

13.3 EXERCICE DE GÉOTHERMIE BASSE ÉNERGIE

Exercice 13.3.a : L'échangeur sol-air

Dans ce problème, un échangeur sol-air est considéré pour préchauffer l'air frais d'une VRC. Le sol est considéré à température constante de 7°C pendant toute la période de chauffage. Le tube de PVC de longueur $L = 40$ m possède un diamètre intérieur de 20 cm¹ et une épaisseur de 3mm². Le rayon considéré au-delà duquel le sol ne varie pas en température est de 15 cm³.

Les conductivités du sol et du PVC sont de 0,52 W/mK et 0,35 W/mK⁴

On circule 200 CFM⁵ d'air et on considère que la puissance consommée par le ventilateur est négligeable en première approximation. On évalue aussi les propriétés de l'air à 0°C⁶.

Les températures moyennes mensuelles pour Montréal sont de :

January	-10,2
February	-8,4
March	-2,3
November	1,6
December	-6,3

QUESTIONS

Question 1 : Quel est le gain thermique pendant ces cinq mois?

Question 2 : Quelle est la valeur de cette énergie si vous devez entrer en compétition avec un fournisseur:

- a) d'électricité à 0,10\$/kWh?
- b) de gaz à 0,40\$/m³?

Question 3 : Si vous désirez une PRI simple de 10 ans, quel est le budget d'investissement initial maximal possible?

Quelle est votre recommandation:

- On abandonne, ce ne sera jamais rentable
- On poursuit par une étude de faisabilité en engageant une firme spécialisée

Note : vous négligez, en première approximation:

- Les variations de propriétés de l'air,
- Les variations de la température du sol,
- La consommation du ventilateur (pertes de charge),

¹ 20cm est en fait 8po. Un diamètre que vous retrouverez dans le commerce au Canada. Plus gros que cela, ça devient trop cher au pied linéaire pour les solutions deviennent potentiellement rentables.

² 3mm est en fait 1/8 po. Encore ici une épaisseur standard. C'est assez considérable mais on ne veut pas que le tuyau ne s'affaisse avec les années sous le poids et la pression de sol.

³ Ceci est une approximation et il ne faut en aucun cas penser que cela est vrai pour tous les sols.

⁴ Ce sont des valeurs typiques plausibles tirées de tables de propriétés thermiques.

⁵ Un débit assez standard pour l'alimentation du VRC type. Souvent, il fonctionne avec un débit moindre. Le débit est fourni en CFM car c'est le standard pour les débits volumétriques au Canada.

⁶ Tref ici n'est pas une VRAIE température. C'est la température calculée qui peut être employée pour estimer les propriétés « moyennes » du fluide dans le tuyau. Par exemple, puisque T_{in} ne sera pas T_{out} , strictement, la densité de l'air dans le tuyau va varier le long de celui-ci. Il est de pratique courante d'employer une température dite de référence pour estimer les propriétés thermiques des fluides et SOUVENT, pour simplifier l'analyse, on utilise des propriétés constantes évaluées à la moyenne arithmétique de T_{in} et T_{out} . Comme on ne connaît pas T_{out} , si on veut employer cette approximation, on a recours à une solution itérative. Si vous aviez à résoudre un tel problème « à la main ». Il vous faudrait estimer T_{out} avec les valeurs de propriétés évaluées à T_{in} , puis a ré-évaluer les propriétés à la moyenne des deux, et de recommencer.

Mais dans ce problème, cette stratégie n'est pas adoptée. Puis que l'Air entre dans le tube à -5,10C en moyenne et qu'il est réchauffé par un sol à 70C, la solution estime les propriétés à 00C en première approximation et reste avec cet estimé. Certes, les propriétés varient avec T mais dans un intervalle si faible de 120C au maximum, il est absolument inutile d'employer la moyenne arithmétique.

- Les frais annuels d'entretien et de maintien d'actifs

Notez que dans ce qui suit:

- Les équations sont groupées par thème,
- Chaque équation ou variable est complétée par sa description et comporte les unités

Notez que ce problème possède une solution complète sur INTERACTIVE HEAT TRANSFER, disponible sur le site du cours. Enfin, remarquez que ce problème fait appel à des notions de thermique non spécifiquement couvertes par le module 2 : Notions fondamentales. Pour le réaliser et le comprendre, il faut avoir fait un cours de thermique.

