



Epreuve de Physique B - Thermodynamique

Durée 2 h

Si, au cours de l'épreuve, un candidat repère ce qui lui semble être une erreur d'énoncé, d'une part il le signale au chef de salle, d'autre part il le signale sur sa copie et poursuit sa composition en indiquant les raisons des initiatives qu'il est amené à prendre.

L'usage de calculatrices est interdit.

L'usage de tout ouvrage de référence et de tout document est interdit.

AVERTISSEMENT

La **présentation**, la lisibilité, l'orthographe, la qualité de la **rédaction**, la **clarté** et la **précision** des raisonnements entreront pour une **part importante** dans l'**appréciation des copies**. En particulier, les résultats non justifiés ne seront pas pris en compte. Les candidats sont invités à encadrer les résultats de leurs calculs.

De nombreuses parties sont indépendantes. Il est conseillé aux candidats de prendre connaissance rapidement de la totalité du texte du sujet.

Les candidats doivent respecter les notations de l'énoncé et préciser, dans chaque cas, la numérotation de la question posée.

Étude de géothermie domestique

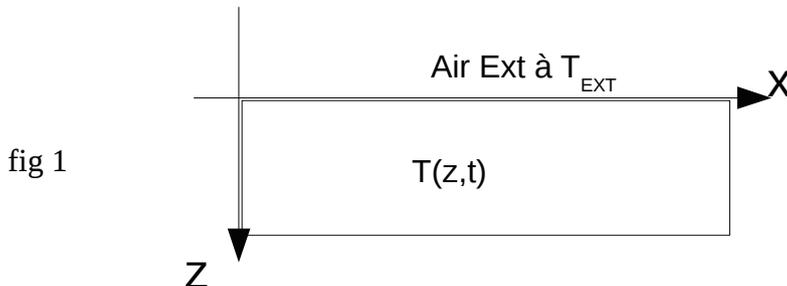
Les calculs numériques seront effectués à un ou deux chiffres significatifs à l'appréciation des candidats. Les trois parties sont indépendantes.

$$\begin{aligned}\ln(5) &= 1,6 \\ \sqrt{(1/0,3)} &= 1,8 \\ \ln(0,03) &= -3,5\end{aligned}$$

1. Études Préliminaires sur les ondes thermiques

Quelques données pour le sol:

$$\begin{aligned}\lambda &= 0,5 \quad \text{W.m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{conductivité thermique du sol} \\ \rho &= 1500 \quad \text{kg.m}^{-3} \quad \text{masse volumique du sol} \\ c &= 1000 \quad \text{J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \quad \text{capacité thermique massique du sol}\end{aligned}$$



1.1. En faisant un bilan sur une tranche, démontrer l'équation de diffusion thermique dans le sol ($z > 0$) vérifiée par la température $T(z,t)$ pour un flux thermique vertical: $\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ (fig1)

1.2. La température du sol est excitée par des variations périodiques de la température de l'air extérieur. On modélise la température au niveau de la surface par $T(0,t) = T_0 + a \cdot \cos(\omega t + \varphi)$. « a » représente l'amplitude de la variation de température à la surface du sol. On pourrait prendre les pulsation $\omega_A = 2\pi \text{ rad/an} \sim 2 \cdot 10^{-7} \text{ rad/s}$ et $\omega_J = 2\pi \text{ rad/jour} \sim 7 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$.

A quels phénomènes correspondent-elles ?

1.3. La variation de température se transmet de proche en proche. On prend une solution de la forme $T(z,t) = T_0 + \alpha \cdot e^{-\frac{z}{\delta}} \cos(\omega \cdot t + \varphi - \frac{z}{\delta})$. Montrer que $\delta = \sqrt{\frac{2\lambda}{\rho c \omega}}$

1.4. Que représente physiquement δ ?

1.5. Connaissez vous un autre phénomène physique où une quantité analogue à δ intervient ?

1.6. Calculer δ pour ω_J et ω_A . Commenter.

1.7. Donner en fonction de δ la profondeur pour que l'amplitude de la variation soit divisée par un facteur 5. Faire l'application numérique pour une pulsation de $\omega_A = 2,0 \cdot 10^{-7} \text{ rad.s}^{-1}$.

