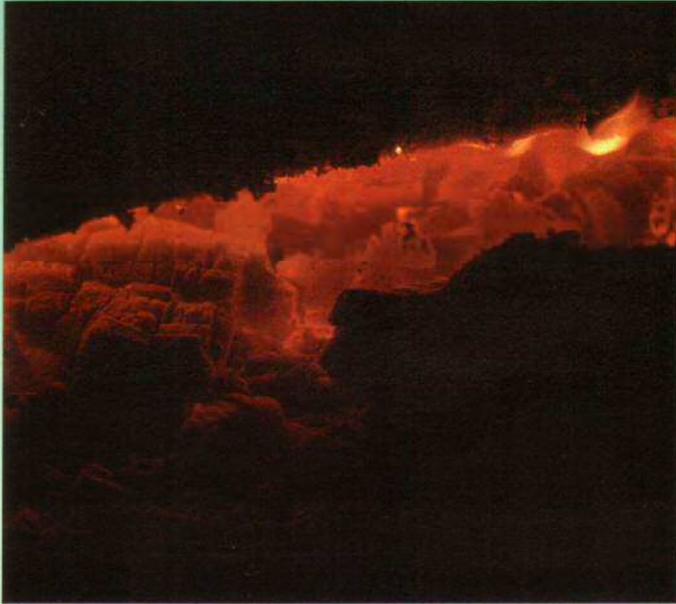


Chapitre 36. La dilatation des solides

Peut-être avez-vous déjà été surpris d'entendre des craquements dans le moteur d'une voiture que l'on vient d'arrêter ou au voisinage d'une plaque électrique, juste après l'avoir éteinte. Ces bruits sont dus aux effets des variations de la température sur la matière. Pour éviter des inconvénients, des dispositifs spéciaux sont parfois nécessaires : joint de dilatation de rails de chemin de fer, par exemple.

CHALEUR



1 Dilatation et contraction

Les dimensions d'un corps solide augmentent lorsque sa température s'élève; c'est le phénomène de la **dilatation**. À l'inverse, ses dimensions diminuent lorsque la température s'abaisse et l'on parle de **contraction**.

Si le corps est de forme allongée, comme une tige, on remarque surtout sa variation de longueur; on parle d'une dilatation linéaire.

En fait, toutes les dimensions du corps varient, produisant ainsi un changement global de son volume; c'est la dilatation volumique.



Lyre de dilatation : à quoi sont destinés les coudes de la canalisation ?

2 Le coefficient de dilatation linéaire

EXPERIENCE Différents appareils permettent d'étudier les dilatations. Dans un dilatomètre, une tige métallique de longueur l_1 , fixée à une extrémité, est chauffée uniformément. Le faible déplacement de son autre extrémité est mis en évidence par l'aiguille et peut être mesuré. On note cette mesure Δl (delta l) qui signifie « variation de la grandeur l ». Un thermomètre indique les températures θ_1 et θ_2 de la barre avant et après le chauffage.



Dilatomètre. Une tige métallique fixée à une extrémité est chauffée par un réchaud à alcool. Le déplacement de son autre extrémité est repéré par une aiguille.

En prenant plusieurs tiges de longueurs et de substances différentes, on vérifie que l'allongement Δl de chaque tige :

- est proportionnel à sa longueur initiale l_1 ;
- est proportionnel à sa variation de température $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$;
- dépend du matériau qui la constitue.

Ces propriétés s'expriment par la relation

$$\Delta l = \alpha \cdot l_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1)$$

$$= \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta\theta$$

Le facteur de proportionnalité α (alpha) caractérise le matériau constituant la tige et s'appelle **coefficient de dilatation linéaire**. Son unité est le $[\text{°C}^{-1}]$ (si les températures sont en $[\text{°C}]$) ou le $[\text{K}^{-1}]$ (si les températures sont en $[\text{K}]$). La valeur de α est indépendante du choix de l'une ou l'autre de ces deux unités.

La longueur l_1 et l'allongement Δl sont exprimés dans les mêmes unités. L'unité de longueur utilisée dans le système international est le [m].

Remarques

- Si une tige s'allonge de un millionième de sa longueur pour une augmentation de température de un degré celsius (ou Kelvin), le coefficient α de la substance qui la constitue vaut un **millionième par degré** : $\alpha = 10^{-6} \text{°C}^{-1}$ ou K^{-1} .
- α peut varier pour une même substance en fonction de la température de départ et de l'écart de température; on peut toutefois le considérer comme constant dans les conditions de la vie courante.
- Si $\theta_2 < \theta_1$, les valeurs de $\Delta\theta$ et Δl sont négatives. Il s'agit d'une contraction.
- Dans tous les cas la longueur finale l_2 de la tige est donnée par :

$$l_2 = l_1 + \Delta l = l_1 + \alpha \cdot l_1 \cdot (\theta_2 - \theta_1)$$

$$= l_1 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\theta)$$

SUBSTANCE	α [°C^{-1}] ou [K^{-1}]
Acier	$11 \cdot 10^{-6}$
Aluminium	$25 \cdot 10^{-6}$
Béton	$10 \cdot 10^{-6}$
Bois de chêne	$-50 \cdot 10^{-6}$
Fer	$12 \cdot 10^{-6}$
Invar	$2 \cdot 10^{-6}$
Latron	$18 \cdot 10^{-6}$
Vere ordinaire	$9 \cdot 10^{-6}$
Vere pyrex	$3 \cdot 10^{-6}$

Quelques coefficients de dilatation linéaire.

3 Ordre de grandeur

Calculons l'allongement Δl d'une barre de fer de 1 m sous une augmentation de température de 100 °C.

Le coefficient de dilatation linéaire du fer vaut :

$$\alpha_{\text{fer}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{°C}^{-1}$$

$$\Delta l = 12 \cdot 10^{-6} \text{°C}^{-1} \cdot 1 \text{ m} \cdot 100 \text{°C} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m} (= 1,2 \text{ mm})$$

Les allongements dus aux dilatations sont très petits. Ils peuvent toutefois avoir de graves conséquences pratiques si l'on n'en tient pas compte. Les ponts, par exemple, seraient soumis, lors de leur dilatation, à des forces suffisantes pour les déformer. C'est la raison pour laquelle on ménage des espaces entre les éléments du pont et à ses extrémités; ce sont les joints de dilatation.



Joint de dilatation.

4 Le bilame

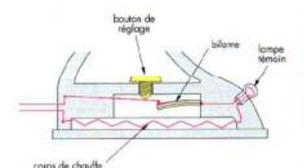
Un bilame est constitué de deux lames de matériaux différents soudés ensemble. Les deux lames subissent des dilatations différentes et un bilame initialement droit se courbe quand on le chauffe. Cette propriété est utilisée dans de nombreux dispositifs.

Pour maintenir la température constante dans un espace donné (pièce d'habitation, four, chambre froide, séchoir), on équipe les appareils d'un thermostat, qui est un dispositif qui contrôle et régule la température.

On équipe les fers à repasser d'un thermostat à bilame. Dans ce type de thermostat, un bilame, en se courbant, actionne un interrupteur qui ouvre ou ferme le circuit électrique de chauffage. Un bouton de réglage permet de courber à l'avance le bilame et donc de régler la température à laquelle le chauffage s'enclenche.



Thermostat d'un fer à repasser.



Régulation thermique d'un fer à repasser.

5 La variation de volume

La variation de volume ΔV d'un corps solide sous l'effet d'une variation de température $\Delta\theta$:

- est proportionnelle à son volume initial V_1 ;
- est proportionnelle à sa variation de température $\Delta\theta$;
- dépend du matériau qui constitue ce solide.

$$\Delta V = \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\theta$$

Le facteur de proportionnalité γ (gamma), caractéristique de la substance, est appelé **coefficient de dilatation volumique**.

Sa valeur vaut approximativement le triple de celle du coefficient de dilatation linéaire

$$\gamma \approx 3\alpha$$

et son unité est le $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou le K^{-1} suivant le choix de l'échelle de température. Le volume et sa variation sont en $[\text{m}^3]$ dans le système international.

Le volume final V_2 du corps est donné par:

$$V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\theta = V_1 \cdot (1 + \gamma \cdot \Delta\theta)$$



Dilatation d'une sphère de laiton.

6 Contenance des récipients

L'expérience de la figure ci-contre montre que les cavités se dilatent de la même manière que les parties pleines. Il en résulte que la contenance des récipients augmente quand la température augmente. Sur les récipients gradués destinés à la mesure du volume d'un liquide figure la valeur de la température pour laquelle la graduation est fiable.

8 Lien entre dilatation linéaire et dilatation volumique

Considérons un cube d'arête l_1 (figure ci-contre). Son volume initial est

$$V_1 = l_1^3$$

Sous l'effet d'un changement de température $\Delta\theta$, chaque arête devient

$$l_2 = l_1 + \Delta l$$

Son volume final est

$$V_2 = l_2^3 = (l_1 + \Delta l)^3 = l_1^3 + 3l_1^2 \cdot \Delta l + 3l_1 \cdot \Delta l^2 + \Delta l^3$$

Prenons l'exemple d'un cube de fer d'arête $l_1 = 1\text{m}$ subissant une augmentation de température $\Delta\theta = 100^{\circ}\text{C}$.

Calculons la valeur numérique de chaque terme de l'expression ci-dessus. Pour mieux les comparer, nous exprimons les résultats en $[\text{cm}^3]$.

$$\alpha_{\text{fer}} = 12 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

$$\Delta l = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$l_1^3 = 1 \text{ m}^3 = 1\,000\,000 \text{ cm}^3$$

$$3l_1^2 \cdot \Delta l = 3,60 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 = 3\,600 \text{ cm}^3$$

$$3l_1 \cdot \Delta l^2 = 4,32 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 = 4,32 \text{ cm}^3$$

$$\Delta l^3 = 1,73 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 = 0,0017 \text{ cm}^3$$

Les deux derniers termes de l'expression calculée ont une valeur négligeable comparée aux autres. On n'en tient pas compte dans l'expression algébrique qui donne V_2 .

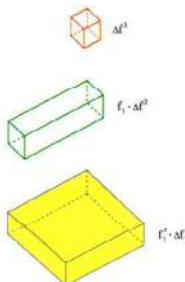
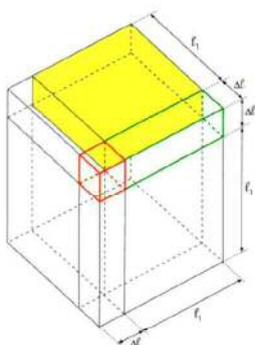
Il reste:

$$V_2 = l_1^3 + 3l_1^2 \cdot \Delta l = V_1 + 3l_1^2 \cdot \Delta l$$

On retrouve ainsi la relation:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = 3l_1^2 \cdot \Delta l = 3l_1^2 \cdot \alpha \cdot l_1 \cdot \Delta\theta = 3\alpha \cdot V_1 \cdot \Delta\theta$$

L'opération qui consiste à enlever d'une expression les termes dont la valeur numérique est négligeable est une approximation.



7 Masse et volume

Quelle que soit l'expérience réalisée, on peut vérifier que la masse de l'objet dilaté (ou contracté) ne change pas. Comme son volume change, la **masse volumique d'une substance varie avec la température**.

Les tables numériques font mention de la température de référence θ_0 à laquelle correspondent les valeurs des masses volumiques ρ_0 indiquées. On peut ainsi trouver la valeur de la masse volumique ρ à n'importe quelle température θ .

Considérons un corps fait d'une substance donnée, de masse m et de volume V_0 à la température θ_0 . La masse volumique à cette température vaut

$$\rho_0 = \frac{m}{V_0}$$

À la température θ , le volume du corps est:

$$V = V_0 [1 + 3\alpha (\theta - \theta_0)]$$

et la masse volumique s'obtient par:

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{m}{V_0 [1 + 3\alpha (\theta - \theta_0)]} = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha (\theta - \theta_0)}$$

EXERCICES

1 Vrai ou faux ?

- Si une tige chauffée s'allonge, c'est parce que son diamètre diminue.
- Tous les métaux, dans les mêmes conditions, se dilatent de manière identique.
- La contraction est le phénomène inverse de la dilatation.
- Un bimétre est une lame partiellement fendue.
- Un thermostat est un dispositif qui permet de régulariser une température.
- Les cavités (ou creux) d'une pièce ne se dilatent pas.

2

Les récipients de laboratoire sont gradués à 20°C . Pour faire des mesures précises, il faut s'en servir à cette température.

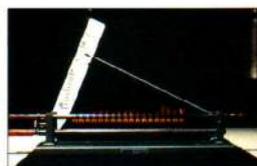
Pourquoi ?

3

On utilise le montage de la figure ci-dessous pour étudier la dilatation d'une tige métallique. L'aiguille tourne quand on chauffe la tige.

Pourquoi et dans quel sens ?

Que se passerait-il si la tige était fixée à ses deux extrémités ?



4

Sur les parois des immeubles de grande longueur, on observe parfois des joints de dilatation (lignes rectilignes, verticales).

Quel est leur rôle ?

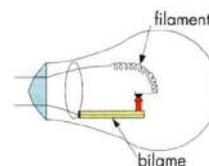
5

Prendre une règle en matière plastique, la poser sur une planchette et piquer deux pointes de façon à ce que la règle passe juste entre elles. Tremper longuement la règle dans de l'eau très chaude puis essayer de la repasser entre les pointes.

Recommencer avec une règle en métal.

Comparer et conclure.

