

Séquence 7

Physique

L'énergie,
défi du XXI^e siècle

Chimie

Combustion des alcools
et des alcanes

Sommaire

1. Physique : L'énergie, défi du XXI^e siècle

Résumé

Exercices

2. Chimie : Combustion des alcools et des alcanes

Résumé

Exercices



Chapitre

1

Physique

L'énergie, défi du XXI^e siècle

Au début du XXI^e siècle, « économiser l'énergie », c'est le slogan à la mode... Pourtant, une planète reçoit, directement ou indirectement, de l'étoile autour de laquelle elle gravite l'essentiel de son énergie. Pendant des siècles, les hommes ont pu se nourrir, se chauffer, s'éclairer, se déplacer, et faire fonctionner leurs machines en se contentant de cette énergie. Tout changea au XIX^e siècle lorsqu'on comprit que la machine à vapeur pouvait apporter un immense progrès à ceux qui sauraient l'utiliser. Mais pour faire fonctionner ces machines à vapeur, il fallait du charbon, beaucoup de charbon ! On creusa donc des mines et, comme les transports de marchandises restaient encore rudimentaires, on installa les usines qui utilisaient des machines à vapeur, le plus près possible des mines. L'industrialisation était en marche et que dire de la durée des déplacements : le train parcourait en quelques heures, à des vitesses hallucinantes de près de 60 km par heure, des distances qu'on mettait, autrefois plusieurs jours à parcourir.

Au début du XX^e siècle, c'est l'électricité qui fait son apparition. On pense alors que les barrages hydroélectriques vont devenir une source d'énergie inépuisable puisqu'une fois remplis, ils ne cessent de produire l'électricité dont on a besoin. Dans le même temps, le moteur à explosion fait son apparition, et pour le faire fonctionner, il faut du pétrole : on va donc commencer à creuser des puits... À la même époque, Einstein révolutionne la physique en disant que la masse et l'énergie d'un système sont indissociables et qu'une production d'énergie doit s'accompagner d'une perte de masse et réciproquement. Mais comme vous l'avez vu dans les séquences précédentes, produire de l'énergie en utilisant la perte de masse d'un système ne peut se faire que grâce à des réactions de fission ou des réactions de fusion.

Aujourd'hui, sur notre planète, on n'utilise donc plus pour produire l'énergie électrique et pour les transports, qu'une très faible partie de l'énergie (directe ou indirecte) que nous envoie le Soleil, mais, le minerai d'uranium, et les réserves de combustibles fossiles qui avaient mis des millénaires à se former et qui ne sont pas inépuisables...

Objectifs

- ▶ Savoir ce que peut produire sur un système un transfert thermique : une élévation de la température ou un changement d'état.
- ▶ Savoir que, pour un système donné, l'énergie se conserve : ce système ne peut que transformer une forme d'énergie en une autre forme. Connaître les différentes formes d'énergie utilisables sur Terre et leurs caractéristiques.



Les différentes formes d'énergie d'un système

1. L'énergie cinétique

L'énergie cinétique d'un système correspond à l'énergie qu'il possède du fait de son mouvement. On parle le plus souvent d'énergie cinétique, pourtant il existe en réalité deux énergies cinétiques. Celle dont vous connaissez la formule ($E_c = \frac{1}{2}.m.v^2$) correspond à l'énergie cinétique de translation due en fait au déplacement du centre d'inertie de ce système. Il faut savoir qu'un système se déplace en translation si l'on peut admettre que tous ses points se déplacent, à chaque instant, dans la même direction, dans le même sens et avec la même vitesse que son centre d'inertie.

Mais un système peut être en mouvement sans que son centre d'inertie se déplace; c'est le cas de tous les dispositifs qui tournent autour d'un axe fixe passant par leur centre d'inertie. On dit alors qu'ils possèdent de l'énergie cinétique de rotation dont vous n'avez pas encore à connaître la formule.

Dans le cas de systèmes qui possèdent un mouvement plus complexe parce qu'ils se déplacent en roulant (par exemple, une boule qui roule sur un plan incliné), leur énergie cinétique est alors égale à la somme de l'énergie cinétique de translation et de l'énergie cinétique de rotation.

2. L'énergie potentielle

Vous avez appris la formule donnant l'*énergie potentielle de pesanteur* quand on peut considérer que le champ de pesanteur est uniforme ($E_{pp} = mgh$), mais on sait définir beaucoup d'autres énergies potentielles.

Si l'on comprime un ressort, on sait qu'il est capable de propulser un objet lorsqu'il se détendra, on définit dans ce cas une *énergie potentielle élastique*. Tout objet déformé et qui reprend sa forme initiale, dès qu'on cesse l'action de déformation, peut posséder de l'énergie potentielle élastique.

Quand on maintient deux charges électriques de même signe très proches l'une de l'autre, on sait qu'elles vont s'écarter l'une de l'autre dès qu'on va cesser de les retenir. On dira alors que le système des deux charges électriques possédait de l'*énergie potentielle électrostatique* lorsqu'elles étaient maintenues à proximité l'une de l'autre.

Bien qu'il existe encore bien d'autres formes d'énergie potentielle, il faut préciser qu'il est impossible de définir une énergie potentielle qui correspondrait à l'action des frottements.

3. L'énergie interne

Un système est constitué de particules microscopiques qui peuvent toutes posséder de l'énergie cinétique et de l'énergie potentielle. On appelle énergie interne d'un système, que l'on note U , la somme des énergies cinétiques et des énergies potentielles de toutes les particules qui constituent le système.

Il est impossible de calculer l'énergie interne que peut posséder un système mais les physiciens se sont dotés de variables macroscopiques comme la température qui permettent de calculer la variation d'énergie interne d'un système.

Vous savez, peut-être, que lorsque la température augmente, l'agitation des particules microscopiques qui constituent le système devient plus importante. On peut donc en conclure qu'une élévation de température permet d'augmenter l'énergie interne d'un système, puisque l'énergie cinétique de chaque particule sera plus grande. Nous apprendrons comment lier la variation d'énergie interne aux variations de température.

4. Le capital énergie ou énergie totale

Un système peut donc stocker de l'énergie cinétique macroscopique, de l'énergie potentielle macroscopique et de l'énergie interne microscopique. Son capital énergie ou énergie totale, que l'on note E , sera donc égal à :

$$E = \Sigma E_c + \Sigma E_p + U.$$

Le signe Σ (qui se lit sigma) signifie qu'il faut faire la somme, soit de toutes les énergies cinétiques, soit de toutes les énergies potentielles.

Dans le cas simple d'un système qui ne possède que de l'énergie cinétique de translation et de l'énergie potentielle de pesanteur, vous avez appris que son énergie mécanique était égale à :

$$E_m = \frac{1}{2}mv^2 + mgz.$$

En fait dans le cas général, on posera de même que : $E_m = \Sigma E_c + \Sigma E_p$.

Le capital énergie d'un système est donc égal à la somme de son énergie mécanique macroscopique et de son énergie interne microscopique.

Si un système reçoit de l'énergie (soit sous forme de travail, soit sous forme de chaleur) du milieu extérieur, son capital énergie augmente. Par contre, si un système cède de l'énergie (soit sous forme de travail, soit sous forme de chaleur) au milieu extérieur, son capital énergie diminue.

Mais si le système n'échange rien avec le milieu extérieur (on dit alors qu'il constitue un **système isolé**), son capital énergie reste constant. Cela veut dire qu'un système qui n'échange pas d'énergie avec le milieu extérieur ne peut pas créer d'énergie ; il ne peut que transformer une sorte d'énergie en une autre sorte.

Par exemple, lorsque le conducteur appuie sur la pédale de frein, son véhicule perd de l'énergie mécanique ; dans le même temps les disques de freinage s'échauffent, donc l'énergie interne du véhicule a augmenté. Lors du freinage, le

véhicule adonc transformé une partie de son énergie mécanique macroscopique en énergie interne microscopique.



Élévation de la température et (ou) changement d'état lors d'un transfert thermique

Avertissement

Les expériences utilisant une source de chaleur ne peuvent être réalisées qu'avec précaution et qu'en présence d'un adulte.

1. Transfert thermique entre deux corps possédant des températures différentes

Quand on place une casserole d'eau froide sur une plaque électrique, on constate que la température de l'eau augmente : la plaque électrique a cédé de l'énergie, sous forme de chaleur, à l'eau de la casserole. Retirons la casserole de la plaque électrique ; on observe que la température de l'eau baisse parce que l'eau chaude cède, à son tour, son énergie sous forme de chaleur au milieu extérieur qui était plus froid.

Dans le deuxième cas, il est facile de vérifier qu'au bout d'une durée suffisamment longue, la température de l'eau deviendra égale à celle de l'air qui l'environne. Ces expériences simples illustrent une loi générale de la physique :

un corps chaud cède spontanément, lors d'un transfert thermique, de la chaleur à un corps froid jusqu'à ce qu'ils atteignent la même température d'équilibre.

Comment ce transfert thermique se réalise-t-il ? Comme nous l'avons dit précédemment, la température d'un corps est liée à l'agitation des particules qui le constituent. Lors du transfert thermique, l'énergie qui passe du corps chaud vers le corps froid, entraîne une augmentation de l'agitation des particules du corps froid et, au contraire, une diminution de l'agitation de celles du corps chaud. Ce transfert d'énergie microscopique désordonnée se produit lors des chocs entre particules et il ne s'arrête que lorsque les particules ne peuvent plus rien échanger car elles possèdent la même énergie : c'est alors que la température d'équilibre est atteinte.

Remarque

Il faut bien noter que le transfert thermique est un échange d'énergie désordonnée alors que le travail est un échange d'énergie ordonnée. Comme il est très

facile de passer de l'ordre au désordre, il est très facile de transformer du travail en chaleur (il suffit de taper dans ses mains pour les réchauffer), par contre, comme il est moins aisé de passer du désordre à l'ordre, il sera plus difficile de passer de la chaleur au travail (c'est néanmoins possible, dans une machine à vapeur ou un moteur à explosion, par exemple).

Le transfert thermique entre deux corps possédant des températures différentes peut se faire par trois mécanismes : la conduction, la convection et le rayonnement.

- **La conduction** : lorsqu'on laisse une cuillère métallique dans une casserole que l'on a mis à chauffer sur une plaque électrique, on se brûle les doigts quand on essaie de l'attraper ; si l'on fait la même chose avec une cuillère en bois, on ne subit pas la même mésaventure. Tout simplement parce qu'il existe des corps qui conduisent bien la chaleur (en général, ce sont les mêmes qui conduisent bien l'électricité, les métaux en particulier) et des corps qui ne conduisent pas bien la chaleur (on les nomme isolants thermiques). Ces derniers sont très utilisés dans la construction des habitations puisque « pour économiser l'énergie » il est important qu'il ne se produise pas de transfert thermique entre l'habitation et l'air qui l'entoure.

Activité 1 Les isolants thermiques

Rechercher les isolants thermiques qui sont fréquemment utilisés dans la construction des maisons

- **La convection** : il est bien connu que l'air chaud est moins dense que l'air froid ; on utilise cette propriété pour faire voler une montgolfière. Le ballon rempli d'air chaud s'élève au-dessus de l'air froid. À côté d'une source de chaleur, un fluide (gaz ou liquide) va voir sa masse volumique diminuer et va donc avoir tendance à s'élever mais lors de son déplacement, il s'éloigne de la source de chaleur et donc se refroidit, et finit par redescendre. Ce sont ces déplacements des fluides autour de la source de chaleur que l'on nomme courants de convection qui explique qu'un radiateur ne chauffe pas seulement l'espace situé près de lui mais toute la pièce.

Activité 2 Les courants de convection

Rechercher un exemple de dispositif qui utilise les courants de convection où le fluide qui réalise le transfert thermique est l'eau.

- **Le rayonnement** : on sait bien qu'entre le Soleil et la Terre, il y a des immensités de vide et que, pourtant, le Soleil transfère son énergie à notre planète. Il est donc impossible que ce transfert se fasse par conduction ou par convection. En réalité, le Soleil émet de nombreuses radiations : visibles, infra-rouges et ultra-violettes qui permettent de transférer l'énergie vers tout ce qui l'entoure puisque ces radiations électromagnétiques n'ont besoin (contrairement aux sons) d'aucun support matériel pour se propager.

Activité 3 Le fer à repasser

Pour savoir si un fer à repasser est chaud ou froid, il suffit d'approcher (à distance raisonnable) sa main de la semelle. Quels sont les deux phénomènes de transfert possibles qui permettent d'expliquer ce fait ?

2. Quantité de chaleur reçue ou perdue par un corps dont la température est modifiée, sans changement d'état

On chauffe, à l'aide d'une source de chaleur qui délivre une énergie q constante dans le temps, une masse m d'eau dans une casserole et on repère la température à intervalles de temps réguliers.

