

SURVEILLANCE DU RISQUE D'EFFONDREMENT LOCALISE DANS UNE EXPLOITATION DE SEL PAR DISSOLUTION

MONITORING OF GROUND FAILURE HAZARDS IN A SOLUTION MINE

Stella COCCIA¹, Jannes KINSCHER¹, Sami LIMAM², Pascal BIGARRE¹

¹ INERIS, Direction des Risques du Sol et du Sous-Sol – Ecole des Mines, Campus ARTEM, CS 14234, F-54042 Nancy cedex, France

² SOLVAY CHIMICA ITALIA, Rosignano Solvay (Li-Italie)

RÉSUMÉ – L'exploitation de gisements de sel par dissolution peut induire des effondrements localisés soulevant une problématique de gestion du risque. L'exploitation de Solvay à Ponteginori, en Toscane (Italie), est concernée par ce type d'aléa du fait de son contexte géologique. Pour prédire et gérer les risques associés à ces phénomènes, l'exploitant a mis en place, dès les années 80, un dispositif de surveillance microsismique qui a permis d'anticiper plusieurs effondrements en 2015.

ABSTRACT – Solution mining can induce local ground failures, called sinkholes, rising a risk management issue to the mining staff. The solution mine of SOLVAY, at Pontiginori, in Tuscany (Italy), induces such pervasive sinkhole phenomena due to the geological context. To anticipate and manage these geohazards Solvay installed during the 80's a microseismic monitoring which allowed to anticipate several ground failures in 2015.

1. Introduction

L'exploitation de sel gemme, sédimenté en souterrain au cours de diverses ères géologiques, peut se faire par extraction dans des mines souterraines (par chambre et pilier) ou par dissolution. A Ponteginori, en Toscane, (Italie), Solvay exploite le sel par dissolution depuis 1930 à la concession de « Buriano », et, depuis plus récemment, à la concession de « Saline ». Depuis le début de son l'exploitation, la concession de Buriano a connu environ 160 effondrements localisés (« sinkholes » en anglais), avec des diamètres d'ouverture variant de quelques mètres jusqu'à plus de 50 m.

Du fait de la complexité de la géologie, ces effondrements peuvent s'accompagner quelques fois de glissements de terrain, notamment en présence de failles dans une géomorphologie très vallonnée. Ces mouvements de terrains induisent donc un risque pour la sécurité du personnel intervenant quotidiennement sur les concessions, ainsi qu'un risque d'impact environnemental lié aux projections de saumure en surface, même si une grande partie des épanchements de saumure est récupérée via des rigoles conduisant à un bassin de récupération des eaux de surface.

Pour anticiper et bien gérer ces risques, l'exploitant a mis en place, dès les années 80, un dispositif de surveillance microsismique. Le dispositif a pour objectif de détecter et de localiser les crises microsismiques induites par des ruptures en évolution vers la surface, à l'aide d'indicateurs basés sur la quantification de l'activité microsismique. L'INERIS a modernisé ce dispositif depuis 2015, ce qui a permis d'anticiper des cas d'effondrements récents.

2. Description générale des concessions minières

Le gisement actuellement exploité, près de Volterra (Italie), est composé de lentilles de sel situées entre 150 et 300 m de profondeur dans une série de couches d'argiles, de marnes, et d'anhydrite du Miocène (Figure 1). L'épaisseur des lentilles varie de 30 à 50 mètres. De l'eau douce est injectée dans ces lentilles à l'aide de forages. L'eau injectée se sature en dissolvant le sel gemme, créant des cavités complexes dans le sous-sol, et mettant en communication les forages. La saumure saturée est extraite, puis transportée par conduites jusqu'à l'usine de production (située à une trentaine kilomètres).

