Abandon des mines de sel : faut-il ennoyer ?

P. BEREST
Laboratoires LMS et G3S
École polytechnique
Palaiseau 91128 Cedex
Berest@lms.polytechnique.fr

B. BROUARD
Brouard Consulting
101, rue du Temple,
75003 Paris
Brouard@lms.polytechnique.fr

B. FEUGA
BRGM, REM/RESE
BP 6009
45060 Orléans Cedex 2
Bernard.Feuga@industrie.gouv.fr

Résumé

L'abandon d'une mine de sel sèche 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 situés au mur de la mine.

Mots-clés : **mine de sel, ennoyage volontaire, dégradation du mur.**

Dry salt mine abandonment : is deliberate flooding the best option ?

Abstract

Abandonment of dry salt mines raises 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 flooding 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, en 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 estimer 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 de l'eau (ou de la saumure).

En fait, il arrive que l'un de ces événements soit la conséquence de l'autre. Dans la suite on s'intéresse à l'invasion 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. De ce point de vue, une typologie sommaire des gisements de sel conduit à distinguer :

a) les gisements en couches restées à peu près horizontales depuis leur dépôt. 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 (Wellington Permian Formation) dans la région de New York (Upper Silurian Group) ou en Lorraine (Keuper inférieur) ;

b) les dômes, résultant de l'ascension du sel provoquée par sa faible densité et sa nature de fluide visqueux, parfois assistée par le contexte tectonique. Les dômes 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.

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, 1901 ; Saint-Pandelon, 1905-1962 ; Saint-Pierre à Dax, 1894, etc. (DARPMI, 2001).

USA

Un cas typique est celui des cinq dômes de sel alignés, appelés « Five Islands », au bord du golfe du Mexique, en Louisiane (Fig. 1) : 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 (Nichols *et al.*, 1980 ; 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 soudaine d'un jet violent de saumure sortant d'un pilier (Thoms et Gehle, 2000).

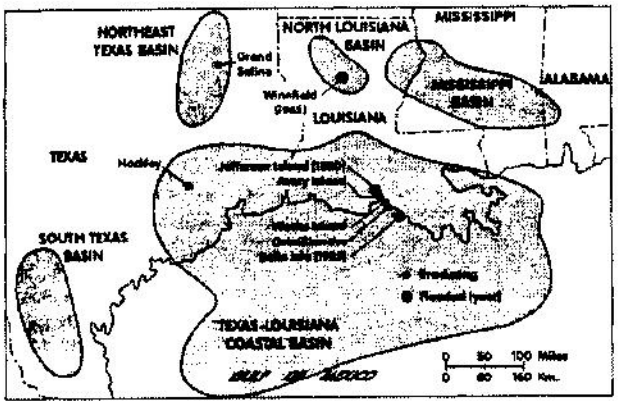


FIG. 1 **Mines et dômes de sel au Texas et en Louisiane. L'année indiquée est celle de la perte de la mine (d'après Johnson et Gonzales, 1978, cité par Thoms et Gehle, 2000).**
Salt mines and salt domes in Louisiana and Texas (After Johnson and Gonzales, referred by Thoms and Gehle, 2000).

Allemagne

Un grand nombre d'invasions de mines de sel ou de potasse sont rapportées dans la littérature. Rölleke (2000, p. 88) 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.

2.2 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 se met en place.

Communication entre les couches aquifères et la mine : discontinuités naturelles

En général, les massifs de sel pur sont extrêmement peu perméables. De plus, dans les conditions naturelles, il n'existe en général 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 (Thoms et Gehle, 2000) ; dans un autre contexte, le stockage de pétrole du LOOP près de la Nouvelle Orléans est un autre exemple, McCauley *et al.*, 1998, Lolan *et al.*, 1998). On peut aussi trouver des discontinuités verticales dans les couches de sel, comme les mud-cracks que l'on observe dans la mine de Varangéville ; mais ils font quelques mètres de haut, ne sont pas interconnectés et sont remplis de matériaux insolubles et peu perméables, de sorte que leur rôle hydraulique resterait en toute hypothèse modeste. Les surprises sont notamment possibles dans les quelques premières dizaines de mètres sous le toit de la formation salifère, qui a pu être affecté de phénomènes complexes lors du dépôt et postérieurement. Dans le cas de la mine de Holle, République du Congo, les galeries étaient tracées sous une épaisseur de sel de 35 à 55 m, avec un minimum observé à 16 m ; aucune faille ou discontinuité n'avait été rencontrée pendant huit années d'exploitation. Le 17 juin 1977 on observe dans une galerie de reconnaissance une venue d'eau et un éboulement de matériaux caractéristiques des niveaux placés au-dessus du toit du sel, bien que celui ci soit localement à 70 m au-dessus du front. Le 20 juin apparaît une brutale venue d'eau, avec chute de blocs rocheux et un débit de l'ordre de 30 m³/h, diminution rapide de la teneur en sel, augmentation du débit à 1 650 m³/h le 21 juin, puis plus de 10 000 m³/h le 22 juin avec apparition d'un cratère de diamètre 150 m, profondeur 20 m (Archives MDPA). Il est très vraisemblable que la galerie de reconnaissance ait rencontré de manière inattendue une fracture entaillant profondément le toit du sel. L'accélération finale est typique (voir § 2.3) mais on retient surtout ici qu'une invasion par l'eau exige, en général, qu'une communication soit créée ou activée entre les eaux et la mine.

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.

Deux cas d'accidents (qui n'impliquaient pas de vide minier), les cas du puits d'Haoud Berkaoui et du puits Brejcha à Dieuze, sont décrits plus loin. Un exemple extraordinaire est celui de la mine de Jefferson Island.

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 volume de la mine est de 15 millions de m³ (Johnson, 2001) et le sel est extrait du dernier niveau exploité, à 500 mètres de profondeur (Fig. 2). Au-dessus de la mine, à la surface, dans cette région des bayous, se trouve le lac Peigneur, qui contient 7 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, on observe une perte de fluide de circulation, le mât commence alors à s'incliner : le forage a atteint un niveau antérieurement exploité de 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 dizaine de mètres (Thoms et Gehle, 2000). 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 (O'Gorman et Stafford, 1980 ; Thoms et Gehle, 1994).

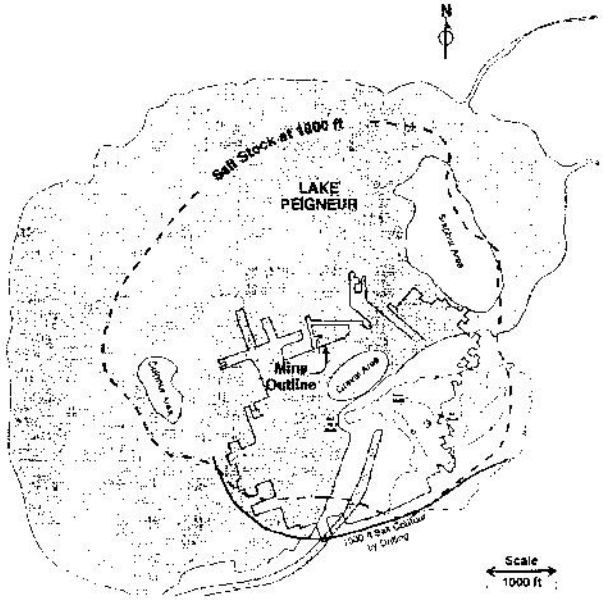


Fig. 2 Plan représentant l'extension horizontale de la mine de Jefferson Island, du lac Peigneur et du dôme à la profondeur de 1000 pieds (300 mètres). D'après Thoms et Gehle (1994) ; le fond de carte est de Nichols *et al.*, 1981.
Jefferson Island salt stock (at a 1000' depth), Lake Peigneur and Jefferson Island Mine. After Thoms and Gehle (1994). Base map after Nichols *et al.*, 1981.

Discontinuités créées par les ouvrages souterrains

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 (Fig. 3). Il s'agit d'une exploitation par chambres et piliers, réalisée sur deux niveaux, respectivement à 163 m (de 1902 à 1955) et 224 m (de 1955 à 1976) sous la surface. Les chambres ont 22 à 23 m mètres de haut pour une largeur de 15,2 m, les piliers ont une largeur de 30,5 m ; de sorte que le taux de défruitement est de 55 % (Bauer *et al.*, 2000 ; Hoffman et Ehgartner, 1997). En 1981, la mine avait été convertie en stockage de pétrole. Deux fontis apparaissent à l'aplomb du bord de la mine, le premier en 1992. Cette localisation est logique, puisque la flexion de la couche de sel laissée au-dessus de la mine engendre, au toit de cette couche, des contraintes de traction qui sont les plus intenses au-dessus du bord de la mine ; mais l'apparition des fontis était inattendue, 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 (Carosella, 1978). 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.

2.3 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.

