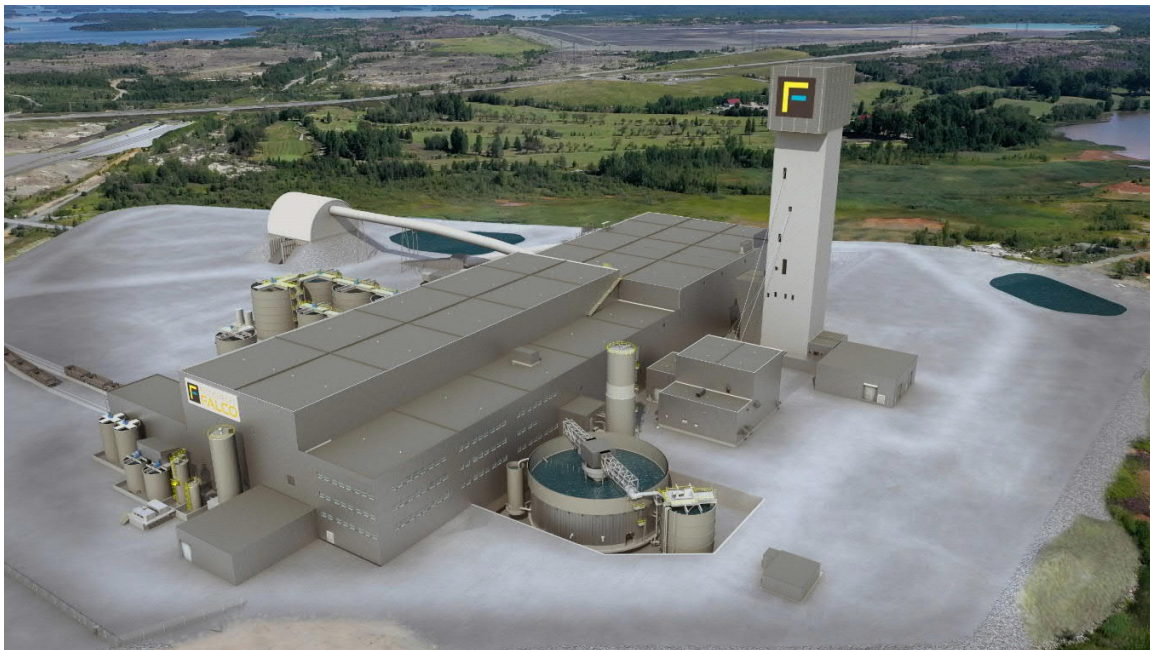




Revue de littérature sur les effets de la sismicité induite à l'échelle mondiale



13 septembre 2024

Revue de littérature sur les effets de la sismicité induite à l'échelle mondiale

Rapport réalisé pour :

Préparé par Soft dB

Septembre 2024

N/Réf. : CNS-24-06-07-M

Rapport No : #001

Révision : 01

Table des matières

1	Contexte et objectifs	4
2	Introduction.....	4
3	Séismes induits par l'exploitation minière.....	6
3.1	Mécanismes d'apparitions	6
3.2	Caractéristiques spécifiques des séismes induits	7
3.3	Échelles de perception.....	7
3.4	Courbes de fragilité	8
3.5	Prévention des risques	9
4	Evénements sismique reportés	10
4.1	Canada.....	10
4.2	Europe	14
4.3	Autres événements	16
5	Conclusions	17
6	Références	17

Liste des figures

Figure 1 :	Classification des causes d'événements sismiques répondants aux activités humaines [1]	5
Figure 2 :	Magnitudes associées aux causes d'événements sismiques [1]	5
Figure 3 :	Mécanismes de génération d'événements sismiques induit par une activité minière [2]	6
Figure 4 :	Échelle modifiée de Mercalli [11-12]	8
Figure 5 :	Courbes de fragilités (PGV – Peak Ground Velocity) [18].....	8
Figure 6 :	Échelle de dégâts [19]	9
Figure 7 :	Étapes de prise en compte de la sismicité induite [20]	10
Figure 8 :	Nombre d'événements $M_n > 3$ par mines – de 1985 à 2021 [9]	11
Figure 9 :	Cartes isoséistes événements proches de la ville de Saskatoon [3]	12
Figure 10 :	Incident sismique relevé en Europe et description des dommages associés [6]	14
Figure 11 :	Carte des réactions à la secousse – Événement sismique du 26 juin 2021 [7]	15
Figure 12 :	Bris d'objets selon témoignages individuels [7]	15
Figure 13 :	Présence de fissures larges et profondes sur bâtiments [7]	16
Figure 14 :	Autres événements reportés à travers le monde [21]	16

Liste des tableaux

Tableau 1:	Événements sismiques induits par des activités minières relevés au Canada [1]	13
------------	---	----

1 Contexte et objectifs

Ressources Falco prévoit de construire une mine souterraine à des profondeurs allant de 700 mètres à 2 kilomètres, et à environ 400 mètres à l'horizontale des résidences à Rouyn-Noranda.

Ce projet fait l'objet d'une évaluation par le Bureau d'audiences publiques sur l'environnement (BAPE). Lors de l'audience du 28 août 2024, 19h à Rouyn-Noranda, le Président de la Commission du BAPE a demandé à Mme Hélène Cartier, porte-parole pour le projet, de réaliser une « revue de la littérature scientifique [...] pour montrer à l'échelle mondiale quelle est l'intensité à partir de laquelle des effets importants ou des conséquences importantes se produisent par rapport aux effets sismiques induits ». Ressources Falco a donc mandaté Soft dB afin d'effectuer cette revue de la littérature. L'objectif principal de celle-ci est d'analyser les publications disponibles sur ce sujet afin d'estimer, dans la mesure du possible, la magnitude des séismes induits pouvant entraîner des conséquences significatives.

