

Les méthodes d'exploitation du domaine salifère. Une expertise internationale

L'après mine est souvent synonyme de problèmes environnementaux, voire d'accidents, de moins en moins tolérés par l'opinion. D'où le souci de déterminer les méthodes d'exploitation les moins perturbatrices pour l'environnement et les plus aptes à garantir la sécurité à long terme après l'abandon des travaux. C'est, pour les exploitations de sel gemme, encore très actives, la mission qu'ont confié les pouvoirs publics à un groupe international d'experts. Leurs principales conclusions.

*par Pierre Bérest, Bill Diamond,
Antoine Duquesnoy, Gérard Durup,
Bernard Feuga, Lothar Lhoff,
avec la collaboration d'Ignace Salpêtreur (*)*

La disparition progressive des mines de fer, de charbon, d'uranium, etc., témoigne de la réduction de l'activité minière en France. L'exploitation du sel gemme reste pourtant très active. La faible valeur à la tonne de cette substance nécessaire pour l'alimentation, le déneigement et l'industrie chimique encourage à maintenir la production à faible distance de l'utilisateur final. D'ailleurs, le territoire national est loin de manquer de réserves de sel gemme, même

quand on tient compte de l'espace qu'il faut réserver à la réalisation de cavernes de stockage d'hydrocarbures. Un objectif d'ailleurs souvent compatible avec la production de sel.

On peut alors se demander pourquoi une substance, incontestablement stratégique il y a cinq siècles, mais répandue et peu coûteuse aujourd'hui, est restée concessible. La raison principale réside sans doute dans les problèmes particuliers que soulève son exploitation,

et qui incitent l'État à la maintenir plus étroitement sous son contrôle.

Le sel souterrain n'existe sous forme solide que s'il est efficacement protégé de la dissolution par les eaux souterraines. La nature a construit, sous des formes variées mais assez fréquemment, les conditions qui permettent une coexistence durable du sel et des eaux souterraines. Pourtant cette coexistence résulte souvent d'un équilibre que l'activité humaine peut facilement perturber.

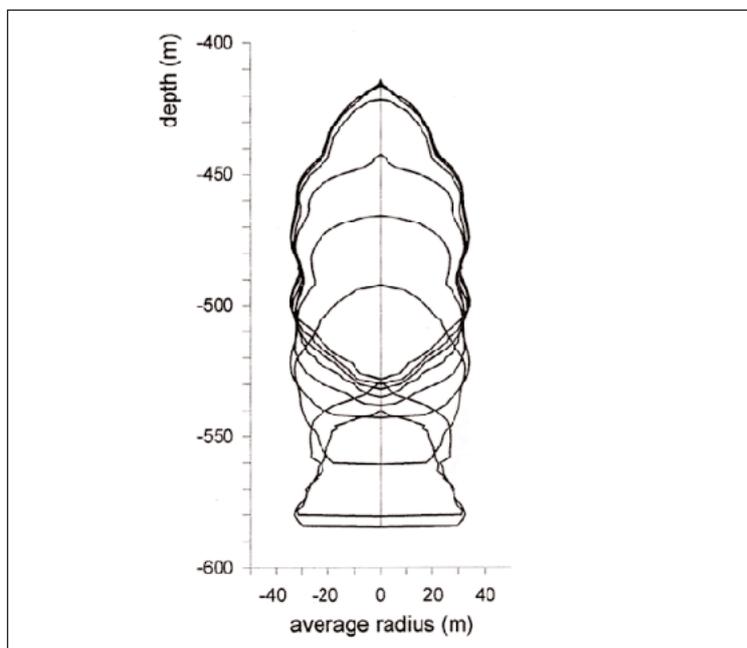
L'ouverture de puits, de sondages, de galeries, de cavernes - qu'il s'agisse de mines, d'exploitations par dissolution ou d'une simple traversée de la formation salifère avec un objectif plus profond - crée dans l'équilibre antérieur des déchirures souvent irréversibles. Ces ouvertures révèlent, de façon parfois brutale, l'instabilité latente liée à la coexistence d'eaux douces et de roches très solubles. Les exemples d'accidents qui ont suivi la création d'ouvrages et qui se traduisent le plus souvent par des mouvements importants et plus ou moins rapides de la surface du sol, ne manquent pas.

Pour le public, ces accidents et incidents constituent un tribut qui est ressenti comme de plus en plus lourd au fur et à mesure que s'estompe le souvenir de la période de l'activité minière intense, avec ses retombées positives. L'urbanisation rend nécessaire une planification de l'usage futur de la surface du sol, qui souligne les contraintes nées des incertitudes que l'exploitation minière a laissées. Les préoccupations croissantes de sécurité et de protection de l'environnement conduisent à s'interroger sur les conséquences de long terme de la création d'ouvrages souterrains. L'État a fait évoluer la réglementation pour tenir compte de ces demandes nouvelles.

