

TD T3

Transferts thermiques

A. Flux thermique _____ ●○○

On cherche à comparer deux pertes thermiques. Pour cela, on donne les conductivités thermiques du verre ($\lambda_{\text{verre}} = 1,20 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) et du béton ($\lambda_{\text{béton}} = 1,40 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$).

1. Calculer le flux thermique à travers un simple vitrage dont la surface vaut $S = 2,00 \text{ m}^2$, d'épaisseur $e = 5,00 \text{ mm}$ lorsqu'il fait $T_0 = 0,0^\circ\text{C}$ à l'extérieur et $T_1 = 20,0^\circ\text{C}$ à l'intérieur.
2. Même question pour un mur en béton de surface $S' = 20,0 \text{ m}^2$, d'épaisseur $e' = 20,0 \text{ cm}$ dans les mêmes conditions de température.

B. Résistance thermique _____ ●○○

1. Calculer la résistance thermique d'un mur de briques dont la surface vaut $S = 15,0 \text{ m}^2$ et d'épaisseur $e = 10,0 \text{ cm}$.
2. Calculer la résistance thermique d'un mur de même aire, composé de $10,0 \text{ cm}$ de brique, $30,0 \text{ cm}$ de parpaing et $2,00 \text{ cm}$ de plâtre.

Données : $\lambda_{\text{brique}} = 0,67 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, $\lambda_{\text{plâtre}} = 0,80 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, $\lambda_{\text{parpaing}} = 1,15 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$

C. Mur d'un four _____ ●○○

Le mur d'un four comporte trois couches de matériaux différents accolées les unes aux autres :

- une couche de briques réfractaires de conductivité $\lambda_a = 1,210 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$,
- une couche de revêtement calorifuge de conductivité $\lambda_b = 0,080 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$,
- une couche de briques de conductivité $\lambda_c = 0,690 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$.

Chaque couche possède une épaisseur de $10,00 \text{ cm}$. La température est de $850,0^\circ\text{C}$ à l'intérieur du four et de $25,0^\circ\text{C}$ à l'extérieur.

1. Si la surface du mur est de $S = 30,00 \text{ m}^2$, calculer la perte calorifique par conduction pendant une journée entière.
2. Déterminer la température T_m au milieu du mur.

D. Efficacité d'un double vitrage _____ ●○○

L'intérieur d'une pièce est séparé de l'extérieur par une baie vitrée de surface S , et dont le verre a une conductivité thermique K . Ses faces interne et externe sont respectivement aux températures T_i et T_e avec $T_e < T_i$ (cas de l'hiver). On choisit un axe (O, x) orthogonal à la vitre. On ne considère que des régimes permanents. On pourra faire les applications numériques avec $S = 1 \text{ m}^2$.

1. La baie est une simple vitre d'épaisseur e

1. le flux thermique ϕ_1 sortant de la pièce à travers cette paroi en fonction de K, S, e, T_i et T_e .
2. Définir la résistance thermique R_1 de cette vitre ; et l'exprimer en fonction de $K, S, e, \dots$

2. La baie est formée de double vitrage

Les deux vitres, de même épaisseur e , sont séparées par une épaisseur e' d'air, de conductivité thermique K' . On ne tient compte que de la conduction.

1. Exprimer le flux thermique ϕ_2 sortant de la pièce, puis le rapport $\frac{\phi_2}{\phi_1}$.
2. A.N. : $T_e = -3^\circ\text{C}$; $T_i = 19^\circ\text{C}$; $e' = e = 3\text{ mm}$; $K = 1,2\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$; $K' = 0,02\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Calculer $\frac{\phi_2}{\phi_1}$ et commenter.
3. Calculer les températures T_1 et T_2 des faces en regard des deux vitres.
4. Représenter graphiquement les variations de la température en fonction de x dans le double vitrage.

E. Le refuge du Goûter

Le "nouveau" refuge du Goûter, situé dans le massif du Mont Blanc, est le plus haut refuge gardé de France (3 835 m). Il a été ouvert au public le 1^{er} juin 2015. D'architecture novatrice, il est conçu pour résister à un environnement difficile, et préfigure une nouvelle génération de bâtiments.



