1. Session 2023 – Jour1 – Centres Étrangers

EXERCICE 3 – FOUR À CÉRAMIQUE (5 points)

Pour obtenir des objets en céramique, il faut les placer à l'intérieur d'un four adapté. Les objets sont introduits dans le four à température ambiante, chauffés progressivement jusqu'à atteindre 1000 °C (phase 1) et maintenus à cette température pendant une durée précise pour obtenir une céramique réussie (phase 2).

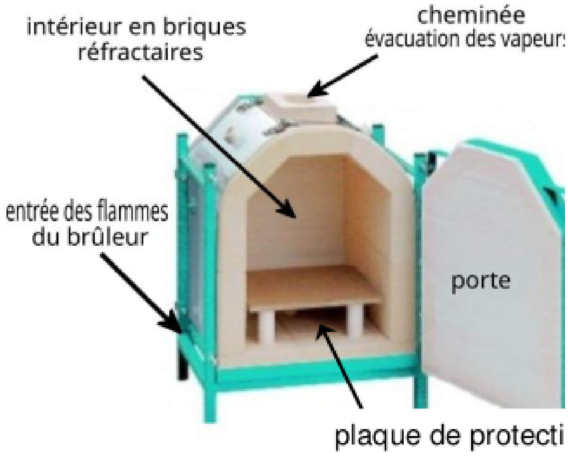
L'objectif de cet exercice est d'évaluer la consommation de gaz d'un four lors des deux phases de la cuisson.

DOCUMENT 1 - Le four

Une fois allumé, un brûleur à propane est placé devant l'entrée en bas du four. Les flammes jaillissent à l'intérieur sous une plaque de protection sur laquelle sont placées les pièces à cuire.

L'intérieur du four est fabriqué en briques réfractaires, dotées d'une grande résistance thermique.

Au sommet du four, une cheminée permet d'évacuer l'air et les vapeurs.



Caractéristiques du four

- Capacité thermique massique : $c_f = 800\ \text{J·K}^{-1}\text{·kg}^{-1}$
- Masse du four : $m_f = 120$ kg
- Résistance thermique du four : $R_{th} = 0{,}6\ \text{K·W}^{-1} = 0{,}6\ \text{°C·W}^{-1}$

DOCUMENT 2 - Bouteille de propane

Pour la cuisson, on utilise du propane, gaz combustible, dont les caractéristiques sont les suivantes :

- Masse molaire du propane : $M = 44{,}1\ \text{g·mol}^{-1}$
- Énergie molaire libérée lors de la combustion du propane : $E_n = 2004\ \text{kJ·mol}^{-1}$

Rappels

- $T(\text{K}) = \theta\,(\text{°C}) + 273{,}15$
- La variation de l'énergie interne ΔU d'un système incompressible de masse m et de capacité thermique massique c, dont la température passe de θ_i à θ_f, est donnée par la relation :

$$\Delta U = m \times c \times (\theta_f - \theta_i).$$

Données

- Le débit massique de gaz en sortie de bouteille, D, en g·h^{-1}, est la masse de gaz, en gramme, cédée par la bouteille durant 1 h.
- La résistance thermique est reliée au flux thermique par la relation : $\Phi = \frac{(\theta_{four} - \theta_{ext})}{R_{th}}$,

  avec le flux Φ en watt et la différence de température $(\theta_{four} - \theta_{ext})$ entre le four et l'air extérieur, en K ou en °C.

Partie A - Durée de la mise en température du four

On veut déterminer la quantité de gaz brûlée dans le four pour élever sa température de $\theta_i = 20$ °C à $\theta_f = 1000$ °C.

1. Calculer la variation d'énergie interne ΔU du système { *four* } lorsque sa température passe de θ_i à θ_f.
2. Appliquer le premier principe de la thermodynamique au système { *four* } et en déduire la valeur de la quantité d'énergie Q reçue par le système par transfert thermique.

Lors de la phase de chauffe, la combustion du gaz dégage une quantité de chaleur Q_A supérieure à Q car 33 % de la quantité Q_A est perdue lors de la chauffe.

