

Avis d'expert sur le rapport intitulé Technical Report : Horne 5 Project, Numerical Modelling and Risk Analysis de A2GC et Associates

Martin Grenon ing. PhD

15 octobre 2024

381

DD9.1

Projet Horne 5 à Rouyn-Noranda par
Ressources Falco Ltée

6211-08-020

Introduction

Le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE) a mandaté Martin Grenon pour donner un avis d'expert sur le potentiel sismique du projet Horne 5. Le mandat était plus spécifiquement de commenter, sous la forme d'une courte note technique, la méthodologie, les limitations et les conclusions du rapport ayant pour titre Technical Report : Horne 5 Project, Numerical Modelling and Risk Analysis préparé par A2GC et Associates. La note technique devait également introduire certains concepts associés à la sismicité induite par l'activité minière. Le libellé exact des questions se retrouve à l'annexe A.

Il est à noter que l'Université (Martin Grenon) prendra les mesures raisonnables afin d'effectuer les Services selon les règles de l'art normalement reconnus en matière de recherche universitaire, mais n'offre aucune garantie de résultats et ne garantit aucunement à l'Organisme que ces travaux seront utilisables dans tout litige devant les tribunaux.

Les prochaines sections présenteront tout d'abord certaines notions de base en lien avec la sismicité minière puis aborderont les éléments spécifiques en lien avec le rapport de A2GC.

Sismicité minière

La sismicité induite par l'activité minière dans les mines de roche dure est documentée depuis près de 100 ans (Potvin et Hudyma, 2001; Gibowicz et Kijko, 1994). Au cours des dernières décennies, avec l'exploitation de mines à de plus grandes profondeurs et sous hautes contraintes (in situ et induites), l'aléa sismique minier s'est accru.

La Figure 1, tirée de Hudyma et Potvin (2010), présente les principaux éléments associés à la sismicité induite par l'activité minière. Avant le début des travaux, le massif rocheux est caractérisé par un état de contrainte in situ. L'excavation de galeries et de chantiers va entraîner une redistribution de ces contraintes (contraintes induites). Le massif rocheux est caractérisé par la présence de structures géologiques : failles, contacts, intrusions, etc. Les propriétés géométriques et mécaniques de ces structures vont impacter leur comportement notamment en lien avec l'état de contraintes induites. Le massif rocheux est aussi caractérisé par des propriétés mécaniques caractérisant son comportement en lien avec la redistribution des contraintes.

Tous les mécanismes sources présentés à la Figure 1 sont associés à la redistribution des contraintes suite aux processus miniers. La Figure 1a présente un premier mécanisme source de la sismicité minière. Une redistribution des contraintes suite au dynamitage d'un chantier peut entraîner un mouvement le long d'une faille. Les événements sismiques caractérisés par une grande magnitude sont habituellement associés à ces mouvements. La Figure 1b présente la fracturation du massif rocheux, au pourtour d'une galerie minière, associée à la redistribution des contraintes. La Figure 1c présente un bris hors profil au pourtour d'un chantier. La Figure 1d indique qu'une différence importante entre les propriétés mécaniques de deux unités lithologiques peut engendrer un événement sismique. La Figure 1e montre la rupture d'un pilier de massif rocheux. La Figure 1f présente un exemple de la déformation du massif rocheux associée à l'augmentation des contraintes induites.