FIGURE 1 – Le refuge du Goûter en construction

Les contraintes d'accès et de production d'énergie sont telles qu'il est très important de minimiser les pertes d'énergie d'un tel bâtiment. On suppose que la température intérieure du refuge $T_i = 20^\circ\text{C}$ et la température extérieure $T_e = -10^\circ\text{C}$ sont constantes tout au long de la journée et de l'année. Le refuge est modélisé par un parallélépipède rectangle de longueur $L_1 = 15,0\text{ m}$, de largeur $L_2 = 8,0\text{ m}$ et de hauteur $h = 10,0\text{ m}$, posé à flanc de montagne. On modélise les échanges radio-convectifs à l'intérieur et à l'extérieur du refuge par des coefficients conducto-radio-convectifs internes et externes dont les valeurs sont pour l'intérieur $h_i = 9,1\text{ USI}$ et pour l'extérieur $h_e = 16,7\text{ USI}$.

Les murs latéraux sont constitués de différents matériaux assemblés comme le montre la figure 2.

Les résistances thermiques totales (conduction + convection) **surfaiques** du toit et du sol, notées respectivement r_{sol} et r_{air} , sont égales et valent $10,0\text{ USI}$.

On définit le *coefficient de déperditions thermiques moyen* du bâtiment par la relation suivante :

$$\mathcal{P}_{\text{tot}} = U_{\text{batiment}} \mathcal{S}_{\text{tot}} (T_i - T_e)$$

Dans cette relation, $\mathcal{P}_{\text{tot}}$ est la puissance thermique totale perdue par le bâtiment, U_{batiment} le coefficient de déperditions thermiques du bâtiment et $\mathcal{S}_{\text{tot}}$ la surface totale de l'enveloppe du bâtiment.

Votre but est de déterminer si le bâtiment est correctement isolé.

Matériau	Conductivité thermique λ	Densité
Acier inoxydable	26	7,8
Béton armé	1,15	2,2
Brique traditionnelle	1,15	2,4
Pierre	2,1 à 3,5	2,6
Sapin / Epicéa	0,13	0,45
Polystyrène	0,036	0,015
Laine de verre	0,032	0,1
Fibre de bois	0,038	0,2

TABLE 1 – Conductivité thermique ($\text{W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$) et densité de divers matériaux

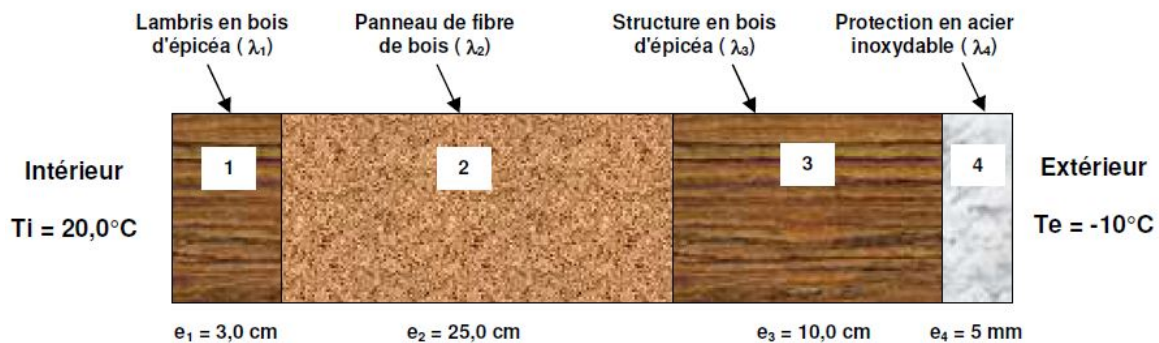


FIGURE 2 – Composition des murs latéraux du refuge du Goûter

Performances thermiques	U_{batiment} en unité USI
Bâtiment mal isolé	$> 1,5$
Bâtiment correctement isolé	De 0,5 à 0,7
Bâtiment très bien isolé	$< 0,3$

TABLE 2 – Qualité de l'isolation

F. Ailettes de refroidissement

Pour éviter un échauffement trop important d'un appareil électrique, dû à l'effet Joule, on munit l'arrière de son boîtier d'ailettes de refroidissement métalliques. Chaque ailette est un parallélépipède d'épaisseur $a = 2,0 \text{ mm}$, de largeur $b = 10,0 \text{ cm}$ et de longueur $c = 12,0 \text{ cm}$. Dans les calculs, on admettra que $a \ll b$.

En fonctionnement permanent, le boîtier de l'appareil maintient une température $T_M = 60^\circ\text{C}$. L'air extérieur qui circule est à une température constante et uniforme $T_A = 20^\circ\text{C}$ sauf au voisinage immédiat de l'ailette.