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 interface avec 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 évolu-

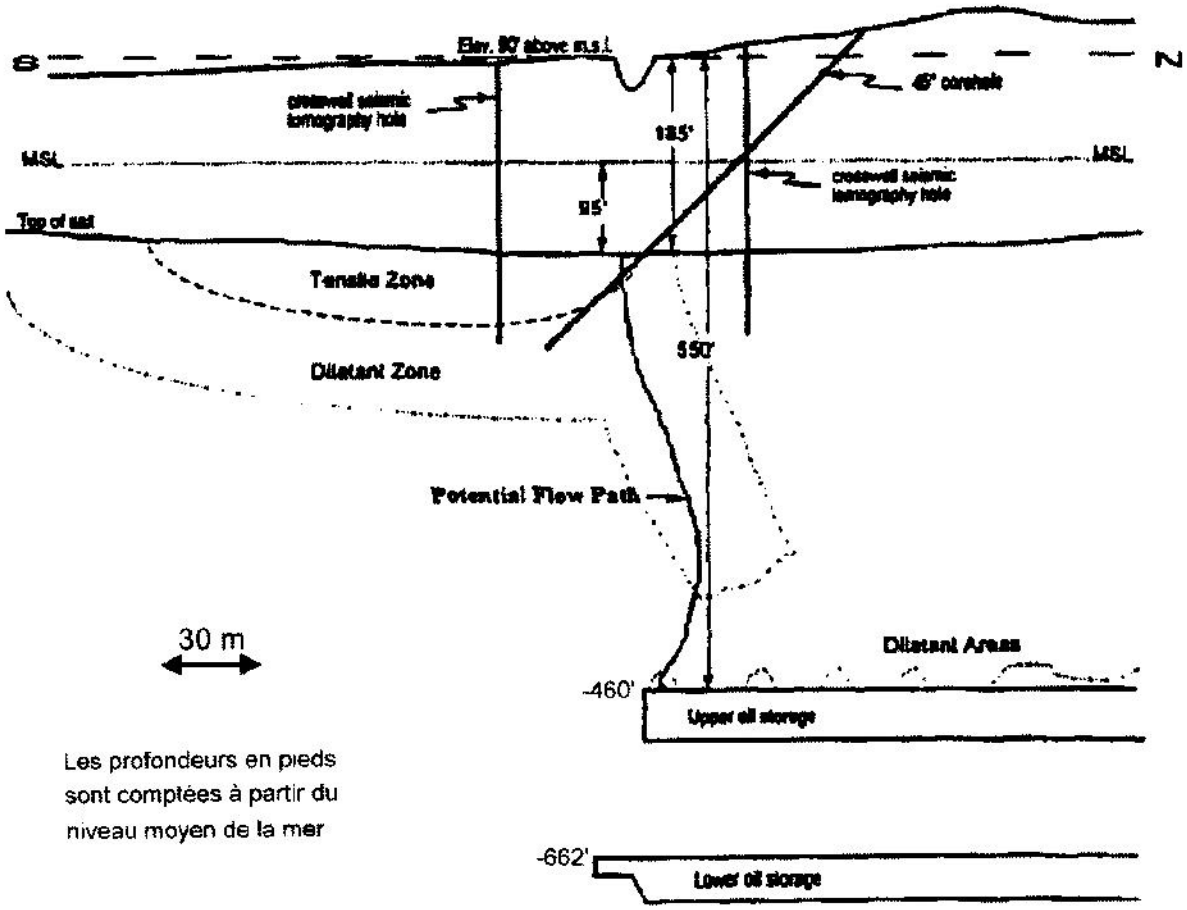


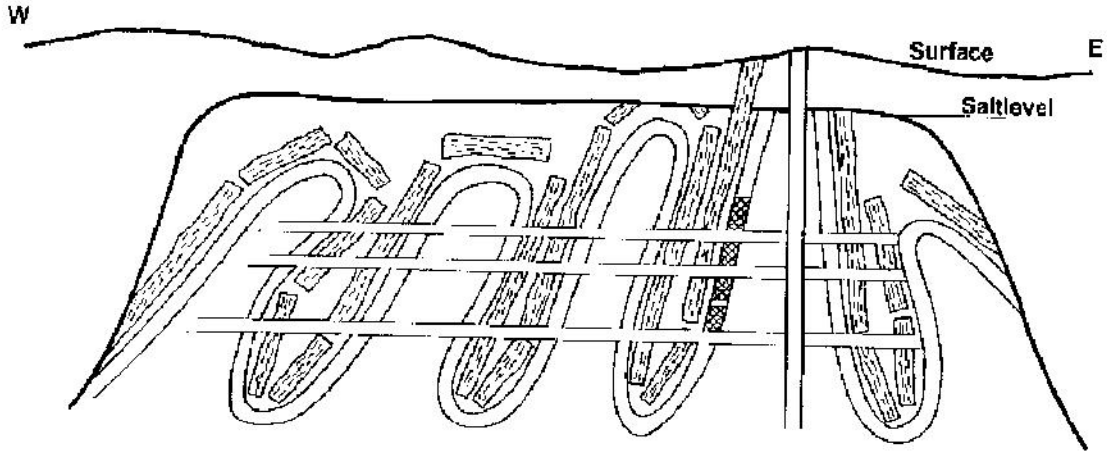
FIG. 3 **Mine de sel de Weeks Island, convertie en stockage de pétrole. La modélisation géomécanique de Ehgartner et Hoffman montre le mécanisme de développement d'une fissure en traction au-dessus des vides miniers après plusieurs années, et sa progression à travers les zones dilatantes endommagées (d'après Bauer *et al.*, 2000).**
Weeks Island Mine; it was converted into an oil storage. Geomechanical modeling by Ehgartner and Hoffman showed mechanism for crack development in tension that would develop over mined openings after a number of years, and progressing through weakened dilatant zones (After Bauer *et al.*, 2000).

tion 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 celui de la mine de Holle en République du Congo ; où le débit atteignit 10 000 m³/h, après qu'une galerie eut rencontré une faille permettant à l'eau douce de puissants aquifères sus-jacents d'envahir la mine). Dans certains cas la venue peut être maîtrisée ; le cas de la Central Canada Potash Mine près de Saskatoon est décrit dans Jeremic, 1994 ; il arrive même que l'on puisse dénoyer la mine (Prugger, 1980). Van Sambeek (1993) décrit le contrôle de très fortes venues de saumure saturée dans la mine de potasse IMC K2 à Esterhazy, Canada, obtenu en injectant une solution de chlorure de calcium concentré dans l'aquifère sus-jacent : la solution y précipite en gypse et réduit la perméabilité de l'aquifère.

Le cas de Ronnenberg

Le cas de Ronnenberg (Rölleke, 2000) est typique. La potasse était exploitée dans ce dôme qui est séparé en plusieurs zones par des séries pratiquement verticales de marne et d'anhydrite (Fig. 4). Des galeries furent tracées, traversant ces niveaux insolubles, et fournissant un exutoire pour l'eau qu'ils contenaient ou qui y circulait. Le débit initial était très réduit, et son accélération finale est caractéristique. De 1905 à 1973, le volume d'exhaure 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. Le débit passa à 60 m³ par minute le 10 juillet.



Coupe du dôme de sel de Ronnendorf (d'après Rölleke, 2000).
Vertical cross-section of the Ronnendorf salt dome (After Rölleke, 2000).

2.4

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 sa géométrie (c'est le cas pour la mine de Dieuze en Lorraine, ennoyée par de la saumure pénétrant par le puits d'accès) sauf si la saumure ne contient pas les mêmes sels que ceux qui composent la couche de minerai exploité, comme dans le cas de la mine IMC K2, Van Sambeek, 1993. 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 les vides miniers et apparition d'une subsidence localisée ou formation d'un cratère.

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, en particulier au voisinage du point d'entrée dans celle-ci. Alors que l'accroissement de volume d'une mine de sel après une invasion par de l'eau douce est en moyenne de 18 %, cet accroissement peut être bien supérieur au voisinage du point d'entrée de l'eau. Dans le cas de Jefferson Island, on estime que le trou de sondage a vu passer son diamètre de 20 cm environ à une dizaine de mètres en quelques heures ; la cuvette formée au fond du lac avait un diamètre de 800 m et une profondeur maximale estimée de 30 à 90 cm (Johnston, 2001).

Dans le cas de Retsof (Gowan *et al.*, 1999), 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 m) de profondeur, donc bien plus que la hauteur exploitée dans la mine, ou même que la hauteur totale de la couche exploitée (Fig. 5). Rölleke (2000) décrit plusieurs cas analogues survenus en Allemagne. Par exemple dans le cas de la mine de Ronnenberg (§ 2.3.2) quand il apparut que l'abandon de la mine était devenu inévitable, et qu'on devait redouter des dommages dans des zones urbanisées ou industrielles, on décida d'injecter de l'eau par deux sondages rapidement réalisés afin de répartir l'entrée d'eau de manière plus uniforme et de transférer les dégâts vers des zones moins sensibles (Rölleke, 2000). A Holle (Congo) le cratère créé par l'invasion de la mine de carnallite avait 20 mètres de profondeur, alors que l'ouverture des vides miniers n'était que de quelques mètres.