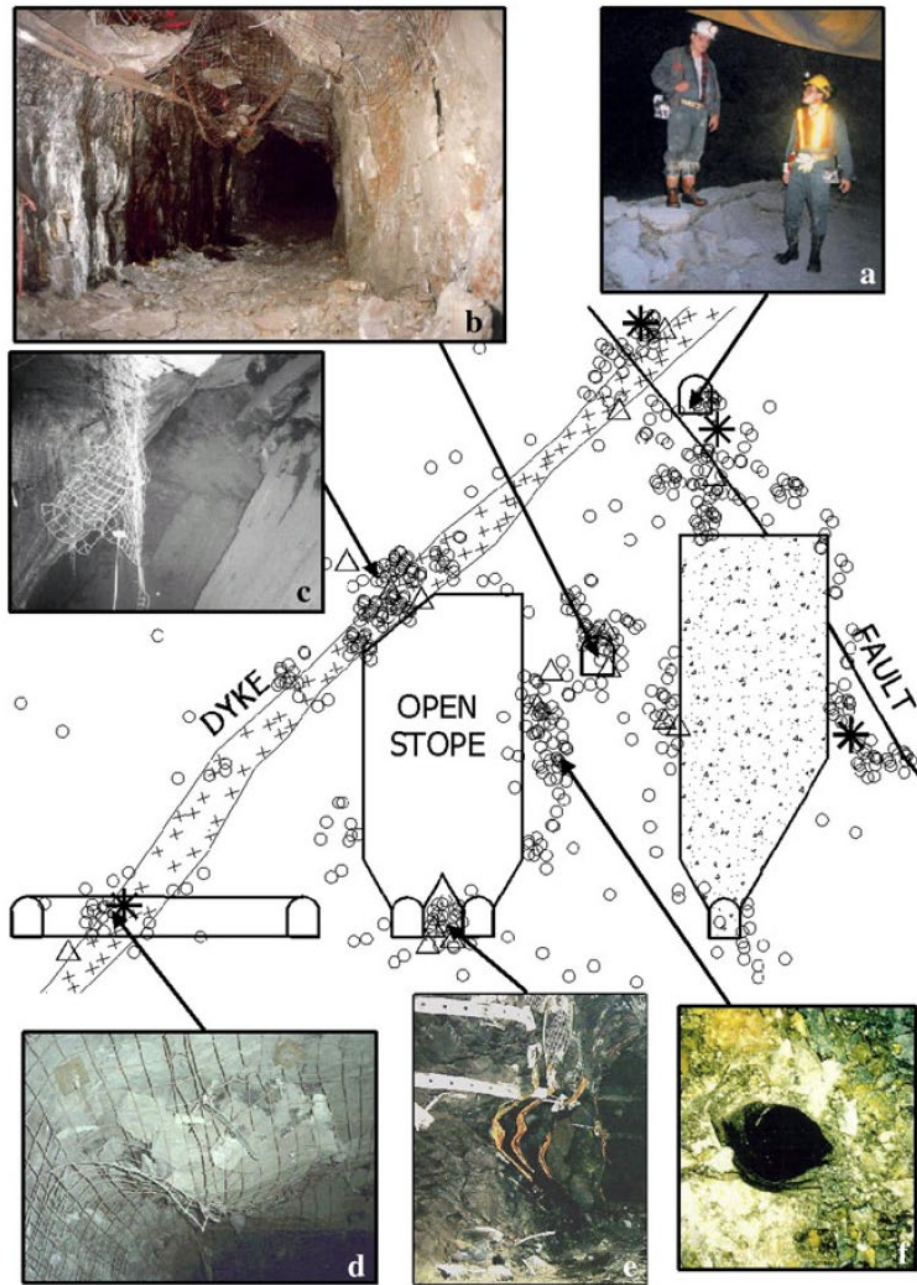


Fig. 1 Représentation schématique des sources de la sismicité minière, tirée de Hudyma et Potvin (2009)

La sismicité minière est directement associée aux contraintes induites par le minage et aux différentes propriétés du massif rocheux et du modèle structural. Le niveau de connaissance du régime structural et du massif rocheux évolue avec l'avancement d'un projet minier. Read et Stacey (2009) schématisent bien le niveau de connaissance du modèle structural et du massif rocheux aux différentes étapes d'un projet minier à ciel ouvert, Figure 2. Un niveau de connaissance similaire est attendu pour les mines souterraines. À l'étape de l'étude de faisabilité (FS) le niveau de confiance visé pour le modèle structural est de 45-70% et pour massif rocheux de 60-75%. Ceci implique qu'une incertitude importante est associée aux propriétés structurales

et du massif rocheux à cette étape. Il est important de noter que puisque les mines sont réalisées dans un matériau naturel, une incertitude va demeurer même lorsque la mine sera en exploitation. Donc à l'étape de la FS, il y a une incertitude sur les propriétés géométriques et mécaniques des structures et sur les propriétés mécaniques du massif rocheux. De plus, habituellement à l'étape de la FS il n'y a aucune mesure du tenseur de contraintes in-situ, les seules valeurs disponibles sont des valeurs trouvées dans la littérature pour des opérations minières similaire et à proximité.

