

ABANDON DES MINES DE SEL : FAUT-IL ENNOYER ?

BEREST Pierre¹, BROUARD Benoît², FEUGA Bernard³

¹Laboratoires LMS et G3S, Ecole polytechnique, Palaiseau 91128 Cedex - France. Berest@lms.polytechnique.fr.

²Brouard Consulting, 37 rue du petit-musc, 75004 Paris - France. Brouard@lms.polytechnique.fr

³ BRGM, REM/RESE BP 6009 – 45060 Orléans – France.

RESUME :

L'abandon des mines de sel sèches soulève un problème très particulier en raison de la forte probabilité que la mine soit noyée après son abandon, avec des conséquences significatives à la surface du sol. On analyse plusieurs cas d'ennoyage survenus pendant que des mines de sel étaient encore actives, afin de comparer les avantages et les inconvénients d'un ennoyage délibéré avant l'abandon, et notamment la dégradation possible des bancs marneux.

MOTS-CLEFS : mine de sel, ennoyage volontaire, dégradation du mur.

ABSTRACT: Abandonment of dry salt mines set a difficult problem, as post-abandonment mine flooding is in most cases highly probable, with possible severe consequences at ground level. Several cases of active mine flood are analyzed, to compare the advantages and drawbacks of a deliberate flooding before mine abandonment. Special attention is kept to the possible degradation of the marly floor layers.

KEY-WORDS: salt mine, deliberate mine flooding, floor weathering

1. Introduction

L'article concerne l'abandon des mines de sel « sèches ». On emploie cet adjectif pour distinguer ces mines des cavités créées par dissolution du sel au moyen de circulation d'eau par des sondages, qui suscitent des questions différentes. L'abandon des mines « sèches » pose un ensemble de problèmes très particuliers. Pour les analyser, on peut tirer des leçons utiles du comportement de ces mines quand elles sont encore en exploitation. De façon générale les mines de sel se referment lentement, avec un écrasement progressif des piliers que l'on a laissés entre les galeries pour assurer la stabilité des terrains ; inexorablement la mine finira par se fermer complètement, entraînant une descente des terrains sus-jacents : mais, dans beaucoup de cas il s'agit d'une évolution très lente, dont on peut d'ailleurs mesurer la vitesse, et qui ne s'achèvera qu'après une durée trop longue pour avoir des conséquences pratiques (plusieurs siècles ou dizaines de siècles). Toutefois d'assez nombreuses mines en activité ont connu des évolutions bien plus rapides, qu'on peut ranger en deux catégories :

1. effondrement de mines mal dimensionnées
2. invasion de la mine par l'eau (ou la saumure)

En fait, il arrive fréquemment que l'un de ces événements soit la conséquence de l'autre. Dans la suite on s'intéresse à l'invasion par l'eau car c'est l'accident le plus fréquent mais aussi le plus caractéristique des mines de sel ou de potasse. Il faut s'efforcer de tirer des exemples d'accidents connus des enseignements généraux que l'on puisse transposer à des situations nouvelles ; on doit néanmoins garder à l'esprit le rôle que jouent dans chaque cas les circonstances locales. Une typologie sommaire des gisements de sel conduit à distinguer :

- les gisements en couches restées à peu près horizontales depuis leur genèse. On y exploite souvent une hauteur de quelques mètres (mines sèches) ou quelques dizaines de mètres

(cavités de dissolution) de haut, au sein d'une série qui comporte d'autres niveaux peu solubles, aux propriétés mécaniques souvent contrastées, de l'anhydrite très raide aux marnes ou « argilites », dénomination plus vague qui rassemble des roches souvent peu résistantes et facilement altérables. Cette configuration se retrouve typiquement au Kansas, dans la région de New York ou en Lorraine.

- les dômes, résultant de l'ascension du sel provoquée par sa faible densité, parfois assistée par le contexte tectonique ; ils se présentent comme des structures de grande extension verticale, qui autorisent une exploitation placée assez profondément sous le sommet du dôme, qui est fréquemment proche de la surface (golfe du Mexique). Le sel y est souvent pur, à l'exception de zones anormales marquées par la présence de sel noir, de poches de gaz ou de saumure, de contraintes éloignées de la distribution sphérique, que l'on trouve à proximité des flancs du dôme ou à la limite de deux masses de sel affectées de mouvements différentiels ; ou de zones hétérogènes contenant des couches d'anhydrite et de marne redressées jusqu'à la verticale (nord de l'Allemagne) ou des sels d'autre nature (potasse, carnallite), donnant souvent lieu à des méthodes d'exploitation qui diffèrent des classiques « chambres et piliers » fréquents dans les couches de sel ou les dômes du golfe du Mexique.

2. Invasion des mines de sel par l'eau

2.1. Un accident fréquent

L'invasion des mines de sel par l'eau est un accident assez fréquent. Il était très fréquent dans les mines anciennes, car le sel était exploité au voisinage des « affleurements » connus, c'est à dire près des sources salées : les mines étaient peu profondes, souvent placées aux limites des gisements, là où le sel est en contact direct avec les eaux souterraines. Toutefois cet accident n'a pas été éliminé, loin de là, par les progrès considérables des techniques de reconnaissance et d'exploitation.

2.2. France

En Lorraine, cinq mines sèches ont été exploitées (Vic-sur-Seille, Dieuze, Saint-Nicolas, Rosières, Einville ; Rosières et Saint-Nicolas, qui étaient proches, ont été ultérieurement reliées pour former la mine actuelle de Varangéville). Deux autres puits (Crévic et Tonnoy) ont été creusés jusqu'au niveau de la onzième couche du gisement, la seule exploitée systématiquement, mais sans donner lieu à une exploitation effective. La mine de Vic-sur-Seille, ouverte en 1821, a été abandonnée après quelques années, car les entrées d'eau ou de saumure non saturée dans la mine ne pouvaient être contrôlées. La mine de Dieuze, dont le toit était profond de 115 m, a été envahie par de la saumure en 1864 ; l'invasion ne trouvait d'ailleurs pas sa cause dans la mine elle-même (une galerie à une profondeur de 60 mètres, reliée au puits d'accès, s'est effondrée). Seules deux mines sont encore ouvertes, Einville qui n'est plus exploitée et Varangéville qui est en activité. Ailleurs en France, d'autres mines ont été abandonnées après ennoyage (Larralde, Saint Pandelon, Saint Pierre à Dax, etc.)