2. Dimensionnement d'un puits canadien

Dans cette partie on veut rénover un logement en y installant un puits canadien (ou puits provençal). Le logement fait une surface de 100 m² sous une hauteur moyenne de 2 m. Dans le logement à rénover, la ventilation se fait par l'apport d'air extérieur grâce aux ouvertures en haut des fenêtres et par l'expulsion de l'air intérieur par une ventilation mécanique contrôlée (V.M.C) (fig 2). On bouche les ouvertures pour les remplacer par un dispositif de puits canadien: l'air extérieur aspiré circule dans le sol avant d'entrer dans le logement (fig 3). On considère que le débit volumique D_v dans la V.M.C et le puits est constant et identique (pas de perte de charge), les rayons R des sections sont également identiques.

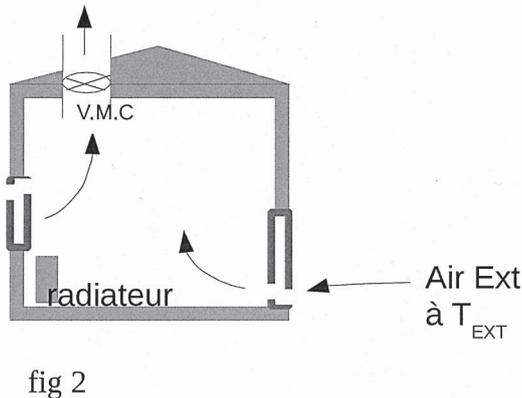


fig 2

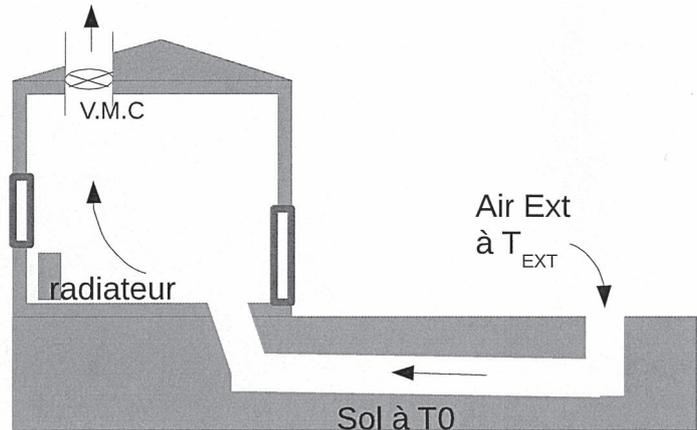


fig 3

On peut fixer les grandeurs R , L (la longueur du puits) et D_v indépendamment les unes des autres en dimensionnant l'installation lors de la conception. On évitera alors d'utiliser v la vitesse de l'air pulsé que l'on peut exprimer en fonction de ces grandeurs. L'objectif est de trouver la longueur, la profondeur et la section que doit avoir le puits.

Les lois physiques utilisées dans cette partie font intervenir des différences de températures: **toutes les températures notées T ou θ sont exprimées en degré Celsius.**

h : coefficient modélisant le transfert thermique de surface conducto-convectif entre le sol de température T_0 et l'air de température T en écoulement par la **loi de Newton** qui donne au signe près le flux surfacique d'échange: $\phi = h(T - T_0)$ en $W.m^{-2}$

On modélise h par l'expression ci-contre.
$$h = 1,18 \cdot \frac{D_v^{0,8}}{R^{1,8}} SI \text{ (SI pour Systeme International)}$$

$$D_v = 50 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$$

$$R = 50 \text{ mm}$$

$$\rho = 1,275 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \text{ masse volumique de l'air}$$

$$c_p = 1000 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} \text{ capacité thermique massique de l'air à pression constante.}$$

