

# Caractérisation statistique de la résistance en compression uniaxiale, de la résistance en tension et de l'indice de double poinçonnement du roc intact pour un projet minier

Catherine Boudreau, Martin Grenon et Geneviève Bruneau  
Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux,  
Université Laval, Québec, Canada  
Paul Germain  
Mine Éléonore, Goldcorp inc, Canada



*Challenges from North to South  
Des défis du Nord au Sud*

## ABSTRACT

The design of excavation in underground mines relies on rock mass characterization. Intact rock properties are assessed according to the guidelines suggested by the International Society for Rock Mechanics. For laboratory testing, a minimum number of specimens must be analysed. This number is specific for a given test type. Nonetheless, rock variability, heterogeneity and anisotropy may suggest that a larger number of specimens could be necessary to fully assess rock mass properties. Furthermore, a characterization campaign must also respect certain practical and financial limitations. Using a case study from a Quebec mine site, this paper presents a methodology that allows directly linking the results of statistical analysis on campaign results to target levels of confidence for geotechnical data at all stages of a mining project.

## RÉSUMÉ

La conception des ouvrages miniers souterrains repose sur une caractérisation géotechnique du massif rocheux. Les propriétés du roc intact sont évaluées au laboratoire selon les recommandations prescrites par la Société internationale de mécanique des roches. Lors d'essais en laboratoire, il est suggéré de tester un nombre minimal de spécimens par type de roche. Néanmoins, la variabilité, l'hétérogénéité et l'anisotropie du massif rocheux rendent parfois difficile l'établissement de valeurs représentatives de ces paramètres. Une campagne d'essais géomécaniques doit également répondre à des contraintes pratiques et financières. À l'aide d'une étude de cas réalisée sur un site minier québécois, cet article présente une méthodologie permettant de lier directement les résultats d'analyses statistiques des données de laboratoire à des niveaux de connaissance cibles pour les données géotechniques et ce à toutes les étapes d'un projet minier.

## 1 INTRODUCTION

La conception des ouvrages miniers souterrains repose sur une caractérisation géotechnique du massif rocheux. Lors des essais en laboratoire sur le roc intact, les données géotechniques sont amassées suivant les recommandations prescrites par la Société internationale de mécanique des roches (SIMR) (Brown, E. T., 1981). La SIMR définit un nombre minimal de spécimens par unité géomécanique devant être testé. Cependant, pour un essai donné en laboratoire, bien que les spécimens soient similaires à l'œil nu, ils comportent des défauts microscopiques, tels que des microfissures. Ces défauts ont un impact sur le mécanisme de rupture, ce qui contribue à la dispersion des résultats. Gill et al. (2003 ; 2005) suggèrent qu'il est, à priori, difficile d'établir le nombre d'essais nécessaire à la détermination des paramètres géomécaniques et que ce nombre varie selon le type de roche et le type d'essai.

De plus, le nombre minimal de spécimens à tester par type de roche, fixé par les normes SIMR, ne varie pas selon l'avancement du projet minier. C'est-à-dire que

l'effort de caractérisation géotechnique requis est le même pour un projet à l'étape conceptuelle qu'un pour projet à l'étape de l'exploitation.

Certains auteurs proposent que l'effort de caractérisation doive varier au cours d'un projet minier. Selon Read et Stacey (2009), la durée de vie d'un projet minier peut-être divisée en cinq étapes distinctes : conception, préfaisabilité, faisabilité, construction et exploitation. Pour chacune des étapes d'un projet minier, ces auteurs ont établi des lignes directrices afin de déterminer l'effort de caractérisation nécessaire pour chacune des composantes d'un modèle géotechnique. Les cinq niveaux d'effort de caractérisation à atteindre sont définis comme étant des niveaux géotechniques cibles (Tableau 1). Ces niveaux géotechniques ont été développés par un sous-comité du projet CSIRO sur la stabilité des pentes de grande fosse à ciel ouvert (LOP). Lors de l'avancement d'un projet, un effort de caractérisation géotechnique supplémentaire doit être fait à chacune des nouvelles étapes.

Tableau 1. Niveaux géotechniques suggérés et niveaux de connaissance cibles pour chacune des étapes d'un projet minier (d'après Read, 2013).

| Statut du projet                         | Conceptuel                       | Pré faisabilité                                                                        | Faisabilité                                                                           | Construction                                                    | Exploitation                                                    |
|------------------------------------------|----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| Niveau géotechnique                      | Niveau 1                         | Niveau 2                                                                               | Niveau 3                                                                              | Niveau 4                                                        | Niveau 5                                                        |
| Caractérisation géotechnique (NG)        | Information régionale pertinente | Évaluation et début de la compilation des données géotechniques à l'échelle de la mine | Poursuite de l'évaluation et compilation de toutes les données à l'échelle de la mine | Raffinement de la base de données géotechniques et du modèle 3D | Maintenance de la base de données géotechniques et du modèle 3D |
| Niveaux de connaissance cibles (NCC) (%) |                                  |                                                                                        |                                                                                       |                                                                 |                                                                 |
| Géologie                                 | > 50                             | 50 - 70                                                                                | 65 - 85                                                                               | 80 - 90                                                         | > 90                                                            |
| Structure                                | > 20                             | 40 - 50                                                                                | 45 - 70                                                                               | 60 - 75                                                         | > 75                                                            |
| Hydrogéologie                            | > 20                             | 30 - 50                                                                                | 40 - 65                                                                               | 60 - 75                                                         | > 75                                                            |
| Massif rocheux                           | > 30                             | 40 - 65                                                                                | 60 - 75                                                                               | 70 - 80                                                         | > 80                                                            |
| Géotechnique                             | > 30                             | 40 - 60                                                                                | 50 - 75                                                                               | 65 - 85                                                         | > 80                                                            |