Le cas de la mine de Wapno en Pologne est caractéristique (Kunstman et Urbanczyk, 2003). De 1911 à 1960, on a exploité le sel de ce dôme très pur sur dix niveaux, de 384 m à 683 m de profondeur. L'exploitation est conduite par des galeries de 15 m de large, 15 m de haut et 100 à 150 m de long, séparées par des piliers de 15 m, et qui rejoignent en « arêtes de poisson » la galerie principale. Après 1960, on a repris l'exploitation du niveau 384 m, en amaigrissant les piliers et augmentant la hauteur des galeries. Une venue de saumure de 1 l/minute apparaît ; sa masse volumique est de 1,29 g/l et elle contient une teneur élevée en K et Mg. L'analyse du tritium contenu montre qu'il s'agit d'eau d'origine extérieure au dôme. Entre 1972 et 1976, la masse volumique diminue, la teneur en NaCl augmente, ainsi que le débit. Cette évolution montre que la venue de saumure a dû se faire le long de fissures initialement remplies de K et Mg, qu'il a fallu plusieurs années pour dissoudre. La zone où se faisait l'entrée de la saumure dans la mine était fortement sollicitée mécaniquement, le calcul avait mis en évidence la présence de contraintes de traction au toit des galeries. Les venues ont augmenté par la suite sans qu'on puisse les maîtriser, et le 3 août 1977 on décidait d'abandonner la mine ; le débit était alors de 530 l/minute. Une venue brutale de 15 000 m³ en 15 minutes est observée au niveau 384 m le 5 août ; son origine est une ancienne exploitation de gypse au-dessus de la mine. Il est à noter que les désordres maximaux en surface sont observés à quelques centaines de mètres au-delà du contour extérieur du dôme, les fontis les plus importants étant pro-

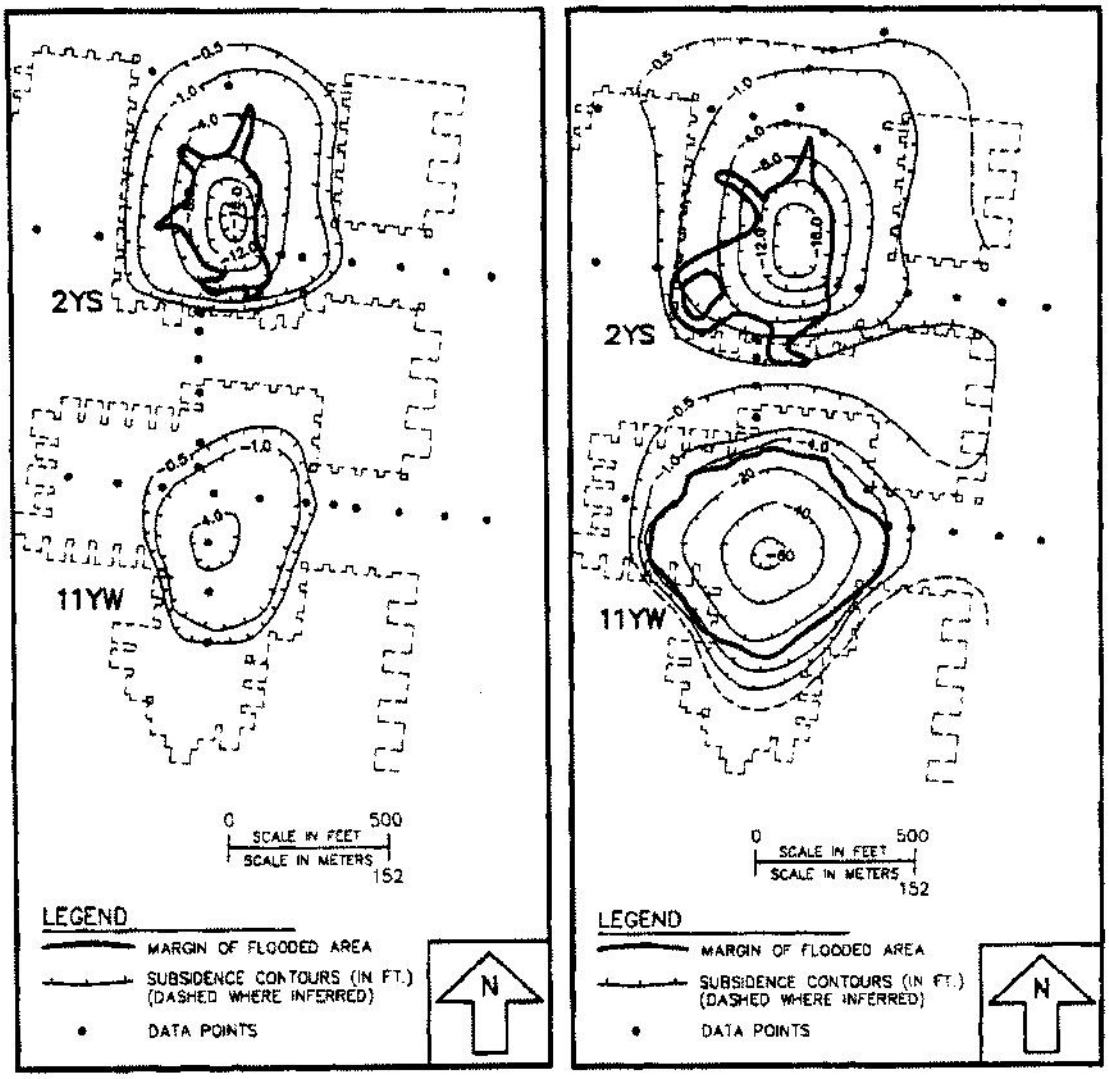


FIG. 8 Subsidence de surface les 14 avril 1994 (gauche) et 13 au 13 juin 1995 (droite) au-dessus des quartiers 2YS et 11YW de la mine de Retsof. Les chambres ont une hauteur de 12 pieds (3,6 m) ; la cuvette au-dessus du quartier 11 YW finira par atteindre 70 pieds (21 m) de profondeur (d'après Gowan et Trader, 2000).
Surface subsidence as of April 14, 1994 (left) and as of June 13 and 15, 1994 (right) above the 2YS and 11YW panels of the Retsof mine. Rooms are 12 feet high. The final sinkhole depth above the 11 YW panel will be 70 feet (after Gowan and Trader, 2000).

voqués par l'écoulement de sables superficiels vers les vides souterrains. Ces désordres conduisent à évacuer 53 immeubles et plus de 1 400 habitants de la ville de Wapno, située au-dessus du dôme. Afin de réduire l'impact en surface de l'ennoyage incontrôlé, on a alors décidé de remplir délibérément la mine avec de l'eau provenant d'un lac voisin.

La présence de cuvettes de subsidence plus profondes que n'est épaisse la couche exploitée, et parfois de fontis apparaissant à l'extérieur de la trace à la surface du contour horizontal de la mine, est un des traits caractéristiques des mines de sel ou potasse : elle 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 au paragraphe 4.3 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 favorables, lorsqu'on considère la totalité de la mine.

2.5 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 soit sont en activité, soit ont été abandonnées après une invasion par l'eau, délibérée ou non. Un cas d'effondrement de mine restée sèche après abandon à la mine de Tennant, en Irlande du Nord, est décrit dans Griffith, 1991. En France nous avons recensé huit mines de sel, parmi lesquelles une est encore en activité, une est abandonnée mais surveillée, cinq ont été envahies volontairement ou non par l'eau ou la saumure, une s'est effondrée en restant sèche.

Quand ils n'ont pas été convenablement scellés, les puits constituent un point faible après l'abandon. La mine de sel de Little River, au Kansas, n'a plus été exploitée après 1926 mais n'a été abandonnée qu'en 1938, en laissant toutefois le puits ouvert sans scelle-

ment (Walters, 1978). La profondeur du mur de la mine était de 240 m. Le puits, d'une section initiale de 2 m x 5 m, était alors endommagé par un ruissellement d'eau douce provenant des niveaux superficiels. En 1975, de nouveaux propriétaires envisagent une conversion de la mine en stockage de propane. Trois sondages, dont l'un à travers le remplissage du puits, qui s'était progressivement comblé, sont réalisés. Une mesure par sonar montre que la base du puits est considérablement élargie (une caverne de 20 m de haut et 60 m de largeur avait été lessivée à la base du sel) jusqu'à une profondeur de 170 m, où des shales contenant des joints verticaux remplis de halite peuvent être trouvés ; ces joints se dégradent très vite en présence d'eau douce ou même d'air humide. Le puits fut ultérieurement cimenté et la mine convertie en stockage.

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 (Fig. 6). 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 de sable, de roche et de paille, dont les événements ultérieurs permettent de penser qu'il était peu perméable. 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. Sous l'effet de l'entrée d'eau, la mine devenait une sorte de stockage d'air comprimé dont la pression relative a dû atteindre 0,1 MPa (la mine était vraisemblablement à moitié pleine de saumure après 50 ans). L'entrée d'eau conduisait à une dissolution des couches de sel au pied du puits, qui avait déjà entraîné un effondrement du remblai du puits principal en 1971, rapidement comblé (Walters, 1978), comme dans le cas du puits de Little River décrit plus haut. Une briqueterie s'était installée au-dessus de la mine abandonnée, probablement pour tirer parti 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 instants, 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 jusqu'à 50 m de haut ; la « pluie » dura au moins 10 minutes (Fig. 6). 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 est envisagé. Il faut noter qu'on remplit en général de saumure les vides restants afin d'empêcher les circulations d'eau (§4.1). Dans la région de Lapczyka (entre Wieliczka et Bochnia) en Pologne (A. Kunstman, communication personnelle) on remplit partiellement de sable des cavernes instables de quelques dizaines de milliers de m³. Une raison tient au risque que la saumure produite en cas d'effondrement ne pollue une rivière alimentant en eau potable une ville située en aval. On soutire un volume de saumure équivalent au volume de sable injecté, en veillant à garder à peu près constante la pression de la saumure dans la caverne pour ne pas provoquer d'effondrement.

