

THERMODYNAMIQUE – EXERCICES

Gaz parfait :

Exercice 1 :

Un récipient clos contient un gaz à 17°C sous la pression atmosphérique. A quelle température faut-il porter le gaz pour que la pression augmente de 50% ?

Exercice 2 :

Deux récipients contiennent respectivement du chlore et de l'azote dans les conditions suivantes :

Cl_2 : 2,25 L ; 0,30 bar ; 20°C N_2 : 1,40 L ; 1,0 bar ; 0,0°C

Masses molaires: $M_{\text{Cl}_2} = 71 \text{ g/mol}$; $M_{\text{N}_2} = 28 \text{ g/mol}$

- 1) Calculer la quantité de matière et la masse de chaque gaz en les supposant parfaits.
- 2) On mélange ces gaz dans un même récipient de volume 18,5 litres à la température de 0,0°C. On suppose le mélange idéal.
Calculer la pression du mélange gazeux.

Exercice 3 :

Un enfant gonfle un ballon avec de l'hélium. Après avoir fait entrer $n_0 = 0,250 \text{ mol}$ d'hélium dans le ballon à une température de $\theta_0 = 25^\circ\text{C}$, la pression dans le ballon est égale à $P_0 = 120 \text{ kPa}$.

- 1) Déterminer l'expression de la pression P_1 dans le ballon lorsqu'il aura fait entrer $n' = 0,150 \text{ mol}$ de plus à la même température. Réaliser l'application numérique. On considère la variation du volume du ballon comme négligeable.
- 2) Le ballon est alors mis dans un congélateur à une température $\theta_2 = -18^\circ\text{C}$. On suppose que la pression du ballon reste constante. Déterminer l'expression du volume V_2 du ballon et réaliser l'application numérique.

Bilan thermique

Exercice 4 :

Frédéric chauffe un volume $V = 250 \text{ mL}$ d'eau dans sa tasse. Il souhaite que la température de l'eau passe de 10 °C à 90 °C.

- 3.3. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau contenue dans la tasse.

On suppose que le four à micro-ondes est bien isolé. Le four est réglé sur la position de puissance $P = 900 \text{ W}$.

- 3.4. Au bout de combien de temps l'eau du thé sera-t-elle prête ?

Données :

- Célérité de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$;
- Masse volumique de l'eau : $\rho_{\text{eau}} = 1,00 \text{ kg.L}^{-1}$;
- Capacité thermique de l'eau : $c_{\text{eau}} = 4180 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;

Exercice 5 :

Oscar a oublié une casserole d'eau sur le feu. On souhaite étudier énergétiquement la transformation thermodynamique mise en jeu.

1. Dans un premier temps, on constate que la température de l'eau augmente de 20 °C à 100 °C. Décrire la situation à l'échelle microscopique.
2. Sans utiliser de formule, justifier que l'énergie interne augmente pendant cette transformation.
3. Calculer l'énergie Q_1 reçue par l'eau.
4. Dans un second temps, on constate que la température de l'eau est constante et égale à 100 °C. En revanche, la masse d'eau liquide diminue. Expliquer pourquoi.
5. Déterminer l'énergie Q_2 reçue par l'eau lors de la vaporisation de toute l'eau.
6. Comparer Q_1 et Q_2 et commenter cet écart.
 - Énergie massique de vaporisation : $L_{\text{vap}} = 2\,257 \text{ kJ.kg}^{-1}$
 - Masse d'eau dans la casserole : $m = 2,0 \text{ kg}$
 - Capacité thermique massique de l'eau : $c = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$

Exercice 6 :

Parmi les divers équipements publics ou privés, les piscines sont souvent considérées comme énergivores. Pourtant, de nombreuses solutions techniques permettent d'optimiser la consommation d'énergie d'une piscine en agissant sur sa forme, son orientation et sur la source de production d'énergie nécessaire à son chauffage. Les pompes à chaleur sont des dispositifs désormais préconisés pour le chauffage de ces bassins d'eau.