3. Montrer que la quantité d'énergie thermique Q_A que doit fournir la combustion du gaz a pour valeur $Q_A = 1{,}4\times10^8$ J.
4. Déduire des questions précédentes la valeur de la masse m_g de gaz nécessaire pour atteindre la température θ_f.
5. En supposant que, pour cette phase, le débit du gaz en sortie de bouteille est constant et vaut $D = 1250$ g·h^{-1}, déterminer la valeur de la durée Δt_A nécessaire pour que la température du four atteigne la valeur souhaitée.

Partie B - Maintien en température

Une fois la température de 1000 °C atteinte, la combustion du propane est maintenue pour que le four reste à cette température $\theta_{four} = 1000$ °C pendant la durée $\Delta t_B = 20$ min. Le lieu où se trouve le four (milieu extérieur) demeure en permanence à la température $\theta_{ext} = 20$ °C.

On note Q_B la quantité de chaleur reçue par le système { *four* }, due à la combustion du propane durant la durée Δt_B, pour compenser les pertes thermiques vers le milieu extérieur.

6. Citer les trois modes de transfert thermique possibles du four vers le milieu extérieur.

Le constructeur du four indique une résistance thermique de $R_{th} = 0{,}60$ K·W^{-1}.

7. Calculer la valeur du flux thermique Φ entre le système { *four* } et le milieu extérieur lorsque le four est maintenu à $\theta_{four} = 1000$ °C.

Le four est maintenu à cette température pendant la durée $\Delta t_B = 20$ min.

8. Montrer que la valeur de l'énergie Q_B nécessaire pour maintenir constante la température du four pendant cette durée est proche de 2,0 MJ.
9. En déduire la valeur de la masse de gaz minimale m_{min} qui doit être consommée pendant cette phase de maintien de la température du four à $\theta_{four} = 1000$ °C.

Partie C – Comparaison des énergies

10. Comparer la valeur de l'énergie Q_A nécessaire pour la mise en température avec celle de l'énergie Q_B nécessaire pour maintenir le four à température. En tirer une conclusion pratique dans la vie quotidienne lorsque l'on a plusieurs cuissons différentes à réaliser.

D. Une expérience contestée

Après la course, la technique dite du bain froid, est utilisée par des pilotes de BMX pour favoriser la récupération physique. Elle consiste à immerger le pilote de BMX dans un bain d'eau froide à 10 °C, pendant quelques minutes.

Dans cette partie, on cherche à déterminer la température du corps du pilote au bout de la durée d'immersion. Pour cela on s'intéresse à l'évolution de la température T du système {pilote de BMX} placé au contact de l'eau froide du bain dont la température T_{eau} demeure constante et égale à 10 °C.

On note Q l'énergie thermique échangée entre le pilote et l'eau pendant une durée Δt. On note Φ le flux thermique correspondant.

On assimile le pilote à un système incompressible possédant une capacité thermique, C, constante.

Données :

- température initiale du pilote avant son immersion : θ_0 = 37 °C ;
- T (K) = θ (°C) + 273 ;
- capacité thermique du système {pilote de BMX} : C = 347 kJ·K^{-1}.

Q.11. Citer trois modes de transfert thermique.

Q.12. En appliquant le premier principe de la thermodynamique, relier la variation d'énergie interne ΔU du système {pilote de BMX} à l'énergie thermique Q.

Q.13. Exprimer le flux thermique Φ en fonction de Q et de Δt. Indiquer les unités du système international des grandeurs intervenant dans cette expression.

La variation d'énergie interne d'un système incompressible au repos dont la température varie de ΔT est donnée par la relation $\Delta U = C \cdot \Delta T$.

Q.14. Exprimer le flux thermique Φ en fonction de la capacité thermique C, de la variation de température ΔT et de la durée Δt.

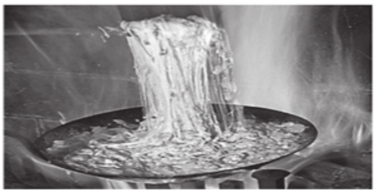
La valeur du flux thermique moyen échangé entre le système {pilote de BMX} et l'eau froide est estimée à 4,6 x 10^3 W.

