

Suivi topographique d'une cavité saline jusqu'à son effondrement

■ Régine HOURBEIGT-FLEURY - Laurent CAUVIN - Xavier DAUPLEY

Le sous-sol de la Lorraine renferme d'importants gisements de sel, exploités principalement par dissolution. Cette technique peut conduire à la création de cavités souterraines de grande dimension. Dans le cadre de travaux de recherche dédiés à l'après-mine, l'auscultation topographique de la surface sur le site de Cerville-Buissoncourt a permis l'analyse et la compréhension du mécanisme d'affaissement des terrains précédant l'effondrement final d'une de ces cavités. L'article constitue un condensé d'un mémoire d'ingénieur établi sur la base de mesures déjà effectuées.*

MOTS-CLÉS

Cavité, affaissement, effondrement, auscultation, suivi topographique, sel gemme

Le contexte

En Lorraine, l'exploitation du sel gemme est très ancienne. Ce sont d'abord les sources salées qui ont été valorisées, puis au XIX^e siècle, l'exploitation industrielle s'est développée par mines souterraines et par la suite par forages destinés à pomper l'eau salée présente au toit¹ du gisement de sel ou à pratiquer de la dissolution en injectant de l'eau douce. La société Solvay a développé le principe d'exploitation par dissolution appelé "par pistes de sondages". Il s'agit d'une méthode dite "intensive" qui consiste à récupérer l'intégralité du gisement de sel par dissolution créant des cavités de grandes dimensions qui conduisent à l'effondrement des terrains de couverture (Figure 5).

Dans le cadre d'un programme d'appui technique au Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer (MEEDDM), l'INERIS a mis à profit l'occasion unique offerte par l'effondrement volontaire d'une de ces grandes cavités pour tester des méthodes de détection de signes précurseurs d'effondrement. Cette expérimentation a été conduite par le GISOS (Groupement d'Intérêt Scientifique sur l'Impact et la Sécurité des Ouvrages Souterrains) composé par le BRGM (Bureau de Recherches Géologiques et Minières), l'INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques), l'INPL (Institut National Polytechnique de Lorraine) et l'Ecole des Mines de Paris a constitué un programme de recherche ayant pour but de caractériser l'évolution des

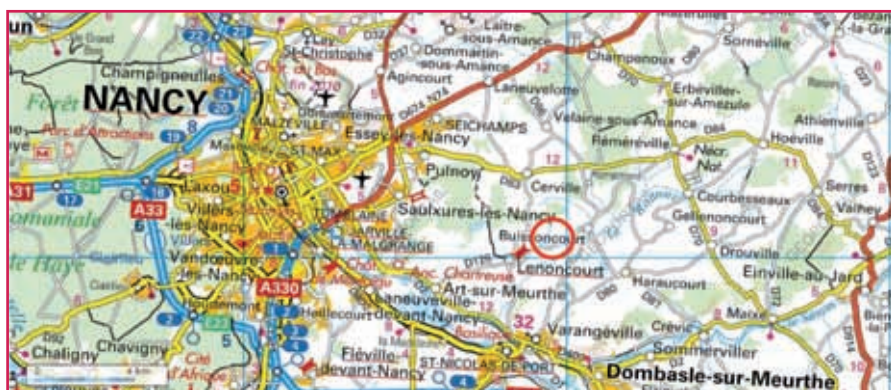


Figure 1. Carte topographique de la région de Nancy avec la zone d'étude (cercle rouge).

terrains liée à la progression de la cavité vers l'effondrement.

Le site d'expérimentation est celui de Cerville-Buissoncourt, situé à l'Est de Nancy (Figure 1). L'évolution de la cavité initialement située à 180 m de profondeur a été suivie pendant plusieurs mois jusqu'à son effondrement final survenu le 13 février 2009.

Ce travail de recherche sur le site pilote de Cerville-Buissoncourt a permis la mise en place de nombreux suivis *in situ* : écoute microsismique, mesures extensométriques, écoute hydro-acoustique, suivi électrique, tomographie sismique, suivi topographique, etc. L'écoute microsismique enregistre la propagation des ondes élastiques qui se propagent dans le milieu rocheux. Les résultats de cette écoute seront corrélés avec les observations issues du suivi topographique.

Le suivi topographique est présenté ici. Il a été mis en place par l'INERIS. L'analyse des données s'étend sur une période comprise entre le 13 mars 2008 et le 12 mai 2009.

Le suivi topographique est présenté ici. Il a été mis en place par l'INERIS. L'analyse des données s'étend sur une période comprise entre le 13 mars 2008 et le 12 mai 2009.

Géologie du site

Les gisements de sel en France se répartissent dans quelques grandes régions, notamment dans l'Est de la France. En Lorraine, ils ont été déposés au Trias, niveau caractérisé par une sédimentation épirogénique², marine, lacustre ou lagunaire. Le sel de Cerville-Buissoncourt est daté du Keuper inférieur (- 230 Millions d'années). Voir Figure 2.

Au niveau des sondages du site de Cerville-Buissoncourt, le toit du gisement se trouve à environ -185 m sous la surface du sol ; son épaisseur totale est

(*) Le mémoire est à la disposition des personnes intéressées au CNAM (chaire de géotechnique) - Paris.

(1) Toit : surface supérieure d'une formation.

(2) Epirogénique : lié aux mouvements verticaux des continents traduisant des régressions et des transgressions.



de 85 m (Figure 3). Le sel est sous forme cristalline, gris clair à gris foncé. La halite (sel gemme) est très soluble (360 g/litre d'eau douce). Par comparaison, les autres minéraux courants les plus solubles sont l'anhydrite

(2,4 g/litre) et le gypse (2 g/litre). Cette caractéristique prédispose le sel à l'exploitation par dissolution.

Dans la série stratigraphique (Figure 4), on peut noter un niveau particulier que l'on peut rencontrer régionalement

dans le paysage, il s'agit de la dolomie de Beaumont. Elle apparaît à l'affleurement sous forme assez massive, parfois vacuolaire, se débitant en petites dalles sonores centimétriques ou décimétriques. Les sondages montrent la présence au toit de cette formation d'un banc d'anhydrite, roche très compétente comme la dolomie. L'ensemble de ces deux couches forme la "dolomie de Beaumont" d'une épaisseur de 8,5 m à Cerville. Cette formation a des caractéristiques mécaniques importantes en comparaison de celles du sel et des marnes à anhydrite. Les différents essais géotechniques réalisés permettent de mettre en évidence la forte valeur du module d'Young de la dolomie de Beaumont (80 Gpa) ainsi que sa résistance à la compression, proche de 200 MPa (en laboratoire).

Méthode d'exploitation par pistes et sondages

La technique mise en œuvre par Solvay est dite intensive. Elle consiste à exploiter par dissolution la totalité de l'épaisseur du gisement de sel selon des alignements prédéfinis de sondage. De l'eau douce est injectée

ERE	PERIODE		MA env.
Cénozoïque (Tertiaire)	Néogène	Pliocène	0
		Miocène	-7
		Oligocène	-23
	Paléogène	Eocène	-34
		Paléocène	-53
		Supérieur	-96
Mésozoïque (Secondaire)	Crétacé	Inférieur	-135
		Malm	-155
	Jurassique	Dogger	-175
		Lias	-205
	Trias	Supérieur	Rhétien -220 Keuper -230
		Moyen	-240
		Inférieur	-250
Paléozoïque (Primaire)	Permien		-295
	Carbonifère		-355
	Dévonien		-408
	Silurien		-435
	Ordovicien		-500
	Cambrien		-540

Figure 2. Echelle des temps géologiques.