Remarque On doit repérer une température et non la mesurer car, en sciences physiques, une température ne constitue pas une grandeur mesurable. Sans rentrer dans les détails, les températures ne sont pas mesurables parce qu'on ne sait pas en définir simplement la somme. Si vous versez 2 L d'eau à 40°C dans 5 L d'eau à 25°C, vous pouvez tout de suite dire que le volume final est de 7 L mais vous ne pouvez pas donner, par simple addition, la température finale.

L'expérience est assez simple à réaliser en réglant au minimum le « petit feu » d'une cuisinière à gaz.

Il suffit de se procurer un thermomètre « électronique » au dixième de °C, ce que l'on trouve facilement dans le commerce. Même s'il n'est pas très juste, ce n'est pas grave puisque ce sont les variations de température qui vont nous intéresser.

Cette masse correspond d'abord à 200 mL (soit 0,200 kg avec une précision acceptable). Puis on multiplie la masse de l'eau par 2, puis par 3. On relève la température de l'eau, toutes les 30 secondes, pendant 5 minutes et on obtient les résultats suivants :

Date (s)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Température des 0,200 kg d'eau (°C)	15,4	16,6	17,8	19,0	20,2	21,4	22,6	23,8	25,0	26,2	27,4
Température des 0,400 kg d'eau (°C)	15,8	16,4	17,0	17,6	18,2	18,8	19,4	20,0	20,6	21,2	21,8
Température des 0,600 kg d'eau (°C)	16,2	16,6	17,0	17,4	17,8	18,2	18,6	19,0	19,4	19,8	20,2

Activité 4 Influence de la masse du corps

- Tracer, sur un même graphique pour les 3 expériences, la variation de la température $\Delta\theta = \theta(t) - \theta(t=0)$ en fonction de la date. Vérifier que l'on obtient, dans

chaque cas, une droite passant par l'origine dont on calculera le coefficient directeur.

- Pourquoi peut-on exprimer ces coefficients directeurs en K.s^{-1} ?
- Comparer le rapport des coefficients directeurs des expériences (1) et (2) et le rapport des masses d'eau chauffées ; même travail pour les expériences (1) et (3). Quelle conclusion doit-on en tirer sur le rôle joué par la masse du corps sur l'expression de la chaleur reçue par l'eau ?

On recommence la même expérience en remplaçant l'eau par du pétrole lampant. On se contentera de chauffer 400 g de pétrole, sans toucher au réglage de la source de chaleur. On obtient les résultats suivants :

Date (s)	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300
Température des 0,400 kg d'eau (°C)	15,8	16,4	17,0	17,6	18,2	18,8	19,4	20,0	20,6	21,2	21,8
Température des 0,400 kg de pétrole (°C)	15,3	16,5	17,7	18,9	20,1	21,3	22,5	23,7	24,9	26,1	27,3

Activité 5 Influence de la nature du corps

- Si la masse volumique du pétrole lampant est d'environ 800 kg.m^{-3} , quel volume faut-il verser dans la casserole pour en chauffer 0,400 kg ?
- Tracer, sur un même graphique pour les 2 expériences, la variation de la température $\Delta\theta = \theta(t) - \theta(t=0)$ en fonction de la date. Vérifier que l'on obtient, dans chaque cas, une droite passant par l'origine dont on calculera le coefficient directeur.
- Comparer le rapport des coefficients directeurs des deux expériences. S'il faut une énergie de 100 joules pour augmenter de x °C la température d'une masse m d'eau, quelle énergie faudra-t-il pour augmenter de x °C la température d'une masse m de pétrole lampant ?

La casserole et son contenu ont reçu, pendant une durée Δt , une énergie : $Q = q.\Delta t$ qui est proportionnelle au temps de chauffe puisque la chaleur reçue par unité de temps q est constante. Or, les expériences montrent que la durée Δt et l'augmentation de température $\Delta\theta = \theta(t) - \theta(t=0)$ sont proportionnelles. On doit donc en conclure que l'énergie reçue par transfert thermique Q est proportionnelle à l'augmentation de température.

La première série d'expériences nous a permis de montrer que, pour une même quantité d'énergie reçue, l'élévation de température est proportionnelle à l'inverse de la masse. On peut en conclure que l'énergie reçue par transfert thermique est proportionnelle à la masse de corps chauffé.

La deuxième série d'expériences nous a montré que, pour une même quantité d'énergie reçue, l'élévation de température dépend de la nature du corps chauffé. L'énergie reçue par transfert thermique est aussi proportionnelle à une grandeur

c que l'on nomme capacité thermique massique du corps dans un état donné. On retiendra donc la formule :

$$Q = m.c.\Delta\theta.$$

Q est une énergie et s'exprime donc en joules (J),

m est une masse et s'exprime en kg,

$\Delta\theta$ est une variation de température et s'exprime donc en kelvins (K) ; elle est égale à la variation de température en $^{\circ}\text{C}$ puisque c'est une différence et qu'on a $\theta \text{ (K)} = \theta \text{ (}^{\circ}\text{C)} + 273,15$.

(un écart de température a la même valeur si on exprime les températures en kelvin ou en $^{\circ}\text{C}$)

On doit en déduire que la capacité thermique massique c s'exprime en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Dans cette formule $\Delta\theta$ représente la différence entre la température finale du corps et la température initiale du corps. Si l'on chauffe le corps $\Delta\theta$ aura une valeur positive et donc l'énergie Q sera également positive. Au contraire, si le corps se refroidit, $\Delta\theta$ aura une valeur négative et donc l'énergie Q sera également négative. Cela correspond à une règle observée généralement en physique : quand on travaille sur des valeurs algébriques pour les énergies, on compte positivement, ce qui est reçu par un système, et négativement, ce qui est perdu par le système. En 1^{re}S, on se contentera de travailler sur des valeurs absolues (positives) pour les énergies, mais il faut alors préciser si cela correspond à un gain ou une perte pour le système étudié.

Lorsqu'un système voit sa température et son énergie interne augmenter, il reçoit de l'énergie. Le transfert d'énergie est positif.

Lorsqu'un système voit sa température et son énergie interne diminuer, il cède de l'énergie. Le transfert d'énergie est négatif.

Il existe des tables des capacités thermiques massiques que l'on peut trouver facilement sur « Internet ». On pourra alors vérifier les quelques propriétés citées ci-après :

- ▶ La capacité thermique de l'eau est égale à $4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- ▶ Toutes les capacités thermiques massiques des solides et des liquides sont plus petites que celle de l'eau : elles sont donc inférieures à $4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.
- ▶ La chaleur massique d'un corps à l'état liquide est toujours supérieure à celle du même corps à l'état solide : ainsi pour la glace (eau solide) $c = 2,10.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Remarque En mathématiques, $|x|$ s'appelle valeur absolue de x ; $|x| = x$ si x est positif et $|x| = -x$ si x est négatif.

Activité 6 Valeur de la capacité thermique massique du pétrole lampant

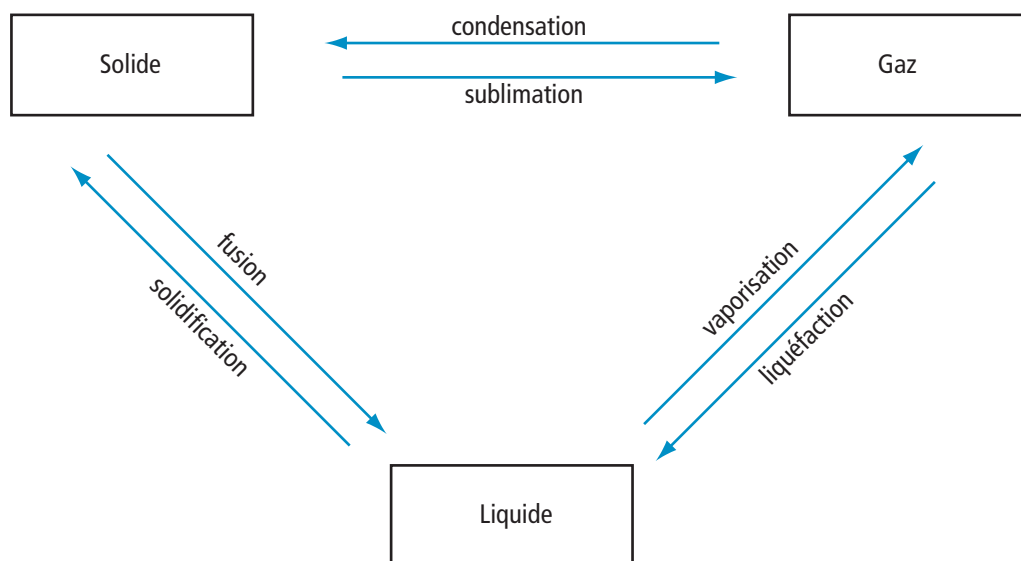
D'après les résultats de la deuxième série d'expériences, et en utilisant la valeur donnée pour l'eau, quelle est la valeur de la capacité thermique massique du pétrole lampant ?

3. Quantité de chaleur reçue ou perdue par un corps pur lors d'un changement d'état

On peut là encore réaliser une expérience en prenant des glaçons et en les plaçant dans la casserole qui contient un peu d'eau liquide. On mélange et on attend que la température se stabilise aux environs de 0°C . On place alors la casserole sur la même source de chaleur que lors des expériences précédentes (le « petit feu » d'une cuisinière à gaz toujours réglé au minimum).

De nouveau, on relève la température toutes les 30 secondes mais on constate qu'elle ne varie pratiquement pas. Il faut attendre que tous les glaçons aient fini de fondre, pour que la température commence à s'élever vraiment. On vient ainsi de vérifier une propriété importante : le changement d'état **d'un corps pur** se fait à température fixe, lorsque la pression reste constante.

Quand un corps change d'état à température constante, il reçoit ou il cède une énergie Q qui dépend de sa masse, de sa nature et du changement d'état envisagé. Rappelons quels sont les divers changements d'état que peut subir un corps pur :



On retiendra la formule : $Q = m.L$

Q s'exprime en joules,

m s'exprime en kg,

L s'appelle l'enthalpie de changement d'état massique : elle s'exprime donc en J.kg^{-1} .

Par exemple, l'enthalpie de fusion massique correspond à la quantité de chaleur nécessaire à 1 kg de corps pur pour passer de l'état solide à l'état liquide, cette transformation s'opérant à pression constante.

On doit donc toujours préciser en indice de quel changement d'état il s'agit, mais il faut savoir que la valeur absolue de l'enthalpie de changement d'état massique est la même quel que soit le sens dans lequel ce changement d'état s'opère : par exemple, $L_{\text{fusion}} = L_{\text{solidification}}$.

On trouve, dans des tables, les valeurs absolues des enthalpies qui correspondent aux différents changements d'état des corps purs.

Remarque

En 1^{re} S, on se contentera de travailler sur les valeurs absolues (positives) et donc la grandeur $Q = m.L$ que l'on calculera sera toujours positive. Mais il faudra alors bien faire attention dans quel sens s'opère le changement d'état : par exemple si la glace se transforme en eau, c'est que le système reçoit de l'énergie du milieu extérieur alors que si la vapeur d'eau se transforme en eau liquide, c'est le milieu extérieur qui recevra de l'énergie du système.

Activité 7 Enthalpie de changement d'état massique

- ▶ À partir des résultats de la première expérience déterminer la valeur de q , l'énergie fournie par la source de chaleur dans l'unité de temps
- ▶ Au bout de 2 minutes de chauffage, on peut déterminer que la masse des glaçons a diminué de 12 g (il suffit de peser les glaçons avant de commencer à chauffer et au bout de 2 minutes pour savoir la quantité qui a fondu ; si vous essayez de le faire, essayez bien les glaçons avant chaque pesée). Quelle valeur de l'enthalpie de fusion massique de la glace peut-on tirer de ce résultat ?

4. Quantité de chaleur reçue ou perdue par un corps dont la température est modifiée, avec changement d'état

On chauffe, toujours à l'aide de la même source de chaleur qui délivre une énergie q constante dans le temps, une casserole dans laquelle on a placé quelques glaçons sortis du congélateur. On repère la température à certaines dates et on obtient les résultats suivants :

Date (s)	0	10	20	30	90	150	180	240	260	280	300
Température (°C)	-19,8	-11,9	-4,0	0	0	0	0	0,3	8,2	16,1	24,0
$\theta - \theta_0$ (K)	0	7,9	15,8	19,8	19,8	19,8	19,8	20,1	28,0	35,9	43,8

Activité 8 Énergie reçue lorsque la température varie avec changement d'état

- ▶ Tracer la variation de la température $\Delta\theta = \theta(t) - \theta(t=0)$ en fonction de la date. En déduire la date à laquelle les glaçons ont commencé à fondre et celle à laquelle ils ont fini de fondre (on donnera ces deux résultats à la seconde près)
- ▶ En utilisant les résultats trouvés pour la valeur de q et de l'enthalpie de fusion massique, déterminer la masse des glaçons placés dans la casserole.