C'est dans ce contexte que se pose la question du devenir des exploitations de sel gemme. C'est en Lorraine, où se concentre le plus grand nombre d'exploitations actives, que le problème est le plus visible. Faut-il préférer des méthodes d'exploitation qui laissent la surface du sol intacte au-dessus de cavernes réputées stables ou, au contraire, des méthodes d'exploitation qui conduisent à l'effondrement complet de la surface et à l'effacement des vides souterrains ? Les premières apparaissent meilleures, si la stabilité est

assurée pour une durée indéfinie ; mais des incidents récents montrent, qu'il s'agisse de sel ou d'autres substances, que des doutes peuvent subsister, quant à la pérennité de cette stabilité. Des évolutions inattendues peuvent survenir quelques décennies après l'abandon, quand on croyait la situation stabilisée ; ou bien des erreurs dans la conduite des opérations minières restent inaperçues assez longtemps pour que se crée une situation où tout pronostic de long terme est devenu incertain. Les secondes font payer la création d'une situation apparem-

Le devenir à long terme est une préoccupation qui concerne tous les ouvrages miniers. Mais le cas du sel gemme (ou celui de la potasse et des autres sels de potassium et magnésium) est particulier.



Coupes verticales successives au cours de l'exploitation d'une caverne par dissolution. La caverne est axisymétrique. Les images sont obtenues au moyen d'un outil sonar ("echo-log") descendu dans le puits. On note la sédimentation des fractions insolubles dégagées par la dissolution, qui entraîne une remontée du fond de la caverne.

ment stabilisée par la formation de cratères transformant irréversiblement la surface du sol. On peut redouter, dans le cas particulier de l'exploitation du sel gemme, que les discontinuités nouvelles ouvertes lors des effondrements ne permettent des circulations de fluides et des dissolutions que le maintien de cavernes stables n'aurait pas provoquées.

Ces interrogations ont conduit l'administration des Mines (**) à préconiser la constitution d'un groupe d'experts international qui fasse le point sur l'état de l'art des méthodes d'exploitation du sel dans le

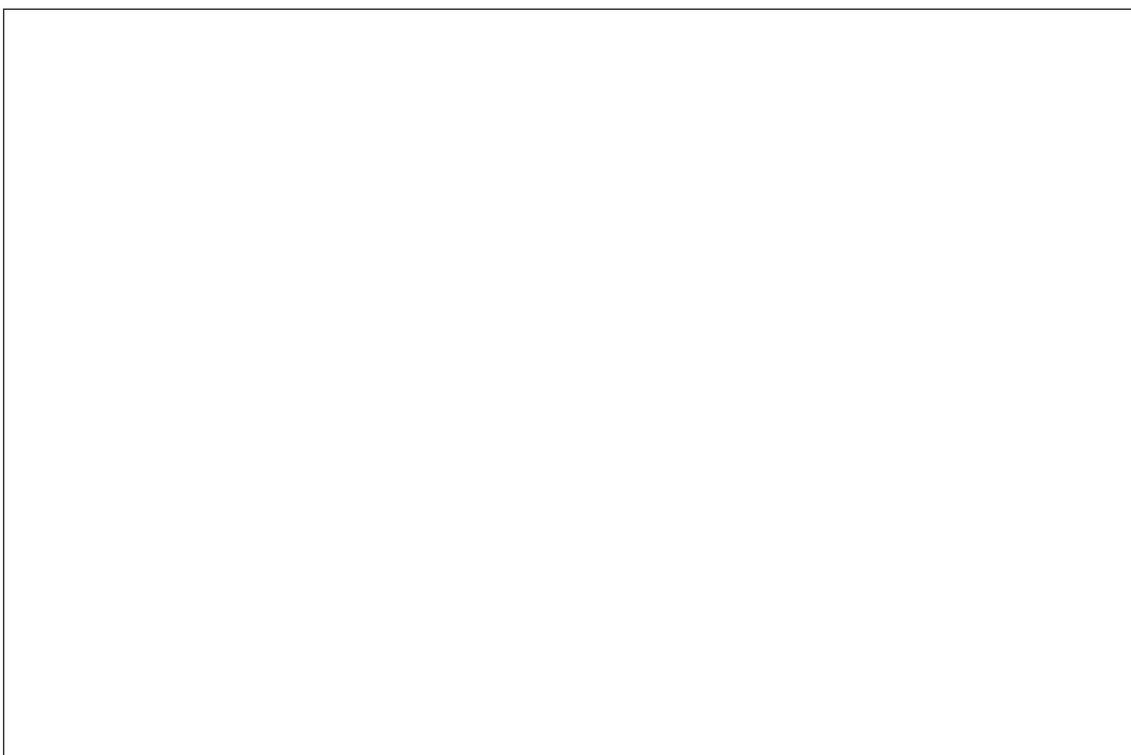
monde, et plus particulièrement dans les pays comparables à la France, et indique les leçons à tirer de cet examen dans le cas des exploitations françaises, et notamment en Lorraine. Le texte qui suit rassemble les conclusions principales de cette expertise.