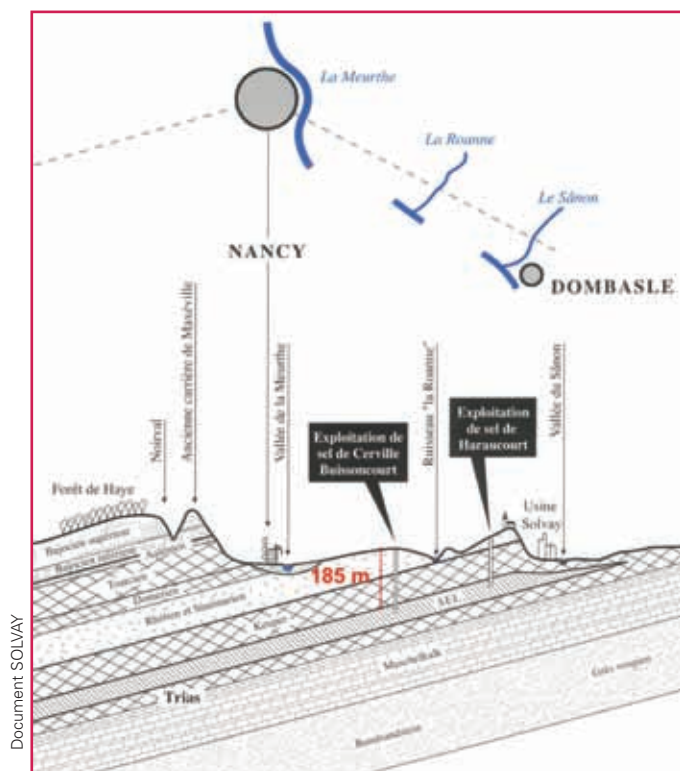


Figure 3. Coupe géologique schématisée de la région Est de Nancy.

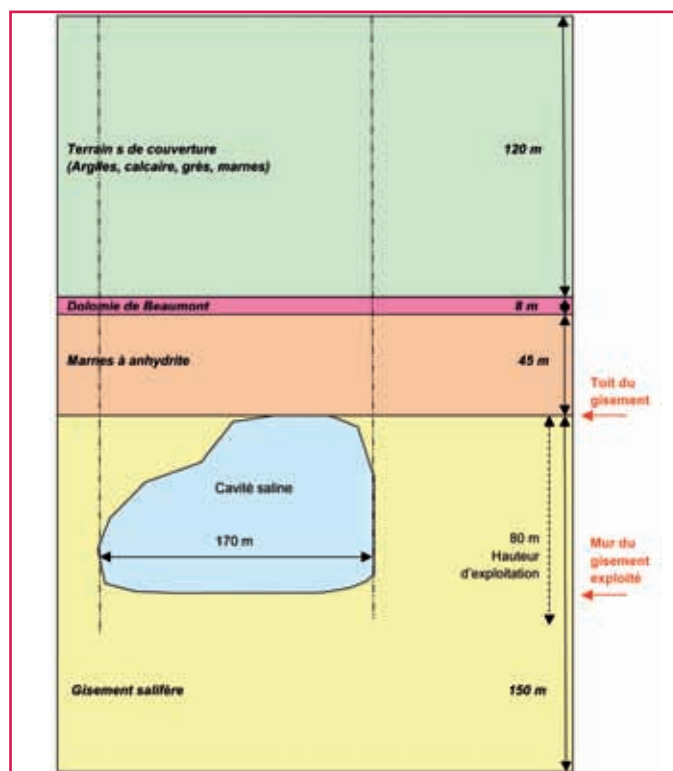


Figure 4. Série stratigraphique schématisée à Cerville.

dans le gisement, elle se charge en sel au contact de celui-ci. La saumure liquide est ensuite aspirée et envoyée à une usine par une pompe à grande capacité.

Dans le détail, la méthode est la suivante :

Le procédé d'exploitation pistes et sondages consiste à implanter des forages tous les 50 m alignés suivant la ligne de plus grande pente du gisement.

Le forage est arrêté au mur de la formation de sel. Les forages doivent être rejoins par un chenal de communication réalisé ainsi.

En même temps que l'eau douce, de l'air comprimé est injecté dans le forage. L'air vient se plaquer au toit de la cavité et empêche l'eau douce de le dissoudre. La dissolution ne s'effectue plus que latéralement. La cavité s'agrandit et, de proche en proche, les cavités se rejoignent. La communication entre les forages est ainsi établie et l'exploitation peut commencer.

De l'eau douce est injectée à une extrémité du chenal. La dissolution se développe dans toutes les directions au voisinage des sondages "introduceurs" d'eau. La saumure saturée est soutirée dans un ou deux sondages de plus gros diamètre situés à l'autre extrémité de la piste : c'est l'extraction.

La cavité s'agrandit et finit par atteindre le toit du gisement de sel. L'injection d'eau est alors reportée sur d'autres sondages plus en aval qui comportent encore du sel.

Les terrains de couverture, qui ne sont plus soutenus par le sel qui a été dissous, s'effondrent peu à peu dans la cavité et il apparaît en surface un effondrement appelé "cratère" dont la dimension correspond sensiblement à celle de la cavité créée par dissolution. Cette dépression se remplit d'eau de ruissellement.

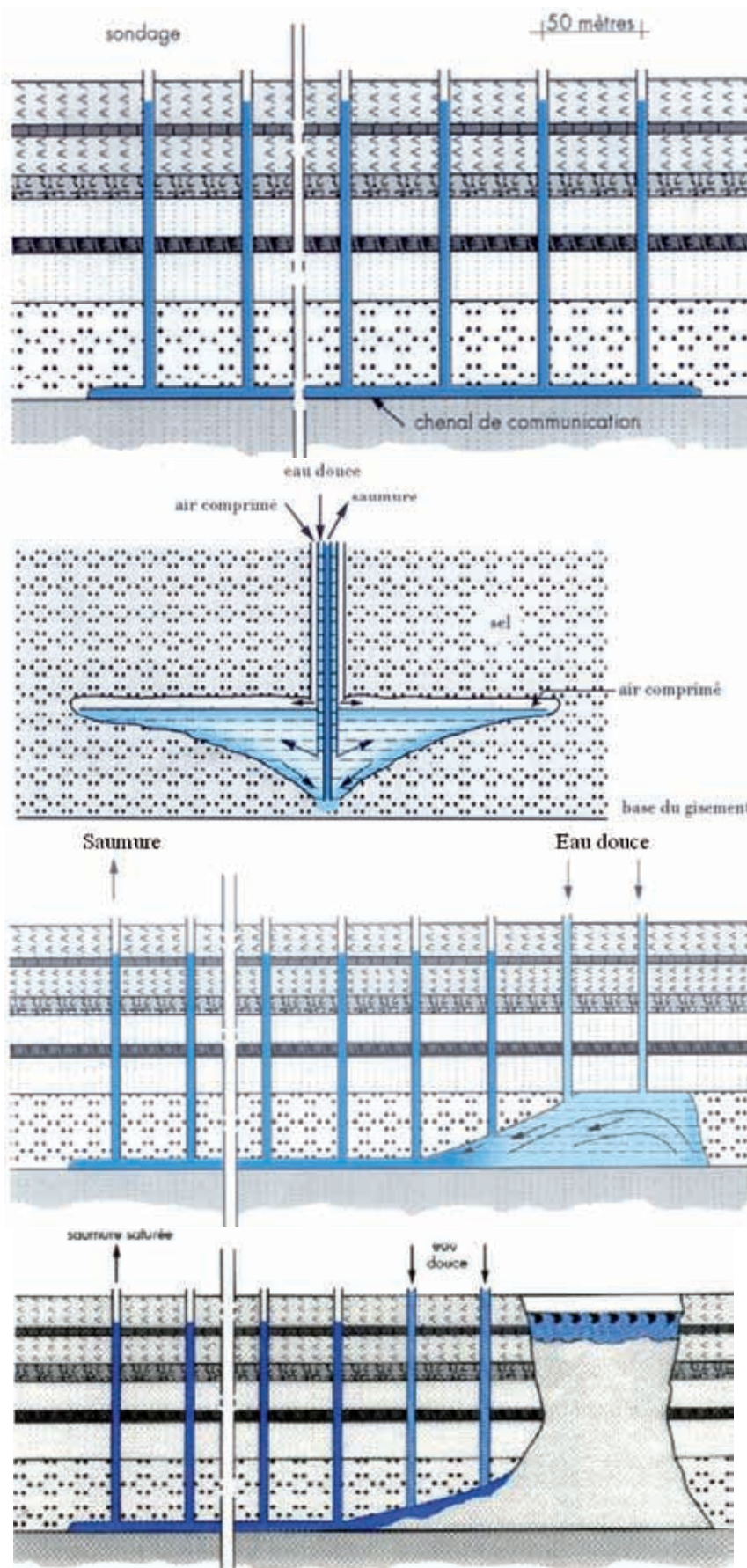


Figure 5. Procédé d'exploitation.

