

Suivi expérimental multi-paramètres de l'effondrement d'une cavité saline : site de Cerville-Buissoncourt

Xavier Daupley, Hubert Fabriol, Isabelle Contrucci, Séverine Bernardie, Ngoc-Tuyen Cao, François Lebert, Laurent Cauvin, Philippe Jousset, Emmanuelle Klein, Behrooz Bazargan-Sabet

▶ **To cite this version:**

Xavier Daupley, Hubert Fabriol, Isabelle Contrucci, Séverine Bernardie, Ngoc-Tuyen Cao, et al.. Suivi expérimental multi-paramètres de l'effondrement d'une cavité saline : site de Cerville-Buissoncourt. 5. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'ingénieur "Infrastructures, développement durable et énergie" (JNGG 2010), Jul 2010, Grenoble, France. pp.411-418. ineris-00973582

HAL Id: ineris-00973582
https://ineris.hal.science/ineris-00973582

Submitted on 4 Apr 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

SUIVI EXPERIMENTAL MULTI-PARAMETRES DE L'EFFONDREMENT D'UNE CAVITE SALINE – SITE DE CERVILLE-BUISSONCOURT

MULTI PARAMETER MONITORING OF A SALT CAVERN COLLAPSE (CERVILLE-BUISSONCOURT SITE, FRANCE)

Xavier DAUPLEY[1], Robert FABRIOL[2], Isabelle CONTRUCCI[1], Séverine BERNARDIE[2], Ngoc-Tuyen CAO[1], François LEBERT[2], Laurent CAUVIN[1], P. JOUSSET[2], Emmanuelle KLEIN[1], Behrooz BAZARGAN[2]
1 Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Verneuil-en-Halatte, France
2 Bureau de Recherche Géologique et Minière, Orléans, France

RÉSUMÉ – L'INERIS et le BRGM ont participé, dans le cadre du GISOS, à une expérimentation visant à suivre l'évolution d'une cavité saline en exploitation (Lorraine, France) jusqu'à son effondrement provoqué. Plusieurs techniques d'auscultation ont été mises en œuvre afin de détecter des signes précurseurs de l'effondrement. La comparaison des principaux résultats acquis permet de décrire de façon détaillée les différents stades d'évolution de la cavité dont l'effondrement est survenu en février 2009.

ABSTRACT – In the framework of GISOS, INERIS and BRGM contributed to a monitoring experiment of a salt cavern (Lorraine, France). Thereby, the opportunity offered by this collapse was taken to test various monitoring techniques to detect early warning signals. Comparative analysis of the data collected by the various monitoring techniques allows describing in detail the different evolution stages of the cavity and the precursor of its collapse occurred in February 2009.

1. Introduction

La présence de cavités souterraines d'origine naturelle ou anthropique peut être à l'origine de mouvements de terrain par effondrement localisé ou généralisé. Une des solutions, pour diminuer la vulnérabilité des zones concernées, est la gestion du risque par la surveillance géotechnique et/ou géophysique. Cette dernière est cependant difficile à mettre en œuvre et le retour d'expérience est limité.

Depuis 2004, le GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains, regroupant le BRGM, l'INERIS, l'INPL et l'ENSMP) réalise une expérimentation de grande ampleur sur une cavité saline en exploitation dans le bassin salifère lorrain, à quelques kilomètres de Nancy.

Le site d'expérimentation se situe à l'intérieur du périmètre de la concession minière de Cerville-Buissoncourt appartenant à la société SOLVAY. La méthode d'exploitation utilisée, dite "intensive" consiste à récupérer l'intégralité du gisement de sel par dissolution et laisser s'effondrer les terrains de couverture. Il a ainsi été mis à profit l'occasion unique, offerte par l'effondrement volontaire d'une grande cavité souterraine dans le sel (effondrement faisant partie de la méthode d'exploitation employée), pour tester différentes techniques d'auscultation et de surveillance destinées à détecter les signes précurseurs de l'effondrement et améliorer la connaissance sur le comportement et l'évolution des cavités salines.

