

À retenir !

$$\Delta E_{totale, syst} = \Delta E_{méca} + \Delta U = \Delta U = W + Q : \text{1}^{\text{er}} \text{ principe de la thermodynamique}$$

(système fermé et macroscopiquement au repos)

W et $Q > 0$ si transfert entrant

W et $Q < 0$ si transfert sortant

spontané, du corps chaud vers le corps froid :

$$\phi_{moy} = \frac{Q}{\Delta t} \quad \text{flux thermique}$$

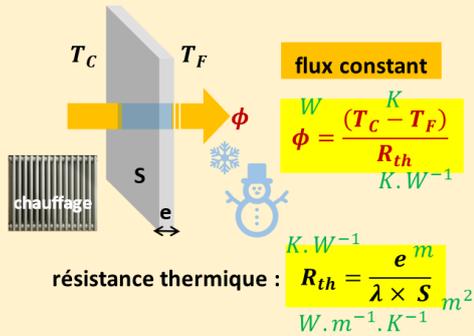
$$\Delta U_{syst} = m_{syst} \times c_{m, syst} \times \Delta T$$

dans le cas d'un système incompressible

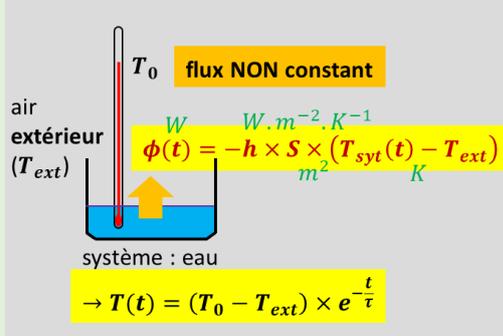
transfert conducto-convectif

par rayonnement

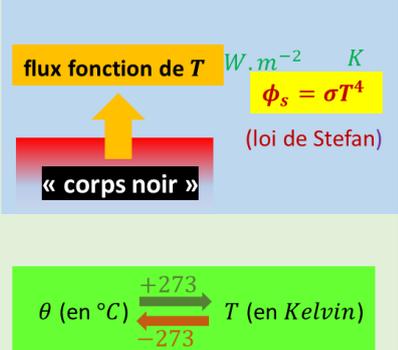
cas d'une paroi séparant 2 milieux thermostatés



refroidissement au contact d'un thermostat

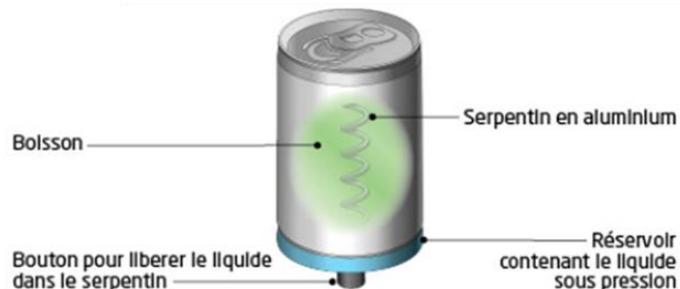


émission d'un corps noir



Exercice 1. Une canette auto-réfrigérante

Une canette auto-réfrigérante comporte à sa base un réservoir en acier contenant un liquide sous haute pression (figure ci-dessous). 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 $c_B = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Masse volumique de la boisson : $\rho_B = 1,0 \text{ kg} \cdot \text{L}^{-1}$

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

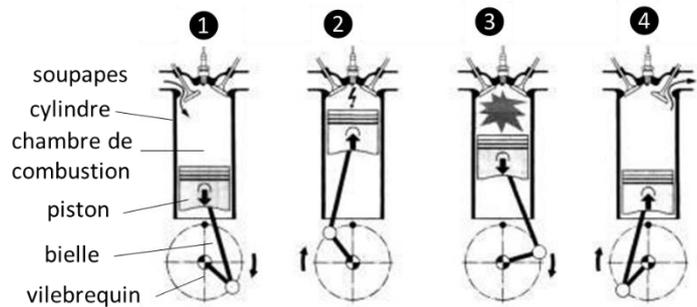
Exercice 2. Les moteurs et machines thermiques

De nombreux dispositifs du quotidien reposent sur des échanges énergétiques. En fonction de leur fonction, on les classe en moteur ou machine thermique.

