

## TP - Énoncé

### Mise en contexte

L'Université souhaite intégrer un spa/piscine extérieur toute saison sur le grand axe afin d'agrémenter la vie sur le campus. Dans un souci d'inscrire ce projet dans une approche de développement durable, on aimerait que le bassin soit chauffé par un système géothermique. Un concept a été élaboré et votre équipe a reçu le mandat d'en faire l'analyse.

### Description du concept

Les échangeurs géothermiques (ÉG) verticaux sont constitués d'un tube de polyéthylène haute densité en U installés dans le forage qui est un trou dont le rayon est de 15 cm. Un coulis remplit le puits et assure son étanchéité. La profondeur maximale de chaque puits est de 200 m. Les puits sont reliés en parallèle. Un fluide antigel circule dans les échangeurs pour aller chercher de la chaleur dans le sol (mode chauffage). On a estimé que la température initiale du sol est de 10°C. Les ÉG sont reliés à une pompe à chaleur (PAC). Celle-ci procure de l'eau chaude au bassin selon ses besoins. Dans l'éventualité où la PAC n'est pas en mesure d'assurer la demande complète du bassin, un système d'appoint sera utilisé. Il s'agit d'un échangeur de chaleur qui utilise la vapeur produite par l'Université pour chauffer l'eau. Le bassin en question est hors-terre. Il possède une paroi de verre d'une épaisseur de 1,5 cm et d'une hauteur de 1,5 m. Les dimensions du bassin sont de 10 m par 20 m.