6 Faire un schéma expliquant le fonctionnement de la lampe éclosoyante représentée sur la figure ci-dessus.

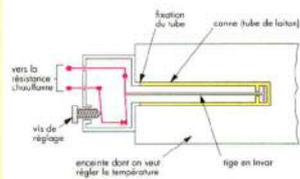


7

Le réglage de la température de la semelle d'un fer à repasser se fait à l'aide d'un thermostat à bilame. Expliquer son fonctionnement.

8

Le thermostat «à canne» est utilisé dans les chauffe-eau électriques.



Reproduire son schéma et représenter sur un second schéma les pièces dilatées ou déplacées quand la température de réglage est atteinte.

Comment règle-t-on cette température ?

9

L'une des lames d'un bimétre est très souvent en Invar.

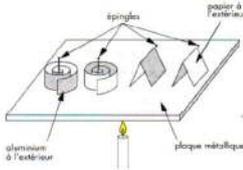
Quel est l'avantage par rapport à un bimétre constitué de deux métaux usés ?

Rechercher l'origine du nom «Invar» ainsi que la composition de cet alliage qui fut inventé par Charles Edouard Guillaume (1861-1938), physicien suisse et prix Nobel de physique en 1920.

EXERCICES

10 Avec un morceau de papier métallisé, on réalise différents bilames que l'on place sur une plaque métallique préalablement chauffée ou au-dessus de la flamme d'une bougie.

Comment vont-ils se déformer ? Pourquoi ?



Expliquer le fonctionnement du thermomètre métallique.



11 Rivet à chaud consiste à chauffer fortement un rivet avant de le poser.

Quel est l'avantage de cette façon de procéder ?



12 Que vaut l'allongement d'un fil électrique en cuivre de 50 m de long dont la température passe de -10°C à $+20^{\circ}\text{C}$?

13 Les extrémités de certains ponts reposent sur des rouleaux. Pourquoi ?



14 Un flacon en verre pyrex a une capacité de 500 ml à 20°C .

Calculer sa capacité à 60°C .
Note: $\lambda_{\text{pyrex}} = 3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$

15 Les dimensions (linéaires) d'un objet varient de 0,2% sous l'effet d'un écart de température.

Quelles sont les variations relatives de sa surface et de son volume ?

16 Calculer la masse volumique de l'alcool à 10°C et à 25°C .

A partir de ces résultats, expliquer le fonctionnement de l'appareil ci-dessous.



17 Les balanciers d'horloge

Dans les horloges mécaniques, c'est le balancier qui sert de régulateur de vitesse pour le mouvement des aiguilles.

Pour comprendre le principe de cette régulation, il suffit de suspendre un petit objet (gomme, taille-crayon) au bout d'un fil à coudre, et de modifier la longueur du fil pendant que l'objet se balance.



Que se passe-t-il lorsque le balancier d'une horloge s'allonge sous l'effet d'une augmentation de température ?

Ce schéma montre comment sont construits les balanciers de certains horloges.

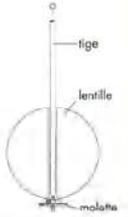
La lentille coulisse sur la tige du balancier et repose sur une molette de réglage vissée à cette tige.

La masse de la tige est petite, comparée à la masse de la lentille.

Grâce à cette construction, la distance séparant l'axe O du centre de gravité du balancier ne varie pratiquement pas avec la température.

a) Comment cela est-il possible ?

b) Expliquer le rôle de la molette de réglage.



18 Le sertissage de pièces mécaniques

Certaines pièces d'un moteur automobile emboîtées l'une dans l'autre doivent rester fortement serrées, de même que le centre d'une roue de wagon sur son bandage. Pendant très longtemps, ce genre d'ajustement s'est fait en chauffant l'une des deux pièces avant de les emboîter; ensuite, il s'est fait en refroidissant l'autre pièce dans l'azote liquide (-196°C).

Actuellement, on trempe l'une des pièces dans l'azote liquide tandis que l'autre est chauffée légèrement, puis on réalise l'emmanchement.

Une autre méthode consiste à écarter la matière. Cette méthode est couramment utilisée pour servir les cosses de fils électriques.



Corrigé des exercices

La dilatation des solides

Exercice 1

Toutes les dimensions d'un objet solide augmentent dans les mêmes proportions lorsque sa température s'élève. Il se dilate.

Chaque matière a un coefficient de dilatation qui lui est propre.

Toutes les dimensions d'un objet solide diminuent dans les mêmes proportions lorsque sa température baisse. Il se contracte.

Un bilame est constitué de deux lames de matière fixées l'une à l'autre sur toute leur longueur et dont le coefficient de dilatation est différent (l'une se dilate plus que l'autre pour un même écart de température). Cette différence se traduit par une courbure du bilame lorsque la température varie.

Un thermostat est un dispositif qui permet de maintenir la température d'un objet au-dessus (four de cuisinière) ou au-dessous (congélateur) d'une température choisie.

Toutes les dimensions d'un objet solide, y compris celles des cavités (ou creux), augmentent dans les mêmes proportions lorsque sa température s'élève.

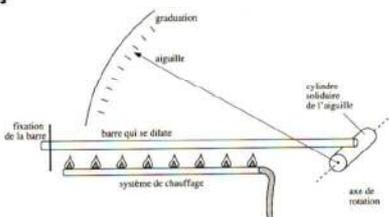
La dilatation des solides

Exercice 2

Les récipients gradués se dilatent et se contractent avec les variations de température. Pour que leur capacité corresponde à la graduation, il faut les utiliser à la température indiquée. Les liquides ayant une dilatation environ vingt fois plus importante que les solides, les différences de température ont une importance plus grande qu'on ne pourrait le déduire en calculant la variation de volume du récipient solide.

La dilatation des solides

Exercice 3



La barre qui se dilate est appuyée sur le cylindre solidaire de l'aiguille et le fait tourner. Le système sera d'autant plus sensible que le rayon du cylindre sera petit et que l'aiguille sera longue.

Les forces de dilatation sont très grandes. Si on fixe la barre aux deux extrémités, soit elle casse le système de fixation, soit elle se plie.

La dilatation des solides

Exercice 4

Les joints de dilatation sur les édifices (sur les ponts et autres constructions de grandes dimensions) sont destinés à permettre aux éléments de la construction de se dilater sans se fendre ou faire des dégâts à d'autres parties de la construction.

La dilatation des solides

Exercice 5

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

La dilatation des solides

Exercice 6

Sur le schéma de la donnée, le courant électrique peut passer puisque les parties rouge et noire sont en contact. Lorsqu'on branche cette ampoule, elle va s'allumer et la température va rapidement monter (95% de l'énergie est transformée en chaleur).

Le bilame est tourné de telle manière qu'il se tord vers le bas lorsque sa température augmente; il va donc séparer le contact rouge du contact noir et le courant électrique sera interrompu. La lampe s'éteint.

En se refroidissant, le bilame reprend sa forme de départ, rétablit le contact électrique et le cycle recommence.

La plupart des thermostats fonctionnent sur le même principe. Selon le sens qu'on lui donne, le bilame interrompt le circuit électrique soit quand la température augmente, soit quand elle diminue.

La dilatation des solides

Exercice 7

Voir l'exercice n° 6 de la même série.

La dilatation des solides

Exercice 8

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

Pour le principe de fonctionnement, voir l'exercice n° 6 de la même série.

La dilatation des solides

Exercice 9

L'amplitude de mouvement d'un bilame dépend de la différence entre les coefficients de dilatation des deux pièces qui le constituent. L'Invar ne se dilate presque pas, la différence avec un métal se dilatant beaucoup comme l'aluminium sera d'autant plus grande.

La dilatation des solides

Exercice 10

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

La dilatation des solides

Exercice 11

Le rivetage à chaud consiste à placer le rivet après l'avoir fortement chauffé (plusieurs centaines de degrés). En se refroidissant, il se contracte et serre très fort les plaques qu'il doit assembler.

$$\alpha = \frac{\Delta l}{l_0 \cdot \Delta \theta} \Rightarrow \Delta l = l_0 \cdot \alpha \cdot \Delta \theta = 50 \text{ m} \cdot 17 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 30^\circ\text{C} = 25,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ce fil de cuivre se dilate d'environ 25 millimètres.

Ces rouleaux sont des joints de dilatation; les constructions métalliques subissent des dilatations particulièrement importantes (voir l'exercice 4 dans la même série).

$$\lambda = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta \theta} \Rightarrow \Delta V = V_0 \cdot \lambda \cdot \Delta \theta = 500 \text{ ml} \cdot 3 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 40^\circ\text{C} = 0,06 \text{ ml}$$

La capacité du flacon augmente de 0,06 ml, elle vaut 500,06 ml.

Les liquides ayant une dilatation environ vingt fois plus importante que les solides, les différences de température ont une importance plus grande qu'on ne pourrait le déduire en calculant la variation de volume du récipient solide.

Pour illustrer ce problème, prenons un cube dont l'arête se dilate de 100 mm à 100,2 mm (augmentation de 0,2%).

L'aire d'une face augmente de 10 000 mm² à 10 040 mm² (augmentation de 0,4%).

Le volume augmente de 1 000 000 mm³ à 1 006 012 mm³ (augmentation de 0,6%).

En valeur relative et en arrondissant les calculs, la surface augmente deux fois plus que la longueur, le volume trois fois plus.

$$\text{Masse volumique de l'alcool à } 10^\circ\text{C: } \rho_{10} = \frac{\rho_0}{1 + \gamma \cdot \Delta \theta} = \frac{790 \text{ kg/m}^3}{1 + 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 10^\circ\text{C}} = 781 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Masse volumique de l'alcool à } 25^\circ\text{C: } \rho_{25} = \frac{\rho_0}{1 + \gamma \cdot \Delta \theta} = \frac{790 \text{ kg/m}^3}{1 + 1,1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 25^\circ\text{C}} = 769 \text{ kg/m}^3$$

La dilatation des solides étant environ vingt fois moins grande, un flotteur en verre qui a une masse volumique de 775 kg/m³ à 10°C (il flotte dans l'alcool à cette température) aura, à 25°C, la masse volumique suivante:

$$\rho = \frac{\rho_0}{1 + 3\alpha \cdot \Delta \theta} = \frac{775 \text{ kg/m}^3}{1 + 27 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \cdot 15^\circ\text{C}} = 774,7 \text{ kg/m}^3$$

Cette différence est négligeable et il coulera à cette température. Il est donc possible de régler différents flotteurs pour qu'ils coulent chacun à une température bien déterminée. Cet appareil est un *thermomètre à flotteurs*.

a) La tige est généralement construite en Invar et sa masse est petite comparée à celle de la lentille. Le centre de gravité du balancier est pratiquement au centre de la lentille.

Si seule la tige se dilate, le centre de gravité du balancier descend.

Si seule la lentille se dilate, le centre de gravité du balancier monte.

Pour que ces deux effets se compensent, il faut que les coefficients de dilatation de la tige et de la lentille soient en proportion inverse de la longueur de la tige et du rayon de la lentille. Par exemple une tige en Invar ($\alpha = 2 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) de 27 cm de longueur compense la dilatation d'une lentille en laiton ($\alpha = 18 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$) de 3 cm de rayon.

Cela revient à dire que la dilatation de la longueur ℓ de la tige doit avoir la même valeur que la dilatation du rayon r de la lentille:

$$\Delta \ell_{\text{tige}} = \Delta r_{\text{lentille}} \Rightarrow \ell_{\text{tige}} \cdot \alpha_{\text{tige}} \cdot \Delta \theta = r_{\text{lentille}} \cdot \alpha_{\text{lentille}} \cdot \Delta \theta \Rightarrow \frac{\ell_{\text{tige}}}{r_{\text{lentille}}} = \frac{\alpha_{\text{lentille}}}{\alpha_{\text{tige}}}$$

b) La molette de réglage sert à régler la cadence (période) du balancier. Celle-ci ne dépend en effet que de la distance entre l'axe de rotation du balancier et son centre de gravité.

2 Le coefficient de dilatation volumique

Un liquide n'ayant pas de forme propre, on ne considère que sa dilatation volumique.

Les expériences précédentes montrent que, comme pour les solides, la variation ΔV de volume:

- est proportionnelle au volume initial V_1 ;
- est proportionnelle à la variation de température $\Delta \theta$;
- dépend de la nature du liquide.

$$\Delta V = \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta \theta$$

γ (gamma) est le coefficient de dilatation volumique du liquide. On trouve dans les tables numériques les valeurs de γ pour les différents liquides. Elles sont exprimées en [$^\circ\text{C}^{-1}$] ou en [K^{-1}] selon le choix de l'unité de température.

La valeur de γ dépend de la température, mais on peut la considérer comme constante. Ce n'est toutefois pas le cas de l'eau, dont le coefficient de dilatation varie fortement avec la température.

Le volume final du liquide, après dilatation, est donné par:

$$V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta \theta$$

SUBSTANCE	γ [$^\circ\text{C}^{-1}$ ou K^{-1}]
Alcool (éthanol)	$1,1 \cdot 10^{-4}$
Huile	$0,7 \cdot 10^{-4}$
Mercure	$0,18 \cdot 10^{-4}$

Coefficients de dilatation de quelques liquides.

3 Dilatation des liquides dans des récipients

Quand on chauffe brusquement un récipient contenant un liquide, ses parois se dilatent d'abord et le niveau du liquide descend légèrement. Ensuite, le liquide se dilate à son tour et le niveau remonte au-dessus du niveau initial.