- Calculer l'énergie reçue par les glaçons d'abord en utilisant la valeur de q , et ensuite en se servant de la formule $Q = mc\Delta\theta$ (on utilisera pour m la valeur trouvée à la question précédente).
- Calculer l'énergie reçue par l'eau résultant de la fonte des glaçons d'abord en utilisant la valeur de q , ensuite en se servant de la formule $Q = mc\Delta\theta$ (on utilisera pour m la valeur trouvée à la question précédente).

Le but de l'activité précédente est de montrer que lorsqu'un système reçoit de l'énergie par transfert thermique qui provoque à la fois une variation de la température et un changement d'état, on peut déterminer la valeur de l'énergie reçue en décomposant le calcul en trois étapes :

Étape 1 : énergie reçue dans l'état (1) de la température initiale jusqu'à la température de changement d'état

Étape 2 : énergie reçue lors du changement d'état

Étape 3 : énergie reçue dans l'état (2) de la température de changement d'état jusqu'à la température finale.

5. Détermination de la température d'équilibre lors d'un transfert thermique

Nous avons déjà dit que lorsqu'on met en présence un corps chaud et un corps froid, le corps chaud cède son énergie au corps froid jusqu'à ce que les deux corps possèdent la même température. Pour déterminer la valeur de cette température d'équilibre, on applique le principe suivant : si deux corps n'échangent entre eux de l'énergie que par transfert thermique, l'énergie reçue par le corps froid est égale à l'énergie cédée par le corps chaud.

Pour que ce principe soit vrai, il faudrait que les deux corps n'échangent de l'énergie que l'un avec l'autre pour qu'il n'y ait aucune perte vers le milieu extérieur. Néanmoins, dans de nombreux cas, on obtient en appliquant ce principe à des situations réelles, une valeur de la température d'équilibre très proche de celle que l'on peut repérer expérimentalement à l'aide d'un thermomètre.

Pour un système de deux corps isolés thermiquement de l'extérieur, on a donc :

$$Q_1 = Q_2.$$

en appelant Q_1 , la quantité de chaleur cédée par le corps chaud et Q_2 la quantité de chaleur reçue par le corps froid.

Exemple On mélange 3 litres d'eau qui sont à la température de 18°C , avec 2 litres d'eau qui sont à la température de 26°C . Quelle sera la température d'équilibre des 5 litres d'eau.

L'énergie cédée par le corps chaud est donnée par : $Q_1 = m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{1i} - \theta_f)$.

L'énergie reçue par le corps froid est donnée par : $Q_2 = m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_{2i})$.

Si les 5 litres d'eau sont isolés thermiquement de l'extérieur, alors on peut écrire :

$$Q_1 = Q_2.$$

$$\text{soit } m_1 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_{1i} - \theta_f) = m_2 \cdot c_{\text{eau}} \cdot (\theta_f - \theta_{2i}).$$

On résout cette équation : $\theta_f(m_1 + m_2) = m_1 \cdot \theta_{1i} + m_2 \cdot \theta_{2i}$ et l'on trouve finalement :

$$\theta_f = \frac{m_1 \cdot \theta_{1i} + m_2 \cdot \theta_{2i}}{m_1 + m_2}.$$

On fait l'application numérique en considérant, comme toujours dans ce type d'exercices qu'un litre d'eau possède une masse de 1 kg, et en prenant les températures en kelvins ($T = t + 273$)

$$\theta_f = \frac{2 \cdot (26 + 273) + 3 \cdot (18 + 273)}{2 + 3} = 294 \text{ K}.$$

Ce qui donne une température d'équilibre, en s'arrêtant à la précision du degré :

$$\theta_f = (294 - 273) = 21^\circ\text{C}.$$

Si l'on n'avait pas transformé les températures en kelvins, on aurait trouvé le même résultat :

$$\theta_f = \frac{2 \times 26 + 3 \times 18}{2 + 3} = 21^\circ\text{C}.$$

Si l'on regarde l'équation de départ, on raisonne en fait sur des variations de température et l'on sait que ces variations sont les mêmes qu'on les exprime en K ou en $^\circ\text{C}$. On pourra donc s'éviter, dans ce type de calcul, de convertir les températures en kelvins.

Activité 9 Un bain à la bonne température

Pierre a fait couler dans sa baignoire 200 litres d'eau à 45°C . Quel volume d'eau à 16°C doit-il ajouter pour avoir un bain à 37°C ?

6. Interprétation microscopique de la variation de température et du changement d'état d'un corps pur

L'énergie interne d'un corps pur égale à la somme des énergies cinétiques potentielles de toutes les particules qui le constituent : $U = \sum_{n=1}^p E_c + \sum_{n=1}^p E_p$.

Un solide possède une structure compacte et ordonnée : à l'intérieur de ce solide, les particules sont le plus proche possible les unes des autres et elles sont « immobiles », ce qui signifie qu'elles ne se déplacent pas les unes par rapport aux autres. Toutefois, elles possèdent quand même de l'énergie cinétique car, elles peuvent tourner sur elles-mêmes et vibrer autour de leur position d'équilibre. Pour chaque particule : $E_c = E_c^{(\text{rot})} + E_c^{(\text{vib})}$, mais cette énergie cinétique est très inférieure à celle d'une particule qui se déplace en translation. Pour l'énergie potentielle qui est due aux forces de cohésion, qui permettent aux particules de

rester ensemble, il faut comprendre qu'elle varie comme l'énergie potentielle de pesanteur. Plus un objet s'écarte de la Terre, plus son énergie potentielle augmente ; plus les particules d'un corps s'éloignent les unes des autres, et plus leur énergie potentielle dues aux forces de cohésion augmente. Dans un solide, l'énergie cinétique des particules qui le constituent est faible et leur énergie potentielle aussi puisqu'elles sont très proches les unes des autres, donc **l'énergie interne d'un solide est peu élevée.**

Un liquide possède une structure compacte et désordonnée : à l'intérieur de ce liquide, les particules sont au contact les unes des autres et elles se déplacent les unes par rapport aux autres. Pour chaque particule : $E_c = E_c^{(trans)} + E_c^{(rot)} + E_c^{(vib)}$, donc cette énergie cinétique est nettement supérieure à celle d'une particule dans un solide. Comme ces particules se déplacent, elles sont « statistiquement » plus éloignées les unes des autres que dans le solide. Dans un liquide, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle des particules qui le constituent est plus importante que dans un solide, donc **l'énergie interne d'un liquide est nettement plus élevée que celle d'un solide.**

Un gaz possède une structure dispersée et désordonnée : à l'intérieur de ce gaz, les particules sont éloignées les unes des autres et elles se déplacent rapidement et, indépendamment, les unes par rapport aux autres. Pour chaque particule : cette énergie cinétique est supérieure à celle d'une particule dans un liquide, car elle se déplace plus vite. Comme ces particules sont éloignées les unes des autres leur énergie potentielle $E_c = E_c^{(trans)} + E_c^{(rot)} + E_c^{(vib)}$, est nettement plus grande que dans le liquide. Dans un gaz, l'énergie cinétique et l'énergie potentielle des particules qui le constituent est plus importante que dans un liquide, donc **l'énergie interne d'un gaz est nettement plus élevée que celle d'un liquide.**

Prenons un solide, à la température ordinaire, et apportons lui de l'énergie en le chauffant. Dans un premier temps, l'énergie cinétique de chacune de ces particules augmente et, macroscopiquement, cette augmentation d'énergie cinétique se traduit par une élévation de la température de ce solide. Mais, à force de voir son énergie cinétique augmenter, une première particule du solide va vouloir se déplacer. Pour cela, il faut qu'elle fasse varier son énergie potentielle. Ainsi, successivement, toutes les particules qui constituent le solide vont devoir faire varier leur énergie potentielle pour se mettre en mouvement. Pendant tout le temps, que l'énergie potentielle des particules augmente, leur énergie cinétique ne varie pas. Macroscopiquement, on voit donc le solide devenir liquide mais sa température reste constante pendant tout le changement d'état.

Quand la dernière particule a augmenté son énergie potentielle, le solide s'est entièrement transformé en liquide et l'énergie qu'on lui fournit va de nouveau permettre aux particules d'augmenter leur énergie cinétique. Macroscopiquement, cette augmentation d'énergie cinétique se traduit par une élévation de la température du liquide. Mais, à force de voir son énergie cinétique augmenter, une première particule du liquide va vouloir se séparer des autres. Pour cela, il faut qu'elle fasse varier son énergie potentielle. Ainsi, successivement, toutes les particules qui constituent le liquide vont devoir faire varier leur énergie poten-

tielle pour se séparer des autres. Pendant tout le temps, que l'énergie potentielle des particules augmente, leur énergie cinétique ne varie pas. Macroscopiquement, on voit donc le liquide se transformer en gaz mais sa température reste constante pendant tout le changement d'état.

Quand la dernière particule a augmenté son énergie potentielle, le liquide s'est entièrement transformé en gaz et l'énergie qu'on lui fournit va de nouveau permettre aux particules d'augmenter leur énergie cinétique. Macroscopiquement, cette augmentation d'énergie cinétique se traduit par une élévation de la température du gaz.

On comprend facilement que plus les forces de cohésion du corps pur sont importantes et plus il faudra fournir d'énergie lors du changement d'état puisque l'augmentation de l'énergie potentielle de chaque particule devra être plus importante. En général, les corps purs à structure ionique mettent en jeu des forces de cohésion supérieures à ceux à structure moléculaire (voir la séquence 3). On devra donc fournir plus d'énergie pour le changement d'état d'un corps pur à structure ionique que pour celui d'un corps pur à structure moléculaire.

Activité 10 Retour au solide

On cesse d'apporter de l'énergie au corps pur : en vous inspirant du paragraphe précédent, décrire ce qui se passera lorsque le corps pur gazeux va redevenir solide.



La conservation de l'énergie : quelques exemples pour divers systèmes

1. Le sauteur à la perche

Le sauteur, de masse 80 kg, court sur la piste d'élan qui est horizontale ; son centre d'inertie se trouve alors à 1 m au dessus du sol. Quand il plante sa perche dans le « butoir », sa vitesse est de 9 m.s^{-1} . La perche se plie alors, puis en reprenant sa forme initiale, elle catapulte le sauteur qui s'efforce « d'enrouler la barre » de telle sorte que son centre d'inertie s'élève juste à 10 cm au-dessus d'elle. On peut considérer qu'au sommet de son saut, la vitesse de l'athlète est nulle. Ensuite, le sauteur retombe dans la fosse de réception et, quand il prend contact avec la fosse, son centre d'inertie se trouve, de nouveau, à 1 m au dessus du sol. Dans ces conditions, le sauteur réussit son essai à 5,80 m.

Activité 11 Étude du saut

- Quelles énergies macroscopiques sont mises en jeu par l'athlète lors des différentes phases de son saut ?

- ▶ Quelle est la valeur de son énergie cinétique lorsque le sauteur plante sa perche dans le « butoir » ?
- ▶ Quelle est la hauteur maximale que pourrait sauter l'athlète si l'énergie mécanique se conservait ?
- ▶ Comment expliquez-vous que le sauteur ait pu réussir son essai à 5,80 m ?
- ▶ Quelle est la vitesse du sauteur lorsqu'il reprend contact avec la fosse de réception ? En quoi ce résultat confirme-t-il votre réponse précédente ?

Dans les calculs, on pourra prendre : $g = 10 \text{ S.I}$

2. Pain de glace

On fait glisser vers le bas un pain de glace, à vitesse constante, le long d'un plan incliné qui fait un angle de 30° avec l'horizontale. L'ensemble du dispositif se trouve à la température de 0°C . Sachant que le pain de glace a une masse de 50 kg, au départ, on se demande si, pour un parcours de 10 m sur le plan incliné, la perte de masse du pain de glace sera sensible ou non.

Activité 12 Fonte de la glace

- ▶ Pourquoi la masse du pain de glace doit-elle diminuer lorsqu'il glisse sur le plan incliné ?
- ▶ Quelle est la perte d'énergie mécanique que subira le pain de glace lorsqu'il parcourra 10 m sur le plan incliné (en supposant que sa masse variera très peu) ?
- ▶ Calculer, en utilisant le résultat précédent, la perte de masse que subirait le pain de glace ? L'approximation sur la perte de masse vous semble-t-elle justifiée ?
- ▶ On donne l'enthalpie de fusion massique de la glace : $3,3 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.

