

## Examen final

### GLQ2200 – Géophysique appliquée 1 Hiver 2026

Polytechnique Montréal  
Département des génies civil, géologique et des mines  
Professeur : Charles L. Bérubé

Nom : \_\_\_\_\_ Matricule : \_\_\_\_\_

#### Consignes :

- Le début de l'examen est vendredi le 17 avril 2026 à 15h00.
- La fin de l'examen est dimanche le 19 avril 2026 à 15h00.
- L'examen doit être fait **individuellement**.
- L'examen se fait à livre ouvert et toute documentation, incluant Internet, est permise.
- Aucune communication au sujet de l'examen n'est permise pendant l'examen.
- Le professeur ne répondra à aucune question pendant la durée de l'examen.
- Il faut **justifier toutes vos démarches** et citer vos sources au besoin.
- Le questionnaire fait 6 pages et contient 4 questions pour un total de 20 points.
- Une grille d'évaluation est donnée à la page 6 du questionnaire.
- Il faut mettre au propre vos réponses de façon bien organisée.
- Le questionnaire signé **doit être remis** avec votre cahier de réponses.
- Remettre le tout dans la boîte de dépôt prévue à cet effet sur Moodle.

#### En signant le questionnaire, l'étudiant ou l'étudiante confirme qu'il ou elle

- respecte l'engagement pris lors de la signature du code de conduite de Polytechnique ;
- comprend les règles institutionnelles concernant la fraude citées dans le plan de cours ;
- a fait l'examen individuellement, sans avoir communiqué avec qui que ce soit ;
- comprend que toute suspicion de fraude sera signalée aux instances appropriées ;
- comprend que les réponses qui ne sont pas écrites au propre, c'est-à-dire dont la présentation est désorganisée ou illisible, ne seront pas prises en compte lors de la correction.

Signature de l'étudiant(e) : \_\_\_\_\_ Date : \_\_\_\_\_

### Question 1. Corrections gravimétriques

Vous réalisez un levé gravimétrique près d'une ancienne mine à Rouyn-Noranda ( $48.2342^\circ$  N,  $79.0188^\circ$  O), en Abitibi-Témiscamingue. Le levé est effectué en abaissant lentement un gravimètre dans un trou de forage. Le trou a été foré dans des roches volcaniques homogènes dont la densité moyenne est égale à  $2785 \text{ kg/m}^3$ . Vous savez que deux anciennes galeries minières vides, situées à la même élévation  $z_g$ , passent près du forage (Figure 1). Votre objectif est d'investiguer la possibilité que cette ancienne mine possède une extension de ses zones minéralisées en profondeur.

Le système de coordonnées est défini de sorte que l'axe  $x$  pointe vers l'est, l'axe  $y$  pointe vers le nord, et l'axe  $z$  représente la profondeur verticale, positive vers le bas. Le forage est dévié de  $30^\circ$  vers le nord par rapport à la verticale. Ainsi, la trajectoire du gravimètre reste dans le plan  $yz$ , avec  $x = 0$ . Le fond du trou est situé à une profondeur verticale de 1000 m. Le gravimètre descend à une vitesse constante de 3 cm/s. Une station de base est située au collet du forage, à  $z = 0$ .

À 8 h 00, juste avant de commencer la descente, on mesure la gravité à la station de base et on obtient une valeur de 12 mGal. Des lectures de contrôle sont ensuite effectuées à la station de base aux heures suivantes : 10 h 40 : 10 mGal ; 13 h 21 : 11 mGal ; 16 h 01 : 10 mGal ; 18 h 41 : 12 mGal.