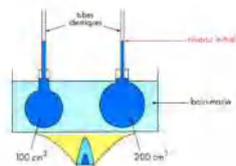
Cela montre que le liquide se dilate plus que le solide du récipient. **En général, pour une même différence de température, les liquides se dilatent plus que les solides.** On peut aussi s'en rendre compte en comparant les valeurs des coefficients de dilatation volumique des solides et des liquides.

Chapitre 37. La dilatation des liquides

Comme les solides, les liquides se dilatent ou se contractent sous l'effet d'un changement de température. Dans le circuit d'eau de chauffage d'un immeuble, il est nécessaire de prévoir un vase d'expansion permettant à l'eau de se dilater. Le thermomètre à liquide est l'application la plus connue de la dilatation des liquides.

1 Expériences

EXPERIENCE On prend des ballons de contenances différentes et renfermant de l'alcool. On mesure les volumes d'alcool à la température ambiante. On les chauffe simultanément à bain-marie et l'on mesure leurs volumes finaux à la nouvelle température. On constate que l'augmentation du volume d'alcool est proportionnelle au volume initial.



Comparaison des dilatations dans le cas de volumes différents.

EXPERIENCE En observant un seul des ballons de l'expérience précédente, on mesure le volume d'alcool pour différentes températures. On constate que la variation du volume d'alcool est proportionnelle à la variation de température.

EXPERIENCE Plusieurs liquides de natures différentes et de même volume initial sont soumis au même écart de température. Leurs volumes finaux ne sont pas les mêmes.

On constate que la variation du volume dépend de la nature du liquide.



De ces trois liquides, alcool, huile et eau, c'est l'alcool qui se dilate le plus.

4 Masse et volume

Quelle que soit l'expérience réalisée, on peut vérifier que la masse du liquide dilaté (ou contracté) ne change pas. Comme pour un solide, la **masse volumique d'un liquide varie avec la température.**

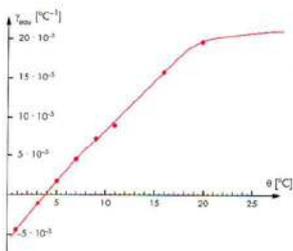
5 Le cas de l'eau

Habituellement, un liquide se dilate lorsque sa température augmente. Ce n'est pas le cas de l'eau qui se contracte lorsque sa température s'élève de 0°C à 4°C. Elle se dilate de nouveau lorsque sa température dépasse 4°C.

Le volume occupé par une masse d'eau donnée est donc minimal à 4°C et par conséquent la masse volumique de l'eau est maximale à 4°C.

θ_1 [°C]	θ_2 [°C]	γ [°C ⁻¹] ou [K ⁻¹]
0	2	$-5 \cdot 10^{-5}$
2	4	$-1,5 \cdot 10^{-5}$
4	6	$1,5 \cdot 10^{-5}$
6	8	$4,5 \cdot 10^{-5}$
8	10	$7,5 \cdot 10^{-5}$
10	12	$9 \cdot 10^{-5}$
12	20	$16 \cdot 10^{-5}$
20	...	$20 \cdot 10^{-5}$

Coefficients de dilatation de l'eau pour des intervalles de température compris entre θ_1 et θ_2 .



Variations du coefficient de dilatation de l'eau en fonction de la température.

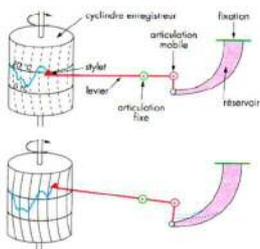


Schéma de principe d'un thermomètre enregistreur. En haut, à 20°C. En bas, à une température supérieure à 20°C.

6 Le thermomètre enregistreur

Dans les endroits où il est important de contrôler les variations de température, (chambres froides, musées, caves, etc.), on installe des thermomètres enregistreurs. Plus particulièrement en météorologie, le thermomètre enregistreur, allié à un hygromètre et à un baromètre, est utile pour prévoir l'évolution du temps.

Certains modèles possèdent un bilame. D'autres utilisent comme capteur un réservoir rempli d'alcool. L'enregistrement se fait sur un cylindre.

Dans le modèle à alcool, le réservoir, en forme de croissant, est rempli de liquide. Lorsque la température augmente, le liquide se dilate et déforme les parois du réservoir. La déformation, amplifiée par un levier, est transmise à un stylet encreur. Le cylindre, entraîné par un mouvement d'horlogerie, fait généralement un tour en une semaine.

EXERCICES

1 Vrai ou faux ?

- Tous les liquides se dilatent de la même manière, dans les mêmes conditions.
- En général, un liquide se dilate plus que le récipient qui le contient.
- Tous les thermomètres sont à liquide.
- La masse d'un liquide augmente quand le liquide se dilate.

2 Quels sont les facteurs qui influent sur la dilatation d'un liquide ?

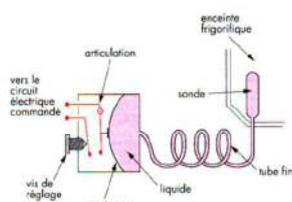
3 Citer un instrument (ou un dispositif) fonctionnant avec la dilatation d'un liquide.

4 La forme du récipient a-t-elle une influence sur la dilatation du liquide contenu ?

5 La figure ci-dessous représente un thermostat d'installation frigorifique.

Que se passe-t-il quand la température de la chambre froide est trop élevée ?

A quoi sert la vis de réglage ?



6 Schématiser une expérience permettant de montrer que la masse d'un liquide ne varie pas quand il se dilate.

7 Donner une raison pour laquelle l'eau n'est pas utilisée comme liquide dans les thermomètres.

8 Pourquoi est-il dangereux de remplir à ras bord un réservoir d'essence en été ?

9 Dans un thermomètre minima-maxima, on considère que la longueur de la colonne de mercure ne varie pas. Pourquoi ?



Quel est le liquide thermométrique ?

A quoi sert le mercure ?

10 On remplit à ras un ballon de verre avec de l'alcool. On ferme ce ballon avec un bouchon traversé par un tube de verre. L'alcool remplit le tube sur quelques centimètres. Il n'y a aucune bulle d'air dans le ballon. On immerge rapidement ce ballon dans un récipient d'eau chaude. Pendant les premières fractions de seconde, on observe que le niveau de l'alcool dans le tube descend légèrement. Ensuite, ce niveau monte fortement.

Expliquer ces observations.

11 Comment la masse volumique de l'eau varie-t-elle en fonction de la température ?

12 On peut affirmer que les eaux du fond d'un lac ou d'un océan sont à environ 4°C. Pourquoi ?

13 Une citerne contient 20000 litres d'huile de chauffage.

Quelle est l'augmentation de volume si sa température moyenne s'élève de 5°C ?

Note: $\gamma_{\text{huile de chauffage}} \approx 1 \cdot 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

14 Une installation moderne de chauffage central

Dans une installation de chauffage, l'eau peut circuler par simple convection, mais cette circulation est lente. C'est la raison pour laquelle toutes les installations actuelles comportent une pompe qui fait circuler l'eau plus rapidement.

L'eau se dilate environ 10 fois plus que les parties métalliques qui la contiennent. Quand elle est chaude, elle n'a plus assez de place dans les canalisations; on installe donc un vase d'expansion.

Dans les anciennes installations, ce vase était situé tout en haut et ouvert à l'air libre. De nos jours, on le place près de la chaudière et on le ferme hermétiquement; il contient un gaz séparé de l'eau par une membrane déformable. *Quel est le rôle de ce gaz ?*

Une chaudière possède un système qui règle le chauffage selon la température maximale désirée pour l'eau (aquastat) ou la température souhaitée dans la maison (thermostat d'ambiance). De plus, pour réguler la température pièce par pièce et par souci d'économie, les radiateurs sont équipés de robinets thermostatiques.

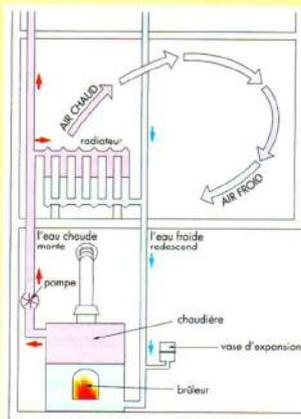
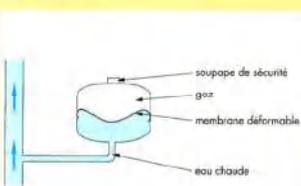


Schéma de principe d'une installation de chauffage central.



Installation de chauffage : vase d'expansion.



Principe des vases d'expansion utilisés actuellement.

Corrigé des exercices

La dilatation des liquides

Exercice 1

- Chaque liquide a un coefficient de dilatation qui lui est propre.
- D'une manière générale, les liquides se dilatent environ 20 fois plus que les solides.
- Il existe plusieurs types de thermomètres qui n'ont pas de partie liquide (thermocouples, bilames, ...)
- La masse est conservée dans les phénomènes physiques, elle ne varie pas.

La dilatation des liquides

Exercice 2

La dilatation d'un liquide, comme celle d'un solide, dépend de la température et de la nature du liquide.

La dilatation des liquides

Exercice 3

Il existe des thermomètres et des thermostats qui utilisent la dilatation d'un liquide (voir l'exercice 5).

La dilatation des liquides

Exercice 4

La forme du récipient n'a pas d'influence sur la dilatation du liquide qu'il contient.

La dilatation des liquides

Exercice 5

La sonde est un réservoir de liquide. Lorsque la température baisse, le volume du liquide diminue et la membrane souple (élastique) se déplace vers la droite et éloigne les deux contacts rouges. Cela interrompt le passage du courant électrique qui alimente le compresseur du réfrigérateur; ce dernier s'arrête de fonctionner.

Lorsque la température remonte dans l'armoire frigorifique, le liquide de la sonde se dilate, pousse la membrane souple vers la gauche, rétablit le contact entre les deux pièces rouges et le compresseur se remet en route.

La vis de réglage sert à régler la température de l'armoire frigorifique.

La dilatation des liquides

Exercice 6

Verser de l'eau chaude dans une bouteille. Fermer la bouteille et la peser sur une balance précise.

Refaire la pesée sans ouvrir la bouteille lorsqu'elle se sera refroidie.

La dilatation des liquides

Exercice 7

L'eau présente la particularité de se dilater lorsqu'on abaisse sa température au-dessous de 4 °C.

La dilatation est même de l'ordre de 10% au moment de la congélation de l'eau. Cette propriété unique de l'eau permet aux glaçons de flotter; ce n'est pas le cas avec d'autres substances. Cela rend très difficile la congélation complète d'un plan d'eau et permet aux animaux de passer l'hiver sous la couche de glace.

Un thermomètre ne peut pas être fiable si le liquide qu'il contient ne se dilate pas de manière régulière.

La dilatation des liquides

Exercice 8

Si l'essence se dilate sous l'effet de la chaleur, le réservoir va déborder.

La dilatation des liquides

Exercice 9

Le mercure se dilate mais de manière négligeable en comparaison de la dilatation de l'alcool du réservoir.

Le liquide thermométrique est de l'alcool.

Le mercure sert à repérer les valeurs de température maximale et minimale.

La dilatation des liquides

Exercice 10

Pour élever la température d'un corps, il faut lui apporter de l'énergie thermique (chaleur). Cet apport se fait de proche en proche. La température du verre augmente avant celle de l'alcool; le verre se dilate en premier et le niveau d'alcool descend dans le tube.

La température de l'alcool met plus de temps à s'élever car la masse de l'alcool est plus importante. Au fur et à mesure que l'alcool se dilate, le niveau remonte dans le tube et même beaucoup plus haut que la position de départ car le coefficient de dilatation volumique de l'alcool est environ quarante fois plus grand que celui du verre.

La dilatation des liquides

Exercice 11

A cause de sa manière particulière de se dilater (voir l'exercice n° 7 de cette série), la masse volumique de l'eau est maximale à 4 °C.

La dilatation des liquides

Exercice 12

A cause de sa manière particulière de se dilater (voir l'exercice n° 7 de cette série), la masse volumique de l'eau est maximale à 4 °C. Pour cette raison, le fond des lacs et des océans est presque toujours à 4 °C.

La dilatation des liquides

Exercice 13

$$\gamma = \frac{\Delta V}{V_0 \cdot \Delta\theta} \Rightarrow \Delta V = V_0 \cdot \gamma \cdot \Delta\theta = 20 \text{ m}^3 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \text{ }^\circ\text{C} = 0,1 \text{ m}^3 = 100 \text{ litres}$$

Le volume de 20 000 litres d'huile de chauffage augmente d'environ 100 litres si la température augmente de 5 °C.

La dilatation des liquides

Exercice 14

Le gaz enfermé dans les vases d'expansion hermétiques permet au liquide du circuit de chauffage de se dilater. Cela protège le système de tuyauterie d'une rupture due à la force de dilatation du liquide qu'il contient.

Chapitre 38. Les gaz parfaits

En été, après exposition au Soleil, on constate qu'un matelas pneumatique relativement peu gonflé devient plus dur: la pression de l'air contenu a augmenté. Il grossit également: le volume d'air contenu a augmenté. En général, lorsque l'on élève la température d'un gaz, son volume et sa pression augmentent. Si la pression reste constante, seul le volume augmente.

1 La dilatation d'un gaz



Un volume V_1 d'air à la température ambiante θ_1 est enfermé dans une seringue bouchée. On la plonge dans un récipient contenant de l'eau chaude à la température θ_2 . Le piston se soulève car le volume d'air emprisonné augmente sous l'effet de l'augmentation de température.

Quand on chauffe un gaz à pression constante, son volume augmente.

On mesure le nouveau volume V_2 .