Doc 1. Principe du moteur thermique

Le fonctionnement d'un moteur thermique d'une voiture est basé sur la conversion du transfert thermique provoqué par la combustion du carburant en travail mécanique permettant le déplacement du véhicule. On parle aussi de moteur à combustion ou à explosion. Le moteur thermique d'une voiture fonctionne en quatre étapes. Dans le moteur sont creusés des cylindres et à l'intérieur de chaque cylindre se trouve un piston. Le moteur fonctionne selon un cycle qui se répète : **1** les pistons descendent, aspirant du carburant et de l'air **2** en remontant, tout ce mélange est comprimé dans les cylindres **3** arrivé en butée haute, il se produit une combustion de ce mélange grâce à une étincelle et l'explosion refoule alors les pistons vers le bas **4** les pistons remontent à nouveau pour pousser les gaz d'échappement vers l'extérieur du moteur et un nouveau cycle peut alors recommencer. L'ensemble vilebrequin et bielle permet de transformer le mouvement de va et vient du piston en un mouvement de rotation communiqué ensuite aux roues de la voiture. En résumé, le transfert thermique de la combustion (« source chaude ») est converti par l'air du piston, en partie, en travail mécanique fourni au système bielle-vilebrequin et donc à la voiture, et le reste du transfert est redirigé par l'air du piston vers l'atmosphère (« source froide »).

principe du cycle de fonctionnement d'un moteur thermique

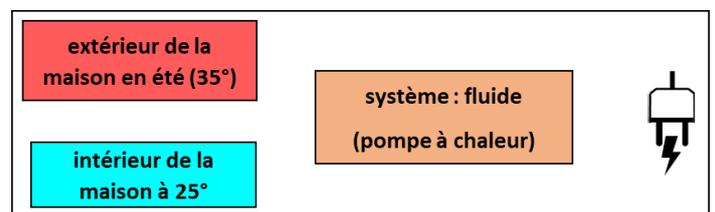
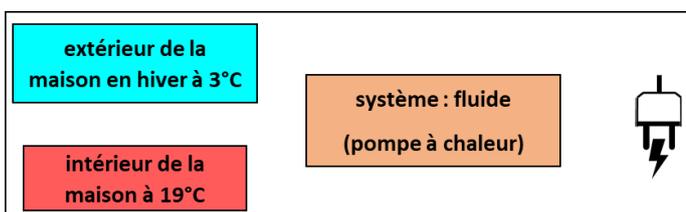
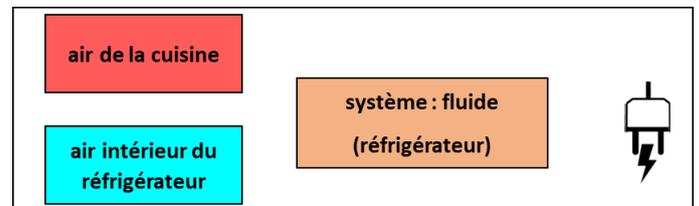
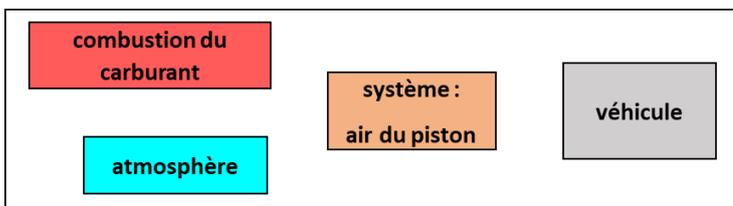


- 1** admission du mélange carburant/air
- 2** compression du mélange
- 3** combustion libérant de l'énergie → refoulement du piston
- 3** échappement des gaz brûlés

Doc 2. Principe des machines thermiques

Dans une machine thermique, un fluide circule entre deux milieux qu'on appelle source froide (de température T_F) et source chaude (de température $T_C > T_F$) afin de forcer le transfert thermique non-naturel entre la source froide et la source chaude, et cela grâce à un travail électrique reçu par le fluide. Dans le cas d'une pompe à chaleur (PAC) en hiver, le fluide force vers lui un transfert thermique de l'extérieur froid, et qu'il redirige ensuite vers l'intérieur de la maison pour la chauffer, et cela grâce au travail électrique reçu. Dans le cas d'un réfrigérateur, le fluide force vers lui un transfert thermique depuis l'intérieur de l'appareil, et qu'il redirige ensuite vers l'air de la cuisine, là encore grâce au travail électrique reçu.