Cette revue comprend donc :

- Des exemples d'événements sismiques induits par des mines existantes;
- La magnitude des événements sismiques générés ainsi que l'évaluation des dommages éventuels causés aux résidences les plus proches.

Pour ce projet de mine, Ressources Falco anticipe des événements pouvant atteindre des magnitudes allant jusqu'à 3,5 sur l'échelle de Richter ; les événements présentés dans cette revue sont donc de magnitudes comparables.

2 Introduction

Le catalogue en ligne *HiQuake* (consulté pour la dernière fois le 05/09/2024) offre un aperçu global de la sismicité induite à travers le monde, en répertoriant plus de 1 315 événements induits depuis 1868 et documentés dans des publications scientifiques [1].

Ce catalogue confirme que la survenue d'événements sismiques en réponse aux activités humaines est un phénomène observé dans divers types d'opérations industrielles. La Figure 1 présente une classification des causes des événements sismiques induits par des activités humaines : les opérations liées à l'exploitation minière représentent une part significative des événements sismiques relevés.

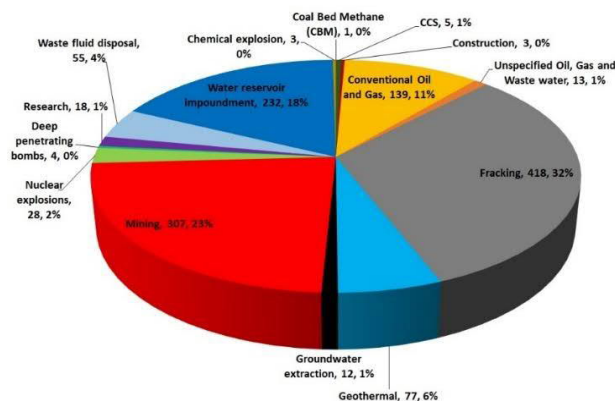


Figure 1 : Classification des causes d'événements sismiques répondants aux activités humaines [1]

Comme le montre la Figure 2, la magnitude moyenne des événements sismiques induits par des activités minières est située entre 3.5 et 4 : la magnitude maximale des événements anticipés par Ressources Falco est donc dans la moyenne de ceux reportés.

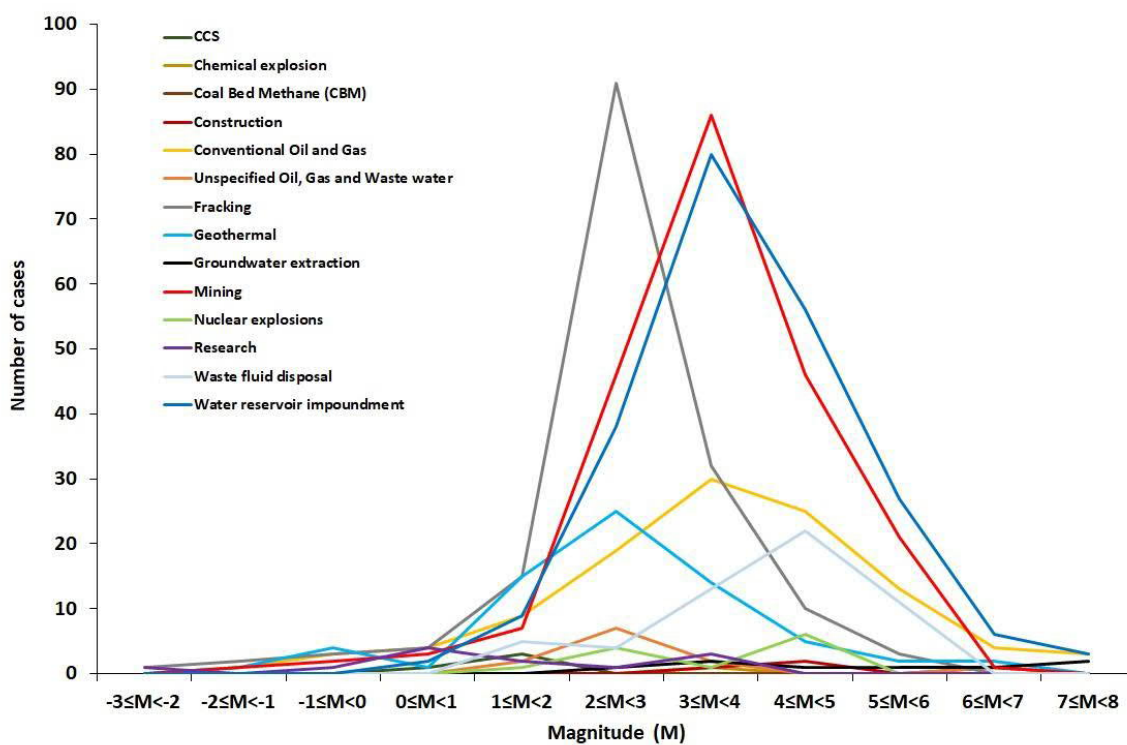


Figure 2 : Magnitudes associées aux causes d'événements sismiques [1]

3 Séismes induits par l'exploitation minière

3.1 Mécanismes d'apparitions

La Figure 3 présente six modèles théoriques expliquant l'apparition de sismicité induite dans les mines souterraines [2]. Le premier modèle, intitulé effondrement de cavité (Figure 3-a), peut se manifester de deux façons :

- Un coup de terrain au plafond de la mine, provoquant l'expulsion violente d'une masse rocheuse importante vers le bas;
- La chute d'une grande masse de roche fragilisée par l'exploitation, principalement sous l'effet de la gravité (éboulement).

Il est à noter que l'éboulement génère nettement moins d'énergie sismique qu'un coup de terrain. Le deuxième modèle, l'éclatement de pilier (Figure 3-b), résulte de la combinaison de deux types de forces :

- Des forces convergentes liées à l'avancement du front de taille (processus élastique);
- Des effets différés dépendants du temps (processus inélastique).