- L'expérience est répétée avec différents volumes d'air dans la seringue (pour un même écart de température). On constate que l'augmentation de volume ΔV est proportionnelle au volume initial V_1 .
- On prend un volume d'air donné dans la seringue et on l'immerge successivement dans des bacs contenant de l'eau à différentes températures. On constate que l'augmentation de volume ΔV est proportionnelle à l'augmentation de température $\Delta\theta$.

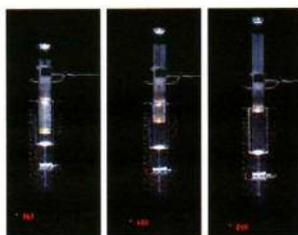
L'augmentation de volume d'un gaz est donnée par

$$\Delta V = \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\theta$$

Comme dans le cas des liquides, γ est le coefficient de dilatation volumique du gaz. Son unité est le $[\text{ }^\circ\text{C}^{-1}]$ ou le $[\text{K}^{-1}]$ selon le choix de l'unité de température.

Le volume V_2 s'obtient à partir du volume V_1 par

$$V_2 = V_1 + \Delta V = V_1 + \gamma \cdot V_1 \cdot \Delta\theta$$



2 La dilatation d'un gaz ne dépend pas de sa nature

Contrairement aux liquides ou aux solides, les gaz se dilatent presque tous de la même façon.

Pour tous les gaz:

$$\gamma \approx \frac{1}{273} \text{ }^\circ\text{C}^{-1} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$$

si les températures sont en $[\text{ }^\circ\text{C}]$, ou

$$\gamma \approx \frac{1}{273} \text{ K}^{-1} = 3,66 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

si les températures sont en $[\text{K}]$.

Placés dans les mêmes conditions, un liquide se dilate plus qu'un solide; un gaz se dilate encore davantage.

	volume à 20 °C en $[\text{cm}^3]$	volume à 60 °C en $[\text{cm}^3]$
verre pyrex.....	250,0	250,1
kérosène.....	250,0	258,0
air.....	250,0	285,0

Dilatations comparées d'un solide, d'un liquide et d'un gaz.

3 La loi de Gay-Lussac

On reprend les résultats des expériences du paragraphe 1 où l'on exprime les températures en kelvins.

On désigne par:

T_1 la température initiale de l'air contenu dans la seringue en $[\text{K}]$ (température ambiante);

T_2 la température finale de l'air contenu dans la seringue en $[\text{K}]$ (température de l'eau chaude);

V_1 le volume d'air avant immersion de la seringue dans le bac;

V_2 le volume d'air après immersion de la seringue dans le bac.

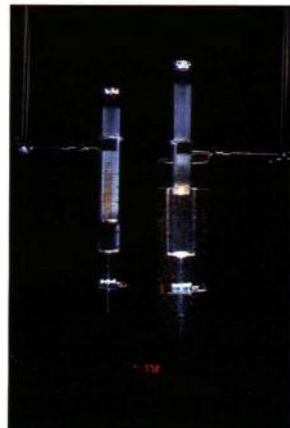
On constate que:

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

Lors de la dilatation d'un gaz à pression constante, son volume et sa température absolue sont proportionnels.

$$\frac{V}{T} = \text{constante}$$

C'est la loi de Gay-Lussac.



4 Passage de l'échelle Celsius à l'échelle absolue (Kelvin)

On peut retrouver la loi de Gay-Lussac à partir de la loi de la dilatation.

Considérons un gaz occupant le volume V_0 lorsqu'il se trouve à la température $\theta_0 = 0^\circ\text{C}$. Son volume V à une nouvelle température θ quelconque vaut :

$$V = V_0 + \gamma \cdot V_0 \cdot (\theta - 0) = V_0 \cdot [1 + \gamma \cdot \theta]$$

En introduisant la valeur de γ ,

$$V = V_0 \cdot \left[1 + \frac{\theta}{273}\right] = V_0 \cdot \left[\frac{273 + \theta}{273}\right]$$

Or $273 + \theta$ est la température finale θ exprimée en kelvins et notée T ; 273 représente la température initiale θ_0 exprimée en kelvins et notée T_0 .

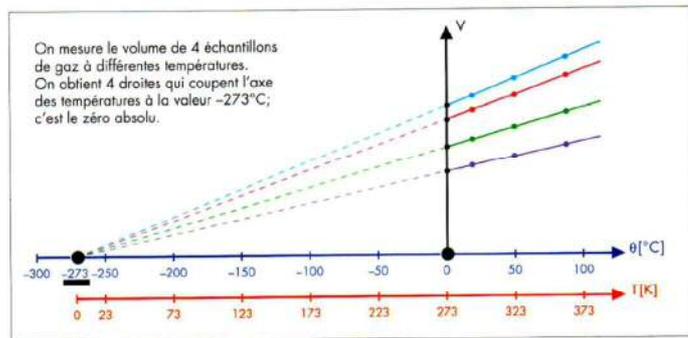
On obtient :

$$V = V_0 \cdot \frac{T}{T_0}$$

ou

$$\frac{V}{T} = \frac{V_0}{T_0} = \text{constante}$$

c'est-à-dire la loi de Gay-Lussac.



6 La loi de Charles

EXPERIENCE On considère un gaz enfermé dans un récipient indéformable à la température (absolue) T_1 ; un manomètre indique sa pression p_1 . On chauffe ce gaz à la température (absolue) T_2 et on mesure la nouvelle pression p_2 .

On constate que

$$\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}$$

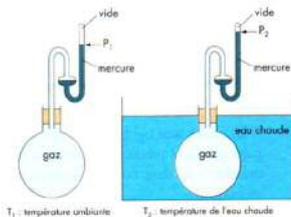
Lorsqu'on chauffe un gaz en maintenant son volume constant, sa pression et sa température absolue sont proportionnelles.

$$\frac{p}{T} = \text{constante}$$

Exemple

Que se passe-t-il dans une marmite à pression ?

L'eau chauffée dans une marmite à pression se transforme en vapeur qui ne peut pas s'échapper, sauf lorsque la pression atteint 0,7 bar de plus que la pression atmosphérique : une soupape s'ouvre et laisse partir de la vapeur d'eau. Sous cette pression, la température d'ébullition de l'eau vaut 115°C . La cuisson des aliments est plus rapide.



T_1 : température ambiante. T_2 : température de l'eau chaude



Marmite à pression pour essais en laboratoire.

5 Chauffer un gaz dans un récipient fermé

L'augmentation de température accroît l'agitation des particules constituant le gaz. Celles-ci viennent frapper les parois du récipient :

- Si les parois sont mobiles, le volume augmente et la pression varie peu.
- Si les parois sont rigides, le volume ne varie pratiquement pas et la pression augmente : c'est le cas d'une chambre à air dans un pneumatique, ou du gaz dans un briquet.
- Si les parois sont élastiques, le volume augmente, mais pas assez, et la pression augmente aussi (ballon de baudruche ou matelas pneumatique au soleil).

Dans les deux derniers cas, si la pression dépasse la résistance des parois, le récipient éclate.

Afin d'éviter toute augmentation de pression et tout risque d'explosion, les bouteilles de gaz comprimés (air, oxygène...) ne doivent pas être stockées près de sources de chaleur ou être exposées trop longtemps au soleil.

Lorsqu'une substance se trouve dans un récipient simultanément sous forme liquide et gazeuse (bouteilles de butane ou de propane), le danger est beaucoup plus grand. En effet l'élévation de température produit l'évaporation d'une partie du liquide et la pression dans le récipient augmente beaucoup plus que s'il n'y avait pas de liquide.



À gauche, allure normale de la flamme, à la température ambiante.
À droite, allure de la flamme, quand le briquet est plongé dans l'eau chaude : la taille de la flamme indique que la pression du gaz a augmenté.

	pression à 20°C en bars	pression à 50°C en bars
pneumatique	2,0	2,4
gaz comprimé	3,0	3,5
bouteille de butane	2,0	8,0

Comparaison des effets d'une augmentation de température de 40°C sur la pression.

7 La loi de Boyle-Mariotte

EXPERIENCE Un gaz étant compressible, il est possible de modifier son volume. Si sa température ne change pas, sa pression varie.

De l'air à température ambiante est enfermé par un index de mercure dans un tube de petite section S .

La hauteur de l'index de mercure est désignée par h_{merc} et la pression atmosphérique par p_{atm} . La masse volumique du mercure est notée ρ_{merc} .

- Le tube est tourné de façon que l'index de mercure se trouve au-dessus de la colonne d'air.

On mesure la hauteur h_1 de la colonne d'air ; le volume d'air emprisonné vaut

$$V_1 = S \cdot h_1$$

et sa pression

$$p_1 = p_{\text{atm}} + \rho_{\text{merc}} \cdot g \cdot h_{\text{merc}}$$

- On retourne le tube ; l'index de mercure est alors au-dessous de la colonne d'air emprisonné. On constate qu'elle occupe une hauteur différente h_2 .

Le nouveau volume d'air vaut

$$V_2 = S \cdot h_2$$

et sa pression

$$p_2 = p_{\text{atm}} - \rho_{\text{merc}} \cdot g \cdot h_{\text{merc}}$$

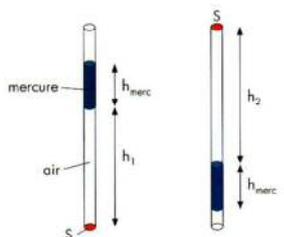
On constate, à partir des résultats obtenus, que :

$$p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$$

Lorsqu'on comprime un gaz à température constante, sa pression et son volume sont inversement proportionnels.

$$p \cdot V = \text{constante}$$

C'est la loi de Boyle - Mariotte ; l'unité de la constante est le $[\text{N} \cdot \text{m}]$ c'est-à-dire le $[\text{J}]$; il s'agit donc d'une énergie.



Modification du volume d'un gaz à température constante.

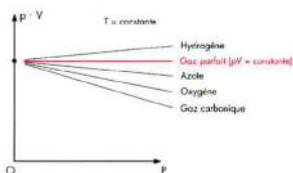
8 La loi des gaz parfaits

Les trois lois que nous venons d'étudier sont résumées dans une loi plus générale. Celle-ci décrit la transformation d'un gaz de masse constante.

$$p \cdot V / T = \text{constante}$$

C'est la loi des gaz parfaits; l'unité de la constante est le [J·K⁻¹].

Dans un gaz parfait, on néglige les collisions entre les molécules ainsi que leur volume. Il n'en est pas de même dans les gaz réels qui, en conséquence, ne suivent pas exactement la loi des gaz parfaits. Ils s'en approchent d'autant plus que leur pression est faible et leur température élevée.



Ecart entre gaz réels et gaz parfait.

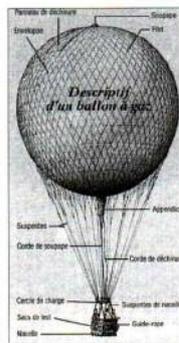
Note historique

La relation de Boyle - Mariotte a été établie en 1662 par Robert Boyle (Irlande 1627 - 1691) et de façon indépendante, en 1679, par l'abbé Edme Mariotte (France 1620 - 1684).

XERCICES

- Un ballon à gaz n'est pas une enceinte fermée. Un orifice, au bas du ballon (appendice), permet le contact permanent du gaz que renferme l'enveloppe avec l'air ambiant.
 - Que se passe-t-il quand le ballon s'élève ?
 - Que se passe-t-il quand le soleil réchauffe l'enveloppe ?

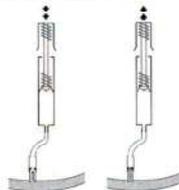
Note: admettre que le volume du ballon est constant.



- Les figures illustrent le fonctionnement d'une pompe servant à gonfler les pneus d'une bicyclette. On considère une telle pompe dont le diamètre intérieur mesure 20mm.

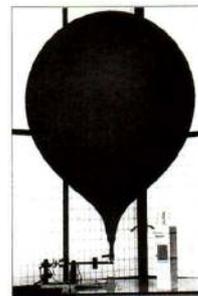
Quelle est l'intensité de la force avec laquelle il faut pousser le piston en fin de course si la surpression dans la chambre à air vaut 2 bar.

Note: on admettra que la température de l'air dans la pompe ne change pas.



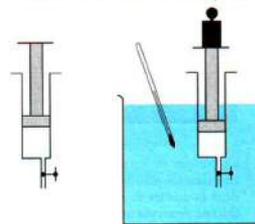
- Contrairement aux ballons à gaz habituels, un ballon météorologique est constitué par une enveloppe élastique fermée. Ce type de ballon emporte des instruments météorologiques jusqu'à une altitude d'environ 30km. A cette altitude, le ballon «explose» et les instruments redescendent, suspendus à un petit parachute.

Pour quelle raison ces ballons explosent-ils ?



- Une seringue dont l'extrémité inférieure est fermée contient un volume de 60ml d'air à la pression de 0,96 bar et à la température de 18°C. On dépose une masse sur son piston, puis on l'immerge partiellement dans de l'eau chaude. La nouvelle pression de l'air emprisonné vaut alors 1,20 bar et sa température 57°C.

Calculer le nouveau volume de l'air emprisonné.



- Une certaine quantité de gaz parfait voit sa température absolue et sa pression doubler.

Que peut-on dire de son volume ?

XERCICES

- Une ampoule électrique éteinte contient un gaz inerte à une pression d'environ 500 hPa, soit la moitié d'une pression atmosphérique normale.

Expliquer pourquoi.



