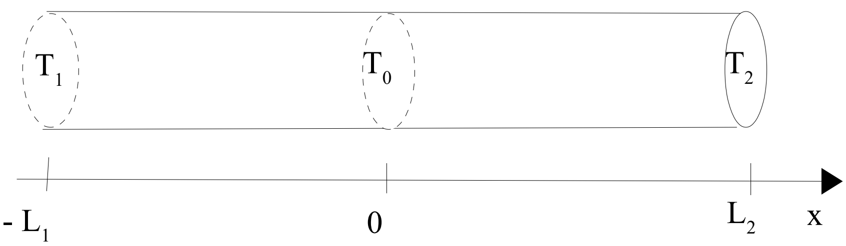
EXERCICES CONDUCTION THERMIQUE .

Exercice 1 : température d'interface

Deux barres cylindriques de même section sont placées bout à bout . Les parois latérales sont calorifugées. La première barre a pour longueur L_1 et pour conductivité thermique λ_1 ; la seconde a pour longueur L_2 et pour conductivité thermique λ_2 . Les deux extrémités sont maintenues aux températures $T_1\, et\, T_2$.



1- Exprimer la température T_0 au niveau de la jonction entre les deux matériaux en fonction de $T_1, T_2, \alpha_1=\frac{\lambda_1}{L_1}\, et\, \alpha_2=\frac{\lambda_2}{L_2}$.

2- Expliquer pourquoi l'acier semble toujours plus froid au toucher que le bois à température égale .

AN : $\lambda_{bois}=1\, W.m^{-1}.K^{-1}; \lambda_{main}=10\, W.m^{-1}.K^{-1}; \lambda_{acier}=100\, W.m^{-1}.K^{-1}$.

Exercice 2 : double vitrage

On ne considère que des régimes permanents .

L'intérieur d'une pièce de température T_i est séparée de l'extérieur de température T_e par une paroi vitrée de surface S , orthogonale à l'axe (Ox) , et dont le verre a une conductivité thermique K .

I- Dans un premier temps, on ne prend pas en compte les transferts de surface entre la vitre et l'air . Les températures des faces intérieure et extérieure de la vitre valent respectivement T_i et T_e.

1- La paroi est une vitre simple d'épaisseur e . Déterminer le flux thermique Φ_1 sortant de la pièce à travers cette paroi en fonction de K , S , e , T_i et T_e . Calculer la résistance thermique Rth de la paroi vitrée .

2- La paroi est un ensemble de deux vitres de même épaisseur e séparées par une épaisseur e' d'air de conductivité thermique K' . On ne tient compte que de la conduction .

   a- Déterminer le flux thermique Φ_2 sortant de la pièce , puis $\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$.

   b- A.N. : Te = 270 K ; Ti = 292 K ; e' = e = 3 mm ; K = 1,2 W.m^{-1}.K^{-1} ; K' = 0,025 W.m^{-1} .K^{-1} . Calculer $\frac{\Phi_2}{\Phi_1}$ et les températures T_1 et T_2 des faces en regard des deux vitres . Représenter graphiquement les variations de la température en fonction de x dans le double vitrage .

II- En plus de la conduction thermique étudiée ci-dessus , on doit tenir compte des échanges thermiques superficiels entre le verre et l'air . Une surface de verre d'aire S , à la température Ts , échange avec l'air , à la température T_f , le flux thermique : $\Phi = hS (Ts - T_f)$ avec h > 0

   a- Quelle valeur implicite donnait-on précédemment à h lorsqu'on confondait Ts et T_f ?

   b- Montrer que ces échanges superficiels introduisent une résistance thermique R_{cc} . Donner l'expression de R_{cc} .

   c- Soit he le coefficient d'échange entre le verre et l'air extérieur et hi celui relatif aux autres contacts verre-air . Les flux Φ_1 et Φ_2 des questions 1- et 2- deviennent respectivement Φ_1' et Φ_2' . Exprimer Φ_1' et Φ_2' en fonction Ti , Te , hi , he et des paramètres e , K , K' et S .