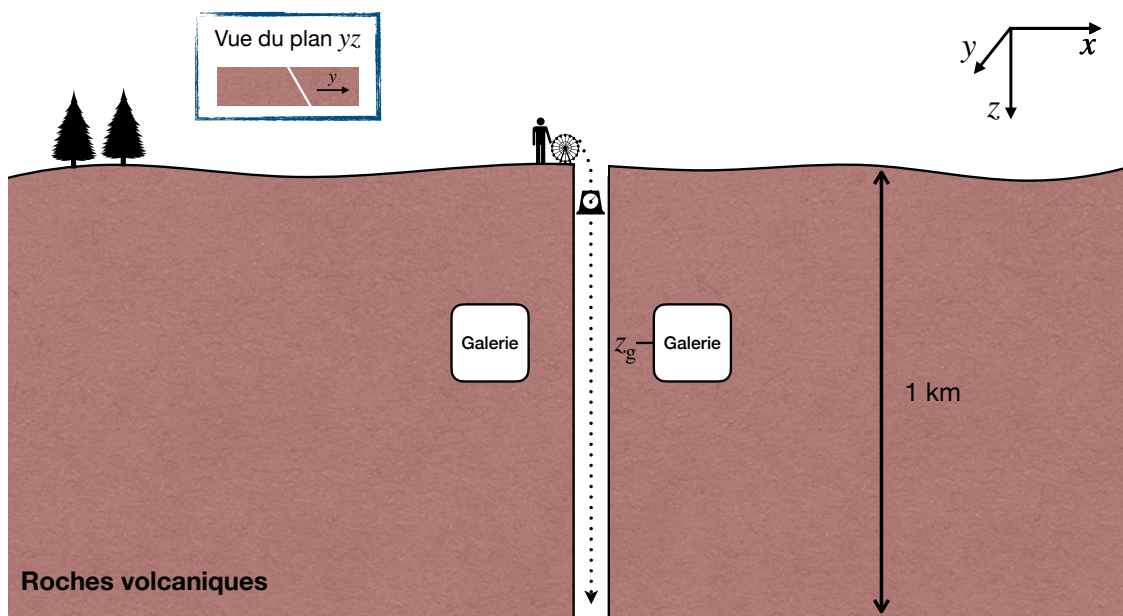


Figure 1 – Sondage gravimétrique en forage.

En justifiant toutes vos démarches, tracez sous forme de graphiques les profils de

- la correction de dérive ;
- la correction de latitude ;
- la correction d'altitude ;
- la correction de plateau ;
- l'anomalie de Bouguer.

Toutes vos réponses doivent montrer la valeur demandée en fonction de  $z$ .

## Question 2. Conception d'un levé géophysique

Votre firme de consultation est mandatée pour évaluer la stabilité d'une digue en remblais qui retient un bassin de résidus miniers. L'exploitant soupçonne la présence d'une zone de suintement préférentiel dans le corps de la digue, possiblement liée à un ancien drain mal colmaté. Cette zone saturée pourrait accélérer l'érosion interne et compromettre la stabilité de l'ouvrage.

Les plans de construction indiquent que la digue est constituée d'un remblai de densité moyenne  $\rho_r = 2100 \text{ kg m}^{-3}$ . On estime que la porosité du remblai est de 20 %. Dans la zone de suintement, les pores sont entièrement saturés en eau. On suppose que la zone saturée peut être approximée par un cylindre infini dans la direction  $y$  et ses paramètres géométriques sont donnés à la Figure 2.

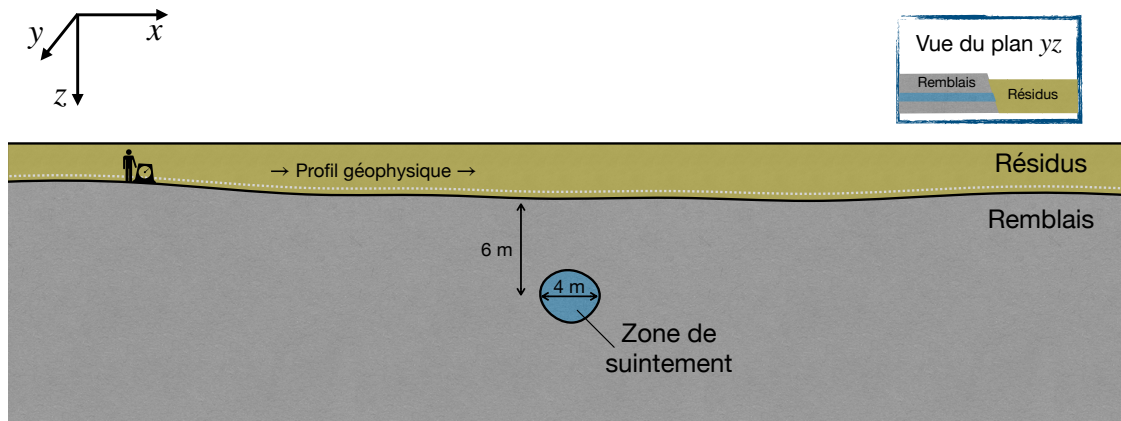


Figure 2 – Caractérisation géophysique d'une zone de suintement dans une digue minière.