Aperçu historique

L'exploitation du sel souterrain est très ancienne. On connaît, en Chine, des exploitations par dissolution vieilles de plus de 2 000 ans. Des mines sèches de

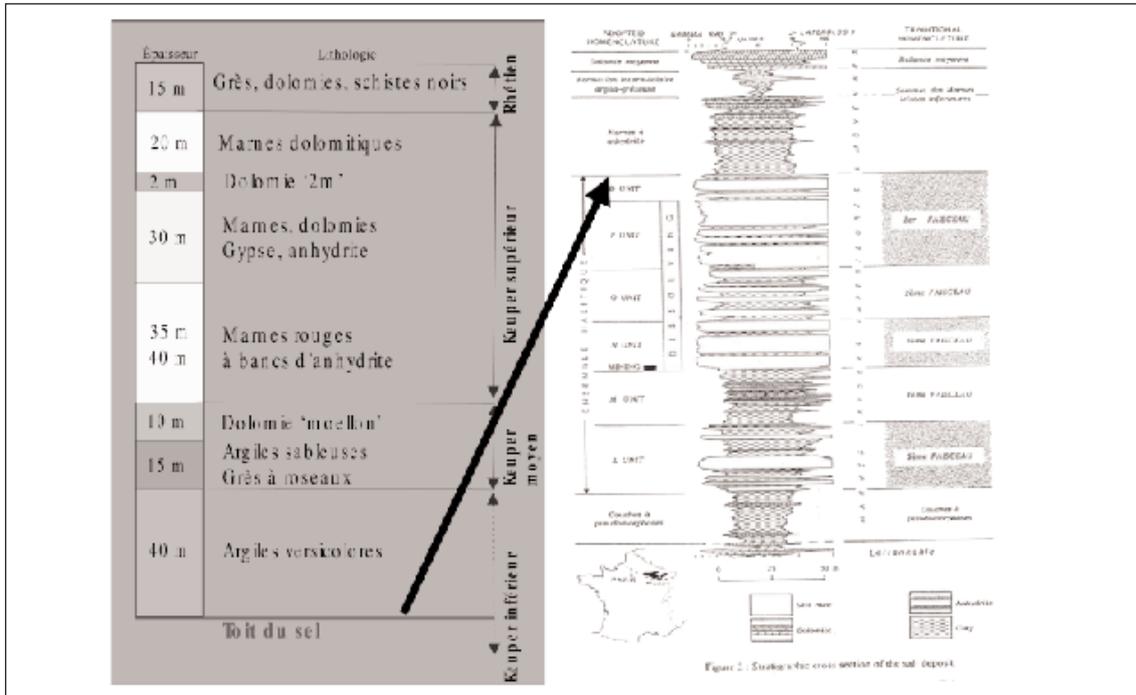
production du sel étaient en exploitation au Moyen Âge en Autriche et Pologne, mais le sel était déjà exploité à l'âge de fer à Hallstatt, en Autriche. C'est au XIX^e siècle que les exploitations prennent un caractère industriel, qu'il s'agisse de mines sèches ou d'exploitations par dissolution.

Les mines sèches dans les gisements en couche étaient alors le plus souvent exploitées par la méthode des chambres et piliers, avec des taux de défrètement élevés, de l'ordre de 80 % à 200 mètres de profondeur. Ce taux, trop important pour les capacités de résistance



Ferdinando Scianna/magnum photos

La méthode des cavernes stables est aujourd'hui la méthode la plus couramment utilisée pour l'exploitation du sel par dissolution. Elle est universellement considérée comme une option d'exploitation admissible, sous réserve que des techniques satisfaisant aux règles de l'art actuelles soient utilisées pendant la création, l'exploitation et l'abandon des cavernes.