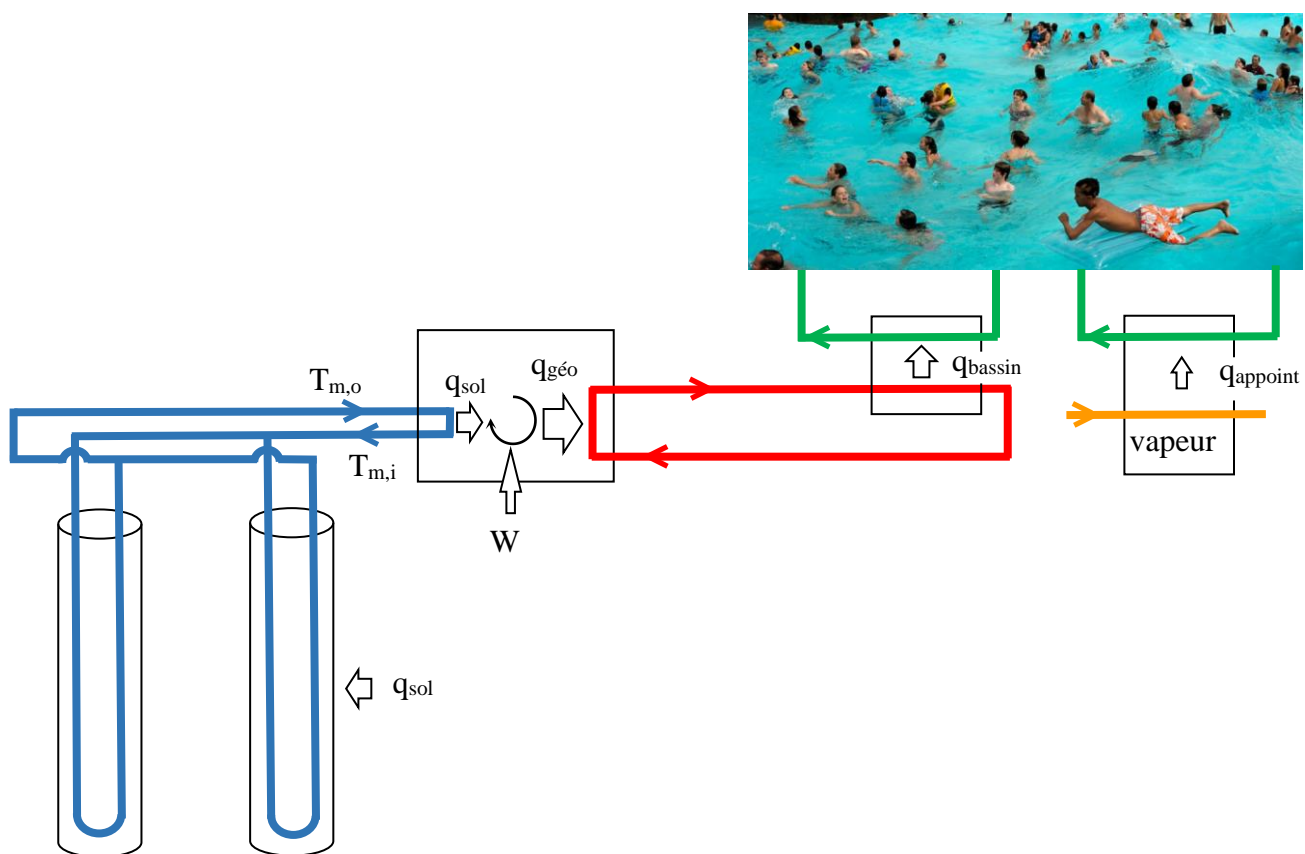


Figure 1 : Représentation schématique du système envisagé.

## INFORMATIONS TECHNIQUES

### Pompe à chaleur (PAC)

Le coût de la PAC en poképièce est de :  $23q_{H,\max}^{0.65}$  où  $q_{H,\max}$  est le taux de transfert de chaleur maximal que peut fournir la PAC en chauffage en kW.

Le  $COP_H$  de la pompe à chaleur est défini par :  $q_H/W_{elec}$ , où  $q_H$  est le taux de transfert de chaleur fourni par la PAC à un instant donnée et  $W_{elec}$  est la puissance électrique consommée par la PAC. Le COP est corrélé à la température du fluide de la manière suivante :

$$COP_H = 1 + 5 \frac{(T_{m,i} - T_{\min})}{12}$$

où  $T_{m,i}$  est la température du caloporteur à l'entrée des échangeurs géothermiques, i.e. à la sortie de la PAC. La PAC cesse de fonctionner si la température du fluide en provenance des échangeurs géothermiques baissent sous  $T_{\min} = -2^\circ\text{C}$ . Le coût de l'électricité pour le fonctionnement du compresseur de la PAC est de 5 poképièce par MWh.

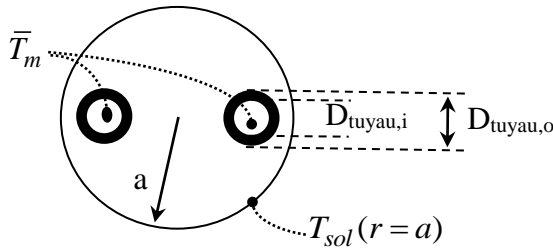
Du côté chaud de la PAC, on présume que l'eau est produite à  $55^\circ\text{C}$  dans tous les cas.

### Échangeurs géothermiques

Le coût des échangeurs géothermiques est de 50 poképièces par 100 m d'échangeur. Le taux de transfert linéique injecté dans le sol est relié aux différentes températures en jeu :

$$q'_{sol} L_{tot} = \frac{\left( \frac{T_{m,i} + T_{m,o}}{2} \right) - T_{sol}(r=a)}{R'_b / L_{tot}} = \dot{m} c_p (T_{m,i} - T_{m,o})$$

$q'_{sol}$  est positif si on injecte de la chaleur dans le sol et vice versa et  $L_{tot}$  est la longueur totale d'échangeurs géothermiques (nombre d'échangeurs multiplié par leur profondeur). Notez que les températures et le taux de transfert linéique varie dans le temps. Le sol possède une conductivité de  $2.5 \text{ W/mK}$  et une diffusivité de  $2 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ .



La résistance linéique de l'échangeur  $R'_b$  [mK/W] est la somme de trois résistances linéiques soit la convection dans le tuyau, la conduction dans le tuyau et la conduction dans le coulis :

$$R'_b = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\pi D_{tuyau,i} h_i} + \frac{\ln(D_{tuyau,o} / D_{tuyau,i})}{2\pi k_{tuyau}} \right] + \frac{1}{Sk_{coulis}}$$

où :

$$S = 21.9 \left( \frac{2a}{D_{\text{tuyau},o}} \right)^{-0.38}$$

La conductivité du coulis est de 1,2 W/mK. Les tuyaux ont un diamètre interne de 0,015 m et une épaisseur de 0,005 m. Le débit dans chaque échangeur est choisi de façon à obtenir le régime turbulent dans le tube. La température du sol loin des puits est de 10°C. On néglige les interactions entre les puits et on suppose que le transfert de chaleur dans les échangeurs et dans le sol s'opère principalement dans la direction radiale.

