

**Richard Maudit**

Professeur en BTS  
au lycée Robert Schuman (Le Havre)

# Thermodynamique en 20 fiches

DUNOD

Tout le catalogue sur  
[www.dunod.com](http://www.dunod.com)



Le pictogramme qui figure ci-contre mérite une explication. Son objet est d'alerter le lecteur sur la menace que représente pour l'avenir de l'écrit, particulièrement dans le domaine de l'édition technique et universitaire, le développement massif du photocopillage.

Le Code de la propriété intellectuelle du 1<sup>er</sup> juillet 1992 interdit en effet expressément la photocopie à usage collectif sans autorisation des ayants droit. Or, cette pratique s'est généralisée dans les établissements

d'enseignement supérieur, provoquant une baisse brutale des achats de livres et de revues, au point que la possibilité même pour

les auteurs de créer des œuvres nouvelles et de les faire éditer correctement est aujourd'hui menacée. Nous rappelons donc que toute reproduction, partielle ou totale, de la présente publication est interdite sans autorisation de l'auteur, de son éditeur ou du

Centre français d'exploitation du droit de copie (CFC, 20, rue des Grands-Augustins, 75006 Paris).



© Dunod, Paris, 2013

ISBN 978-2-10-058830-5

Le Code de la propriété intellectuelle n'autorisant, aux termes de l'article L. 122-5, 2° et 3° a), d'une part, que les « copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective » et, d'autre part, que les analyses et les courtes citations dans un but d'exemple et d'illustration, « toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droit ou ayants cause est illicite » (art. L. 122-4).

Cette représentation ou reproduction, par quelque procédé que ce soit, constituerait donc une contrefaçon sanctionnée par les articles L. 335-2 et suivants du Code de la propriété intellectuelle.

# Table des matières

## Partie 1 : Thermométrie et transferts thermiques

Fiche 1	La température et sa mesure	5
Fiche 2	Chaleur – Calorimétrie	11
Fiche 3	Transferts thermiques	17
Fiche 4	Échangeurs thermiques	26
Fiche 5	Rayonnement thermique	33

## Partie 2 : Gaz parfaits et gaz réels

Fiche 6	Gaz parfaits et gaz réels	42
---------	---------------------------	----

## Partie 3 : Premier principe de la thermodynamique

Fiche 7	Travail des forces de pression	50
Fiche 8	Premier principe de la thermodynamique	59
Fiche 9	Loi de Laplace et récapitulatif	67

## Partie 4 : Deuxième principe de la thermodynamique

Fiche 10	Cycles thermodynamiques	75
Fiche 11	Cycles moteurs	80
Fiche 12	Cycles récepteurs	89
Fiche 13	Deuxième principe de la thermodynamique	94
Fiche 14	Diagramme $(T, S)$ et entropie du gaz parfait	101

## Partie 5 : Changements d'état d'un corps pur

Fiche 15	Changements d'état physique du corps pur	110
Fiche 16	Équilibre liquide-vapeur	116
Fiche 17	Diagrammes enthalpiques	126

## Partie 6 : Dynamique des fluides compressibles

Fiche 18	Dynamique des fluides compressibles	135
Fiche 19	Théorème d'Hugoniot	144

## Partie 7 : Air humide – Psychrométrie

Fiche 20	Air humide – Psychrométrie	151
----------	----------------------------	-----

# La température et sa mesure

## I Introduction

La sensation de chaud et de froid conduisent à la notion de température, or, il faut distinguer température et chaleur (en effet, un corps peut recevoir un transfert thermique  $Q$  sans que sa température  $T$  change).

La température d'un corps est une grandeur caractéristique de l'état de ce corps (de même que sa masse, son volume...).

Un système dont la température est la même en tout point est dit en équilibre thermique. Les changements d'états physiques des corps purs se produisent toujours, sous pression donnée, aux mêmes températures qui constituent donc des repères thermométriques.

## II Thermomètre et température absolue

### ► Thermomètre

Un thermomètre est un dispositif qui se met en équilibre thermique avec le corps dont on veut connaître la température (notée  $\theta$  provisoirement). Une des propriétés physiques  $G$  (facilement mesurable) du thermomètre est liée à la température  $\theta$  par la relation  $G = f(\theta)$  :  $G$  est la grandeur thermométrique et  $G = f(\theta)$  est l'équation thermométrique.