   A.N : hi = 10 W.m^{-2} .K^{-1} et he = 14 W.m^{-2} .K^{-1} .

   Calculer $\frac{\Phi_2'}{\Phi_1'}$. Conclusion ?.

Exercice 3 :bnac de Kofler

Un banc de Kofler permet de mesurer avec précision la température de fusion de cristaux solides en poudre. C'est une barre parallélépipédique horizontale de longueur L et de section a x b (avec b << a), constituée d'un matériau de conductivité thermique λ . A l'une des extrémités du banc est insérée une résistance électrique R .

Quand on branche le banc de Kofler, la résistance *R* est soumise a une tension U. On admet que la totalité de la puissance dégagée par effet Joule est transmise au banc.

Les échanges thermiques entre l'air et le banc sont modélisés par une puissance $P=h(T-T_a)S$ où T est la température du banc, Ta la température de l'air et S la surface d'échange. On considère la face inférieure isolée : le transfert thermique avec l'extérieur s'effectue à travers la face supérieure du banc. On applique une tension de valeur efficace U aux bornes de la résistance R .

1- Trouver l'équation différentielle vérifiée par la température du banc en régime stationnaire, en supposant le problème unidimensionnel. Donner la forme du profil de température.

2- A quelle condition sur *L* peut-on supposer le banc comme semi-infini.Montrer que dans le cadre de cette approximation le profil de température dans le banc est de la forme $T(x)=A+B e^{\frac{-x}{\delta}}$.

Exprimer A , B et δ en fonction des données du texte.

3- On saupoudre les cristaux à étudier dans le sens de la longueur L. Expliquer ce que l'on observe et comment on en déduit la température de fusion.

Justifier la nécessité d'un étalonnage et montrer que le choix de la résistance R caractérise la plage de température de fusion détectable.

Exercice 4:température du corps humain en plongée

Le but de cet exercice est de décrire les processus de transfert thermique entre le corps d'un plongeur sous marin et l'eau . On note $T_i(t)$ la température interne du plongeur à l'instant t , supposée uniforme et T_e la température de l'eau . On se place en régime quasi-stationnaire, dans ce cas, on peut utiliser la notion de résistance thermique .

L'ensemble { périphérie du corps humain + derme } est assimilée à une résistance thermique notée R_1 .

Le plongeur est équipé d'une combinaison en néoprène d'épaisseur e = 5 mm . Le contact thermique entre la peau du plongeur et l'intérieur de la combinaison est supposé parfait . Le néoprène est une mousse remplie de bulles de diazote . Un fois la combinaison gorgée d'eau , sa conductivité thermique est $\lambda=5{,}4.10^{-2}\,W.m^{-1}.K^{-1}$. On note R_{comb} la résistance thermique associée .

Les transferts thermiques entre la paroi externe de la combinaison et l'eau sont modélisés par la loi de Newton de coefficient conducto-convectif $h=2.10^{2}\,W.m^{-2}.K^{-1}$. On note Rcc la résistance thermique associée à ce transfert .

Les effets radiatifs (rayonnement de type infrarouge) de la paroi vers l'extérieur sont modélisés par la loi de Stefan (admise) donnant le flux radiatif global $\Phi^{rad}=\epsilon\sigma S(T_{paroi}^4-T_e^4)$ où S est l'aire de l'interface , $\sigma=5{,}7.10^{-8}\,SI$ est la constante de Stefan et $0<\epsilon<1$ le coefficient d'émissivité sans dimension traduisant l'efficacité des transferts radiatifs .

1- Déterminer l'unité de la constante de Stefan .

2- Montrer que si l'écart entre T_{paroi} et T_e est faible Φ^{rad} est approximativement proportionnel à $T_{paroi}-T_e$. Déterminer la constante de proportionnalité en fonction entre autres de T_e , on pourra poser $\alpha=\frac{T_{paroi}-T_e}{T_e}\ll 1$. Définir et donner l'expression de R_{rad} , résistance thermique associée au transport radiatif .

3- Exprimer Rcc en fonction de h et S .

