

Plan de cours

MÉTHODES DE CARACTÉRISATION DE LA SOUS-SURFACE

GEO 1502

Automne 2026



Institut national
de la recherche
scientifique

PLAN DE COURS

Nom du cours	Méthodes de caractérisation de la sous-surface
Sigle du cours	GEO 1502
Offert au trimestre	Automne 2026
Nombre de crédits	3
Dates	Cours de terrain : du 14 au 20 septembre 2026 Examen oral : le 2 octobre 2026, en après-midi
Heure	Les journées débutent généralement à 8 h 30
Lieux	Ville de Québec et environs; Pont-Rouge; station CIRSA de l'INRS à Sacré-Cœur
Locaux	ETE 2403 (INRS) et sites de terrain

Professeur responsable et coordonnées

Daniel Paradis (INRS) | 418-265-3713 | daniel.paradis@inrs.ca

Formatrices et formateurs

Jasmin Raymond (INRS), Pierre Francus (INRS), Renaud Soucy-La Roche (INRS), Jean-Michel Lemieux (Université Laval), Christian Dupuis (Université Laval), Vincent Taillard (INRS), Bernard Giroux (INRS), Geneviève Bordeleau (INRS), Daniel Paradis (INRS).

Description du cours

Cours de terrain intensif du 14 au 20 septembre 2026.

Coûts : étudiant - 400 \$ pour les frais de terrain + frais de scolarité; professionnel - 800 \$ pour les frais de terrain + frais de scolarité.

Cours crédité offert dans le cadre des programmes de sciences de la Terre de l'INRS et de l'Université Laval, ainsi qu'à titre d'étudiant libre pour les participantes et participants de l'extérieur. Le nombre de places est limité à 15 personnes.

Objectif du cours

La protection des ressources en eau souterraine, le stockage géologique du CO₂ et l'évaluation du potentiel énergétique de la sous-surface exigent une bonne connaissance des caractéristiques géologiques, géophysiques, hydrogéologiques et thermiques du milieu souterrain. Ces caractéristiques sont évaluées à l'aide de méthodes de terrain permettant de décrire la géométrie, les propriétés physiques et les conditions d'écoulement des aquifères et des réservoirs.

Ce cours vise à permettre aux personnes participantes de se familiariser avec les principales méthodes de caractérisation de la sous-surface utilisées en géosciences, notamment dans les domaines de l'eau souterraine, de la géothermie, du pétrole, du gaz et du stockage géologique du CO₂. À travers différents ateliers de terrain réalisés dans la région de Québec, à Pont-Rouge et à la station de recherche CIRSA de l'INRS près de Sacré-Cœur, les personnes participantes réaliseront et analyseront différents types de levés géologiques, géophysiques, hydrogéologiques et thermiques, ainsi que des activités de forage et d'échantillonnage de l'eau souterraine.

Contenu du cours – aperçu des activités

Jour	Date	Lieu	Activité	Responsables
Jour 1	Lundi 14 septembre	LISTE-INRS, Québec	Essais de conductivité thermique en géothermie et mesures CT-SCAN	Jasmin Raymond; Pierre Francus
Jour 2	Mardi 15 septembre	Québec et environs	Levés de géologie structurale et excursion géologique	Renaud Soucy-La Roche
Jour 3	Mercredi 16 septembre	LISTE-INRS, Québec	Échantillonnage de sols contaminés et opérations de forage	Vincent Taillard; Daniel Paradis
Jour 4	Jeudi 17 septembre	Pont-Rouge	Levés électriques et géoradar	Bernard Giroux
Jour 5	Vendredi 18 septembre	Université Laval, Québec	Essais hydrauliques multiniveaux et diagraphies géophysiques en forages; départ vers Sacré-Cœur	Jean-Michel Lemieux; Christian Dupuis
Jour 6	Samedi 19 septembre	Station CIRSA, Sacré-Cœur	Interactions eau de surface et eau souterraine	Geneviève Bordeleau; Daniel Paradis
Jour 7	Dimanche 20 septembre	Station CIRSA, Sacré-Cœur	Flux et échantillonnage de l'eau souterraine; retour vers Québec	Geneviève Bordeleau; Daniel Paradis
Examen oral	Vendredi 2 octobre	INRS salle à confirmer	Présentation en équipe	Jury du cours

Note logistique : le moment exact du déplacement vers la station CIRSA et du retour vers Québec pourra être ajusté selon les conditions de terrain et la logistique de transport.