### ► Phénomènes thermométriques

Les variations de température d'un corps sont repérables grâce à des thermomètres exploitant des phénomènes physiques variés :

- thermomètres à liquides (alcool, mercure, pentane...) : phénomène de dilatation des liquides ;
- thermomètres à résistance métallique (platine) : variation de la résistivité des métaux ;
- thermocouples : deux jonctions de deux conducteurs différents portées à des températures différentes donnent naissance à une différence de potentiel ;
- thermomètres à gaz : dilatation des gaz à pression constante.

### ► Échelle de température absolue

La température absolue notée  $T$ , exprimée en kelvins (K), est une mesure de l'agitation thermique des particules constitutives d'un corps.

Le thermomètre utilisé est une masse  $m$  de gaz parfait dont le produit  $PV$  est la grandeur thermométrique. (cf. fiche 6).

À l'aide d'un thermomètre à gaz (gaz réel sous faible pression), et en expérimentant à deux températures  $T_1$  et  $T_2$ , on aboutit, par extrapolation aux basses pressions, à l'expression suivante :

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{\lim_{p \rightarrow 0} (PV)_{T=T_2}}{\lim_{p \rightarrow 0} (PV)_{T=T_1}} \left( \frac{T_2}{T_1} \text{ ne dépend pas de la nature du gaz ; il ne dépend que des} \right.$$

valeurs des températures  $T_1$  et  $T_2$ ).

À l'aide d'un seul repère thermométrique correspondant au point triple III de l'eau (mélange eau liquide-glace-vapeur d'eau en équilibre), on définit l'échelle de température absolue  $T$ .

Par définition,  $T_{\text{III}} = 273,16$  K donc :  $1 \text{ K} = \frac{T_{\text{III}}}{273,16}$ .

### Remarques :

- La température thermodynamique (en K) s'identifie à la température absolue par une relation avec la grandeur entropie  $S$  d'un système en équilibre thermodynamique d'énergie interne  $U$  :

$$T = \left( \frac{\partial U}{\partial S} \right)_V$$

- L'échelle Celsius se déduit de l'échelle de température absolue par la relation :

$$\theta \text{ (}^\circ\text{C)} = T \text{ (K)} - 273,15$$

### Exemple

Par conséquent, un écart de températures exprimé en  $^\circ\text{C}$  est égal au même écart de températures en K :  $\Delta\theta = \Delta T$ .

## III L'échelle Celsius

C'est une échelle affine à deux points fixes :  $\theta_0 = 0$   $^\circ\text{C}$  (glace fondante) et  $\theta_{100} = 100$   $^\circ\text{C}$  (eau bouillante) sous 101 325 Pa. La grandeur thermométrique  $G$  peut être : la pression d'un gaz à volume constant, le volume apparent d'un liquide...

L'équation thermométrique est de la forme  $G = a\theta + b$ .

On note :  $G = G_0$  lorsque  $\theta = \theta_0$  et  $G = G_{100}$  lorsque  $\theta = \theta_{100}$ . On obtient :

$$G_0 = b$$

$$\text{Et : } G_{100} = 100a + G_0 \text{ donc } a = \frac{G_{100} - G_0}{100}$$

L'équation thermométrique se réécrit :  $G = \left( \frac{G_{100} - G_0}{100} \right) \theta + G_0$ .

On en déduit l'expression de la température  $\theta$  :

$$\theta = 100 \times \left( \frac{G - G_0}{G_{100} - G_0} \right)$$

Mesurer  $G$  permet donc d'accéder à la valeur de la température  $\theta$  connaissant les valeurs de  $G_0$  et  $G_{100}$ .

Il y a autant d'échelles Celsius que de phénomènes thermométriques mais elles coïncident toutes, par construction, aux points fixes 0 °C et 100 °C.

**Remarque :** L'échelle Fahrenheit est une autre échelle affine de température avec les deux points fixes suivants :

Mélange d'eau, de glace, de sels : 0 °F et température du sang d'un homme en bonne santé (!!): 100 °F.

Loi de passage entre les 2 échelles  $\theta_{(^\circ\text{C})} = \frac{5}{9}(\theta_{(^\circ\text{F})} - 32)$ .