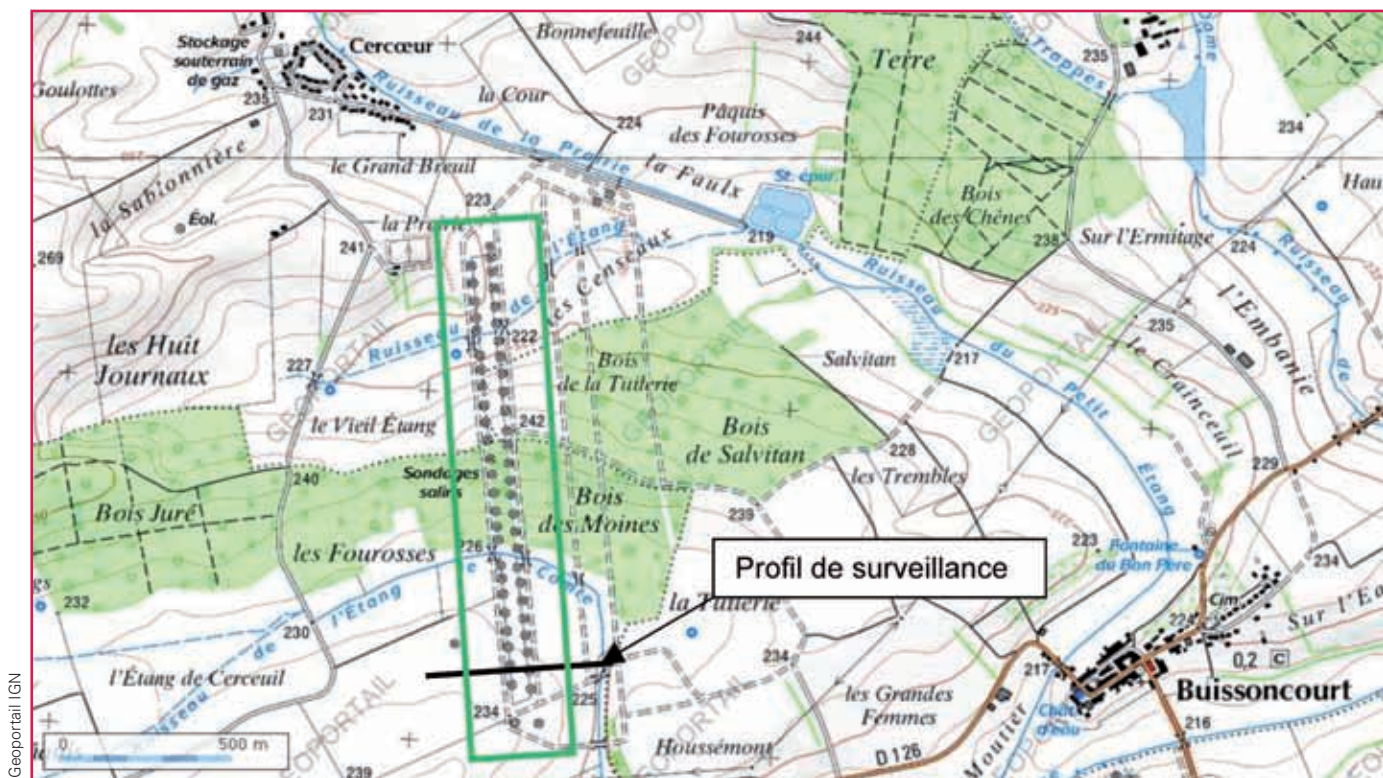


Figure 6. Emplacement des pistes de sondage.

Instrumentation mise en place

Sur la carte topographique de la Figure 6, figurent les tracés des deux pistes de sondage mises en place pour les besoins de l'exploitation (Figure 7).

La surveillance topographique est placée selon un profil perpendiculaire au plus grand côté du rectangle de façon à avoir de part et d'autre de la ligne, des repères stables extérieurs à la zone d'influence de l'exploitation.

Cette surveillance est établie à partir de mesures topographiques classiques. Ont été utilisés :

- Un tachéomètre en zone stable.
- Des références (repères en zone stable).
- Les cibles (prismes positionnés selon une ligne, numérotées de 1 à 17).
- Deux antennes GPS : l'une placée à proximité du prisme 8, l'autre en référence proche du local technique.
- Un local technique qui centralise l'ensemble des acquisitions de la surveillance.

Le tachéomètre utilisé est un TCA2003 de Leica (précision angulaire de ± 0.15 mgon et précision de mesure de

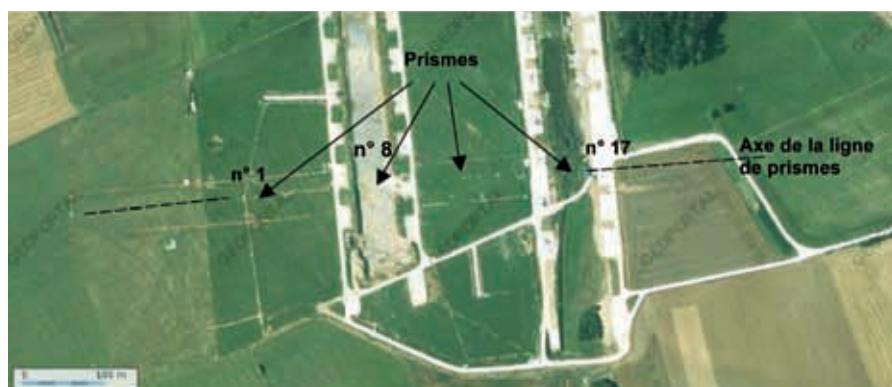


Figure 7. Image Géoportail IGN du site pilote de Cerville - zone instrumentée.

distance de ± 1 mm + 1 ppm). C'est un appareil robotisé qui permet de répéter les mesures topographiques à intervalles réguliers selon une fréquence définie par l'utilisateur.

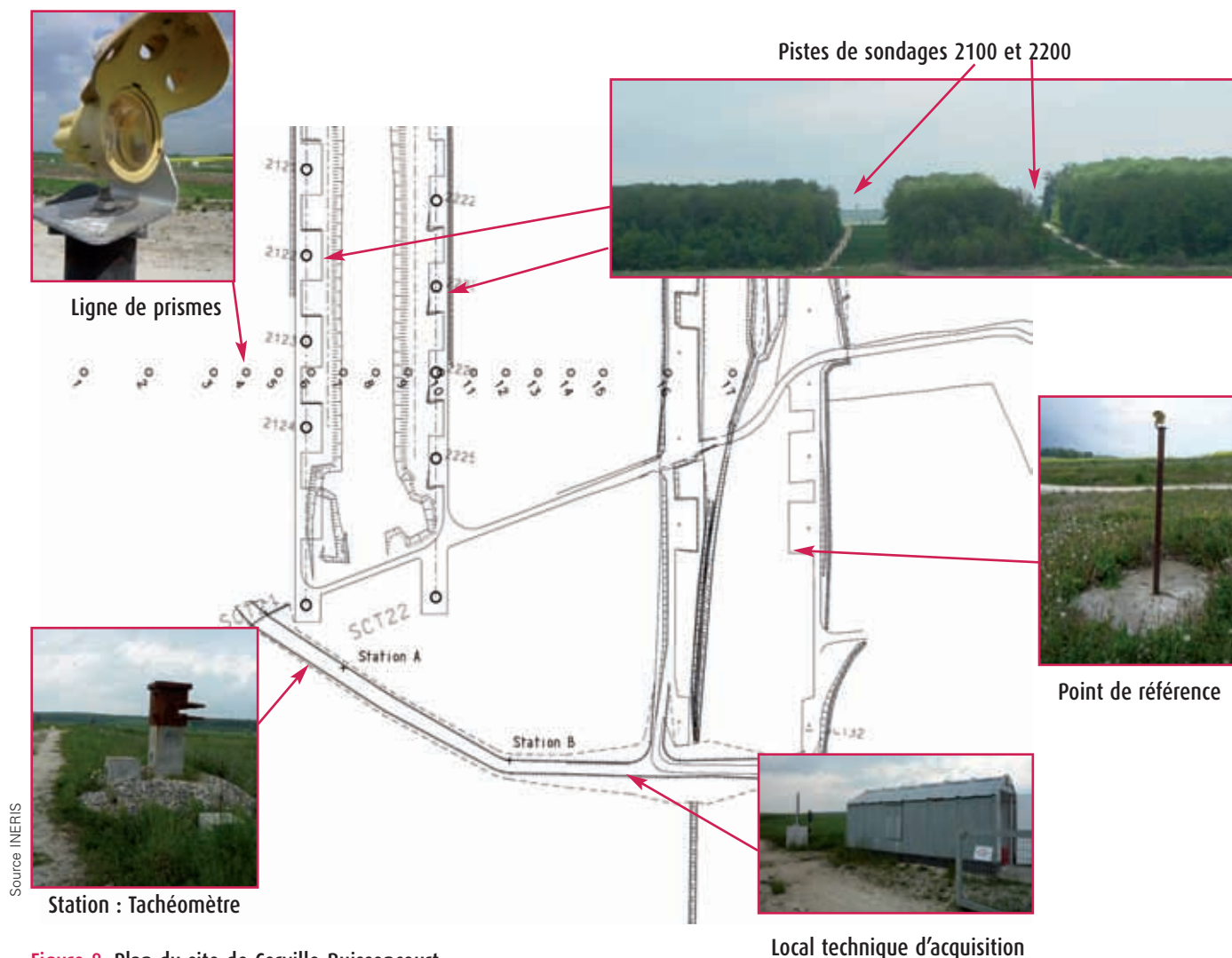


Figure 9. TCA 2003 dans son caisson métallique.