Pour chaque diagramme ci-dessous, indiquer par des flèches, les transferts d'énergie réalisés en précisant leur nature (Q_F ; Q_C ; W_{elec} ; $W_{méca}$) et leurs signes du point de vue du système :



Exercice 3. Une pompe à chaleur pour chauffer l'eau d'une 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.

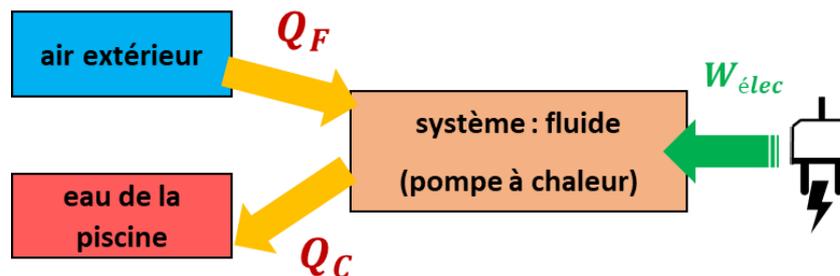


Données :

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

L'objectif est ici d'estimer le coût d'un tel chauffage réalisé avec une pompe à chaleur de COP = 5.

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



2. Justifier que $\Delta U_{fluide} = 0$ 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. Écrire 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.

figure 1

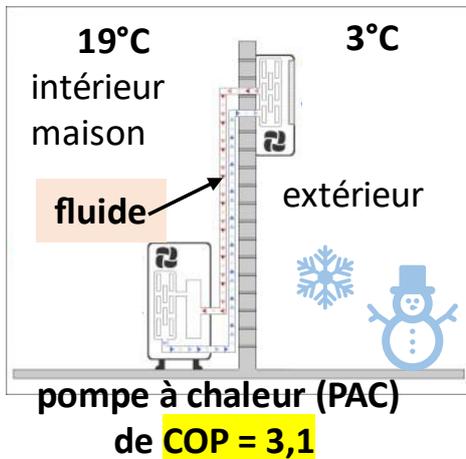
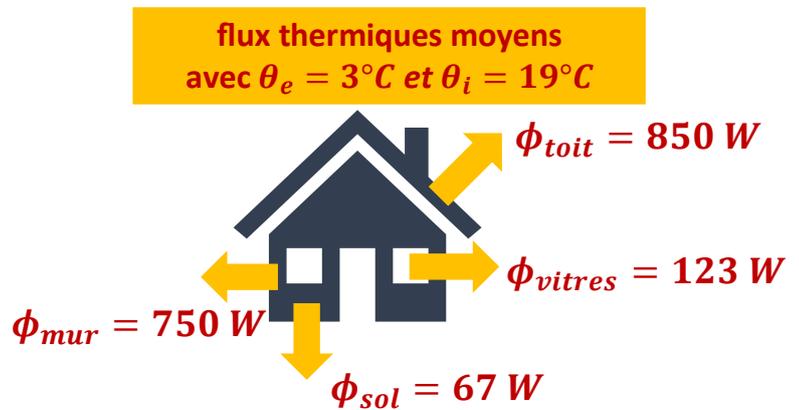


figure 2

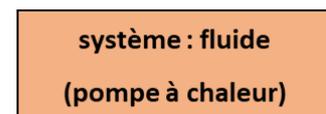


Données :

- Le coefficient de performance (COP) d'une pompe à chaleur est le rapport entre le flux thermique fourni 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.