## Thermomètre non juste

Un thermomètre à colonne de mercure, gradué linéairement est plongé dans de la glace fondante sous la pression atmosphérique normale  $P_0$  : le mercure affleure la graduation  $n = -2$ . Placé dans la vapeur d'eau bouillante sous la pression  $P = P_0$ , le mercure atteint la graduation  $n = 103$  (thermomètre non juste).

1. Dans un bain à la température  $\theta$  sous la pression  $P = P_0$ , le mercure affleure la graduation  $n = 70$ . Déterminez  $\theta$ .
2. Déterminez l'écart qui existe entre la température  $\theta$  et la graduation  $n$  ; on exprimera cet écart sous la forme :  $\theta - n = f(n)$ .
3. Quelle est la température notée  $\theta_1$  pour laquelle aucune correction n'est nécessaire ? Précisez le sens de la correction à apporter à la lecture de la graduation  $n$  pour  $\theta \neq \theta_1$ .

## Solution

1. Le phénomène thermométrique exploité par ce thermomètre est la dilatation apparente du mercure et la loi thermométrique s'écrit :  $n = a\theta + b$ .

On en déduit, d'après le résumé de cours, l'expression de  $\theta$  :

$$\theta = 100 \times \left( \frac{n - n_0}{n_{100} - n_0} \right)$$

Si le thermomètre est juste,  $n_0 = 0$  lorsque  $\theta = 0$  °C et  $n_{100} = 100$  lorsque  $\theta = 100$  °C ; la loi précédente s'écrit alors :  $\theta = n$ .

Le thermomètre non juste (à cause de résidus de dilatation de l'enveloppe de verre) est tel que :  $a = \frac{\Delta n}{\Delta \theta} = \frac{103 - (-2)}{100}$  soit  $a = 1,05 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  et  $b = -2$ . Donc :

$n = 1,05 \theta - 2$  et la température  $\theta$  indiquée par ce thermomètre est :

$\theta = \frac{n + 2}{1,05}$  ; pour une graduation  $n = 70$ , la température est  $\theta = 68,6 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

2. L'écart, noté  $\varepsilon$ , entre la température  $\theta$  et la graduation  $n$ , est :

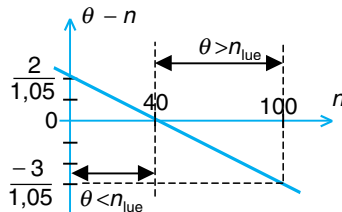
$\varepsilon = \left( \frac{n + 2}{1,05} - n \right)$  soit  $\varepsilon = \frac{-0,05}{1,05}n + \frac{2}{1,05} = f(n)$  (droite décroissante).

3. Aucune correction n'est nécessaire lorsque la fonction écart  $\varepsilon = f(n)$  s'annule. On a donc :  $\frac{0,05}{1,05}n_1 = \frac{2}{1,05}$  soit  $n_1 = \frac{2}{1,05} = 40$  ou  $\theta_1 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Si la fonction écart  $f(n)$  est positive alors  $\frac{-0,05n + 2}{1,05} > 0$  ce qui entraîne :  $n < n_1$ .

Dans ce cas, la température  $\theta$  est supérieure à la graduation  $n$  lue sur le thermomètre. Il faudra donc apporter une correction **positive** à la lecture (par exemple, pour  $n = 20$ , on trouve par calcul  $\theta = 20,95 \text{ } ^\circ\text{C}$  au lieu de  $20 \text{ } ^\circ\text{C}$  pour le thermomètre juste). On peut représenter graphiquement la situation, sachant que si  $n = 0$ ,  $\varepsilon = \frac{2}{1,05}$  et si

$n = 100$ ,  $\varepsilon = \frac{-3}{1,05}$ .



## Sonde de platine

Un thermomètre est constitué par un fil de platine dont la résistance  $R$  varie avec la température. On remplace la loi  $R(\theta)$  où  $\theta$  est la température Celsius, par une relation linéaire affine passant par les deux points fixes correspondants à la température de la glace fondante et de l'eau à l'ébullition.

On mesure alors :  $R_0 = 1,0000 \Omega$  et  $R_{100} = 2,9800 \Omega$

Toutes les mesures sont effectuées sous la pression atmosphérique normale.

On choisit alors une échelle thermométrique centésimale entre 0 et 100.



1. En déduire la température centésimale notée  $\theta_{Pt}$ . À la température d'ébullition de l'acétone, on mesure  $R_a = 2,0267 \Omega$ . Calculer  $(\theta_{Pt})_a$ .