Il est muni d'un système de reconnaissance automatique de prisme (ATR : Automatic target recognition). Il a été installé sur un pilier de béton et inséré dans un caisson métallique afin de le protéger. Une fente permet les mesures vers les différentes cibles (Figure 9).

La stabilité du tachéomètre était contrôlée par un système d'alerte dès que l'appareil n'était plus calé.

Les prismes sont au nombre de 17, positionnés régulièrement selon une ligne transversale à l'alignement des sondages ; ils sont placés sur des cannes assez élevées (3 à 6 m) afin d'être visibles depuis la station totale (Figure 11).

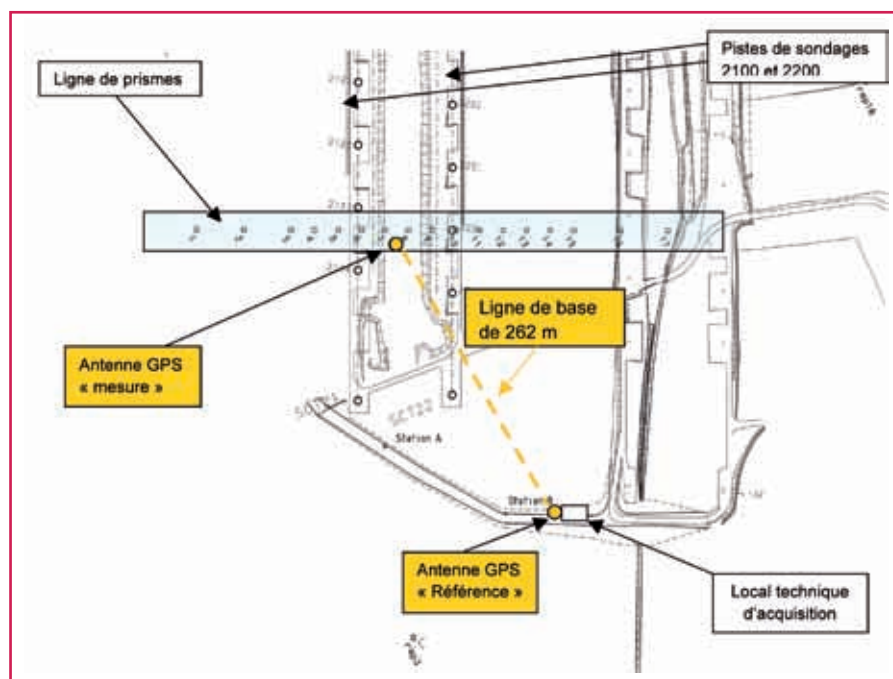


Outre la nécessité d'élever ces prismes pour qu'ils soient tous visibles depuis la station, la configuration du terrain occasionnait des visées rasantes. Ces visées proches de la surface topographique subissent une forte réfraction atmosphérique et entachent les lectures d'erreurs importantes.

Le déplacement de la station B vers la station A (Figure 8) a minimisé l'influence de la réfraction.

La distance entre chaque prisme et la station totale est comprise entre 172 m et 295 m. Les mesures sont prises en continu sur 24 heures. Chaque mesure est répétée deux fois, par double retournement, la mesure enregistrée étant la moyenne des deux mesures prises. Chaque cycle de mesure débute par la visée sur une référence placée en zone stable (figure 8).

Le tachéomètre met environ 20 minutes pour effectuer 14 visées. Au total, les



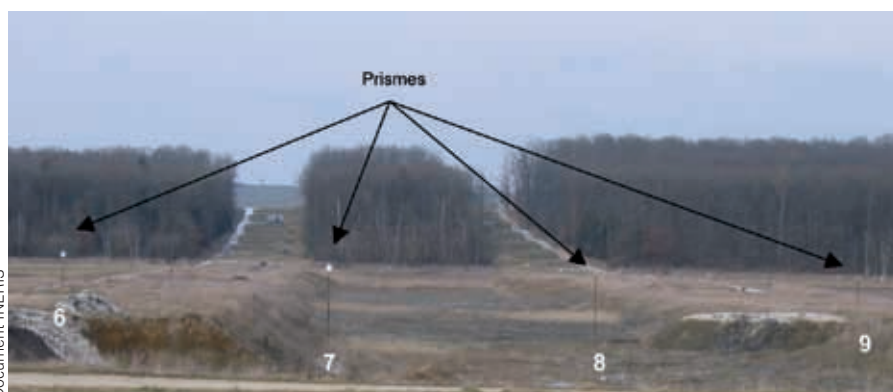


Figure 11. Photographie du site au niveau des prismes 6 à 9 (avant renforcement) – Vue vers le Nord.

données disponibles représentent un fichier de 200 000 mesures. L'ensemble de cette instrumentation a été mise en place conjointement par Laurent Cauvin (INERIS), Bertrand Delaplanche (LEICA) et la société Solvay, qui ont opéré à plusieurs reprises des adaptations au site afin que le système soit opérationnel de façon durable.

Le système GPS est constitué d'une antenne "référence" proche du local technique d'acquisition et d'une antenne "pivot" proche du centre présumé de la cuvette et du prisme 9. Les deux antennes GPS de marque Magellan sont bi-fréquences pour une meilleure précision. La méthode choisie est le RTK afin de disposer des mesures en temps réel nécessaires pour le suivi opérationnel du mouvement de terrain. Les données de mesures ou de corrections sont transmises par radio entre le mobile et la référence.

La Figure 10 présente l'emplacement des différentes antennes ainsi que la ligne de base dont la longueur est très courte.

Validité et précision des mesures

L'ensemble des données obtenues nécessitent un tri au regard des différentes erreurs liées essentiellement aux conditions de mesure sur le site de Cerville-Buissoncourt.

Seront présentées les erreurs systématiques d'une part et les erreurs accidentelles d'autre part.

Les **erreurs systématiques** concernant l'instrument ont fait l'objet d'une déter-

mination et d'un enregistrement avant les mesures. Les lectures ensuite réalisées ont automatiquement été compensées et corrigées de ces erreurs. Il s'agit des erreurs d'index du compensateur bi-axial, d'index du cercle vertical, de la ligne de visée, de basculement, d'origine de la localisation ATR.

De même, les erreurs atmosphériques liées à la température, la pression et l'humidité relative influencent les mesures de distance. Les variations climatiques dans cette région au climat continental sont importantes et ont été prises en compte :

- La température est mesurée en degré Celsius à $\pm 0.1^\circ\text{C}$. Une variation de température de 1°C correspond à une erreur de 1 mm par km, c'est-à-dire une précision relative de 10^{-6} ou 1 ppm. A Cerville, l'amplitude est de 40°C environ (-2°C à $+38^\circ\text{C}$).
- La pression est mesurée en millibar à $\pm 0.1 \text{ mb}^{(3)}$. Une variation de pression de 3 mm Hg correspond à une erreur de 1 mm par km, c'est-à-dire une précision relative de 10^{-6} ou 1 ppm. A Cerville, l'amplitude est de 115 mb (889 mb à 1004 mb)
- A Cerville, les mesures d'humidité relative n'ont pas été faites. Les mesures sont paramétrées dans le tachéomètre pour une humidité relative de 60 %.

La correction atmosphérique résultante maximum a été de 43 ppm (valeurs allant de - 13 ppm à + 43 ppm), ce qui a pour effet pour une distance maximale entre station et prisme d'environ 300 m, d'occasionner une erreur sur la distance de + 13 mm.

(3) 1 mbar = 1 hectoPascal = 1 hPa

Ces corrections ont été faites automatiquement par le tachéomètre.

