

## PLAN DE COURS

**Nom du cours :**

Transmission de la chaleur appliquée aux sciences de la Terre

**Sigle du cours :**

GEO1504

**Offert au trimestre :**

Hiver

**Nombre de crédits :**

3

<b>Heure :</b>	<b>Lundi 13h30 à 16h30</b>	<b>Date :</b>	<b>8 janvier au 22 avril 2021</b>	<b>Local :</b>	<b>2301</b>
----------------	----------------------------	---------------	-----------------------------------	----------------	-------------

**PROFESSEUR RESPONSABLE ET COORDONNÉES**

Jasmin Raymond  
T 418-654-2559  
jasmin.raymond@ete.inrs.ca

**AUTRES PROFESSEURS PARTICIPANTS AU COURS, LE CAS ÉCHÉANT**

John Molson – professeur U. Laval, Richard Fortier – professeur U. Laval, Mafalda Miranda et Mirah Rajaobelinson – chercheuses postdoctorales INRS

**DESCRIPTION DU COURS**

Transmission de la chaleur par conduction, convection et radiation, changement de phase. Méthodes analytiques et numériques. Problématiques appliquées aux sciences de la Terre : géodynamique, géothermie, traçage thermique en hydrogéologie, pergélisol.

**OBJECTIFS DU COURS**

Les processus de transmission de chaleur jouent un rôle fondamental dans les phénomènes géologiques qui influencent la Terre et ses ressources naturelles. L'énergie thermique contrôle la géodynamique interne du globe, est une source d'énergie renouvelable, tout comme un traceur naturel et affecte la stabilité des matériaux géologiques. Ce cours gradué a pour objectif d'introduire les étudiants aux processus de transmission de chaleur et d'appliquer les notions apprises à des problématiques du domaine des sciences de la Terre. Les équations de transmission de chaleur par conduction, convection et radiation seront présentées en plus des notions

sur les changements de phase. Des méthodes de simulations analytiques et numériques seront abordées pour ensuite traiter de problématiques concernant : la géodynamique, les ressources géothermiques superficielles et profondes dont les systèmes de pompe à chaleur, l'utilisation de la température comme traceur en hydrogéologie environnementale et la stabilité du sol en milieu nordique.

## CONTENU DU COURS

Le cours comprend quatre cours généraux dans lesquels l'introduction, les équations fondamentales ainsi que les méthodes analytiques et numériques en transfert thermique sont présentées. Les cours suivants sont consacrés à des problématiques appliquées à la transmission de chaleur en sciences de la Terre. Des travaux pratiques seront donnés en classe à la fin des cours et seront à remettre la semaine suivante. La correction des travaux se fera en classe. La présentation d'un travail de session est prévue à la fin du cours.

Cours 1 – Introduction et organisation – 8 janvier, Jasmin Raymond

- Introduction et histoire de la transmission de la chaleur en sciences de la Terre
- Méthodes de mesure de la température

Cours 2 – Équations fondamentales – 15 janvier, Jasmin Raymond

- Conduction, convection et radiation

Cours 3 – Propriétés thermiques et changement de phase – 22 janvier, Jasmin Raymond

- Les matériaux géologiques

Cours 4 – Solutions analytiques et numériques – 29 janvier, Jasmin Raymond

- Sources de chaleur cylindrique et linéaire, différences finies et éléments finis

Cours 5 – Géodynamique – 5 février, Mirah Rajaobelinson

- Le flux de chaleur terrestre

Cours 6 – Ressources géothermiques profondes – 12 février, Mafalda Miranda

- Classification des ressources géothermiques
- Calcul de ressources pour la production d'électricité

Cours 7 – Pompes à chaleur géothermique – 19 février, Jasmin Raymond

- Systèmes verticaux à boucle fermée

Cours 8 – Pompes à chaleur géothermique – 26 février, Jasmin Raymond

- Tests de réponse thermique

Semaine de lecture – 4 mars – période pour avancer le travail de session

Cours 9 – Autres systèmes de pompes à chaleur – 11 mars, Jasmin Raymond

- Systèmes horizontaux à boucle fermée et systèmes à boucle ouverte

Cours 10 – Stockage thermique souterrain – 18 mars, Jasmin Raymond

- Couplage solaire-géothermie
- Emmagasinement de la chaleur dans le sol

Cours 11 – Pergélisol – 25 mars, Richard Fortier

- Gel et dégel du pergélisol et stabilité des matériaux géologiques

Cours 12 – Modélisation numérique et hydrogéologie environnementale – 8 avril, John Molson