Pour chacune des composantes d'un modèle géotechnique (géologie, structure, hydrogéologie, massif rocheux etc.), des niveaux de connaissance cibles en pourcentage ont été établis. Dans le cadre de cet article, les niveaux de connaissance sont utilisés de manière identique aux niveaux de confiance envers les données géotechniques tels que définis par Read et Stacey (2009).

Sur la base des résultats d'une seule campagne de caractérisation du roc intact d'un projet minier (il est à noter que le site a été l'objet de plusieurs campagnes de caractérisation, mais qu'une seule est considérée dans le cadre de cet article), les objectifs de cet article sont, dans un premier temps, de quantifier la variabilité des résultats obtenus en laboratoire pour les essais de résistance en compression uniaxiale, de tension indirecte et de double poinçonnement. Dans un second temps, l'objectif est de proposer une méthodologie permettant de lier la variabilité des résultats aux niveaux de connaissance cibles sur le massif rocheux proposés par Read et Stacey (2009). Ces analyses statistiques permettront de mieux quantifier notre connaissance des propriétés du roc intact dans le cadre d'un projet minier. Elles permettront également d'optimiser le nombre d'essais à réaliser tout en s'assurant de la représentativité des résultats. Finalement, elles permettront d'identifier plus efficacement de nouvelles cibles de caractérisation.

Les données géotechniques proviennent du projet Éléonore (Goldcorp inc.). C'est un des projets miniers aurifères les plus importants actuellement en développement au Québec. L'étude de pré faisabilité de 2011 indique une production journalière de 7000 tonnes à l'usine contribuant à une production annuelle de plus de 600 000 onces d'or. Le gisement demeure ouvert en profondeur avec un potentiel intéressant. Dans le cadre de cet article, afin de caractériser le roc intact au projet Éléonore, une campagne d'essais en laboratoire a été menée à l'été 2013 sur des échantillons prélevés entre 400 et 800 mètres de profondeur.

Les essais ont été effectués par le Laboratoire de mécanique des roches de l'Université Laval (LMR). Les échantillons ont été préparés et testés selon les recommandations établies par la SIMR (Brown, 1981). Au total, neuf types de roches ont été échantillonnés pour des essais de résistance en compression uniaxiale ( $\sigma_c$ ), de résistance en tension indirecte (essai brésilien) ( $\sigma_t$ ) et de double poinçonnement diamétral (Is50). Le nombre d'essais valides est présenté au tableau 2 selon le type d'essais, et ce, pour chacun des domaines lithologiques.

Tableau 2. Nombre d'essais valides de résistance en compression uniaxiale ( $\sigma_c$ ), de résistance en tension indirecte ( $\sigma_t$ ) et de double poinçonnement diamétral (Is50) effectués sur des spécimens de roches provenant du projet minier Éléonore.

| Nombre d'essais valides (n) |            |            |      |
|-----------------------------|------------|------------|------|
| Domaine                     | $\sigma_c$ | $\sigma_t$ | Is50 |
| S3DI                        | 4          | 10         | 13   |
| S3DX                        | 3          | 5          | 4    |
| S3AL                        | 2          | 7          | 5    |
| S4                          | 2          | 10         | 16   |
| I1G                         | 4          | 10         | 14   |
| ROB1                        | 2          | 3          | 2    |
| ROB2                        | 3          | 10         | 8    |
| M8                          | 4          | 9          | 6    |
| S3S0                        | 2          | 8          | 10   |
| Total                       | 26         | 72         | 78   |

Lors de cette campagne, le nombre limité d'échantillons n'a pas toujours permis d'effectuer le nombre d'essais recommandés par la SIMR.

## 2 QUANTIFICATION DE LA VARIABILITÉ DES RÉSULTATS PAR LA MÉTHODE DU FAIBLE ÉCHANTILLONNAGE

Lors d'une campagne d'essais géomécaniques, il est rare que 40 essais de même type soient conduits sur un même domaine lithologique. La méthode du faible échantillonnage utilise la notion d'inférence statistique afin de quantifier la variabilité des résultats de laboratoire d'un petit échantillon ( $n < 40$ ). La variabilité de l'échantillon est quantifiée par le calcul de l'erreur relative sur la moyenne vraie. Acceptée en statistique, cette théorie est maintenant utilisée pour des applications en géotechnique (Gill et al., 2003 ; 2005) (Fillion et Hadjigeorgiou, 2013).