2.3. USA

Un cas typique est celui des cinq dômes de sel alignés, appelés « Five Islands », au bord du golfe du Mexique, en Louisiane : ils fournissent au moins grossièrement une statistique car ils ont tous été exploités par mine. Belle Isle a été abandonnée (Walters, 1978), faute d'avoir pu contrôler les arrivées d'eau par le second puits d'accès, qui avait été réalisé sans congélation préalable des terrains. Jefferson Island (O'Gorman et Stafford, 1980 ; Thoms et Gehle, 1994) a été envahie en

quelques heures par les eaux d'un lac, après qu'un puits pétrolier eut atteint la mine par erreur (1980). Weeks Island était une mine de sel, convertie en stockage de pétrole ; le stockage a été abandonné (Bauer et al., 2000) après que deux fontis, qui mettaient en communication les eaux douces superficielles et la mine, furent apparus de façon inopinée en surface (1995). Cote Blanche et Avery Island sont toujours exploités. Hormis la Louisiane on peut citer l'invasion en 1994 de la mine de Retsof dans l'état de New York, qui était vraisemblablement la plus grande mine de sel du monde ; l'invasion a été précédée d'une rupture du toit de la mine dans une zone exploitée par petits piliers (Gowan et Trader, 2000 ; Gowan et al., 1999 ; Payment, 2000 ; Van Sambeek, 1996 ; Van Sambeek et al., 2000) ; et l'abandon de la mine de Winnfield (1965) qui a commencé par l'apparition inopinée d'un jet violent de saumure sortant d'un pilier (Thoms et Gehle, 2000).

2.4. Allemagne

Un grand nombre d'invasions de mines de sel ou de potasse sont rapportées dans la littérature. Rölleke (2000) indique : "as potash salt mining has developed, mines in Germany have been hit by a number of uncontrolled water influxes which have resulted in spectacular subsidence and the creation of sinkholes". Il décrit trois cas survenus dans le nord de l'Allemagne (Vienenburg I, 1930 ; Hedwigsburg, 1921 ; et Ronnenberg, 1975, qui sera évoqué plus loin). Thoma et al. (2000) donnent huit autres cas survenus dans le centre de l'Allemagne.

2.5. Mécanisme d'invasion

Une mine sèche contient de l'air, dont la pression est très proche de la pression atmosphérique, donc bien plus faible que la pression de l'eau contenue dans les couches aquifères placées au dessus ou au dessous de la mine. Si une communication est créée entre ces couches et la mine, une circulation de l'eau vers la mine est possible.

2.6. Communication entre les couches aquifères et la mine

En général, les massifs de sel pur sont extrêmement peu perméables. De plus, dans les conditions naturelles, il n'existe pas dans le sel de fractures susceptibles de laisser circuler les eaux souterraines (on peut trouver des exceptions dans des localisations très particulières, telles que le voisinage d'une faille majeure ou les flancs d'un dôme de sel ; Winnfield est un cas où ce facteur a joué un rôle vraisemblablement important ; le stockage de pétrole du LOOP près de la Nouvelle Orléans est un autre exemple, McCauley et al., 1998, Lolan et al., 1998). Il est donc nécessaire, en général, qu'une communication soit créée entre les eaux et la mine.

2.7. Puits de mine et sondages

Dans certains cas, l'accès à la mine pour les eaux souterraines est simplement fourni par les puits de mine ou les sondages, et notamment par l'espace annulaire entre le cuvelage métallique des puits et les terrains, dans lequel les circulations peuvent passer inaperçues. On prête une attention particulière à ces ouvrages pendant leur construction (congélation des terrains aquifères) et lors de la mise en place de la complétion des puits (cuvelages mobiles, utilisation du bitume, etc.) mais des accidents surviennent néanmoins. La congélation n'a pas été utilisée, pour des raisons d'économie, pendant le fonçage du second puits de Belle Isle, entraînant des venues ultérieures d'eau et, finalement, l'abandon de la mine. Les sondages traversant une mine sont en général isolés par un très large pilier de sel pour éviter les mises en communication. Un exemple extraordinaire est celui de la mine de Jefferson Island.

2.8. *Le cas de Jefferson Island*

Le dôme de sel de Jefferson Island est situé à 30 km de Lafayette, en Louisiane. Une mine y était exploitée depuis 1920. En novembre 1980, le sel est extrait d'un niveau situé à 500 mètres de profondeur. Au dessus de la mine, à la surface, dans cette région des bayous, se trouve le lac Peigneur, qui contient 15 millions de m³ d'eau douce. Le mât de forage opère depuis une barge posée sur le fond du lac. Le 20 novembre 1980, le sondage atteint la profondeur de 370 m ; le mât commence alors à s'incliner : le forage atteint la mine ou son voisinage immédiat. Un tourbillon, d'un diamètre estimé à 400 mètres, commence à se former à la surface du lac. Le trou de forage s'élargit sous l'effet du flot d'eau qui y pénètre, son diamètre finira par atteindre une vingtaine de mètres. Le lac entier envahit en quelques heures les galeries et les puits d'accès à la mine. L'application rigoureuse des procédures d'urgence permet d'évacuer les 50 mineurs qui travaillaient au fond.

2.9. *Discontinuités*

L'ouverture d'une mine engendre dans son voisinage une redistribution des contraintes ; cette redistribution n'est pas suffisante, quand la mine est bien dimensionnée, pour menacer sa stabilité ; mais elle peut créer des discontinuités nouvelles, ou ouvrir des discontinuités préexistantes, qui constitueront une voie d'accès possible pour les eaux souterraines. Le cas de Weeks Island est typique. Il s'agit d'une exploitation par chambres et piliers, réalisée sur deux niveaux, à 163 m et 224 m sous la surface respectivement. Les chambres ont 22,3 mètres de haut pour une largeur de 13,2 m, les piliers ont une section de 30,5 m² ; de sorte que le taux de défrêtement est de 56 % (Hoffman et Ehgartner, 1996). La mine avait été convertie en stockage de pétrole. Deux fontis apparaissent à l'aplomb du bord de la mine. Cette localisation est logique, puisque la flexion de la couche de sel laissée au dessus de la mine engendre des contraintes de traction, au toit de la couche de sel, qui sont les plus intenses au dessus du bord de la mine ; mais l'apparition des fontis était inattendue, puisqu'on pouvait penser que le remplissage de la mine par du pétrole sous une pression assez élevée n'avait pu qu'améliorer la stabilité mécanique, qui apparaissait déjà satisfaisante avant la conversion de la mine en stockage. Dans ce cas la discontinuité s'est créée dans la masse du sel ; dans d'autres cas elle peut affecter des bancs non salins qui traversent la formation salifère ; l'exemple de Ronnenberg est décrit plus loin.