Dans l'ailette, on admet une conduction thermique unidimensionnelle; la température est donc notée $T(x)$, la loi de FOURIER s'applique et la conductivité est $\lambda = 20 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$.

Il existe, par ailleurs, un transfert thermique de l'ailette vers l'air ambiant. Le flux thermique entre une surface latérale dS de l'ailette à la température $T(x)$ et l'air ambiant à la température T_A suit la loi de NEWTON, avec $h = 180 \text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-2}$:

$$d\mathcal{P} = h(T(x) - T_A)dS$$

1. Ecrire le bilan énergétique en régime stationnaire permanent des échanges thermiques d'une tranche d'ailette de largeur dx . En déduire que la température est solution de l'équation différentielle :

$$\frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{1}{L^2} (T(x) - T_A) = 0$$

en précisant l'expression de L ainsi que sa valeur numérique.

2. Résoudre cette équation et donner l'expression simplifiée de $T(x)$ compte tenu de l'inégalité entre L et c .
3. Exprimer et calculer numériquement la puissance thermique totale $\mathcal{P}$ évacuée par l'ailette, puis la puissance thermique $\mathcal{P}'$ fournie par le boîtier à l'ailette en $x = 0$.
4. Combien d'ailettes faudrait-il disposer sur le boîtier pour évacuer une puissance totale de 200 W ?

G. Isolation d'une canalisation

On rappelle que, lorsque la surface S d'un solide portée à la température T_0 est en contact avec un fluide à la température T , la puissance thermique échangée entre la surface et le fluide est $\mathcal{P} = h(T_0 - T)S$ (loi de Newton) où h est une constante.

Une canalisation cylindrique, infinie, contient de l'eau à la température T_e . Elle est entourée d'une gaine isolante, l'ensemble se trouve dans l'air à la température T_0 . La canalisation a un rayon intérieur r_1 , un rayon extérieur r_2 , et une conductivité thermique λ_1 . La gaine isolante a un rayon extérieur r_3 , et une conductivité thermique λ_2 . Les échanges thermiques aux interfaces satisfont à la loi de Newton avec des coefficients d'échange h_1 pour l'interface eau/tube, h_2 pour l'interface tube/isolant, h_3 pour l'interface isolant/air.

1. Déterminer la direction du vecteur densité de flux thermique $\vec{j}_{\text{th}}$ et les variables dont il dépend.
2. Donner l'équation de diffusion thermique. Comment est-elle modifiée quand on se place dans le cas stationnaire?
3. Établir la résistance thermique R_1 pour une longueur ℓ du tube. Faire de même pour la gaine. On notera R_2 cette résistance.
4. Montrer que l'on peut également définir une résistance thermique pour chaque interface. On les notera R'_1 , R'_2 et R'_3 et on les exprimera en fonction des coefficients d'échange et des rayons.
5. Déterminer la résistance thermique totale R .
6. Montrer que la puissance thermique perdue par l'eau passe par un maximum pour une valeur particulière de r_3 .
7. Commenter.

H. Sensation de froid

Le but de l'exercice est d'expliquer l'observation suivante : lorsqu'on pose la main sur une table en bois puis sur une table en acier à la même température, le bois semble plus chaud que l'acier. On adopte le modèle suivant : deux cylindres isolés latéralement, de même section S , de même axe (Ox) , de conductivités thermiques λ_1 et λ_2 , de longueurs L_1 et L_2 sont mis bout à bout, le contact s'établissant en $x = 0$. On maintient les extrémités $x = -L_1$ et $x = L_2$ aux températures T_1 et T_2 . On étudie un régime stationnaire pour lequel la température ne dépend que de x et on néglige toute perte latérale.

1. Établir l'expression de $T(x)$ dans les deux cylindres en fonction de T_1 , T_2 , x , L_1 , L_2 et de la température T_c en $x = 0$.
2. Que peut-on dire du vecteur densité de flux thermique en $x = 0$? En déduire la température T_c en fonction des données du problème.

La température de la main est $T_1 = 37^\circ\text{C}$ et celle de la table (acier ou bois) est $T_2 = 20^\circ\text{C}$. Les conductivités thermiques sont $\lambda_1 = 10\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ pour la main, $\lambda_2 = 1\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ pour le bois et $\lambda'_2 = 100\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$ pour l'acier. On prendra $L_1 = L_2$.