4- Proposer le schéma électrique équivalent permettant de déterminer la résistance thermique totale R_{tot} entre l'intérieur du corps humain et l'eau . En déduire l'expression du flux thermique global Φ_{th} en fonction de $T_i(t)$, T_e et R_{tot} .
5- On cherche à simplifier l'expression de R_{tot} .
Montrer que le processus de transfert radiatif est négligeable dans le schéma précédent (il sera négligé par la suite) .
Estimer la valeur de R_{comb} , résistance thermique de la combinaison , en supposant une géométrie de type plane . Montrer que Rcc peut-être négligée .
6- Le corps humain dégage de l'énergie thermique grâce aux molécules d'ATP . On note P_A le puissance associée à cette production interne , C la capacité thermique massique du corps humain et M la masse du plongeur .
a- Etablir une équation différentielle permettant de déterminer la température T_i du plongeur en fonction du temps .
b- En supposant P_A constante au cours du temps , déterminer l'expression de la température $T_i(t)$ en fonction de $R_{tot}, T_e, P_A, C, M \; et \; T_i(0)$
c- L'état d'hypothermie est atteint lorsque la température du plongeur passe en dessous de $T_h = 35\,°C$. Sachant que $T_e = 15\,°C$, $P_A = 1{,}5.10^2 W$, $T_i(0) = 37\,°C$, $C = 4.10^3 J.kg^{-1}.K^{-1}$, $M = 70\,kg \; et \; R_1 = 8.10^{-2} K.W^{-1}$, S = 2 m² , déterminer le temps t_h au bout duquel l'hypothermie est atteinte . Comparer au temps obtenu sans combinaison .

Exercice 5 : Temps de cuisson d'un poulet dans un four
Soit T(M,t) le champ des températures dans une phase condensée, solide, idéale et homogène de masse volumique ρ de capacité thermique massique c, de conductivité thermique λ . Lorsque ce matériau appelé (P) est uniquement le siège d'un phénomène de conduction thermique, alors l'évolution spatio-temporelle de la température vérifie l'équation de la chaleur .
Si on chauffe la surface de (P) pendant une durée τ la conduction thermique modifie le champ initial des températures de (P) sur une distance caractéristique δ .
1- Rappeler l'équation de la chaleur . A l'aide de l'équation de la chaleur, en travaillant avec des ordres de grandeur des différents termes,montrer que $\tau = K_1 \delta^2$ où K_1 est une constante que l'on exprimera en fonction des constantes de l'énoncé.
2- Monsieur X sait qu'un poulet de 1 kg doit être cuit pendant 1 h pour un réglage donné de son four. En indiquant vos hypothèses, estimer le temps de cuisson nécessaire pour un poulet de 2 kg en conservant le même réglage du four.

Exercice 6: isolation d'une canalisation
Une canalisation cylindrique , rectiligne infinie contient de l'eau à la température Te . Elle est entourée d'une gaine isolante , l'ensemble se trouve dans l'air à la température To . La canalisation a un rayon intérieur r_1 , un rayon extérieur r_2 , une conductivité thermique λ_1 . La gaine isolante a un rayon extérieur r_3 , 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 et h_3 pour l'interface isolant-air .

1- Etablir l'expression la résistance thermique par unité de longueur du tuyau Rth_1 et celle de la gaine Rth_2 . Montrer que l'on peut définir de la même façon une résistance thermique à chaque interface et les exprimer en fonction des rayons et des coefficients d'échange .
2- Montrer que la puissance thermique perdue par l'eau passe par un maximum pour une valeur particulière de r_3 . Commenter . Comment a-t'on intérêt à choisir r_3 ?
3- Une longueur L de la canalisation précédente contient de l'eau chaude au repos de température initiale Teo > To . Cette eau refroidit en gardant une température uniforme Te (t) . Elle a une masse volumique μe et une capacité thermique massique ce . On appelle Rth la résistance thermique de la longueur L de canalisation . Ecrire et intégrer l'équation différentielle vérifiée par Te (t) dans le cas du régime quasi stationnaire .

