BLAISE PASCAL
PT 2021-2022

TD 15 – Thermodynamique

Conduction thermique

Difficulté d'analyse et compréhension, initiative requise ;
Difficulté technique et calculatoire ;
Exercice important.

Flasher ce code pour accéder aux corrigés

Questions de cours

Seuls les étudiants du groupe de TD PT⋆ seront interrogés en colle sur les questions marquées d'une étoile, car elles sont plus techniques et/ou moins essentielles ... mais tous les étudiants sont bien sûr invités à les travailler !

15.1 - Considérons une plaque plane d'épaisseur e, section S, faite dans un matériau de conductivité thermique λ, en régime permanent. Montrer que le flux thermique ϕ traversant une section droite de la plaque est indépendant de son abscisse x.

> ***Méthode attendue :*** *ou bien bilan d'enthalpie pour une tranche située entre x et $x + dx$*
>
> $$dH \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} \phi(x)\,dt - \phi(x+dx)\,dt \underset{\substack{\uparrow \\ \text{RP}}}{=} 0 \qquad \text{d'où} \qquad \frac{\mathrm{d}\phi}{\mathrm{d}x} = 0\,,$$
>
> *ou bien pour un système macroscopique compris entre x_1 et x_2 quelconques*
>
> $$dH \underset{\substack{\uparrow \\ \text{1er P}}}{=} \phi(x_1)\,dt - \phi(x_2)\,dt \underset{\substack{\uparrow \\ \text{RP}}}{=} 0 \qquad \text{d'où} \qquad \phi(x_1) = \phi(x_2)\,,$$

15.2 - Établir le profil de température en régime permanent $T(x)$ dans une plaque plane d'épaisseur e, section S, faite dans un matériau de conductivité thermique λ.

> *La méthode utilisée (conservation du flux ou double intégration de l'équation de la chaleur) est laissée au choix de l'étudiant.*

15.3 - Établir l'expression de la résistance thermique d'une plaque plane d'épaisseur e, section S, faite dans un matériau de conductivité thermique λ.

15.4 - Établir l'équation de la chaleur à une dimension cartésienne.

15.5 - Considérons une plaque plane d'épaisseur e, faite d'un matériau de diffusivité D et soumise à « un échelon » de température ΔT. Au choix de l'interrogateur, exprimer ou bien la durée τ caractéristique du régime transitoire ou bien exprimer l'abscisse x à laquelle avance le front de diffusion au bout d'un temps t, en raisonnant par analyse dimensionnelle. Commenter les résultats.

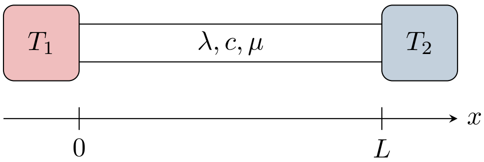
> ***Commentaires attendus :***
> - *les résultats sont indépendants de ΔT ;*
> - *différence fondamentale entre un phénomène diffusif et un phénomène ondulatoire pour lequel on aurait $x = ct$.*

Refaire le cours

Exercice 1 : Deux thermostats reliés par une barre

oral banque PT | 1 | 1 |

- *Équation de la chaleur ;*
- *Résistance thermique ;*
- *Transitoire thermique ;*
- *Temps caractéristique de diffusion.*



Considérons deux solides assimilés à des thermostats de températures respectives T_1 et T_2, reliés par une barre cylindrique de rayon a et longueur L, faite d'un matériau de conductivité thermique λ, capacité thermique massique c et masse volumique μ. L'ensemble est calorifugé.

1 - Établir l'équation de la diffusion thermique (équation de la chaleur) dans la barre.

2 - Établir l'expression de la résistance thermique de la barre.

3 - On suppose maintenant que la température T_2 n'est pas constante. Établir l'équation différentielle vérifiée par $T_2(t)$ en hypothèse quasi-statique. Exhiber un temps caractéristique τ.

4 - Donner ou établir un temps τ_{diff} caractéristique de la diffusion thermique dans la barre.