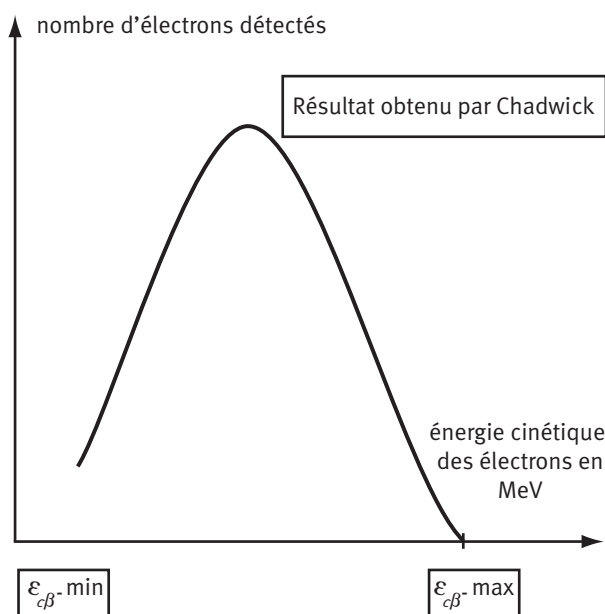
Dans les calculs, on pourra prendre : $g = 10 \text{ S.I}$

3. La découverte du neutrino

L'étude de la découverte du neutrino est intéressante, car, avant que l'existence de cette particule « indétectable » ne soit prouvée expérimentalement, certains physiciens, au milieu du XX^{e} siècle, en étaient arrivés à douter du principe de conservation du capital énergie d'un système. On peut, par exemple, citer Niels Bohr qui prétendait qu'il valait mieux mettre en doute un principe, que croire à l'existence d'une particule invisible.

Reprenons ce problème dans l'ordre chronologique. Au début du XX^{e} siècle, le physicien James Chadwick étudie les nucléides émetteurs β^- . Rappelons que de tels noyaux (voir la séquence 3) donnent une réaction nucléaire qui a pour équation : ${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z+1}^AY + {}_0^{-1}e$.

Cette réaction s'accompagne d'un rayonnement électromagnétique γ (constitué de photons de haute énergie) qui provient du fait que le noyau fils ${}_{Z+1}^A Y$ se forme en général dans un état excité et qu'il doit émettre un photon pour revenir dans son état fondamental. Or un noyau possède des niveaux d'énergie quantifiés (voir la séquence 2), ce qui implique que les photons, émis lors de la radioactivité β^- , ne peuvent posséder que des énergies bien particulières.



D'autre part vous avez appris qu'on peut calculer l'énergie produite par la réaction nucléaire de désintégration β^- en écrivant que :

$$E_{\text{nuc}} = (m(X) - [m(Y) + m(e)]).c^2$$

Lors de la radioactivité β^- , on peut considérer que l'énergie nucléaire produite se répartit entre l'énergie cinétique des particules émises et l'énergie du rayonnement γ (photon).

Si l'énergie du photon ne peut prendre que des valeurs particulières, l'électron n'aurait dû posséder lui-aussi que des valeurs d'énergie particulières.

Et, c'est de là qu'est venu tout le problème puisque les expériences de James Chadwick montraient que le spectre d'énergie des électrons émis

lors de la radioactivité β^- était continu, c'est à dire que l'énergie de ces électrons pouvait prendre n'importe quelle valeur comprise entre un minimum et un maximum.

Dès lors, on pouvait comme Niels Bohr penser que le principe de conservation du capital énergie ne s'appliquait plus dans le cas de la radioactivité β^- ou bien, comme l'a fait William Pauli, penser que le principe de conservation de l'énergie devait toujours s'appliquer et inventer le neutrino qui permettrait d'écrire que :

$$E_{\text{nuc}} = \epsilon_C(\text{électron}) + \epsilon_\gamma(\text{photon}) + \epsilon_{\text{(neutrino)}}.$$

Dans ce cas, pour toute désintégration β^- , il devait se former un électron, un photon et un neutrino, qui emporteraient l'énergie :

$$\epsilon_{\text{(neutrino)}} = E_{\text{nuc}} - \epsilon_C(\text{électron}) - \epsilon_\gamma(\text{photon}).$$

Pour Pauli, le neutrino était une particule légère, neutre et qui interagissait peu avec les autres particules. En fait, c'est Enrico Fermi qui donnera son nom à la particule « invisible » imaginée par Pauli, en même temps qu'il bâtera la théorie de l'interaction faible.

Entre 1952 et 1956, les physiciens Frederick Reynes et Clyde Cowan lancent une grande série de recherches pour mettre en évidence l'existence du neutrino. Ils travaillent à côté des réacteurs nucléaires et essaient de piéger les milliards de

neutrinos qui doivent s'en échapper au moyen d'une cible d'eau cadmiée. Ils parviennent à leurs fins en travaillant auprès du réacteur nucléaire de Savannah River.

Plus tard, on apprendra que la particule « invisible » qui apparaît lors de la radioactivité β^- , n'est pas, en réalité, un neutrino mais un antineutrino. C'est lors de la radioactivité β^+ que se forment les « vrais » neutrinos.

L'étude de ces particules mystérieuses reste d'actualité puisque, le 23 septembre 2011, un laboratoire du CERN a annoncé avoir mesuré une vitesse de déplacement des neutrinos légèrement supérieure à la vitesse de la lumière... affaire à suivre.



Les ressources énergétiques, renouvelables ou non, utilisables sur Terre : durées caractéristiques associées

1. Relation entre puissance et énergie

La puissance d'un transfert énergétique correspond à l'énergie échangée en une seconde. Elle permet d'évaluer la rapidité du transfert d'énergie.

$$E \text{ en J} \leftarrow \boxed{E = P \Delta t} \begin{cases} \rightarrow P \text{ en W} \\ \rightarrow \Delta t \text{ en s} \end{cases}$$

L'énergie s'exprime en Joule (J) ; la puissance s'exprime en Watt (W) ; la puissance est mesurée avec un wattmètre.

Remarque Cette formule n'est valable que si la puissance reste constante pendant la durée Δt .

Exemple Un marathonien développe une énergie importante sur une longue durée tandis qu'un coureur de 100 m transfère une énergie moins importante sur une durée beaucoup plus courte. Le coureur de cent mètres développe une puissance plus importante que le marathonien.

2. L'énergie musculaire

Il faut tout d'abord rappeler que, par définition, un système possède de l'énergie lorsqu'il peut fournir du travail. L'être humain correspond à cette définition puisqu'il peut se déplacer, donc acquérir de l'énergie cinétique, soulever des charges, déformer des matériaux, en un mot fournir du travail. Mais tout cela n'est possible que s'il se nourrit et pour cela, il lui faut trouver de l'eau potable et des aliments. Trouver de l'eau sur Terre n'est possible que parce qu'il pleut : la

formation des nuages dépend de l'énergie solaire. Ces aliments peuvent être de nature animale ou végétale mais de toute façon, au bout de la chaîne alimentaire, on retrouvera toujours les végétaux. Pour l'essentiel, les végétaux croissent grâce à la synthèse chlorophyllienne qui ne peut se faire qu'avec l'apport de l'énergie solaire. S'il se fait aider, dans son travail, par des animaux, il lui faudra de même les nourrir. Voilà pourquoi, dans le texte introductif, on a pu dire que jusqu'au XIX^e siècle, l'homme a pu vivre sur notre planète en n'utilisant directement ou indirectement que l'énergie que le Soleil lui procurait. *A priori*, les ressources en énergie musculaire sont inépuisables tant que le Soleil continue à nous apporter son énergie. Mais il faut bien dire, que tant pour les transports que dans l'industrie, ces ressources sont de moins en moins utilisées, au XXI^e siècle. En effet, l'homme a su créer des machines qui sont bien plus performantes que tous les êtres vivants. Le problème vient de ce que ces machines ne s'alimentent plus avec des végétaux mais, le plus souvent aujourd'hui, avec de l'électricité ou avec du pétrole.

Activité 13 La synthèse chlorophyllienne

- ▶ Lors de la synthèse chlorophyllienne, un végétal fait réagir le dioxyde de carbone et l'eau. Le glucose est un glucide de formule $C_6H_{12}O_6$; écrire l'équation chimique qui correspond à la synthèse chlorophyllienne du glucose.
- ▶ Calculer le volume d'eau liquide et le volume de dioxyde de carbone qu'il faut à une plante pour synthétiser 10 g de glucose, et le volume de dioxygène qu'elle libère alors

On donne les masses atomiques en $g.mol^{-1}$: C = 12, H = 1 et O = 16, et le volume molaire : $24 L.mol^{-1}$.

3. L'énergie solaire

Vous avez appris que le Soleil produit de l'énergie grâce à des réactions de fusion. Pour l'essentiel, au cours de ces réactions, l'hydrogène se transforme en hélium. Il rayonne ensuite cette énergie dont la Terre ne reçoit qu'une infime partie. On a vu quel rôle l'énergie solaire joue pour les êtres vivants eux-mêmes, mais l'homme peut aussi l'utiliser pour produire de la chaleur et (ou) de l'énergie électrique.

La première technique consiste à récupérer l'énergie solaire soit à l'aide de panneaux, soit à l'aide de « fours » qui vont permettre de chauffer de l'eau (ou d'autres substances). Avec les panneaux, on se contente de chauffer l'eau à une température inférieure à 100°C et on se servira de cette eau chaude pour les besoins domestiques. Avec les fours, on va produire de la vapeur d'eau qui entraînera une turbine comme dans les centrales thermiques classiques. Les pays qui possèdent des régions très ensoleillées (Espagne et Etats-Unis) ont déjà construit des centrales électriques fonctionnant sur ce principe.

La deuxième méthode consiste à utiliser des panneaux solaires qui transforment directement l'énergie solaire en énergie électrique. Cette méthode est de plus en plus utilisée chez les particuliers, mais il existe des centrales électriques qui

fonctionnent grâce à des panneaux solaires, même si elles ne donnent qu'une assez faible production (la centrale solaire de Beneixama, en Espagne détient le record en 2006 avec une puissance de 20 MW). En effet, pour fournir de grandes quantités d'énergie électrique, il faut d'immenses surfaces de panneaux solaires.

Activité 14 Panneaux solaires

Un mètre carré de panneau solaire bien exposé à la lumière fournit en moyenne une puissance électrique de 130 W par m^2 . Calculer la surface de panneaux solaires qu'il faudrait utiliser (au minimum) pour produire la même énergie qu'un réacteur nucléaire de 1200 MW ?

Peut-être savez-vous que le Soleil a une durée de vie limitée et qu'il a déjà vécu plus de temps qu'il ne lui en reste à vivre ? Les astrophysiciens les plus pessimistes pensent que bien avant sa mort, dans environ 4 milliards d'années, la vie sera devenue impossible sur la planète Terre et il chiffe à environ 1 milliard d'années, la durée de vie encore possible sur notre planète. De toute façon, si on rapporte cette durée à celle, moyenne, de la vie d'un homme (même si elle s'allonge de plus en plus), il s'écoulera bien des générations avant que l'alimentation en énergie solaire ne pose de réels problèmes aux êtres vivants sur notre planète.

4. L'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie que l'on peut créer grâce au vent, au moyen d'un dispositif quelconque. Elle tire son nom de « Eole » qui était le dieu des vents dans la Grèce antique. Cette énergie est une des premières à avoir été utilisée par les hommes, aussi bien pour les transports (bateaux à voile) que pour des activités « agro-industrielles » telles que la transformation du blé en farine (moulins à vent) ou le pompage de l'eau des nappes souterraines.

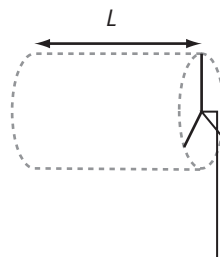
Aujourd'hui, les moulins à vent ne servent plus qu'à décorer les paysages et les voiles sur les bateaux sont surtout utilisées pour faire du sport. Toutefois, des projets de bateaux mixtes (moteur + voile) sont à l'étude ; le moteur ne devant servir qu'en l'absence de vent. Par contre, on utilise l'énergie éolienne pour produire de l'électricité : les éoliennes, couplées à un générateur électrique, peuvent produire, soit du courant alternatif (elles sont alors directement reliées au réseau de distribution), soit du courant continu (elles alimentent alors un système qui permet de stocker l'énergie électrique).

Comme l'existence des vents sur notre planète est liée indirectement à l'énergie solaire qu'elle reçoit, les réserves d'énergie paraissent là encore « inépuisables ».

Activité 15 Énergie éolienne

Une éolienne est faite de trois pales de longueur $R = 30 \text{ mètres}$.

Lorsque le vent souffle à 15 m.s^{-1} , on peut donc considérer que l'air qui traverse, en une seconde, le



cercle engendré par la rotation des pales est contenu dans un cylindre de longueur $L = 15 \text{ m}$ et de surface de base : $\pi R^2 = 2,8.10^3 \text{ m}^2$.