Project level status	PROJECT STAGE				
	Conceptual	Pre-feasibility	Feasibility	Design and Construction	Operations
Geotechnical level status	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5
Geological model	Regional literature; advanced exploration mapping and core logging; database established; initial country rock model	Mine scale outcrop mapping and core logging; enhancement of geological database; initial 3D geological model	Infill drilling and mapping; further enhancement of geological database and 3D model	Targeted drilling and mapping; refinement of geological database and 3D model	Ongoing pit mapping and drilling; further refinement of geological database and 3D model
Structural model (major features)	Aerial photos and initial ground profiling	Mine scale outcrop mapping; targeted oriented drilling; initial structural model	Trench mapping; infill oriented drilling; 3D structural model	Refined interpretation of 3D structural model	Structural mapping on all pit benches; further refinement of 3D model
Structural model (fabric)	Regional outcrop mapping	Mine scale outcrop mapping; targeted oriented drilling; database established; initial stereographic assessment of fabric data; initial structural domains established	Infill trench mapping and oriented drilling; enhancement of database; advanced stereographic assessment of fabric data; confirmation of structural domains	Refined interpretation of fabric data and structural domains	Structural mapping on all pit benches; further refinement of fabric data and structural domains
Hydrogeological model	Regional groundwater survey	Mine scale airlift, pumping and packer testing to establish initial hydrogeological parameters; initial hydrogeological database and model established	Targeted pumping and airlift testing; piezometer installation; enhancement of hydrogeological database and 3D model; initial assessment of depressurisation and dewatering requirements	Installation of piezometers and 3 dewatering wells; refinement of hydrogeological database, 3D model, depressurisation and dewatering requirements	Ongoing management of piezometer and dewatering well network; continued refinement of hydrogeological database and 3D model
Intact rock strength	Literature values supplemented by index tests on core from geological drilling	Index and laboratory testing on samples selected from targeted mine scale drilling; database established; initial assessment of lithological domains	Targeted drilling and detailed sampling and laboratory testing; enhancement of database; detailed assessment and establishment of geotechnical units for 3D geotechnical model	Infill drilling, sampling and laboratory testing; refinement of database and 3D geotechnical model	Ongoing maintenance of database and 3D geotechnical model
Strength of structural defects	Literature values supplemented by index tests on core from geological drilling	Laboratory direct shear tests of saw cut and defect samples selected from targeted mine scale drill holes and outcrops; database established; assessment of defect strength within initial structural domains	Targeted sampling and laboratory testing; enhancement of database; detailed assessment and establishment of defect strengths within structural domains	Selected sampling and laboratory testing and refinement of database	Ongoing maintenance of database
Geotechnical characterisation	Pertinent regional information; geotechnical assessment of advanced exploration data	Assessment and compilation of initial mine scale geotechnical data; preparation of initial geotechnical database and 3D model	Ongoing assessment and compilation of all new mine scale geotechnical data; enhancement of geotechnical database and 3D model	Refinement of geotechnical database and 3D model	Ongoing maintenance of geotechnical database and 3D model
Target levels of data confidence					
Geology	>50%	50–70%	65–85%	80–90%	>90%
Structural	>20%	40–50%	45–70%	60–75%	>75%
Hydrogeological	>20%	30–50%	40–65%	60–75%	>75%
Rock mass	>30%	40–65%	60–75%	70–80%	>80%
Geotechnical	>30%	40–60%	50–75%	65–85%	>80%

Fig 2. Niveau de confiance des données géotechniques aux différentes étapes d'un projet minier, tirée de Read et Stacey 2009.

L'approche usuelle utilisée pour quantifier la redistribution des contraintes induites suite aux opérations de minage est la modélisation numérique. Sans entrer dans les détails des différentes méthodes et outils, les principaux intrants de ces approches numériques sont la géométrie des excavations planifiées et la séquence de minage, le régime de contraintes in situ, les propriétés géométriques et mécaniques du régime structural et les propriétés mécaniques du massif rocheux. L'incertitude associée aux données géotechniques ne doit pas limiter l'utilisation de méthodes numériques aux premières étapes d'un projet minier. Comme présentée à la Figure 3, dans le domaine de la mécanique des roches les analyses numériques sont souvent caractérisées par une faible compréhension du problème et un manque de données (zone 4). Ceci est particulièrement vrai à l'étape de la FS. Néanmoins, les modèles numériques sont essentiels aux premiers stades du projet afin de comprendre les mécanismes importants contrôlant le comportement du massif rocheux en lien avec la redistribution des contraintes. Au cours de la réalisation des travaux miniers, des données géomécaniques deviendront disponibles et pourront être intégrées aux modèles numériques. Les données d'instrumentation (comme celles des

systèmes sismiques, Mendecki et al 1999) permettront d'acquérir des données, de calibrer les modèles numériques et de revoir la conception au besoin. Plusieurs auteurs au fil des années ont lié la sismicité minière aux résultats de la modélisation numérique, Board et al (2001), Board (1994), Ryder (1988), etc.