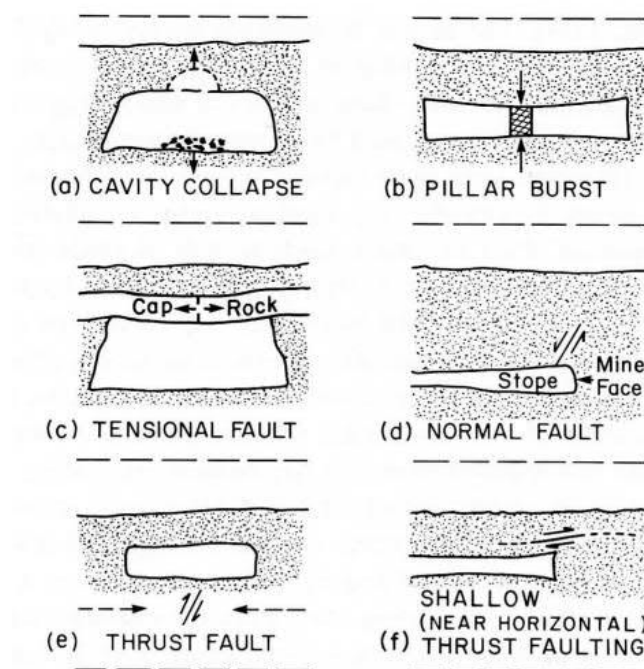


Figure 3 : Mécanismes de génération d'événements sismiques induit par une activité minière [2]

La rupture en traction de la roche de couverture au-dessus d'une mine, illustrée dans la Figure 3-c, peut se produire près du centre d'une vaste excavation, là où l'affaissement du toit est le plus prononcé. La Figure 3-d présente les dislocations en bordure et failles broyées :

- Ce type de fracturation est la plus courante;
- Se produisent près du front de taille;
- Résultent du dynamitage et de la fermeture de volume.

Les Figure 3-e et Figure 3-f représentent respectivement les failles de chevauchement et les failles de chevauchement peu profondes et quasi horizontales. Celles-ci :

- Peuvent se produire sous ou au-dessus de la mine;
- Surviennent quand la contrainte principale maximale est horizontale;
- Déclenchées par une réduction importante de la contrainte verticale;
- Peuvent initier un glissement dans le milieu intact ou activer une faille préexistante.

3.2 Caractéristiques spécifiques des séismes induits

Les caractéristiques spécifiques des tremblements miniers expliquent des différences de capacité destructrice par rapport aux tremblements de terre naturels :

- Fréquences élevées : Les tremblements induits par les mines ont généralement des fréquences élevées, entre 10 Hz et 50 Hz. Cela implique qu'ils sont peu susceptibles de provoquer une réponse structurelle des bâtiments ayant des fréquences naturelles basses. En général, les structures avec des fréquences naturelles inférieures à 2 Hz ne réagissent pas à ce type d'événements. Les immeubles de grande hauteur, par exemple, ne répondent pas à ce type d'excitation sismique, car leurs fréquences naturelles sont bien inférieures à 2 Hz [17] ;
- Profondeur des épicentres : Les tremblements miniers se produisent à des épicentres relativement peu profonds, typiquement entre 2 et 4 km de profondeur. Cela signifie que leur propagation est limitée à une zone restreinte ;
- Atténuation rapide : L'atténuation des tremblements miniers est rapide. Par exemple, une accélération de 0,39 g mesurée à 2,5 km se réduit à 0,13 g à une distance de 10 km [8].

3.3 Échelles de perception

Les vibrations induites par les tremblements miniers peuvent cependant être perçues et considérées alarmantes par la population [17-18].

Afin d'évaluer l'intensité perçue d'un séisme, l'échelle modifiée de Mercalli est utilisée. Celle-ci est présentée Figure 4. L'intensité perçue est également comparée à des niveaux vibratoires (vitesse et accélération).

Average peak velocity (centimeters per second)	Intensity value and description	Average peak acceleration (g is gravity=9.80 meters per second squared)
	I. Not felt except by a very few under especially favorable circumstances. (I Rossi-Forel scale)	
1-2	IV. During the day felt indoors by many, outdoors by few. At night some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make creaking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing automobiles rocked noticeably. (IV to V Rossi-Forel scale)	0.015g-0.02g
2-5	V. Felt by nearly everyone, many awakened. Some dishes, windows, and so on broken; cracked plaster in a few places; unstable objects overturned. Disturbances of trees, poles, and other tall objects sometimes noticed. Pendulum clocks may stop. (V to VI Rossi-Forel scale)	~0.04g
5-8	VI. Felt by all, many frightened and run outdoors. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster and damaged chimneys. Damage slight. (VI to VII Rossi-Forel scale)	0.06g-0.07g
8-12	VII. Everybody runs outdoors. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken. Noticed by persons driving cars. (VIII Rossi-Forel scale)	0.10g-0.15g
20-30	VIII. Damage slight in specially designed structures; considerable in ordinary substantial buildings with partial collapse; great in poorly built structures. Panel walls thrown out of frame structures. Fall of chimneys, factory stack, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. Sand and mud ejected in small amounts. Changes in well water. Persons driving cars disturbed. (VIII to IX Rossi-Forel scale)	0.25g-0.30g
45-55	IX. Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb; great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations. Ground cracked conspicuously. Underground pipes broken. (IX to X Rossi-Forel scale)	0.50g-0.55g
More than 60	X. Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations; ground badly cracked. Rails bent. Landslides considerable from river banks and steep slopes. Shifted sand and mud. Water splashed, slopped over banks. (X Rossi-Forel scale)	More than 0.60g
	XI. Few, if any, (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Broad fissures in ground. Underground pipelines completely out of service. Earth slumps and land slips in soft ground. Rails bent greatly.	
	XII. Damage total. Waves seen on ground surface. Lines of sight and level distorted. Objects thrown into the air.	

