

Summary

Seismicity in underground mines is the result of stress perturbations and rock fractures induced by excavations. In the last decades, the problem of mining-induced seismicity has become more and more important due to the increasing depth of underground mines. Understanding mining-induced seismicity is, then, a fundamental purpose for improving seismic hazard assessment in deep mining operations, for mine infrastructure stability and mine workers safety.

With the aim of better understanding interactions between stress modifications induced by mining and the generation of seismic activity, a deep area of Garpenberg mine (Sweden) was instrumented by Ineris with microseismic probes and geotechnical cells. The main objective of this thesis is to realize a comparative analysis of the recorded seismic and geotechnical data, along with a 3D numerical model, taking into account the mining sequence and the geological conditions.

As a first major contribution of this thesis, recorded microseismic activity between 2015 and 2016 (~700 events) has been analyzed and interpreted. Results show a clear dependence between blasts and microseismic events, even if the rock mass response to mining appears to be very variable across space and time. Two seismic clusters are observed: one located in the major production area (Central Cluster) and another (Right Cluster) located at some distance from the excavations, in a zone characterized by a heterogeneous distribution of weak (talc) and stiff (limestone, polymetallic ore) rocks. Seismic source parameters analysis demonstrates that the two clusters are characterized by different dynamics, with Right Cluster events being mainly controlled by geological heterogeneities. Indeed, weak rocks impose high stress concentrations in the stiff rock masses, inducing a mechanism of stress transfer from the exploitation area toward the weak zone.

Geotechnical data analysis shows important strain changes throughout the study period, whose intensity seems to be more correlated with mining sequence and the proximity of weak geological zones than to the amount of extracted rock mass. Geotechnical measurements also show that mechanisms of differed strains take place at Garpenberg mine, and that seismic activity decays proportional to the decaying rate of measured strains. This latter observation implies that, in addition to the immediate stress change induced by blasting, aseismic creep may be another mechanism driving seismicity at Garpenberg mine.

A 3D elasto-plastic geo-mechanical numerical model was run considering a precise reconstruction of the geology, the virgin stress state and the mine sequence. The model simulates 70 excavation steps. The results show how the mining sequence, with one column of stopes being exploited upward and downward simultaneously, leads to high stress concentrations in the remaining pillar and to strong plastic deformation within the weak rocks.

In the last part of this thesis, model results have been compared with seismic data analysis to investigate whether correlations exist. Results shows that mine-wide numerical models can be suitable for the analysis of mining induced seismicity at large-scale. However, there are some aspects of the induced seismicity that the model cannot fully explain. This is particularly true for remote seismicity occurring at a distance from excavations, while better correlations are found when considering seismicity close to production areas. Further analysis will be needed in future works to

deeper characterize remote seismicity and found appropriate constitutive law able to represent it within the model.

Résumé

La sismicité dans les mines souterraines est le résultat des perturbations du champ de contraintes naturelles qui sont à l'origine de phénomènes de rupture dans le massif encaissant. Au cours des dernières décennies, le problème de la sismicité induite par l'exploitation minière est devenu de plus en plus important en raison de la profondeur croissante des mines souterraines. La compréhension de la sismicité induite par l'exploitation minière est donc un objectif fondamental pour améliorer l'évaluation des risques associés et pour garantir la stabilité des infrastructures minières, ainsi que la sécurité des mineurs.

Afin de mieux comprendre les interactions entre les modifications des contraintes induites par l'exploitation minière et la génération d'activité sismique, une zone profonde de la mine de Garpenberg (Suède) a été instrumentée par l'Ineris avec de sondes microsismiques et de cellules géotechniques. L'objectif principal de cette thèse est de réaliser une analyse comparative des données sismiques et géotechniques enregistrées, ainsi qu'un modèle numérique 3D, prenant en compte la séquence minière et les conditions géologiques.

Comme première contribution majeure de cette thèse, l'activité microsismique enregistrée entre 2015 et 2016 (~700 événements) a été analysée et interprétée. Les résultats montrent une nette dépendance entre les tirs de productions et les phénomènes microsismiques, même si la réaction des masses rocheuses à l'exploitation minière est très variable dans l'espace et le temps. Deux clusters principaux sont observés : l'un situé dans la zone de production (cluster central) et l'autre (cluster droit) situé à une certaine distance des excavations, dans une zone caractérisée par une distribution hétérogène de roches faibles (talc) et dures (calcaire, minerai polymétallique). L'analyse des paramètres à la sources des événements sismiques montre que les deux clusters sont caractérisés par des dynamiques différentes, les événements du cluster droit étant principalement contrôlés par des hétérogénéités géologiques.

Les données géotechniques montrent des variations de déformation importantes tout au long de la période d'étude, dont l'intensité semble être plus corrélée à la séquence minière et à la proximité de zones géologiques faibles qu'à la quantité de masse rocheuse extraite. Les mesures géotechniques montrent également que des mécanismes de fluage se produisent et que l'activité sismique décroît proportionnellement au taux de diminution des déformations mesurées. Cette dernière observation implique que le fluage peut être un autre mécanisme menant à la sismicité, s'ajoutant au changement de contrainte immédiat induit par les tirs de production.

Un modèle géo-mécanique élasto-plastique 3D a été réalisé à partir d'une reconstruction précise de la géologie, de l'état de contrainte vierge et de la séquence minière. Le modèle numérique simule 70 étapes d'excavation. Les résultats montrent comment la séquence d'exploitation minière conduit à de fortes concentrations de contraintes dans le pilier restant au tour des excavations et à une forte déformation plastique dans les roches faibles.

Dans la dernière partie de cette thèse, les résultats du modèle ont été comparés à l'analyse des données sismiques pour déterminer s'il existe des corrélations. Les résultats montrent que les modèles numériques à l'échelle de la mine peuvent être des outils puissants pour étudier la sismicité induite à grande échelle. Cependant, il y a certains aspects de la sismicité induite que le modèle ne

peut expliquer entièrement. Cela est le cas pour la sismicité déclenchée à distance des excavations, alors que de meilleures corrélations sont trouvées lorsque l'on considère la sismicité à proximité des zones de production. D'autres analyses seront nécessaires dans les travaux futurs pour mieux caractériser la sismicité à distance et trouver des lois constitutives appropriées capable de la représenter dans le modèle.