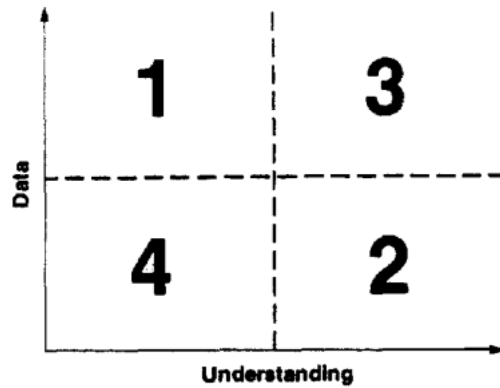


Fig 3. La classification de Holling pour les problèmes de modélisation, tirée de Starfield et Cundall (1988)

Deux grandes approches sont utilisées pour minimiser l'exposition des travailleurs aux risques sismiques : la modification des processus de minage (séquence d'excavation, taux d'extraction, tir à l'explosif pour rediriger les contraintes) et l'utilisation de systèmes de renforcement. Plusieurs auteurs discutent d'approches modifiant les processus de minage : Board et al (2001), Andrieux 2005, Rentzelos et al (2024), etc. Plusieurs auteurs abordent également la conception de systèmes de soutènement en lien avec le risque sismique : Kaiser et al (1995), Potvin et Hadjigeorgiou (2020), etc. D'autres approches opérationnelles sont également utilisées sur les sites pour réduire le risque sismique.

Rapport de A2GC

Cette section aborde les réponses spécifiques en lien avec le rapport produit par A2GC.

- *Regard sur la méthodologie : Est-ce que la modélisation a été effectuée de façon rigoureuse et selon les règles de l'art?*

Les travaux de modélisation présentés reposent sur la séquence de minage de l'étude de faisabilité (FS) du projet Horne 5. Les données géotechniques (structure et massif rocheux) utilisées sont également celles présentées dans la FS de Horne 5. Le régime de contraintes utilisé provient d'une étude portant sur le Bouclier Canadien, Maloney et Young (2006) et également utilisée dans la FS. Les données géotechniques brutes ne sont pas présentées en détail dans le rapport de A2GC et le niveau d'incertitude n'est pas discuté. Pour la présente note technique, il est considéré que ces données ont un niveau d'incertitude typique des données associées à une FS comme présenté à la Figure 2. Il est à noter que le rapport de A2GC indique qu'une campagne de caractérisation extensive a été réalisée à l'étape de la FS pour définir les propriétés du roc.

La section 3.1 du rapport de A2GC explique le choix du logiciel FLAC3D pour réaliser l'analyse numérique. Le choix d'une méthode continue est approprié pour les projets miniers où les contraintes induites sont considérées comme étant le principal défi géomécanique. La section 3.2 présente une intégration au modèle numérique des principales unités lithologiques et des failles identifiées lors de la FS. La section 3.3 présente les critères de rupture utilisés pour les différentes lithologies. L'approche utilisée correspond aux règles de l'art. L'état de contraintes in-situ a été modélisé en respectant les données de la FS. Il est mentionné que le tenseur de contraintes in-situ n'a pas été mesuré. Finalement, la géométrie des chantiers et la séquence de minage des 2165 chantiers de la mine Horne 5 (en accord avec le plan de minage de la FS) ont été modélisées, section 3.5. Pour limiter le temps de calcul, 10 chantiers sont minés simultanément. Cette approche est raisonnable à l'étape de la FS. Cette même section présente les principaux défis associés à la séquence de minage étudiée. Il est à noter que l'auteur de cette note n'a pas validé le modèle numérique. Il a uniquement accès au rapport.

La section 4 présente les résultats d'une analyse du potentiel sismique (seismic potency) pour chacune des étapes de minage en fonction des résultats des analyses numériques. Cette approche est rigoureuse et selon les règles de l'art pour une FS. Cette approche permet d'identifier les étapes de minage les plus critiques en lien avec le potentiel sismique. Il est important de rappeler que ces modèles numériques devront être validés lors de la mise en exploitation de la mine et qu'un système devra être utilisé pour faire le monitoring de l'activité sismique.