5 - Que doivent vérifier τ et τ_{diff} dans l'hypothèse quasi-statique ? En déduire des conditions sur les paramètres. Interpréter.

Résistances thermiques

Exercice 2 : Plancher chauffant

2 | 2

- *Loi de Newton ;*
- *Association de résistances thermiques.*

Un plancher chauffant est un système de chauffage des bâtiments par le sol dans lequel l'énergie de chauffage est transmise au plancher via un réseau hydraulique circulant sous le plancher (des systèmes de chauffage électrique existent également). Dans les constructions modernes, bien isolées, la température de l'eau peut être relativement basse, entre 21 et 24 °C, ce qui rend le plancher chauffant particulièrement adapté aux chauffages écologiques de nouvelle génération comme la géothermie et le chauffage solaire. Cet exercice a pour but d'étudier l'installation schématisée figure 1, destinée à chauffer une salle de vie de $40\,\mathrm{m}^2$ au sol. Pour simplifier, le réseau hydraulique est modélisé par une couche de température uniforme.

On suppose un contact thermique parfait entre les différents matériaux de la construction. En revanche, les transferts thermiques entre le carrelage et l'air de la pièce sont décrits par la loi de Newton :

$$\vec{j}_{5\to 6} = h(T_{56} - T_6)\vec{u}$$

avec $h = 10\,\mathrm{W\cdot K^{-1}\cdot m^{-2}}$ le coefficient d'échange conducto-convectif, T_{56} la température de surface du carrelage, T_6 celle de l'air de la pièce et $\vec{u}$ un vecteur unitaire dirigé du carrelage vers l'air.

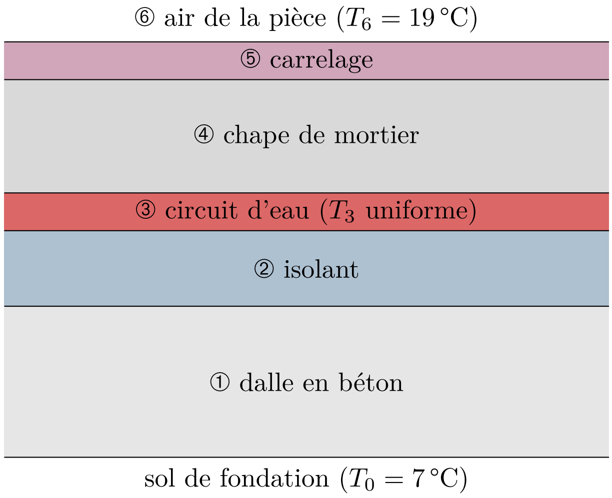
1 - Montrer que la loi de Newton se traduit par une résistance thermique d'interface R_{56}, dont on établira l'expression en fonction de h et S.

2 - Donner le schéma électrique équivalent de l'installation. En déduire la résistance thermique totale R_{36} entre la « couche » d'eau et l'air de la pièce. La calculer numériquement.

Dans une région au climat est assez doux (comme la Normandie !), une pièce de $40\,\mathrm{m}^2$ bien isolée nécessite en hiver une puissance de chauffe de l'ordre de [1] 1 kW, alors qu'une maison mal isolée consomme quatre fois plus.

3 - En déduire la température T_3 à laquelle se trouve l'eau du circuit de chauffage pour chauffer la maison bien isolée.

1. Source : `https://particuliers.engie.fr/`



Matériau	Conductivité λ ($\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$)	Épaisseur e (cm)
⑤ Carrelage	1,3	1
④ Mortier	1,1	3
③ Circuit d'eau	/	/
② Isolant	0,02	2
① Béton	1,4	10

Figure 1 – Description de la construction étudiée.

4 - Les normes d'installation d'un plancher chauffant imposent que la température de surface du carrelage T_{56} n'excède pas 28 °C, ce qui correspond à la température de la plante des pieds. Quelle puissance maximale l'installation peut-elle fournir à l'habitation ? Commenter.