### 2.1 Hypothèses

La méthode du faible échantillonnage impose les hypothèses suivantes :

- La fonction de densité de probabilité de la population du paramètre étudié suit une loi normale.
- La procédure d'échantillonnage est aléatoire et doit permettre aux éléments de la population d'avoir la même probabilité d'être sélectionnés.
- L'échantillonnage doit être fait à partir d'une population infinie d'éléments.
- Les échantillons doivent être indépendants.

Les mesures de paramètres géomécaniques effectués en laboratoire sont considérées comme des variables aléatoires issues de phénomènes naturels. C'est pourquoi l'hypothèse que la population de ces paramètres suit une loi normale est raisonnable (Hoek, 1998) (Košťák et Bielenstein, 1971) (Sari et Karpuz, 2006). Toutefois, le nombre d'échantillons étant limité, il est reconnu qu'il est difficile de concevoir une stratégie d'échantillonnage permettant d'avoir la même probabilité d'amasser tous les échantillons de la population d'une zone (Gill et al., 2003). Puisque la taille de l'échantillon est petite par rapport à la zone d'échantillonnage, la population de la zone est considérée comme infinie. Les propriétés mécaniques des roches sont considérées comme des variables aléatoires régionalisées. Ainsi, l'échantillonnage d'une zone doit être fait en s'assurant qu'il n'y a pas de corrélation spatiale entre les échantillons dont la conséquence serait une sous-estimation de la variabilité des propriétés mécaniques testées (Gill et al., 2003).

#### 2.1.1 Intervalle de confiance sur la moyenne vraie selon la théorie du faible échantillonnage

Selon la théorie du faible échantillonnage, l'intervalle de confiance sur la moyenne vraie ( $\mu$ ) bilatérale d'une population de variance inconnue est défini par l'équation (Montgomery et Runger, 2011) :

$$\bar{X} - t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [1]$$

Où  $n$  représente le nombre de spécimens contenus dans l'échantillon,  $\bar{X}$  est la moyenne de l'échantillon et

$t_{\alpha/2,v}$  est le coefficient de confiance obtenu à partir de la distribution de Student  $t$  pour une loi binomiale centrée sur la moyenne de la population ( $\mu$ ) selon un paramètre représentant le niveau de confiance requis ( $\alpha$ ) et un degré de liberté ( $v = n - 1$ ).

### 2.2 Erreur relative selon la théorie du faible échantillonnage

Pour un échantillon donné, l'erreur absolue maximale  $E_a$  sur la détermination de la moyenne vraie est la demi-longueur de l'intervalle de confiance pour un niveau de confiance donné (Montgomery et Runger, 2011) :

$$E_a = \left( \bar{X} + t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}} \right) - \left( \bar{X} - t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}} \right) \quad [2]$$

En simplifiant l'équation, l'erreur absolue maximale  $E_a$  est donnée par :

$$E_a = \bar{X} + t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad [3]$$

L'erreur relative maximale ( $E_r$ ) sur la moyenne vraie est obtenue en divisant l'erreur absolue maximale ( $E_a$ ) par la moyenne de l'échantillon :

$$E_r = \frac{t_{\alpha/2,v} \frac{s}{\sqrt{n}}}{\bar{X}} \quad [4]$$

Où le coefficient de confiance de Student  $t_{(\alpha/2,v)}$  est déterminé pour un intervalle de confiance à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) tel que suggéré par Gill et al. (2003).

## 3 DÉTERMINATION DU NIVEAU DE CONNAISSANCE CIBLE (NCC) ET DU NIVEAU GÉOTECHNIQUE (NG) DES RÉSULTATS

### 3.1 Niveau de connaissance cible (NCC) sur la géologie

Des niveaux de connaissances cibles en pourcentage ont été établis par Read et Stacey (2009) pour chacune des composantes d'un modèle géotechnique (Tableau 1). Afin d'être cohérent avec les guides utilisés pour rapporter la confiance envers les résultats des travaux d'exploration minière, les niveaux géotechniques et les niveaux de connaissance cibles ont été proposés afin de correspondre à la structure du code australien JORC 2004 (JORC, 2004) décrivant les ressources et les réserves minérales. Selon Read et Stacey (2009), l'industrie utiliserait un niveau de confiance cible de  $\pm 25\%$  pour les ressources minérales indiquées et de  $\pm 10\%$  à  $\pm 15\%$  pour les ressources mesurées. Ces frontières sont compatibles avec les niveaux géotechniques 2, 3 et 4 (Tableau 3). Les intervalles en pourcentage définis par Read et Stacey (2009) sont donc interprétés dans cet article comme l'erreur relative maximale admissible sur la teneur moyenne du minerai à l'étude ( $E_r$  – Teneur) (Tableau 3).