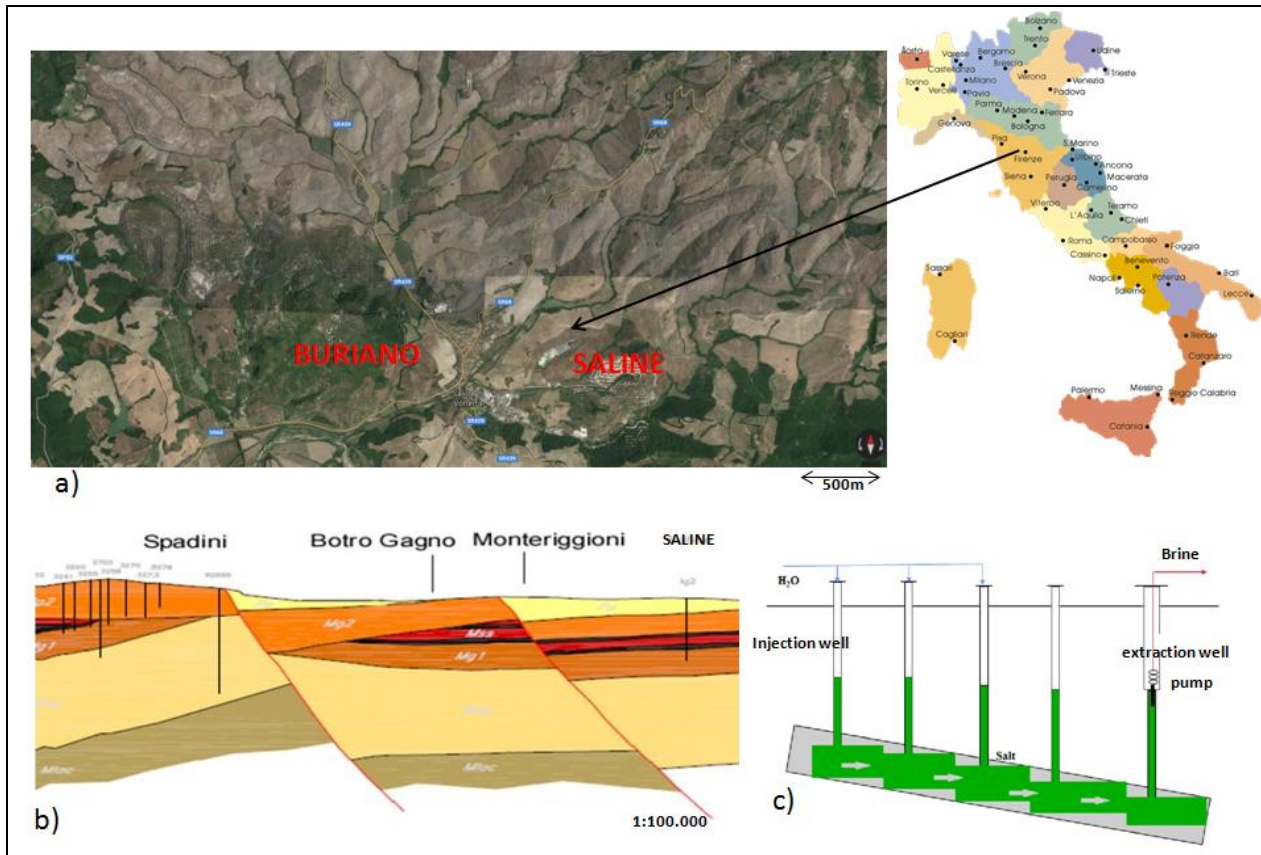


Figure 1: (a) Localisation des deux concessions minières «Saline» et «Buriano», (b) Coupe géologique à travers la concession de «Saline» qui montre en noir les niveaux de sel (source Squarci P., 1998), (c) Schématisation de la méthode d'exploitation du sel par dissolution.