La section 5 du rapport présente l'approche utilisée pour quantifier le risque géomécanique en fonction de la contrainte déviatorique normalisée. Cette approche est communément utilisée en littérature pour ce type de travaux afin d'identifier le niveau de risque lorsque les contraintes induites anticipées sont élevées. Les étapes de minage les plus critiques peuvent donc être identifiées.

La section 6 discute de l'impact des contraintes induites sur les infrastructures minières. La section 6.7 présente une courte note sur le Smelter Horne. Une analyse numérique des déplacements anticipés est présentée. Un déplacement maximal de 0.5cm est calculé. A2GC indique que le modèle utilisé ne permet pas de modéliser de blocs rocheux discrets qui pourraient être présents. Selon les informations disponibles, la FS ne semblait pas indiquer la présence importante de structures discrètes à cet endroit. L'approche utilisée est adéquate.

La section 7 présente les analyses relatives au pilier barrière (Barrier Pillar). Ce pilier est situé entre la mine Horne historique et Horne 5. Une analyse numérique des contraintes induites dans le pilier a été réalisée pour déterminer la possible fracturation du pilier aux différentes étapes de minage. La section 7.2 analyse le potentiel de génération de grands événements sismiques. L'approche des chemins de contraintes est utilisée pour déterminer la violence de la rupture. Cette approche est la meilleure disponible à l'étape de la FS. Le calcul de la contrainte déviatorique est également utilisé pour déterminer les étapes de minage associées à un haut risque géomécanique. Les conclusions tirées des résultats de la modélisation numérique en fonction des modèles et des hypothèses utilisés semblent raisonnables.

La section 8 présente des analyses associées au comportement (le glissement) de failles principales qui sont habituellement associées aux éléments sismiques majeurs. L'approche numérique proposée consiste à étudier le comportement de la faille Andésite. Cette faille est la seule identifiée à l'étape de la FS pouvant avoir des effets importants en surface. L'approche ESS

proposée par Ryder (1988) est appropriée pour estimer la taille des événements sismiques associés. Les suppositions faites pour réaliser les simulations sont raisonnables à l'étape de la FS et apparaissent conservatrices. Les calculs du PPV, basés sur l'approche de Kaiser et al (1996), sont en accord avec les pratiques dans le domaine.

- *Regard sur les limitations : Les limitations énoncées dans l'étude fragilisent-elles les résultats de la modélisation? Si oui, cela pourrait-il entraîner une sous-estimation des risques?*

La section 9 présente les limitations des analyses numériques réalisées. Comme mentionné précédemment, à l'étape de la FS une incertitude importante est associée aux connaissances du régime structural et des propriétés mécaniques du massif rocheux. Ceci est tout à fait usuel, normal et acceptable pour un projet minier à cette étape. De nouvelles informations deviendront disponibles avec l'avancement du projet minier et devront être intégrées aux analyses. Le comportement du massif rocheux et la performance des excavations devront également être évalués à toutes les étapes de la séquence de minage. Ces données devront être utilisées pour calibrer et bonifier le modèle numérique. Au besoin, le plan minier devra être revu. Les limitations énoncées dans l'étude ne fragilisent pas l'étude, mais la contextualisent dans le cadre des étapes associées à un projet minier. Néanmoins, il demeure possible que l'aléa sismique soit sous-évalué. Un monitoring sismique rigoureux dès le début de la mine permettra de revoir au besoin le plan de minage.

- *Regard sur les conclusions : Quelles conclusions tirez-vous des résultats de cette modélisation, par exemple au regard des risques pour la population et les infrastructures (installations de la Fonderie Horne et résidences limitrophes notamment)?*

Sur la base du niveau de connaissances géotechniques actuel et des travaux de modélisation réalisés dans le cadre de cette étude, les conclusions semblent adéquates. Le mandat n'incluait pas la vérification des modèles numériques. Les travaux de modélisation présentés sont à la fine pointe de la pratique actuelle. La construction des modèles est rigoureuse et l'évaluation des contraintes induites aux différentes étapes de minage également. Les estimations du potentiel sismique, de la sismicité induite dans le pilier barrière, et de la sismicité associée aux déplacements le long de la faille Andésite sont tout à fait adéquates. Sur la base de ces travaux, j'arrive aux mêmes conclusions associées aux mêmes limitations.

