $50 \text{ g.mol}^{-1}$ , calculer la masse de GPL présent dans le réservoir sous forme gazeuse.

(relation des gaz parfaits :  $P.V = n.R.T$  ; constante des gaz parfaits  $R = 8,32 \text{ (S.I.)}$ )

2) Le GPL est puisé dans le réservoir à l'état liquide.

Il passe ensuite à l'état gazeux, il est vaporisé.

La chaleur nécessaire à cette transformation est fournie par le circuit de refroidissement du moteur.

On suppose qu'à un instant donné, le débit de GPL liquide est de  $0,16 \text{ L.min}^{-1}$ .

La chaleur latente de vaporisation du GPL étant dans ces conditions  $L_v = 365 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .

3) Calculer la puissance thermique qui doit être fournie par le circuit de refroidissement du moteur pour obtenir la vaporisation du GPL.

### B 2006

Une vieille maison est à restaurer.

Un capteur solaire thermique est installé sur le versant sud de son toit, pour chauffer l'eau.

On souhaite une eau chaude à une température  $\theta_c = 55^\circ\text{C}$ .

La consommation d'eau chaude par jour est de  $V = 300 \text{ L}$ .

L'eau froide est prise à  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ .

On prendra pour capacité thermique de l'eau  $c = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

1) Quelle est la quantité de chaleur nécessaire par jour, pour élever la température de l'eau de  $15^\circ\text{C}$  à  $55^\circ\text{C}$ , exprimée en kWh ?

L'énergie solaire qui arrive sur le capteur n'est pas entièrement transmise à l'eau qui circule dans les tubulures.

Le rendement est de  $\eta = 40\%$ .

2) Quelle est la quantité d'énergie solaire journalière que doit recevoir le capteur pour chauffer l'eau ? L'ensoleillement journalier moyen par  $\text{m}^2$  dépend de la période.



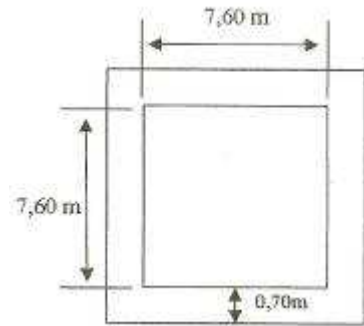
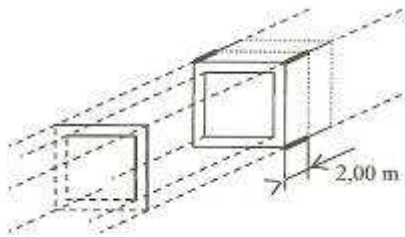
L'ensoleillement quotidien pendant les mois ensoleillés est  $E_{\max} = 6 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  et  $E_{\min} = 3 \text{ kWh.m}^{-2}.\text{jour}^{-1}$  pendant les mois les moins ensoleillés.

3) a- Quelle est la surface de capteurs thermiques nécessaire pendant les mois ensoleillés ?  
On installe  $8 \text{ m}^2$  de capteur.

b- Pendant les mois les moins ensoleillés, avec une telle installation quelle est la température de l'eau obtenue ?

### EB 2008

Chaque tronçon de tunnel du métro est constitué d'un bloc préfabriqué, de longueur  $L = 2 \text{ m}$ , acheminé et monté sur place en vue d'un assemblage bout à bout selon le principe de la figure ci-dessous :



#### Plan de coupe de chaque bloc :

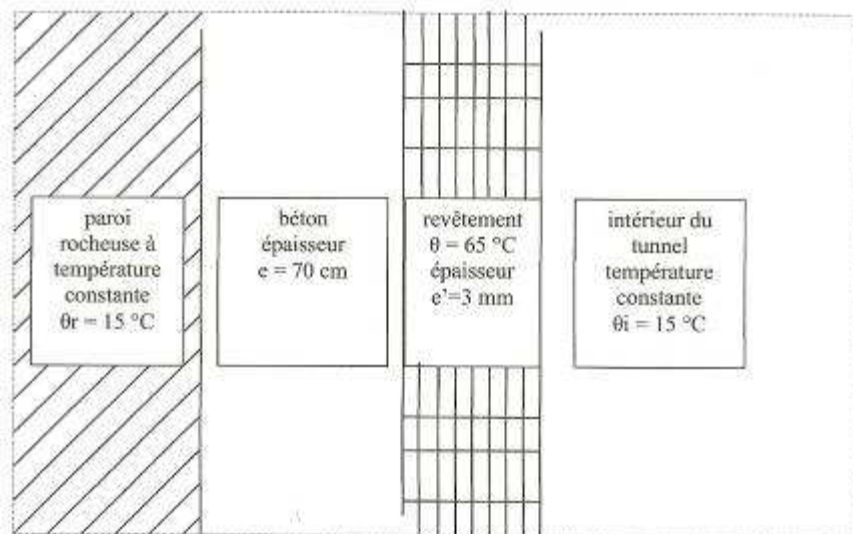
Pour fabriquer ce bloc, on utilise du béton armé.