Par ailleurs l'erreur de réfraction atmosphérique nécessite une analyse plus fine compte tenu de la morphologie du terrain et des heures de mesures à tout moment de la journée et de la nuit.

Le trajet optique du rayon lumineux issu du tachéomètre n'est pas rectiligne, il traverse des couches atmosphériques de densité différente et est incurvé vers le sol.

La formule de correction de cette réfraction fait intervenir le module de réfraction atmosphérique.

Le module de réfraction atmosphérique correspond au rapport du rayon de la Terre sur le rayon de courbure de la trajectoire lumineuse. Il varie de 0.16 à 0.13. Un minimum peut être atteint aux heures chaudes avec 0.11.

Cependant ce module n'est pas stable, il est choisi arbitrairement à 0.13 par Leica mais peut être fortement modifié en fonction de l'influence des heures de mesure ou du phénomène de rasanse. Des expériences (Cf. *Géodésie générale – Levallois cité ci-dessous*) ont permis de mettre en évidence une différence entre les modules théoriques calculés à partir d'une formule et les modules déterminés de façon empirique. Aux heures matinales, une discordance de 30 % à 50 % a pu être observée alors qu'elle était moindre aux heures chaudes. "Le phénomène présente quelques régularités pendant la période du minimum de réfraction de 10 h à 15 h".

Afin de qualifier la réfraction, il aurait été préférable de réaliser des visées zénithales réciproques et simultanées.

La rasanse se définit par le rapprochement de la ligne de visée vers le sol. A Cerville, lorsque le tachéomètre était stationné en B, les visées étaient fortement influencées par la réfraction compte tenu de la morphologie défavorable du site. Il a été constaté une imprécision de 10 cm entre deux journées consécutives de mesure sur le même point, lorsque le tachéomètre était positionné en station B.

C'est la raison de son déplacement vers la station A pour réduire ce phénomène.

En conclusion, il apparaît que les mesures fiables soient uniquement



celles prises à partir de la station A sur un intervalle de temps (10 h – 15 h). Il a été tenu compte de cette plage horaire 10 h – 15 h dans le traitement des données avec le logiciel Excel, ce qui n'a pas été le cas avec le logiciel GeoMoS.

Les **erreurs accidentelles** sont considérablement réduites par le fait que le tachéomètre soit robotisé. Les erreurs résiduelles dépendent des caractéristiques de l'instrument données par le constructeur et le calcul des écarts-types suit la loi normale de composition des erreurs accidentelles.

- Sur les angles :

$\sigma_V = \pm 0.15 \text{ mgon}$ (donnée constructeur). Les mesures angulaires sont déterminées par double retournement donc prises deux fois et la mesure retenue est la moyenne des deux :
Donc l'écart-type sur la moyenne
 $\sigma_V = \pm 0.15 / \sqrt{2}$
 $\sigma_V = \pm 0.00015 \cdot \pi / \sqrt{2} \cdot 200$
 $= \pm 1.666 \cdot 10^{-6} \text{ rad}$

- Sur les distances :

$\sigma_{Dp} = \pm 1 \text{ mm} + 1 \text{ ppm}$ (donnée constructeur)
Pour une distance de 295 m, $\sigma_{Dp} = \sqrt{0.001^2 + (0.001 \times 0.295)^2} = \pm 1.04 \text{ mm}$
Les mesures de distance sont également prises deux fois :
L'écart-type sur la moyenne est :
 $\sigma_{Dp} = \pm 1.04 / \sqrt{2} = \pm 0.735 \text{ mm}$
On prendra pour cette étude le cas de mesures les plus défavorables, c'est-à-dire : $V = 102 \text{ gon}$ et $Dp = 295 \text{ m}$ (V correspondant à la visée la plus inclinée et D distance maximale).

- Précision de la dénivelée :

$Dni = f(Dp, V)$
 $\sigma_{dn}^2 = f'^2_{Dp} \cdot \sigma_{Dp}^2 + f'^2_V \cdot \sigma_V^2 = (\cos V \cdot \sigma_{Dp})^2 + (-Dp \cdot \sin V \cdot \sigma_V)^2 = \pm 0.000492 \text{ m}$
soit $\pm 0.5 \text{ mm}$
Tolérance $T = 2.58 \sigma = \pm 1.3 \text{ mm}$

- Précision de la distance horizontale :

$Dh = g(Dp, V)$
 $\sigma_{dh}^2 = g'^2_{Dp} \cdot \sigma_{Dp}^2 + g'^2_V \cdot \sigma_V^2 = (\sin V \cdot \sigma_{Dp})^2 + (Dp \cdot \cos V \cdot \sigma_V)^2 = \pm 0.00699 \text{ m}$
soit $\pm 0.7 \text{ mm}$
Tolérance $T = 2.58 \sigma = \pm 1.9 \text{ mm}$

La composition de la composante planimétrique (distance horizontale) et de la composante altimétrique (dénivelée) donne une tolérance de $\sqrt{1.3^2 + 1.9^2} = \pm 2.3 \text{ mm}$.

Point ID	Profile	Time	Longitudinal Displacement [m]	Transverse Displacement [m]	Height Displacement [m]
POINT15	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0026	0.0012	0.0089
POINT16	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0004	-0.0011	0.0086
POINT17	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0015	0.0005	0.0078
POINT3	Profile	04/04/2008 23:59:59	-0.0001	-0.0003	0.0031
POINT4	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0069	-0.0023	0.0035
POINT5	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0038	-0.0046	0.0025
POINT6	Profile	04/04/2008 23:59:59	0.0016	-0.0003	0.0012

Figure 12. Extrait d'une page d'écran du logiciel GeoMoS.

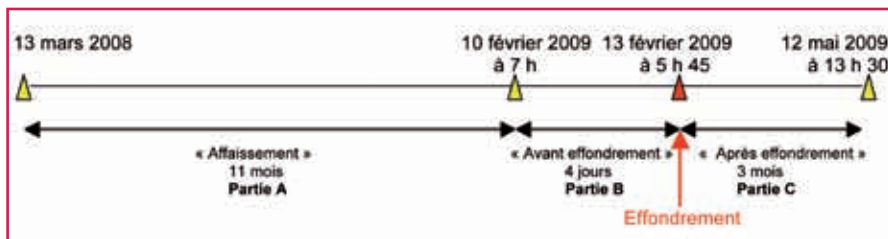


Figure 13. Phases d'étude du suivi topographique.

En conclusion il convient de ne prendre en compte que les mesures dont les écarts à la valeur de départ sont supérieurs à la tolérance. Tous les écarts inférieurs à cette tolérance ne sont pas indicatifs.

Exploitation des données

Le **traitement des données** a été assuré par l'intermédiaire du logiciel GeoMoS de Leica qui permet une visualisation des déplacements de chaque prisme aussi bien dans le plan horizontal (longitudinalement et trans-

versalement à la ligne de prisme) que dans le plan vertical. Ne seront présentés ici que les déplacements verticaux qui présentent un intérêt vis-à-vis de l'affaissement.

Une série de mesures se présente comme indiqué dans la Figure 12. Pour les besoins de l'étude, la période de mesure est découpée en trois parties : la première débute lorsque les mesures sont effectuées en double retournement soit le 13 mars 2008 et se termine juste avant la période de pompage. La saumure présente dans la cavité

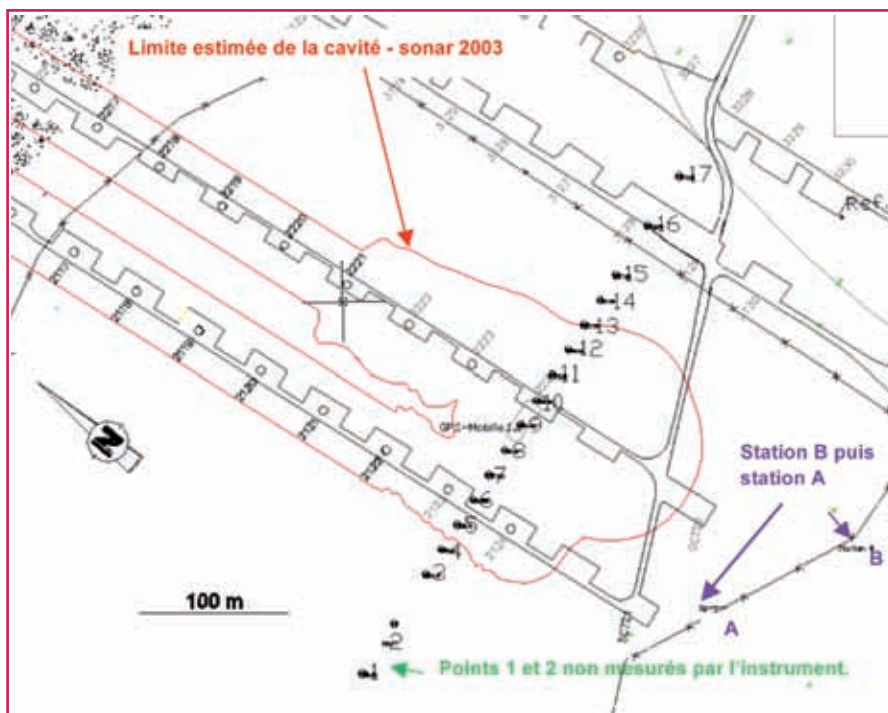


Figure 14. Plan présentant la ligne de prismes et l'extension de la cavité supposée avant l'effondrement (en rouge) - Document Solvay modifié sur AutoCad et Covadis.