- Détection de la recharge, de l'interaction entre les eaux de surface et souterraines et des écoulements en milieux fracturés avec la température
- Traitement thermique des sols contaminés et murs gelés
- Modélisation couplée : écoulement de l'eau souterraine et transfert de chaleur

Cours 13 – Présentation du travail de session en classe – 15 avril

#### MATÉRIEL DIDACTIQUE ET APPROCHES PÉDAGOGIQUES

Tout le matériel du cours est disponible sur Moodle ou sur OneDrive :

[https://inrs-my.sharepoint.com/:f/g/personal/jasmin\\_raymond\\_inrs\\_ca/Etbw-pi0ILlGm9mXWM6l5PoBGzVt8s9jmVRlKFvI5hmfMA?e=HvSZUI](https://inrs-my.sharepoint.com/:f/g/personal/jasmin_raymond_inrs_ca/Etbw-pi0ILlGm9mXWM6l5PoBGzVt8s9jmVRlKFvI5hmfMA?e=HvSZUI)

#### ÉVALUATION

Travaux pratiques (TP) 50 %, travail de session (TS) 50 %.

##### Barème des notes

90% et plus A+  
85% à 89,9% A  
80% à 84,9% A-  
77% à 79,9% B+  
73% à 76,9% B  
70% à 72,9% B-  
65% à 69,9% C+

60% à 64,9% C  
59,9% et moins E

*Pour plus de détails:*

[Politique d'intégrité en recherche:](http://www.inrs.ca/sites/default/files/inrs/politiques_procedures_reglements/Politique_IntegriteRecherche%20VersionFinale.pdf)

[http://www.inrs.ca/sites/default/files/inrs/politiques\\_procedures\\_reglements/Politique\\_IntegriteRecherche%20VersionFinale.pdf](http://www.inrs.ca/sites/default/files/inrs/politiques_procedures_reglements/Politique_IntegriteRecherche%20VersionFinale.pdf)

[Intégrité en recherche : Guide pour les étudiants:](http://www.inrs.ca/sites/default/files/etudier_inrs/etudiants_actuels/INRS_Guide_de_letudiant_Integrite_Recherche.pdf)

[http://www.inrs.ca/sites/default/files/etudier\\_inrs/etudiants\\_actuels/INRS\\_Guide\\_de\\_letudiant\\_Integrite\\_Recherche.pdf](http://www.inrs.ca/sites/default/files/etudier_inrs/etudiants_actuels/INRS_Guide_de_letudiant_Integrite_Recherche.pdf)

#### **CONSIGNES RELATIVES AUX RETARDS DES TRAVAUX ET ABSENCE À UN EXAMEN**

La correction des TP se fait généralement en classe. Un retard entraîne un échec.

#### **INFORMATIONS COMPLÉMENTAIRES**

Les TP et le TS sont à remettre via la plateforme Moodle.

#### **BIBLIOGRAPHIE SOMMAIRE**

Banks, D., 2012. An Introduction to Thermogeology - Ground Source Heating and Cooling, 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley & Sons, West Sussex, 544 pages.

Bergman, T.L., Lavine, A.S., Incropera, F.P., Dewitt, D.P., 2011. Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 7<sup>th</sup> edition. John Wiley & Sons, Hoboken, 1052 pages.

Bundschuh, J., Suarez Arriaga, M.C., 2010. Introduction to the Numerical Modeling of Groundwater and Geothermal Systems – Fundamentals of Mass, Energy and Solute Transport in Poroelastic Rocks. CRC Press, Boca Raton, 457 pages.

Eppelbaum, L., Kutasov, I., Pilchin, A., 2014. Applied Geothermics. Springer, Heidelberg, 751 pages.

Jaupart, C., Mareschal, J.-C., 2011. Heat Generation and Transport in the Earth. Cambridge University Press, New York, 463 pages.

Jessop, A.M., 1990. Thermal Geophysics. Elsevier Science, Developments in Solid Earth Geophysics. Volume 17, 306 pages.

Lamarche, L., 2023. Fundamentals of Geothermal Heat Pump Systems. Sprigner Cham, Suisse, 295 pages.

Stauffer, F., Bayer, P., Blum, P., Molina Giraldo, N., Kinzelbach, W., 2014. Thermal Use of Shallow Groundwater. CRC Press, Boca Raton, 287 pages.

Turcotte, D., Schubert, G., 2014. Geodynamics. Cambridge University Press, Cambridge, 626 pages.