$$T_0 = 12^\circ\text{C} \text{ température du sol.}$$

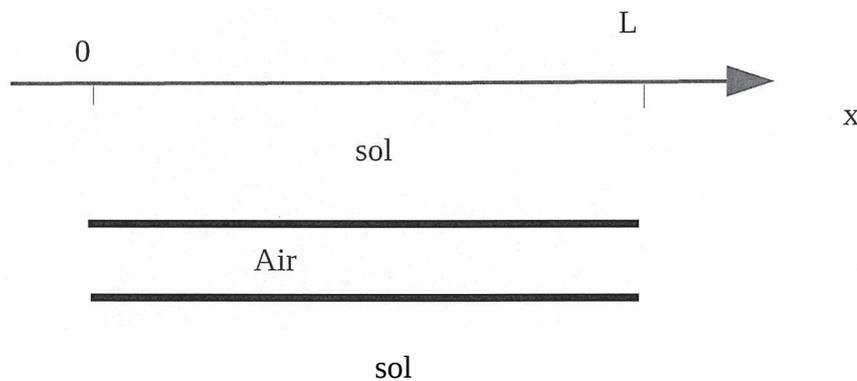
$$T_{EXT} = -4^\circ\text{C} \text{ température de l'air extérieur}$$

$$T_L = 19^\circ\text{C} \text{ température du logement}$$

2.1. Pourquoi doit-on renouveler l'air du logement ? Quel en est l'inconvénient ? Quelle est la durée nécessaire pour que l'air se renouvelle entièrement dans le logement ? A quoi sert le puits canadien ?

2.2. On veut maintenant dimensionner la longueur et le rayon du tuyau nécessaires au puits. Quelle température maximale peut on espérer à la sortie du puits s'il est suffisamment long ? Estimer alors la puissance gagnée P par rapport à un apport direct d'air extérieur dans la maison. Commenter.

Le tuyau est orienté par un axe x dans le sens de l'écoulement.



La température le long du tuyau souterrain est notée $T(x)$. On pose $\theta(x) = T(x) - T_0$

On prend un modèle simplifié pour la circulation de l'air dans le sol:

- Le régime est permanent
- Pas de perte de charge, la pression P est constante.
- La masse volumique de l'air est également supposée constante et uniforme.

2.3. En considérant une tranche d'air $x, x+dx$, établir l'équation différentielle en θ

et montrer que: $\theta(x) = \theta_i e^{-K \cdot x}$ avec $K = \frac{2\pi hR}{\rho D_v c_p}$

2.4. Pour dimensionner la longueur, on veut atteindre une température de sortie T_{FINALE} au moins égale à 96 % de la température Celsius maximale. On donne $K = 0,15 \text{ unité SI}$ Calculer cette longueur L .

2.5. Que peut on dire de l'effet du débit sur la longueur nécessaire à l'augmentation maximale de température ? On justifiera avec soin à l'aide des différents processus physiques mis en jeu.

2.6. Que peut on dire de l'effet du diamètre du tuyau sur la longueur nécessaire à l'augmentation maximale de température ? On justifiera avec soin à l'aide des différents processus physiques mis en jeu.

On choisit finalement un diamètre qui évite une perte de charge et on ne dimensionne donc pas totalement la section de la conduite en fonction de la contrainte thermique.

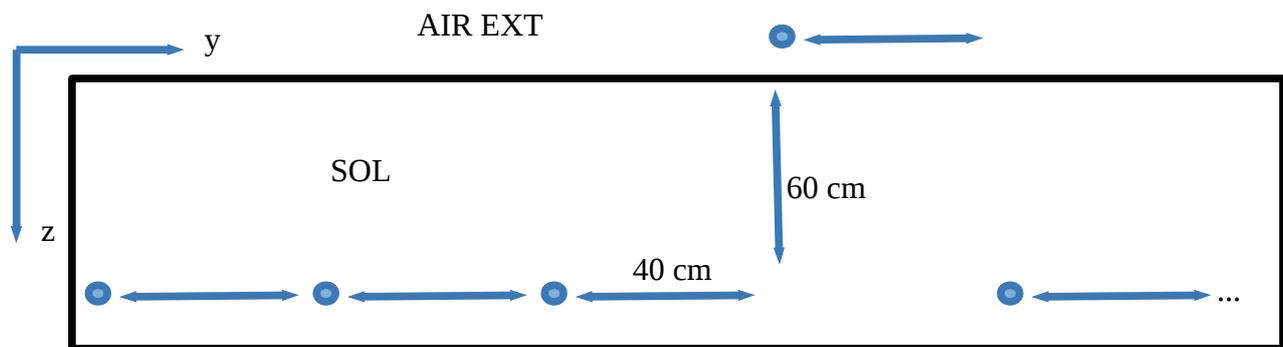
3. Remplacement d'un chauffage électrique par un chauffage géothermique horizontal