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, d'autant que les mines récentes sont conçues avec un large coefficient de sécurité. Dans un contexte différent (il s'agissait de cavités réalisées dans le sel par dissolution d'une couche de sel) Buffet (1998) décrit un effondrement provoqué : le pompage de la saumure contenue dans les sondages et le sommet de 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 par reprise des opérations de dissolution pour obtenir la rupture, et l'ensemble des opérations a duré cinq ans (Fig. 7).

3.3

On peut assurer une surveillance permanente

Il faut alors 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

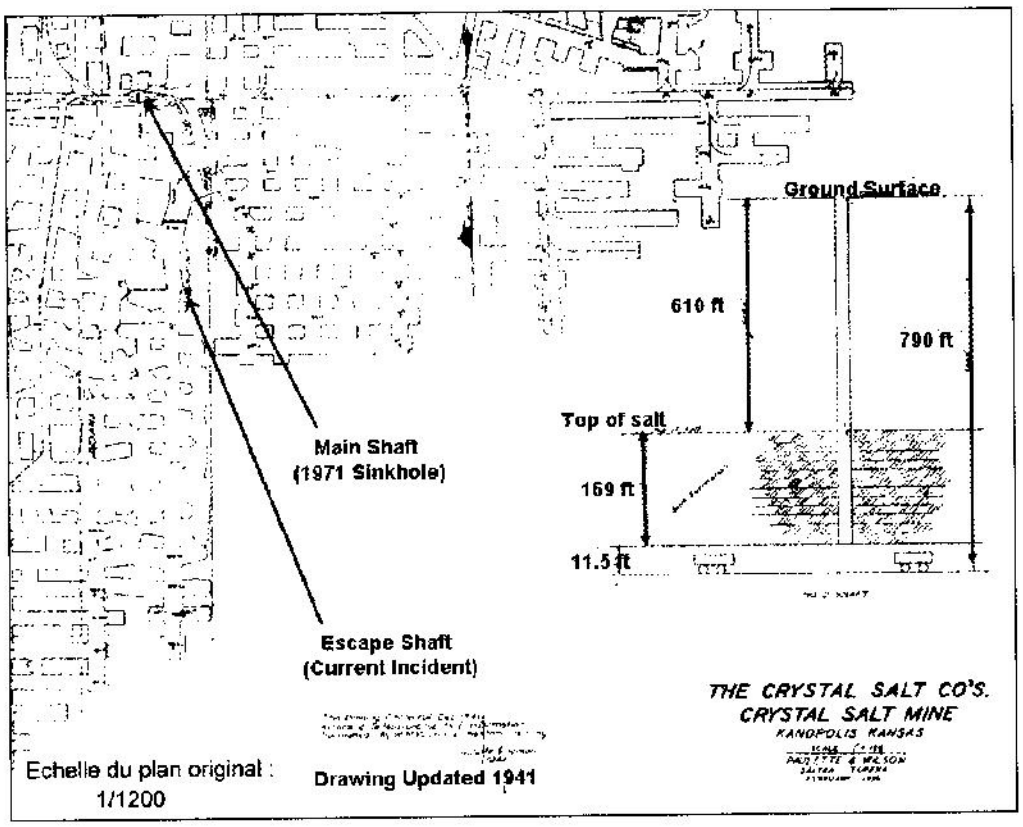
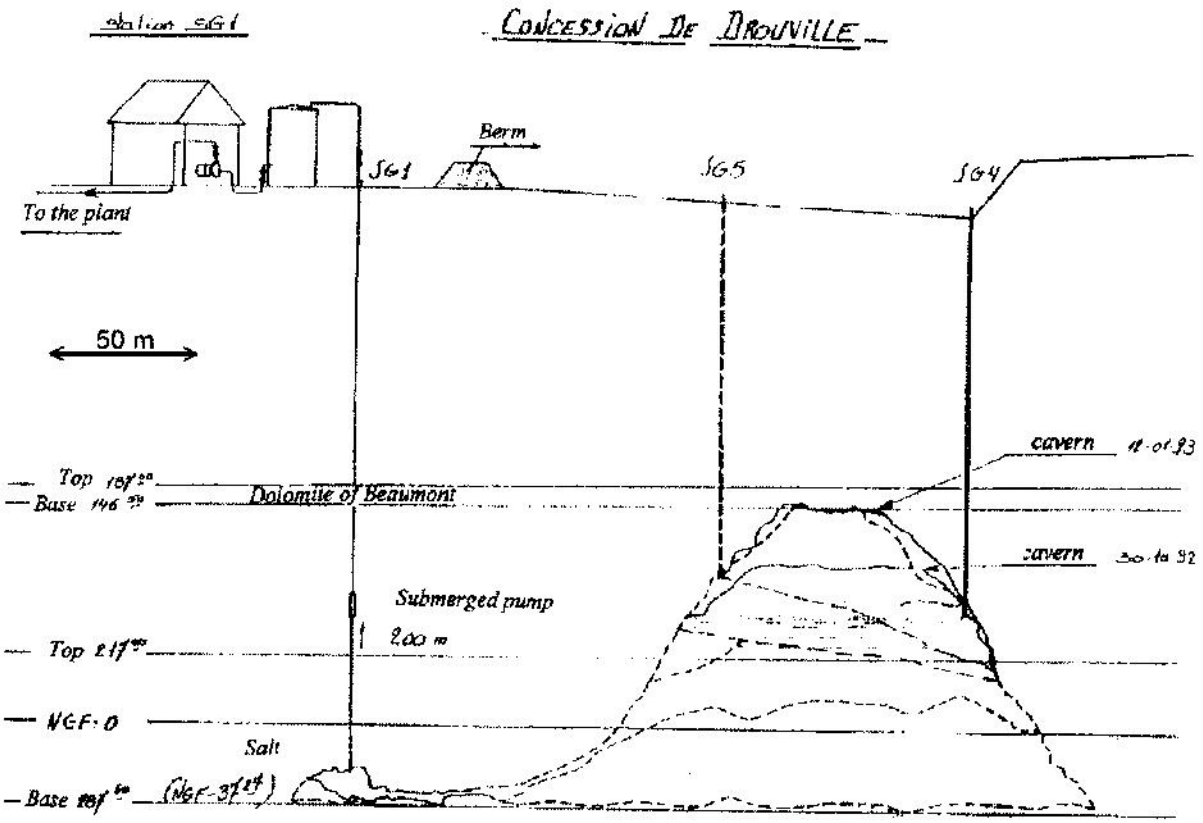


FIG. 6 **Plan et coupe verticale de la mine de Kanopolis, Kansas (en haut) et expulsion (en bas) du nuage de briques par le puits de secours (documents aimablement communiqués par L. Van Sambeck, RESPEC).**
Map and vertical cross section of the Kanopolis mine, Kansas (upper) and bricks blow out (lower) through the escape shaft (Courtesy of L. Van Sambeck, RESPEC).



Pompage de la saumure dans les cavernes SG4-SG5 (concession de Drouville). Le toit de la caverne remonte jusqu'à la Dolomie de Beaumont, atteinte en 1992. On décide alors de décomprimer la caverne en descendant le niveau de saumure dans le puits SG1 au moyen d'une pompe immergée. La chute de pression dans la caverne n'a pas provoqué l'effondrement (d'après Buffet, 1998).
Brine withdrawal from the SG4-SG5 caverns (Drouville concession). Cavern roof rises through stoping and reaches the Beaumont Dolomite by 1992. It was decided to lower brine level in SG1 well. A submerged pump was used. Pressure drop did not provoke cavern failure (After Buffet, 1998).

mine était complètement envahie en quelques heures. Les mines de Vienenburg I et Hedwigsburg ont été complètement ennoyées respectivement en 28 et 2 jours. A Retsof la chute du toit se passe le 12 mars 1994, avec apparition immédiate de fissures en surface; la descente des terrains (1 m) est nette le 28 mars; elle atteint 3 m le 6 avril, et 18 m à la mi-juin (Fig. 5); mais l'invasion complète de la mine dure 21 mois (Gowan et Trader, 2000). 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 qu'une venue d'eau (ou de saumure) a été constatée ? 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, p. 93) 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 $MgCl_2$ 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 liquide, 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 D'une part, on laisse peu ou pas de volume vide qui permettrait un remplissage rapide ou important ; par ailleurs, quand les puits eux mêmes sont également remplis, la pression dans la mine est égale ou supérieure à celle des aquifères environnants, et il n'existe pas de gradient qui puisse engendrer un écoulement. (Il faut noter qu'à Weeks Island, la mine et les puits avaient été remplis 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 soigneusement la distribution finale des pressions : dans le puits plein de saumure ou d'eau, le niveau de l'interface liquide/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) ;

– s'il existe un gradient hydraulique important 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 ;

– si des pompages sont effectués au voisinage des vides souterrains. A Stassfurt, l'exploitation de la potasse a commencé dès 1861 ; dix millions de m^3 de vide ont été créés sous la ville, et envahis par l'eau entre 1878 et 1922, conduisant à une subsidence totale de 2 millions de m^3. La descente des terrains atteint 6 m sous certaines parties de la ville, qui sont aujourd'hui sous le niveau de la nappe phréatique, obligeant à un pompage de 1 000 m^3/j environ, qui induit une circulation dans les vieux ouvrages effondrés (Maas, 2001). Il est même arrivé dans certaines régions qu'on exploite la saumure contenue dans des mines ennoyées *(Bastard brining)*, ce qui conduit à l'amaigrissement rapide des piliers et à l'effondrement de la mine (Rolfs et Crotogino, 2000).