2. Les tables internationales donnent pour la température d'ébullition de l'acétone :  $t_a = 51,60 \text{ }^\circ\text{C}$ .

L'écart entre  $(\theta_{Pt})_a$  et  $t_a$  est du à la variation de  $R$  avec  $t$  ; en effet , la loi de variation de  $R$  avec  $t$  est :  $\mathbf{R = A + Bt + Ct^2}$  où  $t$  est la température exprimée en degré Celsius. Exprimez l'écart  $\varepsilon = \theta_{Pt} - t$  en fonction de  $t$ . Montrez que cet écart est maximal pour  $t = t_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Solution

1. On a :  $\theta_{Pt} = 100 \times \left( \frac{R - R_0}{R_{100} - R_0} \right)$ . Connaissant  $R_a$ , on calcule la température d'ébullition de l'acétone :  $(\theta_{Pt})_a = 51,85 \text{ }^\circ\text{C}$ .

2. La fonction écart  $\varepsilon = f(t)$  admet pour racines  $t_1 = 0 \text{ }^\circ\text{C}$  et  $t_2 = 100 \text{ }^\circ\text{C}$  puisque les deux lois de variation de  $R$  en fonction de la température coïncident aux températures  $t_1$  et  $t_2$ . L'expression de  $f(t)$  est donc :

$$f(t) = k(t - t_1)(t - t_2) \text{ soit ici : } f(t) = \varepsilon = kt(t - 100) \text{ où } k \text{ est une constante.}$$

L'écart  $\varepsilon$  est maximal lorsque sa dérivée s'annule :  $\left( \frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{t=t_m} = 0$ , or :

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = k(2t - 100) \text{ donc } \left( \frac{d\varepsilon}{dt} \right)_{t=t_m} = 0 = 2t_m - 100 \text{ soit } t_m = 50 \text{ }^\circ\text{C}.$$

La correction à apporter n'est pas négligeable puisque  $(\theta_{Pt})_a$  est voisine de  $t_m$ .

### Relation température / résistance d'un filament

La résistivité  $\rho$  d'un fil métallique dépend de la température donc la résistance élec-

trique du fil en dépend aussi puisque  $R = \rho \frac{L}{S}$ .

( $L$  : longueur du fil et  $S$  sa section droite)

$\rho$  est une grandeur intrinsèque du matériau alors que  $R$  dépend, en plus, des caractéristiques géométriques du conducteur. L'intérêt d'utiliser  $R$  plutôt que  $\rho$  réside dans sa facilité de mesure.

On se propose d'utiliser un modèle expérimental de la variation de la résistance d'un filament d'ampoule électrique en tungstène en fonction de sa température. Des mesures expérimentales de la variation de la résistivité  $\rho$  du tungstène ont été faites par Jones et Langmuir.

Le comportement  $\rho = \rho(T)$  est modélisé par la fonction  $\rho = aT^2 + bT$ .  
 $a = 2,54 \times 10^{-14}$  SI ;  $b = 2,30 \times 10^{-10}$  SI

1. Calculez la résistivité  $\rho$  à 300 K et à 2 400 K à l'aide du modèle choisi. Par quel facteur est multipliée cette résistivité entre ces deux températures ?

2. Le fabricant d'ampoule électrique prévoit une température du filament de 2 400 K dans les conditions normales de fonctionnement (à savoir 6,0 V et 0,55 A en continu).

Le rayon du filament est  $r = 0,03$  mm.

Déterminez  $R$  ; en déduire sa longueur  $L$ .

3. À partir de la connaissance de  $R$ , on va montrer que l'on peut déterminer la température du filament de l'ampoule.

3.1. À partir du modèle précédemment choisi pour  $\rho(T)$ , donnez l'expression de la température  $T$  en fonction notamment de  $R$  et de la constante  $C = \frac{R(T_0)}{\rho(T_0)}$ .  
 On suppose les dimensions du filament invariables.

3.2. Comment procéder pour connaître la température du filament ?

## S o l u t i o n

1. Les calculs donnent  $\rho(300) = 7,1310^{-8} \Omega \cdot m$  et  $\rho(2\,400) = 6,98 \cdot 10^{-7} \Omega \cdot m$ .

La résistivité est donc multipliée par un facteur voisin de 10.

