

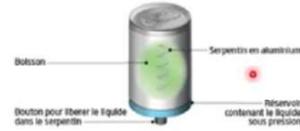
ETUDE THERMODYNAMIQUE

Exercice 1. Une canette auto-réfrigérante.

Une canette auto-réfrigérante comporte à sa base un réservoir en acier contenant un liquide sous haute pression. Lors de l'activation du dispositif, le liquide est libéré dans un serpentin en aluminium et se vaporise en "absorbant" dans la boisson à refroidir une énergie de 12 kJ.

Données.

- Volume de boisson dans la canette 33 cL;
- Capacité thermique massique de la boisson $c_B = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- Masse volumique de la boisson $\rho_B = 1,0 \text{ kg.L}^{-1}$.



1. Comment varie l'énergie interne de la boisson lors de l'activation du dispositif? Préciser comment cela se traduit microscopiquement.
2. Déterminer la température de la boisson, initialement à 20°C, après activation du dispositif.

Exercice 2. Principe des moteurs et machines thermiques.

Voir la vidéo pour l'énoncé.

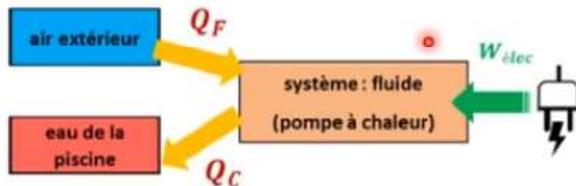
Exercice 3. Une pompe à chaleur pour chauffer l'eau de la piscine

On chauffe 10 tonnes d'eau d'une piscine d'extérieur de 10°C (température de l'air extérieur) à 27°C grâce à une pompe à chaleur (PAC). Pendant le chauffage, la piscine est équipée d'un couvre-piscine qui rend négligeable les échanges thermiques entre l'eau et l'air extérieur. Le moteur électrique de la PAC force un fluide frigorigène (du fréon CCl_2F_2) à circuler entre l'air extérieur et l'eau de la piscine. Au cours de cette circulation le fluide prélève de l'énergie de l'air extérieur qu'il transmet à l'eau de la piscine. La PAC fonctionne de manière cyclique: le fluide revient dans le même état (mêmes température, pression...) après un cycle. Le fluide de la pompe à chaleur réalise un transfert thermique "non naturel" depuis l'atmosphère (même froide!) vers l'eau de la piscine grâce au travail électrique reçu du fournisseur d'énergie.

Données.

- Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.
- Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est le rapport entre la puissance thermique fournie par la pompe et la puissance électrique consommée par l'appareil. Il est toujours compté positivement.
- $1 \text{ kWh} = 3,6 \times 10^6 \text{ J}$
- Prix du kWh d'électricité en France en 2021: 0,18 euros.

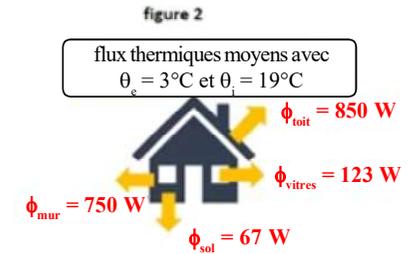
1. Préciser sur le diagramme ci-dessous le signe des transferts d'énergie du point de vue du fluide.



2. Justifier que $\Delta U_{\text{fluide}} = 0$ pour un nombre entier de cycles effectués par le fluide.
- Dans toute la suite, on considère que le fluide a effectué un nombre entier de cycles.
3. Ecrire la relation entre Q_C , Q_F et W_{elec} .
4. Calculer la variation d'énergie interne ΔU_{eau} de l'eau de la piscine lors du chauffage de 10°C à 27°C. Donner la valeur en kWh.
5. Déterminer Q_C en kWh. Justifier son signe.
6. Déterminer W_{elec} en kWh.
7. Estimer le coût du chauffage.
8. La pompe à chaleur a une puissance de 3,5 kW. Estimer la durée du chauffage.

Exercice 4. Chauffage d'une maison avec une pompe à chaleur.

On souhaite maintenir l'intérieur d'une maison à une température de 19°C à l'aide d'une pompe à chaleur (PAC) par une journée d'hiver avec 3°C à l'extérieur (figure 1). La figure 2 indique les flux thermiques perdus vers l'extérieur de la maison.

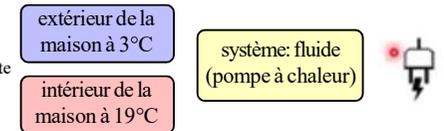


Données.

- Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est le rapport entre la puissance thermique fournie par la pompe et la puissance électrique consommée par l'appareil. Il est toujours compté positivement.
- Prix du kWh d'électricité en France en 2021: 0,18 euros.

La PAC fonctionne de manière cyclique: le fluide revient dans le même état (mêmes température, pression...) après un cycle. Le fluide de la pompe à chaleur réalise un transfert thermique "non naturel" depuis l'atmosphère (même froide!) vers l'intérieur de la maison grâce au travail électrique reçu du fournisseur d'énergie.

1. Indiquer sur le diagramme ci-contre par des flèches, les transferts d'énergie réalisés en précisant leur nature (Q ou W) et leurs signes du point de vue du système.
2. Calculer le flux thermique total perdu par la maison ϕ_{perdes} .
3. Calculer le flux thermique ϕ_{PAC} que doit fournir la PAC pour maintenir constante la température dans la maison.
4. Calculer la puissance électrique P_{elec} consommée par la PAC de COP = 3,1.
5. Pour un nombre entier de cycle du fluide, écrire, en la justifiant, la relation entre ϕ_{PAC} , P_{elec} et le flux thermique ϕ_{froid} extrait par le fluide à l'extérieur de la maison. En déduire ϕ_{froid} .
6. Estimer le coût d'une journée de chauffage avec une PAC. Comparer avec le coût obtenu avec des simples radiateurs électriques de COP égal à 1. Conclure.



Exercice 5. Détermination d'une capacité thermique massique.

La capacité thermique massique d'un matériau mesure sa capacité à absorber ou à restituer de la chaleur lors d'une variation de sa température. Dans la construction, il est important de connaître la capacité thermique des matériaux utilisés en vue de réaliser des économies d'énergie. L'objectif est ici de déterminer expérimentalement la capacité thermique massique du fer à l'aide d'un calorimètre (schématisé ci-contre). C'est un appareil destiné à mesurer les échanges d'énergie par transfert thermique au cours d'une transformation physique ou chimique réalisée à l'intérieur de celui-ci. La constitution du calorimètre est telle que tout transfert d'énergie vers l'extérieur est négligeable. Il possède lui aussi une capacité thermique.

Données.

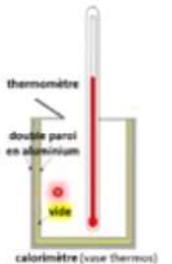
- Capacité thermique du calorimètre $C_{\text{calo}} = 40 \text{ J.°C}^{-1}$;
- capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$;
- Masse volumique de l'eau $\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ g.mL}^{-1}$;

Protocole expérimental:

- Peser le cylindre de fer à disposition $m_{\text{fer}} = 190,0 \text{ g}$;
- Introduire dans le calorimètre un volume d'eau $V_{\text{eau}} = 200 \text{ mL}$. Laisser quelques minutes s'établir l'équilibre thermique entre l'eau et le calorimètre. Noter alors la température de l'ensemble: $\theta_1 = 20,6^\circ\text{C}$.
- Introduire pendant 4 minutes le cylindre de fer dans de l'eau chaude pour atteindre l'équilibre thermique et noter ensuite la température de l'ensemble $\theta_2 = 70,3^\circ\text{C}$.
- Introduire rapidement le cylindre dans le calorimètre. Attendre l'équilibre thermique et noter la température $\theta_f = 25,0^\circ\text{C}$.

Le système considéré est l'ensemble (calorimètre + eau + cylindre de fer) et la variation de son énergie interne est la somme de celles des sous-systèmes: $\Delta U_{\text{sys}} = \Delta U_{\text{eau}} + \Delta U_{\text{calo}} + \Delta U_{\text{fer}}$.

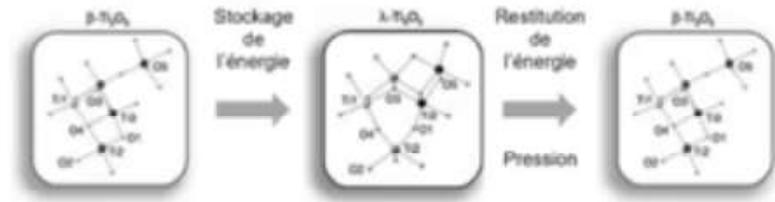
1. Justifier que la constitution du calorimètre limite les transferts thermiques avec l'extérieur.
2. A l'aide du 1^{er} principe de la thermodynamique, montrer que $\Delta U_{\text{sys}} = 0$.
3. Exprimer la capacité thermique massique du fer en fonction des données. Calculer sa valeur en $\text{J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.