Exercice 7 :répartition de température dans un fil électrique .
On considère un fil électrique dont l'âme est un cylindre de rayon r1 et de longueur H . Cette âme est formée de cuivre dont la conductivité électrique est γ et la conductivité thermique K . Elle est parcourue par un courant d'intensité I = 10 A .
Ce conducteur est entouré d'une gaine cylindrique coaxiale , de rayon r2 , considérée comme un isolant électrique parfait et dont la conductivité thermique est λ . La surface extérieure de cette gaine est maintenue à la température constante T2 .

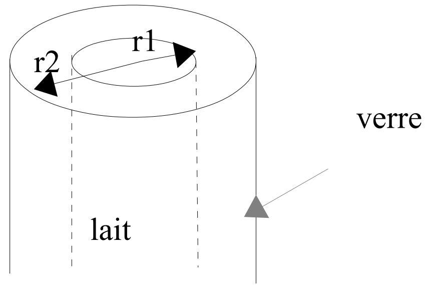
On cherche à déterminer la température dans l'âme du fil et dans sa gaine en régime permanent ; le fil est supposé suffisamment long pour que cette température de dépende que de la distance r du point à l'axe .

La puissance volumique dissipée par effet Joule dans l'âme du fil électrique est $p=\frac{1}{\gamma}\frac{I^2}{(\pi r_1{}^2)^2}$

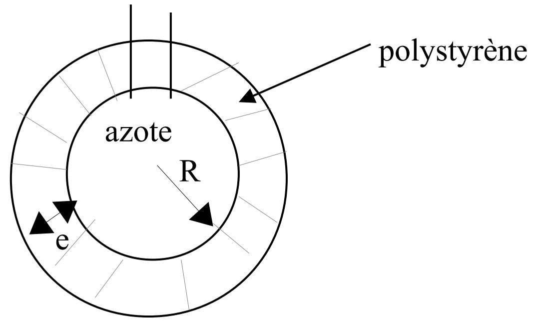
1- Exprimer la puissance totale dissipée par effet Joule dans le conducteur .
2- Donner deux expressions du vecteur densité de flux de chaleur $\vec{j}_q$ dans la gaine ; on exprimera son module en fonction de I , γ , r1 et r , puis en fonction de λ et de T . En déduire la température dans la gaine .
3-
 a- Déterminer la puissance P (r) dissipée par effet Joule dans le cylindre de rayon r < r1 et de longueur H .
 b- En déduire la densité de flux thermique dans l'âme du fil et tracer le graphe de jq (r) pour 0 < r <r2 .
 c- Déterminer la loi de variation de la température et tracer le graphe de T (r) pour 0 < r < r2 . Préciser la température To sur l'axe .

Application numérique :
Ame : r1 = 0,5 mm γ = 5,8.10^7 S.m-1 K = 390 W.m-1.K-1
Gaine : r2 = 1 mm λ = 0,2 W.m-1.K-1 T2 = 293 K .