L'objectif de cet exercice est de répondre à la question suivante : en quoi l'utilisation d'une pompe à chaleur contribue-t-elle à apporter une solution au défi énergétique ?

La pompe à chaleur

La pompe à chaleur (PAC) est un équipement de chauffage thermodynamique à énergie renouvelable. La PAC transfère de l'énergie depuis une source renouvelable, appelée source froide, telle que l'air extérieur, l'eau (d'une nappe souterraine ou de la mer), ou la terre vers un autre milieu (un bâtiment, un logement, un bassin d'eau, etc.).

Pour exploiter ces différents gisements d'énergie renouvelable, une source d'énergie, généralement électrique, est toutefois nécessaire : aussi les PAC consomment-elles de l'électricité.

Le coefficient de performance η de la PAC est plus ou moins élevé selon la technologie, la source renouvelable ou l'usage de la PAC. Plus le coefficient de performance est élevé, plus la quantité d'énergie électrique nécessaire pour faire fonctionner la pompe est faible par rapport à la quantité d'énergie renouvelable prélevée au milieu.

Le coefficient de performance η d'une pompe à chaleur traduit donc la performance énergétique de celle-ci. Il est défini par le rapport de l'énergie utile fournie par la PAC sur l'énergie électrique requise pour son fonctionnement. La valeur de ce coefficient η est généralement comprise entre 2,5 et 5. Elle dépend de la conception et du type de PAC, mais aussi de la température extérieure de la source froide.

d'après : www.ademe.fr

Données :

- système étudié : le fluide frigorigène de la PAC ;
- capacité thermique massique de l'eau liquide : $c_{\text{eau}} = 4,18 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$;
- masse volumique de l'eau liquide : $\rho_{\text{eau}} = 1000 \text{ kg.m}^{-3}$ dans les conditions de l'étude.

Schéma énergétique de la pompe à chaleur air / eau

La pompe à chaleur air / eau est une machine thermique dittheme qui fonctionne entre une source de température variable au cours du temps et une source de température quasi constante, tout en recevant de l'énergie électrique. La PAC fonctionne comme une machine cyclique. Au terme d'un cycle, la variation d'énergie interne ΔU du système (fluide frigorigène) contenu dans la PAC est nulle.

Des transferts énergétiques Q_f , Q_c et W_e sont mis en jeu au cours d'un cycle de la PAC, avec :

- Q_f énergie transférée de l'air extérieur (source froide dans ce dispositif) au fluide de la PAC ; cette énergie est renouvelable et gratuite ;

- Q_c énergie transférée par le fluide de la PAC à l'eau du bassin de la piscine ;

- W_e énergie électrique consommée par la PAC et transférée intégralement au fluide de la PAC sous une autre forme.

Les grandeurs Q_f , Q_c et W_e sont positives.

Les grandeurs Q_f , Q_c et W_e sont positives.

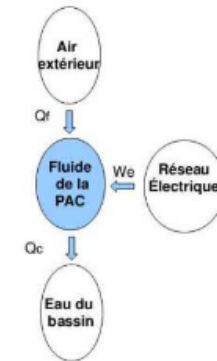


Figure 1. Schéma énergétique de la pompe à chaleur d'une piscine.