Début 2009, après plusieurs stades d'évolution significative de la cavité et alors qu'elle avait atteint ses dimensions critiques (Klein et al., 2008), l'exploitant a décidé d'accélérer son effondrement. Pour ce faire, des opérations de pompage dans la cavité ont permis de réduire le niveau de la saumure et ainsi la pression hydrostatique qui contribuait jusqu'alors à soutenir les parois de la cavité. Ces opérations, menées sur 4 jours, ont été suivies en temps réel par les dispositifs mis en œuvre sur le site. Elles ont conduit à l'effondrement de la cavité le 13 février 2009.

2. Description de l'expérimentation

2.1. Site de Cerville-Buissoncourt

Le site d'expérimentation se situe dans le bassin salifère de Nancy (54, France), dans une concession propriété de Solvay.

La géologie du site présente quatre principaux faciès subhorizontaux, appartenant à la bordure est du bassin parisien : (1) une alternance de bancs argilo-gréso-marneux jusqu'à 120 m de profondeur environ; (2) un banc raide massif et peu fracturé de dolomie et d'anhydrite (i.e. Dolomie de Beaumont), de ~8.5 m d'épaisseur ; (3) ~ 56 m de marnes à anhydrites plus ou moins indurées et (4) la couche de sel, de 80 m d'épaisseur environ, jusqu'à ~ 270 m de profondeur.

Le banc de dolomie de Beaumont, particulièrement résistant contribue fortement à la stabilité du recouvrement lors de la création et de l'agrandissement de la cavité. Il joue le rôle d'un banc raide (Klein, 2008).

La géométrie de la cavité saline a été évaluée par mesures sonar au démarrage de l'expérimentation. Fin 2004, le toit de la cavité était localisé à 180 m environ de profondeur, à l'interface entre le toit du sel et les marnes sus-jacentes.

2.2. Dispositifs expérimentaux

Le dispositif de monitoring multi-paramètres comprend (Figure 1) :

- *un réseau microsismique* composé de quatre sondes 3D et cinq sondes 1D, équipées de géophones 40 Hz miniatures et installées à différentes profondeurs autour et à l'aplomb de la cavité. La station M6, au centre de la zone d'étude, comporte trois sondes disposées verticalement dont la plus profonde (sonde M6.3) est située dans le banc de dolomie de Beaumont. La durée des enregistrements est fixée à 1.5 s et l'échantillonnage à 5000 Hz. Le traitement a été réalisé avec la suite logicielle SYTMIS (Contrucci et al, 2010) ;
- *un tachéomètre motorisé à visée laser* mesurant, avec une précision verticale de ± 3 mm, la position de 17 cibles, alignées et implantées dans et en dehors de la zone d'effondrement ;
- *deux balises GPS différentiel RTK* (Real Time Kinematic) : l'une placée sur une zone stable ; l'autre à l'aplomb de la cavité, mesurant l'affaissement relatif au centre de la zone d'étude avec une précision de ± 5 mm ;
- *un extensomètre multipoints* ancré dans le forage situé à l'aplomb de la cavité où sont implantées les 3 sondes microsismiques. Les points suivis sont solidarisés à la paroi du forage respectivement à 113 m, 125 m, 129 m de profondeur. Les deux points les plus profonds sont situés à la hauteur du banc raide de dolomie de Beaumont ;