Coupe type du gisement de sel lorrain (d'après E. Ledoux). Sept mines sèches ont été exploitées en Lorraine, toutes à la base de la 11ème couche. Les cavernes d'exploitation par dissolution, pour leur part, remontent fréquemment jusqu'au toit du sel, et même au-dessus, lorsque les terrains surincombants se dégradent. Un effondrement est possible quand le toit de la caverne atteint sur une trop grande portée le niveau résistant de la Dolomie de Beaumont.

des piliers, du toit ou du mur, a parfois conduit à l'effondrement des terrains sus-jacents et, plus fréquemment, à des ruptures partielles, souvent suivies d'une invasion de la mine par les eaux souterraines. L'exploitation par dissolution a d'abord concerné les sources naturelles d'eaux salées. On a dégagé et approfondi les exutoires, puis, pour pomper l'eau salée, on a équipé les sondages d'un tube, souvent non cimenté aux terrains. Le pompage entraînait des arrivées d'eau douce au toit du gisement de sel. Ces arrivées se faisaient par l'extrados des sondages ou par des discontinuités ouvertes,

naturelles ou créées par l'exploitation. La provenance de l'eau douce, tout comme la localisation des dissolutions, était complètement incontrôlée. Il en résultait une dissolution souvent étendue mais peu profonde du toit du gisement, des cuvettes d'affaissement de grande extension, mais aux pentes molles. Les conséquences étaient somme toute réduites, sauf si les conditions topographiques ou hydrogéologiques étaient favorables à la poursuite naturelle de la dis-

solution du sel, activée par les communications créées par les sondages mal abandonnés ou par les discontinuités engendrées par l'exploitation. La réalisation de sondages pénétrant profondément à l'intérieur du gisement a permis un taux de récupération bien plus important, par création de cavités de grande hauteur. Le tube équipant le sondage servait au soutirage de la saumure. L'eau douce nécessaire pouvait provenir de niveaux aquifères sus-jacents :

On entend par « caverne stable » un vide souterrain dont l'existence n'entraînera pas de conséquence pratique significative pour son environnement, du point de vue chimique, hydrogéologique et mécanique.

elle était alors appelée vers la cavité par le pompage et pénétrait dans la cavité par l'extrados du sondage non cuvelé ; ou encore, une saumure non saturée était fournie par l'intermédiaire de la nappe salée, zone de dissolution naturelle au toit de la formation salifère. Les cavités progressaient vers le haut en s'évasant, jusqu'à atteindre le toit de la formation salifère. L'effondrement des terrains de surface en résultait, quand les dimensions horizontales de la cavité créée étaient suffisantes. L'étape suivante dans l'amélioration du taux de récupération, a consisté à faire se rejoindre des cavités individuelles, en les laissant croître jusqu'à la coalescence, ce qui permettait de spécialiser certains sondages dans l'injection d'eau douce, d'autres dans le soutirage de saumure, parfois alternativement, avec des débits de production bien plus importants.

Puis la technique de la fracturation hydraulique a permis de créer la communication dès un stade précoce du développement des cavités individuelles. L'exploitation était conduite sans grand souci de la stabilité des terrains de surface et a pu conduire à des effondrements inopinés ou involontaires ; la préoccupation principale était d'exploiter le maximum de sel avant que les dégradations de la

surface du sol ne rendent inutilisables les équipements d'injection et de soutirage. Cette méthode supposait toutefois que l'exploitant soit propriétaire de la surface du sol. Lorsque ce n'était pas le cas, l'exploitation n'était pas menée jusqu'à son terme, de façon à maintenir la surface en l'état en suivant des règles que l'expérience locale fixait progressivement.

L'évolution récente des techniques et du contexte sociétal

Les méthodes d'exploitation ont profondément évolué depuis quelques décennies et, notamment, depuis les années 1970.

La première raison de cette évolution c'est une prise de conscience plus aiguë par le public, et donc aussi par les exploitants miniers, des conséquences de long terme de l'exploitation du sous-sol.

Cette prise de conscience est particulièrement vive dans les régions d'Europe densément habitées ; au souci d'une meilleure protection de l'environnement s'ajoutent l'extension de l'urbanisation et la volonté de planifier et d'organiser à long terme l'occupation

de la surface du sol qui se heurtent aux sujétions que font peser sur l'utilisation de cette surface des menaces souvent difficiles à identifier, prévoir et quantifier avec précision.

Les progrès des connaissances et des techniques constituent un autre facteur d'évolution important.

D'une part, on a accumulé une expérience empirique volumineuse, qui comporte des enseignements sur certaines conséquences non souhaitables de l'exploitation incontrôlée mais aussi, plus positivement, des informations sur les moyens d'éviter ces évolutions non souhaitables.