- La masse volumique de l'air étant égale à $1,18 \text{ kg.m}^{-3}$, calculer la puissance reçue par l'éolienne en une seconde.
- Combien d'éoliennes faudrait-il utiliser (au minimum) pour produire la même énergie qu'un réacteur nucléaire de 1200 MW ?

5. L'énergie hydroélectrique

L'énergie hydroélectrique est l'énergie qui utilise l'énergie cinétique d'un courant d'eau pour produire de l'énergie électrique. On peut préciser que les premières machines utilisées industriellement par l'homme ont souvent utilisées ce type d'énergie : on peut citer, par exemple, les moulins.

L'énergie hydroélectrique est une énergie « inépuisable » puisqu'elle ne dépend que du cycle de l'eau qui existera toujours tant que notre planète recevra le rayonnement solaire actuel. Cependant, pour produire de l'électricité, en grande quantité, il faut construire des barrages et noyer ainsi d'immenses surfaces, ce qui pose des problèmes humains et écologiques. En France métropolitaine, il n'existe pratiquement plus de sites où l'on peut implanter un barrage ; il a fallu aller en Guyane pour construire le « grand » barrage de Petit-Saut à la fin du XX^e siècle. On peut toutefois noter qu'il existe, en France, de nombreuses micro-centrales qui utilisent les chutes d'eau qui sont fréquentes sur les rivières pour produire du courant qui est utilisé « in-situ » et dont le surplus est vendu à E.D.F.

Activité 16 Barrage hydro-électrique

L'eau d'un barrage hydro-électrique descend vers les turbines situées soixante mètres plus bas avec un débit de 100 mètres cube par seconde (donc 100 tonnes par seconde).

On admet que toute l'énergie potentielle que possédait l'eau avant de descendre dans les canalisations se retrouve sous forme d'énergie électrique.

On rappelle que l'énergie potentielle de pesanteur E d'une masse M , située à l'altitude h , est donnée par l'expression : $E = Mgh$, dans laquelle g est l'intensité du champ de pesanteur.

- En déduire la puissance électrique fournie par ce barrage. (L'intensité du champ de pesanteur vaut $g = 10 \text{ m.s}^{-2}$).
- Combien de barrages faudrait-il utiliser (au minimum) pour produire la même énergie qu'un réacteur nucléaire de 1200 MW ?

6. Les autres énergies renouvelables

Il existe peu de sources d'énergie qui ne dépendent pas de l'énergie solaire, on peut toutefois citer : l'énergie nucléaire dont nous reparlerons plus loin, l'énergie marémotrice et la géothermie.

Pour utiliser l'énergie marémotrice, on peut jouer, comme le fait l'usine de la Rance sur l'énergie potentielle d'un grand volume d'eau : on stocke un maximum d'eau à marée haute et on utilise cette eau stockée (comme l'eau d'un barrage pour une centrale hydroélectrique) à marée basse. On peut aussi utiliser directement les courants d'eau, consécutifs aux flux et au reflux des marées : c'est ce qui a été réalisé en Norvège. Cette usine fonctionne sur le principe des éoliennes, sauf que c'est l'eau et non le vent qui fait tourner les pales.

Le principal problème à résoudre pour produire de l'énergie grâce aux marées, est celui de la corrosion des éléments qui sont en contact avec l'eau de mer. En effet, l'eau salée est bien plus corrosive que l'eau douce (ou le vent) et tous les problèmes liés à la longévité des matériaux utilisés ne sont pas encore bien maîtrisés.

La géothermie consiste à prélever la chaleur contenue dans le sol. Plus on va rechercher cette énergie profondément dans le sol, et plus l'apport énergétique est important. Le record actuel est un forage à 12 km de profondeur qui permet d'obtenir une température de 180°C.

Pour récupérer cette énergie, soit on utilise directement de l'eau qui se trouve sous terre : les romains utilisaient déjà des sources d'eau chaude pour leurs thermes, soit on fait circuler un fluide (souvent un mélange d'eau et de glycol) pour récupérer l'énergie qui se trouve à une certaine profondeur.

On distingue la géothermie de basse profondeur qui est surtout utilisée pour le chauffage domestique et le chauffage urbain et la géothermie des grandes profondeurs qui va servir à produire de l'électricité.

Pour ce qui concerne la géothermie de basse profondeur, il faut savoir qu'à 4,50 m au-dessous du sol, la température reste pratiquement constante aux environs de 12°C. Les pompes à chaleur que l'on utilise pour les installations domestiques peuvent donc servir au chauffage pendant l'hiver et à la climatisation pendant l'été.

On a classé la géothermie dans les énergies renouvelables, il faut pourtant savoir que les gisements géothermiques de grande profondeur (ceux utilisés pour produire de l'électricité) ont une durée de vie limitée à quelques dizaines d'années.

7. L'énergie produite à partir des combustibles fossiles

Historiquement, c'est d'abord le charbon qui a été utilisé le premier au début de l'ère industrielle (c'est-à-dire au XIX^e siècle). Il a servi aussi bien pour les transports (sur terre, locomotives à vapeur et sur mer, bateaux à vapeur), que pour le chauffage et que pour faire tourner les machines. Bien que son utilisation ait diminuée (en pourcentage) aujourd'hui pour deux raisons :

- ▶ l'une écologique, puisque le charbon est le combustible qui, à quantité égale, produit le plus de CO₂,
- ▶ l'autre, en raison de la crise économique mondiale,

il ne faudrait pas croire qu'il ne se consomme plus de charbon sur notre planète. La consommation mondiale est encore d'environ 6500 millions de tonnes, ce qui place le charbon, derrière le pétrole mais devant le gaz. Les réserves de charbon, dans le monde, sont estimées à environ 1000 milliards de tonnes. On peut donc facilement calculer que si la consommation mondiale n'augmente pas, on pourra encore utiliser du charbon pendant au moins 150 ans.

Dès l'apparition du moteur à explosion, on a commencé à exploiter sérieusement les puits de pétrole. Progressivement, le pétrole a supplanté le charbon dans tous les secteurs : le transport, bien sûr, mais aussi le chauffage et aussi de manière indirecte, dans l'industrie, puisque les machines actuelles fonctionnent le plus souvent grâce à des moteurs électriques et que de nombreuses centrales thermiques sont chauffées, grâce au pétrole. On a longtemps pensé que l'on trouverait toujours de nouveaux gisements de pétrole pour faire face à la demande ; ce n'est plus le cas aujourd'hui, on sait qu'on ne pourra plus découvrir de réserves exploitables, en grande quantité, dans les années à venir. On n'a pas encore atteint « le pic de Hubert », c'est à dire le moment où la production mondiale de pétrole va commencer à diminuer mais tout indique que l'on s'en approche à grands pas (peut être moins de 10 ans). A l'heure actuelle, les experts pensent que dans moins de 40 ans, il ne sera plus possible d'utiliser le pétrole, comme on le fait actuellement, car les réserves seront pratiquement « à sec ».

Souvent associé au pétrole, le gaz naturel est constitué essentiellement de méthane (CH_4). On a pu penser, dans les années 1970, que son utilisation allait dépasser celle du charbon mais son prix, plus élevé, fait que des trois combustibles fossiles, il est encore le moins utilisé. Toutefois le gaz naturel représente près du quart de la consommation énergétique mondiale. On peut chiffrer cette consommation aux environs de 3000 milliards de m^3 par an. Les réserves de gaz naturel sont estimées quant à elles à environ 190 000 milliards de m^3 . On peut donc facilement calculer que si la consommation mondiale n'augmente pas, on pourra encore utiliser du gaz naturel pendant au moins 60 ans.

8. L'énergie nucléaire

On vous a expliqué, dans une séquence précédente, que pour produire de l'énergie nucléaire, on ne possède encore qu'une seule possibilité : réaliser la fission de l'uranium 235. C'est en effet le seul isotope naturel fissile qui existe sur notre planète. L'élément uranium n'est pas rare sur Terre, mais compte tenu des possibilités d'exploitation des sites, on estime à environ 4 millions de tonnes les réserves utiles en uranium. La consommation actuelle est d'environ 64 000 tonnes par an. On peut donc facilement calculer que si la consommation mondiale n'augmente pas, on pourra encore utiliser ces réserves d'uranium pendant au moins 60 ans.

Cependant ces calculs ignorent les progrès qui peuvent encore être réalisés pour produire de l'énergie à partir des réactions de fission. À partir du jour où on maîtrisera mieux la surgénération (ou surrégénération), les réserves pour produire de l'énergie nucléaire deviendront quasiment inépuisables puisque le combustible ne sera pas l'isotope 235 (abondance isotopique 0,7%) mais l'isotope 238 (abondance isotopique 99%) et qu'on pourra aussi utiliser le thorium 232 qui est un

élément encore plus abondant que l'uranium 238.

La surgénération consiste à utiliser des noyaux qui au départ ne sont pas fissiles mais fertiles (uranium 238 ou thorium 232). Ces éléments fertiles peuvent capturer des neutrons et à la suite de réactions nucléaires se transformer en isotopes fissiles, par exemple en plutonium 239 (qui n'existe pas à l'état naturel).

Activité 17 Transformation de l'uranium

L'uranium 238 capte un neutron, puis subit deux désintégrations β^- pour devenir du plutonium 239.

► Écrire les trois équations nucléaires qui permettent cette transformation.

En France, la construction de Superphénix, un surgénérateur qui fonctionnait à l'aide du plutonium 239, récupéré dans les réacteurs de première génération, et d'uranium 238, avait permis une avancée considérable dans ce domaine mais, le projet jugé beaucoup trop coûteux, a finalement été définitivement abandonné en 1997. On considère que l'utilisation de surgénérateurs permettrait de multiplier par un facteur d'au moins 50 les réserves en uranium, ce qui laisserait espérer 3000 ans d'utilisation au lieu de 60 !

N'oublions pas enfin les réactions de fusion. Pour le moment, il n'est toujours pas possible de contrôler ce type de réaction nucléaire et donc de les utiliser pour produire de l'énergie. Mais, on peut raisonnablement penser que les scientifiques y parviendront un jour. Si l'on tient compte du fait qu'à masse égale une réaction de fusion produit 3 à 4 fois plus d'énergie qu'une réaction de fission, et que les réserves de deutérium contenues dans les océans sont immenses, l'homme peut alors espérer disposer de l'énergie dont il aura besoin pendant des centaines de millénaires.

Évidemment, les difficultés liées à la sécurité nucléaire et au traitement des déchets radioactifs ne sont pas non plus à prendre à la légère...

Résumé

Un système peut posséder de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et de l'énergie interne.

Il existe de nombreuses formes d'énergie potentielle.

L'énergie interne d'un système, que l'on note U est égale à la somme des énergies cinétiques et des énergies potentielles de toutes les particules qui constituent le système.

On peut relier la variation d'énergie interne d'un système à des grandeurs macroscopiques, par exemple la température.

Le capital énergie ou énergie totale d'un système est égal à la somme de son énergie mécanique macroscopique et de son énergie interne microscopique.

Quand un système n'échange rien avec le milieu extérieur (on dit alors qu'il constitue un système isolé), son capital énergie reste constant. Cela veut dire qu'un système qui n'échange pas d'énergie avec le milieu extérieur ne peut pas créer d'énergie ; il ne peut que transformer une sorte d'énergie en une autre sorte.

Lors d'un transfert thermique, un corps chaud cède spontanément de la chaleur à un corps froid jusqu'à ce qu'ils atteignent la même température d'équilibre.

Pour déterminer la valeur de la température d'équilibre, on admet que, si deux corps n'échangent entre eux de l'énergie que par transfert thermique, l'énergie reçue par le corps froid est égale à l'énergie cédée par le corps chaud.

Bilan d'énergie pour un système de deux corps isolés thermiquement échangeant de l'énergie thermique

$$Q_1 = Q_2.$$

Quand la température d'un système varie mais que cette variation n'entraîne pas de changement d'état de ce système, l'énergie reçue ou cédée, sous forme de chaleur, est donnée par la relation :

$$Q = m.c.\Delta\theta.$$

La capacité thermique massique c s'exprime en $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Le changement d'état d'un corps pur se fait à température fixe, lorsque la pression reste constante.

Lors d'un changement d'état, l'énergie reçue ou cédée par un système, sous forme de chaleur, est donnée par la relation

$$Q = m.L.$$

L s'appelle l'enthalpie de changement d'état massique : elle s'exprime en J.kg^{-1} .

On doit toujours préciser en indice de quel changement d'état il s'agit, mais il faut savoir que la valeur de l'enthalpie de changement d'état massique est la même quel que soit le sens dans lequel ce changement d'état s'opère.

Lorsqu'un système reçoit de l'énergie par transfert thermique qui provoque à la fois une variation de la température et un changement d'état, on peut déterminer la valeur de l'énergie reçue en décomposant le calcul en plusieurs étapes.