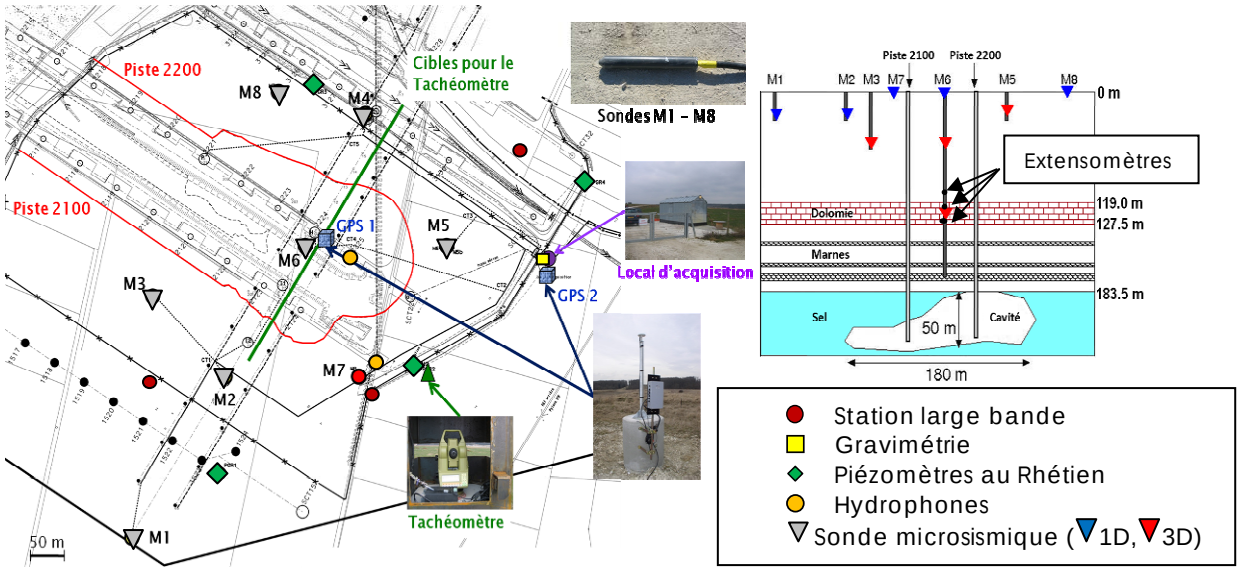


Figure 1. Implantation du réseau de surveillance multi-paramètres. En trait rouge, limite d'extension estimée de la cavité en 2004. Dans l'encadré à droite : coupe géologique simplifiée E-W, position des sondes microsismiques 3D et 1D et des extensomètres.

- *3 hydrophones,* dont 1 placé dans un sondage situé au centre de la zone de rupture attendue dans le banc de dolomie et deux autres dans un sondage hors zone de rupture dans le banc raide et au toit du sel (base du sondage). Les hydrophones enregistrent les signaux acoustiques (événements sur seuil) dans les basses fréquences (de 30Hz à 3kHz) et les hautes fréquences (de 30kHz à 180kHz) ainsi que la puissance des signaux RMScont (Root Mean Square) dans 4 gammes de fréquences (haute : 30kHz à 180kHz, basse : 30Hz à 3kHz, intermédiaire : 3kHz à 30kHz et totale de 30Hz à 180 kHz) ;
- *6 piézomètres* dans le Rhétien, aquifère situé 60 m au dessus du banc de dolomie. 4 piézomètres ont été implantés autour de la future zone d'effondrement. Ils sont équipés de sondes permettant de suivre l'évolution de la pression, la température et la conductivité.

Lors de la dernière phase d'évolution de la cavité, en février 2009, plusieurs capteurs ont été rajoutés :

- *un réseau de 3 sismomètres large bande* (Güralp CMG40-T, bande passante 0.016 – 50 Hz) *en enregistrement continu à fréquence d'échantillonnage 100 Hz ;* deux de ces sismomètres sont associés à des accéléromètres ;
- *un gravimètre CG3-M en acquisition continue* (1 mesure toute les 15 secondes) permettant de mesurer les variations de pesanteur liées aux déplacements de masse associés à l'effondrement.

3. Evolution avant l'effondrement

La Figure 2 présente l'activité microsismique enregistrée sur le site entre Janvier 2005 et Janvier 2009 : 3 crises microsismiques majeures, en Mai 2007, Mars-Avril 2008 et Janvier 2009 ressortent nettement. Elles surviennent avec une subsidence faible de la surface (Tab. 1). Un changement dans le régime microsismique de fond

après la crise de 2008 est également observable : il passe de quelques événements par jour à ~ 25 événements par jour en moyenne.