exerce une pression hydrostatique sur le pourtour de la cavité maintenant ainsi les terrains en place. Le rabattement de la nappe ayant pour effet de diminuer la pression accroît de ce fait l'affaissement. La société Solvay a ainsi la possibilité de maîtriser et de choisir la période d'effondrement. Elle a été prévue pour la semaine du 10 février ce qui définit la limite entre les deux premières périodes. La seconde période correspond donc à l'accélération de l'affaissement jusqu'à l'effondrement le 13 février 2009. La troisième période concerne l'après effondrement jusqu'à l'arrêt des mesures le 12 mai 2009 (Figure 13).

■ Situation de départ

Une campagne de mesure par sonar avait été effectuée en 2003 et avait permis d'estimer l'étendue de la cavité comme présenté sur la Figure 14. On constate une extension plus importante de la cavité au niveau de la piste de sondage 2200. Le centre présumé de la cavité se situe au droit du prisme 9.

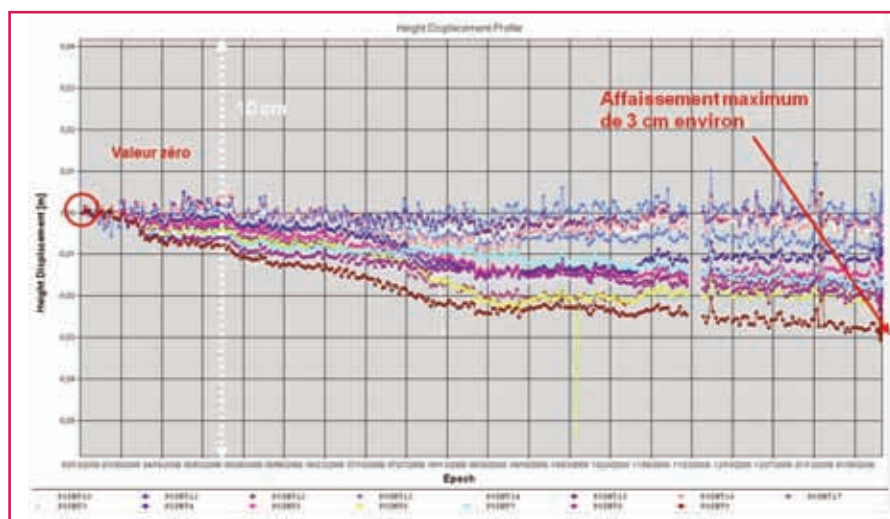


Figure 15. Image d'écran du logiciel GeoMoS - Affaissement des prismes sur 11 mois.

■ Première période

Les prismes sont représentés par des couleurs différentes.

On constate un affaissement progressif et régulier sur cette période de 11 mois avec un maximum de 3 cm environ pour le prisme 9. Les prismes en périphérie de la cavité ne présentent pas un affaissement aussi grand, leur variation n'est

que de 1 cm environ. On peut de plus remarquer que certains prismes présentent un léger soulèvement vers la fin de la période. Le schéma de la Figure 15 montre le soulèvement constaté de ces prismes situés plus à l'Est qu'à l'Ouest de la cavité. Sur cette période les données GPS sont cohérentes avec celles du tachéomètre au point 9, l'évolution des deux courbes est identique ; le 10 février à 7 h, le point 9 enregistrait un affaissement de -0,028 m et l'antenne GPS -0,026 m. L'allure générale permet d'indiquer très nettement la tendance à l'affaissement au centre de la ligne de prismes ainsi qu'un léger soulèvement à la périphérie surtout à l'Est pour les prismes 16, 17 (+ 8 mm).

Ce phénomène est compatible avec le scénario suivant : le comportement mécanique du banc raide de la dolomie agirait comme une poutre sur appui subissant des charges réparties, fléchissant au centre et se soulevant aux extrémités et résulte de l'évolution significative de la cavité ; le toit de celle-ci a atteint la base du banc de dolomie (éboulement de 30 m d'épaisseur environ de marnes) (KLEIN et al., 2008, DAUPLEY et al., 2010)

Ce phénomène n'avait jusqu'à présent jamais été mesuré en vraie grandeur (Figure 16 et Figure 17).

■ Deuxième période

Début 2009, alors que la cavité avait atteint ses dimensions critiques, l'exploitant a décidé d'accélérer son effondrement. Des opérations de pompage

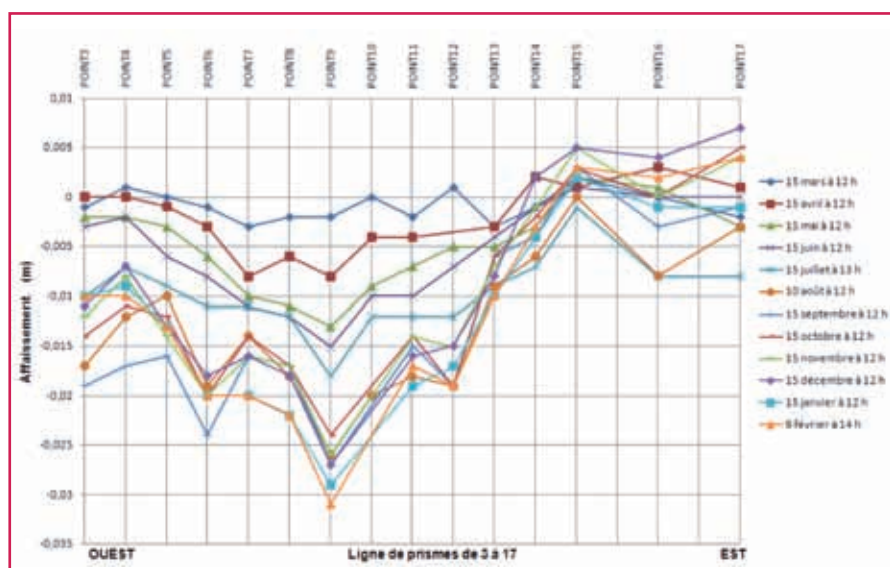


Figure 16. Evolution mensuelle de l'affaissement entre mars 2008 et février 2009.

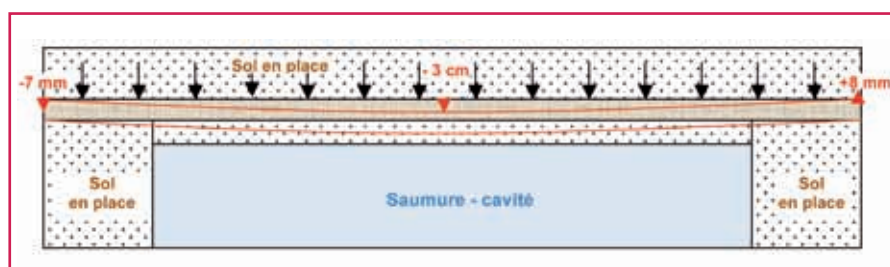


Figure 17. Schéma de l'évolution de la dalle de dolomie de Beaumont.