3. Dispositif de surveillance microsismique mise en place sur le site

La surveillance des deux concessions exploitées se fait par deux systèmes de télémessure différents, composés respectivement de 24 sondes (sur la concession «Buriano») et de 15 sondes (sur la concession «Saline») située plus à l'Est). Les sondes sont toutes installées en surface. Il s'agit de sondes unidirectionnelles (une seule composante verticale) équipées de trois géophones montés en série afin d'augmenter le rapport signal / bruit de la voie de mesure. Chaque réseau de sondes est relié à sa propre centrale de numérisation, de détection et d'enregistrement automatique des signaux. Les centrales sont reliées à une infrastructure pour la gestion automatique des données en quasi temps réel.

La surveillance a pour but de détecter et surveiller l'activité microsismique induite par l'exploitation, de quantifier son évolution et de réguler ainsi la circulation du personnel afin de prévenir tout risque d'exposition à l'aléa redouté. Cela a été rendu possible par l'INERIS grâce à la télétransmission et au traitement en quasi temps réel des données microsismiques.

4. Acquisition automatique des données et traitement

4.1 Catalogue des signaux enregistrés

Les signaux microsismiques enregistrés sur les sites de « Buriano » et de « Saline » peuvent être classifiés en 4 groupes :

- les événements microsismiques, induits par les instabilités des terrains dans le sous-sol (liées à l'exploitation);
- les séismes (locaux ou régionaux) ;
- les chutes de bloc réalisées en surface par l'exploitant pour contrôler le bon fonctionnement des dispositifs de surveillance et la précision de la localisation (campagne de calage) ;
- les « bruits » induits par d'autres facteurs divers : activité des pompes, passage d'engins, tonnerres, artefacts électriques, et présence d'animaux sauvages.

La grande majorité des signaux des événements microsismiques (~ 90 %) sont caractérisés par un faible rapport signal-sur-bruit et avec un contenu fréquentiel inférieur à 50 Hz (Figure 2). Le manque de hautes fréquences ainsi que le faible rapport signal-sur-bruit sont liés à la faible énergie sismique de ces sources ainsi qu'une forte atténuation du milieu, paramètres liés à la nature des terrains de recouvrement et aux faibles contraintes naturelles aux profondeurs exploitées.

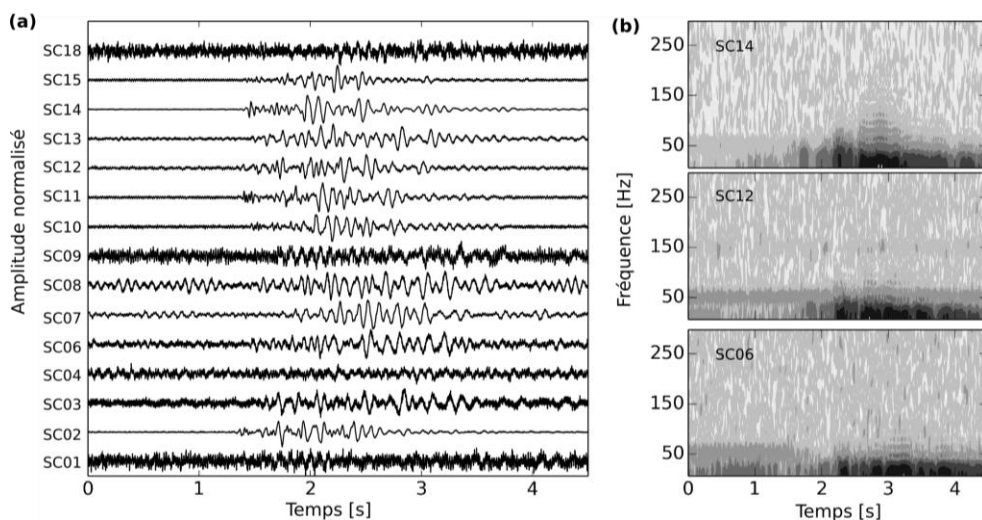


Figure 2 : Exemple d'un événement microsismique enregistré pendant l'effondrement d'avril 2015 dans la concession de « Saline » : (a) séismogrammes de toutes les sondes du réseau et (b) spectrogrammes pour les sondes SC06, SC12 et SC14 localisées à une distance respective de 400, 300 et 200 m de l'effondrement.