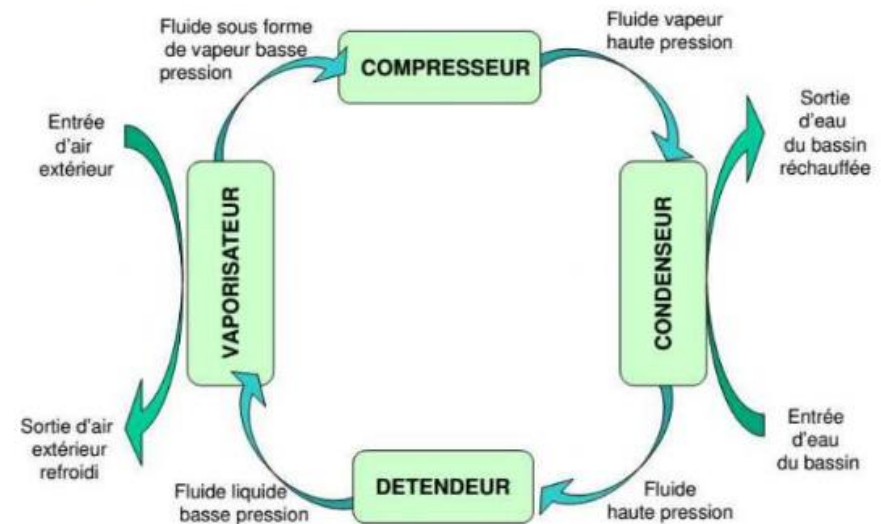


Figure 2. Cycle du fluide frigorigène dans la PAC.

1. Fonctionnement global de la pompe à chaleur

1.1. Parmi les transferts d'énergie Q_c , Q_f et W_e , indiquer ceux qui correspondent à une énergie reçue par le fluide de la PAC et ceux qui correspondent à de l'énergie cédée par le fluide de la PAC.

1.2. Montrer que pour un cycle du fluide, on a l'égalité $Q_c = Q_f + W_e$.

2. Étude du fluide frigorigène

Le fluide frigorigène est un mélange choisi pour ses propriétés thermiques. Il circule dans des tuyaux à l'intérieur de la PAC et n'est donc jamais en contact direct avec l'air extérieur.

2.1. Nommer le changement d'état que subit le fluide frigorigène contenu dans la PAC lors de son passage dans le vaporisateur. Lors de ce changement d'état, le fluide frigorigène a-t-il reçu ou cédé de l'énergie ?

2.2. Quels sont le ou les modes de transfert d'énergie entre l'air extérieur et le fluide frigorigène ?

3. Chauffage de l'eau du bassin d'une piscine

Après remplissage d'une piscine de volume $V = 560 \text{ m}^3$ avec une eau initialement prise à une température de 17°C , on souhaite augmenter la température de l'eau de piscine jusqu'à 28°C . On considérera que le transfert thermique depuis la PAC sert intégralement à chauffer l'eau de la piscine sans déperdition.

3.1. Calculer la variation d'énergie interne de l'eau du bassin ΔU_{eau} quand la température de l'eau a atteint 28°C . En déduire la valeur de Q_c , énergie transférée par le fluide de la PAC à l'eau du bassin de la piscine.

3.2. On a mesuré l'énergie électrique W_e consommée (et facturée) pendant ce transfert et trouvé une valeur égale à $W_e = 8,0 \times 10^9 \text{ J}$. Déterminer la valeur de Q_f , l'énergie transférée par l'air extérieur.

3.3. Exprimer, puis calculer le coefficient de performance η de la PAC.

4. Enjeux énergétiques

4.1. Montrer qu'avec une PAC de coefficient de performance $\eta = 3,0$, on réalise 67 % d'économie sur sa facture en énergie électrique par rapport à un chauffage direct utilisant, par exemple, une résistance électrique.

4.2. En conclusion, répondre en quelques lignes à la question suivante : en quoi l'utilisation de pompes à chaleur apporte-t-elle une réponse à des problématiques énergétiques contemporaines ?

Transferts thermiques

Exercice 7 :

Réduire la consommation d'énergie est, de nos jours, au cœur des préoccupations afin de préserver l'environnement, épargner les ressources naturelles et limiter les dépenses. Une grande part de la consommation d'énergie provient de l'habitat. Comment rendre une maison plus économe en énergie de chauffage ?

