

GML6953C – GÉOTHERMIE DE BASSE TEMPÉRATURE AUTOMNE 2018

École Polytechnique de Montréal Département des génies civil, géologique et des mines Programme de génie minéral

PROFESSEUR: Philippe Pasquier (philippe.pasquier@polymtl.ca) - Local B-633

HORAIRE:

Cours théoriques : Lundi de 12h45 à 15h35 (A-552)
Travaux pratiques: Mercredi (B1) de 12h45 à 15h35 (B-511)
Séances de laboratoire: Mercredi (B1) de 12h45 à 15h35 (À confirmer)

SITE MOODLE DU COURS : <https://moodle.polymtl.ca/course/view.php?id=2095>

DESCRIPTION DU COURS :

Transfert de chaleur en milieux poreux et fracturé, saturé et non saturé, avec et sans advection. Traçage thermique et mesures de terrain et de laboratoire en géothermie. Méthodes avancées d'interprétation des essais de réponse thermique. Conception des systèmes géothermiques utilisant des boucles ouvertes, des puits à colonne, des boucles fermées horizontales ou des piliers et fondations énergétiques. Interférence thermique et hydraulique. Efficacité énergétique, coûts de construction et optimisation financière. Modélisation couplée des processus thermique et hydraulique dans un champ géothermique. Stockage thermique souterrain. Utilisation des échangeurs géothermiques et des thermosiphons pour le refroidissement des pergélisols, des haldes et parcs à résidus, pour le chauffage des sols et la dégradation des contaminants organiques.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX DU COURS :

À la fin de ce cours, les étudiants devront pouvoir :

- expliquer les mécanismes de transfert de chaleur dans les matériaux géologiques saturé et non saturé contrôlant la performance des systèmes géothermiques;
- réaliser des mesures de laboratoire et de quantifier les propriétés thermiques et le flux de chaleur traversant des matériaux géologiques;
- réaliser et d'interpréter un essai de réponse thermique in situ en vue de la conception d'un système, et de porter un regard critique sur les différentes stratégies d'interprétation;
- concevoir un système géothermique utilisant une boucle ouverte, des puits à colonne, une boucle fermée horizontale ou des piliers et fondations énergétiques et évaluer les économies d'énergie générées par l'opération du système;
- modéliser le transfert de chaleur et l'écoulement de l'eau souterraine dans un aquifère pour une application en géothermie et discuter des solutions numériques obtenues;
- comprendre les aspects législatifs et environnementaux pouvant affecter la conception et l'opération d'un système géothermique au Québec.

GML6953C – GÉOTHERMIE DE BASSE TEMPÉRATURE AUTOMNE 2018

CHARGE DE TRAVAIL HEBDOMADAIRE :

- 3 heures de présence en classe;
- 1.5 heures de travaux dirigés ou de laboratoire; et
- 4.5 heures d'étude personnelle.

MÉTHODES D'ÉVALUATION :

Nature	Nombre	Pondération
1) Devoirs	4	40%
2) Rapports de laboratoire	2	10%
3) Rapports de travaux pratiques	3	15%
3) Projet de session	1	25%
4) Exposé oral	1	10%

À moins d'indications contraires, les devoirs, rapports de travaux pratiques et de laboratoire devront être remis deux semaines après la tenue de l'activité. Une pénalité de 10% par jour ouvrable de retard sera appliquée à tout travail remis en retard. Les travaux pratiques, rapports de laboratoire seront réalisés en équipe de 2.