Programmation détaillée

Jour 1 – lundi 14 septembre | Essais de conductivité thermique en géothermie et mesures CT-SCAN
Jasmin Raymond et Pierre Francus – LISTE-INRS, Québec



Conductivité thermique

L'atelier vise à présenter les principes et les méthodes de mesure de la conductivité thermique applicables aux sols, aux roches et aux forages, dans un contexte d'évaluation du potentiel géothermique.

- Mesure de la conductivité thermique sur des échantillons de sol selon la norme ASTM D5334.
- Utilisation d'une sonde à aiguille : calibration et mesure en laboratoire.
- Présentation de la mesure de conductivité thermique en forage.
- Description des équipements : câble chauffant, lecteur de puissance et capteurs de température.
- Préparation des capteurs, installation du câble chauffant et injection de chaleur dans le forage.

Mesures CT-SCAN

L'atelier vise à présenter l'utilisation du CT-SCAN pour la caractérisation non destructive d'échantillons géologiques.

- Visite du laboratoire de tomodensitométrie de l'INRS.
- Principes de base de la tomodensitométrie à rayons X appliquée aux carottes de sols, de sédiments et de roches.
- Présentation de la préparation des échantillons, des paramètres d'acquisition et des limites de résolution.
- Démonstration ou analyse d'images CT-SCAN : densité relative, structures sédimentaires, fractures, vides et hétérogénéités.

Jour 2 – mardi 15 septembre | Levés de géologie structurale et excursion géologique Renaud Soucy-La Roche – Québec et environs



L'excursion dans la région de Québec permettra d'observer les relations stratigraphiques et structurales entre le socle du Grenville, la plate-forme du Saint-Laurent et le front tectonique des Appalaches. Les principaux mécanismes de la déformation dans ces domaines tectoniques seront abordés afin de mettre en perspective les propriétés mécaniques et la structure des roches qui contrôlent la migration et la formation de réservoirs de fluides sous la surface de la Terre.

Horaire

- 8 h 30 à 10 h (salle de cours) : introduction aux réservoirs géologiques profonds et à leur utilisation pour l'extraction d'hydrocarbures, le stockage de gaz naturel et de CO₂ et la géothermie.
- 10 h à 17 h : visite d'affleurements sur le terrain dans la région de Québec.

Arrêts

- Rivière Montmorency au nord de la chute : discordance entre le socle du Grenville et le Groupe de Trenton.
- Passerelle du parc de la Chute-Montmorency : vue d'ensemble sur le socle du Grenville, la plate-forme du Saint-Laurent et les nappes externes des Appalaches.
- Île d'Orléans à Sainte-Pétronille : Ligne Logan, Nappe du Promontoire de Québec, Écaille de Sainte-Pétronille, plis et mesures structurales.
- Chutes de Charny : nappe de la Chaudière, Formation de Saint-Nicolas et anticlinal déversé.

Jour 3 – mercredi 16 septembre | Échantillonnage de sols contaminés et opérations de forage

Vincent Taillard et Daniel Paradis – LISTE-INRS, Québec



La journée vise à présenter deux ensembles de méthodes de terrain utilisées pour la caractérisation environnementale et hydrogéologique de la sous-surface. L'avant-midi portera sur l'échantillonnage de sols contaminés, alors que l'après-midi sera consacré aux opérations de forage, incluant le sondage CPT, l'échantillonnage des sols en forage et l'installation de puits d'observation.

Échantillonnage de sols contaminés

- Étude du guide de caractérisation.
- Présentation des outils d'échantillonnage.
- Méthodes de prélèvement et prévention de la contamination.
- Mise en situation : caractérisation de phase 2 sur un site simulé.

Opérations de forage

- Consignes de sécurité et fonctionnement de la foreuse de l'INRS.
- Présentation de l'instrumentation utilisée, incluant le système CPT/SMR.
- Présentation d'exemples de données CPT et de leur utilisation pour la reconnaissance des matériaux.
- Échantillonnage des sols en forage et description des échantillons.
- Installation d'un puits d'observation.