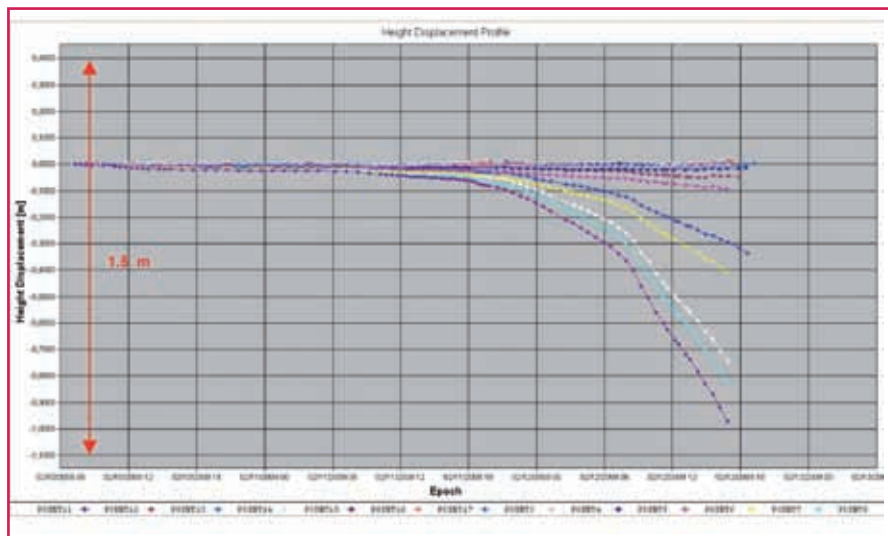


Figure 18. Déplacement vertical de tous les points depuis le 10 février à 7 h jusqu'au 13 février à 7 h - (arrêt des mesures le 12 février à 19 h 15) - GeoMoS.

Dates	Affaissement Point 9	Affaissement GPS	Ecart
10 février à 7 h	-0.028 m	-0.026 m	2 mm
11 février à 6 h	-0.053 m	-0.053 m	0 mm
11 février à 18 h 30	-0.095 m	-0.091 m	4 mm

Tableau 1. Comparaison des valeurs tachéométriques d'affaissement du point 9 et du GPS.

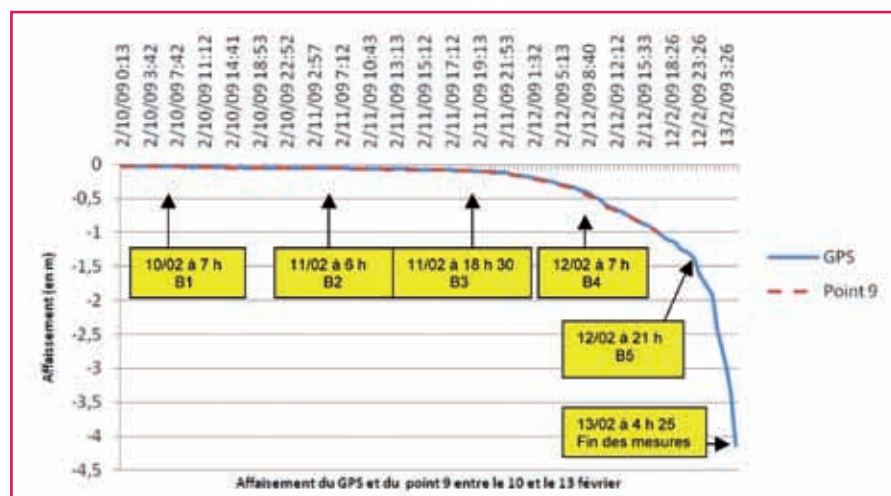


Figure 19. Graphique combiné de l'affaissement du GPS et du point 9.

Etape	Date	Description	Altitude
Etape B1	10 février à 7 h	Affaissement constaté au début de -3 cm en absolu Début du pompage Accélération de l'affaissement	-3 cm
Etape B2	11 février à 6 h	Reprise du pompage Accélération de l'affaissement	-5 cm
Etape B3	11 février à 18 h 30	Accélération de l'affaissement en surface Première crise microsismique majeure Remontée du niveau de la saumure de 9 m en 1 h Fracturation probable du banc de dolomie	-10 cm
Etape B4	12 février à 7 h	Augmentation importante du pompage Début de l'affaissement final Deuxième crise microsismique majeure	-40 cm
	12 février à 17 h	Perte des mesures tachéométriques (à -1 m)	-1 m
Etape B5	12 février à 21 h	Accélération finale de l'effondrement	
	13 février à 4 h 25	Perte des données de l'antenne GPS (à -4,13 m)	-4 m
Etape B6	13 février à 5 h 45	Effondrement	

Tableau 2. Calendrier de l'effondrement la semaine le précédant - en rouge : affaissement absolu.

dans la cavité ont permis de réduire le niveau de saumure qui contribuait jusqu'alors à soutenir les parois de la cavité. Les opérations ont été menées sur 4 jours et suivies en temps réel. (DAUPLEY et al., 2010).

L'accélération de l'affaissement jusqu'à l'effondrement est visible sur le graphique de la Figure 18, certains prismes sont tombés, d'autres en périphérie, sont restés en surface. Les prismes ont été suivis jusqu'à -1 m, 12 heures avant l'effondrement ; les données de l'antenne GPS ont été enregistrées jusqu'à 20 minutes avant l'effondrement avec un affaissement de -4 m. Le Tableau 1 et le graphique de la Figure 19 montrent la parfaite corrélation entre les données du tachéomètre et les données GPS. On constate des valeurs similaires et une évolution identique du point 9 et du GPS. Les quelques différences sont dues à l'heure de mesure qui n'est pas forcément la même à quelques minutes près, rappelons que les mesures tachéométriques sont cycliques et s'échelonnent sur une demi-heure environ et que les mesures GPS s'effectuent avec une périodicité de 30 minutes également. Le moment de mesure peut être décalé de 10 à 20 minutes.

Une analyse plus fine et plus rapprochée des courbes et des différences de comportement des prismes a permis de définir les moments clés de l'évolution de l'affaissement, moments en parfaite corrélation avec les données microsismiques enregistrées sur le lieu (DAUPLEY et al., 2010). Ces dates sont regroupées dans le Tableau 2 : l'effondrement a été marqué par plusieurs étapes importantes où le phénomène s'est accéléré :

Etape 1 : le 10 février vers 7 h, le début de l'affaissement est constaté sur tous les points.

Etape 2 : le 11 février vers 6 h, le point 9 placé au centre présumé de la cuvette témoigne d'une accélération de l'affaissement.

Etape 3 : Le 11 février vers 18 h 30, tous les points du centre de la cuvette sont concernés par une accélération de l'affaissement ; les points 7 à 12 descendent plus vite que les points extérieurs (données tachéométriques) et une



Figure 20. Photographie de l'effondrement - Vue vers le Nord-Est - 12 mai 2009 - INERIS.

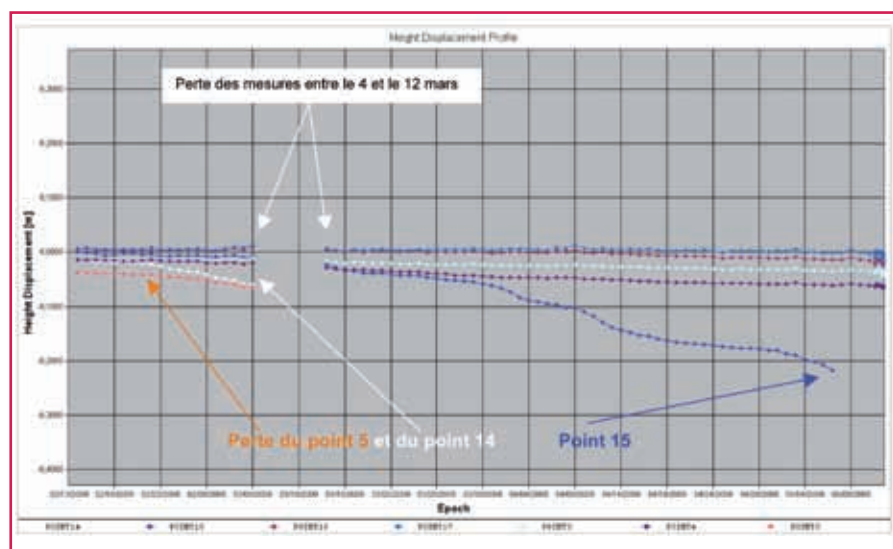


Figure 21. Déplacements verticaux de tous les prismes restants entre le 13 février et le 12 mai 2009 - GeoMoS.



Figure 22. Photographie du site avec les prismes encore en place - Vue vers le Nord-Ouest.

importante crise microsismique marque certainement le début d'une fracturation au sein du banc de dolomie.