Figure 4 : Échelle modifiée de Mercalli [11-12]

3.4 Courbes de fragilité

Des courbes de fragilité, basées sur des observations empiriques ont été proposées [18] : celles-ci sont proposées en Figure 5. Elles concernent un type de construction particulier (« adobe ») et ont été construites à l'aide de sondages réalisés au sein de 13 communautés proches d'un champ de géothermique. Il s'agit donc d'une étude spécifique qui prend en compte divers facteurs propres au site étudié. L'échelle de dégâts est celle proposée par le FEMA et présentée en Figure 6 [19]. L'auteur indique par ailleurs que la vulnérabilité d'une structure ou d'un type de bâtiment peut être estimée de manière déterministe (par exemple, par l'établissement de courbes de *pushover*) ou empiriquement à partir de relevés de dommages après séisme et de statistiques dérivées.

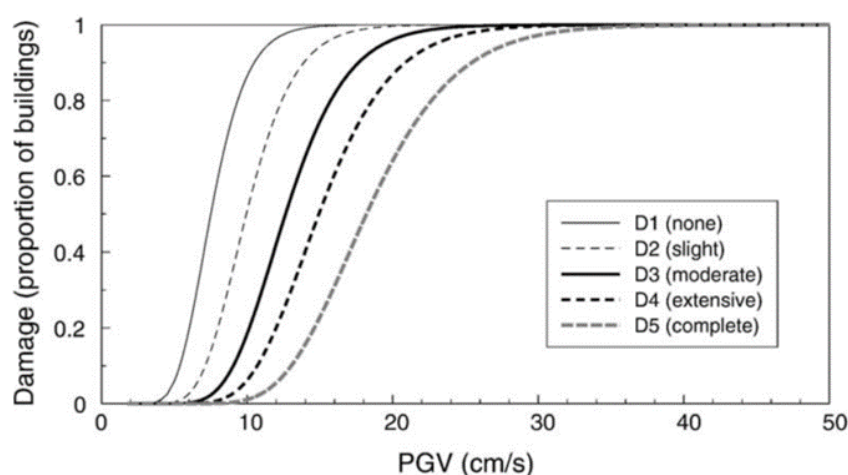


Figure 5 : Courbes de fragilités (PGV – Peak Ground Velocity) [18]

Damage State		Description
	Slight	Small plaster cracks at corners of door and window openings and wall-ceiling intersections; small cracks in masonry chimneys and masonry veneers. Small cracks are assumed to be visible with a maximum width of less than 1/8 inch (cracks wider than 1/8 inch are referred to as "large" cracks).
	Moderate	Large plaster or gypsum-board cracks at corners of door and window openings; small diagonal cracks across shear wall panels exhibited by small cracks in stucco and gypsum wall panels; large cracks in brick chimneys; toppling of tall masonry chimneys.
	Extensive	Large diagonal cracks across shear wall panels or large cracks at plywood joints; permanent lateral movement of floors and roof; toppling of most brick chimneys; cracks in foundations; splitting of wood sill plates and/or slippage of structure over foundations.
	Complete	Structure may have large permanent lateral displacement or be in imminent danger of collapse due to cripple wall failure or failure of the lateral load resisting system; some structures may slip and fall off the foundation; large foundation cracks. Three percent of the total area of buildings with Complete damage is expected to be collapsed, on average.

Figure 6 : Échelle de dégâts [19]

Note : Les courbes de *pushover* (ou courbes de poussée) sont des outils utilisés en ingénierie sismique pour évaluer la performance sismique d'une structure. Elles représentent la réponse non linéaire d'un bâtiment soumis à une force latérale croissante, simulant ainsi les effets d'un tremblement de terre.

3.5 Prévention des risques

Un document, édité par le département américain de l'énergie, propose un protocole de prévention relatif aux séismes induits par des sites de géothermies. Ce protocole vise à fournir des directives pour gérer la sismicité induite. Les points clés sont les suivants sont présentés en Figure 7.

Il s'agit d'un document évolutif destiné au public, aux régulateurs et aux opérateurs géothermiques. Le protocole souligne l'importance d'une communication transparente avec les parties prenantes, notamment le public et les autorités locales.

Il reconnaît que chaque projet est unique et que le protocole doit être adapté aux conditions locales spécifiques. Ce document vise à rassurer le public et les régulateurs sur la sécurité des technologies géothermiques.

The following steps are proposed for addressing induced seismicity issues as they relate to the whole project.



Figure 7 : Étapes de prise en compte de la sismicité induite [20]

4 Événements sismique reportés

4.1 Canada

Le Tableau 1 présente les événements sismiques majeurs induits par des activités minières relevés jusqu'à nos jours [1].

Pour chacun de ces événements relevés, des publications sont associées : celles-ci traitent principalement de techniques de monitoring de ces événements avec pour objectif principal, le développement de technique visant à prévenir les destructions d'infrastructures minières (barres d'ancrages, treillis métalliques, ...).

La Figure 8 présente le nombre d'événements dont la magnitude était supérieure à 3 M_n considérant des mines canadiennes : il apparaît que ce type d'événement est fréquent et corrobore les observations mises en évidence par la Figure 2.