4.2

Les cas de Haoud Berkaoui, Algérie, du puits « Brejcha » de Dieuze, France, et de l'exploitation du pétrole au Kansas

Dans le cas de Haoud Berkaoui, le sel, d'âge sénonien, est situé à une profondeur de 600-650 m. Il est protégé de la nappe phréatique par 300 m 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 m d'eau) à celui de la nappe phréatique. En 1978 un puits est foré, avec un objectif pétrolier à 3 200 m de profondeur. Le puits est abandonné à 2 500 m en raison de problèmes de stabilité des parois ; la partie inférieure du puits n'est pas cuvelée. 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 caverne se forme et finit par atteindre un second puits foré en 1979 et distant de 80 m 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 2 000 m^3/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 (d'après Morisseau, 2000).

Le puits « Brejcha » a été creusé en 1906-1907 à Dieuze en Lorraine (Minoux, 1956 ; GEODERIS, communication personnelle). Il traverse la formation salifère entre 59 m et 208 m sous la surface du sol. Sa profondeur totale est 660 m ; les grès vosgiens, un aquifère d'importance régionale, étaient atteints sur une épaisseur totale de 90 m. Les venues d'eau depuis les grès coquilliers, l'unité qui surmonte immédiatement les grès vosgiens, atteinte à la profondeur de 486 m, augmentèrent jusqu'à atteindre 27 m^3/h. La pression de l'eau en tête de puits était de 0,55 MPa, indiquant que le potentiel hydraulique des niveaux débitant dans le puits était très supérieur à celui de la nappe phréatique. Le puits fut exploité pour l'eau potable. La méthode de cimentation s'avéra défectueuse, puisqu'elle n'empêcha pas l'écoulement ascendant des eaux artésiennes par l'annulaire cimenté et la dissolution du sel sus-jacent. En 1918, la teneur en NaCl de l'eau pompée était de 1,6 g/l. On décida d'arrêter le pompage, et le débit artésien passa de 141 m^3/h en avril 1918 à 40 m^3/h en février 1922 puis zéro en 1922-1923. En 1924, une large cuvette de subsidence s'était développée. Le puits fut cimenté jusqu'à la profondeur de 194 m et on n'observa aucun désordre ultérieur.

Dans ces deux exemples les dissolutions sont engendrées par un écoulement ascendant mais ce cas n'est pas général. On peut trouver, sous une grande partie du centre et du sud du Kansas, une formation de sel en couche d'âge permien, l'Hutchinson Salt Member. La profondeur du toit du sel est de l'ordre de 300 m et l'épaisseur de la série salifère est de l'ordre de 100 m, dans la région où l'exploitation minière du sel a été le plus intense (§ 2.5) et où des cavernes ont été lessivées pour la production de saumure ou pour le stockage des hydrocarbures (600 cavernes de stockage ont été créées au Kansas, Poyer et Cochran, 2003). A une profondeur un peu supérieure à 1 000 m se trouve le puissant aquifère salé Arbuckle. Sa teneur en sel est de 15 g/l et son potentiel hydraulique est plus faible que celui des aquifères superficiels. Le niveau Arbuckle contient de grandes quantités d'huile et de gaz. Les hydrocarbures sont pompés vers la surface avec l'eau salée : l'eau salée est réinjectée dans l'aquifère Arbuckle par des puits d'injection qui acceptent des débits importants par simple écoulement gravitaire. Les eaux salées sont corrosives en raison de la présence d'hydrogène sulfuré, de sorte que certains puits sont attaqués par la corrosion et finissent par permettre l'introduction de saumures non saturées dans la formation saline : des cavités sont créées qui peuvent atteindre une taille suffisante pour provoquer une subsidence ou même la formation d'un cratère. Le cas de Panning Sink est le mieux documenté (Walters, 1978) ; le diamètre final du cratère formé était de l'ordre de 100 mètres. Walters (1978) mentionne à juste titre que, sur les 80 000 puits d'exploitation qui ont atteint l'aquifère Arbuckle, seuls 8 ont conduit à de la subsidence, ce qui fournit une sorte de statistique quant aux effets de la corrosion dans les puits. Cependant l'existence pérenne de gradients verticaux de potentiel hydraulique et la persistance de conditions favorables à la corrosion peuvent susciter des inquiétudes : cinquante années d'activité humaine, dans un environnement qui était demeuré stable pendant plus de deux cents millions d'années, laissent un héritage dont les effets ne sont sans doute pas épuisés.

Ces trois exemples n'impliquent pas de mine sèche, mais il est facile de les transposer au cas d'une mine qui serait traversée par un sondage mal cimenté susceptible de la mettre en communication avec un niveau aquifère. Ils mettent en évidence les dangers présentés par une configuration dans laquelle une couche de sel est encadrée par deux niveaux aquifères de potentiels hydrauliques distincts.

4.3 Stabilisation de la mine par la pression de 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 devoir 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 :

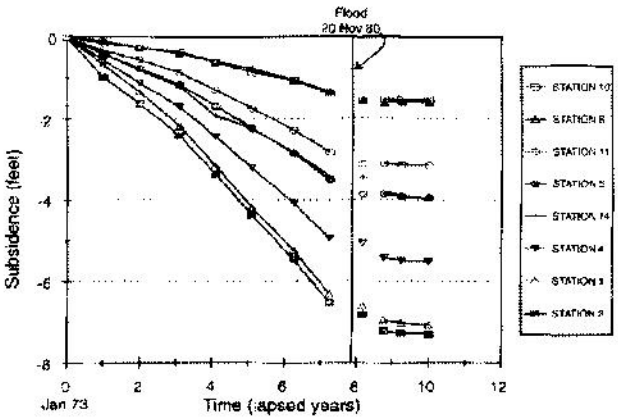
– la dissolution du sel par l'eau douce accroît le volume des vides de 18 % environ, ce qui n'est pas favorable à la stabilité. En fait l'accroissement de volume n'est certainement pas uniformément réparti : il est bien plus intense dans le voisinage du point d'admission de l'eau, où l'eau encore presque 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. Les vitesses de convergence de la mine et de subsidence des terrains dépendent 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 comme on peut le déduire de la loi de fluage du sel (Van Sambeek, 2000). On peut donc attendre que cette vitesse soit considérablement réduite quand le remplissage de la mine et des puits est achevé.

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 deux ans après l'invasion, est réduite d'un ordre de grandeur après l'invasion (Fig. 8). On peut évidemment attendre que le résultat soit encore plus favorable quand la mine a été 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 (des calculs relatifs à ce cas ont été présentés par Vouille, 2001). Ces observations sont remarquables, car des essais de laboratoire (Spiers *et al.*, 1986 ; 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.

Il faut toutefois noter, comme Van Sambeek et Thoms (2000), que, si le remplissage par la saumure ralentit le processus de fermeture de la mine, il ne change pas son issue ultime, qui est la fermeture complète. Cette dernière toutefois n'est obtenue dans la plupart des cas qu'après des dizaines de siècles, une durée trop longue pour présenter une importance pratique.



Subsidence avant et après l'ennoyage de la mine de Jefferson Island (d'après Van Sambeek et Thoms, 2000).
Pre-and post-flooding surface subsidence at Jefferson Island salt mine (After Van Sambeek and Thoms, 2000).

On notera aussi que la création de nouveaux vides par dissolution du sel commence dès le début de l'invasion par l'eau douce; en revanche la stabilisation de la mine du fait d'une pression élevée de la saumure contenue n'est acquise qu'à la toute fin de l'ennoyage, quand les puits eux-mêmes sont remplis de liquide jusqu'à la surface du sol. La phase transitoire de remplissage peut donc être plus critique que la phase ultérieure.

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 néfastes 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.

5.2

Contraintes effectives élevées

Le sel intact est un milieu très peu perméable, dans lequel la notion de contrainte effective (contrainte totale diminuée de la pression de pore) n'est sans doute pas pertinente. Il n'en est pas de même dans d'autres types de formations qui peuvent être traversées par la mine, et dans lesquelles l'accroissement de pression du fluide contenu dans la mine peut avoir des effets négatifs dans la mesure où il induit un accroissement de la pression de pore. En 1986, la mine de la Potash Company of America à 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 (Fig. 9). 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 (Fig. 10) 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, ou lors de la mise en eau de grands barrages.