2.10. *Augmentation rapide du débit*

Les venues d'eau constituent un phénomène extrêmement fréquent dans toutes les mines, quel que soit le minerai exploité ; l'accélération du débit est en revanche caractéristique du cas des mines de sel : un débit initialement modéré peut croître de manière spectaculaire, jusqu'à interdire tout contrôle, lorsque le cheminement vers la mine s'élargit et autorise la circulation de saumure non saturée.

2.11. *Description du mécanisme*

Typiquement, l'accès initial à la mine peut se faire suivant une discontinuité peu ouverte qui n'autorise que la circulation d'un débit modéré de fluide. Cette discontinuité peut être naturelle, par exemple une couche non saline ; parfois son ouverture hydraulique est modifiée par les conséquences mécaniques de l'ouverture des vides miniers. Au début du processus, la discontinuité n'autorise que la circulation d'un débit assez faible pour que la saumure ait largement le temps de se

saturer en sel entre le point d'admission de l'eau dans la formation salifère et le point d'accès dans la mine. Toutefois le cheminement s'élargit progressivement, en commençant par le voisinage du point d'admission de l'eau, ce qui permet une augmentation progressive du débit. Cette évolution reste d'abord inaperçue, mais la ligne séparant la saumure complètement saturée de la saumure non saturée progresse en direction de la mine. Quand cette ligne atteint la mine, le processus devient rapidement explosif : le débit s'accélère, empêchant que la saumure ait le temps de se saturer complètement en sel, conduisant à une dissolution accrue le long de tout le cheminement, à l'élargissement de celui-ci, à la réduction des pertes de charge, et finalement à un débit encore accru. Le caractère explosif de cette évolution, dans sa phase finale, explique pourquoi des dizaines de mines ont dû être abandonnées après l'apparition d'une venue de saumure initialement limitée. On doit néanmoins remarquer que le temps de latence du phénomène peut être très long (plusieurs dizaines d'années). De plus une évolution finale très rapide n'est possible que si une grande quantité d'eau est rapidement disponible (un lac, comme dans le cas de Jefferson Island, ou un aquifère présentant de très bonnes caractéristiques hydrauliques, comme dans le cas de la mine de Retsof ou de la mine de Holle au Congo). Dans certains cas la venue peut être maîtrisée ; un cas est décrit dans Jeremic, 1994 ; il arrive même que l'on puisse désennoyer la mine (Prugger, 1980).

2.12. Le cas de Ronnenberg

Le cas de Ronnenberg (Rölleke, 2000) est typique. La potasse était exploitée dans ce dôme qui est séparé en deux parties principales par une série pratiquement verticale de marne et d'anhydrite. Des galeries furent tracées, traversant ces niveaux insolubles, et fournissant un exutoire pour l'eau qu'elles contenaient ou qui y circulaient. Le débit initial était très réduit, et son accélération finale est caractéristique. De 1905 à 1973, le débit cumulé est de 200 000 m³, mais il atteint 240 000 m³ pendant la seule année 1974. Le débit passe de 1 m³ par minute en avril 1975 à 1,5 m³ le 27 juin, puis 3,7 m³ par minute le 29 juin, et finalement 30 m³ par minute le 30 juin, date à laquelle l'abandon est décidé.

2.13. Conséquences en surface d'une invasion de la mine

Lorsque la mine est envahie par de la saumure saturée, incapable de dissoudre du sel, il n'y a pas de changement important de la géométrie de la mine (c'est le cas pour la mine de Dieuze en Lorraine, ennoyée par de la saumure pénétrant par le puits d'accès). Si le débit est très important il peut y avoir érosion au voisinage du point d'accès (après, le flot s'étale sur une grande surface), entraînement des matériaux sus-jacents dans le fontis et les vides miniers et apparition d'une subsidence localisée ou formation d'un fontis. Mais le débit est rarement très important dans le cas d'une invasion par la saumure saturée. En revanche l'invasion par l'eau douce conduit à la formation d'un fontis beaucoup plus spectaculaire du fait de la dissolution qui a lieu à la fois dans le cheminement d'accès et dans la mine elle-même, préférentiellement au voisinage du point d'entrée dans celle-ci. Dans le cas de Jefferson Island, on estime que le trou de sondage a vu passer son diamètre de 20 cm environ à 20 m en quelques heures. Dans le cas de Retsof (Gowan et al., 2000), les chambres de la mine avaient 12 pieds (3,6 m) de haut. Deux fontis (sinkholes) se sont formés à la suite de l'invasion du quartier 2YS par l'eau. Le premier, au-dessus de 2YS, a atteint 15 pieds (4,5 m) de profondeur. Un second fontis, au dessus du quartier voisin 11YW, a atteint 70 pieds (21 mètres) de profondeur, donc bien plus que la hauteur exploitée dans la mine. Rölleke (1998) décrit plusieurs cas analogues survenus en Allemagne. Un tel phénomène est assez caractéristique des mines de sel ou potasse : il se retrouve moins fréquemment dans les mines d'autres substances, où on s'attend à ce que la subsidence soit du même ordre, ou plus petite, que la hauteur de minerai exploitée. Toutefois on verra plus loin que dans le cas du sel et de la potasse, si l'invasion par l'eau

douce est souvent dommageable au voisinage du point d'entrée dans la mine, les conséquences mécaniques peuvent être globalement plus favorables, lorsqu'on considère la totalité de la mine.

2.14. Cas d'accidents post-exploitation

On n'a pas trouvé dans la littérature de cas d'invasion par l'eau d'une mine après son abandon. La raison en est sans doute que la plupart des mines de sel existantes sont soit en activité soit abandonnées après une invasion par l'eau. En France une mine (Einville) n'est plus active depuis 1949 mais est toujours ouverte. Un cas très remarquable d'accident post-fermeture a été rapporté oralement par Van Sambeek lors d'une réunion du Solution Mining Research Institute (2002). Cet accident est survenu dans la mine de Kanopolis, au Kansas, abandonnée en 1948. Sa profondeur était de 240 m et son volume de 2,3 millions de m³. Les trois puits d'accès avaient été comblés par un mélange probablement assez peu perméable de sable, de roche et de paille. Avant l'abandon, de l'eau s'écoulait vers la mine par les puits d'accès, avec un débit de l'ordre de 1,2 m³ par heure pour chacun des puits. Ce remplissage très lent s'est poursuivi, mettant en pression l'air contenu dans la mine. Il conduisait à une dissolution des couches de sel au pied du puits, qui avait entraîné un effondrement du remblai d'un des puits en 1972, rapidement comblé par apport de matériaux peu profonds (Walters, 1978). Une briqueterie s'était installée au dessus de la mine abandonnée, probablement pour tirer partie des accès par chemin de fer existants. Un tas de briques de plusieurs milliers de m³ avait été constitué au dessus d'un autre des puits comblés, dont la tête était recouverte par du remblai. La section horizontale du puits était rectangulaire, et la suite des événements prouva que le puits était resté intact 50 ans après la fermeture. Le 26 octobre 2000, le remblai contenu dans le puits commença à s'ébouler dans la mine, ouvrant en surface un fontis, en partie rempli par les briques provenant du tas constitué en surface. Après quelques minutes, l'air comprimé contenu dans la mine commença à chasser les matériaux qui avaient pénétré dans le puits, engendrant une « pluie de briques » – les briques étaient projetées à 50 mètres de haut ; la « pluie » dura au moins 10 minutes. Il n'y a pas eu de victimes, mais un entrepôt a été sévèrement endommagé. Van Sambeek a présenté des calculs de débit d'air qui rendaient bien compte des phénomènes observés.