### Échangeurs de chaleur eau-eau et eau-vapeur

Deux échangeurs contrecourant avec l'eau de la piscine sont présents : un pour fournir de la chaleur à partir de la pompe à chaleur et un pour fournir de la chaleur en appoint lorsque requis. En effet, un échangeur eau-vapeur servira à fournir la chaleur à partir du réseau de vapeur de l'UL quand la PAC n'est pas en mesure de le faire. On estime que l'efficacité des échangeurs sera de 75%. Le coût d'achat d'un échangeur en poképièce est :  $50 \times (A/90)^{0.68}$ , où A est la surface d'échange de l'échangeur en m<sup>2</sup>. On doit dimensionner l'échangeur (i.e. choisir A) pour le pire cas possible, soit la valeur maximale du taux de transfert de chaleur que l'échangeur devra fournir pendant la période de 5 ans d'opération du système. Le coefficient global de l'échangeur est  $U = 340 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour l'échangeur eau-vapeur et  $U = 240 \text{ W/m}^2\text{K}$  pour l'échangeur eau-eau. Le coût de la vapeur consommée est de 4 poképièces par MWh. La centrale nous fournit de la vapeur saturée à 115°C.

### Bassin

La concentration de vapeur (kg de vapeur par m<sup>3</sup> d'air) à la surface de l'eau du bassin est celle obtenu lorsque l'air est saturé en vapeur :

$$W_{\text{sat}} = 1.9747 \times 10^{-5} T^2 + 1.3257 \times 10^{-4} T + 3.9866 \times 10^{-3}$$

où T est la température de l'eau du bassin. On se rappelle que le flux de chaleur perdu par évaporation est :

$$q''_{\text{évaporation}} = \underbrace{\rho_{\text{air}} h_m (W_f - W_{\text{air}})}_{\dot{m}_{\text{évap}}} i_{fg} \quad (1)$$

Des relations permettent de relier  $h_m$  à  $h$  (voir chapitre 6 de votre livre).

On a reçu l'information que l'eau de l'aqueduc dont on pourrait avoir besoin pour combler l'eau perdue par évaporation est à une température moyenne de 7°C.

Il existe un isolant sur le marché pour isoler les parois du bassin si on le souhaite. Sa conductivité est de 0,05 W/mK. Son coût est de 100 poképièce par m<sup>3</sup> d'isolant.

Pour le chauffage de l'eau dans les échangeurs de chaleur, on souhaite limiter l'augmentation de température de l'eau à 10°C pour éviter d'envoyer de l'eau trop chaude dans la piscine. Le débit d'eau de la piscine dans les échangeurs est le débit limitant ( $C_{\text{min}}$ ).

### Conditions climatiques

Vous pouvez supposer que la température extérieure varie de la façon suivante :

$$T_{\text{ext}}(t) = 6.4 + 29.5 \sin \left( 1.5\pi + \frac{2\pi t}{365} \right)$$

où  $t$  est en jour. De plus, vous pouvez supposer que la concentration de vapeur dans l'air (kg de vapeur par  $m^3$  d'air) est égale à 50% de la valeur à saturation (i.e.  $0.5 W_{sat}$ ). Vous pouvez négliger le rayonnement solaire si vous le souhaitez.

### **Mandat**

---

Vous devez répondre aux questions suivantes que votre client se pose :

Question 1 : Quels sont les besoins en chauffage pour le bassin?

Question 2 : Votre client s'inquiète de savoir quelle sera le coût d'opération et la performance en opération du système géothermique au cours des 5 prochaines années. Vous devez réaliser une simulation numérique avec des différences finies pour résoudre l'équation de conduction dans le sol en 1D (coordonnées radiales et régime transitoire). Une capsule sera offerte en classe pour expliquer la démarche. Il faudra ensuite relier la température à la paroi de l'échangeur à la température du fluide caloporteur et à la performance de la PAC pour estimer les coûts d'opération.