4.2 Tri semi-automatique des événements enregistrés

Une approche STA/LTA cumulée a été mise en place (Figure 3) sur les deux sites afin d'éliminer les enregistrements associés aux bruits et d'identifier les événements microsismiques de manière automatique. Le STA/LTA cumulé est une fonction qui

représente le nombre de stations qui ont dépassé un seuil fixé à un instant donné. La distance entre deux sondes (sur les deux sites de surveillance) étant plutôt courte (< 500 m), un événement microsismique est toujours détecté par plusieurs stations en même temps (à un dixième de seconde près).

La fonction STA/LTA cumulée a été définie (seuil et fenêtre de temps) de sorte que l'on détecte correctement les événements microsismiques enregistrés par au moins deux stations au même instant. Le choix d'un seuil de 0.2 s et de la taille des fenêtres STA et LTA (de 2 s) est justifié par le fait que les différences des temps d'arrivée des ondes P entre les sondes ne dépassent jamais 0.2 s, en supposant que la vitesse des ondes P soit de l'ordre de 2500 m/s (Nicolich et al., 2002, Zgur et Nicolich, 2004).

L'identification des événements microsismiques est réalisée par un tri automatique en trois étapes :

1. la première étape correspond au tri de données à l'aide de la fonction de STA/LTA cumulée telle que décrite ci-dessus. Elle permet de filtrer les bruits de surface ;
2. la deuxième étape du tri a été conçue pour l'identification des séismes régionaux et des événements liés à la foudre ;
3. la troisième et dernière étape du tri est la validation des tris précédents par un opérateur. Cette étape consiste surtout à éliminer les bruits qui ne sont pas automatiquement rejetés par le système (comme ceux liés aux pompes). Grâce à leur localisation, l'identification de ces événements est relativement simple. De plus, il s'agit souvent des signaux répétitifs qui forment des clusters spatiaux très distincts.

4.3 Localisation automatique

La localisation se fait en utilisant les amplitudes. Cette approche a été choisie du fait de la difficulté du pointage de temps d'arrivée des ondes P et S (manuellement ou automatiquement). Contrairement, à l'approche classique basée sur les temps des premières arrivées des ondes P et S, cette approche utilise simplement les amplitudes crête-à-crête facilement mesurables pour chaque sismogramme.

L'approche utilisée ici est une version simplifiée de celle développée par Kinscher (2015) et Kinscher et al. (2015). Elle se base sur les rapports des amplitudes « A » pour tous les couples de stations i, j . La décroissance des amplitudes avec la distance « r » est estimée par l'expression suivante :

$$\log_{10}\left(\frac{A_i}{A_j}\right) = \log_{10}\left(\frac{s_i}{s_j}\right) + n_{app} \log_{10}\left(\frac{r_j}{r_i}\right) \quad (1)$$

où « s » représente le coefficient d'amplification (effets de site) pour une station et « n_{app} » le coefficient d'atténuation géométrique apparent. Autrement dit, la décroissance des amplitudes avec la distance est décrite par un seul paramètre n_{app} . Le paramètre n_{app} peut être calibré à partir d'une base de données de référence contenant des données sismiques dont les localisations sont bien contraintes. Il peut être déterminé par régression à partir de ces localisations et des rapports de distances hypocentrales « r » entre les stations (Figure 3b).

Dans notre cas, le paramètre n_{app} a été déterminé à partir des chutes de bloc (campagnes de calage). Les coefficients d'amplification pour chaque couple des stations sont ensuite estimés statistiquement en connaissant n_{app} et r .