Tableau 3. Comparaison des niveaux de connaissance cibles (NCC) pour la géologie, de l'erreur relative sur la moyenne utilisée en exploration selon Read et Stacey (2009) ( $E_r$  - Teneur) et des erreurs relatives obtenues à partir de l'équation 5 ( $E_r$  (%)) pour chacune des étapes d'un projet minier.

| Statut du projet                                       | Conceptuel | Pré faisabilité | Faisabilité | Construction | Exploitation |
|--------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|
| Niveau géotechnique (NG)                               | Niveau 1   | Niveau 2        | Niveau 3    | Niveau 4     | Niveau 5     |
| Niveau de connaissance (NCC) cible sur la géologie (%) | >50        | 50 - 70         | 65-85       | 80 - 90      | >90          |
| ( $E_r$ – Teneur) (%)                                  |            | ±25             | ±15         | ±10          |              |
| $E_r$ (%)                                              | <50        | 30 - 50         | 15 - 35     | 10 - 20      | <10          |

Selon cette interprétation, ce sont donc les erreurs relatives maximales admissibles ciblées en exploration ( $E_r$  – Teneur) qui ont permis de définir les frontières des niveaux de connaissance cibles (NCC) pour la caractérisation géologique, et ce, pour chacune des étapes d'un projet minier (Tableau 3). Cependant, la nature du lien entre l'erreur relative maximale admissible ( $E_r$  – Teneur) et les niveaux de connaissance (NCC) sur les données n'a pas été définie explicitement par Read et Stacey (2009) et Read (2013).

Il est proposé dans cet article de lier la méthode du faible échantillonnage aux niveaux de connaissance (NCC) sur la géologie proposés par Read et Stacey (2009) par l'entremise de l'erreur relative ( $E_r$ ) sur la détermination de la moyenne vraie. La relation proposée est donnée par:

$$NCC (\%) = 100 - 100E_r \quad [5]$$

Ainsi, un grand intervalle de confiance peut-être accepté en début de projet, mais cet intervalle doit diminuer au fur et à mesure de l'avancement du projet. Il est nécessaire de toujours avoir la même confiance envers le fait que la vraie moyenne se situe à l'intérieur de cet intervalle. Pour la caractérisation géologique, les résultats de la relation établie par l'équation 5 sont présentés au tableau 3 ( $E_r$  (%)).

Lors de l'analyse des résultats pour un échantillon donné, l'erreur relative ( $E_r$  (%)) est calculée selon la méthode du faible échantillonnage pour un intervalle de confiance à 95% ( $\alpha = 0,05$ ). La relation établie à l'équation 5 permet de déterminer le niveau de connaissance, et par le même fait, les niveaux géotechniques (NG) des résultats associés aux propriétés géologiques.

### 3.2 Niveau de connaissance cible (NCC) sur le massif rocheux

Dans le cadre de ce projet, les analyses statistiques sont effectuées sur les résultats d'essais en laboratoire effectués sur le roc intact. Les niveaux de connaissance cibles (NCC) sont ceux liés au massif rocheux. En effet, tel que classifié par Read et Stacey (2009) la caractérisation du roc intact est inhérente à la caractérisation du massif rocheux.

En utilisant la relation établie à l'équation 5 aux résultats provenant d'essais géomécaniques sur le roc intact, il est possible de déterminer le NCC, et par le fait même le NG atteint pour un échantillon donné.

Les NCC ont été définis par Read et Stacey (2009) pour un usage dans le cadre de projets de fosses à ciel ouvert. Il est suggéré dans le cadre de cet article, de distinguer à l'étape de l'exploitation de la mine deux niveaux cibles. Pour un projet minier souterrain en exploitation, le niveau géotechnique 5 est associé à l'utilisation des résultats lors de la conception d'une excavation souterraine temporaire. Le niveau géotechnique 6 est associé à l'utilisation des résultats lors de la conception d'une excavation souterraine permanente. Cette distinction permet d'être cohérent avec les erreurs relatives à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) suggérées par Gill et al. (2003 ; 2005). Selon ces critères, l'erreur relative suggérée pour un groupe d'échantillons ne doit pas excéder 20% ( $E_r < 20\%$ ) lorsqu'il s'agit d'une excavation temporaire. Pour les ouvrages miniers permanents, une erreur relative inférieure à 15% ( $E_r < 15\%$ ) est suggérée. En résumé, les niveaux de connaissance (NCC) sur le massif rocheux tel que défini par Read et Stacey (2009) ont été modifiés dans le cadre de cet article afin d'inclure la notion d'ouvrage temporaire et permanent tel que suggéré par Gill et al. (2003 ; 2005). Les résultats de cette modification sont présentés au Tableau 4.

#### 3.2.1 Exemple numérique

La méthode de la détermination du niveau de connaissance selon l'erreur relative à 95% est utilisée dans cette section sur les résultats obtenus en laboratoire à la suite d'essais de résistance en compression uniaxiale sur le type de roche I1G. Cet échantillon est de taille  $n = 4$ , a une moyenne  $\bar{X} = 133,13$  MPa et un écart-type  $s = 19,75$  MPa. Pour un intervalle de confiance fixé à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) et un degré de liberté ( $v = n - 1$ ) de 3, un coefficient de confiance ( $t_{\alpha/2,v}$ ) de 3,18 est trouvé selon la loi de Student t bilatérale.