DONC : pas de problème aussi complexe à résoudre lors de l'examen. Surtout la portion qui fait l'estimer du coef de transfert h. Dans un examen, si un tel problème est abordé, il sera alors simplifié.

REPOSES

Question 1 : Quel est le gain thermique pendant ces cinq mois?

Gain thermique instantané :

$$q = \dot{m} c_p (T_{out} - T_{in})$$

1-Le débit massique doit être évalué à partir de $\rho \dot{V}$ et \dot{V} doit être converti des CFM à des m³/s. Un CFM est une unité usuelle au Québec (Cubic Feet per Minute).

`vdot_CFM = 200 //Volumetric flow rate, [CFM]`

`vdot = vdot_CFM/2.1189e3 //Volumetric flow rate, [m3/s]`

`mdot = rho_air*vdot //Mass flow rate, [kg/s]`

Pour obtenir ρ il faut le faire à une température appropriée. Cette Tref (référence) a été choisie à 273K soit 0°C comme première approximation. Nous savons que la température de l'air variera entre l'entrée et la sortie et comme on le voit en 2, 0°C est une bonne approximation. La densité de l'air peut être obtenue de tables, sur internet ou d'une fonction implantée dans IHT. Ici, 1,287 kg/m³.

2-La température moyenne pondérée des 5 mois peut être employée pour T_{in} car le débit reste constant sur toute la période.

`TinC = (TJ*31+TF*28+TM*31+TN*30+TD*31)/(31+28+31+30+31)`

`//Average Inlet tempereature, [oC]`

`Tin = TinC+273`

`//Inlet tempereature, [K]`

`TJ = -10.2`

`TF = -8.4`

`TM = -2.3`

`TN = 1.6`

`TD = -6.3`

C'est une moyenne pondérée qui donne -5,099 °C. Puisque nous avons un sol à 7°C, il est plausible de fixer que l'air se réchauffera peut-être jusqu'à 5°C (il pourrait atteindre la limite théorique de 7°C si le tube était infiniment long) et qu'il sera en moyenne à 0°C le long du tube enfoui.

3- La chaleur spécifique de l'air à 0°C est de 1006 J/kgK

4- T_{out} est inconnue

5- q est inconnue

Il faut donc une seconde équation pour résoudre. Pour cela, il faut référer à la théorie du transfert thermique (Module 2, Thème2.4). Référence à Incropera et Dewitt, Fund. Heat Mass Transfer

$$\frac{(T_g - T_{out})}{(T_g - T_{in})} = \exp\left(\frac{-1}{\dot{m} c_p R}\right) = \exp\left(\frac{UA}{\dot{m} c_p}\right)$$

L'indice g réfère au sol (ground). U est le coefficient de transfert global et A la surface d'échange du tube ($2 \pi r L$). Il est plus simple d'évaluer directement R .

Il faut donc estimer la Résistance thermique R qui est la somme des résistance du sol, de la paroi de plastique et du film d'air intérieur.

- La résistance du sol est $R_g = \ln(D_g/D_o) / (2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_g)$
- La résistance de la paroi est $R_t = \ln(D_o/D_i) / (2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{PVC})$
- La résistance de l'air est $R_{air} = 1 / (h_{Dbar} \cdot \pi \cdot D_i \cdot L)$

Mais le coefficient de transfert h_{Dbar} demeure une inconnue à évaluer. Tout le reste est fourni dans les données. Au global les résistances sont données par :