Q.15. Calculer à l'aide du modèle la température du pilote au bout de 10 min d'immersion dans l'eau froide.

Q.16. Indiquer une des raisons expliquant pourquoi ce modèle n'est pas pertinent.

EXERCICE A – Transfert thermique et gastronomie (10 points)

Plat emblématique de la gastronomie auvergnate, la truffade se prépare à partir de pommes de terre rissolées dans du saindoux (matière grasse) auxquelles on ajoute en fin de cuisson de la tomme fraiche coupée en fines lamelles. La tomme fraiche est un fromage peu affiné au goût lacté issu de la première étape de la fabrication du Cantal. Pour faciliter le filage, il est conseillé de sortir la tomme du réfrigérateur afin que celle-ci retrouve une température proche de la température ambiante.



Tomme fraiche et truffade

Données :

- masse du bloc de tomme fraiche : m = 0,52 kg ;
- surface d'échange entre l'air et le bloc de tomme : $S = 2{,}9 \times 10^2$ cm^2 ;
- capacité thermique massique de la tomme fraiche : $c = 3{,}1 \times 10^3$ J·kg^{-1}·K^{-1} (estimation) ;
- coefficient de transfert thermique convectif surfacique dans l'air : h = 10,0 W·K^{-1}·m^{-2} (estimation dans les conditions étudiées) ;
- température de l'air mesurée pendant l'expérience : θ_{air} = 19,2 °C (valeur constante) ;
- température initiale du bloc de tomme fraiche : θ_0 = 9,2 °C.

À la sortie du réfrigérateur, le bloc de tomme fraîche est retiré de son emballage puis posé sur une de ses plus grandes faces, sur une planche en bois. L'air circule alors librement tout autour des cinq autres faces.

La situation sera modélisée en considérant uniquement les transferts conducto-convectifs.

On néglige le transfert thermique au niveau de la face du bloc en contact avec la planche en bois devant les autres.

Pour simplifier, on considère que la température du bloc de tomme notée θ est la même en tout point du bloc tout au long de l'expérience.

Une sonde thermique est insérée au cœur du bloc, la température est enregistrée toutes les deux minutes ; les résultats expérimentaux sont donnés figure 2.