5 - Bien qu'une couche isolante soit placée sous les tuyaux de chauffage, une partie de l'énergie fournie par le plancher chauffant est perdue car cédée aux fondations. Proposer une définition du rendement du plancher chauffant et le calculer.

6 - Le choix du revêtement de sol est essentiel pour une bonne efficacité du plancher chauffant. En particulier, il est déconseillé d'utiliser un parquet en bois (conductivité de l'ordre de $0{,}2\,\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$). Proposer une explication.

Exercice 3 : Chauffage d'un studio 2 | 2

▷ *Résistances thermiques.*

Le but de l'exercice est de dimensionner le système de chauffage d'un studio dont le plan est représenté figure 2. Le studio possède une hauteur sous plafond $H = 2{,}5\,\mathrm{m}$, il est entouré de quatre appartements voisins (à sa droite, gauche, au dessus et en dessous), chauffés à la même température T_s que le studio. Il donne sur une rue à température T_r, et s'ouvre sur un couloir à la température T_c.

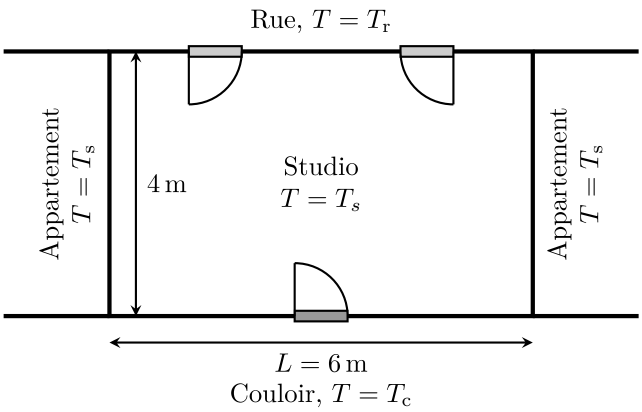


Figure 2 – Plan du studio.

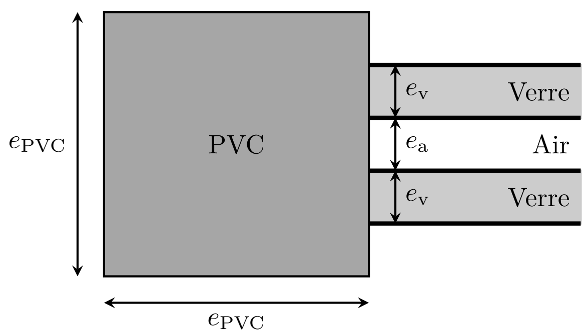


Figure 3 – Coupe horizontale d'une fenêtre.

Les murs sont tous constitués d'une même épaisseur e_b de béton, isolés par la même épaisseur e_i de laine de verre. La porte d'entrée est en bois, de dimensions $h \times l \times e$, et le mur donnant sur la rue est agrémenté de deux fenêtres en double vitrage à monture en PVC, dont le schéma est donné figure 3. Chaque fenêtre a pour dimensions $h_f \times \dfrac{l_f}{2} \times e_f$.

Les applications numériques pouvant être un peu fastidieuses, elles gagneront à être réalisées sous forme d'un fichier Python, définissant une variable pour chaque paramètre et chaque grandeur calculée.

1 - Chaque mur en béton est isolé par de la laine de verre. Calculer la conductance thermique surfacique U du mur isolé, c'est-à-dire l'inverse de la résistance thermique présentée par un mètre carré de mur. Ce coefficient U est couramment utilisé dans le domaine de l'habitat où il est nommé « coefficient de performance thermique ».

2 - Calculer la valeur de la résistance R_{mp} équivalente au système mur+porte donnant sur le couloir.

3 - Calculer la valeur de la résistance R_{fen} équivalente aux fenêtres, puis celle R_{mf} du système mur+fenêtres.

4 - Que vaut le flux reçu par le studio de la part des appartements voisins ?

5 - Calculer la puissance nécessaire pour maintenir le studio à la température voulue.