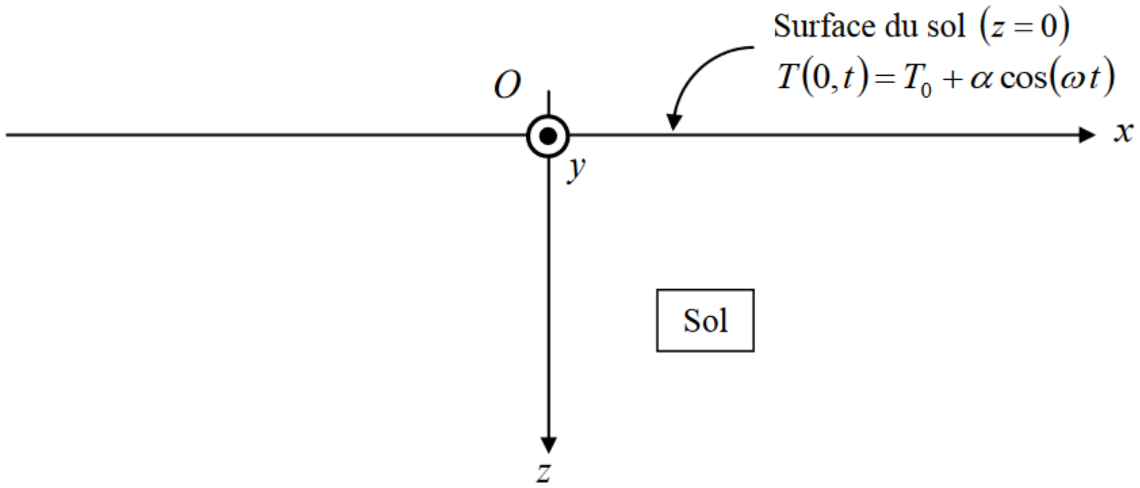
<u>Exercice 8:</u> chauffage d'un biberon au micro onde
On place un biberon rempli de lait dans un four à micro ondes . On donne les capacités thermiques massiques c_l et c_v du lait et du verre, les masses volumiques μ_l et μ_v du lait et du verre . La puissance volumique fournie par le four est uniforme et notée P (le verre n'absorbe aucune fraction de cette puissance) .
1- Ecrire les équations vérifiées par T(r , t) dans le lait et dans le verre .
2- Calculer la répartition de température en régime permanent dans le biberon sachant que T(r1) = Ts .
3- Quel conseil donner à un parent qui utilise le micro onde pour chauffer le biberon .



<u>Exercice 9:</u>récipient à azote liquide
Un récipient isotherme en forme de ballon sphérique de rayon R = 10 cm sert de récipient pour stocker de l'azote liquide . Il est entouré d'une couche de polystyrène d'épaisseur e = 5 cm et de conductivité thermique λ = 0,035 W.m^{-1} .K^{-1} . La température de l'azote est Ta = 77 K et la température extérieure vaut Te = 300 K .
La surface extérieure de la couche est à la température Ts et reçoit de la part de l'air extérieur un flux thermique par unité de surface donné par la loi de Newton jc = h (Te – Ts) où h = 10 W.m^{-2} .K $^{-1}$.
Le récipient est ouvert sur l'extérieur par l'intermédiaire d'un tube de décompression très étroit . La masse volumique de l'azote liquide est ρ = 808 kg.m^{-3} .
1- Déterminer l'équation vérifiée par la température T(r,t) dans l'enveloppe de polystyrène (on introduira les notations manquantes)
2-Déterminer la répartition de température en régime permanent dans l'enveloppe de polystyrène .
3- Déterminer le flux thermique sortant de l'enveloppe en fonction de Te – Ta .
Exprimer la masse d'azote qui s'évapore par unité de temps (on note Lv la chaleur latente massique de vaporisation de l'azote à 77 K) .
AN : Lv = 200 J.g-1 .



Exercice 10: onde thermique (d'après CCP MP 2014)
On se propose d'étudier l'amortissement dans le sol des variations quotidiennes et annuelles de température, en vu 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 w autour d'une moyenne T_0 : $T(0,t)=T_0+\alpha\cos(wt)$, 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 $T(M,t)$ de dépende ni de x et ni de y . On notera par la suite : $T(M,t)=T(z,t)$.

2- Donner 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 . Citer une loi physique analogue à la loi de Fourier .

3- On désigne par ρ et c respectivement la masse volumique et la capacité thermique massique du sol . Etablir l'équation de la chaleur .

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 cherche la solutions de l'équation de la chaleur en régime sinusoïdal permanent . A cet effet, on introduit la variable complexe $\underline{\theta}(Z,t)=f(z)e^{jwt}$, avec $j^2=-1$ et $f(z)$ une fonction de z . L'inconnue $\theta(z,t)$ est alors donnée par $\theta(z,t)=\Re(\underline{\theta}(z,t))$.

4- Déterminer l'équation différentielle verifiée par $f(z)$. On fera intervenir la diffusivité thermique du sol donnée par $D=\dfrac{\lambda}{\rho c}$.
5- 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 .