Dans cette étude on prendra un logement de surface 100 m² habitable assez bien isolée qui consomme une énergie annuelle de 7000 kWh en chauffage électrique. Le coût du kWh aujourd'hui est de 0,15E/kWh. Ce coût bas a favorisé une stratégie investissement en chauffage tout électrique dans beaucoup de logements des années 80. On suppose que le coût du kWh augmentera: le coût prend par exemple l'approvisionnement en uranium mais celui ci ne prend pas en compte le coût du démantèlement des centrales nucléaires et encore mal le coût du stockage des déchets. Les coûts réels de production ne sont pas aujourd'hui connus car les chiffrages des coûts de postproduction (démantèlement, stockage des déchets) et des installations nécessaires sont eux mêmes inconnus dans une large mesure.

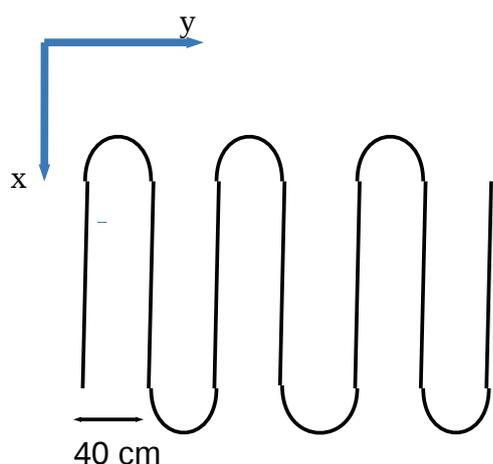
L'objectif de cette partie est donc de calculer le gain d'énergie en remplaçant un système de chauffage électrique par un chauffage géothermique.

On souhaite utiliser un système dit pompe à chaleur P.A.C « EAU/ EAU » : EAU avec glycol dans un circuit souterrain horizontal dit « circuit capteur » qui prend de l'énergie au sous-sol et EAU du circuit de chauffage. Le fluide utilisé dans la PAC est le R407C.

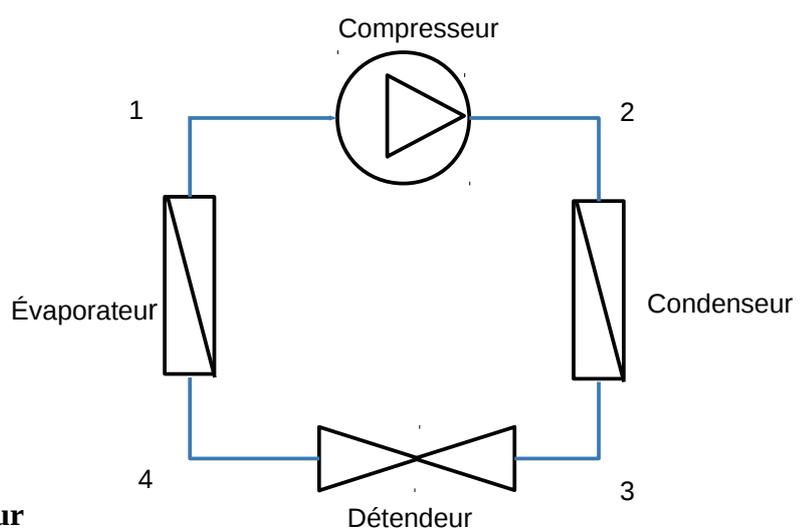
Le circuit « capteur » alimente 4 circuits enterrés, de 100 m de longueur chacun, situés à 60 cm de profondeur, les aller-retour de tuyaux sont espacés de 40 cm.