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. Ce cas est fréquent dans les dômes de sel du Zechstein en Allemagne. 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. De tels phénomènes ont été discutés par exemple par Wilhem *et al.* (2002). L'invasion d'une mine de sylvinite/carnallite par de la saumure saturée en halite et ses conséquences pour la mine sont décrites par Van Sambeek (1993).

5.4

Dégradation des roches non salines

On a dit dans l'introduction que le sel des dômes est souvent pur dans de grands volumes. Les minéraux non halitiques ne jouent pas alors un rôle très important pour la tenue d'une mine. Il n'en est pas de même dans une formation de sel en couche, qui contient de nombreux niveaux anhydritiques ou marneux. Le plus souvent, la mine est implantée au sein d'une couche de sel comprise entre deux bancs non halitiques. On laisse parfois une planche de sel au toit et au mur, mais il existe souvent au moins localement un contact direct entre l'atmosphère de la mine et les bancs intercalaires. En cas d'invasion par l'eau, plus ou moins tard, ces couches seront mises en contact avec de la saumure. Il est d'observation courante que certaines au moins de ces couches se dégradent au contact de l'eau, de la saumure, ou même simplement d'une atmosphère humide. Ce phénomène soulève, du point de vue de la stabilité, des interrogations suffisamment sérieuses pour qu'on les examine en détail.

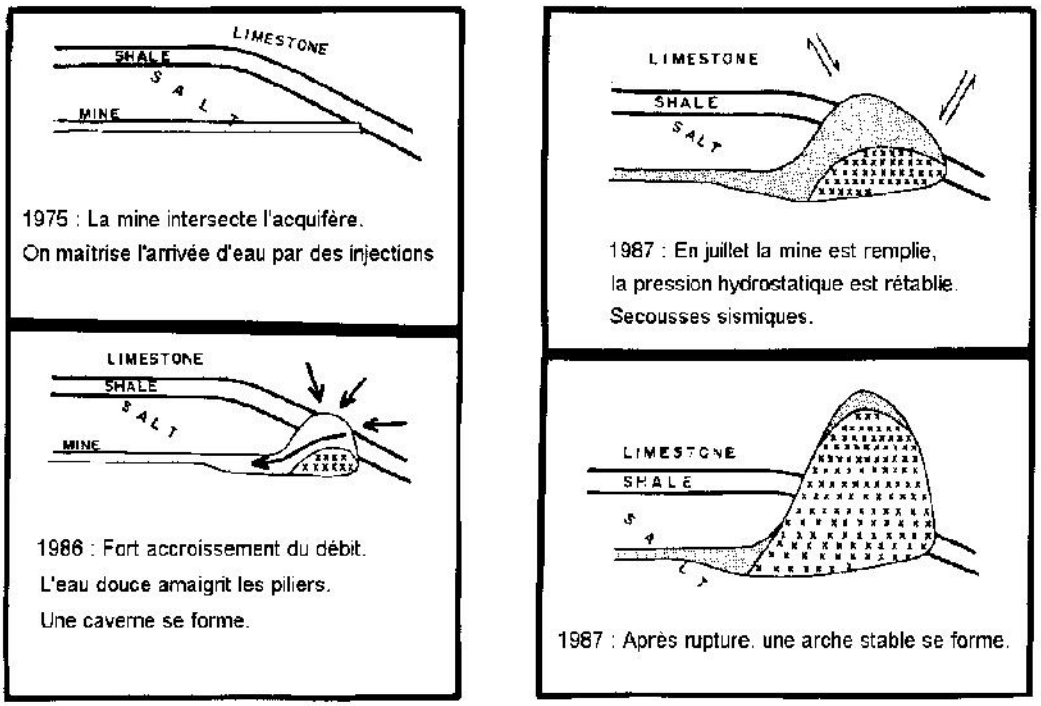


FIG. 9 Scénario possible des événements à la Potash Company of America Mine, Saskatoon (d'après Gendzwill et Prugger, 1990).
Proposed sequence of events for Potash Company of America Mine, Saskatoon (After Gendzwill and Prugger, 1990).

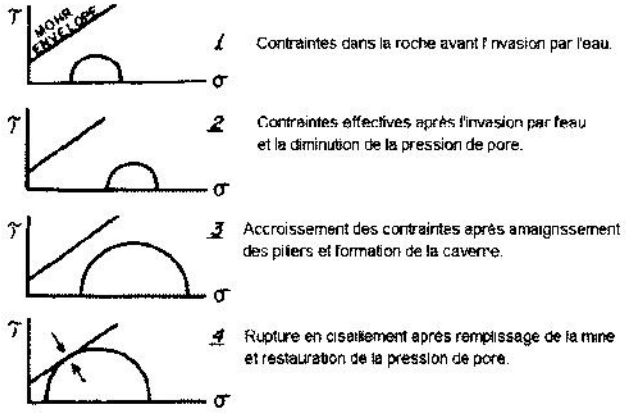


FIG. 10 Évolution de la contrainte effective à la Potash Company of America Mine, Saskatoon (d'après Gendzwill et Prugger, 1990).
Proposed stress analysis for Potash Company of America Mine, Saskatoon (after Gendzwill and Prugger, 1990).

6

Dégradation des couches marneuses

On décrit ci-dessous quelques exemples qui conduisent à des conclusions contrastées.

Cavernes atteignant le toit de la formation salifère

Ce cas est sensiblement distinct de celui d'une mine sèche. Le contexte mécanique n'est pas le même : dans les cavernes réalisées par dissolution, les problèmes sont posés par la présence d'un toit de grande portée, qui est soumis à des contraintes (effectives) de traction sur sa surface inférieure et des cisaillements intenses sur son pourtour. Dans une mine sèche, le premier problème est celui de la fraction du poids des terrains sus-jacents qui est effectivement supportée par les piliers, et de la capacité des piliers, du toit et du mur à supporter cette charge. D'autres différences plus subtiles peuvent exister. On attend par exemple que, dans une mine, les couches marneuses intercalaires soient en équilibre chimique (Walters, 1978) avec la saumure formée avec le sel qu'elles encadrent (encore que la saumure contenue dans les pores des marnes puisse contenir une teneur élevée en magnésium, Buffet *et al.*, 1993) ; c'est moins évident pour les marnes qui surmontent la formation et posent souvent un problème dans le cas des cavernes ; en effet il est fréquent que l'exploitation par dissolution se fasse sur une hauteur de plusieurs dizaines de mètres, et jusqu'au toit de la formation salifère, qui est ainsi mis en contact dans la phase finale avec la saumure saturée contenue dans la caverne (la tendance, toutefois, dans les exploitations modernes, est de laisser au toit une planche de sel d'une dizaine de mètres d'épaisseur, pour éviter les phénomènes décrits ci-dessous). On observe alors une dégradation progressive, le toit de la caverne progressant dans la couverture, jusqu'à ce qu'il se stabilise ou qu'un cratère se forme.

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, mais présentant un caractère intermittent marqué, la vitesse moyenne 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 :

a) le gonflement, qui peut avoir diverses origines : gonflement cristallin, qui affecte surtout les montmorillonites ; gonflement osmotique, d'ampleur en principe limitée en présence de saumure saturée ; gonflement « mécanique », ou dissipation des presssions de pore, qui affecte par exemple un échantillon rapidement prélevé et placé à la pression atmosphérique ;

b) la désintégration *(slaking)* de l'échantillon due à l'accroissement de pression de l'air contenu dans les argiles, qui suppose que ces dernières ne soient pas complètement saturées. Ce phénomène est très net dans le cas d'échantillons conservés sans précaution particulière, donc partiellement désaturés, puis plongés dans l'eau ;

c) des mécanismes variés affectant la résistance de la roche, dont l'effet de l'eau à la pointe des microfractures ;

d) la dissolution de l'anhydrite, très lente en présence d'une saumure présentant une concentration élevée en NaCl, mais qui pourrait être accélérée dans des conditions de circulation rapide de la saumure à l'interface saumure/roche ;

e) l'hydration en gypse de l'anhydrite.

Bekendam souligne que ces effets restent hypothétiques ; les essais conduits sur le matériau du toit à Hengelo ne conduisent pas à une conclusion franche quant à l'importance de certains des mécanismes listés. On peut ajouter à la liste proposée par Bekendam l'oxydation des pyrites, qui exige toutefois la présence d'air, l'oxygène dissous présent dans la saumure en circulation n'étant vraisemblablement pas très efficace à lui seul (M. Gasc, communication personnelle). On remarque qu'il n'est pas toujours facile d'identifier et reproduire au laboratoire toutes les conditions qui assurent que la transposition des résultats obtenus au cas d'un ouvrage souterrain est légitime.