3. Calculer T_c , pour un contact main/bois puis pour un contact main/acier. Conclure.

I. Fusible

Un fusible est constitué par un fil conducteur cylindrique homogène, de section droite d'aire S , de longueur utile L , de masse volumique μ et de capacité thermique massique c . Il possède une conductivité électrique γ , et une conductivité thermique κ . Il est traversé par un courant électrique continu d'intensité I . Ce fil est enfermé dans une capsule remplie d'une substance assurant une isolation thermique et électrique parfaite. Les températures en $x = 0$ et $x = L$ sont imposées et égales à la température T_0 du milieu ambiant.

Pour les applications numériques, on prendra les valeurs suivantes, données dans le système international d'unités (SI) : $\kappa = 65\text{ USI}$; $\gamma = 1,2 \times 10^6\text{ USI}$; $c = 460\text{ USI}$; $\mu = 2,7 \times 10^3\text{ USI}$; $T_0 = 290\text{ K}$; $L = 2,5\text{ cm}$.

On rappelle que la résistance électrique R d'un conducteur cylindrique de conductivité γ , de longueur h , de section S , parcouru par un courant I uniformément réparti et parallèle à son axe, est $R = \frac{h}{\gamma S}$.

On se place en régime permanent

1. Établir l'équation différentielle liant la température T , x , S et les données. Donner l'expression littérale de $T(x)$ et représenter graphiquement T en fonction de x .

Le matériau constituant le fil fond à $T_f = 390\text{ K}$. On veut fabriquer un fusible qui admet une intensité maximale $I_{\max} = 16\text{ A}$.

2. Préciser l'endroit de la rupture en cas de dépassement de $I_{\max}$. Déterminer l'expression littérale de l'aire S à prévoir. Faire l'application numérique.
3. On fixe $I = 10\text{ A}$. Le fil a la section S trouvée à la question précédente. Évaluer littéralement puis numériquement la puissance thermique $\mathcal{P}_{\text{th}}(0)$ transférée par conduction en $x = 0$. Préciser si cette puissance est reçue ou fournie par le fil. Même question pour la puissance thermique $\mathcal{P}_{\text{th}}(L)$ transférée en $x = L$. Quelle relation a-t-on entre $\mathcal{P}_{\text{th}}(0)$, $\mathcal{P}_{\text{th}}(L)$ et la puissance électrique $\mathcal{P}_e$ fournie à l'ensemble du fil ? Commenter

J. Effet de cave

Le sous-sol est considéré comme un milieu semi-infini, homogène, de masse volumique $\rho = 3,1\text{ t.m}^{-3}$, de conductivité thermique $\kappa = 1,8\text{ W.K}^{-1}.\text{m}^{-1}$, de capacité thermique massique $c = 870\text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, situé dans le demi-espace $x > 0$. On suppose que la température de la surface du sol (plan $x = 0$) est celle de l'air en surface, soumis à des variations sinusoïdales :

$$T_a(t) = T_0 + a \cos(\omega t)$$

T_a et a sont des constantes. La température du sol à une profondeur x et à l'instant test notée $T(x, t)$ et on admet qu'à une profondeur infinie, la température du sol vaut T_0 .

1. Rappeler l'équation de diffusion thermique à laquelle satisfait $T(x, t)$. On précisera l'expression et la valeur de la diffusivité D pour le sol.
2. On définit la variable u telle que $u = \frac{T - T_0}{a}$. A quelle équation aux dérivées partielles u obéit-elle?
3. On va résoudre l'équation en effectuant le passage à la notation complexe. Exprimer $\underline{u}(0, t)$ et $\underline{u}(\infty, t)$.
4. On cherche une solution de la forme $\underline{u}(x, t) = \exp(\alpha x + \beta t)$. Déterminer α et β . On fera apparaître la grandeur $\delta = \sqrt{\frac{2D}{\omega}}$.
5. En déduire $T(x, t)$. Commenter.
6. On note ω_a et ω_j les pulsations correspondant aux phénomènes de variations de température annuelles et journalières. Déterminer ces pulsations et les épaisseurs de peau correspondantes, notées δ_a et δ_j . Commenter.
7. On souhaite creuser une cave dans laquelle les variations annuelles de température ne sont que le dixième de ce qu'elles sont en surface. Exprimer et donner la valeur de la profondeur x_c de cette cave.
8. Dans la cave précédente, évaluer l'influence des variations quotidiennes de la température, dues à l'alternance du jour et de la nuit. Conclure.
9. On s'intéresse désormais uniquement aux variations annuelles : la température oscille entre -10°C en février et 30°C en août. Déterminer T_0 et a . Exprimer de façon alpha-numérique, en fonction du temps t , $T_a(t)$ et $T(x_c, t)$. En déduire le décalage temporel entre les variations de température en surface et dans la cave ($x = x_c$).