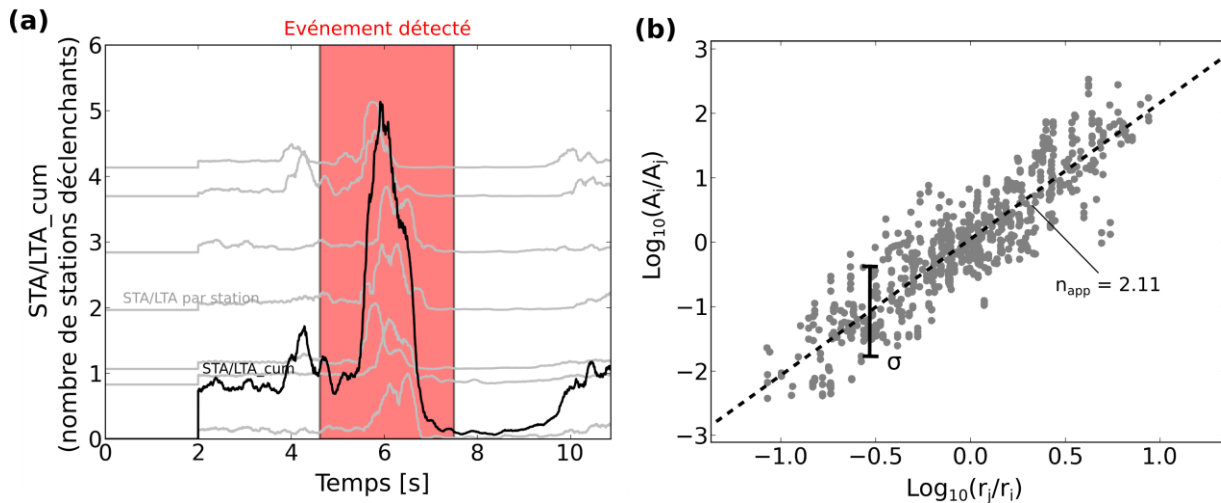


Figure 3 : Calibration la localisation automatique des événements de la concession de « Saline ». Exemple de STA/LTA cumulé (courbe noire) pour une chute de bloc d'une campagne de calage (a); calibrage du paramètre n_{app} par régression linéaire (b).

Les résultats de la localisation sont formulés d'une manière probabiliste. La fonction de densité de probabilité (pdf) de la localisation potentielle \mathbf{X} est définie par :

$$pdf(\mathbf{X}) = \frac{1}{m} \sum_m w_m \cdot \exp \left\{ - \frac{\left| \log_{10} \left(\frac{A_i}{A_j} \right)^{observé} - n_{app} \log_{10} \left(\frac{r(\mathbf{X})_j}{r(\mathbf{X})_i} \right) \right|}{\sigma} \right\} \quad (2)$$

où « m » correspond au nombre total de couples de stations. Le maximum de vraisemblance est trouvé à l'aide de la méthode Oct-Tree (Lomax and Curtis ; 2001).

Le paramètre « σ » représente l'incertitude dans la mesure des amplitudes (barre d'erreur dans la Figure 3 b), et l'incertitude sur la détermination de n_{app} . Le poids « w » est défini par :

$$w_m = \frac{(A_i + A_j)}{\sum_m (A_i + A_j)} \quad (3)$$

La localisation des chutes de bloc des campagnes de calage pour les deux sites de surveillance a démontré que l'erreur absolue de la localisation est inférieure à 100 m. La qualité de la localisation dépend généralement du nombre de stations ayant enregistré le signal (où le seuil STA/LTA est dépassé). Compte tenu de l'extension des réseaux microsismiques, au moins 4 stations sont nécessaires pour obtenir une erreur de localisation inférieure à 100 m dans la concession de « Saline ». Dans la concession de « Buriano », les stations étant légèrement plus espacées, il faut au moins 6 stations pour obtenir une erreur de localisation inférieure à 100 m.

5. Effondrements récents détectés

En 2015, six crises microsismiques importantes ont été enregistrées dans deux zones en exploitation très proches de la concession de « Saline » (Tableau 1 et Figure 4), qui ont été toutes suivies par un effondrement en surface. A titre comparatif, 13 effondrements ont été répertoriés dans la même concession entre 2004 et 2014.