3. Stratégie d'abandon

Les faits présentés ci-dessus montrent que l'abandon d'une mine de sel, surtout dans le cas où la surface du sol est occupée par des habitations ou des infrastructures (route, gazoduc, canal...), doit être envisagé avec attention. C'est le cas si la stabilité mécanique (hormis la lente fermeture, qui est inévitable) ne paraît pas assurée à long terme ; mais ce cas de figure est commun à toutes les mines. Le cas d'une invasion par l'eau pose, on l'a vu, des problèmes qui, à beaucoup d'égards, sont particuliers au sel gemme ou aux matériaux analogues (potasse, carnallite). Plusieurs méthodes d'abandon sont envisageables.

3.1. On peut remplir la mine, ou une partie de celle-ci, de matériaux solides

C'est une solution en général extrêmement coûteuse. Dans bien des cas il sera moins coûteux de reloger confortablement tous les habitants de la surface que de procéder à un tel remplissage, sauf peut être si on dispose à petite distance de la mine de matériaux convenables dont on désire fortement se débarrasser. Un cas récent est celui des mines de Northwich dans le Cheshire pour lesquelles un programme de remplissage partiel par des matériaux solides et de la saumure est envisagé.

3.2. On peut envisager un effondrement préventif provoqué de la mine

C'est une solution délicate à conduire, car on apprécie souvent mal la réserve de stabilité dont dispose la mine. Dans un contexte différent (il s'agissait de cavités réalisées dans le sel par dissolution) Buffet (1998) décrit un effondrement provoqué : le pompage de la saumure contenue dans la caverne, dont l'objectif était de réduire sensiblement la pression dans la caverne qui assurait en partie le soutien des terrains sus-jacents, n'a pas suffi à provoquer l'effondrement : il a fallu de plus agrandir les cavités pour obtenir la rupture, et l'ensemble des opérations a duré 5 ans.

3.3. On peut assurer une surveillance permanente

Il faut concevoir le système d'alerte pour qu'il prévienne assez tôt d'une venue d'eau ou de saumure dans la mine : on a vu que dans certains cas une telle venue conduit à un enchaînement rapide d'événements. Dans le cas extraordinaire de Jefferson Island, la mine était complètement envahie en quelques heures. A Retsof la chute du toit se passe le 12 mars 1994, avec apparition immédiate de fissures en surface ; les premiers signes de descente des terrains (30 cm) sont nets le 28 mars ; ils atteignent trois mètres le 6 avril, et 18 mètres à la mi-juin ; mais l'invasion complète de la mine dure 21 mois. Dans d'autres cas (Weeks Island) les événements sont bien plus progressifs et laissent le temps de prendre les décisions adaptées (transfert du stockage de pétrole sur un autre site). Cette solution (surveillance) a l'inconvénient de n'avoir pas de terme défini (il est pratiquement inévitable que la puissance publique la prenne à sa charge un jour) et elle ne répond pas par elle-même à la question essentielle : que faut-il faire après la constatation de la venue ? Faut-il évacuer la surface, doit-on injecter volontairement de la saumure saturée pour limiter les effets de l'eau, etc., toutes questions auxquelles il vaut mieux s'être soigneusement préparé.

3.4. On peut remplir préventivement la mine avec de l'eau ou de la saumure

Cette solution a des avantages importants, et elle est de règle dans certains pays. On la discute donc plus complètement dans les paragraphes qui suivent.

3.5. Réglementation

Le remplissage des mines de sel et de potasse par de l'eau ou de la saumure est de règle dans les dômes de sel du nord de l'Allemagne, sauf exception. Rölleke (2000) indique : "In salt mining, the mine workings must be flooded as a matter of principle after final shut-down operation. However it is necessary on a case-by-case basis to ensure that the planned flooding does not affect the integrity of the mine. If necessary, the mine must be flooded using for example NaCl or MgCl₂ brines". Cette règle générale n'a souffert que deux exceptions, liées à la présence, dans la mine, de sels de solubilités très différentes : on pouvait en effet redouter alors que certaines parties de la mine connaissent, du fait de l'injection de fluide, une augmentation de volume beaucoup plus forte que la moyenne, avec des menaces pour la stabilité de ces parties.

4. Avantages d'un remplissage de la mine par de l'eau ou de la saumure

4.1. Suppression des écarts de potentiel hydraulique

Lorsque la mine a été remplie de saumure ou d'eau, qui s'est transformée en saumure saturée, la mine n'est plus un exutoire possible pour les eaux souterraines environnantes (Il faut noter qu'à Weeks Island, la mine avait été remplie de pétrole, qui est plus léger que l'eau, de sorte que la pression dans la mine, quoique bien plus grande que la pression atmosphérique, était plus faible que la pression hydrostatique, que déterminerait une colonne d'eau douce remontant jusqu'à la surface. Un faible débit d'eau vers la mine était alors possible, à travers une discontinuité ouverte au dessus

du bord de la mine). Dans la pratique, il faut tout de même examiner la distribution des pressions : dans le puits plein de saumure ou d'eau, le niveau de l'interface fluide/air se met en équilibre avec celui de la nappe phréatique ; la pression dans la mine sera donc en général plus grande que la pression dans les aquifères environnants. Des situations compliquées peuvent se mettre en place, si le puits traverse des horizons de potentiels hydrauliques distincts, avec des circulations possibles qui, en tout état de cause, seront bien plus petites que celles que peut engendrer une mine laissée ouverte. La saumure est plus lourde que l'eau douce, et des mouvements importants ne peuvent survenir que si on trouve sous la mine un aquifère dont le potentiel hydraulique est élevé (le cas de Haoud Berkaoui, qui ne concerne toutefois pas une mine, est décrit au paragraphe suivant), ou s'il existe un large gradient hydraulique entre un accès et une sortie possibles pour les fluides vers et hors de la mine, une situation qui ne doit pas être très fréquente.