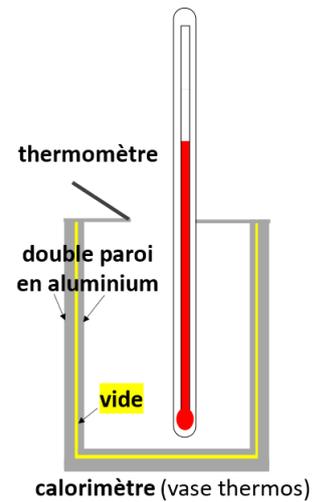
1. Indiquer sur le diagramme ci-contre par des flèches, les transferts d'énergie réalisés en précisant leur nature (Q ou W) et leurs signes du point de vue du système :



2. Calculer le flux thermique total perdu par la maison Φ_{pertes} .
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 $P_{\text{élec}}$ 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} , $P_{\text{élec}}$ 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 de simples radiateurs électriques de COP égal à 1. Conclure.

Exercice 5. Détermination expérimentale d'une capacité thermique

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 $C_{calo} = 40 \text{ J} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
- Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1,00 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$
- Une mesure est convenable si $\frac{|X_{mesuré} - X_{référence}|}{u(X)} < 2$

Protocole expérimental :

- Peser le cylindre de fer à disposition : $m_{fer} = 190,0 \text{ g}$
- Introduire dans le calorimètre un volume d'eau $V_{eau} = 200 \text{ mL}$. Laisser quelques minutes s'établir l'équilibre thermique entre l'eau et le calorimètre. Noter alors la température de l'ensemble : $\theta_i = 20,6^\circ\text{C}$.
- 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 : $\theta_{fer,i} = 70,3^\circ\text{C}$.
- 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 : $\Delta U_{syst} = \Delta U_{eau} + \Delta U_{calo} + \Delta U_{fer}$.

1. Justifier que la constitution du calorimètre limite les transferts thermiques avec l'extérieur.
2. À l'aide du 1^{er} principe de la thermodynamique, montrer que $\Delta U_{syst} = 0$.
3. Exprimer la capacité thermique massique du fer en fonction des données. Calculer sa valeur en $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.
4. Estimer l'incertitude-type associée à la capacité thermique massique du fer, déterminée expérimentalement, à l'aide de la formule :

$$\frac{u(c_m)}{c_m} = \sqrt{\left(\frac{u(T)}{\Delta T}\right)_{eau}^2 + \left(\frac{u(T)}{\Delta T}\right)_{calo}^2 + \left(\frac{u(T)}{\Delta T}\right)_{fer}^2}$$

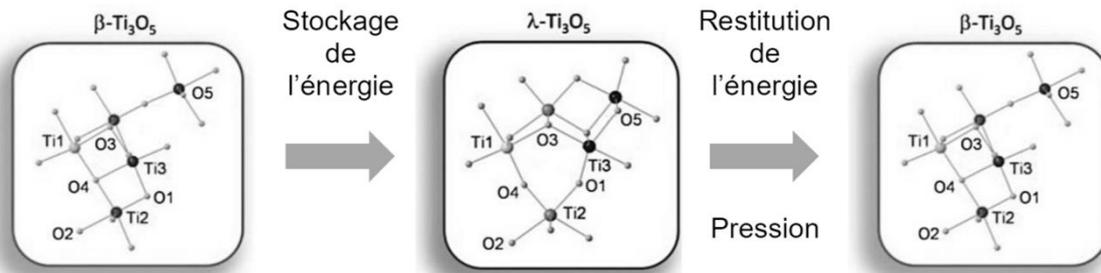
avec une incertitude sur la température estimée à $0,5^\circ\text{C}$.

La détermination expérimentale est-elle convenable sachant que la valeur attendue est de $444 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$?

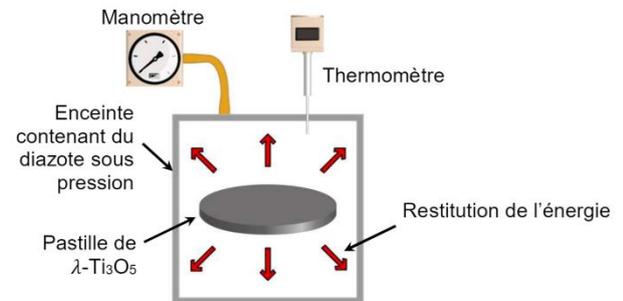
Exercice 6. Une céramique comme réservoir d'énergie

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 (pentaoxyde de titane, Ti_3O_5) 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**) ; l'énergie reçue permet le passage du beta-pentaoxyde de titane ($\beta-Ti_3O_5$) au lambda-pentaoxyde de titane ($\lambda-Ti_3O_5$). Cette nouvelle structure est stable. 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 $\lambda-Ti_3O_5 \rightarrow \beta-Ti_3O_5$. 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 (**figure ci-contre**).