RÉFÉRENCES GÉNÉRALES PERTINENTES AU COURS

- ASHRAE. 2015. ASHRAE Handbook – Applications, Chap. 34 – Geothermal Energy.
- Banks, D. 2012. An introduction to Thermogeology : Ground Source Heating and Cooling, Blackwell Publishing. 2nd edition. <http://site.ebrary.com/lib/polymtl/Doc?id=10565182>
- Bear, J., 1979. Hydraulics of groundwater. McGraw-Hill ed.
- Bergman, T. L., Incropera, F. P., DeWitt, D. P., & Lavine, A. S. (2011). *Fundamentals of heat and mass transfer*. John Wiley & Sons.
- Fetter, C. W. (2018). *Applied hydrogeology*. Waveland Press.
- Kavanaugh, S.P., Rafferty, K. 2014. Geothermal Heating and Cooling: Design of ground-Source Heat Pump System. ASHRAE.
- Nield, D.A., Bejan, A., 2006. Convection in porous media, 3rd ed. ed. Springer, New York.
- Rees, S.J. 2016. Advances in Ground-Source Heat Pump Systems. Duxford, UK: Woodhead Publishing.
- Todd, D.K., Mays, L.W., 2010. Groundwater hydrology, Third Edition. ed. John Wiley and Sons, inc.

CONTENU DES PÉRIODES DE COURS

1. Introduction aux systèmes géothermiques (haute et basse température, ouvert et fermé, verticaux et horizontaux, boucle immergée et fondation énergétique). Notions d'hydrogéologie (loi de Darcy, équation de Richards, équation de Van Genuchten). Écoulements en milieu poreux et fracturé. 3 h
2. Transfert de chaleur en milieux poreux et fracturé, homogène et hétérogène, saturé et non saturé, avec et sans advection. Gel de l'eau interstitielle et migration de la vapeur d'eau. Traçage thermique. Exemple d'un sable, d'une roche fracturée, d'un pergélisol et d'un béton. 3 h
3. Mesures de terrain et de laboratoire en géothermie avec conductivimètre thermique à aiguille ou à plaque transitoire. Mesure du flux de chaleur, de la conductivité 3 h

GML6953C – GÉOTHERMIE DE BASSE TEMPÉRATURE AUTOMNE 2018

thermique, de la capacité spécifique et de la température. Effet Raman et systèmes de mesures distribuées. Vélocimètre thermique. Modélisation d'une aiguille thermique. Incertitude de mesure.

4. Essai de réponse thermique - Réalisation d'un ERT. Essai de circulation continue, de chauffage, de restitution, essai pulsé et distribué. Profil de température. Influence des conditions frontières et de la température initiale. Traitement des données mesurées (moyenne, filtrage, dérivée de Bourdet). 3 h
5. Essai de réponse thermique - Modélisation numérique et analytique d'un ERT à puissance de chauffage variable. Convolution des modèles de réponse. Convolution dans le domaine du temps et spectral. 3 h
6. Essai de réponse thermique - Interprétation d'un essai par approximation de premier ordre, inversion stochastique, inversion par inférence bayésienne. Déconvolution bayésienne. Calage de la variable d'état et/ou de sa dérivée. 3 h
7. Puits à colonne permanente - Solutions analytiques et approches de modélisation couplant la température et l'écoulement de l'eau souterraine. Interférence thermique et hydraulique. Non-stationnarité de la fonction de transfert. Efficacité thermique et bénéfices de la saignée. 3h
8. Puits à colonne permanente - Économie d'énergie Modélisation couplée. Conception d'un PCP (dimensionnement, sélection des matériaux, considérations opérationnelles, coûts de construction, stratégies de contrôle). Études de cas. 3 h
9. Système géothermique en boucle ouverte - Solution analytique, retard thermique, impact de la température de l'eau sur les rabattements, conception du puits de captage et du champ d'injection. 3 h
10. Système géothermique en boucle ouverte - Modélisation couplée, interférence thermique et hydraulique. Importance de la sélection de la pompe submersible et impact de l'énergie de pompage. Études de cas. 3 h
11. Piliers, fondations énergétiques et boucle fermée - Inertie et résistance thermique d'un pilier et d'une fondation énergétique. Conception des systèmes horizontaux et impact de l'infiltration efficace et de la migration de l'humidité. Étude de cas. 3 h
12. Utilisation des échangeurs géothermiques et des thermosiphons pour le gel de l'eau souterraine, pour le refroidissement des pergélisols, des haldes et parcs à résidus, le chauffage des sols et la dégradation des contaminants organiques. Étude de cas. Impacts environnementaux, notions d'hydrogéochimie, de transport des colloïdes, de développement d'algues et de colmatage pour la géothermie. 3 h
13. Résumé du cours, exercices synthèses et examen oral. 3h