Suite à la localisation automatique en temps réel d'une crise microsismique l'exploitant est alerté et une série de procédures internes pour la mise en sécurité du personnel sont mises en œuvre avant l'effondrement des terrains (Figure 5). Il s'agit d'effondrements peu profonds et secs, c'est-à-dire qu'ils n'ont pas atteint pour le moment la saumure qui est entre 20 et 30 m de profondeur (Tableau 1).

Tableau 1: Synthèse des crises microsismiques dans la concession de « La Saline » en 2015

Durée de la crise microsismique	Nombre d'événements	Date d'observation de l'effondrement sur le terrain	Diamètre estimé [m] de l'effondrement	Surface [m ²] de l'effondrement
11-13/04/2015	511	16/04/2015	10	78
9-16/07/2015	1929	14/07/2015	15	176
28-08/09-09/2015	701	07/09/2015	12	113
11-13/10/2015	126	30/11/2015	10	78
26/10-05/11/2015	1164	30/11/2015	10	78
07-11/11/2015	152	30/11/2015	5	20

Les signes précurseurs fournis par le système surveillance ont permis d'anticiper l'apparition de ces effondrements en surface. Ces signes précurseurs sont des produits du traitement de données de la base d'événements détectés et localisés et sont disponibles via le web-monitoring. Ils peuvent être synthétisés via les *critères suivants* :

1. *l'augmentation rapide (en moins de 48h) de l'activité* (quantifiée comme le nombre d'événements qualifiés par jour) en comparaison de l'activité moyenne journalière pendant la période des 30 jours précédant cette observation. Dans le cas où une crise récente a été détectée comme telle, la période de référence de 30 jours est réduite au nombre de jours séparant la dernière crise et celle en cours ;
2. *la concentration spatiale de l'activité microsismique*. L'interdistance spatiale moyenne des événements localisés chute sous la valeur de 50-100 mètres, traduisant une concentration des épacentres sur une zone très restreinte (Figure 6) ;
3. *le nombre moyen de sondes enregistrant l'événement*. Ce nombre augmente de manière significative, de 7 à 12, avec l'occurrence d'une crise sismique qui contient des événements d'énergie plus forte.

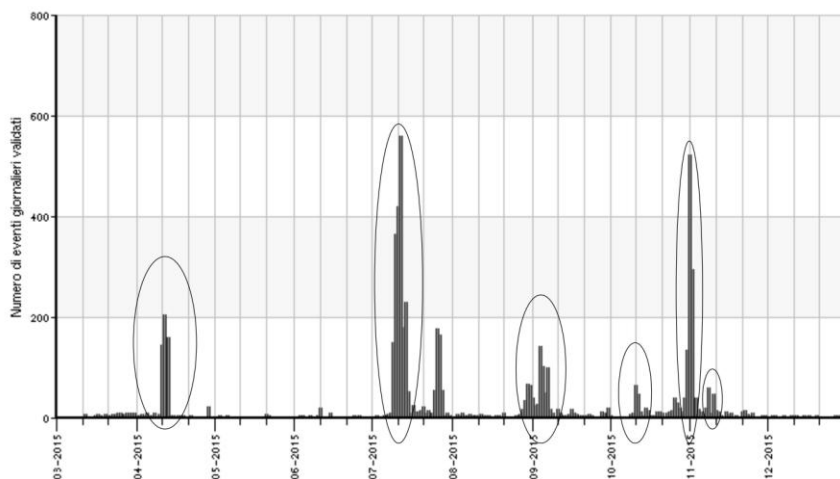


Figure 4: Activité microsismique enregistrée en 2015 par l'INERIS mettant en évidence les 6 crises microsismiques (ce graphique est accessible en temps réel via le web-monitoring).