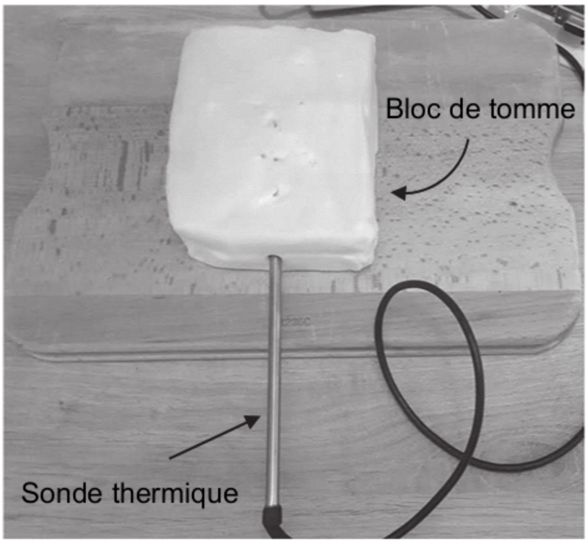


Figure 1. Dispositif de mesure

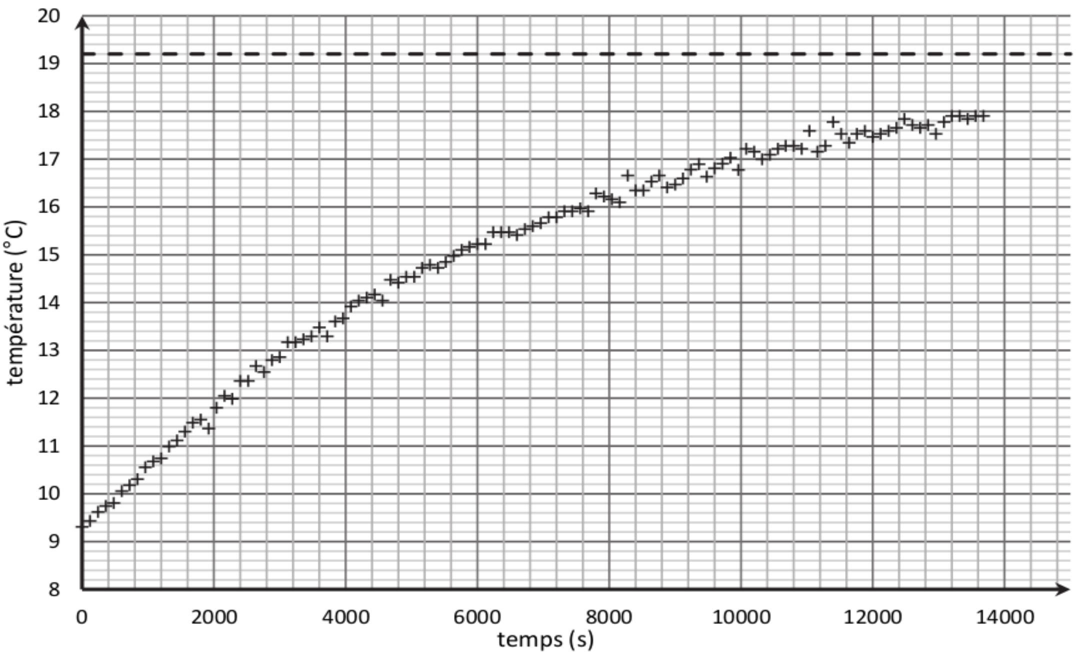


Figure 2. Mesures expérimentales de la température du bloc de tomme

Q1. Indiquer sur un schéma de la situation, faisant apparaitre les températures, dans quel sens s'opère le transfert thermique au travers du bloc de tomme fraiche.

En considérant uniquement les transferts conducto-convectifs, on admet que l'équation différentielle vérifiée par la température du bloc de tomme fraiche est de la forme suivante :

$$\frac{d\theta}{dt} + \frac{h \times S}{m \times c}\theta = \frac{h \times S}{m \times c}\theta_{air} \qquad (1)$$

Cette équation différentielle a pour solution générale :

$$\theta(t) = \theta_{air} + (\theta_0 - \theta_{air}) \times e^{-\frac{t}{\tau}} \qquad (2)$$

Q2. Vérifier à l'aide des équations (1) et (2) que $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$. Donner la signification physique et l'unité de cette grandeur.

Q3. À l'aide de la figure 2, estimer, en explicitant la méthode, une valeur expérimentale de τ, notée τ_{exp}.

La représentation graphique de Y = $\ln(\theta_{air} - \theta(t))$ en fonction du temps est donnée sur la figure 3 page suivante, ainsi que sa modélisation par une fonction affine.

Q4. Montrer à l'aide de la figure 3 que l'expression (2) rend bien compte des résultats expérimentaux.

Q5. Effectuer à l'aide de la figure 3 une nouvelle estimation de la valeur expérimentale de τ et comparer à celle obtenue à la question 3.

Q6. À partir des données, de l'expression $\tau = \frac{m \times c}{h \times S}$ et des valeurs expérimentales obtenues, discuter des hypothèses du modèle choisi.

Q7. Proposer une méthode permettant à un cuisinier de réduire la durée de la remontée en température du bloc de tomme fraiche.