6 - Pour un studio de ces dimensions situé en Seine-Maritime, le site internet d'une grande chaîne de magasins de bricolage[2] recommande un radiateur de puissance 2900 W. Comment expliquer la différence ?

Données :

- ▷ Températures : $T_{\mathrm{s}} = 20\,°\mathrm{C}$; $T_{\mathrm{r}} = 0\,°\mathrm{C}$; $T_{\mathrm{c}} = 15\,°\mathrm{C}$.
- ▷ Épaisseur du béton $e_{\mathrm{b}} = 15\,\mathrm{cm}$, de la laine de verre : $e_{\mathrm{i}} = 5\,\mathrm{cm}$.
- ▷ Dimensions de la porte : $h = 215\,\mathrm{cm}$, $l = 90\,\mathrm{cm}$ et $e = 5\,\mathrm{cm}$.
- ▷ Dimensions extérieures des fenêtres : $h_f = 115\,\mathrm{cm}$, $l_f = 200\,\mathrm{cm}$ et $e_{\mathrm{a}} = e_{\mathrm{v}} = 5\,\mathrm{mm}$. La vitre est maintenue par un montant en PVC d'épaisseur $e_{\mathrm{PVC}} = 5\,\mathrm{cm}$.
- ▷ Conductivités thermiques, en $\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$:

Matériaux	Conductivité thermique
Bois	0,15
PVC	0,17
Béton	0,92
Laine de verre	0,03
Verre	1,2
Air	$2{,}6 \cdot 10^{-2}$

Exercice 4 : Igloo

oral banque PT | 2 | 2

- ▷ *Résistance thermique ;*
- ▷ *Coordonnées sphériques.*

Quatre explorateurs sur la banquise construisent un igloo de rayon R pour s'abriter du froid. Les murs sont d'épaisseur $e = 50\,\mathrm{cm}$ et chaque explorateur dégage une puissance de 50 W. L'igloo est fait de neige tassée de conductivité thermique $0{,}5\,\mathrm{W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}}$.

1 - Montrer que le flux sortant d'une demi-sphère de rayon $R \leq r \leq R + e$ ne dépend pas de son rayon.

2 - En déduire la résistance thermique de l'igloo.

3 - Les explorateurs ont-ils intérêt à construire un igloo de grande ou petite taille ?

4 - L'igloo a un rayon intérieur de 1 m et la température externe est de $-10\,°\mathrm{C}$. Déterminer la température interne en régime permanent.

Bilans mésoscopiques

Exercice 5 : Conductivité thermique dépendant de la température

oral PT | 1 | 2

- ▷ *Bilan mésoscopique ;*
- ▷ *Coordonnées cartésiennes.*

On étudie la conduction thermique dans une barre cylindrique de longueur $L = 20\,\mathrm{cm}$ dont les parois latérales sont calorifugées. Cette barre est faite d'un matériau dont la conductivité thermique dépend de la température selon la relation $\lambda = K/T$, avec $K > 0$ une constante.

1 - Par un bilan enthalpique, déterminer la forme mathématique de $T(x)$ en régime stationnaire.

2 - On donne $T(0) = T_0 = 300\,\mathrm{K}$ et $T(L) = T_1 = 350\,\mathrm{K}$. Déterminer complètement $T(x)$ et la représenter.

3 - Étudier la puissance thermique transmise en $x = 0$ et $x = L$.

2. Verts et blancs, pour ne pas les nommer ☺

Exercice 6 : Ailette de refroidissement 2 | 2 |

▷ *Bilan mésoscopique ;*
▷ *Transfert thermique conducto-convectif ;*
▷ *Coordonnées cartésiennes.*

Pour améliorer le refroidissement de circuits électroniques ou de moteurs, on y ajoute des ailettes de refroidissement en nombre et forme variés afin d'évacuer de la chaleur vers l'air ambiant par transfert conducto-convectif.