Des phénomènes analogues, avec des vitesses verticales de montée du toit également lentes, sont décrits par Buffet (1998) dans le cas des deux cavités SG4-SG5 de Gellenoncourt (Lorraine) : les deux cavités initialement distinctes se rejoignent, 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 m au-dessus du sel, en 1986, puis à 209 m en 1990). L'évolution de la profondeur du toit 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 (Fig. 7), dont la rupture devra être provoquée.

Ces quelques exemples soulèvent des difficultés d'interprétation. On remarque que l'évolution n'est pas continue. Par ailleurs, si le caractère progressif de l'évolution peut faire penser à la propagation d'une dégradation d'origine physico-chimique, les contraintes engendrées par un toit de trop grande portée ont aussi un rôle manifeste, puisque la progression des cavernes les plus petites paraît s'arrêter spontanément, lorsqu'un équilibre mécanique est atteint.

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.

6.2

L'effondrement de Varangéville (Lorraine, 1873)

Une partie de la mine de sel de Varangéville en Lorraine s'est effondrée en 1873 (Archives CSME) ; 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 m 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 m^3/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 heures 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 peut aussi conduire à un effondrement brutal pour des raisons purement mécaniques, sans qu'il soit besoin d'invoquer une dégrada-

tion d'origine physico-chimique du mur. D'ailleurs, la brièveté de l'accident plaide 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.

6.3

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

La mine de Dieuze était exploitée depuis plus de 35 ans quand elle fut ennoyée accidentellement en 1864 (Feuga, 2003). Deux panneaux avaient été ouverts, chacun de 65 m x 550 m, séparés par un pilier central de 10 m x 550 m (Fig. 11). Chaque panneau avait été exploité par chambres et piliers, les piliers à peu près carrés étaient de 4,5 à 5 m de côté, les galeries étaient larges de 6 m à 9 m, déterminant un taux de défruitement de 80 % à 90 %. 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 m (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 ennoyée. Le sondage et 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 (Fig. 12). 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, la contrainte géostatique, résultant du poids des terrains, est de l'ordre de 2,5 MPa, de sorte que, si les piliers portaient la totalité du poids du recouvrement, on pourrait attendre, compte tenu du taux de défruitement, une contrainte verticale moyenne de 20 MPa sur les piliers, 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 assez réduites de la mine.) Le poinçonnement du mur par les piliers, redouté après l'exemple de l'accident de Varangéville, ne s'est pas produit (Feuga, 2003).

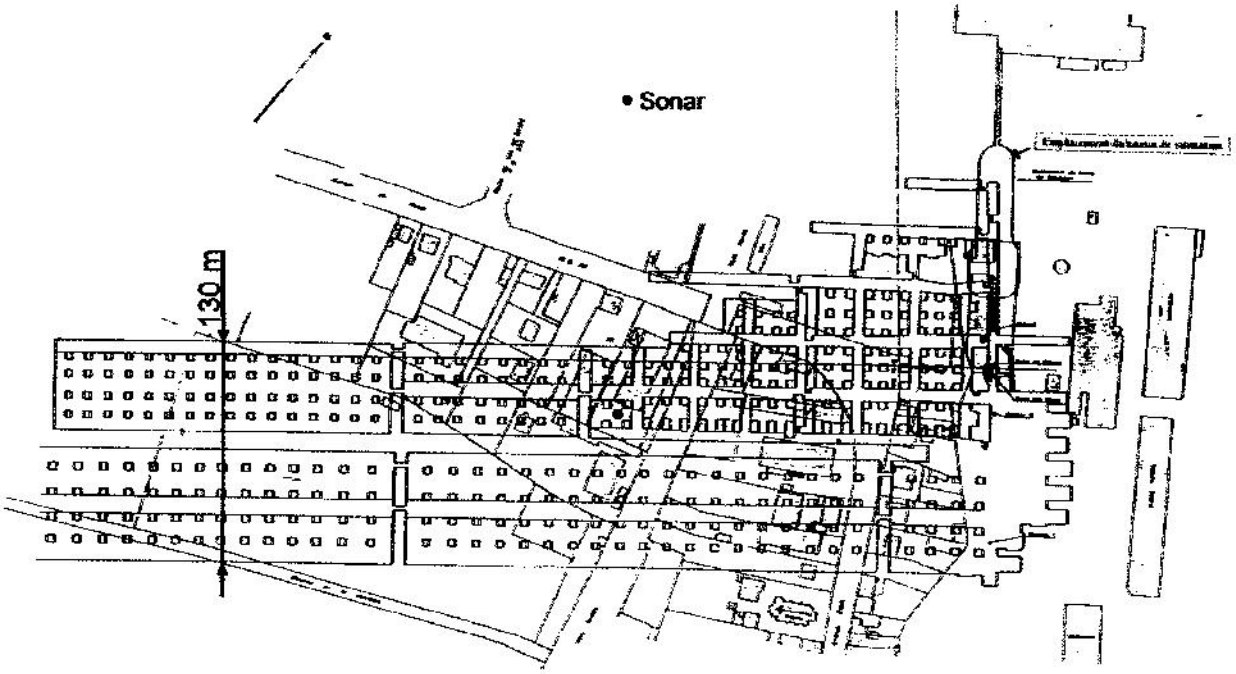


FIG. 11 **Plan de la mine de Dieuze. Le point indique l'emplacement du sondage de 2002.**
Dieuze Mine map. The dot indicates the 2002 well location.

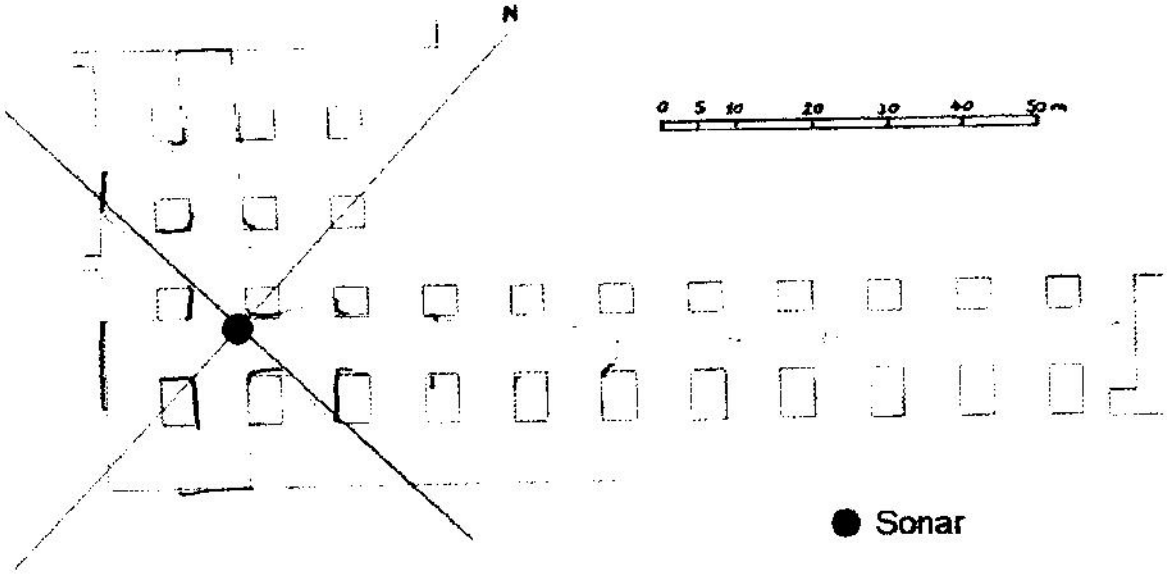


FIG. 11 **Plan de la mine de Dieuze et résultats du relevé sonar.**
Dieuze mine map and sonar survey measurements.

6.4

Comparaison des deux accidents

Du point de vue du comportement du mur, les mines de Dieuze et de Varangéville conduisent à des constatations passablement éloignées. Dans le cas de Dieuze, on n'a observé aucune dégradation appréciable du mur – même après 140 ans de contact direct entre la saumure et les marnes du mur. Le cas de Varangéville est plus compliqué : la dégradation d'échantillons de roches du mur est d'observation courante dans cette mine, et elle peut avoir joué un rôle dans l'effondrement de 1873. Cette différence de comportement pourrait tenir à la distance entre les deux mines, qui est de plusieurs dizaines de kilomètres, même si leurs murs sont situés dans le même horizon (la base de la onzième couche, ou troisième faisceau). Pourtant certains géologues considèrent que cet éloignement n'implique pas nécessairement des différences significatives de composition minéralogique (Rouchy et Blanc-Valleron, communication personnelle).

6.5

Essais de laboratoire

Les essais de laboratoire devraient permettre d'expliquer ces contrastes de comportement. Mais la dégradation des marnes au contact de l'eau, de la saumure ou de l'air atmosphérique, dans le contexte du problème de la stabilité des ouvrages miniers, n'a pas encore fait l'objet d'une attention suffisante. Il est d'observation courante que certaines marnes se dégradent, et parfois même se délitent complètement, au contact des fluides. Mais on sait mal relier ces observations à la composition minéralogique de la roche, à la salinité des fluides, ou même aux conditions de prélèvement. Le prélèvement, s'il est opéré sans soin particulier, engendre un déconfinement mécanique, une désaturation, une oxydation, peut-être même une action bactérienne qui transforment profondément l'échantillon, ou encore l'absorption d'eau par des grains de sel contenus dans les argilites, qui favorise le gonflement des argiles. Les conclusions que l'on tirera des observations de laboratoire ne s'appliqueront pas nécessairement à la roche restée en place et mise au contact de la saumure.