Parmi les énergies utilisables sur Terre, on distingue les énergies renouvelables, c'est-à-dire, celles que l'homme aura « toujours » à sa disposition et celles qui dépendent de réserves qui s'épuiseront un jour.

Parmi les énergies renouvelables, on peut citer l'énergie musculaire, solaire, éolienne, hydroélectrique, marémotrice et la géothermie.

Parmi les énergies non renouvelables, on peut citer les combustibles fossiles (charbon, gaz et pétrole) et l'énergie nucléaire.

E

exercices

Dans les exercices, la masse volumique de l'eau est égale à 1000 kg.m^{-3} .

Exercice 1 Faire bouillir de l'eau

- ❶ La plaque d'une cuisinière électrique fournit une énergie de 1000 J par seconde. On y pose une casserole qui contient 2 litres d'eau à 15°C . Sachant que seulement 75% de l'énergie de la plaque sert à chauffer l'eau de la casserole, au bout de combien de temps cette eau se mettra-t-elle à bouillir ?
- ❷ La ménagère étourdie a oublié qu'elle avait posé la casserole d'eau sur la plaque électrique et elle n'y repense qu'une heure après. Quel volume d'eau restera-t-il dans la casserole ?

La pression reste constante, égale à la pression atmosphérique normale.

Données La capacité thermique massique de l'eau : $4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et l'enthalpie de vaporisation massique de l'eau sous la pression atmosphérique normale : 2257 kJ.kg^{-1} .

Exercice 2 Du fer rouge dans l'eau

Un morceau de fer de 500 g est chauffé au rouge à 1100°C , puis plongé dans un baquet d'eau froide de 200 litres , dont la température est de 16°C . Si l'on suppose qu'il n'y a pas d'eau vaporisée, de combien s'élèvera la température de l'eau du baquet ?

Données Capacité thermique massique de l'eau : $4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
capacité thermique massique du fer : $460 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exercice 3 Capacité thermique massique du plomb

- ❶ On plonge dans un récipient contenant $0,50 \text{ L}$ d'eau froide à 17°C , un morceau de plomb de masse $m = 157 \text{ g}$ qui sort d'une étuve à la température de 120°C . La nouvelle température d'équilibre est 18°C . Calculer la capacité thermique massique du plomb.
- ❷ Quel volume d'eau à 15°C , faut-il rajouter dans le récipient pour que la température de l'eau redevienne égale à 17°C . (Vous devrez, lors de ce calcul, faire une approximation que vous justifierez).

Données Capacité thermique massique de l'eau : $4,18.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exercice 4 La fonte des glaces

Lorsque l'atmosphère est très pure et le soleil près du zénith, une surface terrestre de 1 cm^2 , placée perpendiculairement aux rayons solaires peut recevoir, au niveau de la mer, une énergie qui peut aller jusqu'à 6 J par minute.

- ① Calculer l'énergie que peut recevoir, dans ces conditions, une surface de 1 ha , exposée ainsi pendant 1 heure.
- ② On suppose que cette énergie est entièrement utilisée pour faire fondre de la glace, la température étant de 0°C . Quelle est l'épaisseur de glace qui aura fondu au bout d'une heure pour un hectare de glacier, situé au niveau de la mer et dont la surface est perpendiculaire aux rayons solaires ?

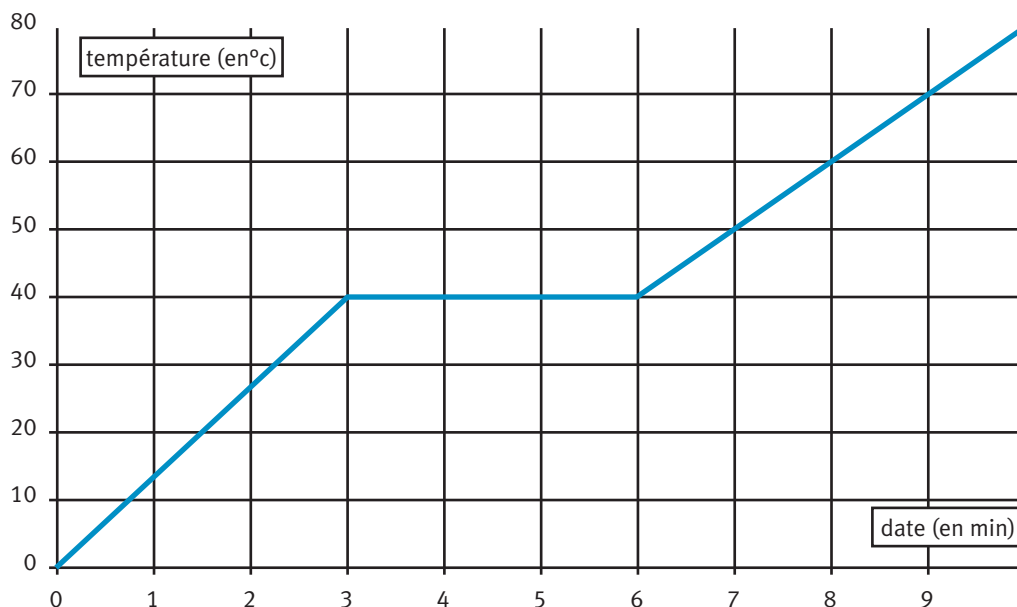
Données Densité de la glace : $0,92$;
enthalpie de fusion massique de la glace : $3,33 \cdot 10^5 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$.

Exercice 5 Changement d'état

Le graphe ci-dessous représente la variation de température d'une masse de 1 kg d'un corps pur qui est à l'état solide à 0°C , à la date $t = 0$, et qu'on chauffe à l'aide d'une source de chaleur qui fournit une énergie de $2,0 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{min}^{-1}$. On suppose qu'il n'y a aucune perte de chaleur.

Déterminer à l'aide de ce graphe :

- la capacité thermique massique du corps pur à l'état solide
- la température de fusion du corps pur
- l'enthalpie de fusion massique du corps pur
- la capacité thermique massique du corps pur à l'état liquide



Exercice 6 À coups de marteau

Un ouvrier frappe avec un marteau de masse $m = 1 \text{ kg}$, sur un morceau de fer de masse $m' = 500 \text{ g}$. Il fait tomber son marteau d'une hauteur $h = 50 \text{ cm}$ au-dessus de l'étau qui retient le morceau de fer. Le marteau part sans vitesse initiale et arrive avec une vitesse de 15 m.s^{-1} sur le morceau de fer.

- ❶ L'énergie mécanique du marteau se conserve-t-elle ? Comment interprétez-vous ce résultat ?
- ❷ On suppose que toute l'énergie que possédait le marteau est transmise au morceau de fer au moment de la frappe. Seulement 40% de cette énergie sert à déformer le morceau de fer. Calculer la valeur de l'énergie qui correspond aux 60% restants ; à quoi servent-ils ?
- ❸ L'ouvrier donne très rapidement 10 coups de marteau identiques (ou supposés tels), sur ce morceau de fer dont la température était de 19°C avant le premier coup de marteau. Quelle sera sa température après le dixième ?

Données $g = 10 \text{ S.I}$ et la capacité thermique massique du fer : $460 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exercice 7 Projectile en plomb

Un pistolet peut tirer des projectiles en plomb de masse m . Un de ces projectiles est animé d'une vitesse de 550 m.s^{-1} et possède une température de 40°C lorsqu'il s'écrase sur la cible.

En admettant que la moitié son énergie cinétique est conservée par le projectile en plomb, sous forme de chaleur, déterminer quels sont l'état physique final et la température finale du projectile en plomb.

Données Capacité thermique massique du plomb à l'état solide : $129 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
capacité thermique massique du plomb à l'état liquide : $142 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
la température de fusion du plomb : 327°C
et son enthalpie de fusion massique : $2,46.10^4 \text{ J.kg}^{-1}$.

Exercice 8 Étude d'un glaçon

On introduit dans un congélateur, un petit cube de plastique dur de 3 cm d'arête qui contient de l'eau à 18°C . Le cube ne possède pas de face supérieure et il est complètement rempli. Une heure plus tard, on constate que ce cube de plastique (qui ne s'est pas déformé) contient un glaçon à -15°C .

- ❶ Quelle est la hauteur du glaçon dans le petit cube de plastique ?
- ❷ Calculer l'énergie cédée par l'eau contenue dans le cube de plastique lors de cette transformation.

Données Densité de la glace 0,92,
capacité thermique massique de l'eau à l'état solide : $2,1.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide : $4,2.10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
température de solidification de l'eau : 0°C
et son enthalpie de fusion massique : $3,33.10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.

Exercice 9 **Rafrâichissement estival**

Un jour d'été, pour boire son verre d'eau, de contenance 200 mL, plus frais, Céline y plonge des glaçons de masse $m = 20$ g qui sont à la température de -12°C .

- ❶ Si la température de l'eau, dans le verre, est de 20°C , avant d'y ajouter les glaçons, quelle devrait-elle être lorsqu'ils auront fini de fondre ?
- ❷ Céline constate qu'en réalité, la température de l'eau dans son verre est de $13,5^{\circ}\text{C}$ lorsque les glaçons ont fini de fondre. Evaluer l'énergie que le milieu extérieur a cédé au verre de Céline pendant la fonte des glaçons.

Données Capacité thermique massique de l'eau à l'état solide : $2,1 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
 capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide : $4,2 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
 température de solidification de l'eau : 0°C
 et son enthalpie de fusion massique : $3,33 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.

Exercice 10 **Température d'un four**

Pour déterminer la température d'un four, on y place, assez longtemps, un morceau de platine de masse $m = 100$ g. Puis on le sort rapidement du four et on le plonge dans de la glace à 0°C . On détermine la masse d'eau de fusion qui en résulte : $m' = 45$ g.

- ❶ Pourquoi faut-il prendre un morceau de platine (et pas un autre métal) pour déterminer la température du four ?
- ❷ Quelle est la température du four ?

Données Capacité thermique massique du platine à l'état solide : $135 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$,
 et l'enthalpie de fusion massique de l'eau : $3,33 \cdot 10^5 \text{ J.kg}^{-1}$.

Exercice 11 **C'est dur de pédaler**

Un cycliste s'aperçoit que, dans une descente à 3 % (c'est à dire qu'il descend de 3 m lorsqu'il parcourt 100 m), il peut conserver, sans pédaler, une vitesse constante de 36 km.h^{-1} .

- ❶ Calculer sa perte d'énergie mécanique pour 100 m de descente parcourue.
- ❷ En se basant sur son énergie mécanique maximale calculée en prenant pour état de référence de l'énergie potentielle de pesanteur, le point le plus bas de sa trajectoire, quel pourcentage de son énergie mécanique cette perte représente-t-elle, pour un parcours de 100 m ?

Pour évaluer, l'énergie musculaire qu'il dépense, ce cycliste fait alors l'hypothèse que ce pourcentage d'énergie mécanique perdue sur un parcours de 100 m (calculée comme on l'a fait précédemment), reste toujours le même quand il roule à vitesse constante.

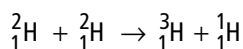
- ❸ Quand le cycliste pédale pendant 100 m, sur une route plate, à la vitesse constante de 15 km.h^{-1} , quelle énergie musculaire ce cycliste dépensera-t-il ? Même question s'il veut rouler à la vitesse constante de 30 km.h^{-1} .

- 4 Quand le cycliste pédale pendant 100 m, dans une côte à 2 %, à la vitesse constante de 15 km.h^{-1} , quelle énergie musculaire ce cycliste dépensera-t-il ? Même question s'il veut rouler à la vitesse constante de 30 km.h^{-1} .
- 5 En vous fondant sur votre expérience personnelle, les résultats obtenus avec l'hypothèse faite par le cycliste, vous semblent-ils cohérents ?

Données Masse du système (cycliste et bicyclette) $m = 75 \text{ kg}$
et l'intensité de la pesanteur $g = 10 \text{ S.I.}$

Exercice 12 Réaction de fusion

La proportion en nombre d'atomes de deutérium existant dans l'hydrogène naturel est estimé à 0,015%. Le deutérium peut donner la réaction nucléaire qui a pour équation :



et qui libère une énergie de 4,05 MeV.