Les remblais miniers contiennent une faible proportion de minéraux paramagnétiques et leur susceptibilité magnétique est  $\chi_m = 3 \times 10^{-3}$  SI. D'après l'IGRF, le champ géomagnétique local a une intensité de  $F = 54\,000 \text{ nT}$ , une inclinaison de  $I = 75^\circ$  et une déclinaison de  $D = -10^\circ$ .

L'équipe dispose de deux options : un gravimètre de terrain de résolution  $1 \mu\text{Gal}$  et un magnétomètre portable de résolution  $0.1 \text{ nT}$ . Le budget ne permet de réaliser qu'un seul levé géophysique. Lors d'une réunion de projet, un candidat à la profession d'ingénieur affirme que « la méthode magnétique sera suffisante, puisque l'eau est non magnétique ».

Pour valider cette affirmation, on vous demande de :

- proposer une paramétrisation pétrophysique complète du problème.
- calculer l'anomalie gravimétrique maximale anticipée au-dessus de la zone saturée ;
- calculer l'anomalie magnétique maximale anticipée au-dessus de la zone saturée en supposant que seule l'aimantation induite est présente ;
- déterminer la fréquence d'échantillonnage minimale requise pour détecter correctement l'anomalie attendue avec une perte d'information négligeable ;
- recommander l'une des deux méthodes en justifiant votre choix de façon détaillée.

Justifiez toutes vos démarches.

### Question 3. Modélisation géophysique

Dans une région côtière karstique, une cavité souterraine verticale est connectée à l'océan par un réseau de fractures. La cavité est modélisée par un cylindre vertical infini vers le bas, dont l'axe passe directement sous un gravimètre installé à la surface (Figure 3). Le toit de la cavité demeure entièrement enfoui sous la surface du sol, à la profondeur  $z_t$ . La densité du roc encaissant est  $\rho_r$  et la densité de l'eau de mer est  $\rho_w$ . La densité de l'air est négligeable. À la surface du sol,  $z = 0$ .

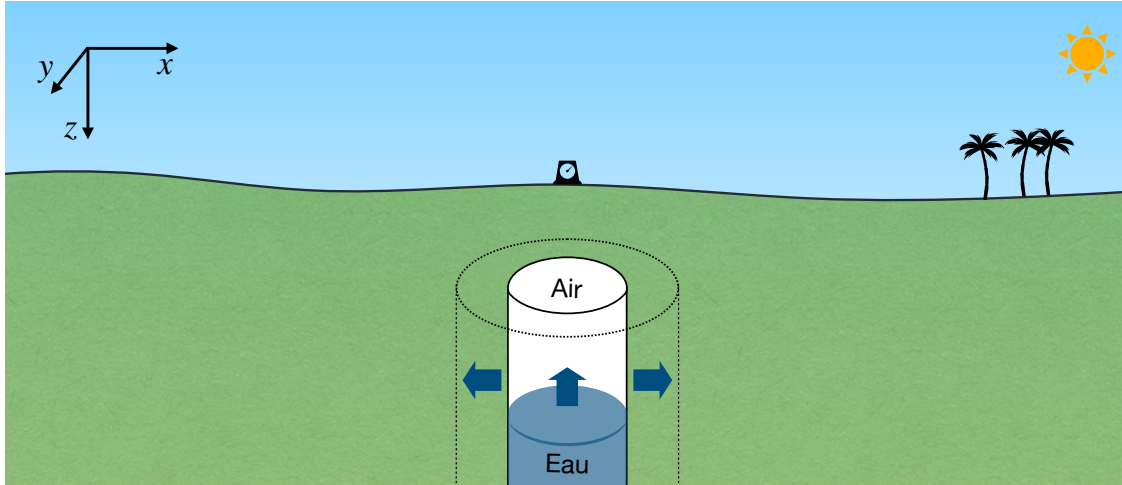


Figure 3 – Suivi temporel d'une cavité karstique par gravimétrie.