Tableau 4. Comparaison des niveaux de connaissance cibles (NCC) sur le massif rocheux et des erreurs relatives à 95% pour chacune des étapes d'un projet minier souterrain incluant la distinction entre les excavations temporaires et permanentes.

| Statut du projet                                       | Conceptuel | Pré faisabilité | Faisabilité | Construction | Exploitation |            |
|--------------------------------------------------------|------------|-----------------|-------------|--------------|--------------|------------|
|                                                        |            |                 |             |              | Temporaire   | Permanente |
| Niveau géotechnique (NG)                               | Niveau 1   | Niveau 2        | Niveau 3    | Niveau 4     | Niveau 5     | Niveau 6   |
| Niveau de connaissance (NCC) sur le massif rocheux (%) | > 30       | 40 - 65         | 60 - 75     | 70 - 80      | 80 - 85      | > 85       |
| $E_r$ (%)                                              | < 70       | 35 - 60         | 25 - 40     | 20 - 30      | 15 - 20      | < 15       |

L'erreur relative à 95% ( $E_r$ ) sur la moyenne vraie est déterminée à partir de la définition de l'intervalle de confiance selon l'équation 4.

$$E_r = \frac{3,18 \frac{19,75}{\sqrt{4}}}{133,13}$$

$$E_r = 23,60\%$$

Ensuite, le niveau de connaissance sur le massif rocheux (NCC) est déterminé à partir de la relation établie à l'équation 5 :

$$NCC (\%) = 100 - 100 * 0,2360$$

$$NCC (\%) = 76,40\%$$

Un NCC sur le massif rocheux de 76,40% est atteint. Selon le tableau 4, un NCC supérieur à 70% représente un NG de 4. Ce niveau de caractérisation est adéquat pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de la construction du site minier ( $70\% < NCC < 80\%$ ).

Il est à noter que les classes des niveaux de connaissance se chevauchent au Tableau 4. Le niveau géotechnique est défini selon la borne inférieure des classes de niveaux de connaissance. Donc, selon les résultats obtenus ( $NCC = 76,40\%$ ), sur la base de cette seule campagne, il serait suggéré de bonifier notre caractérisation avant de passer à l'étape de l'exploitation.

#### 4 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Cette section présente l'application de l'analyse statistique pour les trois types d'essais. Les paramètres statistiques permettant de calculer l'erreur relative à 95% sont présentés dans l'ordre suivant : essais de résistance en compression uniaxiale (Tableau 5), essais de résistance en tension indirecte (Tableau 6) et essais de double poinçonnement diamétral (Tableau 7).

Les niveaux de connaissance (NCC) sur le massif rocheux et les niveaux géotechniques (NG) sont présentés dans l'ordre suivant : essais de résistance en compression uniaxiale (Tableau 8), essais de résistance en tension indirecte (Tableau 9) et essais de double poinçonnement diamétral (Tableau 10).

Tableau 5. Paramètres statistiques nécessaires à la détermination de l'erreur relative à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) pour les essais de résistance en compression uniaxiale.

| Résistance en compression uniaxiale ( $\sigma_c$ ) |                     |                                              |                      |                                                  |                                               |
|----------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Domaine                                            | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{x}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Coefficient de confiance ( $t_{(\alpha/2, v)}$ ) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) |
| S3DI                                               | 4                   | 208,37                                       | 45,85                | 3,18                                             | 35,01                                         |
| S3DX                                               | 3                   | 246,35                                       | 112,25               | 4,30                                             | 113,19                                        |
| S3AL                                               | 2                   | 225,35                                       | 34,63                | 12,71                                            | 138,06                                        |
| S4                                                 | 2                   | 161,94                                       | 17,84                | 12,71                                            | 98,98                                         |
| I1G                                                | 4                   | 133,13                                       | 19,75                | 3,18                                             | 23,60                                         |
| ROB1                                               | 2                   | 171,32                                       | 98,34                | 12,71                                            | 515,73                                        |
| ROB2                                               | 3                   | 233,20                                       | 55,05                | 4,30                                             | 58,64                                         |
| M8                                                 | 4                   | 127,87                                       | 20,00                | 3,18                                             | 24,88                                         |
| S3S0                                               | 2                   | 179,74                                       | 100,24               | 12,71                                            | 501,07                                        |
| Total                                              | 26                  |                                              |                      |                                                  |                                               |

Tableau 6. Paramètres statistiques nécessaires à la détermination de l'erreur relative à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) pour les essais de résistance en tension (essais brésilien).

| Résistance en tension indirecte ( $\sigma_t$ ) |                     |                                              |                      |                                                  |                                               |
|------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Domaine                                        | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{X}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Coefficient de confiance ( $t_{(\alpha/2, n)}$ ) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) |
| S3DI                                           | 10                  | 14,20                                        | 2,81                 | 2,26                                             | 14,13                                         |
| S3DX                                           | 5                   | 15,07                                        | 2,97                 | 2,78                                             | 24,48                                         |
| S3AL                                           | 7                   | 19,28                                        | 2,14                 | 2,45                                             | 10,27                                         |
| S4                                             | 10                  | 14,81                                        | 1,93                 | 2,26                                             | 9,32                                          |
| I1G                                            | 10                  | 8,07                                         | 1,86                 | 2,26                                             | 16,49                                         |
| ROB1                                           | 3                   | 14,78                                        | 5,58                 | 4,30                                             | 93,70                                         |
| ROB2                                           | 10                  | 14,17                                        | 2,29                 | 2,26                                             | 11,55                                         |
| M8                                             | 9                   | 13,59                                        | 3,79                 | 2,31                                             | 21,45                                         |
| S3S0                                           | 8                   | 14,16                                        | 2,42                 | 2,36                                             | 14,28                                         |
| Total                                          | 72                  |                                              |                      |                                                  |                                               |