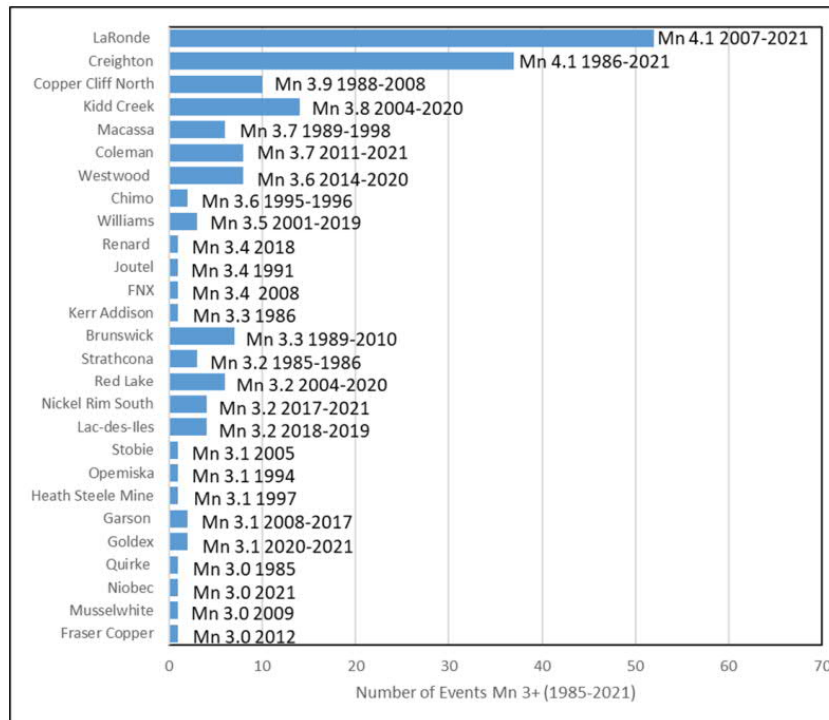


Figure 8 : Nombre d'événements $M_n > 3$ par mines – de 1985 à 2021 [9]

La publication de Gendzwill & Al. [3] détaille plusieurs événements sismiques, dont 4 ayant survénus à proximité de Saskatoon, ville reportée comme la plus proche (localisée à environ 6km des épicentres des événements). La magnitude maximale relevée fut de 4 m_b .

Comme le montrent les cartes isoséistes présentées en Figure 9 (ces cartes montrent les zones d'intensité sismique égale - mesurée par les effets d'un séisme à la surface et représentées par des contours autour de l'épicentre), tous les événements reportés n'ont pas été ressentis à Saskatoon. En revanche, ces événements sont reportés comme « *felt with intensity*¹ » dans un rayon inférieur à 1 km de l'épicentre. Cette publication reporte des dégâts mineurs au sein de la mine mais il n'est pas fait mention de dégâts au sein de Saskatoon.

¹ <https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/info-gen/scales-echelles/mercalli-en.php>

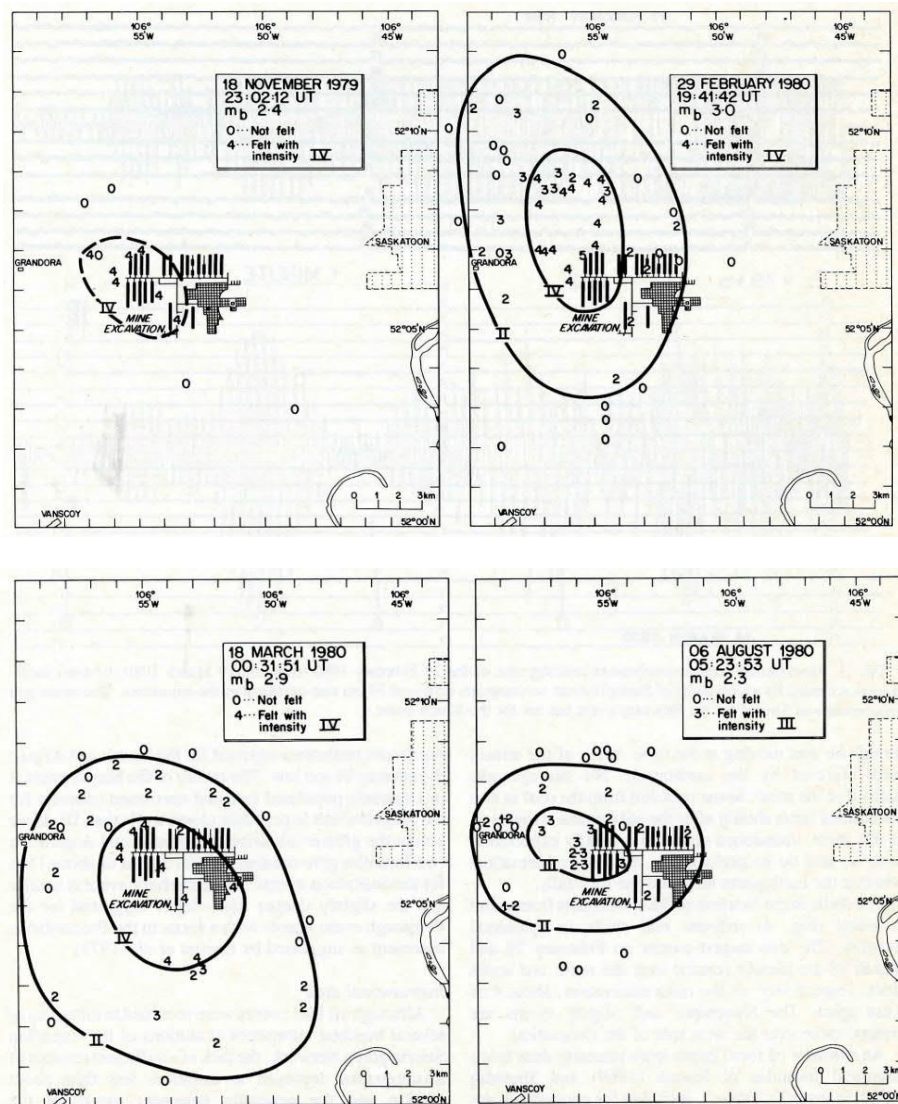


Figure 9 : Cartes isoséistes événements proches de la ville de Saskatoon [3]

Concernant le séisme survenu à Creighton, dont la magnitude était de 4.1M_n, de dégâts n'ont pas été reporté au sein de la ville la plus proche (Sudbury – 5km). On notera cependant qu'un séisme est survenu récemment (le 3 janvier 2024) et dont la magnitude mesurée était de 3.2 M_n [4-5]. Ce séisme généré par les activités de la mine a cependant été ressenti comme « *Lightly felt* » à Sudbury mais n'a pas induit de dommages.