Jour 4 – jeudi 17 septembre | Levés électriques et géoradar

Bernard Giroux – Pont-Rouge



La journée vise à présenter les principes et les méthodes d'acquisition de levés géophysiques de surface utilisés pour caractériser la structure de la sous-surface et appuyer l'interprétation hydrogéologique. Les activités porteront sur la tomographie de résistivité électrique et le géoradar, deux méthodes complémentaires permettant de documenter les contrastes de propriétés physiques associés aux unités géologiques, aux variations de texture et aux conditions hydrogéologiques du site.

Tomographie électrique

Acquisition d'un profil 2D de résistivité électrique au voisinage de puits hydrogéologiques.

- Code de bonne pratique pour l'acquisition de données électriques.
- Déploiement du réseau d'électrodes.
- Configuration du système d'acquisition.
- Contrôle de la qualité des données, transfert sur ordinateur et traitement sommaire par inversion.

Profilage géoradar

Acquisition d'un profil de tomographie géoradar en surface à l'emplacement du profil de résistivité.

- Définition des paramètres d'acquisition.
- Contrôle de la qualité des données en temps réel.
- Interprétation préliminaire et comparaison des données radar et électriques.

Jour 5 – vendredi 18 septembre | Essais hydrauliques multiniveaux et diagraphies géophysiques en forages

Jean-Michel Lemieux et Christian Dupuis – Université Laval, Québec



Cette journée est consacrée à la caractérisation hydrogéologique du roc fracturé à partir de mesures réalisées directement en forage. Les personnes participantes seront initiées à l'utilisation d'obturateurs pneumatiques pour isoler des intervalles de forage et réaliser des essais hydrauliques multiniveaux. Ces essais permettent d'évaluer la variabilité verticale des propriétés hydrauliques et d'identifier les zones plus transmissives. La journée permettra également de se familiariser avec différentes méthodes de diagraphie en forage, utilisées pour documenter les propriétés physiques du milieu, la structure du roc et les conditions hydrogéologiques.

Essais hydrauliques avec obturateurs pneumatiques

- Utilité des obturateurs pneumatiques pour l'investigation hydrogéologique du roc.
- Aperçu des différentes configurations possibles pour des essais multiniveaux.
- Méthodes d'interprétation des essais hydrauliques en régime permanent et transitoire.
- Réalisation ou démonstration d'essais sur le terrain.

Diagraphies géophysique en forages

- Introduction aux méthodes diagraphiques.
- Déploiement de sondes diagraphiques : televiwer, gamma spectral, résistivité et paramètres complémentaires.
- Interprétation des diagraphies pour la caractérisation hydrogéologique du roc.

Jour 6 – samedi 19 septembre | Interactions eau de surface et eau souterraine
Geneviève Bordeleau et Daniel Paradis – Station de recherche CIRSA, Sacré-Cœur



Cette journée porte sur la caractérisation des échanges entre la rivière Sainte-Marguerite et l'aquifère alluvial. Les activités visent à mesurer directement les flux d'eau à travers les sédiments du lit de la rivière et à relier ces flux aux gradients hydrauliques verticaux et aux propriétés hydrauliques du lit.

- Installation de demi-barils et de mini-piézomètres dans le lit de la rivière.
- Mesure des charges hydrauliques dans la rivière et dans les mini-piézomètres.
- Mesure des flux d'eau à travers les sédiments du lit de la rivière.
- Évaluation du gradient hydraulique vertical.
- Estimation de la conductivité hydraulique du lit de la rivière.

Jour 7 – dimanche 20 septembre | Flux souterrain et échantillonnage de l'eau souterraine
Geneviève Bordeleau et Daniel Paradis – Station de recherche CIRSA, Sacré-Cœur

Cette journée porte sur la caractérisation de l'écoulement souterrain à l'échelle des puits d'observation de la station CIRSA. Les activités permettront de comparer des estimations de flux obtenues à partir du gradient hydraulique régional et de mesures directes en puits. La journée inclura aussi une démonstration des principes de développement, de purge et d'échantillonnage de l'eau souterraine.