Tableau 7. Paramètres statistiques nécessaires à la détermination de l'erreur relative à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) pour les essais de double poinçonnement diamétral.

| Double poinçonnement diamétral ( $Is_{50}$ ) |                     |                                              |                      |                                                  |                                               |
|----------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Domaine                                      | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{X}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Coefficient de confiance ( $t_{(\alpha/2, n)}$ ) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) |
| S3DI                                         | 13                  | 8,27                                         | 2,37                 | 2,18                                             | 17,34                                         |
| S3DX                                         | 4                   | 9,59                                         | 0,51                 | 3,18                                             | 8,43                                          |
| S3AL                                         | 5                   | 9,94                                         | 2,53                 | 2,78                                             | 31,62                                         |
| S4                                           | 16                  | 7,99                                         | 0,79                 | 2,13                                             | 5,25                                          |
| I1G                                          | 14                  | 4,90                                         | 1,89                 | 2,16                                             | 22,23                                         |
| ROB1                                         | 2                   | 9,37                                         | 3,07                 | 12,71                                            | 294,18                                        |
| ROB2                                         | 8                   | 7,54                                         | 0,93                 | 2,36                                             | 10,32                                         |
| M8                                           | 6                   | 6,69                                         | 0,70                 | 2,57                                             | 10,98                                         |
| S3S0                                         | 10                  | 8,06                                         | 2,19                 | 2,26                                             | 19,46                                         |
| Total                                        | 78                  |                                              |                      |                                                  |                                               |

Selon les résultats de résistance en compression obtenus dans le cadre de cette campagne (Tableau 8), les niveaux de caractérisation obtenus pour les domaines I1G et M8 sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de la construction du site minier ( $70\% < NCC < 80\%$ ) (NG 4). Selon les résultats obtenus lors de cette campagne pour les domaines S3DI, S3DX, S3AL, S4, ROB1, ROB2 et S3S0 ( $NCC < 70\%$ ), il est nécessaire de réaliser des essais supplémentaires pour atteindre un NG égal à 4. Finalement, lorsque l'erreur relative à 95% ( $E_r$ ) est supérieure à 100% (S3DI, S3DX, S3AL, S4, ROB1, ROB2 et S3S0), le niveau de connaissance (NCC) sur le massif rocheux n'est pas calculé.

Sur la base des résultats de résistance en tension obtenus lors de cette campagne (Tableau 9), les niveaux de caractérisation obtenus pour tous les domaines, mis à part ROB1, sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de la construction du site minier ( $70\% < NCC < 80\%$ ) (NG 4). Selon les résultats obtenus pour le domaine ROB1 ( $NCC < 70\%$ ), il est suggéré de bonifier la caractérisation par la réalisation d'essais supplémentaires de résistance en tension pour atteindre le niveau géotechnique 4. Les niveaux de caractérisation obtenus pour les domaines S3DI, S3AL, S4, I1G, ROB2, et S3S0 sont adéquats pour utiliser les résultats lors de l'étape de

l'exploitation du site minier et ce pour des ouvrages temporaires ( $80\% > NCC > 85\%$ ) (NG 5). Les niveaux de caractérisation obtenus pour les domaines S3DI, S3AL, S4, ROB2 et S3S0 sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de l'exploitation du site minier pour des ouvrages permanents ( $NCC > 85$ ) (NG 6).

Sur la base des résultats obtenus lors des essais de double poinçonnement (Tableau 10), les niveaux de caractérisation obtenus pour tous les domaines, mis à part, S3AL et ROB1, sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de la construction du site minier ( $70\% < NCC < 80\%$ ) (NG 4). Il est suggéré de bonifier la caractérisation des domaines S3AL et ROB1 pour atteindre le NG 4. Des essais supplémentaires de double poinçonnement diamétral devront donc être effectués pour ces domaines géologiques. Les niveaux de caractérisation obtenus pour les domaines S3DI, S3DX, S4, ROB2, M8 et S3S0 sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de l'exploitation du site minier pour des ouvrages temporaires ( $80\% > NCC > 85\%$ ) (NG 5). Les niveaux de caractérisation obtenus pour les domaines S3DX, S4, ROB2 et M8 sont adéquats pour permettre l'utilisation des résultats à l'étape de l'exploitation du site minier pour des ouvrages permanents ( $NCC > 85$ ) (NG 6).