4.2. Le cas de Haoud Berkaoui, Algérie (Morisseau, 2000)

Le sel, d'âge sénonien, est placé à une profondeur de 600-650 m. Il est protégé de la nappe phréatique sénonienne par 300 mètres d'anhydrite, d'argile, de dolomie ; des terrains de nature analogue l'isolent de l'aquifère albo-aptien dont le toit est à 870 m de profondeur. Ce dernier est artésien, et présente un potentiel hydraulique supérieur de 2,5 MPa (250 mètres d'eau) à celui de la nappe phréatique. En 1978 un puits est foré, avec un objectif pétrolier à 3200 m de profondeur. Le puits est abandonné à 2500 m en raison de problèmes de stabilité des parois ; il n'est cuvelé que jusqu'à une profondeur de 650 m (la base du sel). La qualité de l'abandon est probablement médiocre, puisque l'eau de l'aquifère albo-aptien commence à s'écouler le long du puits vers l'aquifère de surface, lessivant au passage la couche de sel. Une cavité se forme et finit par atteindre un second puits foré en 1979 et distant de 80 mètres du premier ; ce second puits est perdu à son tour en mars 1981. La cavité souterraine créée dans le sel s'effondre en octobre 1986. Le cratère formé en surface fait 200 m de diamètre et 75 m de profondeur. Le diamètre de la cavité a été estimé à plus de 300 m et le débit d'eau ascendant à 2000 m³/h. A la fin du processus, le lessivage était vraisemblablement devenu moins actif, l'eau douce remontant par le centre de la cavité sans lécher les parois devenues trop distantes de l'axe central.

4.3. Stabilisation de la pression de la saumure

Un avantage secondaire du remplissage de la mine par de l'eau ou de la saumure est que la mine paraît dans beaucoup de cas être plus stable après remplissage qu'avant. En effet à la fin du processus l'eau ou la saumure remplissent le puits et se mettent en équilibre avec la nappe phréatique, au voisinage de la surface, déterminant dans la mine une pression de fluide assez élevée, qui contribue à la stabilité des vides souterrains. En fait, dans le cas le plus défavorable, quand la mine est remplie par de l'eau initialement douce, deux phénomènes s'opposent :

- La dissolution du sel par l'eau douce accroît le volume des vides de 18 % environ, ce qui n'est pas favorable à la stabilité. En fait l'accroissement de volume n'est certainement pas uniformément réparti : il est bien plus intense dans le voisinage du point d'admission de l'eau, où l'eau encore presque pure dissout très vite le sel, et plus réduit à grande distance, dans les zones atteintes les dernières par de la saumure déjà très chargée en sel. Dans le détail la répartition des volumes créés dépend de nombreux facteurs. Si le mur de la mine présente une pente, l'introduction de l'eau en aval ou en amont pendage conduira à des résultats très différents. La vitesse de l'écoulement aura aussi une influence importante (Duffaut et Bonvallet, 1979). Une analyse dans le cas de Retsof est présentée par Van Sambeek (1996).

- L'augmentation de la pression dans la mine - un effet qui ne se fait sentir qu'à la fin du processus - a en revanche un effet très favorable. La vitesse de subsidence des terrains dépend de l'écart entre la pression déterminée par le poids des terrains au dessus de la mine et la pression dans la mine. Après remplissage complet, cet écart est divisé par deux. La vitesse de subsidence est proportionnelle à une puissance élevée (de 3 à 5) de l'écart indiqué. On peut donc attendre que cette vitesse soit considérablement réduite après remplissage.

4.4. Importance relative des deux effets

Van Sambeek et Thoms (2000) suggèrent nettement que ce second effet (existence d'une pression plus élevée dans la mine) doit l'emporter nettement sur le premier (création de nouveaux vides) en se basant à la fois sur des considérations théoriques et sur des observations de cas réels, à Retsof, Weeks Island, Jefferson Island. Par exemple, à Jefferson Island, la vitesse de subsidence, mesurée pendant 7 ans avant l'invasion par l'eau douce, et pendant 2 ans après l'invasion, est réduite d'un ordre de grandeur après l'invasion. On peut évidemment attendre que le résultat soit encore plus favorable quand la mine est remplie par de la saumure déjà saturée. Le cas de la mine de Dieuze (voir plus loin) montre qu'une mine envahie en 1864 par de la saumure est restée remarquablement stable plus de 130 ans plus tard. Ces observations sont remarquables, car des essais de laboratoire (Cosenza, 1996) suggèrent plutôt l'inverse : la vitesse de déformation d'un échantillon de sel chargé mécaniquement s'accélère très sensiblement, jusqu'à conduire souvent à une rupture rapide, dès que l'échantillon est mis au contact de saumure saturée. Cet effet ne semble pourtant pas affecter les piliers de mine, sans doute parce qu'il s'agit d'un « effet de peau » qui affecte une profondeur de quelques centimètres, ce qui est beaucoup pour un échantillon de laboratoire, et très peu pour un pilier de plusieurs mètres de côté.

4.5. Avantages d'un remplissage délibéré

Un autre avantage d'un remplissage délibéré réside dans la possibilité de choisir le point d'injection de l'eau ou de la saumure, ainsi que son débit. Par ailleurs, les éventuels effets adverses du remplissage surviennent dans des conditions où les moyens de mesure, de contrôle et d'alerte sont par définition immédiatement disponibles.

5. Inconvénients d'un remplissage par l'eau ou la saumure

5.1. Circulation des fluides après remplissage

On a évoqué plus haut ce risque, qui n'existe sans doute que dans des circonstances exceptionnelles. A Stassfurt, l'exploitation de la potasse a conduit à une subsidence totale de 2 millions de m³, avec une descente des terrains de 6 m sous certaines parties de la ville, qui sont aujourd'hui sous le niveau de la nappe phréatique, obligeant à un pompage de 1000 m³/jour environ, qui induit une circulation dans les vieux ouvrages effondrés (Maas, 2001).

5.2. Contraintes effectives élevées

Le sel est un milieu très peu perméable, dans lequel la notion de contrainte effective (contrainte réelle diminuée de la pression de pore) n'est sans doute pas pertinente. Il n'en est pas de même dans d'autres types de milieu qui peuvent être traversés par la mine, et dans lesquels l'accroissement de pression dans la mine peut avoir des effets négatifs dans la mesure où elle induit un accroissement de la pression de pore. En 1986, la mine Esterhazy (au Canada) rencontre le « second red bed shale », un horizon connu pour être aquifère et qui est en général situé à une vingtaine de mètres au dessus du toit de la mine. Le débit d'eau qui en résulte s'accroît, et la mine commence à s'effondrer.