Coupe longitudinale dans le sol



Vue de dessus d'une partie du circuit capteur



Circuit du fluide réfrigérant R-407c

Description du cycle:

Les températures pour les mélanges diphasés du fluide dans les échangeurs isobares sont de 5°C pour l'un et 60°C pour l'autre.

Dans l'état (1) le fluide est sous forme de vapeur saturante à 6 bar puis est comprimé de manière adiabatique dans le compresseur pour atteindre une pression de 27 bar à une température de 70°C dans l'état (2). Le fluide est condensé de manière isobare et se retrouve sous forme de liquide saturant en (3). Le fluide se détend de manière isenthalpique jusqu'à une pression de 6 bar dans l'état diphasé (4). Il passe ensuite de manière isobare dans l'évaporateur pour se retrouver dans l'état (1).

Données sur les caractéristiques du fluide R407c:

Le fluide employé dans la P.A.C est un mélange de fluides frigorigènes appelé R407C.

Température d'ébullition : - 43,8°C (à 0.1013 MPa)

Température critique : 86,1°C , Pression critique : 4,63 MPa

Données thermodynamiques pour le R407C : (avec h: enthalpie massique)

T	P	h _{LIQUIDE}	h _{VAPEUR}
5°C	6 bar	210 kJ/kg	410 kJ/kg
60°C	27 bar	295 kJ/kg	425 kJ/kg
70°C	27 bar		435 kJ/kg

Données sur le système:	Autres Données:
<p>Puissance thermique maximale: 7000W Contenance de la PAC en R407c : 2 kg Débit du circuit de chauffage $D_v=0,20 \text{ L.s}^{-1}$ Débit total du circuit capteur $D_f=0,50 \text{ L.s}^{-1}$ Température circuit capteur $T_f = 5^\circ\text{C}$ Masse volumique de l'eau glycolée assimilée à celle de l'eau $\rho=1 \text{ kg.L}^{-1}$ Capacité thermique massique identique pour l'eau et le mélange eau glycol: $4 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ 4 tuyaux capteurs de 100 m de longueur</p>	<p>$S_{\text{Habitation}}= 100 \text{ m}^2$ $E_{\text{Chauffage}}=7000\text{kWh}$ annuelle Prix kWh=0,15 Euro</p>

- 3.1. Rappeler le principe d'une pompe à chaleur. On fera un schéma avec les sources en expliquant les transferts d'énergie.
- 3.2. A quel élément du circuit du liquide réfrigérant le circuit capteur doit il être en contact? Justifier.
- 3.3. En supposant un chauffage constant sur 6 mois (nuit et jour) quelle puissance moyenne faut il produire sur six mois ? On fera un calcul estimatif.
- 3.4. On dimensionne la puissance thermique maximale que doit fournir la P.A.C à l'eau de chauffage à 7000 W. Commenter.
- 3.5. a. Faire l'allure du diagramme de Clapeyron du R407C avec trois isothermes 5°C, 60°C et 70°C.
- b. Calculer le titre massique en vapeur à l'état (4).
- c. Tracer l'allure du cycle de la P.A.C, on fera figurer les 4 états et le sens du cycle.
- 3.6. Calculer le transfert thermique massique entre le fluide et la source chaude et calculer le travail indiqué massique échangé avec le compresseur. En déduire le transfert thermique massique entre le fluide et la source froide.
- 3.7. a. Calculer l'efficacité de la P.A.C et donner la formule littérale pour l'efficacité de Carnot qui est égale à 6,1. Comparer les efficacités et commenter.
- b. Calculer la puissance électrique nécessaire au compresseur de rendement électromécanique de 75 % pour fournir une puissance maximale de 7000W au circuit de chauffage. (conditions nominales)
- c. Calculer alors la nouvelle consommation électrique annuelle en kWh en supposant un rendement électromécanique et une efficacité constants dans les autres conditions de chauffage.
- d. Calculer alors le gain annuel en euro. Commenter.