Tableau 8. Niveaux de connaissance (NCC) sur le massif rocheux et niveaux géotechniques (NG) pour les essais de résistance en compression uniaxiale.

| Résistance en compression uniaxiale ( $\sigma_c$ ) |                     |                                              |                      |                                               |                                  |                          |
|----------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Domaine                                            | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{X}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) | Niveau de connaissance (NCC) (%) | Niveau géotechnique (NG) |
| S3DI                                               | 4                   | 208,37                                       | 45,85                | 35,01                                         | 64,99                            | 3                        |
| S3DX                                               | 3                   | 246,35                                       | 112,25               | 113,19                                        | N/D                              | N/D                      |
| S3AL                                               | 2                   | 225,35                                       | 34,63                | 138,06                                        | N/D                              | N/D                      |
| S4                                                 | 2                   | 161,94                                       | 17,84                | 98,98                                         | 1,02                             | N/D                      |
| I1G                                                | 4                   | 133,13                                       | 19,75                | 23,60                                         | 76,40                            | 4                        |
| ROB1                                               | 2                   | 171,32                                       | 98,34                | 515,73                                        | N/D                              | N/D                      |
| ROB2                                               | 3                   | 233,20                                       | 55,05                | 58,64                                         | 41,36                            | 2                        |
| M8                                                 | 4                   | 127,87                                       | 20,00                | 24,88                                         | 75,12                            | 4                        |
| S3S0                                               | 2                   | 179,74                                       | 100,24               | 501,07                                        | N/D                              | N/D                      |
| Total                                              | 26                  |                                              |                      |                                               |                                  |                          |

Tableau 9. Niveaux de connaissance (NCC) sur le massif rocheux et niveaux géotechniques (NG) pour les essais de résistance tension (essais brésilien).

| Résistance en tension indirecte ( $\sigma_t$ ) |                     |                                              |                      |                                               |                                  |                          |
|------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Domaine                                        | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{X}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) | Niveau de connaissance (NCC) (%) | Niveau géotechnique (NG) |
| S3DI                                           | 10                  | 14,20                                        | 2,81                 | 14,13                                         | 85,87                            | 6                        |
| S3DX                                           | 5                   | 15,07                                        | 2,97                 | 24,48                                         | 75,52                            | 4                        |
| S3AL                                           | 7                   | 19,28                                        | 2,14                 | 10,27                                         | 89,73                            | 6                        |
| S4                                             | 10                  | 14,81                                        | 1,93                 | 9,32                                          | 90,68                            | 6                        |
| I1G                                            | 10                  | 8,07                                         | 1,86                 | 16,49                                         | 83,51                            | 5                        |
| ROB1                                           | 3                   | 14,78                                        | 5,58                 | 93,70                                         | 6,30                             | N/D                      |
| ROB2                                           | 10                  | 14,17                                        | 2,29                 | 11,55                                         | 88,45                            | 6                        |
| M8                                             | 9                   | 13,59                                        | 3,79                 | 21,45                                         | 78,55                            | 4                        |
| S3S0                                           | 8                   | 14,16                                        | 2,42                 | 14,28                                         | 85,72                            | 6                        |
| Total                                          | 72                  |                                              |                      |                                               |                                  |                          |

Tableau 10. Niveaux de connaissance sur le massif rocheux (NCC) et niveaux géotechniques (NG) pour les essais de double poinçonnement diamétral.

| Essai de double poinçonnement diamétral (Is50) |                     |                                              |                      |                                               |                                  |                          |
|------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------|----------------------|-----------------------------------------------|----------------------------------|--------------------------|
| Domaine                                        | Nombre d'essais (n) | Moyenne de l'échantillon ( $\bar{X}$ ) (MPa) | Écart-type (s) (MPa) | Erreur relative $E_r$ ( $\alpha = 0,05$ ) (%) | Niveau de connaissance (NCC) (%) | Niveau géotechnique (NG) |
| S3DI                                           | 13                  | 8,27                                         | 2,37                 | 17,34                                         | 82,66                            | 5                        |
| S3DX                                           | 4                   | 9,59                                         | 0,51                 | 8,43                                          | 91,57                            | 6                        |
| S3AL                                           | 5                   | 9,94                                         | 2,53                 | 31,62                                         | 68,38                            | 3                        |
| S4                                             | 16                  | 7,99                                         | 0,79                 | 5,25                                          | 94,75                            | 6                        |
| I1G                                            | 14                  | 4,90                                         | 1,89                 | 22,23                                         | 77,77                            | 4                        |
| ROB1                                           | 2                   | 9,37                                         | 3,07                 | 294,18                                        | N/D                              | N/D                      |
| ROB2                                           | 8                   | 7,54                                         | 0,93                 | 10,32                                         | 89,68                            | 6                        |
| M8                                             | 6                   | 6,69                                         | 0,70                 | 10,98                                         | 89,02                            | 6                        |
| S3S0                                           | 10                  | 8,06                                         | 2,19                 | 19,46                                         | 80,54                            | 5                        |
| Total                                          | 78                  |                                              |                      |                                               |                                  |                          |

## 5 DISCUSSION

Les niveaux de connaissance sur le massif rocheux tels que définis par Read et Stacey (2009) ont été modifiés afin d'inclure la notion d'ouvrage temporaire et permanent en milieu souterrain minier telle que suggérée par Gill et al. (2003 ; 2005). Les résultats obtenus selon la relation entre l'erreur relative (à 95%) et les niveaux de connaissance (NCC) pour le massif rocheux adaptés de Read et Stacey sont donc cohérents avec les critères développés par Gill et al. (2003 ; 2005). De plus, les critères proposés dans le cadre de cet article ne nécessitent pas le même effort de caractérisation à toutes les étapes d'un projet minier évitant notamment des coûts élevés en début de projet.