Le premier critère est toujours respecté, par contre pour les crises de Septembre et d'Octobre, l'autre précurseur pertinent est la seule concentration spatiale. Pour les deux crises de Novembre, l'interdistance spatiale moyenne des événements localisés n'est pas un critère d'évolution parce qu'elle est constamment égale à 100 m à partir du 12 octobre et devient inférieure à 200 m pendant cette crise, traduisant la concentration rapide des épicentres sur une zone certes délimitée, mais plus large que celles observées pendant les crises précédentes.

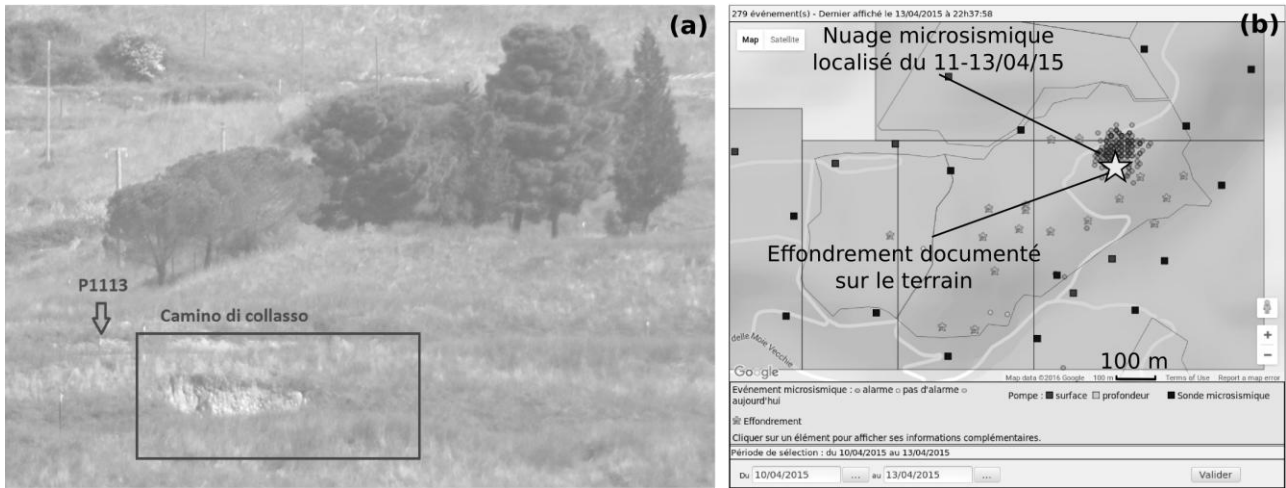


Figure 5 : (a) photo de l'effondrement d'Avril 2015 prise par l'exploitant, (b) la localisation de la crise microsismique (nuage de points noirs), position réelle de l'effondrement observé sur le terrain.