Le niveau marin ne descend jamais sous la hauteur  $z_b$  dans la cavité. Entre deux dates  $t_1$  et  $t_2$ , le rayon de la cavité passe de  $R_1$  à  $R_2$ , avec  $R_2 > R_1$ , à cause de la dissolution des parois de la cavité. Pendant le même intervalle, le niveau de l'eau passe d'une profondeur  $z_1$  à une profondeur  $z_2$ , avec  $z_t < z_1$  et  $z_2 < z_b$ . On s'intéresse seulement à la variation de gravité entre les deux dates.

- Proposez une paramétrisation complète du problème.
- Écrivez l'expression de  $\Delta g_z$  causé par la variation du niveau d'eau seulement, en supposant que le rayon reste égal à  $R_1$ .
- Écrivez l'expression de  $\Delta g_z$  causé par l'agrandissement de la cavité seulement, en supposant que le niveau d'eau reste égal à  $z_1$ .
- En déduire l'expression de la variation gravimétrique totale entre les deux dates lorsque le rayon et le niveau d'eau varient simultanément.
- On mesure une variation de gravité de  $\Delta g_z = -3 \mu\text{Gal}$  entre  $t_1$  et  $t_2$ . En utilisant les valeurs

$$\rho_r = 2600 \text{ kg m}^{-3}, \quad \rho_w = 1030 \text{ kg m}^{-3}, \quad R_1 = 3 \text{ m}, \quad z_t = 15 \text{ m}, \quad z_1 = 22 \text{ m}, \quad z_b = 40 \text{ m},$$

- estimez la nouvelle profondeur  $z_2$  et la variation de volume d'eau, en supposant que le rayon de la cavité est resté constant;
- estimez le nouveau rayon  $R_2$ , en supposant que le niveau d'eau est resté constant.

Commentez sur l'unicité de l'interprétation.

Justifiez toutes vos démarches.

#### Question 4. Interprétation magnétique

Un levé magnétique est réalisé sur un terrain recouvert d'un mort-terrain homogène non magnétique dans une région nordique au Québec. On soupçonne qu'un bloc erratique enfoui est présent dans ce mort-terrain. Le bloc est approximativement sphérique et son centre est situé à une profondeur  $z_0 = 10$  m sous la surface du sol (Figure 4).

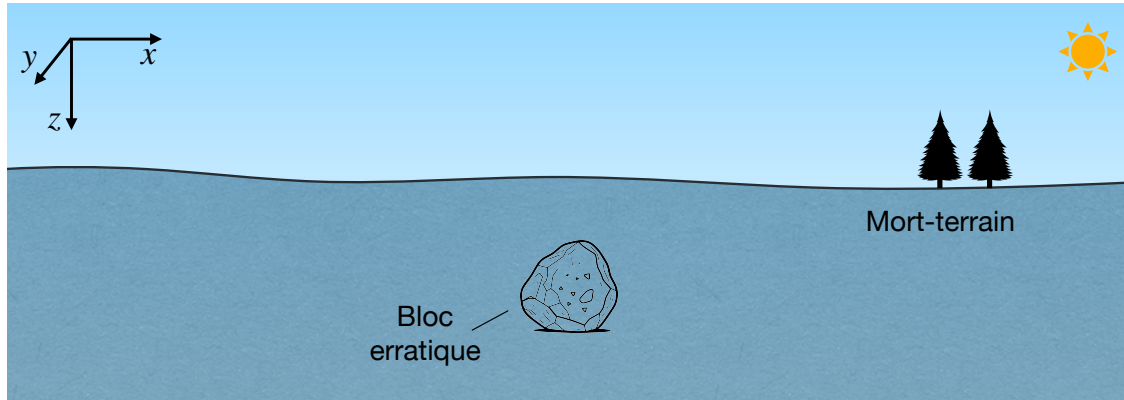


Figure 4 – Détection magnétique d'un bloc erratique enfoui dans un mort-terrain.