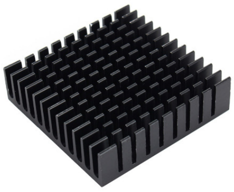


Figure 4 – Ailettes de refroidissement d'un processeur.

Figure 5 – Schéma de l'ailette étudiée.

On étudie ici une ailette parallélépipédique, de longueur L dans la direction x et de côtés a et b dans les directions y et z, faite d'un matériau de conductivité thermique λ. Cette ailette est accolée au composant à refroidir, de température T_c, et placée dans l'air de température supposée uniforme T_0. Les échanges entre l'ailette et l'air sont modélisés par la loi de Newton : le flux $d\varphi$ cédé à l'air par un élément de surface dS de l'ailette situé à l'abscisse x s'écrit

$$d\varphi(x) = h(T(x) - T_0)\, dS\,.$$

Hypothèses de travail :

▷ le régime est stationnaire ;
▷ la température est uniforme sur une section donnée de l'ailette ;
▷ l'ailette est en contact thermique parfait avec le matériau à refroidir ;
▷ la longueur de l'ailette est assimilée à une longueur infinie.

1 - Montrer que la température vérifie l'équation différentielle

$$\frac{d^2T}{dx^2} - \frac{1}{\delta^2}T = -\frac{1}{\delta^2}T_0\,,$$

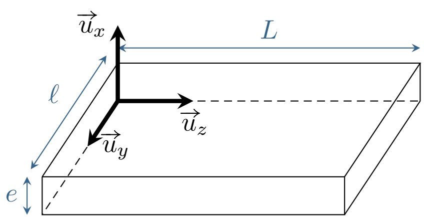
avec δ à exprimer en fonction des données. Préciser ce que signifie l'hypothèse d'ailette infinie.

2 - Résoudre cette équation différentielle.

3 - Calculer la puissance thermique totale dissipée par l'ailette.

4 - On observe sur la figure 4 plusieurs ailettes montées les unes à côté des autres. Quel en est l'intérêt par rapport à une seule ailette de plus grandes dimensions ? On pourra comparer la puissance dissipée par N^2 ailettes de dimensions latérales $a \times b$ à celui d'une unique ailette plus grande, de dimensions $Na \times Nb$.

Exercice 7 : Profil de température dans une plaque conductrice oral banque PT | 2 | 2



On étudie une plaque d'épaisseur e très inférieure à sa longueur L et sa largeur ℓ. Elle est faite dans un métal de conductivité électrique σ et de conductivité thermique λ. Un courant de densité uniforme $\vec{j} = J_0 \vec{u}_z$ parcourt la plaque.

1 - Quelle est l'intensité du courant qui traverse la plaque ? Quelle puissance volumique est transmise à la plaque ?

On modélise les transferts thermiques avec l'air par la loi de Newton : en valeur absolue, la plaque échange avec l'air une puissance surfacique

$$P_N = h\,|T_0 - T_{air}|\,,$$

avec T_0 la température de surface de la plaque.

2 - Déterminer T_0 en régime stationnaire.

3 - Montrer que la température vérifie l'équation

$$\frac{\mathrm{d}^2 T}{\mathrm{d}x^2} = -\frac{{J_0}^2}{2\lambda\sigma} \,.$$

La résolution de cette équation, non demandée, donne une loi de température

$$T(x) = \frac{{J_0}^2}{2\lambda\sigma} x(e-x) + \frac{{J_0}^2 e}{2h\sigma} + T_{\text{air}} \,.$$

4 - Commenter qualitativement l'expression. Représenter le profil de température pour x allant de $-e$ à $2e$.

5 - Exprimer la puissance thermique qui traverse une section de normale $\vec{u}_x$.

Bilans thermiques divers et variés

Exercice 8 : Bilan thermique d'un astéroïde — oral banque PT | 2 | 2

- *Régime permanent ;*
- *Source thermique ;*
- *Coordonnées sphériques.*

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 $\mathrm{d}t$, chaque élément de volume $\mathrm{d}\tau$ de l'astéroïde reçoit une énergie $\mathcal{P}\,\mathrm{d}\tau\,\mathrm{d}t$, $\mathcal{P}$ étant une constante. On raisonne sur une sphère de rayon $r < R$, indéformable et au repos.