Données :

- Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4,18 J \cdot g^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $1,00 g \cdot mL^{-1}$

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 : $\Delta U = \frac{5}{2} n_{gaz} R \Delta T$ où n_{gaz} désigne la quantité de matière de gaz présente dans l'enceinte (en mol), $R = 8,31 J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$ désigne la constante des gaz parfaits et ΔT désigne la variation de température du gaz (en K).

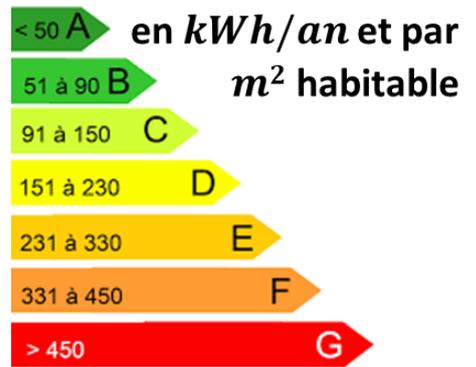
1. Rappeler la définition de l'énergie interne d'un système.

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 température du gaz de $18,2 K$. L'équilibre thermique est alors atteint.

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

Exercice 7. Le DPE d'une maison

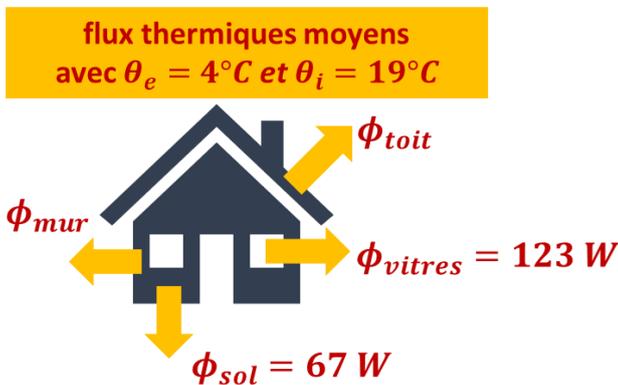
Un couple souhaite acheter une maison. Pour faire son choix, il décide de se renseigner sur son isolation thermique. Obligatoire depuis l'année 2006 lors de la vente d'un logement et depuis 2007 lors de la location d'un logement, le diagnostic de performance énergétique (DPE) renseigne sur la performance 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 :



	surface (m ²)	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 W, 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 : $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$ où e est l'épaisseur de la paroi (en m), 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 × 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 leur 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.



D'après www.ademe.fr

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
200 L	230 V	2200 W	5 h 17 min	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 R_{th} d'une paroi plane est donnée par la relation : $R_{th} = \frac{e}{\lambda S}$ où e est l'épaisseur de la paroi (en m), 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 W, R_{th} en K.W⁻¹, et T_1 et T_2 en K.
 - Capacité thermique massique de l'eau liquide $c_{eau} = 4180$ J.kg⁻¹.°C⁻¹
 - Masse volumique de l'eau : 1,000 kg.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 (RT 2012), les chauffe-eaux à accumulation doivent avoir une constante de refroidissement Cr inférieure ou égale à $2 \times V^\alpha$ 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. 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. Un gâteau servi 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 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 : $T(t) = (T_0 - T_{air}) \times e^{-t/\tau} + T_{air}$ 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.

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

Exercice 10. 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 $c_{eau} = 4,18 \text{ J} \cdot \text{g}^{-1} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{eau} = 1000 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- 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 m^2 et h un coefficient d'échange en $W \cdot \text{m}^{-2} \cdot K^{-1}$

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.