Concernant la mine de Macassa, des secousses ont été reportées en 2018 [10] : quelques dégâts mineurs sont évoqués au sein de la mine.

Tableau 1: Événements sismiques induits par des activités minières relevés au Canada [1]

Projet	Magnitude (Mmax)	Date	Ressource	Profondeur mine (m)	Reference(s)
Wright-Hargreaves mine Ontario	5	1964	Or	-	Hedley and Udd [13]
Mosaic Company, Yorkton, Saskatchewan	5		Potasse	-	Verdon et al. [14]
Creighton Ontario	4,1	2006/11/29	-	1828-2377	Vallejos and McKinnon [15]
Belle Plaine	4		Potasse	-	Verdon et al. [14]
Copper Cliff North Ontario	3,8	2008/09/11	Nickel	-	Vallejos and McKinnon [15]
Kidd Creek Ontario	3,8	2009/01/06	Cuivre & Zinc	-	Vallejos and McKinnon [15]
Garson Ontario	3,3	2008/12/05	-	-	Vallejos and McKinnon [15]
Campbell mine Ontario	3,3		-	-	Hedley and Udd [13]
Macassa Ontario	3,1	2008/07/12	-	1500	Vallejos and McKinnon [15]
Cory Mine Saskatchewan	3	1980/02/29	Potasse	1000	Gendzwill et al. [3]
Quirke mine Ontario	3		Uranium	-	Hedley and Udd [13]
Strathcona Ontario	2,7	1988/06/19	-	-	Trifu et al. [16]
Fraser Ontario	2,4	2008/10/16	-	-	Vallejos and McKinnon [15]
Craig Ontario	2,2	2007/06/22	-	-	Vallejos and McKinnon [15]

4.2 Europe

La Figure 10 présente quelques incidents sismiques, induits par des activités liées à la géothermie [6]. Il est à noter que les séismes induits par la géothermie et ceux causés par l'exploitation minière partagent des similitudes, mais présentent aussi des différences en termes de mécanismes et d'impact. L'analyse des séismes induits par la géothermie offre cependant des perspectives précieuses pour comprendre ceux générés par l'exploitation minière.

La Figure 10 montre que, dépendamment de la magnitude du séisme, des plaintes et dommages ont été engendrés.

Pays	Nom du site	Date	Magnitude	Dommages engendrés	Répercussions
Allemagne	Insheim	9 avril 2010	2,3	Néant	Nombreuses secousses sismiques ressenties par la population jusqu'à environ 10 km.
Allemagne	Landau	15 août 2009	2,7	La plupart des plaintes (63 au total) ont été classées sans suite. Pour 12 plaintes, la responsabilité de l'exploitant n'a pas été exclue, les personnes ont été en conséquence indemnisées entre 200 et 1200 € suivant les cas.	Un groupe d'experts a été mandaté pour étudier le séisme à l'initiative du ministère de l'environnement, des forêts et de la protection des consommateurs de l'État de Rhénanie-Palatinat. Il a été chargé de décrire, d'analyser et d'évaluer l'événement, d'évaluer les causes possibles et d'élaborer des recommandations concernant les opérations futures. Mise en place d'un système d'écoute sismique.
Allemagne	Unterhaching	8 juillet 2008	2,4	Néant	Déploiement d'un réseau sismique local dédié. Réglementation dans la région métropolitaine de Munich modifiée, imposant l'installation d'au moins un sismomètre par site géothermique (en cas de séisme local de ML $\geq$ 1,5, quatre stations supplémentaires au minimum sont exigées).
Belgique	Balmatt	23 juin 2019	2,1	—	Événement ressenti par la population locale. Les opérations sur le site ont été arrêtées pendant environ 1 an suite à l'occurrence de la sismicité.
France	Soultz-sous-Forêt	11 juin 2003	2,9	46 plaintes recensées. À notre connaissance, une seule plainte a abouti pour le remboursement d'un miroir (Com. Pers. ES-Géothermie).	Réalisation d'une enquête macrosismique. Publication d'articles dans la presse locale.
France	Vendenheim	26 juin 2021	3,9	Nombreuses plaintes déposées par les riverains.	Demande de la préfecture de Strasbourg d'arrêter définitivement le projet. Un groupe d'experts a été mandaté par la DREAL Grand Est pour investiguer les causes de la sismicité et élaborer des recommandations.
Islande	Hellisheiði (Húsmúli)	2011	3,9	Néant	Secousses ressenties par la population.
Italie	Latera	1980	2,9	—	—
Italie	Torre Alfina	1977	3,0	—	—
Italie	Cesano	1978	2,0	—	—

Figure 10 : Incident sismique relevé en Europe et description des dommages associés [6]

Concernant l'événement survenu en France en juin 2021, un rapport détaillé est disponible [7]. Celui-ci documente le nombre de plaintes déposées ainsi que les dégâts et le ressenti des personnes se trouvant dans la région. La Figure 11 présent une carte de recensement des réactions à la secousse : il apparaît que l'incident sismique a été perçu jusqu'à une distance relativement importante (>20 km) et a parfois généré des réactions de panique.