Mesures dans les puits d'observation

- Mesure des niveaux d'eau dans les puits.
- Estimation du gradient hydraulique local.
- Estimation d'un flux de Darcy local.
- Mesures de flux en puits à l'aide de débitmètre thermique.

Échantillonnage de l'eau souterraine

- Développement et purge des puits d'observation.
- Échantillonnage de l'eau souterraine à l'aide de différentes méthodes.
- Mesure des paramètres physico-chimiques à l'aide d'une sonde multiparamètres.

Matériel didactique et approches pédagogiques

Le matériel du cours sera disponible en téléchargement sur la plateforme Moodle de l'INRS. Le cours repose sur une approche intensive de terrain combinant démonstrations, manipulations supervisées, observations, analyses préliminaires et discussions de groupe.

Évaluation

Résumés de lecture ou rapports de terrain - 40 %

- À la fin de chaque journée, un résumé de lecture d'un article ou un rapport de terrain est à remettre.
- La longueur maximale du résumé est de 300 mots ou 1 page dans le cas d'un rapport de terrain.

Examen oral - 60 %

- À la fin du cours, des questions seront remises aux personnes étudiantes.
- En équipe de 2 à 3 personnes, les personnes étudiantes devront préparer leurs réponses et les présenter oralement lors d'un exposé devant un jury.
- L'examen oral aura lieu le vendredi 2 octobre 2026 en après-midi; l'horaire détaillé sera confirmé ultérieurement.

Consignes relatives aux retards des travaux et aux absences à un examen

Aucun retard ne sera accepté. La ponctualité de toutes et tous est demandée afin de ne pas retarder les activités de terrain. En cas d'absence à l'examen oral, les règles institutionnelles applicables devront être suivies.

Informations complémentaires

Modalités d'inscription - avant le 8 septembre 2026

Tous les participants doivent compléter la feuille d'inscription à la fin du plan de cours et acquitter les frais additionnels de terrain : tarif étudiant de 400 \$; tarif professionnel de 800 \$. Ces frais couvrent une partie des coûts liés aux déplacements, à l'hébergement et au matériel de terrain.

- Personnes étudiantes de l'INRS : choisir le cours GEO 1502 dans le système IDÉ.
- Personnes étudiantes de l'Université Laval et d'autres établissements universitaires du Québec : remplir une demande d'autorisation de cours hors établissement au BCI.
- Personnes étudiantes canadiennes, françaises et internationales, ainsi personnes professionnelles : faire une demande d'admission à l'INRS à titre de personne étudiante libre de 2e ou de 3e cycle, et indiquer le cours GEO 1502 pour la session d'automne 2026.

Notes importantes

- Les dîners pour l'ensemble du cours et l'hébergement dans la région de Québec doivent être prévus par les personnes participantes.
- Le transport sur les sites de terrain à partir de l'INRS, l'hébergement en dortoir et les repas à la station CIRSA de Sacré-Cœur ainsi que le matériel de terrain sont inclus.
- Prévoir des vêtements de terrain, un sac de couchage et un ordinateur.

- Les journées de cours débutent à 8 h 30 et peuvent se terminer tard. Il n'y a pas d'annulation en cas de pluie.
- Le paiement des frais additionnels de terrain doit être fait par chèque ou carte de crédit à l'ordre de l'INRS avant le **8 septembre 2026**.
- Les frais de terrain ne sont pas remboursables en cas d'annulation.
- Maximum de 15 personnes.