`// Thermal resistances`

`L = 40 //Tube length, [m]`

`RTot = Rair+Rt+Rg //Total resistance, [K/W]`

```

Rair = 1/(hDbar*pi*Di*L)           //Air resistance, [K/W]
Di = 0.20                          //Internal diameter, [m]
Rt = ln(Do/Di) / (2*pi*L*k_PVC)    //Tube resistance, [K/W]
Do =Di+2*e                          //External diameter, [m]
e = 0.003                          //Wall thickness, [m]
k_PVC = 0.35                       //Wall conductivity, [W/mK]
Rg = ln(Dg/Do) / (2*pi*L*k_g)     //Ground resistance, [K/W]
Dg = 0.30                          //Groud radius for invariant temperature, [m]
k_g = 0.52                         //Ground conductivity, [W/mK]
    
```

Il faut alors déterminer le coefficient de transfert. L'intuition du thermicien permet de savoir que ce coefficient sera sans doute compris entre 7 et 50 W/m²K et qu'il sera davantage faible que fort. Autour de 10 (je sais qu'il faut un peu d'expérience mais dans les notes de cours on fournit un petit tableau qui indique les ordres de grandeur).

Pour calculer h, il faut déterminer le type d'écoulement tel que :

```

//Flow
ReDi= um * Di / nu_air
mdot = rho_air * um * Ac
Ac = pi * (Di^2) / 4
NuDbar = NuD_bar_IF_T_FD(ReDi,Pr_air,n)           // Eq 8.60
n = 0.4 // n = 0.4 or 0.3 for Ts>Tm or Ts<Tm
NuDbar = hDbar * Di / k_air
//Tref = (Tin + Tout) / 2                        //Fluid average mean temperature, K
    
```

Le travail du thermicien consiste à évaluer le nombre de Nusselt à partir des nombres de Reynolds et de Prandtl. Chapitre 8, Incropera et Dewitt, Fund. Heat Mass Transfer, Wiley. Notez que la fonction NuDbar est intégrée à IHT. Il est toutefois possible d'écrire l'équation 8.60 du bouquin au long.

Avec les deux équations, il est possible de déterminer Tout et q

Une fois que q est obtenu, il s'agit d'une valeur moyenne sur 5 mois car la température moyenne sur 5 mois est employée comme température d'entrée.

L'intégrale sur le 5 mois se résume à une sommation.

```

// Global heat transfer
Q = mdot*cp_air*(Tout-Tin)           //Overall power, [W]
Qmax = mdot*cp_air*(Tg-Tin)          //Theoretical power, [W]
E = Q*(31+28+31+30+31)*24/1000      //The sum of local powers, [kWh]
Emax = Qmax*(31+28+31+30+31)*24/1000 //The sum of local powers, [kWh]
ToutC= Tout-273                     //Local exit temperature, [oC]
(Tg-Tout)/(Tg-Tin) = exp(-1/(mdot*cp_air*RTot))
TgC = 7                              //Soil invariable temperature, [oC]
Tg = TgC+273
    
```

Ici la valeur Qmax a aussi été calculée car elle permet d'apprécier l'efficacité de l'échangeur. Environ 72% ce qui est raisonnable. Mais notez que la température de sortie est faible à 3,66°C seulement. Mieux que -5°C néanmoins, cela permet une puissance de 1072 W.

Question 2 : Quelle est la valeur de cette énergie si vous devez entrer en compétition avec un fournisseur:

a) d'électricité à 0,10\$/kWh?

b) de gaz à 0,40\$/m³?

Lorsque toute l'énergie est cumulée sur les 5 mois, on obtient 3885 kWh

Électricité : valeur de 388\$ environ

Gaz : 164\$ environ (avec un rendement de 90% et un PCI de 37,89 MJ/m³- conversion de kWh en MJ).



Question 3 : Si vous désirez une PRI simple de 10 ans, quel est le budget d'investissement initial maximal possible? Quelle est votre recommandation:

- On abandonne, ce ne sera jamais rentable
- On poursuit par une étude de faisabilité en engageant une firme spécialisée

Pour une PRI de 10 ans, il faut simplement multiplier par 10 la valeur de ce qui serait épargnée en électricité et en gaz.

Électricité : 3885\$

Gaz : 1640\$

Ce budget est assez faible sauf s'il s'avère possible de ne pas avoir à payer pour l'excavation (en enroulant le tube autour de la fondation lors de la construction de celle-ci). Sinon, il semble que la rentabilité pourrait être longue à atteindre.