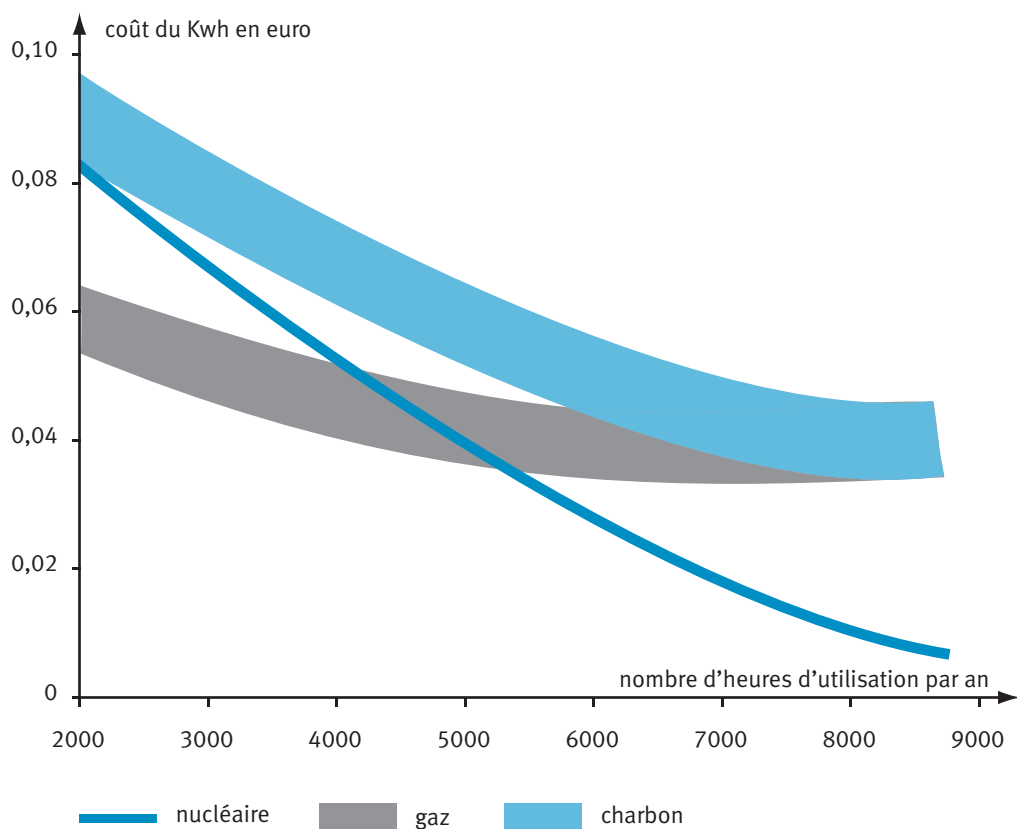
- 1 Calculer le nombre d'atomes d'hydrogène contenus dans 1 kg d'eau naturelle et en déduire le nombre d'atomes de deutérium que l'on peut y trouver.
- 2 Si tous les atomes de deutérium contenus dans 1 kg d'eau naturelle, donnaient la réaction nucléaire ci-dessus, quelle quantité d'énergie en MeV, puis en joules, pourrait-on récupérer ?
- 3 Un kg d'essence peut libérer, lors de sa combustion, une énergie de 5.10^7 J . Combien de kg d'essence faudrait-il faire brûler pour obtenir autant d'énergie que celle que l'on pourrait tirer d'un kg d'eau naturelle, si tous les atomes de deutérium donnaient la réaction nucléaire ci-dessus ?

Données Masses atomiques en g.mol^{-1} : $\text{H} = 1$; $\text{O} = 16$,
nombre d'Avogadro : $6,02.10^{23} \text{ mol}^{-1}$ et la conversion : $1 \text{ MeV} = 1,6.10^{-13} \text{ J}$.

Exercice 13 Coût de l'énergie

En France, on peut trouver des courbes prévisionnelles qui indiquent le prix du kilowattheure électrique selon la source d'énergie et la durée annuelle d'utilisation ; pour dresser ces courbes on doit aussi faire des hypothèses sur la parité euro-dollar.

Ces prix prennent en compte les dépenses de recherche et de développement, ainsi que pour le nucléaire, celles de retraitement, de stockage et même d'éventuel accident.



- ❶ Pourquoi la courbe concernant le prix de l'énergie nucléaire est-elle beaucoup moins large que les deux autres ?
- ❷ Pour un faible nombre d'heures d'utilisation, quelle sera l'énergie la plus rentable ?
- ❸ Pour un nombre d'heures d'utilisation maximum, quelle sera l'énergie la plus rentable ?
- ❹ Combien y a-t-il d'heures dans une année ? Quelle est la source d'énergie la plus rentable pour une utilisation à 50% du temps au cours de l'année ?

Chapitre
2

Chimie

Combustion des alcools
et des alcanes

Objectifs

- ▶ Écrire une équation de réaction de combustion.
- ▶ Savoir calculer l'énergie libérée lors d'une réaction de combustion.
- ▶ Mettre en œuvre un protocole pour estimer la valeur de l'énergie libérée lors d'une combustion.
- ▶ Recueillir et exploiter des informations sur le stockage et la conversion d'énergie chimique.
- ▶ Argumenter sur l'impact environnemental des transformations mises en jeu.
- ▶ Déterminer l'ordre de grandeur de la masse de CO_2 formé par combustion d'un carburant.

Nous avons vu en classe de Seconde qu'une transformation chimique pouvait donner lieu à un échange thermique entre le système et le milieu extérieur.

On distingue alors les transformations chimiques **exothermiques** (le système fournit de la chaleur au milieu extérieur) des transformations chimiques **endothermiques** (le système prend de la chaleur au milieu extérieur).

Le cours de physique nous informe que les premières seront accompagnées d'un **transfert d'énergie négatif** car le système chimique perd de l'énergie tandis que les secondes premières seront accompagnées d'un **transfert d'énergie positif** car le système chimique gagne de l'énergie.

Dans les activités et exercices, nous raisonnerons sur les valeurs absolues (positives) des transferts d'énergie. Il conviendra alors de préciser si l'énergie est reçue par le système chimique.

A

Les réactions de combustion

1. Définition

Une réaction de combustion est une réaction d'oxydoréduction faisant intervenir un combustible et un comburant.

Le combustible est une espèce chimique solide, liquide ou gazeuse tandis que le comburant est généralement le dioxygène pur ou le dioxygène, constituant naturel de l'air.

Activité 1 Écrire l'équation chimique de la combustion dans le dioxygène du :

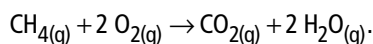
- ❶ méthane CH_4
- ❷ éthanol $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$
- ❸ butane C_4H_{10}

Les réactions de combustion sont des **réactions très exothermiques** : elles dégagent beaucoup de chaleur et sont utilisées pour cette raison.

Une réaction de **combustion complète** consiste à faire réagir une espèce chimique avec du dioxygène (soit pur soit présent naturellement dans l'air) en présence d'une flamme; les produits de la réaction sont alors du dioxyde de carbone et de l'eau.

L'origine de l'énergie libérée par ce type de réaction provient de la rupture puis de la formation de liaisons chimiques. Ainsi, lors de la combustion du méthane dans le dioxygène, toutes les espèces chimiques sont à l'état gazeux; aussi il est possible de calculer la chaleur de combustion du méthane en faisant le bilan des liaisons formées et des liaisons rompues au cours de la réaction :

L'équation chimique de la réaction de combustion complète du méthane s'écrit :



2. Masse de CO_2 produite par un véhicule

La combustion (totale) d'un alcane ou d'un alcool produit du dioxyde de carbone CO_2 , gaz à effet de serre.

Il est par conséquent important d'estimer la masse de CO_2 rejeté par un véhicule après un déplacement donné. Pour cela il faut :

- ▶ Écrire l'équation chimique ajustée de la réaction de combustion du combustible brûlé.
- ▶ Calculer la quantité (en mol) de combustible consommé.
- ▶ Calculer l'avancement maximal de la réaction en considérant toujours le dioxygène en excès.
- ▶ En déduire la quantité de matière puis la masse de CO_2 .

Un calcul simplifié montre qu'un véhicule essence ayant une consommation de 5,0 L aux 100 km produit 110 g de CO_2 soit environ 60 litres de ce gaz.



Aspect énergétique d'une réaction de combustion

1. Définition

On considère un système siège d'une transformation chimique modélisée par une réaction chimique. Les réactifs sont pris dans les proportions stœchiométriques à une température T donnée et réagissent totalement pour donner des produits ramenés à la température initiale T .

On nomme chaleur de réaction Q_r à la température T , la quantité de chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur.

Q_r s'exprime en Joule (J) ou en kiloJoules (kJ) .

À noter Une réaction de combustion est toujours exothermique. La chaleur de réaction est donc notée avec une valeur négative.

La chaleur de réaction est proportionnelle à la quantité de matière du réactif limitant.

Ainsi, pour la réaction de synthèse de l'eau d'équation chimique :



Cela signifie que lorsqu'1 mol de dihydrogène réagit avec 0,5 mol de dioxygène pour donner 1 mole d'eau, la chaleur de réaction fournie par le système est de 241 kJ.

Si l'on double les quantités de réactifs, ce sont 2 mol de dihydrogène qui réagissent alors avec 1 mol de dioxygène, alors la chaleur de réaction devient : $Q_r' = 2 Q_r = -482 \text{ kJ}$. Lors de la réaction, le système cède une chaleur égale à 482 kJ.

Activité 2 Quelle est la chaleur de réaction dégagée par la réaction entre 1 mol de dihydrogène et 1 mol de dioxygène ?

La chaleur de réaction, effectuée à une température et à une pression données, ne dépend donc que des états initial et final du système.

Dans le cas d'une réaction de combustion, on appelle **énergie molaire de combustion** d'une espèce, l'énergie libérée par la combustion d'1 mole de cette espèce ; elle est notée E_{mol} et s'exprime en J.mol^{-1} .

De la même manière, on définit aussi l'énergie massique de combustion d'une espèce, l'énergie libérée par la combustion d'1 mole de cette espèce, notée E_{mas} exprimée en J.kg^{-1} .

Activité 3 Quelle est la chaleur de réaction Q_r dégagée par la réaction de combustion de 3,0 mol d'éthanol ?

Donnée $E_{\text{mol}} = -1244 \text{ kJ.mol}^{-1}$.

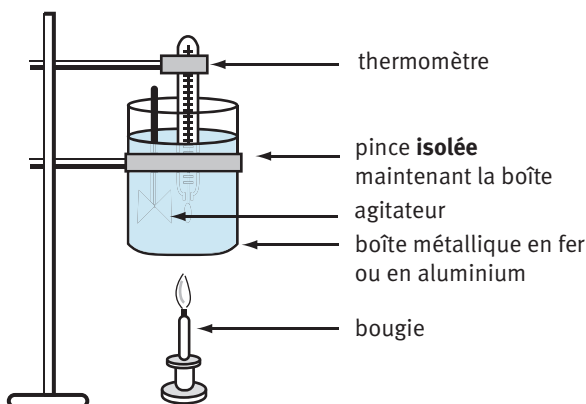
2. Mesure de l'énergie libérée

La mesure de l'énergie libérée lors d'une réaction de combustion est réalisée à l'aide d'un calorimètre : il s'agit d'un récipient calorifugé c'est-à-dire isolé thermiquement.

On se propose de déterminer expérimentalement la chaleur de combustion de la paraffine : alcane solide de formule brute $\text{C}_{25}\text{H}_{52}$.

Pour cela, on utilise une bougie que l'on considère comme constituée seulement de paraffine.

Le montage expérimental est le suivant :



La capacité calorifique μ de la boîte métallique est égale à 12 J.K^{-1} . Elle correspond à l'énergie nécessaire pour élever la température de la boîte métallique de 1°C (ou 1 K).

La capacité thermique massique de l'eau $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

La réaction de combustion de la bougie dégage de la chaleur; cette chaleur sert d'une part à vaporiser la paraffine et d'autre part à chauffer l'eau contenue dans la boîte métallique : celle-ci passe alors d'une température $T = 26^\circ\text{C}$ à une température $T' = 46^\circ\text{C}$.

► La chaleur Q_1 reçue par la masse $m_1 = 150 \text{ g}$ d'eau contenue dans la boîte métallique est : $Q_1 = (m_1.c_{\text{eau}} + \mu).(T' - T)$.

► La chaleur Q_2 nécessaire pour vaporiser une masse $m_2 = 0,40 \text{ g}$ de paraffine est :

$$Q_2 = \frac{m_2}{M} . Q_{\text{vap}}.$$

Avec Q_{vap} : chaleur de fusion et de vaporisation de la paraffine : 500 kJ.mol^{-1} .

- La chaleur Q_3 reçue par l'eau et par la boîte métallique s'exprime par :

$$Q_3 = \frac{m_2}{M} \cdot Q_{\text{comb}}$$

Avec Q_{comb} : chaleur cédée par la combustion de la paraffine.

En considérant que les seuls échanges de chaleurs se font entre la bougie et la boîte métallique remplie d'eau, on peut écrire : $Q_1 + Q_2 = Q_3$.

On peut alors calculer la chaleur cédée par la combustion de la paraffine :

Activité 4 Écrire l'équation chimique de la réaction de combustion de la paraffine.

Activité 5 Exprimer littéralement la chaleur cédée par la combustion de la paraffine Q_{comb} . En déduire sa valeur numérique. La masse molaire de la paraffine est : $352 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$.