Le Tableau I présente les caractéristiques principales des crises. Celle de Mars-Avril 2008 est la plus importante en termes de durée et nombre d'événements ; les fréquences fondamentales des signaux détectées sont aussi les plus élevées (Klein et al., 2008, 2009 ; Mercerat et al. 2010). L'amplitude maximale des événements sur la sonde M6.3 est comparable pour chacune des crises, alors que l'énergie à la sonde augmente significativement à partir de Mai 2007 et les crises suivantes.

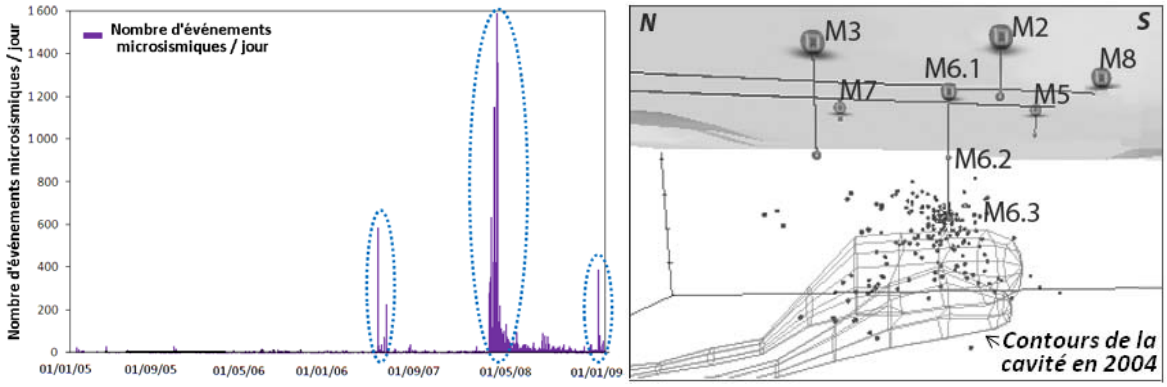


Figure 2. Evolution de l'activité microsismique et de l'énergie au capteur cumulée entre 2005 et 2009 et localisation des foyers le 05/04/2008.

Par ailleurs, ces crises comportent toutes un pourcentage important d'événements de type "rafale" qui se caractérisent par un signal microsismique soutenu sur toutes les voies de mesure, sans possibilité d'identifier des arrivées de phases. Durant ces crises, les sources microsismiques se concentrent principalement sous le banc de dolomie. Ceci a été confirmé par des relevés diagraphiques : par exemple, après la crise de Mars-Avril 2008, elles révèlent une remontée du toit de ~30 mètres, qui atteint alors probablement la base du banc de dolomie (Klein et al, 2008).

Tableau I .Caractéristiques principales des crises microsismiques et amplitude, énergie et fréquence maximales à la sonde M6.3, située dans le banc de dolomie.

	Mai 07	Mars-Avril 08	Jan. 09
Durée (h)	~ 550	> 1200	~ 408
Nombre d'événement	~1000	~14,000	~570
% événement en rafale	50	30	40
Amplitude(mm/s) sur M6.3	6.4	6.55	6
Energie au capteur (J) sur M6.3	2.510^{-3}	1.510^{-2}	1.310^{-2}
Fréquence (Hz)	300	800	400
Affaissement (m)	-	~0.01	~0.02

Le suivi des déformations de la surface du sol par le dispositif tachéométrique a mis en évidence la formation d'une cuvette d'affaissement à partir d'avril 2008 avec, au cours des mois qui vont suivre, une période de soulèvement des bords de la cuvette (plus marqué à l'est). La flèche du banc raide peut être estimée à 5 cm en février 2009 (ancrages extensométriques dans le banc de dolomie). Ces

observations indiquent que le banc de dolomie a maintenu les terrains en place et a réagi comme une poutre reposant sur appui (Figure 2).