Exercice 6. Une céramique comme réservoir d'énergie.

Des chercheurs de l'Université de Tokyo ont découvert une céramique capable de stocker de l'énergie. Son principe de fonctionnement est très simple: une courte exposition au Soleil permet de la "charger"! Cette énergie peut être stockée pendant une longue durée et restituée selon les besoins. Le secret de ce matériau réside dans sa structure. En effet, sous certaines conditions (élévation de la température, exposition à un rayonnement électromagnétique, application d'un courant électrique...), le matériau change de structure cristalline (voir figure ci-dessous), pour restituer l'énergie, il suffit de soumettre ce matériau à une certaine pression.

Stockage puis restitution de l'énergie



Pour libérer l'énergie stockée au sein de la structure cristalline, il suffit d'exercer une pression sur le matériau qui va entraîner une réorganisation de la structure en provoquant la transition $\lambda\text{-Ti}_3\text{O}_5 \rightarrow \alpha\text{-Ti}_3\text{O}_5$.

Le dispositif utilisé pour les tests en laboratoire est une enceinte dans laquelle du diazote est mis sous pression que l'on peut faire varier.

Données.

- ☐ Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.
- ☐ Masse volumique de l'eau $1,00 \text{ g.mL}^{-1}$.

Variation d'énergie interne d'un gaz parfait:

En faisant l'hypothèse que le diazote contenu dans l'enceinte est un gaz parfait, la variation d'énergie interne ΔU du gaz (en J) s'exprime grâce

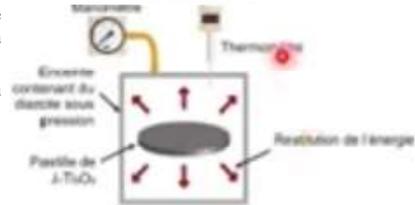
à la relation
$$\Delta U = \frac{5}{2} n_{\text{gaz}} \times R \times \Delta T$$
 où:

- ☐ n_{gaz} désigne la quantité de matière de gaz présente dans l'enceinte (en mol)
- ☐ $R = 8,31 \text{ J.K}^{-1}\text{mol}^{-1}$;
- ☐ ΔT désigne la variation de température du gaz (en °K).

1. Rappeler la définition de l'énergie interne d'un système.

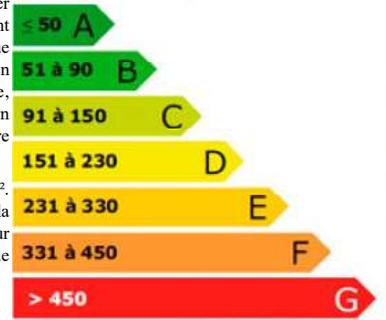
Au cours de l'expérience, l'enceinte utilisée est considérée comme parfaitement isolée thermiquement. Elle contient 40,0 mmol de diazote. Lorsque la pression P est exercée, la pastille (de masse 265 mg) restitue l'énergie stockée qui entraîne une élévation de la température du gaz de 18,2 °K. L'équilibre thermique est alors atteint.

2. Calculer le transfert thermique cédé par la pastille au cours de l'expérience.
3. En considérant que les échanges thermiques s'effectuent sans perte, calculer la masse de pentoxyde de tritane nécessaire pour chauffer 250 mL d'eau pure depuis une température ambiante de 20°C jusqu'à 80°C. Commenter le résultat obtenu en dégageant l'intérêt de ce matériau.



Exercice 7. Le DPE d'une maison.

Un couple souhaite acheter une maison. Pour faire son choix, il décide de se renseigner sur son isolation thermique. Obligatoire depuis l'année 2006 lors de la vente d'un logement et depuis 2007 lors de la location d'un logement, le diagnostic de performance énergétique (DPE) renseigne sur la performance énergétique d'un logement ou d'un bâtiment, en évaluant sa consommation d'énergie totale annuelle (chauffage, eau chaude, électroménager). La lecture du DPE est facilitée par une étiquette de consommation d'énergie annuelle (ci-contre) comportant 7 classes de A à G (A correspondant à la meilleure performance, G à la plus mauvaise).