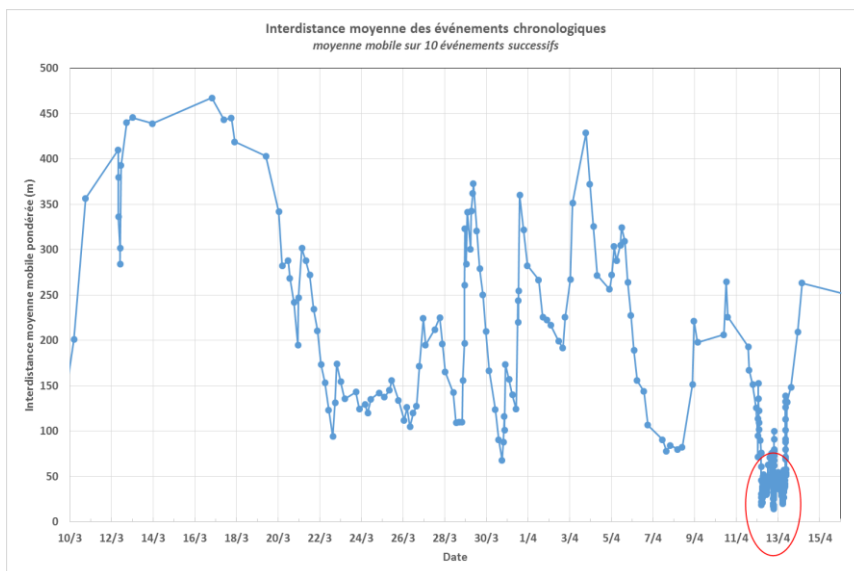


Figure 6 : Interdistance moyenne des événements microsismiques de « Saline » pendant la crise d'Avril. La période de crise se distingue par la série d'événements localisés concentrés sur une interdistance moyenne inférieure à 100 m (axe y) et très rapprochés dans le temps (axe x) (ce graphique est accessible en temps réel via le web-monitoring).

On note que le décalage entre le début de la crise et la date de l'observation en surface de l'effondrement est faible pour les trois premiers effondrements, et plus important pour les trois derniers (Tableau 1). Cela est dû non seulement à l'accessibilité de la zone (zone

à aléa à effondrements plus élevés, donc plus délicate pour la reconnaissance visuelle in situ par le personnel), mais aussi à une apparition plus tardive en surface. En effet, la partie la plus superficielle d'un effondrement, vu le niveau très altéré des terrains, est attendue comme moins sismique que sa formation en profondeur.

Sur la base du recoupement avec les informations fournies par l'exploitant tous les effondrements observés sont bien localisés dans les concessions minières et non à l'extérieur de celles-ci, confirmant a priori l'absence d'une problématique de sécurité publique. En outre, une fois l'exploitation terminée, les zones exploitées seront soumises à une requalification environnementale selon la législation en vigueur.

4. Conclusions

Le dispositif de gestion du risque par une solution de surveillance des mouvements de terrain a mis en évidence l'intérêt de la méthode microsismique réalisée dans l'exploitation de sel de Solvay en Toscane (Italie). Elle permet d'anticiper les instabilités de terrain, induites par la dissolution des couches de sel, par la détermination de signes précurseurs. Les performances de cette surveillance sont liées à la bonne couverture des zones en cours d'exploitations par le réseau de sondes microsismiques, la qualité des algorithmes de détection et de localisation de l'activité microsismique, à l'automatisation des procédures qui permet un traitement en quasi temps réel des événements, ainsi qu'à une collaboration étroite entre l'exploitant et l'INERIS.

Dans la plupart de cas, les crises microsismiques qui ont été enregistrées dans la concession de « Saline » se sont terminées par un effondrement localisé. Le décalage entre le début de la crise et l'apparition de l'effondrement dépend notamment de la profondeur des cavités instables, de la cinétique de remontée des fontis dans les terrains de recouvrement, mais aussi du travail de reconnaissance périodique sur le terrain.

5. Références bibliographiques

- Kinscher J. (2015). The analysis and interpretation of microseismicity induced by a collapsing solution mining cavity: a contribution for progress in hazard assessment of underground cavities. Thèse doctorat, INERIS, Université Lorraine.
- Kinscher, J., Bernard, P., Contrucci, I., Mangeney, A., Pigué, J.P., Bigarre, P. (2015). Location of microseismic swarms induced by salt solution mining. *Geophysical Journal International*, 200, 337-362.
- Lomax, A., and Curtis, A. (2001). Fast, probabilistic earthquake location in 3D models using oct-tree importance sampling, European Geophysical Society (Nice 2001).
- Nicolich, R., Primiero, A., Zgur, F., Di Marzo, N. (2002). 3D Seismic Imaging and Numerical Modelling of Subsidence in Solution Mining of Rocksalt. 64th EAGE Conference.
- Squarci P. (1998). Studio geologico idrogeologico e strutturale dei giacimenti di salgemma della Media Val di Cecina. Relazione Scientifica CNR.
- Zgur, F., Nicolich, R. (2004). Sismica ad alta risoluzione 3d per lo sfruttamento di risorse minerarie (sale) per dissoluzione, GNGTS – Atti del 20° Convegno Nazionale.