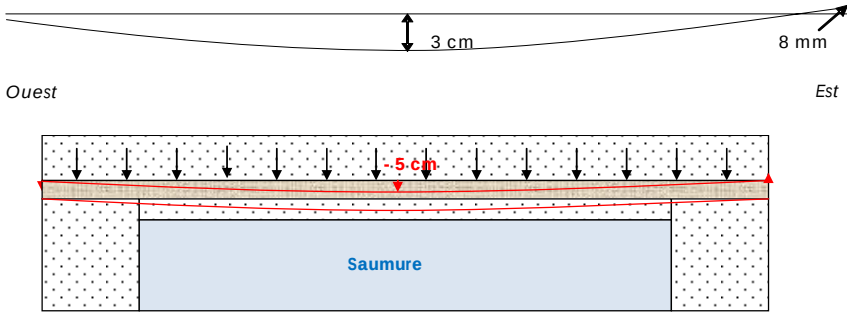


Figure 2 : mars 2008-janvier 2009 ; représentation schématique spatiale de l'affaissement et de la déformation du banc raide sur appui.

3. Effondrement général – proposition d'un scénario d'évolution de la cavité

Du 10 au 13 Février 2009, le rabattement de saumure dans la cavité a été conduit par l'exploitant, afin de provoquer son effondrement dans des conditions maîtrisées.

L'analyse comparée des mesures principales des dispositifs déployés sur le site de Cerville-Buissoncourt permet de proposer un scénario probable de l'évolution de la cavité lors des dernières étapes de son évolution (Figure 3 et Figure 5).

Etape 1 : pompage et rabattement du niveau de saumure

Le banc de dolomie fléchit en réponse à la diminution de la pression de saumure dans la cavité. Cette réponse du banc est enregistrée par les extensomètres et les mesures de déplacements de la surface du sol (cibles tachéométriques et balise GPS). L'activité microsismique et hydroacoustique est réduite.

Etape 2 : Rupture probable du banc raide (34 heures avant l'effondrement)

Alors que la flèche du banc atteint 15 cm environ pour une diminution de pression de 0,7 MPa, la corrélation des mesures acquises par l'ensemble des dispositifs permet de caractériser une première rupture du banc, probablement à ses appuis :

- augmentation rapide du niveau de saumure dans la cavité (+ 9 m). A partir de ce moment, le dispositif de pompage n'arrivera plus à compenser la diminution de volume de la cavité, le niveau de saumure va constamment augmenter ;
- première accélération de l'affaissement en surface et rupture de la continuité de la cuvette d'affaissement. Un saut brusque de déformation du banc (~0,5 mm) est enregistré ;
- baisse du niveau piézométrique de l'aquifère des grès du Rhétien situé dans le recouvrement suggérant une communication hydraulique entre celui-ci et la cavité, liée à la rupture des terrains sus-jacents au banc de dolomie ;
- les mesures géophysiques (microsismiques, hydroacoustiques) indiquent un pic majeur d'activité ; saturation en amplitude et en fréquence des sondes microsismiques les plus proches de la cavité, augmentation de la RMS en particulier dans les hautes fréquences.

Etape 3 : Poursuite de la rupture du banc (20 heures avant l'effondrement)

- alors que l'affaissement en surface s'est poursuivi pour atteindre 40 cm à l'aplomb de la cavité, celui-ci s'accélère à nouveau. Un nouveau pic d'activité microsismique et hydroacoustique est enregistré, des coups sourds sont entendus sur le site et le niveau de saumure dans la cavité monte à nouveau très

rapidement. Tous les capteurs positionnés au sein du banc sont perdus. On peut envisager à ce stade de nouvelles ruptures au sein du banc.