K. Les mammifères marins ...o

Un mammifère marin est modélisé par une boule de rayon R et de centre O . À l'intérieur de son corps, il produit une puissance thermique volumique φ_0 . On suppose que la température de l'animal est uniforme, elle est notée T_C . La sphère est placée dans un fluide (eau de mer) de conductivité thermique λ .

Pour simplifier, on considérera que le fluide est au repos et on négligera la convection. La température loin de la boule est $T_0 = 293\text{ K}$. Le vecteur densité de courant de transfert thermique est radial et s'écrit $\vec{j}_{\text{th}} = j_{\text{th}}(r) \vec{e}_r$. On suppose que le régime permanent est établi.

1. Rappeler la loi de FOURIER de la conduction thermique et la commenter.
2. Quelle est l'unité de la conductivité thermique?
3. Connaissez-vous des lois analogues à la loi de FOURIER?
4. Calculer le flux thermique ϕ dans le fluide en fonction de φ_0 et R en régime permanent.
5. Calculer la norme de $\vec{j}_{\text{th}}(R)$.
6. Montrer que pour $r > R$, $j_{\text{th}}(r) = \frac{A}{r^2}$ avec A constante. Expliciter A .
7. Déterminer l'équation vérifiée par $T(r)$ dans le fluide.
8. Établir que pour $r > R$, la température est donnée par : $T(r) = T_0 + \frac{a}{r}$ où on exprimera a .
9. Exprimer la température cutanée T_C de l'animal en fonction de φ_0 , R , λ et T_0 .
10. On donne la conductivité thermique de l'eau de mer $\lambda = 0,6\text{ USI}$, le rayon $R = 25\text{ cm}$. Calculer φ_0 pour $T_C = 303\text{ K}$.
11. On donne la conductivité thermique de l'air : $0,06\text{ USI}$. Pourquoi n'existe-t-il pas de petits mammifères marins? Quelle est la principale critique que vous feriez à ce modèle?

L. Le gel du lac Oral Centrale • • ○

On étudie la formation d'une couche de glace à la surface d'un lac. La température de l'air en surface est $T_s = -10^\circ\text{C}$ alors que l'eau liquide du lac est à sa température de fusion T_f . On note $e(t)$ l'épaisseur de la couche de glace à l'instant t et on suppose que $e(t = 0) = 0$. L'étude est faite dans l'approximation des régimes quasi-stationnaires.

1. Exprimer la densité de courant thermique $\vec{j}_Q$ dans la couche de glace en régime stationnaire en fonction de e notamment.
2. On note de l'épaisseur de glace formée entre t et $t + dt$. Exprimer de en fonction de j_Q , de l'enthalpie de fusion de la glace ℓ et de sa masse volumique μ . En déduire une équation différentielle vérifiée par $e(t)$.
3. Résoudre cette équation et déterminer l'épaisseur formée au bout d'une journée, d'une semaine et d'un mois. Commenter.
4. Quel serait l'effet d'une couche de neige tombée à la surface de la glace ?

Données : caractéristiques de la glace

- Conductivité thermique : $\lambda = 2,1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Masse volumique : $\mu = 917 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$;
- Enthalpie de fusion : $\ell = 333 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$.



FIGURE 3 – Gel du lac ou survie en eau froide ?

M. Survie en eau froide Oral CCINP • • ○

On considère généralement qu'il y a risque d'hypothermie lorsque la température du corps humaine passe en-dessous de 35°C .

1. Déterminer le temps au bout duquel il y a risque d'hypothermie pour un baigneur dans une eau à 17°C .
2. Quelle doit être l'épaisseur d'une combinaison de plongée en néoprène pour éviter l'hypothermie lors d'une baignade infiniment longue ?