2. La valeur de la résistance est donnée par la loi d'Ohm :  $R = \frac{U}{I} = 11 \Omega$ .

La section du fil cylindrique est  $S = \pi r^2$ . On en déduit l'expression de la longueur du

filament :  $L = \frac{R\pi r^2}{\rho(2\,400)} = 4,4$  cm.

3. La relation  $\rho = aT^2 + bT$  est l'équation du second degré dont l'inconnue est  $T$  :  
 $aT^2 + bT - \rho = 0$ .

La racine positive donne la solution :  $T = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a\rho}}{2a}$ .

Comme  $R = \rho \frac{L}{S}$  et  $R(T_0) = \rho(T_0) \frac{L}{S}$ , on a :  $\frac{R}{\rho} = \frac{R(T_0)}{\rho(T_0)}$ .

Ce qui donne  $\rho = \frac{\rho(T_0)R}{R(T_0)} = \frac{R}{C}$ . La température  $T$  du filament est alors :

$$T = \frac{-b + \sqrt{b^2 + 4a \frac{R}{C}}}{2a}$$

3.2. Pour calculer  $T$ , on mesure  $R$  (par la méthode voltampèremétrique par exemple) ;  
 $a$  et  $b$  sont des données extraites de tables et  $C$  est calculable.

# Chaleur – Calorimétrie

## I Transfert thermique ou chaleur

### ► Définition

Un solide ou un fluide de masse  $m$ , au repos, dont la température  $T$  est constante, est constituée de particules (atomes, molécules, ions...) animées d'un mouvement d'agitation désordonné. Cette agitation dépend de la température  $T$ .

Lorsque le corps reçoit ou cède de l'énergie avec l'extérieur qui tend à modifier l'agitation désordonnée des particules, on dit qu'un transfert thermique (ou transfert de chaleur), noté  $Q$ , a lieu.

La chaleur  $Q$  est un mode de transfert de l'énergie (au même titre que le travail) et s'exprime en joules (J).

Par abus de langage, on parle de quantité de chaleur au lieu de transfert thermique ou d'énergie thermique transférée.

### ► Calorimétrie

C'est l'ensemble des méthodes permettant la mesure des transferts thermiques  $Q$  entre un système et l'extérieur du système.

**Par convention, le signe de  $Q$  est positif si le système reçoit la chaleur du milieu extérieur ; il est négatif dans le cas contraire.**

Le transfert thermique  $Q$ , lorsqu'il est spontané, se fait toujours du corps de plus grande température (corps « chaud ») vers le corps de plus petite température (« corps froid »).

Les mesures calorimétriques peuvent être réalisées dans des enceintes à **parois adiabatiques** (ou calorimètres parfaits) empêchant les échanges thermiques avec l'extérieur.

Pour un calorimètre réel, les échanges thermiques avec l'extérieur sont très faibles à condition que la durée de l'expérience soit petite.

Lorsque  $N$  corps sont placés dans un calorimètre, les transferts thermiques entre eux sont tels que  $\sum_{i=1}^{i=N} Q_i = 0$ .

### ► Expressions des transferts thermiques

#### Sans changement d'état physique

Le transfert thermique élémentaire  $\delta Q$  qui amène la température d'une masse  $m$  d'un corps homogène de la valeur  $T_1$  à la valeur  $T_2 = T_1 + dT$  est :

$$\delta Q = mc dT$$

$c$  est appelée capacité thermique massique et caractérise le corps ( $c$  en  $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ). La valeur de  $c$  dépend de l'état physique du corps ainsi que de la température  $T$ . Lorsque la température du corps varie de  $\Delta T = T_f - T_i$ , le transfert thermique s'écrit :

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} \delta Q = mc_{\text{moy}} \Delta T$$

On pose  $C = mc_{\text{moy}}$  où  $C$  est la capacité thermique du corps homogène donc :  $Q = C\Delta T$ .

Si le corps est composé de  $N$  parties homogènes, alors  $C = \sum_{i=1}^N C_i$ . (On écrira par la suite  $c$  au lieu de  $c_{\text{moy}}$ ).

**Remarque :** En raisonnant sur la quantité de matière  $n$ , en mol, correspondant à la masse  $m$ , on écrira  $Q = nC_m\Delta T$  ( $C_m$  est la capacité thermique molaire du corps).