1. Isolant thermique : faire le bon choix

Soucieux de réduire ses dépenses de chauffage, Frédéric décide d'améliorer l'isolation thermique de son habitation. Sa maison possédant un grenier non chauffé, il décide d'en isoler le sol.

Données :

- Température du grenier : $\theta_1 = 5,0^\circ\text{C}$;
- Température de la maison : $\theta_2 = 20^\circ\text{C}$;
- Surface du sol du grenier : $S = 80 \text{ m}^2$;
- Résistance thermique du sol du grenier : $R = 7,5 \times 10^{-3} \text{ K.W}^{-1}$.

1.1. Dans quel sens s'effectuera le transfert thermique dans la maison de Frédéric ?

1.2. Donner l'expression puis calculer le flux thermique Φ à travers le sol du grenier.

Frédéric consulte de nombreuses documentations sur l'isolation thermique. Il existe de nombreux matériaux isolants caractérisés par leur conductivité thermique notée λ . Plus la conductivité thermique d'un matériau est élevée, plus il conduit facilement la chaleur.

1.3. Utiliser le tableau suivant pour conseiller Frédéric dans son choix de matériau. Justifier.

Nom du matériau	Laine de roche	Polystyrène extrudé	Liège naturel expansé	Cellulose
Conductivité thermique λ en $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$	0,035	0,033	0,042	0,039

1.4. La résistance thermique totale du sol du grenier doit atteindre la valeur $R = 6,3 \times 10^{-2} \text{ K.W}^{-1}$. Sachant que lorsque plusieurs parois sont accolées, la résistance thermique totale est égale à la somme des résistances thermiques de chaque paroi, calculer la résistance thermique de l'isolant choisi précédemment par Frédéric à la question 1.3.

1.5. Frédéric a lu que la résistance thermique d'une paroi plane dépend de la conductivité thermique λ du matériau constituant la paroi, de son épaisseur e et de la surface S traversée par le flux thermique. La résistance thermique est inversement proportionnelle à la conductivité thermique et à la surface traversée et proportionnelle à l'épaisseur.

1.5.1. À partir des informations ci-dessus, donner l'expression de la résistance thermique d'une paroi plane. Vérifier l'homogénéité de votre expression.

1.5.2. Tous les matériaux proposés dans le tableau s'achètent sous forme de panneaux rigides dans le commerce. Quelle épaisseur minimale doit posséder le panneau du matériau choisi par Frédéric ?

2. Principe d'un chauffe-eau solaire

Toujours dans le but de réaliser des économies d'énergie, Frédéric envisage de produire son eau chaude sanitaire en tirant profit de l'énergie solaire. Il se documente sur le principe d'un chauffe-eau solaire individuel. Voici le résultat de ses recherches :

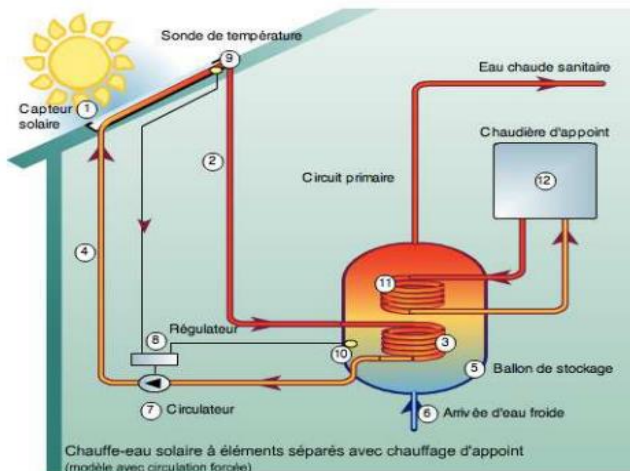


Schéma du principe d'un chauffe-eau solaire individuel (D'après Ademe)