Données :

- Capacité thermique massique du corps humain : $c_{\text{corps}} = 3,5 \text{ kJ} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$;
- Résistance thermique de la peau : $R_{\text{peau}} = 3 \cdot 10^{-2} \text{ K} \cdot \text{W}^{-1}$;
- Conductivité thermique du néoprène : $\lambda_{\text{néo}} = 0,2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$;
- Puissance produite par le métabolisme : $P_{\text{corps}} = 100 \text{ W}$;
- Puissance surfacique de perte du corps humain dans l'eau (par convection) : $P_{\text{conv}} = \alpha(T_{\text{ext}} - T)$, avec T la température de la peau, T_{ext} la température de l'eau et $\alpha = 10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$.

N. Température au cœur d'un astéroïde _____ Oral CCINP • • •

On étudie la température au sein d'un astéroïde modélisé par une sphère de rayon R , de conductivité λ , à l'équilibre thermodynamique.

De l'énergie est libérée à l'intérieur de l'astéroïde par radioactivité : pendant un temps dt , chaque élément de volume $d\tau$ de l'astéroïde reçoit une énergie $\mathcal{P}_V d\tau dt$, $\mathcal{P}_V$ étant une constante.

On raisonne sur une sphère de rayon $r < R$, indéformable et au repos.

1. De quelle(s) variable(s) dépend la température dans l'astéroïde ?
2. Calculer la chaleur traversant la sphère de rayon r par conduction, en fonction notamment de la conductivité λ de l'astéroïde et du rayon r de la sphère.
3. Calculer la chaleur créée dans la sphère de rayon r par radioactivité.
4. Grâce au premier principe de la thermodynamique, donner une relation entre ces deux chaleurs.
5. Exprimer $T(r)$ en fonction de λ , $\mathcal{P}_V$, r et T_0 , la température au centre de l'astéroïde.

L'astéroïde émet à sa surface par rayonnement une puissance surfacique $j_{\text{ray}} = \sigma T_s^4$, avec σ la constante de STEFAN et T_s la température de surface.

6. Déterminer la température T_0 au centre de l'astéroïde en fonction de R , λ , σ et $\mathcal{P}_V$.

O. Chambrage _____ • • •

Une bouteille de vin, choisie dans la cave à une température de $T_0 = 8^\circ\text{C}$ est mise en « chambre » dans la cuisine dont la température vaut $T_A = 22^\circ\text{C}$. La bouteille en verre est assimilée à un cylindre de hauteur $H = 19,5$ cm, de diamètre extérieur $d = 7,6$ cm et d'épaisseur $e = 3$ mm. Dans cette modélisation les échanges thermiques entre l'extérieur et le vin se font uniquement par la surface latérale de la bouteille. Par ailleurs la température $T(t)$ du vin est supposée uniforme, mais dépend lentement du temps ; celle du verre, en revanche, est fonction de r (distance à l'axe des coordonnées cylindriques) et le régime est quasi stationnaire. On note T_S la température en surface extérieure de la bouteille.

Données : conductivité du verre $\lambda = 0,78 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$, coefficient convectif $h = 10 \text{ W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$, capacité thermique massique du vin $c = 4 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

1. Vérifier que le volume V de vin dans la bouteille est cohérent.

On cherche dans ces deux questions à décrire le flux thermique $\mathcal{P}_{\text{th}}$ qui traverse la bouteille .

2. Montrer qu'en régime quasi-stationnaire, $\mathcal{P}_{\text{th}}$ ne varie pas.
3. Déterminer le profil de température $T(r)$ et en déduire la résistance de conduction R_V . Application numérique.

Un phénomène de convection naturelle existe à la surface extérieure de la bouteille, satisfaisant la loi de NEWTON.

4. Exprimer la résistance thermique de convection R_C de la surface latérale de la bouteille en fonction des seules données. Application numérique.
5. En déduire la résistance totale. Commenter.
6. Écrire le bilan énergétique du vin entre deux instants infiniment voisins t et $t + dt$ en notant $C = mc$ la capacité thermique totale du vin. En déduire une équation différentielle vérifiée par $T(t)$. Il y apparaît une constante de temps τ ; quelle est sa signification et sa valeur numérique ?
7. Résoudre cette équation avec la condition initiale proposée. Indiquer l'allure du graphe $T(t)$. Donner le schéma électrique équivalent en pensant à indiquer T , T_S et T_A .
8. Calculer le temps nécessaire pour que le vin atteigne sa température optimale de dégustation $T_d = 16^\circ\text{C}$. Quelle est à cet instant la température de surface T_S de la bouteille ? Commentaire.