On suppose que le bloc est assez petit devant sa profondeur pour être modélisé comme un simple dipôle magnétique de moment dipolaire  $m$  situé à son centre. La ligne du levé passe directement au-dessus du bloc selon l'axe  $x$ , qui pointe vers le nord. Le champ géomagnétique local a une intensité  $F = 56\,000$  nT, une inclinaison  $I = 70^\circ$  et une déclinaison  $D = 0^\circ$ .

On vous demande de tracer l'anomalie magnétique attendue le long du profil si le bloc est

- diamagnétique ( $m = 0.001 \text{ Am}^2$ );
- paramagnétique ( $m = 0.1 \text{ Am}^2$ );
- ferromagnétique ( $m = 1 \text{ Am}^2$ ) et son aimantation est opposée au champ primaire;
- ferromagnétique ( $m = 1 \text{ Am}^2$ ) et son aimantation est orientée vers le sud;
- paramagnétique ( $m = 0.1 \text{ Am}^2$ ), mais on suppose que la polarité du champ géomagnétique est maintenant inversée, c'est-à-dire que  $I \rightarrow -I$ .

Justifiez toutes vos démarches.

## Grille d'évaluation

L'examen est évalué sur 20 points. La clarté des réponses, la propreté de la présentation et la qualité des justifications appuyant les réponses sont évaluées partout. Pour toutes les questions, chaque sous-question a), b), ... vaut 1 point. Une réponse exacte, mais insuffisamment justifiée donne ½ point. Une réponse qui démontre des erreurs de compréhension évidentes donne 0 point.

### Question 1 (5 points)

Cet exercice vise à évaluer votre compréhension des effets de différents paramètres sur la gravité mesurée à la surface du sol. On s'attend à un graphique quantitatif pour les sous-questions a), b), c) et d). On s'attend à un graphique qualitatif pour la sous-question e). Toutes vos réponses devraient montrer la valeur demandée en fonction de  $z$ . Chaque graphique devrait être accompagné d'une justification sous forme de calculs et de quelques phrases.

Pour a) à d), on demande de tracer la valeur de chaque correction. On veut la valeur qui doit être ajoutée ou retranchée, selon le signe de la correction, à la gravité mesurée. Vous devez quantifier les axes des graphiques là où les dimensions données dans la Figure 1 le permettent.

### Question 2 (5 points)

Cet exercice vise à évaluer votre capacité à concevoir une solution géophysique pour détecter une zone de suintement dans une digue en remblais. 1 point pour une paramétrisation pétrophysique complète du problème. 1 point pour un calcul exact de l'anomalie gravimétrique attendue. 1 point pour un calcul exact de l'anomalie magnétique attendue. 1 point pour un calcul exact de la fréquence d'échantillonnage requise. 1 point pour un bon choix de méthode et une justification détaillée des recommandations finales.

### Question 3 (5 points)

Cet exercice vise à évaluer votre capacité à paramétriser, modéliser et interpréter un problème géophysique en contexte de suivi temporel. 1 point pour une paramétrisation complète du problème. 1 point pour l'expression exacte de la variation de gravité causée par la variation du niveau d'eau seulement. 1 point pour l'expression exacte de la variation de gravité causée par l'agrandissement de la cavité seulement. 1 point pour la dérivation correcte de la variation gravimétrique totale par superposition. 1 point pour l'application numérique, incluant l'interprétation et le commentaire sur l'unicité de la solution.

### Question 4 (5 points)

Cet exercice vise à évaluer vos connaissances générales sur les propriétés magnétiques des matériaux et sur leurs interactions avec le champ géomagnétique. Vous devez utiliser des schémas des lignes de champ magnétique, l'équation de modélisation dipolaire et des courts paragraphes pour justifier chaque réponse. Vos réponses doivent être quantitatives, réalistes et cohérentes les unes par rapport aux autres. Justifiez la forme, la polarité relative, la position des extrema et l'amplitude relative de l'anomalie par rapport à la position du bloc. 1 point par sous-question.