Le couple souhaite connaître le DPE d'une maison sans étage de surface habitable 100 m². La maison est construite dans une région où la température de l'air extérieur durant la période de chauffage vaut en moyenne $\theta_e = 4^\circ\text{C}$. Pendant la période de chauffage, l'intérieur de la maison est maintenu à une température constante $\theta_i = 19^\circ\text{C}$ grâce au système de chauffage. On estime la durée annuelle de chauffage à 120 jours.

Données.

- ☐ Caractéristiques thermiques de la maison:

flux thermiques moyens avec $\theta_e = 4^\circ\text{C}$ et $\theta_i = 19^\circ\text{C}$



	Surface (m²)	Matériau	épaisseur e (mm)	conductivité thermique λ (W.m ⁻¹ .K ⁻¹)
Toiture	115	Laine de chanvre	100	0,042
		Terre cuite (tuile)	40	0,60
Murs	91	PLâtre	13	0,46
		Polystyrène	50	0,036
		Brique pleine	210	0,50

- ☐ Lorsque les températures extérieure T_e et intérieure T_i sont constantes au cours du temps, le flux thermique à travers une paroi s'exprime par la relation: $\phi = \frac{T_i - T_e}{R_{th}}$ avec ϕ en Watt, T_i et T_e en K et la résistance thermique de la paroi R_{th} en K.W⁻¹.
- ☐ La résistance thermique d'une paroi plane constituée d'un seul matériau est: $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$ où l'épaisseur e de la paroi s'exprime en mètre, S la surface d'échange en m² et λ la conductivité thermique en W.m⁻¹.K⁻¹.
- ☐ En pratique une paroi est constituée de plusieurs couches de matériaux d'épaisseurs et de conductivités différentes. Dans ce cas, les résistances thermiques de chaque couche s'additionnent.
- ☐ 1 kWh = 3,6 x 10⁶ J.

1. Associer à chacune des propriétés suivantes, le nom du transfert thermique correspondant.

Propriété 1	Propriété 2	Propriété 3
Le transfert thermique dans un milieu matériel se fait de proche en proche sans transport de matière.	Le transfert thermique ne nécessite pas de milieu matériel et se fait sans transport de matière.	Le transfert thermique se fait par déplacement macroscopique de matière, généralement au sein d'un gaz ou d'un liquide.

2. Calculer les flux thermiques moyens à travers le toit et les murs en hiver.
3. Afin de conserver une température constante dans la maison, la puissance moyenne du système de chauffage doit être égale au flux thermique moyen sortant de la maison. En estimant que le chauffage représente 60% de la consommation d'énergie annuelle, déterminer la classe énergétique de cette maison.

Exercice 8. Ballon de chauffage sanitaire

Plus de la moitié des logements produisent de l'eau chaude de manière indépendante. Si l'on regarde la répartition selon l'énergie de production, l'électricité est la première source de production d'eau chaude sanitaire des résidences principales. La part de la consommation liée à l'eau chaude sanitaire (ECS) est en passe de devenir l'un des premiers postes de consommation dans les bâtiments résidentiels neufs. En effet, la Réglementation thermique 2012 (RT2012) imposant une réduction très importante des besoins de chauffage, l'ECS devient donc prépondérante face aux autres usages.

L'objectif de cet exercice est de vérifier que le ballon, dont les caractéristiques sont décrites ci-dessous, respecte la réglementation en vigueur (RT2012).



Caractéristiques techniques d'un ballon d'eau chaude sanitaire.

Cumulus électrique - Gamme Waterplus					
Capacité	Tension	Puissance	Temps de chauffe*	Constante de refroidissement**	Classe énergétique
200L	230 V	2 200 W	200L	0,18 Wh.jour ⁻¹ .K ⁻¹ .L ⁻¹	C
La surface S d'échange thermique du ballon avec le milieu extérieur est de 2,9 m ² .					
L'épaisseur des parois est négligeable.					
Le ballon est isolé par une couche de laine de roche d'épaisseur e = 70 mm et de conductivité thermique: 0,036 W.m ⁻¹ .K ⁻¹ .					

*Temps de chauffe pour que l'eau du ballon passe de 15 à 65°C.

**Constante de refroidissement pour un appareil réglé à 65°C et une température ambiante de 20°C.

Données.

□ La résistance thermique d'une paroi plane constituée d'un seul matériau est: $R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$ où l'épaisseur e de la paroi s'exprime en mètre, S la surface d'échange en m² et λ la conductivité thermique en W.m⁻¹.K⁻¹.