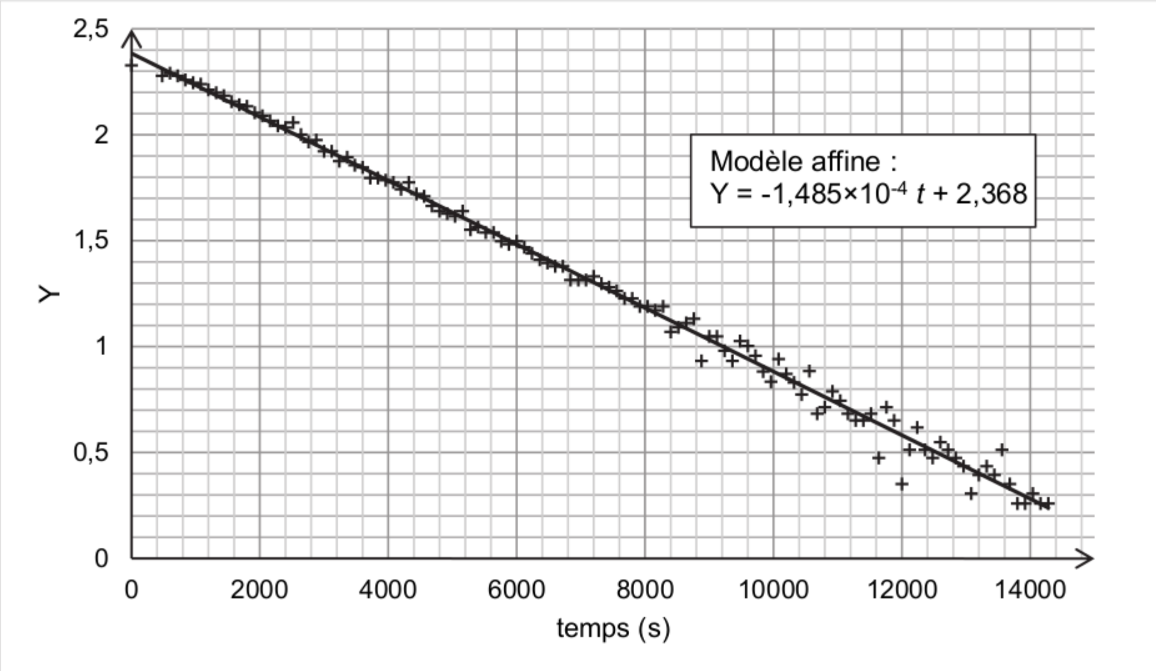


Figure 3. La représentation graphique de Y = $\ln(\theta_{air} - \theta(t))$ en fonction du temps

4. Session 2022 – Jour2 – Centres Étrangers – Capacité thermique massique du cuivre

La capacité thermique massique d'un métal, notée c, est une grandeur caractéristique de ce métal. Son unité est : $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ (ou $J \cdot kg^{-1} \cdot °C^{-1}$).
Pour une masse *m* donnée de métal, cette grandeur est reliée à la capacité thermique C par la relation $C = m\,c$.

Plusieurs méthodes expérimentales permettent de déterminer la valeur de la capacité thermique massique. L'une d'elle repose sur l'analyse des échanges thermiques entre un échantillon de métal chauffé préalablement dans une étuve et un volume d'eau à température ambiante.

Dans cet exercice, on s'intéresse tout d'abord à la durée de chauffage de l'échantillon dans l'étuve avant d'examiner la méthode mise en œuvre afin de retrouver la valeur de la capacité thermique massique du métal le constituant.

On rappelle que l'expression de la variation d'énergie interne d'un système incompressible de masse m entre deux états i et f se met sous la forme :

$$\Delta U_{i \to f} = m\,c\,\Delta\theta$$

avec c la capacité thermique massique du système étudié et $\Delta\theta = (\theta_f - \theta_i)$ la variation de température du système entre ces deux états.

Temps de mise à température de l'échantillon de cuivre

À la date t = 0, on place un échantillon de cuivre, initialement à la température ambiante θ_a, dans une étuve à l'intérieur de laquelle l'air est à la température $\theta_{th} = 100\,°C$.

On veut estimer la durée nécessaire pour être sûr que la température de l'échantillon de cuivre est bien de 100 °C à moins de 1 degré près.

Pour cela, on étudie l'évolution temporelle de la température $\theta(t)$ du système « échantillon de cuivre », de masse *m*.