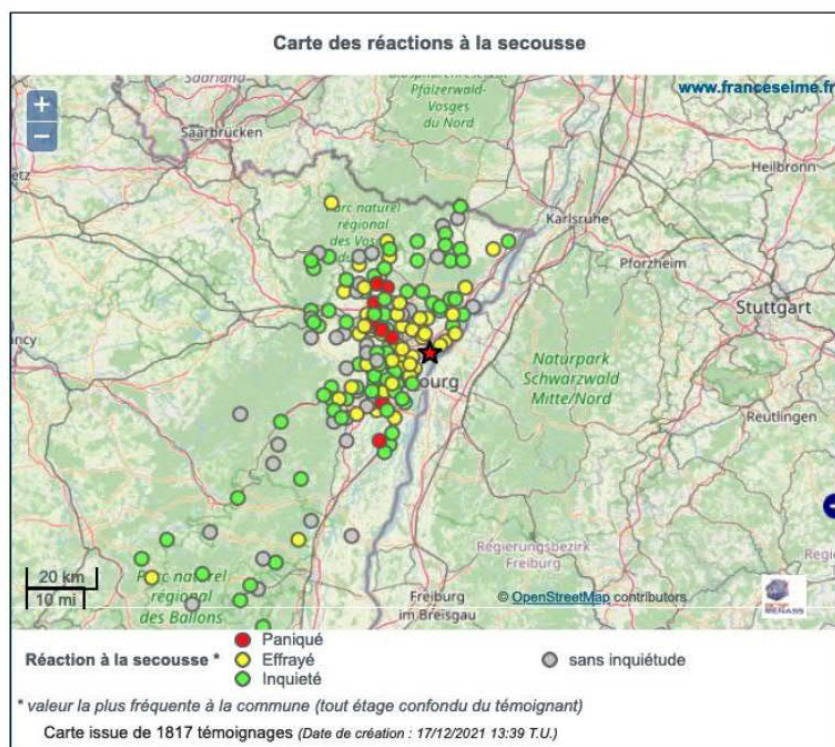


Figure 11 : Carte des réactions à la secousse – Événement sismique du 26 juin 2021 [7]

A la suite de ce premier recensement, une cartographie des dommages sur les objets et le mobilier a été effectuée : peu de dommages sont relevés et ceux-ci apparaissent pour des distances inférieures à 20km.

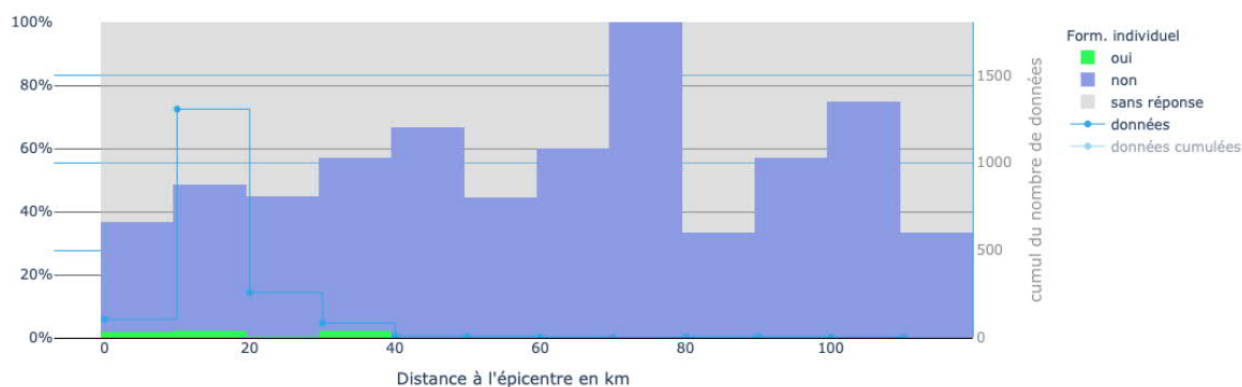


Figure 12 : Bris d'objets selon témoignages individuels [7]

Concernant la Figure 13 et la présence de fissures sur les bâtiments, l'auteur du rapport d'étude précise que : « (...) ce séisme a principalement généré sur quelques bâtiments de vulnérabilité A à C des fissures fines et superficielles (dommages D1) (fig.9) et de rares fissures larges et profondes (D2) (fig. 10). Les dommages sont principalement localisés dans les 20 premiers kilomètres autour de l'épicentre (fig. 11). On peut également souligner la difficulté aujourd'hui pour les habitants à distinguer l'origine des dommages au vu du nombre très important de secousses sismiques s'étant produites depuis novembre 2019. (...) » [7].

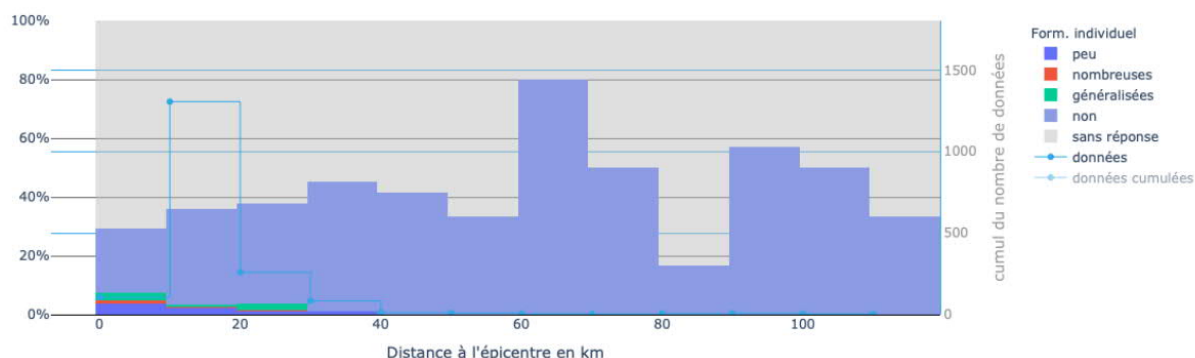


Figure 13 : Présence de fissures larges et profondes sur bâtiments [7]

4.3 Autres événements

La Figure 14 reporte d'autres événements à travers le monde à partir de 1916 jusqu'à 2007. Pour certains d'entre eux, il est fait mention de dégâts sur des bâtiments sans qu'il soit possible de connaître exactement la nature de ceux-ci.