L'abandon est décidé en janvier 1987. La fin du remplissage est attendue pour juillet 1987. Les 1-2 juillet, des craquements se font entendre ; ils croissent en fréquence et en amplitude. Gendzwill et Prugger (1990) attribuent ces craquements à l'accroissement de la pression de pore dans les calcaires sus-jacents, une conséquence directe du remplissage de la mine. De telles manifestations sismiques sont fréquentes dans les champs pétroliers, à la suite de l'injection de fluide sous haute pression

5.3. Présence de sels de solubilités distinctes

Les sels de magnésium (carnallite, bischofite, kiesérite) sont bien plus solubles dans l'eau que la halite. Quand une mine contient un mélange de sels, une dissolution préférentielle affectera les régions de la mine où le sel est très soluble, comme le prouve l'expérience acquise dans les cavités salines de production de saumure, de sorte que l'augmentation de volume des vides sera bien plus intense dans ces régions qu'en moyenne, avec des problèmes locaux possibles de stabilité. On n'évitera pas ces problèmes en injectant une saumure saturée en NaCl ; le chlorure de sodium cristallisera et on dissoudra les sels plus solubles avec des mouvements possibles de convection de la saumure, visant à assurer l'équilibre chimique et mécanique.

5.4. Dégradation des roches non salines

Il est bien connu que les roches marneuses et argileuses sont susceptibles de se dégrader, parfois très rapidement, quand elles sont mises au contact d'eau ou de saumure. Un tel phénomène paraît très fréquent au dessus des cavernes exploitées par dissolution, quand le sommet des cavernes atteint le toit du sel, mettant la saumure en contact direct avec le toit marneux des cavernes. On observe alors une dégradation progressive, le toit de la caverne progressant dans les marnes qui tombent au fond de la caverne. Un tel phénomène est observé dans le champ de cavités de Hengelo, aux Pays-Bas, avec une vitesse de montée du toit de l'ordre de 10 à 14 m par an, avec un caractère intermittent marqué, la vitesse étant de 0,5 à 2 m par an dans la couche anhydritique, qui peut dans certains cas arrêter la migration pendant plus de 25 ans. Bekendam et al. (2000) listent les divers phénomènes physico-chimiques qui, avec le développement des contraintes dans un toit de grande portée, peuvent contribuer à la dégradation des argilites du toit. Des phénomènes analogues, avec des vitesses verticales de montée du toit également lentes, sont décrits par Buffet (1998) dans le cas des cavités SG4-SG5 de Gellenoncourt (Lorraine) : les deux cavités se joignent, et le toit du sel est largement dégagé en 1982 au dessus du doublet. De 1982 à 1992 le système est isolé (il n'y a plus d'injection d'eau) et le toit de la caverne évolue de quelques mètres (il est à 213 m de profondeur, soit 4 mètres au dessus du sel, en 1986, puis à 209 m en 1990). L'évolution s'accélère ensuite, 172 m en octobre 1992 et 146 m en 1993 ; il atteint alors le niveau très résistant de la dolomie de Beaumont, dont la rupture devra être provoquée. Dans le cas d'une exploitation minière par chambres et piliers, on ne s'attend pas à ce qu'un tel phénomène survienne à grande échelle dans le toit, car une planche de sel assez épaisse y est en général laissée pour assurer la stabilité de la mine. En revanche il peut affecter le mur.

5.5. L'effondrement de Varangéville (Lorraine, 1873)

Une partie de la mine de sel de Varangéville s'est effondrée en 1873 ; cet accident pose le problème d'une éventuelle dégradation des marnes du mur de la mine sous l'effet de l'eau. La mine avait été ouverte à la base de la onzième couche, ou du troisième faisceau, qui est épais de 17 à 20 m dans cette zone. Les galeries étaient tracées avec une largeur de 9 m et les galeries secondaires avec une largeur de 8 m, pour une hauteur de 5,5 m. Les piliers, carrés, avaient un côté de 6 m, déterminant un taux de défruitement théorique de 82% (le taux réel était peut être supérieur). On produisait à la

fois des blocs de sel, par abattage à l'explosif, et de la saumure. Trois entailles verticales étaient ménagées avant le tir. Après un certain temps, il fut décidé de créer ces entailles par un jet d'eau sous pression ; elles avaient 30 à 40 cm d'épaisseur pour 3 mètres de profondeur. La saumure non saturée produite était collectée dans un bassin où on la saturait. La production de saumure étant insuffisante, on porta la hauteur des galeries à 17 m. Un échafaudage mobile portait 18 tubes qui fournissaient un débit de 1,5 m³/h. L'eau ruisselait le long du front en dissolvant le sel. La saumure était collectée et transportée vers le puits par des chenaux en bois. Beaucoup de saumure était perdue, soit que les chenaux déversent, soient qu'ils soient obstrués par une pâte marneuse. Cette saumure, non saturée, s'infiltrait dans le mur, dissolvant les veines ou rognons de sel, hydratant l'anhydrite, oxydant la pyrite. Cinq ans avant l'effondrement, des fissures apparaissent dans les piliers proches du puits, les rigoles ménagées au mur se referment, le mur se soulève de 80 cm dans la galerie Sainte-Julie. Des fractures verticales, larges de 5 cm, affectent toute la hauteur de certains piliers. En octobre 1873, une subsidence se développe en surface. Le 31 octobre, à 5 h du matin, une fissure apparaît dans un bâtiment de la saline, la zone est évacuée. L'effondrement qui survient alors n'aurait duré que deux secondes. Des fractures s'ouvrent en deux zones concentriques, quasi circulaires, de 160 m et 350 m de diamètre. Dans la mine, tous les piliers distants de moins de 80 m du puits ont poinçonné le mur. Malgré une subsidence de 3 m, aucune venue d'eau n'est observée et cette partie de la mine est encore sèche aujourd'hui. A l'époque de l'accident, on a mis en relation la dégradation du mur et son poinçonnement par les piliers pour proposer un mécanisme de ruine dans lequel le phénomène initiateur de l'effondrement serait la perte de résistance du mur. Cette idée ne manque pas de logique ; elle est devenue une sorte de dogme sans toutefois que des investigations scientifiques n'en confirment le bien fondé. Les observations récentes faites à Dieuze conduisent à nuancer l'interprétation. En effet, à l'époque, en toute bonne foi, l'exploitant et le service des mines croyaient que le taux de défruitement à Varangéville n'était pas excessif. Ils étaient donc enclins à chercher une explication inhabituelle à l'effondrement. Pourtant il existe une autre explication plus banale : la combinaison d'un taux de défruitement élevé, d'un toit raide et d'une largeur exploitée devenue très grande peuvent aussi conduire à un effondrement brutal pour des raisons purement mécaniques, sans qu'il soit besoin d'invoquer une dégradation d'origine physico-chimique du mur. D'ailleurs la brièveté de l'accident est plutôt en faveur d'un mécanisme dans lequel l'effondrement précède le poinçonnement. Il est vrai qu'on peut aussi imaginer une combinaison des deux mécanismes, dans laquelle la dégradation du mur joue un rôle au moins partiel. Le cas de Dieuze apporte un autre éclairage.