6- Montrer que $\underline{\theta}(z,t)$ peut se mettre sous la forme $\underline{\theta}(z,t)=\alpha e^{\frac{-z}{\delta}}e^{j(wt-\frac{z}{\delta})}$, où δ est une grandeur à exprimer en fonction de w et D .

7- Exprimer $T(z,t)$ à l'aide des paramètres : $T_{0,}\delta,\alpha,w$ et des variables z et t . Interpréter physiquement l'expression obtenue . Interpréter physiquement le paramètre δ .

8- 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 à la surface du sol .

9- On donne pour un sol humide : $D=0{,}257.10^{-6}m^2.s^{-1}$. Calculer numériquement L_{10} dans les deux cas suivants :
→ Cas 1 : variation quotidienne de température .
→ Cas 2 : variation annuelle de température .

A quelle profondeur préconisez vous d'enfouir la canalisation de l'installation géothermique ?

10- 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 .

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

Exercice11:échangeur thermique

Un échangeur de chaleur est modélisé par deux conduites parallélépipédiques de longueur L et de largeur *l* .

La conduite supérieure est parcourue par un « fluide chaud « dont la température T_2 (x) est supposée ne dépendre que de l'abscisse x le long de la conduite .

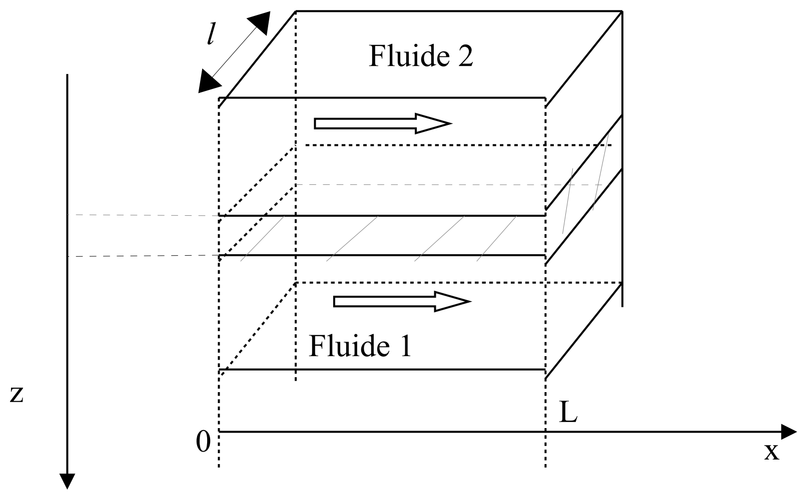
On note Dm_2 et cp_2 les débit et capacité thermique (à pression constante) massiques de ce fluide ces grandeurs sont des constantes du problème .

De même , circule dans la conduite inférieure un « fluide froid « dont les caractéristiques sont données par T_1 (x) , Dm_1 et cp_1 .

Les échanges thermiques entre les deux fluides s'effectue par l'intermédiaire d'une plaque d'épaisseur e constituée d'un matériau de conductivité thermique λ, on suppose que la diffusion dans la plaque se fait essentiellement dans la direction (Oz). Les coefficients de transfert aux interfaces plaque – fluide chaud et plaque – fluide froid sont notés h_2 et h_1 (on supposera qu'ils ne dépendent pas de x)

(On négligera tout effet de bord , toute variation d'énergie cinétique ainsi que les transferts par conduction propre à chaque fluide) .

1- Exprimer le flux thermique dΦ transféré du fluide chaud vers le fluide froid à travers un élément de plaque de largeur *l* et de longueur dx . On donnera le résultat en fonction de T_2 (x) – T_1 (x) . On posera h_{eq} tel que $\frac{1}{h_{eq}}=\frac{1}{h_1}+\frac{1}{h_2}+\frac{e}{\lambda}$.
2- Déterminer les répartitions des températures T_1 (x) et T_2 (x) , les températures à l'entrée de l'échangeur (x = 0) ayant les valeurs T_{10} et T_{20} .