D'autre part, les techniques géophysiques ont fait des progrès considérables ; elles rendent possible une meilleure connaissance du contexte géologique et hydrogéologique ; elles permettent de contrôler le développement des cavernes pendant la totalité de leur cycle de vie (la généralisation de l'usage du sonar est sans doute le progrès le plus spectaculaire). Les procédés de mesure de l'évolution de la surface du sol ont également considérablement évolué, et on peut attendre des avancées spectaculaires basées sur les techniques aéroportées ou par satellite. La mesure des volumes de fluide injectés et soutirés, du titre des solutions soutirées, peut être largement

automatisée et réalisée à des coûts réduits. Il en est de même du contrôle de la piézométrie et de la salinité des puits.

La simulation numérique et les essais divers de laboratoire constituent une autre source de progrès. Le calcul du processus de dissolution est devenu routinier, au moins dans le cas des applications de la création de cavités par dissolution les plus exigeantes du point de vue de la sécurité (stockage d'hydrocarbures). La mécanique des roches utilise systématiquement le calcul par ordinateur et bénéficie des progrès réalisés dans la connaissance du comportement rhéologique du sel et des roches encaissantes, stimulés, notamment, par les problèmes posés par le stockage des déchets radioactifs.

Ces avancées ont bénéficié d'une diffusion mondiale. La profession est rassemblée, à l'échelle internationale, dans des organismes tels que le SMRI, d'origine américaine, mais qui regroupe aujourd'hui la quasi-totalité des exploitants importants d'Europe et d'Amérique. Les réunions régulièrement organisées portent à la connaissance de l'ensemble de la communauté technique les récits d'accident et de réussite, les innovations, les recherches scientifiques, l'état des réglementations ou les recommandations proposées à

la profession. La notion « d'état de l'art » a ainsi acquis un contenu précis, et fait l'objet d'une reconnaissance internationale.

Particularités des questions posées au groupe d'experts

C'est dans ce contexte profondément renouvelé que se pose la question du devenir des exploitations de sel. Il est utile de préciser les limites du sujet. Compte tenu de la géologie et de l'histoire des exploitations françaises, on s'intéresse à des exploitations (mines sèches ou cavernes de production de saumure) réalisées à petite profondeur (200 mètres pour fixer les idées), dans des formations de sel en couche, d'épaisseur réduite (une centaine de mètres en Lorraine), caractérisées, par opposition au sel de dôme, par des couches le plus souvent horizontales ou faiblement pentues, comprises dans des formations contenant des successions de niveaux salins et de niveaux d'autres natures (anhydrite et marnes, pour simplifier), avec une périodicité irrégulière et une épaisseur qui varie du millimètre au décimètre. Cette précision est d'importance, car le sel des dômes,

souvent plus homogène - au moins par grands volumes - et ne comportant pas de stratification horizontale marquée, soulève des problèmes nettement distincts. On peut y placer des cavités de grande taille dans une zone plus homogène que ne l'est une formation typique en couche.

Le devenir à long terme est une préoccupation qui concerne tous les ouvrages miniers. Mais le cas du sel gemme (ou celui de la potasse et des autres sels de potassium et magnésium) est particulier. Le sel est extrêmement soluble. Ainsi, en plus des transformations géométriques du sous-sol engendrées par les travaux miniers proprement dits, on doit redouter les transformations ultérieures, qui pourraient résulter d'une circulation des eaux postérieure à la fin de l'exploitation. Il peut s'agir de la mise en place de circulations nouvelles ; ou de l'accroissement de circulations anciennes, rendues possibles par l'existence des cavités minières ou par les désordres qu'elles ont créés dans l'organisation naturelle des terrains. Ces circulations sont susceptibles de provoquer une dissolution du sel, active même après l'arrêt de l'exploitation, avec des conséquences différées mais parfois significatives pour la stabilité de la surface du sol. De plus, dans le cas des



Ferdinando Scianna/magnum photos

La notion « d'état de l'art » dans l'industrie du sel (les récits d'accident et de réussite, les innovations, les recherches scientifiques, l'état des réglementations ou les recommandations proposées à la profession) a acquis un contenu précis, et fait l'objet d'une reconnaissance internationale.

mines de sel « sèches », l'envoyage par l'eau douce ou la saumure, qui est inéluctable à long terme, peut avoir des conséquences plus sévères que dans le cas de mines d'une autre substance : la profondeur des cratères ou cuvettes éventuellement formés à la surface du sol est souvent plus grande que la hauteur des galeries souterraines ; ils peuvent apparaître à l'extérieur du contour horizontal de la mine, un phénomène qu'on rencontre rarement dans les mines d'autres substances. Les experts soulignent que chaque site minier est spéci-

fique. Rien ne serait plus contraire à la bonne pratique de l'ingénieur que de transposer mécaniquement à un nouveau site des règles figées, élaborées dans des contextes différents. Les conditions géologiques et hydrogéologiques particulières à un site, la méthode concrète d'exploitation mise en œuvre, doivent être prises en compte pour bénéficier utilement des leçons de l'expérience. Les experts ont toutefois la conviction qu'on peut tirer des leçons générales de l'expérience accumulée sur d'autres sites ; ces leçons

constituent une partie de ce qu'on désigne par « l'état de l'art ».