- Un gaz est emprisonné dans une seringue dont l'orifice est bouché. On exerce une force sur le piston. On constate que, lorsqu'on double cette force, la pression du gaz ne double pas, même si sa température reste constante.

Pourquoi ?



- Un pompier est équipé d'un masque de protection alimenté par l'air comprimé contenu dans deux bouteilles de quatre litres de capacité chacune. Avant son utilisation, l'air contenu dans les bouteilles est à la pression de 300 bar. Sa température est de 10°C. Le pompier respire de l'air sous une pression de 960 hPa (mbar), à la température de 35°C, à raison de 45 litres chaque minute.



Combien de temps pourra-t-il respirer avec l'air contenu dans les bouteilles ?

- Les bouteilles d'air comprimé destinées à la plongée sous-marine sont remplies au moyen d'un compresseur.

Quel volume d'air à 950 hPa (mbar) faut-il pomper pour remplir une bouteille de 15 litres d'air comprimé à 200 bar ?

Note: supposer que la température est la même dans les deux situations.



XERCICES

- Lors d'un incendie, une bouteille contenant quatre litres d'hydrogène comprimé à 300 bar voit sa température passer de 20°C à 250°C.

Quelle est la nouvelle pression de l'hydrogène qu'elle contient ?
- La soupape d'une marmite à pression est constituée par un piston de 8 mm de diamètre maintenu par un ressort. Elle laisse échapper la vapeur quand l'intensité de la force pressante agissant sur le piston atteint 3,5 N.
 - Calculer la pression maximale de la vapeur dans la marmite.
 - Déterminer la température de cuisson.



- Un ballon météorologique a un diamètre de 2 m lorsqu'il quitte le sol. La pression de l'hydrogène qu'il contient est alors de 1 bar et sa température de 15°C.

Quel sera son diamètre à une altitude de 11 km, où la pression vaut environ 250 hPa (mbar) et la température -56°C ?

Note: en réalité, la pression de l'hydrogène dans le ballon est supérieure à la pression atmosphérique, du fait de la tension de l'enveloppe; par conséquent, le diamètre réel est inférieur au diamètre calculé; cette différence est faible.

- Une bulle de gaz se détache du fond d'un lac et monte à la surface.
 - Expliquer pourquoi la bulle monte.
 - Comment varie la pression dans la bulle ?
 - Comment varie sa température ?
 - Comment varie son volume ?
 - Comment varie la force ascensionnelle agissant sur la bulle ?
- Une bulle de gaz de 30mm³ se détache du fond d'un étang à 4,5 m sous la surface. La température de l'eau à cette profondeur vaut 7°C.

Quel sera son volume lorsqu'elle atteindra la surface de l'eau, sachant qu'à ce moment sa température sera de 22°C, et que la pression atmosphérique vaut 950 hPa ?

Corrigé des exercices

Les gaz parfaits Exercice 1

- a) La pression atmosphérique diminue avec l'altitude. Le gaz va se dilater et sortir du ballon.
b) L'enveloppe chaude va chauffer le gaz, celui-ci va se dilater et sortir du ballon.

Les gaz parfaits Exercice 2

$$p = \frac{F}{S} \Rightarrow F = p \cdot S = p \cdot \pi \cdot r^2 = 2 \cdot 10^4 \text{ Pa} \cdot \pi \cdot (10^{-3} \text{ m})^2 = 62,8 \text{ N}$$

En fin de course, en négligeant les frottements et l'élévation de la température, il faudra pousser le piston avec une force d'environ 63 newtons.

Les gaz parfaits Exercice 3

Ce type de ballon explose car son volume ne cesse d'augmenter avec l'altitude. En effet, la pression diminuant avec l'altitude, le gaz contenu dans le ballon augmente de volume dans les mêmes proportions (si la pression est divisée par 10, le volume du ballon sera multiplié par 10).

Les gaz parfaits Exercice 4

Situation de départ: $p_1 = 0,96 \text{ bar}$ $V_1 = 60 \text{ ml}$ $T_1 = (18+273) \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = 1,2 \text{ bar}$ $V_2 = \text{cherché}$ $T_2 = (57+273) \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = \frac{0,96 \text{ bar} \cdot 60 \text{ ml} \cdot 330 \text{ K}}{291 \text{ K} \cdot 1,2 \text{ bar}} = 54,4 \text{ ml}$$

Le volume final de l'air emprisonné vaut environ 54,4 ml.

Les gaz parfaits Exercice 5

Situation de départ: $p_1 = 1 \text{ bar}$ $V_1 = 1 \text{ ml}$ $T_1 = 100 \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = 2 \text{ bar}$ $V_2 = \text{cherché}$ $T_2 = 200 \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = \frac{1 \text{ bar} \cdot 1 \text{ ml} \cdot 200 \text{ K}}{100 \text{ K} \cdot 2 \text{ bar}} = 1 \text{ ml}$$

Le volume ne change pas!

Les gaz parfaits Exercice 11

- a) Calcul de la surpression dans la marmite à vapeur:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{F}{\pi \cdot r^2} = \frac{3,5 \text{ N}}{\pi \cdot (4 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2} = 69 \text{ 600 Pa} = 0,696 \text{ bar}$$

La pression maximale dans la marmite vaut donc environ 1,7 bar.

- b) A cette pression, l'eau bout à environ 115 °C (voir «La vaporisation, la liquéfaction» dans le chapitre EFFETS DE LA CHALEUR).

Les gaz parfaits Exercice 12

Pour éviter des calculs fastidieux, étudions la dilatation d'un litre de gaz:

Situation de départ: $p_1 = 1 \text{ bar}$ $V_1 = 1 \text{ litre}$ $T_1 = (15+273) \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = 0,25 \text{ bar}$ $V_2 = \text{cherché}$ $T_2 = (-56+273) \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = \frac{1 \text{ bar} \cdot 1 \text{ litre} \cdot 217 \text{ K}}{288 \text{ K} \cdot 0,25 \text{ bar}} = 3,01 \text{ litres}$$

Le volume augmente d'un facteur 3. Le diamètre augmente donc d'un facteur $\sqrt[3]{3} = 1,44$.

Le diamètre du ballon à 11 km d'altitude vaudra environ $(2 \text{ m} \cdot 1,44) = 2,88$ mètres.

Les gaz parfaits Exercice 13

- a) La bulle monte car la masse volumique du gaz est plus faible que celle de l'eau.
b) La pression du gaz dans la bulle diminue à mesure qu'elle monte; elle s'équilibre constamment avec la pression qu'elle subit.
c) Sa température aurait tendance à diminuer à cause de la baisse de pression mais elle s'équilibre rapidement avec l'eau environnante. Il est difficile de prévoir cette température.
d) Son volume augmente à mesure que la pression environnante baisse.
e) La force d'Archimède étant proportionnelle au volume (voir «La force d'Archimède» dans le chapitre MÉCANIQUE), cette force augmente au cours de la montée.

Les gaz parfaits Exercice 14

La pression dans l'eau augmente de 0,1 bar environ pour chaque mètre de profondeur.

Situation de départ: $p_1 = 0,45+0,95 \text{ bar}$ $V_1 = 30 \text{ mm}^3$ $T_1 = (7+273) \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = 0,95 \text{ bar}$ $V_2 = \text{cherché}$ $T_2 = (22+273) \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = \frac{1,4 \text{ bar} \cdot 30 \text{ mm}^3 \cdot 295 \text{ K}}{280 \text{ K} \cdot 0,95 \text{ bar}} = 46,6 \text{ mm}^3$$

Dans les conditions décrites, le volume de la bulle vaut environ 47 mm³ quand elle atteint la surface.

Les gaz parfaits Exercice 6

Environ 95% de l'énergie électrique est transformée en chaleur dans une ampoule. Quand elle fonctionne, sa température s'élève considérablement. La pression à l'intérieur de l'ampoule est calculée pour qu'elle reste inférieure à la pression atmosphérique quand l'ampoule est allumée. Grâce à cette précaution, en cas de rupture à chaud, il n'y aura pas de projections dangereuses.

Les gaz parfaits Exercice 7

Pour pouvoir appliquer la loi des gaz, il faut mesurer les pressions absolues. Dans le cas présent, on ne peut pas appliquer la loi des gaz parfaits sans tenir compte de la pression atmosphérique et de la force de pesanteur de la seringue.

Les gaz parfaits Exercice 8

Situation de départ: $p_1 = 300 \text{ bar}$ $V_1 = 8 \text{ litres}$ $T_1 = (10+273) \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = 0,96 \text{ bar}$ $V_2 = \text{cherché}$ $T_2 = (35+273) \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_2} \Rightarrow V_2 = \frac{p_1 \cdot V_1 \cdot T_2}{T_1 \cdot p_2} = \frac{300 \text{ bars} \cdot 8 \text{ litres} \cdot 308 \text{ K}}{283 \text{ K} \cdot 0,96 \text{ bar}} = 2 \text{ 720 litres}$$

Le volume d'air respirable vaut 2 720 litres.

Autonomie du pompier: 2 720 litres ÷ 45 litres/minute = 60,5 minutes
Le pompier peut respirer environ 1 heure dans ces conditions.

Les gaz parfaits Exercice 9

Situation de départ: $p_1 = 0,95 \text{ bar}$ $V_1 = \text{cherché}$ $T_1 = T_2$

Situation finale: $p_2 = 200 \text{ bar}$ $V_2 = 15 \text{ litres}$ $T_2 = T_1$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_2}{T_1} \Rightarrow V_1 = \frac{p_2 \cdot V_2}{p_1} = \frac{200 \text{ bars} \cdot 15 \text{ litres}}{0,95 \text{ bar}} = 3 \text{ 160 litres}$$

Le volume d'air à pomper vaut environ 3 200 litres.

Les gaz parfaits Exercice 10

Situation de départ: $p_1 = 300 \text{ bar}$ $V_1 = V_2$ $T_1 = (20+273) \text{ K}$

Situation finale: $p_2 = \text{cherché}$ $V_2 = V_1$ $T_2 = (250+273) \text{ K}$

$$\frac{p_1 \cdot V_1}{T_1} = \frac{p_2 \cdot V_1}{T_2} \Rightarrow p_2 = \frac{p_1 \cdot T_2}{T_1} = \frac{300 \text{ bars} \cdot 523 \text{ K}}{293 \text{ K}} = 535 \text{ bars}$$

La pression de l'hydrogène peut atteindre 535 bars (si la bouteille n'explose pas!).

Chapitre 39. La fusion, la solidification

En hiver, il gèle souvent: il neige et de la glace se forme. Au printemps, c'est le dégel et la fonte des neiges. En été, il faut fabriquer de la glace dans les congélateurs. Gel et dégel sont des phénomènes naturels, banals dans nos régions tempérées.

1 La fusion de la glace

Un tube contenant de la glace et un thermomètre est placé dans l'air ambiant, donc à une température d'environ 20 °C. On mesure régulièrement la température de la glace et le temps t écoulé depuis le début de l'expérience. On observe simultanément l'aspect du contenu du tube.

- Dans un premier temps, la température extérieure du glaçon s'élève jusqu'à 0°C;
- puis la glace commence à fondre; de l'eau apparaît dans le tube et la température reste à 0°C. Cette température ne change pas pendant la fonte de la glace;
- une fois la glace entièrement fondue, la température de l'eau ainsi obtenue s'élève.

Le passage de l'état solide (glace) à l'état liquide (eau) est appelé **fusion**.

Temps en minutes	Température en °C
0	
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	

2 La fusion d'autres substances; la température de fusion

Comme la glace, toute substance pure fond à une température qui lui est propre. Cette température est la température de fusion, notée θ_f . La température de fusion de l'eau vaut 0°C, à la pression dite normale de 1013 hPa, par définition de l'échelle Celsius.

SUBSTANCE	θ_f (°C)
Acier	1515
Aluminium	660
Ethanol (alcool)	-117
Fer	1535
Glace	0
Huile	-10
Mercure	-39
Tungstène	3410

Température de fusion de quelques substances (à pression normale).

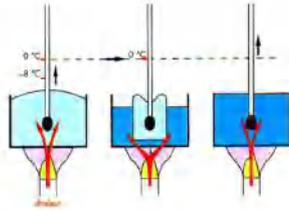
3 Deux effets de l'énergie thermique

Dans notre exemple, le glaçon dans l'éprouvette fond grâce à l'énergie thermique (ou chaleur) qu'il reçoit de l'air ambiant.

Un apport d'énergie thermique peut avoir deux effets sur un corps :

- une élévation de sa température ;
- un changement, à température constante, de son état physique.

Les particules constituant un solide sont animées de mouvements oscillatoires dans un espace bien défini. Un apport d'énergie thermique augmente l'amplitude des oscillations et la température du solide augmente. A partir de la température de fusion, les particules peuvent glisser les unes sur les autres car les liaisons qui les tenaient à leur place sont détruites. L'ordre caractéristique de la structure solide disparaît. L'énergie fournie sert à briser cette cohésion.

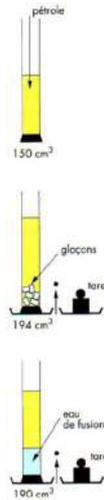


Deux effets possibles de la chaleur sur un corps.

4 Masse et volume

EXPERIENCE On place des glaçons dans une éprouvette contenant du pétrole ; le tout est posé sur le plateau d'une balance qu'on équilibre. Durant la fusion de la glace, la balance reste équilibrée alors que le niveau de pétrole descend.

Lors de la fusion d'un solide, la masse reste constante alors que le volume change.



Volume de la glace : 44 cm³
Volume de l'eau de fusion : 40 cm³.