Bibliographie sommaire

- Anderson, M. P. (2005). Heat as a Ground Water Tracer. *Ground Water*, 43(6), 951–968. doi:10.1111/j.1745-6584.2005.00052.x
- ASTM International. (2022). ASTM D5334-22a — Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Rock by Thermal Needle Probe Procedure. West Conshohocken, PA: ASTM International, 10 p. doi:10.1520/D5334-22A
- Fossen, H. (2016). *Structural Geology* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 528 p. ISBN 978-1-107-05764-7.
- Hsieh, P. A. (2000). A brief survey of hydraulic tests in fractured rocks. In B. Faybishenko, P. A. Witherspoon, & S. M. Benson (Eds.), *Dynamics of Fluids in Fractured Rock*. Geophysical Monograph Series, 122, Washington, DC: American Geophysical Union, p. 59–66. doi:10.1029/GM122p0059
- Jol, H. M. (Ed.). (2009). *Ground Penetrating Radar: Theory and Applications*. Amsterdam: Elsevier, xviii + 524 p. ISBN 978-0-444-53348-7.
- Käss, W. (1998). *Tracing Technique in Geohydrology*. Rotterdam: A.A. Balkema, 582 p.
- Ketcham, R. A., & Carlson, W. D. (2001). Acquisition, optimization and interpretation of X-ray computed tomographic imagery: applications to the geosciences. *Computers & Geosciences*, 27(4), 381–400. doi:10.1016/S0098-3004(00)00116-3
- Keys, W. S. (1990). *Borehole Geophysics Applied to Ground-Water Investigations*. U.S. Geological Survey, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 2, Chapter E2, xvi + 150 p. doi:10.3133/twri02E2
- Loke, M. H. (2004). Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Revision du 26 juillet 2004, 136 p.
- Ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs. (2024). *Guide de caractérisation des terrains*. Québec: Gouvernement du Québec, 212 p. ISBN 978-2-550-96913-6.
- Raymond, J., Therrien, R., Gosselin, L., & Lefebvre, R. (2011). A Review of Thermal Response Test Analysis Using Pumping Test Concepts. *Ground Water*, 49(6), 932–945. doi:10.1111/j.1745-6584.2010.00791.x
- Robertson, P. K., & Cabal, K. L. (2024). *Guide to Cone Penetration Testing* (7th ed.). P.K. Robertson Consulting, 164 p.
- Rosenberry, D. O., & LaBaugh, J. W. (2008). *Field Techniques for Estimating Water Fluxes Between Surface Water and Ground Water*. U.S. Geological Survey, Techniques and Methods 4-D2, 135 p. doi:10.3133/tm4D2
- U.S. Environmental Protection Agency. (2018). *Design and Installation of Monitoring Wells*. SESDGUID-101-R2. Athens, GA: U.S. EPA Region 4, Science and Ecosystem Support Division, 33 p.
- U.S. Geological Survey. (2006). Chapter A4. *Collection of Water Samples* (Version 2.0, revised September 2006; original version published September 1999). U.S. Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations, Book 9, Chapter A4, 166 p.
- U.S. Geological Survey. (2023). *Guidelines for Field-Measured Water-Quality Properties* (Version 1.1, July 17, 2023). U.S. Geological Survey Techniques and Methods, Book 9, Chapter A6.0, 22 p. <https://doi.org/10.3133/tm9A6.0>
- Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). *Ground Water and Surface Water: A Single Resource*. U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p. doi:10.3133/cir1139

Formulaire d'inscription et paiement des frais additionnels de terrain

Coordonnées Nom : _____ Adresse : _____ _____ Courriel : _____ Téléphone jour : _____ Cellulaire durant le cours : _____ Affiliation : _____	Frais d'inscription et besoins pour les repas Frais additionnels pour les déplacements sur le terrain et l'hébergement à la station CIRSA de Sacré-Cœur : Étudiant(e) : 400 \$ ☐ Professionnel(le) : 800 \$ ☐ Les frais de scolarité pour la sélection du cours doivent aussi être acquittés via les systèmes des institutions participantes. Allergies ou besoins particuliers à considérer pour les repas : _____ _____
--	---

Payable par chèque à l'ordre de l'INRS ou par carte de crédit avant le **8 septembre 2026**.

Envoyer le paiement par la poste à : Sylvie Lavoie, Institut national de la recherche scientifique, Centre Eau Terre Environnement, 490, rue de la Couronne, Québec (QC) G1K 9A9.

Ou écrire à finances@inrs.ca pour effectuer un paiement par carte de crédit.

Compléter le choix de cours GEO 1502 dans IDÉ (INRS), avec le BCI (externes) ou dans le formulaire d'admission pour étudiantes et étudiants libres, puis acquitter les frais de scolarité pour la session d'automne 2026.