Les techniques d'exploitation du sel par dissolution en Lorraine

Il est commode de donner d'emblée une brève description des effets en surface des principales méthodes de production de saumure (les définitions seront précisées dans la suite) :

- ✓ les « cavernes stables » : les mouvements de la surface du sol sont négligeables, pendant l'exploitation et après celle-ci. La stabilité à long terme des cavernes est certaine ;
- ✓ les « cavernes effondrées délibérément » : toutes les cavernes créées sont effondrées volontairement pendant la période d'exploitation ;
- ✓ les « cavernes instables » : les cavernes ne sont ni toutes complètement effondrées, ni toutes certainement stables à long terme ;
- ✓ le « lessivage sauvage » : l'origine de l'eau claire nécessaire au lessivage n'est pas contrôlée.

La méthode des cavernes stables

La méthode des « cavernes stables », qu'on définira précisément plus loin, est aujourd'hui la méthode la plus couramment utilisée pour l'exploitation du sel par dissolution. Elle est universellement considérée comme une option d'exploitation admissible, sous réserve que des techniques satisfaisant aux règles de l'art actuelles soient utilisées pendant la création, l'exploitation et l'abandon des cavernes. Cette méthode est aujourd'hui la seule acceptée en Allemagne et aux Pays-Bas. Il est toutefois utile de souligner

que, si ces deux pays ont, en matière de risques miniers et de protection de l'environnement, une culture comparable à celle de la France, certaines différences existent ; par exemple, le sel (ou la potasse) allemand se présente le plus souvent sous forme de dôme de sel, situation moins fréquente en France, et qui permet de réaliser des cavernes plus profondes ; le maintien de la surface du sol à son niveau naturel est un objectif en général plus impératif aux Pays-Bas qu'en France. Une définition précise est souhaitable. On entend par « caverne stable » un vide souterrain dont l'existence n'entraînera pas de conséquence pratique significative pour son environnement, du point de vue chimique, hydrogéologique et mécanique. Autrement dit, ce cas correspond à des cavernes présentant des risques négligeables de : formation de fontis ou cratères ; de subsidence significative ; de contamination de ressources souterraines d'eau potable par des eaux salées. L'expression « pas de conséquence pratique » mérite d'être commentée.

Hormis les questions de sécurité publique, de protection des eaux souterraines et de l'environnement qu'elle peut soulever, la méthode des cavernes instables crée, pour tout usage ultérieur de la surface par la collectivité, une contrainte que l'on ne peut considérer comme acceptable.

Dans une caverne, qu'on a fermée et abandonnée après que l'équilibre thermique fut atteint, la pression de la saumure augmente très lentement par fermeture de la caverne sous l'effet du fluage du sel. Si la caverne demeure parfaitement étanche, la pression de la saumure finira par atteindre la pression résultant du poids des terrains, et la cavité restera stable pendant une durée pratiquement indéfinie. Mais une caverne n'est vraisemblablement jamais étanche. Il est plus probable qu'une cavité fermée relâchera progressivement de la saumure qui imprègnera le massif de sel environnant, ou qui se déplacera, en percolant par exemple le long des sondages d'accès à la cavité, même après que ces sondages aient été convenablement bouchés. Dans ce cas, la cavité se refermera lentement, sous l'effet du contraste entre le poids des terrains et la pression régnant dans la cavité. Mais, dès lors qu'il s'agit de cavernes peu profondes (200 mètres de profondeur), convenablement dimensionnées, suffisamment espacées, ce mouvement est extrêmement lent et la fermeture complète

de la caverne, qui est l'issue ultime inévitable du processus, ne sera acquise qu'après une période qui se compte en milliers, voire dizaines de milliers d'années. La pression dans la caverne sera intermédiaire entre le poids de la colonne de terrains surincombants et le poids d'une colonne de saumure de même hauteur ; la saumure sera lentement expulsée de la caverne, avec des débits suffisamment faibles pour permettre une grande dilution. Il est évidemment important de vérifier qu'il n'existe pas de

Les méthodes comportant un effondrement délibéré de la surface du sol ne sont pas très largement utilisées dans le monde, où l'effondrement de la surface du sol est souvent considéré comme une conséquence indésirable de l'activité minière.

ressource en eau potable significative susceptible d'être polluée dans le voisinage des cavernes et au-dessus du gisement.