Stockage et conversion de l'énergie chimique

Depuis le milieu du XIX^e siècle et l'essor industriel, les besoins de l'Homme en énergie se sont considérablement accrus.

L'énergie est puisée sous différentes formes ; parmi celles-ci l'énergie chimique et plus précisément les combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon) constituent la source d'énergie la plus utilisée dans le monde : ils fournissent plus de 80% des besoins, loin devant l'énergie nucléaire et les autres formes d'énergie (hydraulique, éolienne, solaire).

1. Stockage de l'énergie chimique

Le **stockage de l'énergie** consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure. L'expression «stockage d'énergie» est souvent employée pour désigner le stockage de matière qui contient cette énergie comme c'est le cas avec l'énergie chimique qui est la forme de stockage la plus importante.

Citons le cas des générateurs électrochimiques (piles et accumulateurs), les combustibles fossiles (pétrole et gaz naturel), le dihydrogène (piles à combustible).

Le stockage des ressources énergétiques est non seulement nécessaire pour compenser les fluctuations d'approvisionnement dues à toutes sortes d'aléas lors de la production, du transport, ou les variations de la consommation, qui dépendent notamment des conditions météorologiques. Il est aussi stratégique pour assurer un minimum d'autonomie énergétique du pays consommateur.

Le pétrole est stocké dans d'immenses réservoirs cylindriques situés dans des dépôts pétroliers près des lieux de production du pétrole brut ou près des raffine-

ries de pétrole. Une raffinerie, par distillation du pétrole brut, permet la production des produits finis (essences, fiouls, gaz...).

Le gaz naturel est aussi stocké dans des réservoirs mais sous pression à l'état liquide, soit en surface (500 à 10 000 m³) soit en souterrain (50 000 à 200 000 m³).

2. Présentation de quelques carburants

Parmi les combustibles fossiles, intéressons-nous aux carburants : substances dont la combustion permet le fonctionnement des moteurs thermiques. L'énergie chimique contenue dans le carburant est donc destinée à être convertie en énergie mécanique.

Les principaux carburants pour automobiles sont l'**essence** et le **gazole**. On assiste depuis quelques années au développement des biocarburants qui sont des carburants produits à partir de matériaux organiques non fossiles, animaux ou végétaux. Exemples : le **diester** et le **bioéthanol**.

Enfin, le **G.P.L.** est présent dans nos stations-services depuis quelques temps déjà. Le GPL (Gaz de Pétrole Liquéfié) est un mélange de 50 % de butane et 50 % de propane, provenant du raffinage de pétrole ou de gisements de gaz naturel.

Le **bioéthanol** est un additif utilisé dans les moteurs à essence. Le préfixe « bio » indique que l'éthanol est produit à partir de matière organique végétale (betterave, canne à sucre...) et non à partir du pétrole. Il peut être mélangé à l'essence en des proportions allant de 5 à 85 %.

On les désigne par la lettre E suivie du pourcentage d'éthanol dans le mélange : le carburant E85 contient 85 % d'éthanol et 15 % d'essence en volume.

Le **diester** (ou biodiesel) est obtenu par réaction chimique appelée réaction de transestérification entre de l'huile végétale (ou animale) et un alcool (méthanol ou éthanol).

Comme le bioéthanol, le diester n'est pas issu d'une énergie fossile.

Activité 6 Pour quelle raison appelle-t-on ces carburants des « biocarburants » ?

Les carburants usuels (essence et diesel) n'ont pas une composition bien définie. Ce sont des mélanges d'hydrocarbures qui varient avec l'origine géographique du pétrole utilisé et les procédés de raffinage appliqués. La commercialisation d'un carburant ne peut se faire que s'il vérifie un certain nombre de conditions sur leurs propriétés physiques (densité, volatilité) énergétiques (pouvoir calorifique) et chimiques (indice d'octane, concentrations en certains composants).

Ainsi, l'essence super 95 doit avoir une densité comprise entre 0,72 et 0,78 kg/L à 15 °C et un indice d'octane de 95 au moins.

3. Réactions de combustion d'un carburant

Pour simplifier l'étude nous modéliserons le mélange d'hydrocarbure appelé « essence » dans nos stations-services par un de ses principaux constituants : l'octane.

Activité 7 Donner la formule brute de l'octane.

On envisage alors la réaction de combustion complète de l'octane, censée se produire dans un moteur à essence.

Activité 8

- 1 Écrire et ajuster l'équation chimique de la combustion complète de l'octane.
- 2 À partir d'un tableau d'avancement, calculer la masse de CO_2 formé par la combustion d'une mole d'octane.
- 3 En déduire la masse de CO_2 dégagé par MJ (Mégajoule : 1.10^6 J) d'énergie produite.

Données Masse molaire CO_2 (g/mol) : 44 ;
Énergie molaire de combustion de l'octane : -5 MJ.mol^{-1} .

Une étude similaire réalisée sur d'autres carburants donne les résultats suivants :

Carburant	Essence	Diesel	G.P.L.	Bioéthanol	Diester
Masse de $\text{CO}_2(\text{g})$ dégagé par MJ d'énergie produite par la combustion du carburant	70	72	67	70	50

Activité 9

- 1 Quel est le carburant, à priori, le plus écologique ? Pourquoi ?
- 2 Qu'est-ce que le gaz « à effet de serre » ?
- 3 Citer le nom des 2 biocarburants présents dans la liste ci-dessus.

L'autre avantage des carburants dits écologiques est que leur **bilan carbone** est, *a priori*, neutre car la quantité de carbone émis par leur combustion est égale à celle fixée lors la photosynthèse des plantes choisies comme matière première (betterave, canne à sucre...).

Ce n'est pas le cas des énergies fossiles : leur bilan carbone est négatif. Ils émettent du CO_2 à partir de carbone fixé depuis des millions d'années dans le pétrole, le charbon, le gaz naturel...

Remarque L'utilisation d'un carburant à bilan carbone neutre peut avoir des conséquences négatives sur l'environnement car la culture des plantes choisies comme matière première nécessite des produits chimiques (engrais, pesticides) ainsi que de grandes quantités d'eau (irrigation). Elle empiète également sur les terres agricoles dédiées à l'alimentation humaine.

Résumé

On distingue alors les transformations chimiques **exothermiques** (le système fournit de la chaleur au milieu extérieur) des transformations chimiques **endothermiques** (le système prend de la chaleur au milieu extérieur).

On considère un système siège d'une transformation chimique modélisée par une réaction chimique. Les réactifs sont pris dans les proportions stœchiométriques à une température T donnée et réagissent totalement pour donner des produits ramenés à la température initiale T .

On nomme chaleur de réaction Q_r à la température T , la quantité de chaleur échangée entre le système et le milieu extérieur. Q_r s'exprime en kJ (kilojoules) .

La chaleur de réaction est proportionnelle à la quantité de matière du réactif limitant.

Une réaction de **combustion** est une réaction d'oxydo-réduction faisant intervenir un combustible et un comburant.

Les réactions de combustion sont des réactions très exothermiques : elles dégagent beaucoup de chaleur et sont utilisées pour cette raison

La chaleur de combustion a une valeur négative car le système chimique perd de l'énergie pendant la transformation chimique.

La mesure de l'énergie libérée lors d'une réaction de combustion est réalisée à l'aide d'un calorimètre : il s'agit d'un récipient calorifugé c'est-à-dire isolé thermiquement.

Le **stockage de l'énergie** consiste à placer une quantité d'énergie en un lieu donné pour permettre son utilisation ultérieure.

Parmi les combustibles fossiles, intéressons-nous aux carburants : substances dont la combustion permet le fonctionnement des moteurs thermiques. L'énergie chimique contenue dans le carburant est donc destinée à être convertie en énergie mécanique.

Les principaux carburants pour automobiles sont l'**essence** et le **gazole**. On trouve aussi le G.P.L. , le diester et le bioéthanol.

On peut effectuer un bilan carbone sommaire lors de la combustion d'un carburant, en calculant la masse de dioxyde de carbone dégagé par MJ d'énergie produite.

E

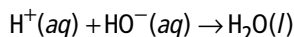
xercices

Exercice 1 Une réaction chimique exothermique

On a versé, dans un premier bécher, 50 mL d'une solution d'acide chlorhydrique à $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$ et, dans un deuxième, 50 mL d'une solution d'hydroxyde de sodium à $0,5 \text{ mol.L}^{-1}$. On repère la température des liquides placés dans les deux béchers : elle est identique pour les deux et égale à $19,8^\circ\text{C}$. On mélange les deux solutions dans un bécher plus grand et on repère la température maximale atteinte à la fin du mélange : $22,8^\circ\text{C}$.

- 1 Quelle devrait être la température du mélange s'il ne se produisait pas de réaction chimique ?

La réaction qui s'est produite entre les deux solutions a pour équation :



- 2 Calculer l'énergie qui a été libérée lors de la réaction en considérant que la masse volumique et la capacité thermique massique des deux solutions sont quasiment égales à celles de l'eau.
- 3 Quelle quantité de réactifs, exprimée en mol, a-t-on utilisée lors de cette expérience ?
- 4 Quelle est l'énergie cédée par cette réaction au milieu extérieur lorsqu'on fait réagir une mole de chacun des deux réactifs ?

Données Capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide : $4,2 \cdot 10^3 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$.

Exercice 2 Une réaction endothermique

On verse dans un bécher 170 mL d'eau ; on relève la température et on lit : $18,3^\circ\text{C}$.

On ajoute 10 g d'un solide le nitrate d'ammonium (NH_4NO_3) qui est soluble dans l'eau. On agite et lorsque le solide est totalement dissous, on repère de nouveau la température ; on lit $14,2^\circ\text{C}$.

- 1 Pourquoi peut-on affirmer que s'il n'y avait pas de réaction chimique, la température de l'eau dans le bécher devrait rester égale à $18,3^\circ\text{C}$?
- 2 Écrire l'équation de la réaction qui s'est produite lorsqu'on a dissous le nitrate d'ammonium dans l'eau.

- 3 Calculer l'énergie qui a été libérée lors de la réaction en considérant que la masse volumique et la capacité thermique massique de la solution de nitrate d'ammonium sont quasiment égales à celles de l'eau.
- 4 Quelle quantité de nitrate d'ammonium, exprimée en mol, a-t-on utilisée lors de cette expérience ?
- 5 Quelle est l'énergie que cette réaction doit prendre au milieu extérieur lorsqu'on dissout une mole de nitrate d'ammonium ?

Données Capacité thermique massique de l'eau à l'état liquide : $4,2 \cdot 10^3 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
masses atomiques en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$: H = 1 ; N = 14 et O = 16.

Exercice 3 Réactions de combustion

Écrire l'équation chimique ajustée de la réaction de combustion de :

- 1 Méthane : CH_4 .
- 2 Éthane : C_2H_6 .
- 3 Propane : C_3H_8 .
- 4 Butane : C_4H_{10} .

Exercice 4 Énergie molaire de combustion

La combustion de 0,035 mol de propane fournit une énergie de 72,1 kJ.
En déduire son énergie molaire de combustion E_{mol} .

Exercice 5 Combustion de l'éthanol

On considère la réaction de combustion complète de l'éthanol de formule $\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$.

- 1 Écrire et ajuster l'équation chimique de la réaction.
- 2 Quelle est l'énergie produite par la combustion de 9,2 g d'éthanol ?

Données Masses molaires ($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$) : C = 12,0 ; O = 16,0 ; H = 1,0.
 $E_{\text{mol}} = -1244 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Exercice 6 Combustion du gazole

On peut modéliser le mélange d'hydrocarbures appelé « gazole » dans nos stations-services par un hydrocarbure de formule moyenne : l'hexadécane.

- 1 Donner la formule brute de l'hexadécane sachant qu'il s'agit de l'hydrocarbure à 16 atomes de carbone.
- On envisage alors la réaction de combustion complète de l'hexadécane, censée se produire dans un moteur diesel.

- 2 Écrire et ajuster l'équation chimique de la combustion complète de l'hexadécane.
- 3 À partir d'un tableau d'avancement, calculer la masse de CO_2 formé par la combustion d'une mole d'hexadécane.
- 4 En déduire la masse de CO_2 dégagé par MJ (Mégajoule : 1.10^6 J) d'énergie produite.
- 5 Comparer le résultat précédent à celui obtenu pour l'essence (voir cours).
- 6 Quelle est la masse de CO_2 produit par un véhicule diesel ayant parcouru le trajet Rennes – Paris (350 km) et consommant une moyenne de 6 L de gazole aux 100 km ? On assimilera le gazole à l'hexadécane de masse volumique 850 g/L.

Commenter le résultat.

Données

Masses molaires : CO_2 (g/mol) = 44 ; $\text{C}_{16}\text{H}_{34}$ = 226. ;
Énergie de combustion molaire du décahexane : $9,8 \text{ MJ.mol}^{-1}$.