5.6. Invasion de la mine de Dieuze (Lorraine, 1864) par la saumure

La mine de Dieuze était exploitée depuis 35 ans quand elle fut ennoyée accidentellement en 1864. Deux panneaux avaient été ouverts, chacun de 65 m x 600 m, séparés par un pilier central de 10 m x 600 m. Chaque panneau avait été exploité par chambres et piliers, les piliers à peu près carrés étaient de 4 à 4,5 m de côté, les galeries étaient larges de 7 m à 7,5 m, déterminant un taux de défruitement de 85 % à 88 % . La mine, implantée dans la onzième couche, avait une ouverture de 3,75 m à 4 m ; le toit de la mine est à une profondeur de 115 m environ. Le toit du sel est à 50 m de profondeur ; le pourcentage moyen de sel est de 67 % dans les 60 premiers mètres au dessus de la mine. Une couche de sel de 1,3 m d'épaisseur était laissée au toit de la mine. Le mur est composé d'argilite et d'anhydrite avec une faible quantité de sel. Une galerie débouchant dans le puits de la mine avait été ouverte à la profondeur de 60 mètres (donc sous le toit du sel) et un bassin de saumure saturée y avait été aménagé. En 1864, cette galerie s'effondre, la saumure saturée qu'elle contient s'écoule par le puits vers la mine, l'effondrement met en communication la galerie avec la « nappe salée » créée par la dissolution naturelle du toit du sel. En mars 1864, on estime le débit qui envahit la mine à 430 m³/h, et la mine est abandonnée. Aucune évolution ultérieure ne se manifeste pendant le siècle suivant. En 2002, GEODERIS décide de forer un sondage jusqu'à la mine noyée.

Le sondage, les diagraphies, le sonar réalisé après que la mine fut atteinte, montrent que celle-ci paraît parfaitement intacte. La carte dressée à partir du sonar coïncide exactement avec la carte établie par l'exploitant il y a 140 ans. A l'intérieur d'une précision de quelques centimètres, la hauteur des galeries n'a pas changé. Aucune dégradation des terrains du mur, que l'on pouvait attendre du fait du contact prolongé avec la saumure, n'est constatée. Le mur est intact, la hauteur de la mine n'a pas changé, et la mine paraît parfaitement stable, malgré le taux d'extraction assez élevé. (A 115 m de profondeur, le poids des terrains est de 2,5 MPa, de sorte qu'on peut attendre une charge moyenne de 20 MPa sur les piliers, une contrainte sous laquelle leur fluage devrait être rapide. Il est donc vraisemblable, suivant une hypothèse proposée par Vouille, 2001, que le toit se comporte comme une dalle raide qui reporte sur le massif vierge une large partie du poids des terrains qui surmontent la mine, comme l'autorisent des dimensions transversales de la mine assez réduites). Le poinçonnement du mur par les piliers, redouté après l'exemple de l'accident de Varangéville, ne s'est pas produit.

5.7. Conclusion relative à la dégradation du mur

Il subsiste ainsi certaines incompatibilités entre les diverses observations relatives à la dégradation du mur des mines par l'eau ou la saumure, qui n'ont pas encore fait l'objet des investigations scientifiques nécessaires. En revanche les observations faites au toit des cavernes réalisées par dissolution (paragraphe 5.4.) peuvent apporter un éclairage utile, si on garde à l'esprit que le contexte géométrique et mécanique est différent : dans un cas on s'inquiète des toits de grande portée, et le poids propre des matériaux joue un rôle ; dans l'autre cas c'est la proportion du poids des terrains surincombants transmise au mur par les piliers qui est le paramètre significatif. On peut faire quelques remarques, qui n'épuisent pas la complexité du sujet :

1. La propagation d'une dégradation ne résulte pas d'un simple contact entre les argilites (ou marnes) et l'eau ou la saumure ; elle exige de plus un contexte de fortes sollicitations mécaniques engendrées par un toit de grande portée ou un taux de défrètement élevé. Ce point est souligné par Walters (1978) dans le cas du Kansas et par Bekendam et al. (2000) pour l'exploitation de Hengelo aux Pays Bas ; il joue un rôle manifeste dans le cas des exploitations par dissolution en Lorraine.
2. L'effet de la salinité ne paraît pas univoque. Walters (1978), dans le cas du Kansas, décrit les effets de l'eau douce qui dissout les veines de sel contenues dans les marnes. Bekendam et al. (2000) et certaines observations faites en Lorraine mettent au contraire en évidence l'effet de la saumure saturée, suivant des mécanismes physico-chimiques qui restent à identifier.
3. La succession des couches constituant le mur et le toit de la mine, ou le toit de la formation salifère, doit le plus souvent être envisagée comme une structure composite. Les bancs anhydritiques ou halitiques présentent une résistance importante, et ne peuvent être rompus que par des sollicitations mécaniques suffisamment intenses : leur rupture dégage des couches moins résistantes, plus facilement dégradables par l'action physico-chimique de la saumure. Cette hétérogénéité peut contribuer à expliquer le contraste de comportement entre ouvrages géographiquement proches, ou l'irrégularité des évolutions, constituées d'épisodes de dégradation rapide suivis de phases de stabilisation, comme dans le cas des cavités SG4-SG5 décrit par Buffet (1998). Ainsi l'hypothèse de dégradation du mur par la saumure, dans le cas des mines de Lorraine, demeure une inconnue importante qui pèse sur le choix d'un remblayage par la saumure ; toutefois son importance éventuelle pour un phénomène d'effondrement reste sujette à des questions, qu'une étude géomécanique complète pourrait lever.