1 - De quelles variables dépend la température dans l'astéroïde ?

2 - Calculer la chaleur cédée par 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 - Énoncer le premier principe de la thermodynamique. En déduire une relation entre ces deux chaleurs.

5 - Exprimer $T(r)$ en fonction de λ, $\mathcal{P}$, r et T_0 la température au centre de l'astéroïde.

L'astéroïde émet à sa surface par rayonnement une puissance surfacique $\mathcal{P}_{\text{ray}} = \sigma {T_{\text{s}}}^4$, avec σ une constante 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 $\mathcal{P}$.

Exercice 9 : Gel d'un lac — oral Centrale PSI | 3 | 2

- *Résistance thermique ;*
- *Changement d'état.*

On étudie la formation d'une couche de glace à la surface d'un lac. La température de l'air en surface est $T_{\text{s}} = -10\,°\text{C}$ alors que l'eau liquide du lac est à température de fusion T_{f}. On note $e(t)$ l'épaisseur de la couche de glace à l'instant t et on suppose que $e(t=0) = 0$.

1 - Exprimer la densité de courant thermique j_Q dans la couche de glace en régime stationnaire en fonction de e notamment.

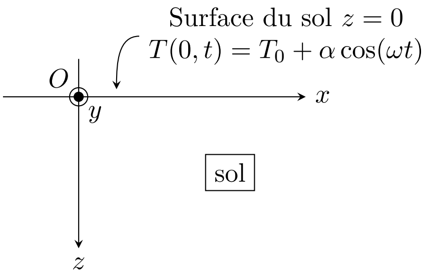
2 - On note $\mathrm{d}e$ l'épaisseur de glace formée entre t et $t + \mathrm{d}t$. Exprimer $\mathrm{d}e$ en fonction de j_Q, de l'enthalpie de fusion de la glace ℓ et de sa masse volumique μ. En déduire une équation différentielle vérifiée par $e(t)$.

3 - Résoudre cette équation et déterminer l'épaisseur formée au bout d'une journée, d'une semaine et d'un mois. Commenter.

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

Exercice 10 : Régime sinusoïdal, onde thermique — écrit CCP MP 2014 | 3 | 2

- ▷ *Régime sinusoïdal forcé ;*
- ▷ *Effet de peau.*



L'objet de cet exercice est d'étudier l'amortissement dans le sol des variations quotidiennes et annuelles de température, en vue de l'enfouissement d'une canalisation d'une installation géothermique.

On se place en repère cartésien. La surface du sol, supposée plane et d'extension infinie, coïncide avec le plan (Oxy). La température au niveau de cette surface, notée $T(0,t)$, varie sinusoïdalement en fonction du temps t avec la pulsation ω autour d'une moyenne T_0 : $T(0,t) = T_0 + \alpha\cos(\omega t)$, où α est une constante. Soit un point M dans le sol repéré par ses coordonnées (x,y,z) avec $z \geq 0$. On cherche à déterminer le champ de température en M, noté $T(M,t)$.

1 - Justifier que $T(M,t)$ ne dépend ni de x ni de y. On notera dans la suite $T(M,t) = T(z,t)$.

2 - Rappeler l'expression de la loi de Fourier relative à la conduction thermique, en rappelant les grandeurs intervenant dans cette loi. On notera λ la conductivité thermique du sol, supposée constante.

On travaille avec l'écart de température par rapport à T_0 en posant $\theta(z,t) = T(z,t) - T_0$. Tout autre phénomène que la conduction thermique est négligé. On donne, dans le cadre de notre modèle, l'équation de la chaleur :

$$\rho c \frac{\partial \theta}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 \theta}{\partial z^2}\,,$$

où ρ et c désignent respectivement la masse volumique et la capacité thermique massique du sol. Ces deux paramètres sont supposés constants.