Hypothèses

- La température $\theta(t)$ est la même en tout point de l'échantillon de cuivre.
- L'air à l'intérieur de l'étuve joue le rôle d'un thermostat. Sa température θ_{th} reste constante au cours du temps.
- Le transfert thermique entre le système et l'air à l'intérieur de l'étuve obéit à la loi phénoménologique de Newton qui exprime une relation de proportionnalité entre le flux thermique Φ et l'écart de température $(\theta_{th} - \theta(t))$.

$$\Phi = h\,S\,(\theta_{th} - \theta(t))$$

Données :

- θ_a = 20,5 °C $\qquad \theta_{\mathrm{th}}$ = 100,0 °C
- Masse de l'échantillon de cuivre m = 44,8 g.
- Capacité thermique massique du cuivre, valeur tabulée : c = 385 $\mathrm{J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}}$.
- Surface *S* d'échange entre le système et l'air *S* = 22 $\mathrm{cm^2}$
- Coefficient d'échange convectif de l'air : $h = 10\ \mathrm{W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}}$
- $\lim\limits_{x \to +\infty} e^{-x} = 0$

1. Prévoir le sens du transfert thermique *Q* qui a lieu entre le système et le thermostat.

2. Ecrire le premier principe pour le système et en déduire une relation entre le transfert thermique *Q*, la masse du système *m*, la capacité thermique massique du cuivre *c* et la variation de température $\Delta\theta$ du système soumis au transfert thermique.

3. Donner la relation liant le transfert thermique Q et le flux thermique Φ pendant la durée très courte Δt. On suppose que Φ est constant pendant la durée Δt.

4. En déduire une relation entre h, *S*, θ_{th}, $\theta(t)$, *m*, c, $\Delta\theta$ et Δt .

5. Déduire de ce qui précède l'équation différentielle donnant l'évolution de la température $\theta(t)$ du système en fonction du temps. La mettre sous la forme :

$$\frac{\mathrm{d}\theta(t)}{\mathrm{d}t} + \frac{1}{\tau} \times \theta(t) = \frac{\theta_{\mathrm{th}}}{\tau}$$

τ étant un temps caractéristique $\tau = \frac{m\,c}{h\,S}$.

La solution de l'équation différentielle précédente est de la forme :

$$\theta(t) = A \times e^{-\frac{t}{\tau}} + B$$

où A et B sont deux constantes.

6. Déterminer l'expression des constantes A et B en fonction de θ_a et θ_{th}. Détailler le raisonnement.

7. Montrer que l'application numérique conduit à l'expression suivante, avec t en s :

$$\theta(t) = 100 - 79{,}5 \times e^{-\frac{t}{784}} \qquad (°\text{C})$$

8. Déterminer la date t_1 à partir de laquelle la température du système sera supérieure à 99 °C.

Principe de la détermination de la capacité thermique massique

On a placé une masse m_e d'eau dans un calorimètre. La température d'équilibre de l'eau est $\theta_e = 20{,}5$ °C. On plonge l'échantillon de cuivre à la température θ_{th} dans l'eau du calorimètre. La température finale de l'ensemble se stabilise à la valeur θ_f.

Hypothèses

- La paroi du calorimètre étant une enceinte calorifugée, il n'y a pas de transfert thermique entre l'intérieur et l'extérieur du calorimètre.
- On considère de plus, pour simplifier, que le calorimètre ne participe pas aux échanges thermiques et que, par conséquent, les échanges thermiques au sein du calorimètre n'ont lieu qu'entre l'eau et l'échantillon de cuivre.

<u>Données</u> :

- Masse de l'eau dans le calorimètre m_e = 100 g.
- Masse de l'échantillon de cuivre : m = 44,8 g.
- Capacité thermique massique de l'eau c_{eau} = 4180 $\text{J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
- Température initiale de l'eau $\theta_e = 20{,}5$ °C.
- θ_f = 23,1°C.

9. Sachant que, dans le calorimètre, l'ensemble {échantillon de cuivre, eau} est isolé, montrer que :

$$c = \frac{m_e c_{eau}(\theta_f - \theta_e)}{m(\theta_{th} - \theta_f)}$$

10. Faire l'application numérique. Proposer une explication à un éventuel écart avec la valeur tabulée.

EXERCICE 3 – POMPE À CHALEUR ET HABITATION (5 points).

Soucieux de diminuer son impact carbone, un particulier souhaite remplacer la chaudière à gaz de son habitation par un système de chauffage bas carbone. Une entreprise spécialisée lui propose alors une pompe à chaleur air/eau.