Après la pose totale des blocs, on injecte à  $65^\circ\text{C}$ , en phase semi-solide, sur toute la partie intérieure du tunnel, un revêtement d'épaisseur  $e = 3 \text{ mm}$ .

On admet que l'intégralité de la quantité de chaleur dégagée par le refroidissement total du revêtement s'effectue par l'intérieur du tunnel.

La température finale atteinte est de  $15^\circ\text{C}$ .

#### Coupe de paroi latérale :



- 1) Calculer la masse du revêtement nécessaire pour recouvrir l'intérieur d'un bloc.
- 2) Trouver alors la quantité de chaleur dégagée par le refroidissement de chaque bloc.
- 3) Sachant que le refroidissement ne dépasse pas  $10^\circ\text{C}$  par heure, calculer la durée minimale de l'opération.
- 4) En déduire la puissance totale dissipée sous forme de chaleur dans l'ensemble de tunnel de longueur,  $3,2 \text{ km}$ .

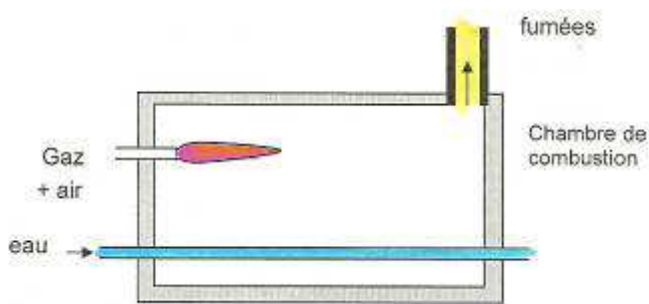
#### Données

capacité thermique massique du revêtement :  $C = 3500 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Masse volumique du revêtement :  $\rho = 100 \text{ kg.m}^{-3}$

**SCBH 2008**

On a schématisé sur la figure ci-dessous la chambre de combustion d'une chaudière à gaz destinée à chauffer l'eau circulant avec un débit volumique  $q$  constant ( $q = 50 \text{ L.min}^{-1}$ ) dans un tuyau qui traverse la chambre considérée comme une enceinte adiabatique. Les produits de la combustion du gaz sont évacués par un conduit supérieur.



Le débit en méthane du brûleur à gaz vaut  $G = 5 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  et le PCI du méthane vaut  $9,96 \text{ kWh.m}^{-3}$ .

1) Que vaut le flux thermique  $\Phi$ , exprimé en watt apporté par le brûleur ?

Le flux thermique perdu par les fumées est noté  $\Phi'$ .

Le flux thermique  $\Delta\Phi$  transféré à l'eau circulant dans le tuyau vaut  $34800 \text{ W}$ .

2) Quelle est la valeur du flux  $\Phi'$ , si l'on néglige toutes les autres pertes ?

La capacité calorifique massique de l'eau  $c$  vaut  $4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

3) Calculer l'augmentation de température  $\Delta T$  de l'eau lors de la traversée de la chambre de combustion.

Donnée :

Masse volumique de l'eau  $\rho = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ .

**EB 2009 (EEC 2011)**

Un jour d'hiver ensoleillé la température de l'eau, à l'intérieur de la cuve, passe de  $5^\circ\text{C}$  à  $12^\circ\text{C}$ .

1) a- Lorsque la cuve contient  $2,00 \text{ m}^3$  d'eau, calculer la quantité de chaleur que celle-ci emmagasine lorsque la température de l'eau passe de  $5^\circ\text{C}$  à  $12^\circ\text{C}$ .

b- Calculer la quantité de chaleur perdue  $Q_0$  par cette eau liquide si elle passe de  $12^\circ\text{C}$  à  $0^\circ\text{C}$ , puis  $Q_1$  lorsqu'elle passe entièrement de l'état liquide à l'état solide à  $0^\circ\text{C}$ .

**SCBH 2011**

Le refuge est isolé par  $317 \text{ m}^3$  de laine de bois de masse volumique  $\rho_b = 55 \text{ kg.m}^{-3}$  et de capacité thermique massique  $c_b = 2100 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ .

3) a- Calculer la Capacité thermique  $C$  de la totalité de l'isolant.

On suppose que pendant la nuit, la puissance thermique moyenne à travers les parois vaut  $7,00 \text{ kW}$  et qu'elle est fournie par l'isolant thermique au milieu extérieur.

b- Calculer l'énergie  $Q_1$  perdue à travers les parois du refuge pendant une nuit de  $12 \text{ h}$ .

c- En déduire la variation de température de l'isolant au cours de la nuit.