Date	Mine, region	Country	Type of salt	Area S, [km ²]	Magnitude M_L or m_s	Consequences	Source
1916 01 22	Hallesche, Teutschenthal	Germany	Potash	0.03	3.0		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1940 05 24	Krögershall, Teutschenthal	Germany	Potash	0.60	5.0	42 people dead	Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1943 03 05	Kleinschierstedt, Ostfeld	Germany	Potash	0.30	4.0		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1953 02 22	Wintershall, Heringen	Germany	Potash	0.70	5.2	damages on buildings	Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1958 08 07	Merkers	Germany	Potash	3.00	5.2		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1961 06 29	Merkers	Germany	Potash	0.20	4.1		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1971 04 04	Aschersleben V, Nordfeld	Germany	Potash	0.32	4.6		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1975 06 23	Unterbreizbach, Sünna	Germany	Potash	3.00	5.3	damages on buildings	Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1983 07 02	Bleicherode	Germany	Potash	0.10	3.3		Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1987 06 07	Kalush, Ivano-Frankovsk	Ukraine	Potash	0.024	2.5		Kostuk <i>et al.</i> ¹⁹⁹⁰
1989 03 13	Merkers, Völktershausen	Germany	Potash	7.00	5.6	damages on buildings	Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
1994 03 12	Rietsof, New York	USA	Salt	0.023	3.6	creation of 2 sinkholes	Kappel <i>et al.</i> ¹⁹⁹⁹
1995 01 05	Solikamsk-2, Western Ural	Russia	Potash	0.42	4.2	fractures on surface	Malovichko <i>et al.</i> ^{2001a}
1995 03 02	Salvay, Wyoming	USA	Trona	2.00	5.1	1 miner dead	Pachmann <i>et al.</i> ¹⁹⁹⁵
1996 09 11	Teutschenthal, Halle	Germany	Potash	2.50	4.8	damages on buildings	Thoma <i>et al.</i> ²⁰⁰⁰
2007 07 28	Berezniiki-1, Western Ural	Russia	Potash	0.0027	1.6	creation of sinkhole	Malovichko <i>et al.</i> ^{2001a}

Figure 14 : Autres événements reportés à travers le monde [21]

5 Conclusions

Cette revue n'a pas permis d'identifier une intensité précise à partir de laquelle des événements de sismicité induite ont eu des effets ou des conséquences significatives, en raison du caractère multifactoriel du phénomène et de ses impacts. Néanmoins, dans le document ci-joint, plusieurs événements sismiques induits ont été relevés dans le monde.

Il semble que très peu de références rapportent des dommages aux habitations causés par des séismes induits par des activités minières. Cependant, pour les séismes induits dont l'épicentre est peu profond et de magnitude relativement faible (par exemple $M_w < 3$), la fréquence pourrait être trop élevée pour causer des dommages structurels. Ces séismes peuvent néanmoins être perçus et considérés comme alarmants par la population.

6 Références

- [1] <https://inducedearthquakes.org/>
- [2] Hasegawa, H. S. & Al., "*Induced seismicity in mines in Canada—An Overview*", Pageoph, Vol. 129, Nos. 3/4 (1989)
- [3] Gendzwil, D.J. & Al., "*Induced earthquakes at a potash mine near Saskatoon, Canada*", Canadian Journal of Earth Science, Vol. 19, Nb. 3 (1982)
- [4] <https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/recent/2024/20240103.0914/index-en.php>
- [5] <https://northernontario.ctvnews.ca/earthquakes-canada-confirms-early-morning-seismic-event-in-sudbury-1.6708903>
- [6] Guide de bonnes pratiques pour la maîtrise de la sismicité induite par les opérations de géothermie profonde - <https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/documents/Guide-geothermie.pdf>
- [7] https://www.franceseisme.fr/donnees/intensites/2021/210626_0300/Rapport_BCSF-RENASS_2021R1_EVT210626-DPT67.pdf
- [8] Milford, R.V. et Wium. D.J.W., "*Impact of seismic events on buildings in mining areas*". Division of Building Technology, CSIR, (1997)
- [9] <http://earthquakescanada.nrcan.gc.ca/stndon/NEDB-BNDS/bulletin-en.php>
- [10] <https://www.lecitoyenvaldoramios.com/article/2018/12/21/la-terre-tremble-dans-les-mines>
- [11] <https://www.earthquakescanada.nrcan.gc.ca/info-gen/scales-echelles/mercalli-en.php>
- [12] <http://eqseis.geosc.psu.edu/cammon/HTML/Classes/IntroQuakes/Notes/mercalli.html>
- [13] Hedley, D. G. F., and J. E. Udd, "*The Canada-Ontario-industry rockburst project, in Seismicity in mines*", pp. 661-672(1989), Springer.

- [14] Verdon, J. P., "Significance for secure CO₂ storage of earthquakes induced by fluid injection", Environmental Research Letters, 9(2014), 064022.
- [15] Vallejos, J. A., and S. D. McKinnon, "Correlations between mining and seismicity for re-entry protocol development", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 48(2011), 616-625.
- [16] Trifu, C.-I., T. I. Urbancic, and R. P. Young, "Source parameters of mining-induced seismic events: An evaluation of homogeneous and inhomogeneous faulting models for assessing damage potential", Pure and applied geophysics, 145 (1995), 3-27.
- [17] Rutquist, J., & Al. "Modeling of induced seismicity and ground vibrations associated with geological CO₂ storage, and assessing their effects on surface structures and human perception", International Journal of Greenhouse Gas Control, 24(2014) 64-77
- [18] Bommer, J. J., & Al. "Control of hazard due to seismicity induced by a hot fractured rock geothermal project", Engineering Geology, 83 (2006) 287-306
- [19] FEMA, "HAZUS-MH: Multi-hazards Loss Estimation Methodology". Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2004
- [20] Majer, E., & Al. "Protocol for Addressing Induced Seismicity Associated with Enhanced Geothermal Systems", US Department of energy, 2012
- [21] Malovichko, A. A., & Al. "Multiscale seismicity at potash mines: 50 years of the seismic monitoring at Verkhnekamskoye deposit", 8th International Symposium – Rockbursts and seismicity in mines, 2007