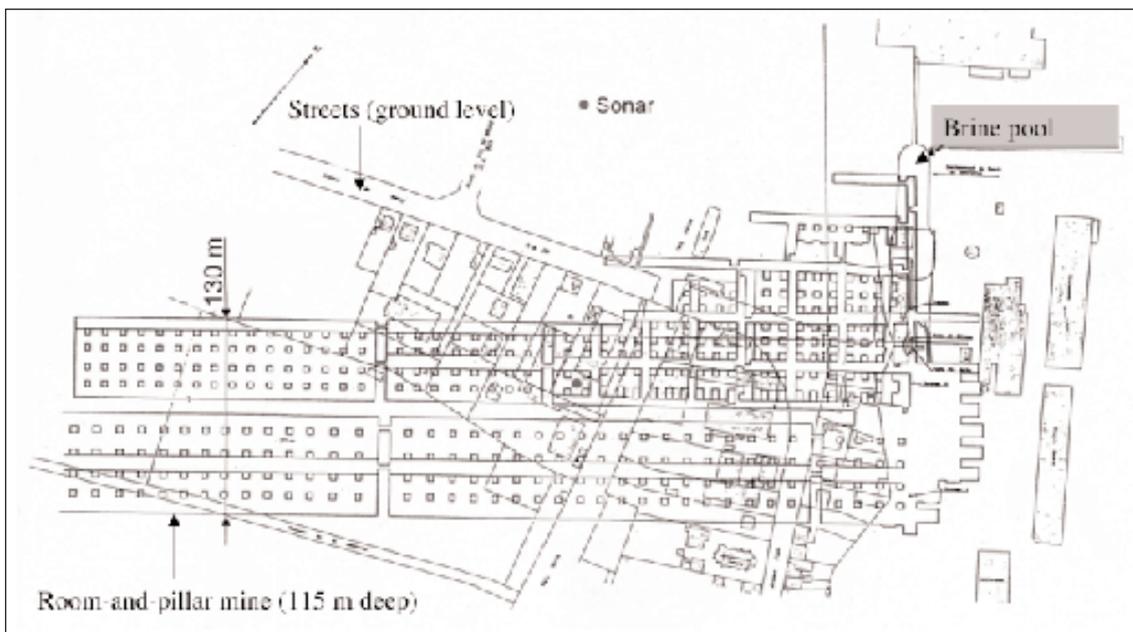
Même s'ils considèrent que chaque situation concrète doit être envisagée avec soin, les experts estiment que les conséquences d'une telle évolution ne doivent pas être prises en compte.

De façon générale, ils pensent que la méthode des « cavernes stables », dès lors qu'elle est pratiquée suivant les règles de l'art, dans un gisement qui s'y prête, comporte moins d'in-

convénients, réels et potentiels, que les méthodes conduisant à un effondrement délibéré des terrains surmontant la caverne.

La méthode des cavernes instables

Les experts soulignent, en revanche, que la pire méthode est incontestablement celle qui conduit à créer, volontairement ou non, des cavernes instables. On entend par là des cavernes qui ne sont pas effondrées mais dont la forme géométrique, et/ou la position au sein de la formation salifère, font craindre qu'elles aient une chance non négligeable de



Mine de Dieuze (Lorraine). On a superposé sur ce plan : la mine de sel exploitée par chambres et piliers à 115 m de profondeur ; la galerie qui contenait une réserve de saumure, à 60 m de profondeur ; le niveau de la rue. La galerie, puis la mine, ont été envahies par de la saumure en 1864. Un sondage complété par une mesure sonar a été effectué en 2002 par Geoderis pour reconnaître l'état actuel de la mine.

s'effondrer à un terme incertain. Hormis les questions de sécurité publique, de protection des eaux souterraines et de l'environnement qu'elle peut soulever, cette situation crée, en effet, pour tout usage ultérieur de la surface par la collectivité, une contrainte que l'on ne peut considérer comme acceptable.

Elle obligerait, soit à chercher un effondrement délibéré par reprise de l'exploitation, avec en général une grande incertitude quant aux conditions à atteindre pour provoquer effectivement l'effondrement ; soit à pratiquer une surveillance indéfinie et à prévoir un plan d'intervention en cas d'évolution rapide ; toutes sujétions que l'on doit s'interdire de créer.