6. Conclusions

L'invasion par l'eau ou la saumure est l'accident le plus caractéristique des mines de sel ou de potasse en activité. Cette invasion est pratiquement inévitable à terme plus ou moins long dans une mine abandonnée, avec des conséquences potentiellement sévères à la surface du sol, notamment au dessus de la zone par laquelle l'eau est entrée dans la mine. Plusieurs solutions sont envisageables pour éliminer ou réduire ce risque. On a surtout évoqué l'option d'un remblayage par de l'eau ou de la saumure saturée, solution de règle dans les dômes du nord de l'Allemagne. Cette solution présente de nombreux avantages, mais elle doit être pesée avec soin dans chaque cas particulier : l'analyse des accidents survenus montre que chaque situation particulière présente des spécificités et qu'il faut se garder d'appliquer mécaniquement dans un nouveau site des solutions qui se seraient avérées heureuses dans un site différent.

Remerciements

Les auteurs ont bénéficié de nombreuses remarques de A. Buffet inspirées de sa connaissance exceptionnelle de la géologie et de l'exploitation du sel en Lorraine.

Références

Bauer S.J., Ehgartner B.L., et Neal J.T. (2000) *Geotechnical studies associated with decommissioning the Strategic Petroleum Reserve facility at Weeks Island, Louisiana : a case history*. Proc. SMRI Fall Meeting Technical Session, San Antonio, 146-156.

Bekendam R., Oldenziel C., et Paar W. (2000) *Subsidence Potential of the Hengelo Brine Field (Part I). Physico-Chemical Deterioration and Mechanical Failure of Salt Cavern Roof Layers*. Technical Class, Proc. SMRI Fall Meeting, San Antonio, 103-118.

Buffet A. (1998) *The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drillings*. Proc. SMRI Fall Meeting, Rome, 79-105.

Cosenza P. (1996) *Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme*. Thèse de l'Université Paris VI, Spécialité Mécanique.

Duffaut P. et Bonvallet J. (1979) *Mine de sel de Varangéville. Poursuite de l'exploitation dans la concession Rhône-Poulenc*. Rapport BRGM pour le Ministère de l'Industrie. 79 SGN 708 GEG.

Gendzwill D.J. et Prugger F.F. (1990) *Seismic activity in a flooded Saskatchewan potash mine*. In C. Fairhurst, editor, Proc. 2nd Int. Symp. on Rockbursts and Seismicity in Mines, Minneapolis, 8-10 June 1988, Balkema, Rotterdam, 115-120.

Gowan S.W., Trader S.M., et Van Sambeek L.L. (1999) *The discovery of an apparent brine pool associated with anomalous closure patterns and the eventual failure of the Retsof salt mine*. Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Washington DC, 241-272.

Gowan S.W. et Trader S. (2000) *The mechanism of sinkhole formation above the collapse of a small yield-pillar panel in the Retsof salt mine*. Technical Class and Technical Session, SMRI Fall Meeting, San Antonio, 313-332.

Jeremic M.L. (1994) *Rock Mechanics in Salt Mining*. A.A.Balkema, Rotterdam, 532 pages.

Kupfer D.H. (1980) *Problems associated with Anomalous Zones in Louisiana Salt Stocks, USA*. Proc. 5th Symp. on Salt, Hamburg, May-June 1979, The Northern Ohio Geological Society, Inc, volume II, 119-134.

Lolan W.E., Valadie R.J., et Ballou P.J. (1998) *Remote Operated Vehicle (ROV) Design, Cavern Survey and Gel Plugging Agent Application to Repair Louisiana Offshore Oil Port (LOOP) Cavern 14*. Proc. SMRI Fall Meeting, Rome, 327-345.

Maas K. (2001) *Analysis, Modelling and Simulation of recent Subrosion in a flooded Potash Shaft*. Proc. SMRI Fall Meeting, Albuquerque, 272-281.

McCauley T.V., Ratigan J.L., Sydansk R.D., et Wilson S.D. (1998) *Characterization of the Brine Loss Zone and Development of a Polymer Gel Plugging Agent to Repair Louisiana Offshore Oil Port (LOOP) Cavern 14*. Proc. SMRI Fall Meeting, Rome, 391-406.

Morisseau J.M. (2000) *Uncontrolled leaching of salt layer in an oil field in Algeria*. Proc. SMRI Fall Meeting Technical Session, San Antonio, 330-333.

O'Gorman F. et Stafford S. (1980) *Jefferson Island: when courage, training, saved 52 in mine flood*. Technical report, Mine Safety and Health Administration.

Payment K.A. (2000) *Loss of the Retsof salt mine: legal analysis of liability issues*. In Hoshi Kakihana, Hardy and Toyokura, editors, Proc. 8th World Salt Symp., Salt 2000, The Hague, Pays-Bas, Elsevier Science publishers B.V., Amsterdam, volume I, 399-404.

Prugger F.F. (1980) *The flooding of the Cominco potash mine and its rehabilitation*. Proc. 5th Symp. on Salt, Hamburg, May-June 1979, The Northern Ohio Geological Society, Inc., volume I, 333-340.

Rölleke F.J. (2000) *Subsidence and Sinkholes over Flooded Potash Mines in Northern Germany*. Proc. Technical Class and Technical Session, SMRI Fall Meeting, San Antonio, 87-101.

Thoma H., Seifert G., et Kuehn F. (2000) *Examples of the Development of Sinkholes above Flooding or Flooded Salt Mines in Central Germany and Ways of Remote Detection of Areas with a Potential Risk of Fall*. Proc. SMRI Fall Meeting, 163-184.

Thoms R.L. et Gehle R.M. (1994) *The Jefferson Island mine flooding revisited*. SMRI Spring Meeting, Houston.

R.L. Thoms et R.M. Gehle (2000) *Winnfield mine flooding and collapse event of 1965*. Proc. Technical Class and Technical Session SMRI Fall Meeting, San Antonio, 262-274.

Van Sambeek L.L. (1996) *Dissolution-induced mine subsidence at the Retsof salt mine*. Proc. SMRI Fall Meeting, Cleveland, 289-309.

Van Sambeek L. et R. Thoms (2000) *Pre- and Post-Flooding Surface Subsidence Rates at the Retsof, Belle Isle, Jefferson Island Salt Mines*. Proc. Technical Class, SMRI Fall Meeting, San Antonio, 75-85.

Van Sambeek L.L., Gowan S.W., et Payment K.A. (2000) *Loss of the Retsof salt mine: Engineering analysis*. In Hoshi Kakihana, Hardy and Toyokura, editors, Proc. 8th World Salt Symp., Salt 2000, The Hague, Pays-Bas, volume I, Elsevier Science publishers B.V., Amsterdam, 411-416.

Vouille G. (2001) *Communication au groupe d'experts de GEODERIS*.

Walters R.F. (1978) *Land subsidence in Central Kansas Related to Salt Dissolution*. Kansas Geological Survey Bull. 214, 1-81.