Lors des essais de résistance en compression uniaxiale, les méthodes suggérées par la Société internationale de mécanique des roches (SIMR) (Brown, 1981) demandent un minimum de 5 essais par type de roche. Lors des essais de résistance en tension, les méthodes suggérées par la SIMR (Brown, 1981) demandent un minimum de 10 essais par type de roche. Pour les essais de double poinçonnement diamétral (Is50), les méthodes suggérées par la SIMR (Brown, 1981) prévoient 10 essais par type de roche. Dans le cas d'une roche anisotrope, la méthode prévoit 20 essais de double poinçonnement par domaine lithologique. Ces méthodes suggérées doivent être respectées. L'approche proposée dans le cadre de cet article s'avère un complément à ces méthodes.

Il est intéressant de remarquer que pour les essais en compression uniaxiale, le nombre d'essais suggérés n'est jamais rencontré et le NG atteint est toujours inférieur à 4. Pour les deux autres tests, il arrive que le nombre d'échantillons requis ne soit pas atteint, mais que le NG atteigne 5 ou 6.

## 6 CONCLUSION

Sur la base d'une seule campagne de caractérisation du roc intact et considérant que le projet minier est au stade de la construction, les objectifs de cet article étaient, dans un premier temps, de quantifier la variabilité des résultats obtenus en laboratoire pour les essais de résistance en compression uniaxiale, de tension indirecte et de double poinçonnement. Dans un second temps, l'objectif était de proposer une méthodologie permettant de lier la variabilité des résultats aux niveaux de connaissance sur le massif rocheux proposés par Read et Stacey (2009).

La méthode suggérée afin de quantifier la variabilité des résultats est le calcul de l'erreur relative ( $E_r$ ) à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) selon la méthode du faible échantillonnage. Ensuite, la détermination du NCC pour le massif rocheux est effectuée selon l'erreur relative à 95% ( $\alpha = 0,05$ ) sur la moyenne vraie ( $E_v$ ).

Cette méthode permet de définir des cibles de caractérisation en fonction de l'avancement du projet minier en utilisant une version modifiée des niveaux de connaissance (NCC) sur le massif rocheux. Ces analyses statistiques permettent de mieux quantifier notre connaissance des propriétés du roc intact dans le cadre

d'un projet minier souterrain. Elles permettent également d'optimiser le nombre d'essais à réaliser tout en s'assurant de la représentativité des résultats. Finalement, elles permettent d'identifier de nouvelles cibles de caractérisation plus efficacement.

## 7 REMERCEMENTS

Les auteurs aimeraient remercier la compagnie Goldcorp inc., le FRQNT et le programme Mitacs accélération pour leur support financier. Les auteurs aimeraient aussi remercier le personnel du projet Éléonore (Goldcorp inc.) pour leur support à ce projet par l'accès au site et aux données.

## 8 RÉFÉRENCES

- Brown, E. T. 1981. Rock characterization, testing & monitoring : ISRM suggested methods. Publié pour la Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics by Pergamon Press. Oxford.
- Gill D.E., Corthésy R., et Leite M.H. 2003. 'Les valeurs pratiques des propriétés mécaniques des roches', Rapport technique :EPM RT ; 2003-05). 95 p.
- Gill, D. E., et al. 2005. Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. *Engineering Geology*, 78(1–2): 29-51.
- Hoek, E. 1998. Reliability of Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 35(1): 63-68.
- JORC. 2004. The Joint Ore Reserves Committee of The Australasian Institute of Mining and Metallurgy, Australian Institute of geoscientists and Minerals Council of Australia, Australasian Code for Reporting of Exploration Results, Mineral Resources and Ore Reserves, site internet visité le 27 April 2015, [http://www.jorc.org/docs/jorc2004web\\_v2.pdf](http://www.jorc.org/docs/jorc2004web_v2.pdf)."
- Košťák, B., Bielenstein, H. U. 1971. Strength distribution in hard rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 8(5): 501-521.
- Fillion, M-H. Hadjigeorgiou, J. 2013. Reliability of strength estimates based on limited laboratory data. *Slope Stability 2013*, P.M. Dight (ed), Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- Montgomery, D. C., Runger G. C. 2011. Applied statistics and probability for engineers, 5<sup>e</sup> éd., John Wiley and Son Inc.
- Read, J., Stacey P. 2009. Guidelines for Open Pit Slope Design, CSIRO publishing.
- Read, J. R. L. 2013. Data gathering, interpretation, reliability and geotechnical models. *Slope Stability 2013*, P.M. Dight (ed), Australian Centre for Geomechanics, Perth.
- Sari, M., Karpuz C. 2006. Rock variability and establishing confining pressure levels for triaxial tests on rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2): 328-335.