Un chauffe-eau solaire se compose d'un capteur solaire thermique (qui se comporte comme une mini serre) (1). Dans le circuit primaire (2) calorifugé circule le liquide caloporteur (eau + glycol). Ce liquide s'échauffe lorsqu'il passe dans les tubes du capteur solaire et se dirige vers le ballon de stockage (5) de l'eau sanitaire. Le liquide caloporteur cède sa chaleur à l'eau sanitaire par l'intermédiaire d'un échangeur thermique (3). Une fois refroidi, le liquide caloporteur repart vers le capteur solaire où il sera à nouveau chauffé. Une pompe électrique (7) met en mouvement le liquide caloporteur lorsque la température de celui-ci est supérieure à celle de l'eau sanitaire du ballon.

L'énergie solaire ne peut pas assurer la production d'eau chaude quelle que soit la saison. C'est pourquoi le ballon de stockage est également équipé d'un dispositif de chauffage d'appoint (ensemble (11) et (12)).

2.1. Citer les trois modes de transfert thermique. Les présenter brièvement.

2.2. Quel mode de transfert thermique intervient :

- au niveau du capteur solaire (1),
- au niveau de l'échangeur thermique (3),
- et à l'intérieur du ballon de stockage (5) ? Justifier.

2.3. Le fluide caloporteur s'échauffe lorsqu'il passe dans le capteur solaire. Comment varie son énergie interne ? Pourquoi ?

Exercice 8 :

Le rayonnement solaire reçu par la Terre atteint un flux thermique surfacique φ_s de $340 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ au sommet de son atmosphère. L'albédo moyen α est de 30 %. La température moyenne θ de la Terre est égale à 15°C .

1. Calculer le flux thermique surfacique absorbé par la surface de la Terre.
2. À partir de la loi de Stefan-Boltzmann, calculer le flux thermique surfacique émis sous forme de rayonnement par la surface de la Terre.
3. En déduire le flux thermique surfacique absorbé, puis renvoyé par l'atmosphère vers la surface de la Terre.
4. En supposant que l'atmosphère émette autant de flux thermique vers la Terre que vers l'espace, déterminer la part de flux thermique absorbée par l'atmosphère.

Exercice 9 :

Le fonctionnement d'une serre ne repose pas sur le principe de l'effet de serre, mais sur la disparition des échanges thermiques dus à la convection entre la terre et l'air ambiant.

On considère dans un premier temps un lopin de terre sans serre. La terre transmet à l'air ambiant $102 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de flux surfacique par convection.

1. Effectuer un bilan d'énergie en considérant les flux thermiques surfaciques reçus de l'extérieur φ_{ext} par la terre, perdus par convection φ_{conv} et émis par rayonnement φ_{ray} .
2. Calculer le flux thermique surfacique reçu de l'extérieur φ_{ext} .

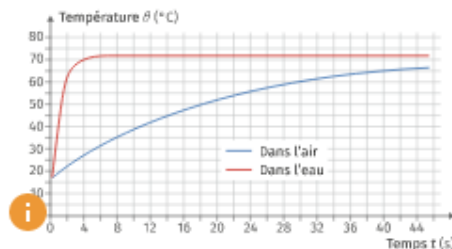
On considère désormais le même lopin de terre, avec une serre installée. Le flux thermique surfacique reçu de l'extérieur est équivalent, mais les échanges thermiques avec l'air par convection sont désormais nuls.

3. Déterminer la température de la terre sous la serre. Préciser quel est le véritable phénomène responsable de cette augmentation de la température.

- **Température moyenne de la surface de la Terre :** $T = 288\text{K}$
- **Expression de la loi de Stefan-Boltzmann :** $\varphi = \sigma \cdot T^4$
- **Constante de Stefan-Boltzmann :** $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$

Exercice 10 :

Un thermomètre n'est pas un instrument idéal. Il possède une capacité thermique qui lui donne une certaine inertie. Un suivi de la température est réalisé avec deux thermomètres du même modèle, l'un placé dans l'air et l'autre dans de l'eau à 71°C .