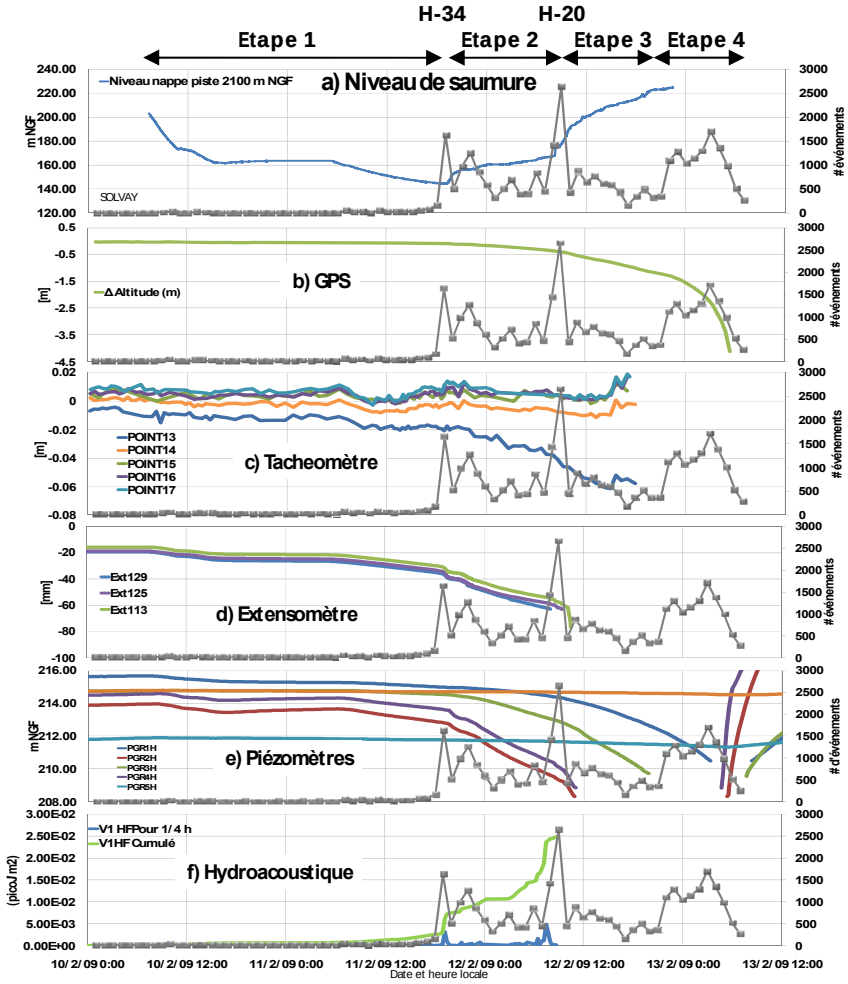


Figure 3 : Corrélation des données acquises par rapport au suivi microsismique.

Etape 4 : Evolution terminale vers l'effondrement

A partir de l'étape 2, on peut envisager que le banc et les terrains de recouvrement situés à l'aplomb de la cavité forment un « piston » qui coulisse vers le bas et dont le déplacement est contrôlé (limité) par la pression de saumure dans la cavité et les frottements à son pourtour. Le banc de dolomie reste en place au moins jusqu'à l'étape 3 comme l'atteste le fonctionnement des capteurs qui lui sont solidaires (microsismique, extensomètre).

L'activité microsismique qui s'était ralentie après l'étape 3 reprend de façon continue et soutenue pendant les 9 heures qui vont précéder l'effondrement. Cette signature différente comparée aux deux pics précédents pourrait correspondre aux délitements successifs des terrains marneux situés au dessus du banc de dolomie une fois ce dernier tombé dans la cavité (entre l'étape 3 et 4).

Dans les heures qui ont précédé l'effondrement, une partie seulement des sondages connectés à la cavité (les plus bas topographiquement) a débordé. L'ouverture de la cavité vers la surface à 5h45 le 13 février 2009 s'est déroulée en moins d'une minute traduisant, comme dans les heures qui ont précédé, une faible mise en pression du dispositif.