6.6

Conclusions

On ne dispose manifestement pas de tous les éléments permettant de conclure et de lever les contradictions au moins apparentes que soulèvent les observations. 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 défruitement 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) on ne sait pas bien si les effets poro-mécaniques jouent un rôle. Mise au contact des marnes, la saumure y pénètre, au moins parce que sa pression est vraisemblablement plus grande que la pression de pore naturelle ; on ne sait pas si elle se propage par la porosité naturelle, par des microfractures ouvertes (dans le cas du toit) par les contraintes de traction (effective) qui peuvent y régner, ou sous l'effet de contrastes de salinité. Ces phénomènes, de type diffusif, fournissent une explication possible du caractère assez lent des dégradations. Ces dernières sont souvent imputées à des phénomènes physico-chimiques liés à la pénétration de la saumure, mais on a vu que la diminution concomitante des contraintes effectives fournissait une autre explication d'origine purement mécanique (mine PCA à Esterhazy, § 5.2) ;

3) 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 ;

4) 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 d'origine physico-chimique (ou autre) 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.

7

Conclusion

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 remplissage par de l'eau ou de la saumure saturée, solution de règle dans les dômes de sel 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 remarques et données fournies par de nombreux collègues, dont les membres du groupe international d'experts (IEG) mis en place par les autorités minières françaises, B. Diamond, A. Duquesnoy, G. Durup, L. Lohff ; de commentaires de A. Buffet, inspirés de sa connaissance exceptionnelle de la géologie et de l'exploitation du sel en Lorraine. Des indications bibliographiques ont été données par I. Salpeteur, L. Van Sambeek a mis à leur disposition des informations (non publiées) sur le cas de Kanopolis, et A. Kunstman sur le cas de Wapno. Les entreprises minières MDPA et CSME ont autorisé les auteurs à consulter des documents de leurs archives ; les auteurs ont aussi profité de longue date de conversations avec les entreprises Solvay et Novacarb. L'étude bibliographique a été partiellement financée par GEODERIS.

Bibliographie

Archives CSMSE – « Note sur l'accident de 1873 à la mine de Varangéville ». *Archives d'exploitation de la Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est* (inédit).

Bauer S.J., Ehgartner B.L., Neal J.T. – « Geotechnical Studies Associated with Decommissioning the Strategic Petroleum Reserve Facility at Weeks Island, Louisiana : A Case History ». *Proc. Technical Class and Technical Session SMRI Fall Meeting*, San Antonio, 2000, p. 146-156. (Les comptes rendus des SMRI Meetings sont disponibles à : SMRI : 3336 Lone Hill Ln., Encinitas, CA 92024-7262, USA.)

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

Buffet A. – « The collapse of Compagnie des Salins SG4 and SG5 drillings ». *Proc. SMRI Fall Meeting*, Roma, 1998, p. 79-105.

Buffet A., Hilly J., Marchal C. – « Relationship between the Composition of Raw Brines Originating from the Mining of Lorraine Salt rock (NE France) and the Lithology of the Deposit ». *Proc. 7th Symp. on Salt*, H. Kakihana, H.R. Hardy Jr, T. Hoshi, K. Toyokura, eds., Elsevier, vol. I, 1993, p.195-204.

Carosella M.E. – « The Use of Salt Domes for the Strategic Petroleum Reserve ». *Proc. 5th Symp. on Salt*, Coogan A.H. and Hauber L. (eds.), Northern Ohio Geological Society Inc. Pub., vol. II, 1978, p. 69-75.

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, 1966, 184 p.

DARPMI – « L'après mine de sel en France ». Direction de l'action régionale et de la petite et moyenne industrie, ministère de l'Économie et des Finances, Rapport interne, février 2001.

Duffaut P., Bonvallet J. – « 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, 1979.

Feuga B. – « Old salt mine at Dieuze (France) revisited 150 years after being abandoned ». Proc. SMRI Fall Meeting, Chester, 2003, p. 114-128.

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

Gowan S.W., Trader S.M., Van Sambeek L.L. – « The discovery of an apparent brine pool associated with anomalous closure patterns and the eventual failure of the Retsof salt mine ». *Proc. SMRI Fall Meeting*, Washington DC, 1999, p. 241-272.

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

Griffith A.E. – « Tennant's ills ». *Ground Engineering*, November 1991, p. 18-21.

Bibliographie

Hoffman E.L., Ehgartner B.L. – « Using Three Dimensional Structural Simulations to Study the Interactions of Multiple Excavations in Salt ». SAND 97-1017C. Report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, N.M, 1997.

Jeremic M.L. – *Rock Mechanics in Salt Mining*. A.A. Balkema, Rotterdam, 1994, 532 p.

Johnston K.S. – « Sinkholes associated with Petroleum Boreholes Drilled Through Salt Deposits in the USA ». *Proc. SMRI Fall Meeting*, Albuquerque, 2001, p. 8-17.

Kunstman A., Urbanezyk K.M. – « Catastrophic looding of Wapno salt mine (1977) and controlled flooding of Solno-mine (1986-1991) – reasons, circumstances, consequences ». Proc. SMRI Fall Meeting, Chester, 2003, p. 190-200.

Kupfer D.H. – « 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, vol. II, 1980, p. 119-134.

Lolan W.E., Valadie R.J., Ballou P.J. – « 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*, Roma, 1998, p. 327-345.

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

McCauley T.V., Ratigan J.L., Sydansk R.D., Wilson S.D. – « 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*, Roma, 1998, p. 391-406.

Minoux G. – « Programme technique pour l'exécution d'un forage AEP de l'Usine Kuhlman ». Rapport BRGM A 938, 1956 (inédit).

Morisseau J.M. – « Uncontrolled leaching of salt layer in an oil field in Algeria ». *Proc. Technical Class and Technical Session, SMRI Fall Meeting*, San Antonio, 2000, p. 330-333

Nichols NW, Wu K.K., Kravitz J.H., O'Gorman F.E., Risbeck J.S., Durfee J.W., Wilcox W.R., Feehan R.D., Lilly D.P. – « The Jefferson Island Mine Inundation, November 20, 1980 ». Mine Safety and Health Administration, US Department of Labor, Report n° 202,031, 1981, 131 p.

O'Gorman F., Stafford S. – « Jefferson Island : when courage, training, saved 52 in mine flood ». Mine Safety and Health Administration, US Department of Labor, Report n° 205,957 1980, 6 p.

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

Poyer C., Cochran M. – « Kansas Underground Storage Regulations » *Proc. SMRI Fall Meeting*, Houston, 2003, p. 199-204.

Prugger F.F. – « 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., vol. I, 1980, p. 333-340.

Rolfs O., Crotogino F. – « Rock Mechanical Problems of Shallow Salt Mines in Cheshire, UK ». *Proc. Technical Class and Technical Session SMRI Fall Meeting*, San Antonio, 2000, p. 303-312.

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

Spiers C.J., Urai J.L, Lister G.S., Boland J.N., Zwart H.J. – « Long-term rheological and transport properties of dry and wet salt rocks » Final Report, Commission of the European Communities, EUR 11848, 1986.

Thoma H., Seifert G., Kuehn F. – « 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. Technical Class and Technical Session, SMRI Fall Meeting*, San Antonio, 2000, p. 163-184.

Thoms R.L., Gehle R.M. – « The Jefferson Island mine flooding revisited ». *SMRI Spring Meeting*, Houston, 1994.

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

Van Sambeek L.L. – « The IMC K2 Mine Flooding ». *SMRI Fall Meeting*, La Fayette, 1993.

Van Sambeek L.L. – « Dissolution-induced mine subsidence at the Retsof salt mine ». *Proc. SMRI Fall Meeting*, Cleveland, 1996, p. 289-309.

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

Van Sambeek L. – « Subsidence Modeling and the use of the SMRI SALT_SUB SID Software ». *Proc. Technical Class and Technical Session, SMRI Fall Meeting*, San Antonio, 2000, p. 11 22.

Van Sambeek L.L., Gowan S.W., Payment K.A. – « Loss of the Retsof salt mine : Engineering analysis ». In R.M. Geertman, ed., *Proc. 8th World Salt Symposium*, Salt 2000, The Hague, Netherlands, Elsevier Science Pub. B.V., Amsterdam, vol. I, 2000, p. 411-416.

Vouille G. – Communication au Groupe d'experts « Sel » de GEODERIS, 2001.

Walters R.F. – « Land subsidence in Central Kansas Related to Salt Dissolution ». *Kansas Geological Survey Bull.* 214, 1978, p.1-81.

Wilhelm St., Poppei J., Mayer G., Schwarz R., Klubertanz G., Siegel P., Förster B. – « Influence of chemical reactions on the flow system and contaminant transport in a former salt mine ». *Proc. 3rd Int. Conf. Uranium Mining and Hydrogeology III*, Freiberg Sept. 2002.