Etape 4 : Environ 12 h après, le 12 février vers 7 h, on constate une deuxième accélération de l'affaissement de ces points (données tachéométriques + GPS) corrélée à l'accroissement du débit d'extraction de la saumure. Une crise microsismique très importante est enregistrée à ce moment-là marquant probablement la rupture franche du banc de dolomie.

Etape 5 : Le 12 février vers 21 h, une accélération finale de l'effondrement se déclenche (données GPS) (Figure 20).

En conclusion, le pompage et ses reprises successives ont à chaque fois accéléré le processus d'affaissement, les crises microsismiques traduisant les événements intenses au sein du massif de dolomie concordent avec l'accélération de l'affaissement. L'ensemble des observations topographiques ont permis de dater avec précision les différents stades d'évolution de la cavité jusqu'à son effondrement ; phases d'éboulement des terrains de couverture, phases de rupture du banc raide de dolomie de Beaumont.

■ Troisième période (février - mai 2009)

Après le 13 février à 5 h 45, le haut de talus de l'effondrement continue de s'élargir. Les mesures tachéométriques ont été poursuivies jusqu'au 12 mai 2009 où le système a été démonté.

On constate que les prismes proches des rives disparaissent au fur et à mesure de l'érosion de celles-ci, il s'agit des points 5, 14 et 15. Ne subsistaient plus en mai 2009 que les prismes 3, 4 coté Ouest et 16, 17 cote Est. Figure 21 et Figure 22.

L'étude altimétrique permet de constater un affaissement général des prismes restés en place. La valeur de l'affaissement pendant cette période est de -2,5 cm pour les points situés à 20 m environ des berges de l'effondrement. L'influence de l'effondrement se fait alors encore sentir sur sa périphérie au moins jusqu'à 40 m (point 17).

L'estimation de la situation de l'effondrement (Figure 23) datée du 14 février 2009 (tracé vert) et complétée par les levés successifs effectués par Hervé



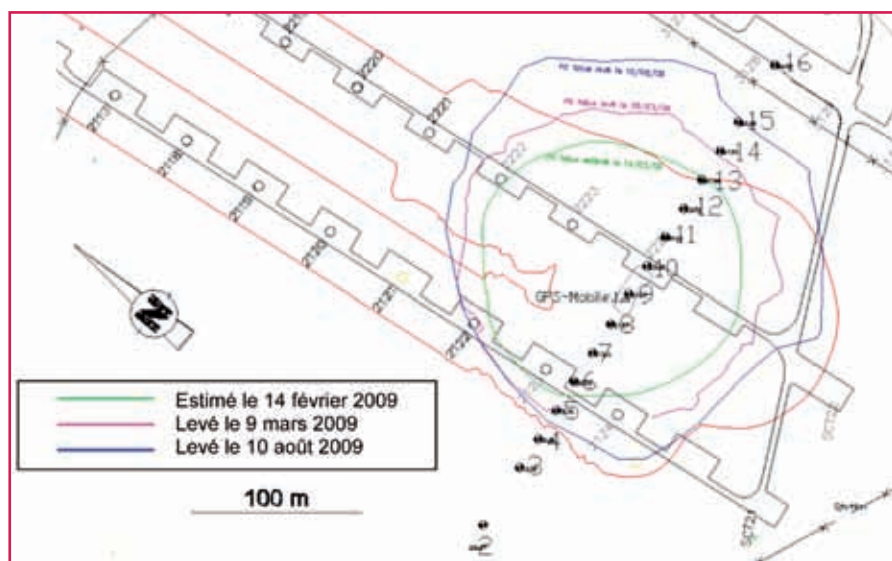


Figure 23. Plan de situation des effondrements successifs levés par le géomètre de la société Solvay.

Martin, géomètre et responsable de l'exploitation des sondages, (tracés rose puis bleu) permet d'observer la progression de l'effondrement. L'élargissement de l'effondrement est essentiellement dû à l'érosion des berges.

Conclusion

L'effondrement de la cavité saline instrumentée a été provoqué par la société Solvay durant la semaine du 10 février 2009 suite à la mise en œuvre d'opérations de pompage. Le suivi topographique a permis d'appréhender géométriquement l'affaissement et de dater avec précision les différentes étapes du processus d'effondrement. La corrélation des mesures GPS et tachéométriques a montré des écarts d'altitude inférieurs au centimètre. ●

Contacts

Régine HOURBEIGT-FLEURY
Enseignante en topographie
à Brétigny-sur-Orge,
Regine.Fleury@ac-versailles.fr

Laurent CAUVIN
Responsable d'études et de recherches
de l'unité Risques géotechniques liés
à l'exploitation du sous-sol. INERIS
laurent.cauvin@ineris.fr

Xavier DAUPLEY
Responsable de l'unité Risques
géotechniques liés à l'exploitation du sous-
sol. INERIS - Xavier.DAUPLEY@ineris.fr

Remerciements

Bertrand DELAPLANCHE
Société LEICA GEOSYSTEMS
Chef de marché Rail, Tunnel et Auscultation
bertrand.delaplanche@leica-geosystems.com

Denis FABRE
Professeur de la chaire de géotechnique
du CNAM
denis.fabre@cnam.fr

Hervé MARTIN
Responsable d'exploitation sondages –
Géomètre. Société Solvay

Laurent POLIDORI
Professeur titulaire de la chaire de
Géomatique du CNAM - Directeur de l'ESGT
laurent.polidori@esgt.cnam.fr

Bibliographie

DAUPLEY X., 2003. *Synthèse des gisements de sel en France dans le contexte de leur abandon.* Programme EAT-DRS-03, INERIS, Verneuil-en-Halatte, 63 p.

DAUPLEY X., 2009. *Surveillance de l'évolution d'une cavité saline jusqu'à son effondrement.* Rapport DRS-09-103948-02566A, INERIS, Verneuil-en-Halatte, 6 p. (www.ineris.fr)

DAUPLEY X., FABRIOL R., CONTRUCCI I., BERNARDIE S., CAO N.-T., LEBERT F., CAUVIN L., JOUSSET P., KLEIN E., BAZARGAN B., 2010. *Suivi expérimental multi-paramètres de l'effondrement d'une cavité saline. Site de Cerville-Buissoncourt.* Journées Nationales de Géotechnique

et de Géologie de l'ingénieur JNGG 2010. Grenoble 7-9 juillet 2010. 9 p.

KLEIN E., CONTRUCCI I., DAUPLEY X., HERNANDEZ O., BIGARRE P., NADIM C., CAUVIN L., 2008. *Experimental monitoring of a solution-mining cavern in salt : Identifying and analyzing early-warning prior signals to collapse.* SMRI Fall 2008 Technical Conference Austin, Texas (Etats-Unis), 12-15 Octobre 2008. 11 p.

HOURBEIGT-FLEURY R., 2010. *Apports des mesures topographiques pour le suivi et la compréhension d'un mécanisme d'effondrement d'une cavité saline.* Mémoire ingénieur CNAM, chaire de géotechnique, Paris, 162 p.

LEVALLOIS J.-J., 1969. *Géodésie Générale, Tome 1 Méthodes générales et techniques fondamentales.* Eyrolles, Paris, 402 p.

MERCERAT D., 2007. *Sismicité induite et modélisation numérique de l'endommagement dans un contexte salin.* Thèse de Docteur de l'INPL, Ecole Nationale Supérieure de Géologie de Nancy, 181 p.

MERCERAT D., 2007. *Evaluation de l'endommagement dans le recouvrement d'une cavité saline par une approche numérique couplée continue-discrète.* Laboratoire Environnement Géomécanique et Ouvrages, Ecole des Mines de Nancy, 8 p.

OUVRAGE COLLECTIF. *Carte et notice géologique de la France au 1/50 000- NANCY - XXXIV-15, 1980.* BRGM, Orléans, 44 p.

POMEROL Ch., 1975. *Ere mésozoïque, Stratigraphie et Paléogéographie.* Douin, Paris 383 p.

POMEROL C., LAGABRIELLE Y., RENARD M., 2006. *Eléments de géologie.* Dunod, Paris, 762 p.

SOLVAY CARBONATE FRANCE, 2000. *Les sondages.* Plaquette de présentation, Dombasle-sur-Meurthe, 8 p.

ABSTRACT

Lorraine contains important deposits of rock salt. The exploitation by solution leads to the creation of a cavity at a depth of about 180 m. The monitoring by surveying of the surface at Cerville Buissoncourt allowed the analysis and the understanding of the overburden subsidence mechanism preceding the final collapse.