Ces observations indiquent très probablement une évolution terminale ascendante de la cavité dans le recouvrement ; durant les heures qui ont précédé l'ouverture en surface du cratère d'effondrement, le banc de dolomie, puis les marnes qui le surmontent tombent progressivement dans la cavité. La hauteur du « piston » formé par les terrains encore en place diminue ainsi progressivement. La mobilisation du frottement à son pourtour se réduit occasionnant une augmentation continue de la vitesse d'affaissement mesurée par le GPS. Cette évolution apparait logique au regard des très faibles mises en pression du système et du rééquilibrage très rapide des pressions lors de l'ouverture du cratère en surface. Une analyse complémentaire des variations de pesanteur observées au cours de l'effondrement devrait permettre d'estimer le déplacement des masses et ainsi vérifier cette hypothèse (Figure 4).

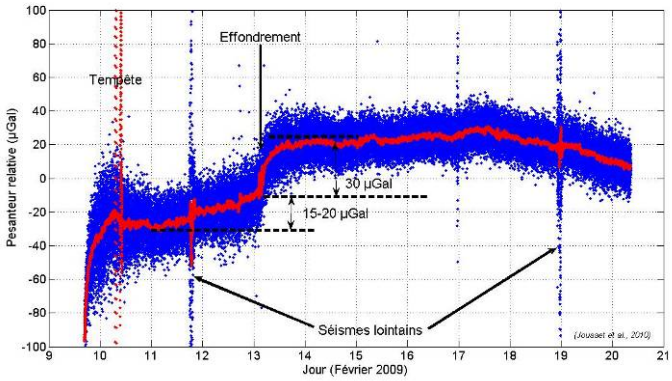


Figure 4: Variations de la pesanteur observée au moment de l'effondrement de la cavité de Cerville.

Tableau II Caractéristiques principales de la microsismicité pendant la période d'effondrement - sonde M6.3 située dans le banc de dolomie.

Heure avant l'effondrement	< H - 34h	H -34h	H -20h	H -2h
# événements/h	< 50	~1600	~2600	~1700
% événements en rafale	7	65	88	70
Amplitude (mm/s) sur M6.3	6.55	6.55	6.55	-
Energie (J) sur M6.3	3.3e-2	1.2e-1	> 1.0	-
Fréquence (Hz) sur M6.3	700	2500	2500	-
Affaissement (m)	< 0.05	~ 0.1	~0.4	~4
Flèche dolomie (m)	< 0.08	~ 0.14	< 0.5	-

4. Conclusions - Perspectives

L'évolution de la cavité a pu être suivie grâce aux différents dispositifs mis en place. Entre 2007 et 2008, des signes précurseurs de son évolution ont été détectés grâce au traitement en temps réel des événements microsismiques qui ont précédé des déplacements perceptibles de la surface du sol. A ce stade, la stabilité de la cavité était assurée par le banc de dolomie qui jouait le rôle de banc raide et par la pression de saumure qui contribuait à soulager la sollicitation des parois de la cavité.

La cavité avait atteint ses dimensions critiques en 2008 et c'est la diminution de la pression de saumure dans cette dernière, opérée par le pompage, qui a occasionné

l'accélération des déformations, la rupture du banc du raide et des terrains sus-jacents. Les mesures et observations ont mis en évidence le rôle essentiel de la saumure présente dans la cavité, de sa mise en pression et de sa dissipation dans la dynamique d'évolution terminale du système.

Cette expérimentation constitue une base de données unique dont la valorisation sera poursuivie en particulier dans l'analyse et l'interprétation corrélées des mesures acquises par les différents dispositifs. Elle offre de nombreuses pistes de recherche tant sur la pertinence des méthodes de surveillance d'effondrement, les signes précurseurs d'instabilité que sur la compréhension des mécanismes d'effondrement à plusieurs échelles d'analyse.