Exercice 12:bilan entropique avec conduction

On considère un solide homogène, de masse volumique , de capacité thermique massique c, de conductivité thermique λ . On suppose qu'il n'y a pas de production d'énergie dans le matériau. La température locale ne dépend que de x et de t.

1. Établir rapidement l'équation aux dérivées partielles vérifiée par la température T(x, t).

2. Soit le cylindre situé entre les plans d'abscisses x et x + dx, de surface de base Σ .

a) Déterminer, en fonction de λ, T, $\partial T / \partial x$, $\partial^2 T / \partial x^2$, dx et dt, l'entropie échangée par ce cylindre entre t et t + dt.

b) Exprimer la variation d'entropie dS de ce même système entre t et t + dt. On pourra utiliser l'identité thermodynamique .

c) Effectuer le bilan entropique et exprimer l'entropie créée scr par unité de volume et de temps. Conclure.

Exercice 13: Croissance hivernale d'une épaisseur de glace (Mines MP 2019)
Pour étudier la croissance de la couche de glace en hiver, on modélise l'océan sous la banquise en formation de la manière suivante (cf. fig. 5) : en profondeur, la température de l'eau est maintenue constante à $T_1=4\,°C$ par les courants océaniques. Sur une hauteur constante e sous la banquise, l'eau se refroidit progressivement jusqu'à atteindre $T_0=0\,°C$ à l'altitude z=0 de formation de la glace (on néglige tout effet de salinité de l'eau). La couche de glace a une épaisseur croissante $z_g(t)$ qu'il s'agit de déterminer ; au-dessus de celle-ci , l'air est à la température constante $T_2=-40\,°C$. On notera $\lambda_e et \lambda_g$ les conductivités thermiques et $c_e et\, c_g$ les capacités thermiques massiques de l'eau liquide et de la glace, $\rho_g et\, l_f$ a masse volumique et l'enthalpie massique de fusion de la glace ; toutes ces grandeurs sont des constantes. L'épaisseur de glace $z_g(t)$ augmente régulièrement du fait de la cristallisation de l'eau refroidie à $T_0=0\,°C$ à la base de la couche de glace. Toutes les études pourront être faites pour un système défini par un cylindre vertical de surface S unité (cf. fig. 5) au sein duquel les transferts thermiques unidimensionnels sont régis par la loi de Fourier.

1- Par une étude des échanges thermiques de l'épaisseur δz prise à l'intérieur de la glace, établir une équation aux dérivées partielles vérifiée par la température $T_g(z,t)$ au sein de la glace.

2- Déterminer une expression donnant l'ordre de grandeur de la durée Δt de la diffusion au sein de la glace sur une hauteur Δz. Quelle durée doit on attendre afin de pouvoir considérer que, pour des évolutions assez lentes, la température T_g ne dépend pratiquement plus du temps ? Préciser ce que l'on entend par « assez lentes » .
On se place dans ce cas dans toute la suite : dans l'eau comme dans la glace, les répartitions de température seront supposées quasi–statiques.

3- Définir et exprimer les résistances thermiques $R_g et\, R_e$,pour une aire donnée S, des couches de glace et d'eau refroidie sous la glace.