Question 3 : Quels dimensionnements recommandez-vous et pourquoi? Quels seront les coûts pour le clients (achat d'équipement et coûts d'opération)?

- Profondeur et nombre d'échangeurs géothermiques
- Capacité de la pompe à chaleur
- Capacité de l'échangeur fournissant la chaleur d'appoint
- Niveau d'isolation du bassin

Les livrables sont les suivants et doivent être déposés sur la boîte prévue à cet effet sur le site du cours :

1. Un rapport technique court à votre client (5 pages max, excluant page couverture et annexes, s'il y a lieu) résumant vos hypothèses, votre démarche, vos résultats et votre analyse.  
La page couverture doit indiquer clairement :
  - Nom et numéro d'étudiant de chaque coéquipier
  - Le rôle joué par chacun
  - Le % du travail attribué à chacun (les notes pourront être distribuées au prorata de la participation)
  - La signature de chacun des coéquipiers
2. Un chiffrier Excel et/ou un code Matlab extrêmement clair détaillant vos calculs, avec les unités bien indiqués.

### Grille d'évaluation (/29)

Contenu				
	10 points	8 points	5 points	0
	<ul style="list-style-type: none"> <li>La méthodologie utilisée est très rigoureuse, très claire et bien documentée.</li> <li>Les calculs sont exacts.</li> <li>Les hypothèses qui sont faites sont réalistes, justifiées et clairement exprimées.</li> <li>L'analyse de la situation et la discussion démontrent une excellente compréhension des différents aspects du problème (thermiques, fluides, économiques, etc.).</li> <li>Les recommandations qui sont formulées dans le rapport sont appuyées par l'analyse et sont logiques. Elles répondent clairement aux questions formulées par le client.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La méthodologie utilisée est relativement rigoureuse, claire et bien documentée.</li> <li>Les calculs sont pour la plupart exacts.</li> <li>Quelques hypothèses ne sont pas réalistes, justifiées et clairement exprimées.</li> <li>L'analyse de la situation et la discussion démontrent une assez bonne compréhension des différents aspects du problème (thermiques, fluides, économiques, etc.).</li> <li>Les recommandations qui sont formulées dans le rapport sont pour la plupart appuyées par l'analyse, et répondent à la majorité des questions du client.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La méthodologie utilisée est moyennement rigoureuse, claire et bien documentée.</li> <li>Les calculs sont souvent inexacts.</li> <li>Un certain nombre d'hypothèses ne sont pas réalistes, justifiées ou clairement exprimées.</li> <li>L'analyse de la situation et la discussion démontrent une compréhension approximative des différents aspects du problème.</li> <li>Les recommandations qui sont formulées dans le rapport ne sont pas toujours fondées et ne répondent pas à toutes les questions du client.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>La méthodologie utilisée n'est rigoureuse et n'est pas claire.</li> <li>Les calculs sont inexacts.</li> <li>Les hypothèses qui sont faites sont mauvaises et non explicites.</li> <li>L'analyse de la situation et la discussion démontrent une grande incompréhension des différents aspects du problème (thermiques, fluides, économiques, etc.).</li> <li>Les recommandations qui sont formulées dans le rapport sont illogiques et ne répondent pas aux questions formulées par le client.</li> </ul>
Q1 *				
Q2				
Q3				

\*La question Q1 étant plus simple, le cote reçue pour cette question sera divisé par 2 (c'est-à-dire que la question est sur 5 points)

Présentation		
4 points	2 points	0
<ul style="list-style-type: none"> <li>Introduction et conclusion</li> <li>Grande qualité des figures et graphiques</li> <li>Ordre et propreté</li> <li>Toutes les consignes sont respectées</li> <li>Pas ou peu de fautes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Introduction et conclusion faible ou trop longue</li> <li>Moyenne qualité des figures et graphiques</li> <li>Ordre et propreté</li> <li>Certaines consignes non-respectées</li> <li>Quelques fautes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Pas d'introduction, conclusion ou beaucoup trop longues</li> <li>Piètre qualité des figures et graphiques</li> <li>Manque d'ordre et de propreté</li> <li>Consignes non-respectées</li> <li>Beaucoup de fautes</li> </ul>