1. Déterminer le temps caractéristique τ pour l'eau et pour l'air.
2. En appliquant le premier principe de la thermodynamique, établir l'équation différentielle régissant l'évolution de la température du fluide à l'intérieur du thermomètre.
3. Déterminer la capacité thermique du thermomètre.

- Coefficient de Newton estimé pour le flux thermique entre l'eau et le thermomètre :
 $h = 200 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
- Surface du thermomètre :
 $S = 2,0 \text{ cm}^2$

Exercice 11 :

La fabrication d'un yaourt ferme nécessite de laisser des ferments se multiplier dans le lait pendant 3 h à 43°C . Ils sont ensuite conditionnés en pots et mis à refroidir dans un réfrigérateur thermostaté à 4°C .

Le flux thermique échangé entre le pot de yaourt et le réfrigérateur est modélisé par :

$$\phi = h \cdot S \cdot (T - T_{\text{réfrigérateur}})$$

La masse de yaourt est notée m et sa capacité thermique massique notée c .

1. Préciser le mode de transfert thermique permettant le refroidissement du yaourt ferme.
2. À partir de l'expression du flux thermique, calculer la résistance thermique R_{th} .
3. Établir l'équation différentielle selon la température T du yaourt ferme en utilisant le premier principe de la thermodynamique.
4. Résoudre l'équation différentielle en utilisant les conditions initiales et finales.
5. Déterminer la température atteinte par le yaourt ferme au bout de 3 min.
6. Déterminer la durée nécessaire au yaourt ferme pour qu'il atteigne une température de 10°C .

- Masse de yaourt dans un pot :
 $m = 100 \text{ g}$
- Capacité thermique massique du yaourt ferme :
 $c = 3\,840 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
- Surface d'échange entre l'air du réfrigérateur et le yaourt :
 $S = 0,010 \text{ m}^2$
- Coefficient de Newton entre l'air du réfrigérateur et le yaourt ferme :
 $h = 25 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$

Exercice 12 :

On étudie le fonctionnement d'un chauffe-eau électrique.
L'eau est chauffée grâce à une résistance électrique.

PARTIE A :

Données :

La cuve d'un chauffe-eau contient 250 L d'eau

Capacité calorifique massique : $c_{eau} = 4,18 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$

Masse volumique : $\rho_{eau} = 1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$

Prix du kWh : 0,15 €

Température initiale de l'eau : 12°C

1 kWh = $3,6 \cdot 10^6$ J

- 1) Déterminer le coût nécessaire pour amener toute l'eau contenue dans la cuve à une température de 65°C.
- 2) Il faut 4h pour chauffer entièrement la cuve, quelle est la puissance moyenne fournie par la résistance ?
- 3) Si on utilise un générateur électrique de rendement 77 % pour alimenter la résistance, quelle est la puissance moyenne du moteur ?

PARTIE B:

On souhaite limiter les pertes de chaleur après un cycle de chauffage de l'eau. Pour cela, on se propose de recouvrir la cuve, en acier, avec un isolant.

Données :

Épaisseur de la cuve : 2 mm

Surface exposée à l'air : 30 m²

Conductivité de l'acier : 50,2 W.m⁻¹

- 1) Quels sont les trois modes de transfert thermique ?
- 2) Quel mode de transfert thermique est impliqué dans le refroidissement de la cuve ?
- 3) Pour isoler la cuve, on a le choix entre différents isolants. Quel est le meilleur isolant possible parmi ceux proposés ?

Matériaux	Conductivité
Carton	0,07
Laine de verre	0,04
Polystyrène	0,036

- 4) Quelle épaisseur minimale d'isolant faut-il ajouter pour faire en sorte que la température de l'eau dans la cuve passe de 65°C à 50°C en plus de 12h ? (On suppose que la surface exposée à l'air reste inchangée).