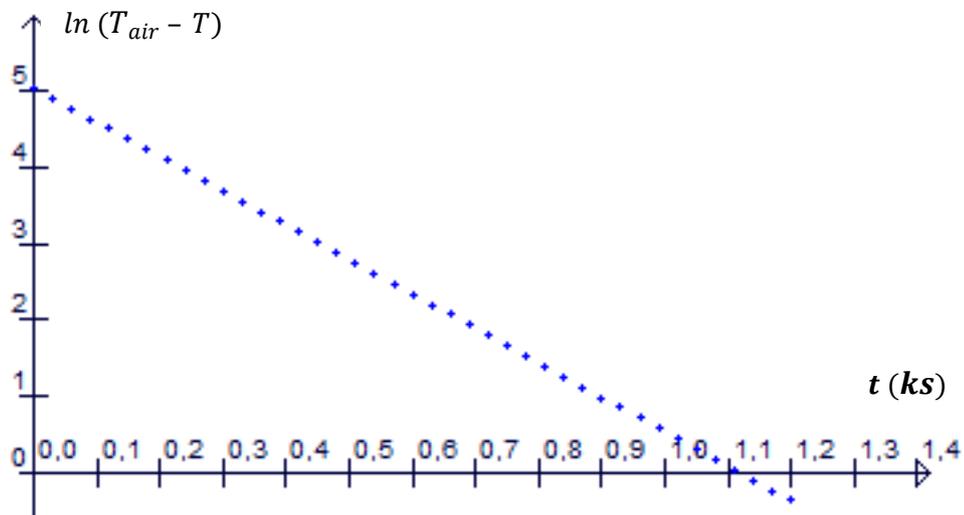
2. Exprimer la variation d'énergie interne de l'eau ΔU_{eau} lors d'une variation de température ΔT , en fonction des données de l'énoncé.
3. À l'aide du 1^{er} principe de la thermodynamique, montrer que le flux thermique instantané a aussi pour expression : $\Phi(t) = \rho_{eau} V_{eau} c_{eau} \frac{dT}{dt}$. Justifier soigneusement.
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).
Tracer l'allure de la courbe de $T(t)$ en fonction du temps.
6. Sachant qu'au bout d'une nuit (12 h), 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 11. Chauffage dans un four industriel

Une pièce cubique de côté $d = 10 \text{ cm}$, faite d'un matériau de masse volumique $\rho_M = 7300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et de capacité thermique massique $c_{m,M} = 228 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, initialement à la température $25 \text{ }^\circ\text{C}$, est placée dans un four dont la température de l'air à l'intérieur est uniformément égale à $180 \text{ }^\circ\text{C}$. Dans le four, la pièce reçoit un flux thermique surfacique $\Phi_s(t) = h \times (T_{air} - T(t))$ avec $T(t)$ la température de la pièce et $h = 150 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$. La pièce étant posée dans le four, la surface d'échange correspond uniquement à la surface de 5 faces de la pièce cubique.

1. À l'aide du 1^{er} principe de la thermodynamique, montrer que le flux thermique instantané reçu par la pièce a pour expression : $\Phi(t) = \rho_M d^3 c_{m,M} \frac{dT}{dt}$. Justifier soigneusement.
2. Montrer que la température de la pièce 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.
3. Calculer τ et préciser son unité.
4. Résoudre l'équation différentielle et donner l'expression de la température $T(t)$ de la pièce.

Une série de mesure de la température de la pièce dans le four permet de tracer la courbe ci-dessous :



5. Montrer que la courbe obtenue est bien en accord avec la solution proposée.
6. Vérifier que le coefficient directeur et l'ordonnée à l'origine de la droite sont en accord avec les valeurs des paramètres expérimentaux.
7. En réalité, la pièce est posée sur un tapis roulant de longueur $5,0 \text{ m}$ reliant les deux extrémités du four. Le tapis avance à vitesse constante et la température de la pièce en sortie du four doit être égale à $120 \text{ }^\circ\text{C}$. Déterminer la vitesse du tapis.

Exercice 12. Estimer la température de la surface terrestre

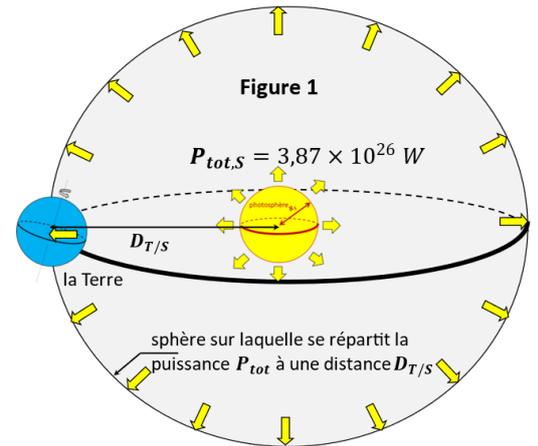
L'objectif de l'exercice est d'estimer la température de la surface terrestre dans différentes hypothèses et la comparer avec la température moyenne actuellement mesurée de 15°C.