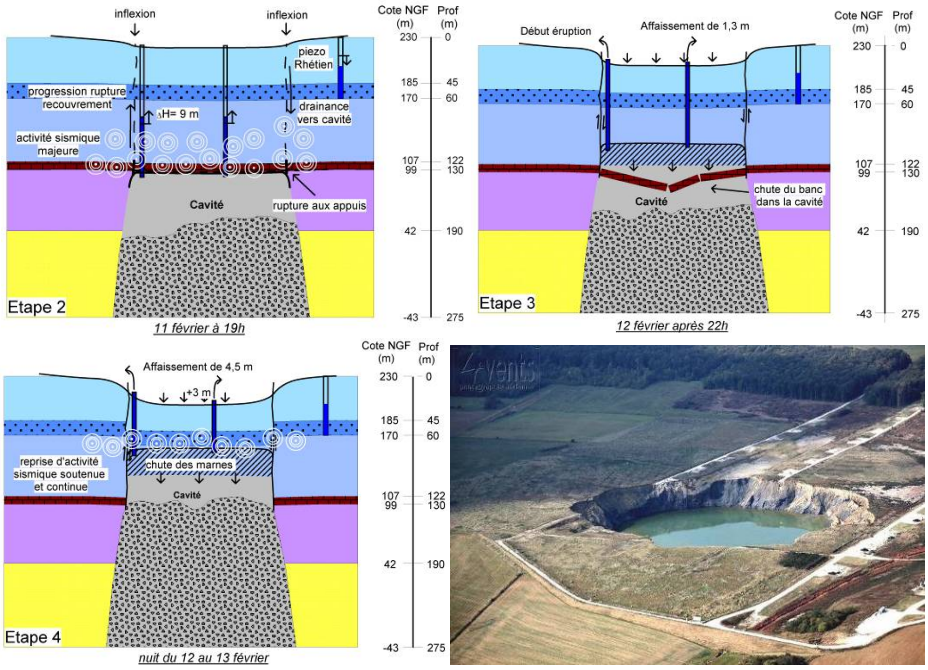


Figure 5 : Représentations schématiques de la cavité instrumentée à différentes étapes et vue aérienne de l'effondrement, été 2009 (cliché Solvay).

5. Remerciements

Le GISOS tient à remercier la société SOLVAY pour le support technique et logistique apportés à cette expérimentation.

6. Références bibliographiques

Contrucci, I., Klein, E., Bigarre, P., Lizeur, A., Lomax, A., and Bennani M., 2010, Management of Post-mining Large-scale Ground Failures: Blast Swarms Field Experiment for Calibration of Permanent Microseismic Early-warning Systems, Pure Appl. Geophys., DOI 10.1007/s00024-009-0005-4.

Jousset P., Bazargan B., Lebert F., Bernardie S. and Gourry J.C., 2010, Geophysical observations at cavity collapse, EGU april 2010

Klein, E., Contrucci, I., Daupley, X., Hernandez, O., Bigarré, P., Nadim, C. & Cauvin, L., 2008. Experimental monitoring of a solution-mining Cavern in Salt: identifying and analyzing early-warning signals prior to collapse. SMRI Fall 2008 Technical Conference, 12-15 October 2008, Galveston (Austin), Texas, USA, pp. 135-146.

Klein, E., Contrucci, I., Cao, N.T. & Bigarré, P., 2009. Real-time monitoring of a salt solution mining cavern: from pre-cursory signs to signs to general collapse. AGU, December 2009, San Francisco, Eos Trans. AGU, 90(52), Fall Meet. Suppl., Abstract S32B-06.

Lebert, F., Bernardie S. and Mainsant G., 2010, Hydroacoustic monitoring of a salt cavity: analysis of precursory events of the collapse, Vol. 12, EGU General Assembly 2010,EGU2010-4878-1, 2010

Mercerat, E. D., Driad-Lebeau, L. & Bernard P., 2010. Induced seismicity monitoring of an underground salt cavern prone to collapse, Pure Appl. Geophys., DOI 10.1007/s00024-009-0008-1.