5 La chaleur latente de fusion

Des expériences de calorimétrie (voir exercice 12) montrent que l'énergie thermique E_F nécessaire à la fusion d'un corps solide :

- est proportionnelle à la masse m de ce corps ;
- dépend de la substance constituant ce corps.

$$E_F = m \cdot L_F$$

La constante de proportionnalité L_F , caractérise la substance. C'est sa **chaleur latente de fusion**. Son unité est le [J · kg⁻¹]. Sa valeur représente l'énergie qu'il faut fournir à 1 kg de la substance pour le faire fondre entièrement.

SUBSTANCE	L_F (J · kg ⁻¹)
Aluminium	$3,96 \cdot 10^5$
Fer	$2,67 \cdot 10^5$
Glace	$3,3 \cdot 10^5$
Mercury	$0,11 \cdot 10^5$
Plomb	$0,25 \cdot 10^5$

Chaleur latente de fusion de quelques substances.

6 Le palier de fusion

On chauffe un glaçon. Le graphique représente les températures mesurées durant la fusion, en fonction du temps t . La courbe obtenue se compose de trois parties distinctes.

- La température de la glace augmente de sa valeur initiale θ_{glace} jusqu'à la température de fusion θ_F .

L'énergie reçue par la glace est :

$$E_{\text{glace}} = c_{\text{glace}} \cdot m \cdot (\theta_F - \theta_{\text{glace}})$$

où m désigne la masse de glace.

- La température du mélange de glace et d'eau reste égale à θ_F ; c'est le palier de fusion.

L'énergie nécessaire à la fusion est :

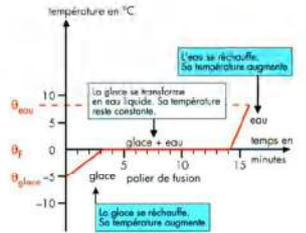
$$E_F = m \cdot L_F$$

Ce palier est une caractéristique de la fusion de n'importe quelle substance.

- La température de l'eau augmente de θ_F jusqu'à sa valeur finale θ_{eau} .

L'énergie reçue par l'eau est :

$$E_{\text{eau}} = c_{\text{eau}} \cdot m \cdot (\theta_{\text{eau}} - \theta_F)$$



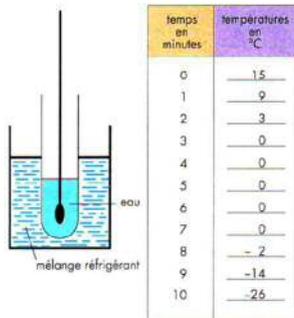
Le palier de fusion de la glace.

7 La solidification de l'eau

Un thermomètre est plongé dans un tube à essai contenant de l'eau. On place l'ensemble dans un mélange réfrigérant. On relève régulièrement la température en observant l'aspect du contenu du tube.

L'eau commence à se solidifier à 0°C. Pendant tout le temps durant lequel elle se transforme en glace, sa température reste constante.

Le passage du liquide (eau) au solide (glace) est un changement d'état physique de la matière appelé **solidification**.



8 Solidification d'autres substances

Tout corps pur se solidifie à une température qui lui est propre. Cette température de solidification est la même que la température de fusion θ_F . Durant ce changement d'état, le liquide cède de l'énergie thermique à son environnement.

L'énergie E_S cédée par une masse m d'eau lors de sa solidification est égale à l'énergie reçue par un glaçon de même masse lors de sa fusion. Il en est de même pour les autres substances. Cette énergie E_S est donnée par

$$E_S = - m \cdot L_F$$

L_F étant la chaleur latente de fusion.

(Le signe - indique qu'il s'agit d'énergie cédée par le liquide).

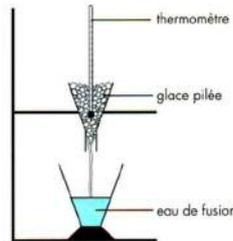
EXERCICES

- On fait fondre de la glace dans une casserole placée sur une plaque électrique allumée. Alors qu'il reste encore de la glace, peut-on tremper le doigt dans l'eau en fusion sans risque de se brûler ? Pourquoi ?

- Vrai ou faux ?**

- La glace, c'est aussi de l'eau.
- Pour faire fondre la glace, il faut lui fournir de la chaleur.
- Lorsqu'un glaçon fond, l'eau liquide qui apparaît est toujours à 0°C.
- Quand l'eau se transforme en glace, son volume reste constant.
- La fusion est un changement d'état physique.

- On réalise l'expérience de la figure ci-dessous. Pourquoi permet-elle de contrôler si le thermomètre est juste ?



- Donner le nom de deux substances qui sont encore à l'état liquide quand la température est inférieure à 0°C.

Dans quel instrument de mesure sont-elles utilisées ?

- Peut-on utiliser sans risque un thermomètre à mercure dans un congélateur ? Dans l'Antarctique ? Pourquoi ?

- Le liquide du circuit de refroidissement du moteur d'une automobile contient de l'antigel. Pourquoi ?

- En hiver, bien que la température de l'air soit inférieure à 0°C, il arrive que les gouttelettes d'eau en suspension dans l'air restent à l'état liquide : on parle alors du phénomène de surfusion. Au contact du pare-brise d'une automobile, des branches des arbres... ces gouttelettes se transforment en givre, et le bulletin météorologique annonce «brouillard givrant».

Rechercher la signification de «surfusion».



- La fusion d'un morceau de beurre est-elle comparable à celle d'un glaçon ?

Plus précisément, que se passe-t-il quand le beurre est à une température de l'ordre de 20°C à 30°C ?

Rechercher dans le dictionnaire la signification de «fusion pâteuse».

- Choisir parmi les six affirmations suivantes celles qui vous semblent correctes :

- une masse de 500 g d'eau donne, en gelant, une masse de 500 g de glace ;
- une masse de 500 g d'eau donne, en gelant, une masse de 550 g de glace ;
- une masse de 500 g d'eau donne, en gelant, une masse de 480 g de glace ;
- un volume de 500 cm³ d'eau donne, en gelant, un volume de 500 cm³ de glace ;
- un volume de 500 cm³ d'eau donne, en gelant, un volume de 550 cm³ de glace ;
- un volume de 500 cm³ d'eau donne, en gelant, un volume de 480 cm³ de glace.

- On retire 300 grammes de glaçons d'un congélateur dont la température est maintenue à -12°C.

Après quelques heures, ces glaçons se sont transformés en eau à 20°C.

Quelle est l'énergie que cette transformation a retirée à l'air ambiant ?

11 Pourquoi faut-il environ deux fois plus de temps et donc de gaz pour faire du thé à partir de neige à 0°C qu'à partir d'eau à 0°C ?



12 Un calorimètre (capacité calorifique = $200 \pm 20 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$) contient $0,400 \pm 0,001 \text{ kg}$ d'eau. La température est équilibrée à $30,0 \pm 0,5 \text{°C}$. On ajoute $0,100 \pm 0,001 \text{ kg}$ de glace à 0°C. Toute la glace fond et la température s'équilibre à $10,0 \pm 0,5 \text{°C}$. Calculer la chaleur latente de fusion de la glace.

13 La surface du lac de Joux est d'environ $9,5 \text{ km}^2$.
a) A partir d'eau à 0°C, quelle quantité d'énergie ce lac devrait-il céder pour qu'il se forme une couche de 10 cm de glace sur toute sa surface ?
b) Combien de temps faudrait-il au rayonnement solaire pour fondre cette glace si l'on suppose que celle-ci absorbe $2 \cdot 10^6 \text{ J}$ par jour et par m^2 par beau temps, soit environ 10% de l'énergie reçue du Soleil ?

14 On verse 200 g d'eau chaude à 55°C dans un récipient contenant 150g de glace à -15°C. Toute la glace fond-elle ? Si oui, quelle est la température finale de l'eau ? Sinon, quelle est la masse de glace non fondue ? Note: admettre que l'eau et la glace n'échangent de l'énergie qu'entre elles.

15 Faire fondre de la glace avec un fil

Il est possible de faire fondre localement de la glace sans qu'il soit nécessaire de la chauffer. Passons un fil lesté en ses deux extrémités sur un bloc de glace. Sous l'effet de la pression appliquée, la glace fond sous le fil. Il s'enfonce ainsi dans le morceau de glace, de part en part, sans couper le bloc car, après le passage du fil, la glace se reforme.



Citer des exemples d'application de ce phénomène.

Corrigé des exercices

La fusion, la solidification **Exercice 1**

Le passage de l'état solide à l'état liquide se fait à température constante (voisine de 0°C). L'eau formée, à l'état liquide, est froide. Il n'y a aucun danger, tant que l'énergie apportée ne sert qu'à fondre la glace.

La fusion, la solidification **Exercice 2**

- La glace est de l'eau solidifiée.
- Pour faire fondre la glace, il faut effectivement lui fournir de l'énergie sous forme de chaleur.
- Les changements d'état des substances se font à température constante. La température de fusion de l'eau vaut effectivement 0°C.
- La formation de glace s'accompagne d'une importante augmentation du volume (environ 10%).
- La fusion est un changement d'état qui ne change pas la nature des substances, dans ce sens il est physique.

La fusion, la solidification **Exercice 3**

Ce montage permet de vérifier si le thermomètre est juste, car la **température de la glace en train de fondre vaut par définition 0°C**.

La fusion, la solidification **Exercice 4**

L'alcool et le mercure sont liquides en dessous de 0°C. Ils sont utilisés dans des thermomètres.

La fusion, la solidification **Exercice 5**

On peut utiliser sans risque un thermomètre à mercure dans des conditions de basse température. Il faut simplement savoir que le mercure se solidifie à -39 °C et qu'en dessous de cette température, il ne fonctionne plus; ce n'est pas un risque, mais un inconvénient.

La fusion, la solidification **Exercice 6**

Si l'eau gèle dans le circuit de refroidissement, celui-ci sera abîmé par la dilatation due au gel de l'eau.

La fusion, la solidification **Exercice 7**

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

La fusion, la solidification **Exercice 8**

La fusion des matières formées d'un mélange de plusieurs substances qui ont chacune un point de fusion différent est plus complexe que la fusion d'une substance pure.

Le beurre contient de l'eau et plusieurs types de graisses qui ne fondent pas toutes à la même température. Pour cette raison, le beurre peut être plus ou moins mou (fusion pâteuse) avant de devenir liquide.

La fusion, la solidification **Exercice 9**

Une masse de 500 grammes d'eau a un volume d'environ 500 cm³.

En gelant, son volume augmente d'environ 10% (550 cm³) mais sa masse ne varie pas.

La fusion, la solidification **Exercice 10**

Il faut de l'énergie pour élever la température des glaçons jusqu'au point de fusion, pour fondre les glaçons et enfin pour élever la température de l'eau de fonte jusqu'à 20 °C:

$$[m_{\text{glace}} \cdot c_{\text{glace}} \cdot (\theta_{\text{fusion}} - \theta_{\text{glace}})] + [m_{\text{glace}} \cdot L_f] + [m_{\text{glace}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{fusion}})] =$$

$$[0,3 \cdot 2,06 \cdot 10^3 \cdot (0 - (-12))] + [0,3 \cdot 3,3 \cdot 10^5] + [0,3 \cdot 4,18 \cdot 10^3 \cdot (20 - 0)] = 131\,000 \text{ J}$$

La glace a retiré environ 131 000 joules à l'air ambiant.

La fusion, la solidification **Exercice 11**

L'énergie nécessaire pour fondre 1 kg de neige (faire fondre des cristaux de glace à 0°C pour obtenir de l'eau liquide à 0 °C) est équivalente à l'énergie nécessaire pour élever la température de 1 kg d'eau liquide de 80 °C.

La fusion, la solidification **Exercice 12**

$$[m_{\text{glace}} \cdot L_f] + [m_{\text{glace}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_f)] + [m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_{\text{init}})] + [\mu_{\text{calo}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_{\text{init}})] = 0$$

$$\Rightarrow L_f = \frac{-[m_{\text{glace}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_f)] - [m_{\text{eau}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_{\text{init}})] - [\mu_{\text{calo}} \cdot (\theta_{\text{fin}} - \theta_{\text{init}})]}{m_{\text{glace}}}$$

$$L_f = \frac{-[(100 \pm 1) \cdot 4,2 \cdot (10,0 \pm 0,5)] - [(400 \pm 1) \cdot 4,2 \cdot (-20 \pm 1)] - [(200 \pm 20) \cdot (-20 \pm 1)]}{100 \pm 1}$$

$$L_{f \text{ max}} = \frac{-[99 \cdot 4,2 \cdot 9,5] + [401 \cdot 4,2 \cdot 21] + [220 \cdot 21]}{99} = 364 \text{ J/g}$$

$$L_{f \text{ min}} = \frac{-[101 \cdot 4,2 \cdot 10,5] + [399 \cdot 4,2 \cdot 19] + [180 \cdot 19]}{101} = 305 \text{ J/g}$$

$$L_f = \frac{L_{f \text{ max}} + L_{f \text{ min}}}{2} \pm \frac{L_{f \text{ max}} - L_{f \text{ min}}}{2} = (335 \pm 30) \text{ J/g}$$

Compte tenu des incertitudes, la chaleur latente de fusion de la glace vaut (335 000 ± 30 000) J/kg.

Chapitre 40. La vaporisation, la liquéfaction

La vapeur d'eau est un gaz invisible, comme la plupart des autres gaz. On peut détecter sa présence sur une surface froide: il se forme de la buée. L'eau peut aussi se condenser sous forme de gouttelettes dans l'air: c'est du brouillard.