En espérant que cette note technique satisfait vos besoins et vos attentes. N'hésitez pas à me contacter si des détails ou éclaircissements supplémentaires étaient requis.

Martin GRENON, professeur, ing., PhD
Département de génie des mines, de la métallurgie et des matériaux
Faculté des sciences et de génie
Université Laval

Reference

1. Andrieux P. 2005. Application of rock engineering systems to large-scale confined distress blasts in underground pillars. Doctoral dissertation. Quebec: Laval University;
2. Board, M. (1994). Numerical Examination of Mining-Induced Seismicity. Doctoral thesis, University of Minnesota, Department of Civil, Environmental and Geo-Engineering, 255 pp. Minneapolis, MN, USA.
3. Board, M., R. Brummer, and S. Seldon (2001). Use of Numerical Modeling for Mine Design Evaluation. In “Underground Mining Methods - Engineering Fundamentals and International CaseStudies,” Handbook of the Society of Mining Engineers (W. Hustrulid and R. Bullock, Eds.),Chapter 58, pp. 483-491.
4. Gibowicz, S.J. and Kijko, A. (1994) An introduction to mining seismology. 1st edition. San Diego,Academic Press, 396 p.
5. Hudyma, M., Potvin, Y.H. An Engineering Approach to Seismic Risk Management in Hardrock Mines. *Rock Mech Rock Eng* **43**, 891–906 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0070-0>
6. Kaiser, P., D. Morrison, G. Swan, M. Neumann, V. Kazakadis, and S. Talebi (1996). Rockburst Research Handbook. Published by the Mining Research Directorate, 976 pp. Sudbury, ON, Canada.
7. Mendecki, A.J., van Aswegen, G. and Mountfort, P. (1999) A guide to routine seismic monitoring in mines. A Handbook on Rock Engineering Practices for Tabular Hard Rock Mines. (Editors A.J. Jager and J.A. Ryder), Creda Communications, Cape Town. 371 p.
8. Potvin Y, Hudyma MR (2001) Seismic monitoring in highly mechanized hardrock mines in Canada and Australia. In: Van Aswegen G, Durrheim R, Ortlepp D (eds) Keynote address in the proceedings of the fifth international symposium on rockburst and seismicity in mines (RaSiM 5), pp 267–280, Johannesburg,
9. Potvin Y, Hadjigeorgiou J (2020) Ground Support for underground mines. Australian center for geomechanics.
10. Rentzelos, T, Andersson, J, Sjöberg, J, Jonsson, L, Dahnér, C, Swindell, R & Kulcsar, Z 2024, 'Evaluation of alternative mining sequences with consideration of barrier pillar placement at LKAB Kiirunavaara mine', in P Andrieux & D Cumming-Potvin (eds), Deep Mining 2024:
11. Read, John Stacey, Peter. (2009). Guidelines for Open Pit Slope Design (pp. 216). CSIRO Publishing.
12. Starfield, Cundall,Towards a methodology for rock mechanics modelling,International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts,Volume 25, Issue 3,1988,Pages 99-106,Proceedings of the 10th International Conference on Deep and High Stress Mining, pp. 327-340, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2465_16

Annexe A

Éléments techniques de l'avis demandé

Volet 1 - Questions d'ordre général sur la sismicité induite

- Qu'est-ce qui distingue un événement sismique induit par l'exploitation minière par rapport à un séisme d'origine naturelle, notamment à l'égard de ses caractéristiques et de ses conséquences?
- Depuis quand ce phénomène est-il étudié et est-il bien documenté?
- Quels sont les principaux facteurs (naturels ou anthropiques) qui peuvent favoriser l'occurrence d'événements sismiques miniers?
- Quelles sont les bonnes pratiques généralement recommandées pour atténuer ou limiter ce type d'évènements?

•

Volet 2 - Questions sur l'étude de modélisation du potentiel sismique du projet Horne 5
([DA1.7, p. 7 à 108 pdf](#))

- Regard sur la méthodologie : Est-ce que la modélisation a été effectuée de façon rigoureuse et selon les règles de l'art?
- Regard sur les limitations : Les limitations énoncées dans l'étude fragilisent-elles les résultats de la modélisation? Si oui, cela pourrait-il entraîner une sous-estimation des risques?
- Regard sur les conclusions : Quelles conclusions tirez-vous des résultats de cette modélisation, par exemple au regard des risques pour la population et les infrastructures (installations de la Fonderie Horne et résidences limitrophes notamment)?