On cherche à résoudre l'équation de la chaleur en régime sinuoïdal permanent. À cet effet, on introduit la variable complexe $\underline{\theta}(z,t) = f(z)\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}\omega t}$, avec $\mathrm{j}^2 = -1$ et $f(z)$ une fonction de z. L'inconnue $\theta(z,t)$ est alors donnée par $\theta(z,t) = \mathrm{Re}(\underline{\theta}(z,t))$ où Re désigne la partie réelle.

3 - Déterminer l'équation différentielle vérifiée par $f(z)$. On fera intervenir la diffusivité thermique du sol donnée par $D = \lambda/\rho c$.

4 - Exprimer la solution générale de cette équation, en faisant intervenir deux constantes d'intégration notées A et B. Par un argument physique à préciser, montrer que l'une de ces constantes est nulle.

5 - Montrer que $\underline{\theta}(z,t)$ se met sous la forme

$$\underline{\theta}(z,t) = \alpha\,\mathrm{e}^{-z/\delta}\,\mathrm{e}^{\mathrm{j}(\omega t - z/\delta)}\,,$$

où δ est une grandeur à exprimer en fonction de ω et D.

6 - Exprimer $T(z,t)$ à l'aide des paramètres T_0, δ, α, ω et des variables z et t. Interpréter physiquement l'expression obtenue. Interpréter physiquement le paramètre δ.

7 - Exprimer la profondeur L_{10} pour laquelle l'amplitude des variations de température dans le sol est atténuée d'un facteur 10 par rapport à celle de la surface du sol.

8 - On donne pour un sol humide $D = 0{,}25 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m^2 \cdot s^{-1}}$. Calculer numériquement L_{10} dans le cas de la variation quotidienne de température, puis dans celui de la variation annuelle de température. À quelle profondeur préconiseriez-vous d'enfouir la canalisation de l'installation géothermique ?

9 - Calculer littéralement puis numériquement le décalage temporel Δt entre $T(z = L_{10}, t)$ et $T(0,t)$ dans les deux cas de la question précédente.

10 - Le modèle développé vous paraît-il pertinent ? Quels phénomènes non pris en compte dans le modèle peuvent intervenir ? Répondre succinctement.

Exercice 11 : Combinaison de plongée — oral CCINP PSI | 3 | 2

▷ *Résolution de problème ;*
▷ *Transitoire thermique ;*
▷ *Résistance thermique.*

> *Cet exercice est un exercice ouvert, de type résolution de problème, demandant de l'initiative dans le raisonnement mené. Pour aborder un tel exercice, il peut notamment être utile de faire un schéma modèle, d'identifier et nommer les grandeurs pertinentes, d'utiliser l'analyse dimensionnelle, de proposer des hypothèses simplificatrices, de décomposer le problème en des sous-problèmes simples, etc. Le candidat peut également être amené à proposer des valeurs numériques raisonnables pour les grandeurs manquantes ... mais toutes les valeurs données ne sont pas forcément utiles. Le tout est évidemment à adapter à la situation proposée !*

Il y a risque d'hypothermie lorsque la température du corps passe en-dessous de 35 °C.

1 - Déterminer le temps au bout duquel il y a risque d'hypothermie pour un baigneur dans la Manche 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 : $c_{\text{corps}} = 3{,}5\,\mathrm{kJ\cdot K^{-1}\cdot kg^{-1}}$;
▷ résistance thermique de la peau : $R_{\text{peau}} = 3\cdot 10^{-2}\,\mathrm{K\cdot W^{-1}}$;
▷ conductivité thermique du néoprène : $\lambda_{\text{néo}} = 0{,}2\,\mathrm{W\cdot m^{-1}\cdot K^{-1}}$;
▷ puissance produite par le métabolisme : $P_{\text{corps}} = 100\,\mathrm{W}$;
▷ 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 $\alpha = 10\,\mathrm{W\cdot m^{-2}\cdot K^{-1}}$.