La fusion, la solidification

Exercice 13

$$a) Q = m \cdot L_F = \rho \cdot V \cdot L_F = \rho_{\text{glace}} \cdot S_{\text{lac}} \cdot \text{épaisseur}_{\text{glace}} \cdot L_{F, \text{glace}} = 917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,5 \cdot 10^6 \text{ m}^2 \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 287 \cdot 10^2 \text{ J}$$

Le lac de Joux cède 287 térajoules à l'environnement pour geler sur une épaisseur de 10 cm.

b) Energie reçue du Soleil sur 1 mètre carré = énergie pour fondre 1 mètre carré de glace:

(n: nombre de jours d'ensoleillement; Q_S: énergie reçue du Soleil par jour et par mètre carré)

$$n \cdot Q_S = m \cdot L_F = \rho \cdot V \cdot L_F$$

$$\Rightarrow n = \frac{\rho \cdot V \cdot L_F}{Q_S} = \frac{917 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 0,1 \text{ m}^2 \cdot 3,3 \cdot 10^5 \frac{\text{J}}{\text{kg}}}{2 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{jour}}} = 15,1 \text{ jours}$$

Il faudra au moins 15 jours pour fondre 10 cm de glace à la surface du lac.

La fusion, la solidification

Exercice 14

L'énergie pour fondre la glace équivaut à celle qui est nécessaire pour chauffer l'eau fondue de 80 °C. Il va donc rester de la glace.

Dans ce cas, l'énergie cédée par l'eau chaude qui se refroidit va réchauffer la glace jusqu'à 0°C (θ_F), puis faire fondre une partie de la glace:

$$[m_{\text{glace totale}} \cdot c_{\text{glace}} \cdot (\theta_F - \theta_{\text{glace}})] + [m_{\text{glace fondue}} \cdot L_F] + [m_{\text{eau chaude}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}})] = 0$$

$$\Rightarrow m_{\text{glace fondue}} = \frac{-[m_{\text{glace totale}} \cdot c_{\text{glace}} \cdot (\theta_F - \theta_{\text{glace}})] - [m_{\text{eau chaude}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{\text{finale}} - \theta_{\text{initiale}})]}{L_F}$$

$$= m_{\text{glace fondue}} = \frac{-[0,15 \cdot 2060 \cdot 15] + [0,2 \cdot 4180 \cdot 55]}{3,3 \cdot 10^5} = 0,125 \text{ kg}$$

125 grammes de glace va fondre, il restera 25 grammes de glace non fondue.

La fusion, la solidification

Exercice 15

La pression abaisse le point de fusion.

Applications:

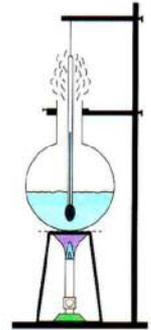
- Les lames des patins à glace font fondre la glace par pression. Le patin glisse sur une mince pellicule d'eau qui gèle à nouveau après le passage du patin.
- La glace fond sous la pression des pointes des pneus à clous qui peuvent ainsi prendre appui sur le goudron à travers la couche de glace si elle n'est pas trop épaisse. Cela est efficace sur les verglas par exemple.

1 L'exemple de l'eau

EXPERIENCE On chauffe de l'eau dans un ballon contenant un thermomètre. On relève régulièrement la température en notant le temps de chauffage; on observe ce qui se passe dans le ballon et sur ses parois:

- dans un premier temps, la température de l'eau s'élève et de la vapeur d'eau (gaz) se forme lentement;
- lorsque la température approche 100°C, une agitation visible anime tout le liquide: l'eau bout. La température reste constante et la vapeur d'eau se forme rapidement.

Des constatations similaires, mais à d'autres températures, peuvent être faites sur d'autres liquides.



2 Température d'ébullition; évaporation et vaporisation

La température à laquelle bout un liquide est sa **température d'ébullition**, notée θ_E.

Cette valeur dépend de la pression agissant sur le liquide; plus la pression est grande, plus la température d'ébullition est élevée. Les valeurs indiquées dans les tables numériques correspondent à la pression normale de 1013 hPa.

SUBSTANCE	θ _E (°C)
Aluminium	+2467
Marsout	+210 à -380
Mercur	-357
Eau	+100
Ethanol (alcool)	+78,5
Butane	+1
Propane	-45
Oxygène	-183
Azote	-196
Hélium	267

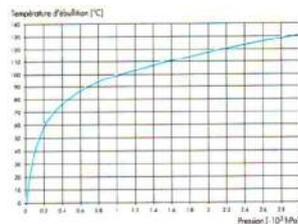
Température d'ébullition de quelques substances (à la pression normale).

La température d'ébullition de l'eau vaut 100 °C (à la pression normale) par définition de l'échelle Celsius. Cette température est plus basse dans nos régions: environ 98,5 °C à 400m d'altitude et environ 96 °C à 900m d'altitude.

La formation lente de gaz en dessous de la température d'ébullition est l'**évaporation**. Elle se produit uniquement en surface et sans agitation.

À la température d'ébullition, la formation rapide de gaz au sein de tout le liquide est la **vaporisation**. Toute l'énergie fournie sert au changement de l'état liquide à l'état gazeux. La température reste constante durant la vaporisation.

L'ébullition, l'évaporation et la vaporisation sont trois manifestations du même changement d'état. Elles requièrent la même énergie.



Températures d'ébullition de l'eau en fonction de la pression.

3 La chaleur latente de vaporisation

Comme pour la fusion, l'énergie E_V nécessaire à la vaporisation complète d'un liquide est proportionnelle à sa masse m et dépend de la nature du liquide

$$E_V = m \cdot L_V$$

La constante de proportionnalité L_V est caractéristique de chaque liquide. C'est sa **chaleur latente de vaporisation**. Son unité est le [J · kg⁻¹]. Sa valeur représente l'énergie à fournir à 1[kg] de liquide pour le vaporiser entièrement (à partir de sa température d'ébullition).

SUBSTANCE	L _V (J · kg ⁻¹)
Azote gazeux (N ₂)	2 · 10 ⁵
Eau (H ₂ O)	23 · 10 ⁵
Ethanol (alcool)	8,5 · 10 ⁵
Fer (Fe)	63,1 · 10 ⁵
Gaz carbonique (CO ₂)	3,9 · 10 ⁵
Hélium (He)	0,25 · 10 ⁵
Hydrogène gazeux (H ₂)	4,52 · 10 ⁵
Mercur (Hg)	3 · 10 ⁵
Oxygène gazeux (O ₂)	2,13 · 10 ⁵

Chaleurs latentes de vaporisation.

4 Le palier de vaporisation

On représente graphiquement l'évolution de la température d'une masse d'eau en fonction du temps de chauffe. La courbe obtenue montre deux parties distinctes.

a) La température de l'eau augmente de sa valeur initiale θ_{eau} jusqu'à la température d'ébullition θ_E.

L'énergie reçue par l'eau est:

$$E_{\text{eau}} = c_{\text{eau}} \cdot m \cdot (\theta_E - \theta_{\text{eau}})$$

où m désigne la masse d'eau.

b) La température reste égale à θ_E; c'est le palier de vaporisation.

L'énergie nécessaire à la vaporisation est:

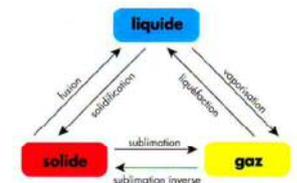
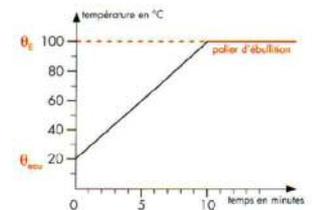
$$E_V = m \cdot L_V$$

La liquéfaction est la transformation inverse de la vaporisation. L'énergie E_L cédée durant la liquéfaction d'un gaz de masse m est donnée par:

$$E_L = -m \cdot L_V$$

L_V étant la chaleur latente de vaporisation; le signe « - » indique que l'énergie est cédée.

Certaines substances (neige carbonique, par exemple) passent directement de l'état solide à l'état gazeux. Cette transformation s'appelle sublimation.



Note historique

À l'heure actuelle, tous les gaz ont pu être liquéfiés. Les derniers furent appelés gaz permanents à une époque où l'on croyait cette opération impossible.

L'oxygène fut liquéfié pour la première fois en 1877 par le Français Louis Paul Cailletet (1823-1913) et l'hydrogène en 1898 par l'Anglais James Dewar (1842-1923). Le Hollandais Heike Kamerlingh-Onnes (1853-1926) liquéfia le dernier gaz, l'hélium, en 1908.



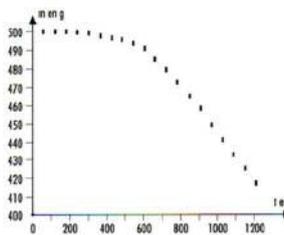
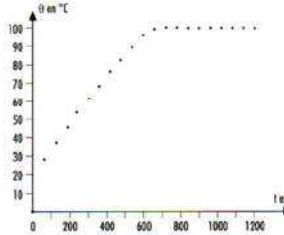
- 1** Indiquer, parmi ces phrases, celles qui semblent les plus correctes :
- l'évaporation de l'eau ne se produit qu'à 100°C;
 - l'ébullition de l'eau ne se produit qu'à 100°C;
 - l'évaporation de l'eau peut se produire à toute température comprise entre 0 et 100°C;
 - au cours de l'évaporation de l'eau, la température reste constante;
 - l'eau reçoit de la chaleur;
 - l'eau reçoit de la température;
 - dans l'écriture 100°C, la lettre C signifie «centigrades».
- 2** On veut faire cuire des aliments dans l'eau bouillante: on règle le chauffage au maximum pour arriver à l'ébullition, puis on baisse l'allure de chauffe. Pourquoi ?
- 3** L'air ambiant contient-il de la vapeur d'eau ? Comment peut-on s'en rendre compte ?
- 4** On parle de vapeur d'eau, de vapeur d'alcool ou d'essence, au lieu de gaz. Quel est l'état normal de ces substances à la température ambiante ? Quelle est leur température d'ébullition ? Comment qualifie-t-on de tels liquides ?
- 5** L'air expiré contient de la vapeur d'eau. Quelle preuve peut-on apporter ?
- 6** La présence d'eau dans l'huile d'une friteuse est dangereuse. Pourquoi ?
- 7** Pour vaporiser un liquide, il faut lui apporter de la chaleur; si on ne lui en donne pas, il la prend. En sortant de l'eau de la piscine, on a une sensation de froid. Il en est de même lorsqu'on désinfecte le bras avec de l'éther avant une vaccination. Expliquer pourquoi.
- 8** Expliquer pourquoi la colonne d'un thermomètre dont le réservoir est mouillé s'abaisse de quelques degrés Celsius lorsqu'on le sort d'un liquide, même si la température de celui-ci est inférieure à celle de l'air ambiant ?

- 9** Le linge mouillé sèche plus vite étendu qu'en tas. Pourquoi ?
Quand l'air est très humide et en absence de vent le linge sèche mal, même s'il fait chaud, car il est entouré d'une gaine de vapeur qui freine l'évaporation. Pourquoi sèche-t-il mieux quand il y a du vent, même s'il fait moins chaud ?
- 10** Autrefois, on gardait le beurre au frais dans un récipient en terre cuite dont la double paroi enfermait de l'eau. Actuellement, on vend des récipients cylindriques en terre cuite poreuse que l'on mouille afin d'y garder des bouteilles de vin au frais, sur une table, l'été.
Pourquoi le beurre ou le vin reste-t-il ainsi au frais ?



- 11** Avez-vous entendu parler du degré hygrométrique de l'air ? Quelle indication nous donne-t-il ? Avec quoi peut-on le mesurer ?
- 12** Chez les marchands de souvenirs, on trouve souvent de petits personnages recouverts de petits grains qui deviennent roses ou bleus. On les appelle improprement «baromètres». Qu'indiquent-ils en réalité ?
- 13** Une plaque chauffante permet de porter à ébullition (97°C) en 5 minutes un litre d'eau prise à la température de 17°C.
Combien de temps faudra-t-il pour évaporer 100g d'eau ?
Note: supposer que l'énergie nécessaire à chauffer le récipient est négligeable et que les pertes d'énergie sont constantes au cours du temps.

- 14** On fait bouillir de l'eau contenue dans un verre au moyen d'un thermoplongeur dont la puissance vaut 400W. On estime les pertes d'énergie à 10%.
Quelle quantité d'eau vaporise-t-on en 5 minutes ?
- 15** Un calorimètre contenant 500 g d'un liquide est déposé sur le plateau d'une balance. Un corps de chauffe de puissance égale à 310W est immergé dans ce calorimètre. Toutes les 60 secondes, on mesure la température θ et la masse m du liquide.
En reportant les mesures de θ et de m en fonction du temps t , on obtient les deux graphiques suivants:



- a) Déterminer la chaleur massique du liquide, sachant que la capacité calorifique du calorimètre est de $120 \text{ J} \cdot \text{°C}^{-1}$.
- b) Déterminer la chaleur latente de vaporisation du liquide.



- 16** Pourquoi un liquide très volatil, comme l'essence ou l'alcool, refroidit-il la matière qu'il mouille ?
- 17** On a placé un thermoplongeur de 400W dans un récipient contenant de l'eau, on a mesuré la température de l'eau toutes les 20 s à partir du moment où le thermoplongeur a été enclenché.

Les résultats obtenus sont les suivants:

temps en s	température en °C
0	25
20	31
40	37
60	43
80	49
100	55
120	61
140	67
160	73
180	79
200	85
220	90
240	94
260	98

À partir de 260 s, la température s'est stabilisée à 98°C.