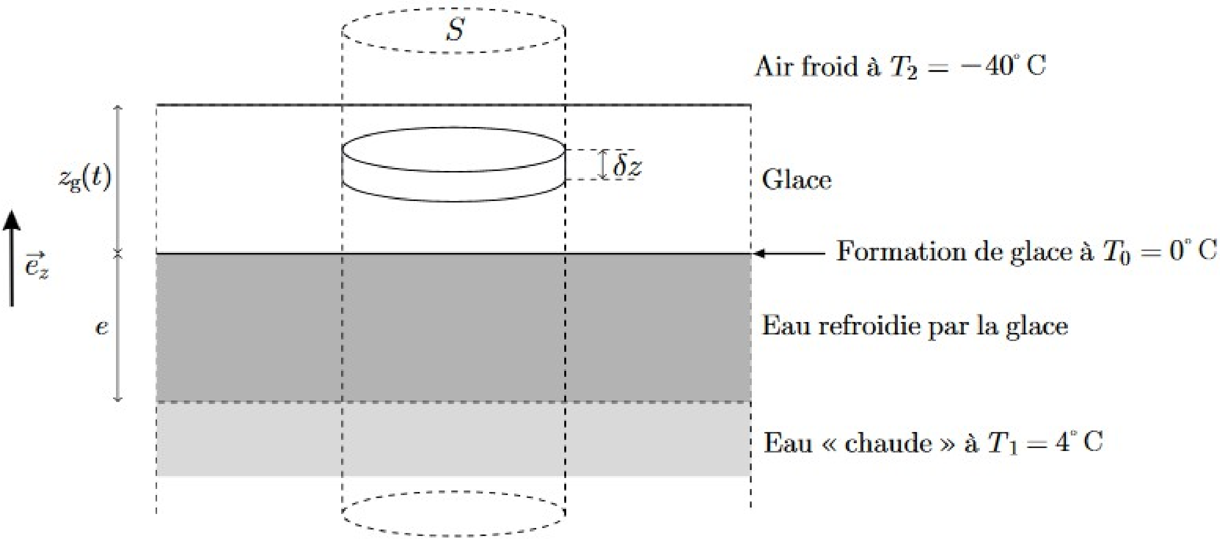


FIGURE 5 – L'océan sous la banquise en formation

Les transferts thermiques à travers la surface supérieure de la banquise sont décrits par la loi de Newton des transferts pariétaux (radiatifs et convecto–conductifs) : la puissance échangée par unité d'aire de cette surface vérifie $|P_u|=h|T_s-T_2|$ où Ts est la température au sommet de la couche de glace ; le coefficient h>0 de la loi de Newton est supposé connu et constant.
4- Exprimer la résistance thermique Ri, pour une aire S,de l'interface entre l'air et la glace.

5- Montrer que le régime quasi–permanent de croissance de la couche de glace peut être décrit par le schéma électrique équivalent de la figure 6 et préciser l'expression du « courant » Φ du générateur de courant en fonction notamment de l_f, ρ_g ,de la vitesse de croissance $v_g = \frac{dz_g}{dt}$ de la couche de glace .

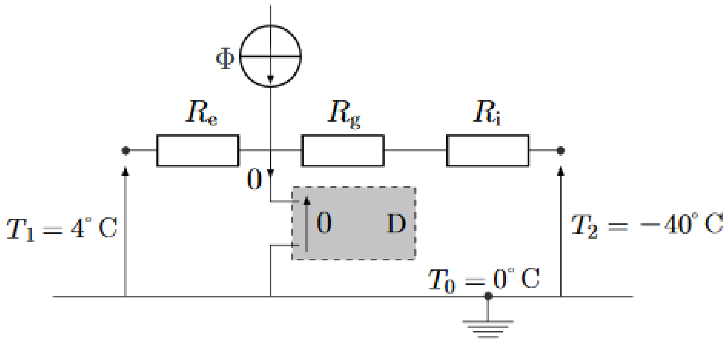


FIGURE 6 – Circuit électrique équivalent à la croissance de la couche de glace. Le dipole D représenté sur cette figure permet d'assurer une différence de potentiel nulle sans appel de courant dans cette branche du circuit.

6- Etablir l'équation différentielle vérifiée par $z_g(t)$. On suppose que pour toutes les valeurs de t considérées on a $\frac{e}{\lambda_e} \gg \frac{z_g}{\lambda_g} + \frac{1}{h}$,en déduire la loi d'évolution de l'épaisseur de la couche de glace sous la forme $\tau_g[l_g z_g(t) + z_g^2(t)] = l_g^2 t$ où on exprimera les grandeurs $\tau_g \, et \, l_g$ en fonction des paramètres du modèle. L'instant t=0 correspond au début de la formation de la banquise.

7- Tracer et commenter l'allure de la courbe donnant z_g en fonction de t. On montrera notamment l'existence de deux régimes successifs.