□ Le flux thermique ϕ à travers une paroi de résistance thermique R_{th} séparant deux milieux de températures respectives T_1 et T_2 est donné par

la relation: $\phi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$ avec ϕ en Watt, T_1 et T_2 en K et la résistance thermique de la paroi R_{th} en K.W⁻¹.

□ Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

□ Masse volumique de l'eau: 1 000 g .L⁻¹.

□ L'énergie perdue par jour lorsque 1 L d'eau contenu dans le ballon perd un degré est proportionnelle à une constante caractéristique du ballon, la constante de refroidissement Cr qui s'exprime en Wh.jour⁻¹.K⁻¹.L⁻¹. Par convention, pour la détermination de Cr, la température de stockage est choisie égale à 65°C, avec une température de l'air ambiant de 20°C.

□ Selon la réglementation thermique (RT2012), les chauffe-eaux à accumulation doivent avoir une constante de refroidissement Cr inférieure ou égale à 2V avec $\alpha = -0,4$ et V représente le volume (en litres) du ballon.

1. En négligeant les pertes, retrouver par le calcul, à l'aide de la puissance indiquée, la durée nécessaire pour chauffer l'eau du ballon de 15°C à 65°C.

2. Calculer le flux thermique à travers les parois du ballon entre l'eau à 65°C et l'air extérieur à 20°C.

3. En déduire la valeur de l'énergie perdue par le ballon en une journée. Exprimer le résultat en Wh.

4. Du résultat précédent, en déduire le coefficient de refroidissement Cr du ballon d'eau chaude sanitaire étudié. Le résultat est-il cohérent avec la donnée du fabricant ?

5. La réglementation thermique RT2012 est-elle respectée pour ce ballon ?

Exercice 9. Refroidissement de l'eau d'une piscine

Le volume d'eau $V_{eau} = 560 \text{ m}^3$ d'une piscine a été chauffé grâce à une pompe à chaleur de la température de l'air extérieur à 17°C jusqu'à 28°C. La pompe a été arrêtée dès la bonne température atteinte.

Données.

□ Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,18 \text{ J.g}^{-1}.\text{°C}^{-1}$.

□ Masse volumique de l'eau: 1 000 kg.m⁻³.

□ Lors du refroidissement de l'eau de la piscine, celle-ci échange avec l'air extérieur à la température constante T_{air} (en K), un flux thermique $\phi(t) = -h \times S \times (T(t) - T_{air})$ calculé en W, avec:

- T(t) la température de l'eau en K,
- S la surface de transfert en m²
- et h un coefficient d'échange en W.m⁻².K⁻¹.

1. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau au cours du chauffage.

On s'intéresse dans toute la suite au refroidissement de l'eau de la piscine.

2. Exprimer la variation d'énergie interne de l'eau ΔU_{eau} lors d'une variation de température ΔT , en fonction des données de l'énoncé.

3. A l'aide du 1^{er} principe de la thermodynamique, montrer que le flux thermique instantané a aussi pour expression $\phi(t) = \rho_{eau} \cdot V_{eau} \cdot c_{eau} \cdot \frac{dT}{dt}$

4. Montrer que la température de l'eau vérifie l'équation différentielle $\frac{dT}{dt} + \frac{1}{\tau} \times T = b$ où τ et b sont des constantes à exprimer en fonction des données de l'énoncé.

5. Résoudre l'équation différentielle et exprimer la température T(t) de l'eau en fonction de τ , T_{air} , et de la température initiale de l'eau au début du refroidissement T_0 (en K).

6. Sachant qu'au bout d'une nuit (12h), la température de l'eau a baissé de 4°C, estimer la valeur de τ .

7. En combien d'heures, la température de l'eau n'est plus que de 20°C ?

8. Déterminer la variation d'énergie interne de l'eau au cours du refroidissement.

Exercice 10. Un gâteau à la bonne température

Pour votre dîner de ce soir, vous préparez un gâteau cuit au four pour le dessert. La température de votre cuisine est constante, égale à 20°C.

Quand vous sortez le gâteau du four à 20h, la température du gâteau est de 180°C. Vous observez qu'à 20h30 elle est encore de 100°C et la température idéale de dégustation est de 25°C.

On suppose que la température du gâteau suit une loi de décroissance exponentielle en fonction du temps du type: $T(t) = (T_0 - T_{air}) \times e^{-t/\tau}$ où:

- τ est une constante,
- T_{air} (en K) la température de l'air de la cuisine,
- et T_0 (en K) la température du gâteau à sa sortie du four.

A quelle heure pourrez-vous servir le gâteau à la température idéale de dégustation ?