Par identification, on a :  $mc = nC_m$ .

Puisque  $n = \frac{m}{M}$  ( $M$  : masse molaire du corps) alors  $C_m = Mc$ .

En pratique, le transfert thermique peut s'effectuer de deux façons :

- Si le volume du système ne varie pas, le transfert thermique, noté  $Q_V$ , s'écrit :  $Q_V = mc_V\Delta T$ .
- Si la pression imposée au système reste constante, le transfert thermique, noté  $Q_P$ , s'écrit :  $Q_P = mc_P\Delta T$  (le transfert thermique a souvent lieu à pression atmosphérique constante).  $c_V$  et  $c_P$  sont respectivement les capacités thermiques massiques à volume constant et à pression constante.

Pour un solide ou liquide (phases condensées), la différence  $(c_P - c_V) \rightarrow 0$  et on notera  $c$  (sans autre précision) la capacité thermique massique (moyenne) sur l'intervalle  $\Delta T$ .

Pour un gaz, on a toujours  $c_P > c_V$  sur le même intervalle  $\Delta T$ . On introduit le coefficient  $\gamma = \frac{c_P}{c_V}$  ( $> 1$ ) appelé exposant adiabatique.

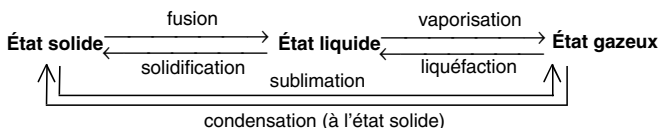
- Si la température du système évolue sans transfert thermique avec l'extérieur ( $Q = 0$ ), la transformation est **adiabatique**.

### Avec changement d'état physique

Lors d'un changement d'état physique d'un corps pur, le transfert thermique  $Q$ , sous pression constante, n'élève pas sa température. Il y a corrélativement une réorganisation complète de la structure du corps pur.

On écrit alors à pression et température constantes du changement d'état :  $\delta Q = dm \cdot l(T)$  où  $dm$  est la masse de corps pur qui change d'état physique et  $l(T)$  est la chaleur latente massique de changement d'état qui dépend de la température  $T$  de changement d'état. On obtient pour la masse  $m$  :

$$Q = ml(T)$$



Lorsque  $Q > 0$ , le changement d'état augmente le désordre interne du corps pur donc  $l(T) > 0$  : c'est le cas pour  $l_{\text{fus}}$ ,  $l_{\text{vap}}$  et  $l_{\text{sub}}$ . Pour toute température de changement d'état physique d'un corps pur, on a :  $l_{\text{sol}} = -l_{\text{fus}}$ ,  $l_{\text{liq}} = -l_{\text{vap}}$  et  $l_{\text{cond}} = -l_{\text{sub}}$ .

## Fusion d'un corps pur : l'étain

On utilise le dispositif représenté ci-après.

### Données :

Masse de l'échantillon d'étain :  $m = 100 \text{ g}$ .

Température de fusion de l'étain :  $T_f = 505 \text{ K}$ .

Température initiale du système :  $T_1 = 298 \text{ K}$ .

Température finale du système :  $T_2 = 550 \text{ K}$ .

Chaleur latente de fusion de l'étain :  $l_{\text{fus}} = 59800 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$

Capacité thermique de l'étain : (valeurs moyennes sur les intervalles considérés).

- solide, sur l'intervalle  $[T_1, T_f]$  :  $c_1 = 245 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- liquide, sur l'intervalle  $[T_f, T_2]$  :  $c_2 = 252 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Le four consomme une puissance électrique  $P = 50 \text{ W}$  et l'échantillon ne reçoit que 75 % de l'énergie correspondante.

1. Quelle est la quantité de chaleur  $Q_1$  nécessaire pour élever la température de l'échantillon de  $T_1$  à  $T_f$  ? Quelle est la durée  $t_1$  de cette opération ?
2. Quelle est la quantité de chaleur  $Q_2$  nécessaire pour fondre l'échantillon ? Quelle est la durée  $t_2$  de cette opération ?
3. Quelle est la quantité de chaleur  $Q_3$  nécessaire pour élever la température de l'échantillon de  $T_f$  à  $T_2$  ? Quelle est la durée  $t_3$  de cette opération ?
4. Représentez graphiquement les variations de la température de l'échantillon en fonction du temps.