Données :

- Loi de Stefan : le flux surfacique rayonné par un corps noir : $\Phi_s = \sigma T^4$ avec Φ_s en $W \cdot m^{-2}$, T en K et $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
- Rayon et température de la photosphère du Soleil : $R_S = 7,00 \times 10^5 km$; $T_S = 5770 K$
- Surface d'une sphère de rayon R : $S = 4\pi R^2$
- Rayon de la Terre : $R_T = 6380 km$; Distance Terre-soleil : $D_{T/S} = 1,50 \times 10^8 km$
- Un corps en équilibre radiatif signifie que le rayonnement qu'il absorbe est égal à celui qu'il émet
- L'expérience montre que le Soleil et la Terre se comportent comme des corps noirs

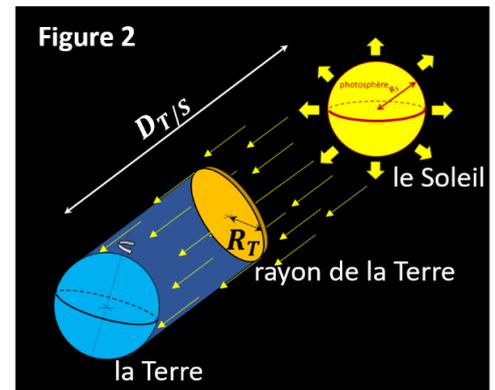
La puissance stellaire

1. Montrer que la puissance totale rayonnée par la photosphère solaire est $P_{tot,S} = 3,87 \times 10^{26} W$.
2. En s'aidant de la **figure 1**, calculer le flux surfacique solaire à la distance Terre-Soleil.



1^{er} modèle : absence d'atmosphère terrestre

3. La **figure 2** montre que la puissance totale reçue par la Terre est égale à la puissance interceptée par un disque de rayon R_T . Calculer la puissance totale reçue par la Terre $P_{tot,T}$.
4. En déduire que le flux thermique surfacique reçu sur Terre du Soleil est $\phi_{s,solaire①} = 342 W \cdot m^{-2}$.
5. La Terre étant en équilibre radiatif, calculer le flux surfacique émis par la Terre $\phi_{s,Terre①}$.
6. Estimer la température terrestre en °C. Conclure.



2^{ème} modèle : présence d'une atmosphère diffusante

L'atmosphère provoque une rétrodiffusion du rayonnement solaire vers l'espace, mesurée par un albédo A (fraction rétrodiffusée du rayonnement) d'environ 0,30.

7. Calculer le flux thermique surfacique reçu sur Terre du Soleil noté $\phi_{s,solaire②}$.
8. La Terre étant en équilibre radiatif, calculer le flux surfacique émis par la Terre $\phi_{s,Terre②}$ et donner une nouvelle estimation de la température de la surface terrestre. Conclure.

3^{ème} modèle : présence d'une atmosphère diffusante et absorbante

En plus de l'albédo, on tient compte maintenant dans l'atmosphère de la présence de gaz absorbant une partie du rayonnement terrestre dans l'infrarouge. La fraction absorbée du rayonnement terrestre est égale à $\alpha = 0,75$ mais ce rayonnement absorbé est réémis, pour moitié vers l'espace et pour moitié renvoyé vers la surface terrestre.

9. La Terre étant toujours en équilibre radiatif, montrer que le flux surfacique émis par la Terre est $\phi_{s,Terre③} = 382 W \cdot m^{-2}$.
Donner une nouvelle estimation de la température de la surface terrestre. Conclure.

Perspectives :

10. En déduire la conséquence d'une augmentation de la concentration des gaz absorbants liée aux activités humaines, et celle de la fonte des glaciers et de la banquise.