Une pompe à chaleur, PAC en abrégé, air/eau est un dispositif de chauffage qui effectue un transfert thermique depuis l'air extérieur vers l'eau chaude circulant dans les radiateurs de l'habitation. Elle est constituée d'un module situé à l'intérieur de l'habitation et d'un autre à l'extérieur.

L'objectif de cet exercice est d'étudier l'adaptation de la pompe à chaleur avec l'habitation du particulier.

Données :

➢ Caractéristiques de la pompe à chaleur étudiée :

Puissance maximale P_{max} fournie pour chauffer l'eau des radiateurs	7,0 kW
Niveau d'intensité sonore L_1 mesuré à 5 m du module extérieur	46 dB

Étude thermodynamique de la PAC.

On considère une journée où la température extérieure T_{ext} est égale à 2 °C. Un transfert thermique à travers les murs s'opère depuis l'air intérieur de la maison vers l'air extérieur.

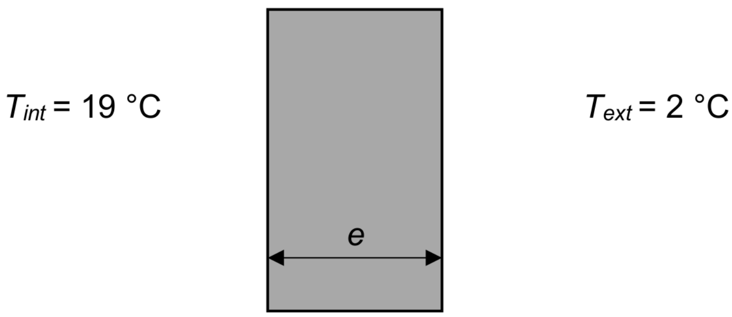


Figure 1. Schéma en coupe du mur en brique de la maison de résistance thermique R_{th}.

Q1. Identifier, en le justifiant, le mode de transfert thermique s'effectuant au travers d'un mur.

On rappelle que le flux thermique ϕ est relié à l'écart de température T_{int} -T_{ext} à la résistance thermique R_{th} par la relation :

$$\phi = \frac{T_{int} - T_{ext}}{R_{th}}$$

Dans le cas du mur, la résistance thermique R_{th} dépend de l'épaisseur e du mur (en m), de sa surface S (en m^2) et d'un paramètre caractéristique du matériau appelé conductivité thermique noté λ (en $W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$) par la relation :

$$R_{th} = \frac{e}{\lambda \times S}$$

Q2. Indiquer, en utilisant les deux relations précédentes, comment évolue le flux thermique ϕ lorsque l'épaisseur e du mur augmente.

À l'aide d'un système de régulation, la température de l'air intérieur de la maison est maintenue constante à une valeur T_{int} égale à 19 °C. La température de l'eau chaude circulant dans les radiateurs est T_{rad} égale à 55 °C.

Q3. Indiquer et justifier le sens du transfert thermique $Q_{rad/air}$ s'opérant entre les radiateurs et l'air intérieur de la maison.

On souhaite réaliser un bilan thermique du système « air intérieur » pendant une durée d'une heure de cette journée d'hiver. Par convention, les transferts thermiques sont comptés négativement lorsqu'ils sont cédés par le système et positivement lorsqu'ils sont reçus. On considère alors que s'effectuent un transfert thermique entre l'air intérieur et les murs noté Q_{mur} ainsi qu'un transfert thermique entre l'air intérieur et les autres parois (toit, fenêtres, sol…) noté Q_{autres}. On admet également que le système n'échange pas de travail avec l'extérieur.

Données :
- La durée du bilan thermique est égale à une heure ;
- Le transfert thermique au travers des murs noté Q_{mur} est égal à − 4,3 MJ ;
- Transfert thermique au travers des autres parois noté Q_{autres} est égal à − 7,1 MJ ;
- 1 MJ = 10^6 J.

Q4. En utilisant le premier principe de la thermodynamique au système « air intérieur », montrer que :

$$Q_{rad/air} = - Q_{mur} - Q_{autres}$$

Q5. À l'aide des données, calculer la valeur de $Q_{rad/air}$.

Q6. En déduire si la puissance de la PAC est suffisante pour chauffer l'eau des radiateurs.