- a) Représenter graphiquement l'évolution de la température au cours du temps. (temps en abscisse: 1 cm \rightarrow 20 s; température en ordonnée: 1 cm \rightarrow 10°C)
- b) Quelle était la température de l'eau au début ?
- c) Y avait-il de la glace dans l'eau ? (Justifier)
- d) Au bout de combien de temps l'eau s'est-elle mise à bouillir ?
- e) Dessiner la ligne de température que l'on aurait obtenue sur un graphique si le récipient avait été un calorimètre parfaitement isolé ?
- f) Dessiner la ligne de température que l'on aurait obtenue si l'on avait déclenché le thermoplongeur après 3 minutes ? (isolation imparfaite)
- g) Dessiner la ligne de température que l'on aurait obtenue si l'on avait placé une même masse d'alcool à la place de l'eau dans le récipient.
- h) Calculer la masse totale d'eau chauffée avant l'évaporation.

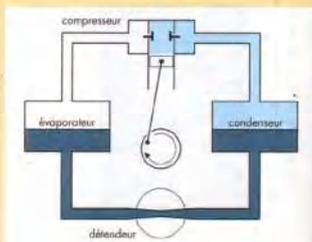
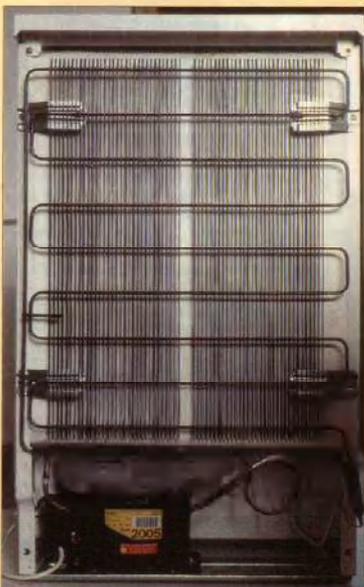
18 Les réfrigérateurs

Les réfrigérateurs utilisent les phénomènes de liquéfaction et de vaporisation d'un liquide, le fréon.

Le circuit du liquide caloporteur (porteur de chaleur) comporte quatre éléments principaux:

- l'évaporateur
- le compresseur
- le condenseur
- le détendeur

Des échanges d'énergie avec le milieu ambiant ont lieu dans l'évaporateur et dans le condenseur.



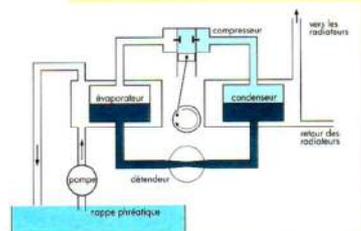
- a) Expliquer la fonction de chaque élément.
- b) Où l'énergie est-elle soustraite du milieu ambiant ?
- c) Où l'énergie est-elle cédée au milieu ambiant ?
- d) L'évaporateur est-il situé à l'intérieur ou à l'extérieur de l'espace réfrigéré ?

19 Les pompes à chaleur

Une pompe à chaleur (PAC) permet de soustraire de l'énergie thermique d'un premier milieu (par exemple l'eau d'une nappe phréatique) pour la transférer à un second milieu (par exemple l'eau qui circule dans un chauffage).

Les transferts d'énergie se font au moyen d'un liquide qui se vaporise à basse température. Une PAC de type usuel comprend quatre éléments principaux:

- l'évaporateur, où le liquide se vaporise à basse pression et soustrait de l'énergie au premier milieu;
- le compresseur, qui comprime la vapeur;
- le condenseur, où la vapeur se condense et libère de l'énergie qui chauffe le second milieu;
- le détendeur, au travers duquel la pression du liquide diminue avant de retourner dans l'évaporateur.



En une année, une PAC tirant l'énergie de l'eau a fourni une énergie de 28650 kWh au système de chauffage d'une habitation.

Pendant cette durée, elle a consommé une énergie électrique de 8760 kWh.

- a) Calculer l'énergie soustraite par l'évaporateur.
- b) Calculer le coefficient de performance moyen (ϵ_p) de cette PAC qui est défini par le rapport:

$$\epsilon_p = \frac{E_{\text{thermique transférée par la PAC}}}{E_{\text{électrique consommée par la PAC}}}$$

Corrigé des exercices

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 1

- L'évaporation de l'eau peut se produire à toute température. L'intensité de cette évaporation augmente avec la «sécheresse» de l'air et avec la température. La glace elle-même se transforme directement en vapeur à moins de 0 °C: c'est la sublimation de la glace.
- L'ébullition de l'eau a lieu à température constante **pour une pression donnée** (voir dans le manuel la théorie qui précède cette série d'exercices). Cette température ne vaut pas toujours 100 °C.
- Le passage de l'eau à l'état gazeux nécessite dans tous les cas (évaporation ou ébullition) le même apport de chaleur.
- 100 °C signifie «100 degrés Celsius» (voir «Quelques éléments biographiques» dans le chapitre ANNEXES).

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 2

A partir du moment où l'eau bout, un apport important d'énergie est inutile car la température n'augmente plus.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 3

En contact avec un objet froid, l'humidité de l'air se condense et dépose une couche de gouttelettes: la rosée (voir aussi le document n° 20 dans cette série d'exercices).

L'humidité de l'air se mesure avec un hygromètre.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 4

L'état normal de ces substances à température ambiante est l'état liquide.

L'eau bout à environ 100 °C; l'éthanol (alcool à brûler) bout à environ 78 °C; l'essence (benzine) bout selon sa qualité entre 80 °C et 100 °C.

Ces produits sont volatils.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 5

Si on expire contre une vitre ou un miroir, on peut y observer une condensation de l'humidité dissoute dans les poumons. La perte d'eau par les poumons est importante, elle se mesure en litres par jour.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 13

La donnée nous indique que la puissance de chauffage est constante, d'abord pendant le chauffage, puis pendant l'ébullition:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{m_{\text{eau chauffé}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta\theta}{t_{\text{chauffage}}} = \frac{m_{\text{eau vaporisé}} \cdot L_v}{t_{\text{ébullition}}}$$

$$\Rightarrow t_{\text{ébullition}} = \frac{m_{\text{eau vaporisé}} \cdot L_v \cdot t_{\text{chauffage}}}{m_{\text{eau chauffé}} \cdot c_{\text{eau}} \cdot \Delta\theta} = \frac{0,1 \cdot 23 \cdot 10^3 \cdot 300}{1 \cdot 4 \cdot 180 \cdot 80} = 206 \text{ secondes}$$

Il faut environ 3 minutes et demie pour évaporer 100 grammes d'eau avec cette puissance de chauffage.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 14

Avec des pertes de 10%, la puissance disponible vaut 90% de la puissance consommée: 400 watts · 0,9 = 360 watts.

$$P = \frac{E}{t} = \frac{m_{\text{eau vaporisé}} \cdot L_v}{t_{\text{ébullition}}}$$

$$\Rightarrow m_{\text{eau vaporisé}} = \frac{P \cdot t_{\text{ébullition}}}{L_v} = \frac{360 \cdot 300}{23 \cdot 10^5} = 0,047 \text{ kg}$$

La masse d'eau vaporisée en 5 minutes vaut environ 47 grammes.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 6

La température d'ébullition de l'eau est plus basse que celle de l'huile, mais sa masse volumique est plus élevée. La présence d'eau au fond de la friteuse est dangereuse à cause des projections d'huile provoquées par les mouvements liés à l'ébullition de l'eau.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 7

L'évaporation de l'eau nécessite une quantité importante d'énergie qui est prise sous forme de chaleur dans l'environnement immédiat. Dans le cas présent, c'est la peau qui cède de la chaleur et se refroidit.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 8

L'évaporation d'un liquide nécessite une quantité importante d'énergie qui est prise sous forme de chaleur dans l'environnement immédiat. Dans le cas présent, c'est le thermomètre qui cède de la chaleur et se refroidit.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 9

Les facteurs suivants accélèrent l'évaporation de l'eau:

- La surface d'échange (très important).
- Le mouvement de l'air permet d'augmenter la quantité d'air qui est en contact avec l'eau. Cela a un effet comparable à une augmentation de la surface d'échange.
- La «sécheresse» de l'air: dans de l'air saturé d'eau (dans du brouillard par exemple) il est impossible de sécher quoi que ce soit.
- La température: une élévation de la température revient à augmenter sa capacité d'absorber de l'humidité (voir le document n° 20 dans cette série d'exercices).

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 10

L'eau emprisonnée dans la matière poreuse s'évapore en prenant de l'énergie thermique dans la terre cuite qui reste fraîche à cause de cette perte de chaleur.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 11

On mesure le degré hygrométrique de l'air (% d'humidité) avec un hygromètre (voir le document n° 20 dans cette série d'exercices).

Il existe des silicates qui changent de couleur en fonction de l'humidité; on en recouvre des objets vendus comme souvenirs.

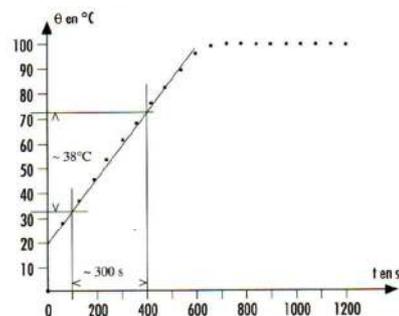
Certaines personnes âgées ont des douleurs liées aux changements d'humidité.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 12

Il existe des silicates qui changent de couleur en fonction de l'humidité; on en recouvre des objets vendus comme souvenirs. Ils n'indiquent pas la pression mais l'humidité de l'air; ce sont des hygromètres rudimentaires.

La vaporisation, la liquéfaction Exercice 15

a) En choisissant un intervalle sur le graphique, on peut relever les valeurs suivantes:



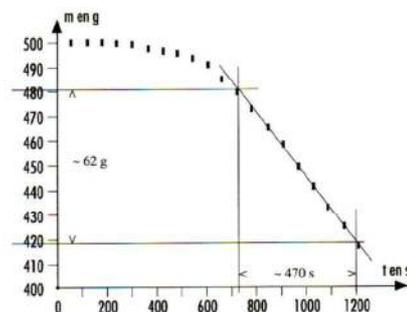
La température s'élève de 38 °C en 300 secondes:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{m_{\text{liquide}} \cdot c_{\text{liquide}} \cdot \Delta\theta + \mu \cdot \Delta\theta}{t_{\text{chauffage}}}$$

$$\Rightarrow c_{\text{liquide}} = \frac{P \cdot t_{\text{chauffage}} - \mu \cdot \Delta\theta}{m_{\text{liquide}} \cdot \Delta\theta} = \frac{310 \cdot 300 - 120 \cdot 38}{0,5 \cdot 38} = 4 \, 650 \text{ J/kg} \cdot \text{°C}$$

La chaleur massique mesurée vaut environ 4 650 J·kg⁻¹·°C⁻¹.

b) En choisissant un intervalle sur le graphique, on peut relever les valeurs suivantes:



62 grammes d'eau s'évaporent en 470 secondes:

$$P = \frac{E}{t} = \frac{m_{\text{liquide vaporisé}} \cdot L_v}{t_{\text{ébullition}}}$$

$$\Rightarrow L_v = \frac{P \cdot t_{\text{ébullition}}}{m_{\text{liquide vaporisé}}} = \frac{310 \cdot 470}{0,062} = 2,35 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$$

La chaleur latente de vaporisation mesurée vaut environ $2,4 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$.

Il pourrait s'agir d'eau mais la chaleur massique paraît élevée. Peut-être l'eau contient-elle une substance dissoute qui augmente sa chaleur massique.

La vaporisation, la liquéfaction

Exercice 16

L'évaporation d'un liquide nécessite une quantité importante d'énergie qui est prise sous forme de chaleur dans l'environnement immédiat.

La vaporisation, la liquéfaction

Exercice 17

Il n'y a pas de corrigé pour cet exercice.

La vaporisation, la liquéfaction

Exercice 18

- Le compresseur crée par pompage une importante différence de pression entre le condenseur et l'évaporateur. Cette différence est maintenue par le détendeur qui est en fait un étranglement qui freine le passage du liquide.
- Dans l'évaporateur, la pression est basse; le liquide se vaporise en prenant de la chaleur dans son environnement immédiat. L'évaporateur est donc très froid.
- Dans le condenseur, la pression est élevée; le liquide se condense en libérant de la chaleur dans son environnement immédiat. Le condenseur est très chaud, il est peint en noir pour mieux rayonner son énergie.
- L'évaporateur est dans l'armoire frigorifique, vers le haut de l'espace réfrigéré. Le condenseur est à l'extérieur de l'armoire frigorifique, généralement derrière celle-ci (voir la photo sur la page du livre).

La vaporisation, la liquéfaction

Exercice 19

- La conservation de l'énergie implique que l'énergie soutirée par l'évaporateur est égale à l'énergie libérée par le condenseur, soit 28 650 kWh.

$$b) c_p = \frac{E_{\text{thermique transférée par la PAC}}}{E_{\text{électrique consommée par la PAC}}} = \frac{38\,650 \text{ kWh}}{8\,760 \text{ kWh}} = 4,41$$

Le coefficient de performance de cette pompe à chaleur (PAC) vaut environ 4,4.

NB: Par abus de langage, on utilise parfois le terme «rendement» pour cette grandeur. Cependant, par définition, un rendement ne peut pas être supérieur à 1 parce qu'il concerne un système fermé où l'énergie est conservée.