De telles méthodes, laissant des cavernes instables, souvent sans que ce soit prévu dès l'origine, ont pu être utilisées dans le passé : il faudra, dans ce cas, éliminer les risques qui pourraient subsister avant de prononcer l'abandon des concessions correspondantes. Mais ces méthodes ne peuvent plus être acceptées pour les exploitations actuelles et futures. On doit prendre pour principe que le pronostic de stabilité à long terme, au moment de l'arrêt de l'exploitation, doit être assuré au vu des connaissances scientifiques disponibles ; le scénario d'évolution

de la pression ou du débit expulsé, de la subsidence, de la forme de la cavité, de la position de son toit qu'on peut en déduire, vérifié avec une très bonne précision, par des mesures effectuées pendant une période suffisante ; et que, en tout état de cause, tout risque pour une ressource significative en eau potable absent.

Marges de sécurité dans la méthode des cavernes stables

Il faut donc s'assurer, quand on conçoit et met en œuvre une méthode d'exploitation par caverne stable, d'une large marge de sécurité qui interdise que l'on puisse passer d'une situation stable à une situation instable. De telles dégradations du statut des cavernes ont déjà été observées en Lorraine. Il faut absolument éviter qu'elles se reproduisent, ce qui appelle diverses conséquences pratiques.

La connaissance et la compréhension des phénomènes d'effondrement

La connaissance précise des conditions susceptibles de conduire à une instabilité des cavités est aujourd'hui impar-

faite. Elle pourrait être considérablement améliorée, en utilisant les données empiriques issues de l'expérience plus que centenaire d'exploitation de la formation salifère lorraine, et les enseignements résultant d'essais de laboratoire et de simulations numériques.

Il serait très souhaitable, à cet égard, que les compagnies mettent en commun, par exemple en demandant à des scientifiques de les rassembler et synthétiser, les connaissances accumulées sur les effondrements, leur mécanisme, les conditions qui les rendent pos-

Il serait très souhaitable que les compagnies mettent en commun, par exemple en demandant à des scientifiques de les rassembler et synthétiser, les connaissances accumulées sur les effondrements, leur mécanisme, les conditions qui les rendent possibles. Ces renseignements n'appartiennent pas au savoir-faire qu'il est normal de protéger.

sibles. Ces renseignements n'appartiennent à l'évidence pas, pour l'essentiel, au savoir-faire qu'il est normal de protéger dans un contexte de concurrence, et leur synthèse serait utile à toute la profession. L'article de A. Buffet consacré à

l'effondrement des cavités SG4-SG5 du champ de Gellenoncourt est un bon exemple de ce qui peut être réalisé dans ce domaine.

De même, il est souhaitable que les conditions chimiques, hydriques, mécaniques et géométriques qui président à un effondrement soient éclaircies.

Il a semblé aux experts qu'on en restait, dans ce domaine, à des explications transmises par la tradition, mais sans base scientifique réelle. L'audition d'experts étrangers a montré qu'il s'agissait de questions difficiles, mais communes à de nombreux gisements dans plusieurs pays, et que les progrès généraux des diverses disciplines des sciences de la terre permettaient d'en attendre la solution. Des résultats significatifs sont d'ailleurs déjà disponibles. Ce travail de rassemblement des données empiriques et d'investigation scientifique permettra de fonder les règles actuelles sur des bases plus solides concernant des paramètres tels que les dimensions horizontales maximales des cavernes, l'épaisseur de la planche de sel laissée au toit, etc.

L'application prudente des règles de dimensionnement

En attendant que les règles de dimensionnement reposent sur des analyses scientifiques plus complètes, et que soit disponible l'expérience tirée de la mise en œuvre des nouvelles méthodes d'exploitation présentées au groupe d'experts, ces derniers suggèrent une application conservatrice des règles de dimensionnement proposées aujourd'hui, notamment à partir des études récentes du CGES (Centre du groupement pour l'étude des

Le groupe des experts

Ce groupe d'experts, dénommé IEG (International Expert Group) a été constitué au cours de l'été 2002, avec le support logistique et scientifique permis par un contrat liant le ministère délégué à l'Industrie et le Bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) ; les experts agissant comme sous-contractants du BRGM.

Même si chaque expert est intervenu à titre individuel, la composition du groupe s'efforce de respecter les équilibres souhaitables entre les cultures propres à l'industrie, à la recherche, et à l'activité de contrôle.

L'expérience de certains membres du groupe dans des organismes de recherche appliquée au domaine des cavernes dans le sel, était à même d'en renforcer la crédibilité. Le groupe était composé de six experts :

- **Bill Diamond**, après une carrière passée dans l'entreprise américaine Morton Salt, jouait un rôle de premier plan dans l'animation d'un institut international de recherche (*Salt Mining Research Institute* ou SMRI) qui consacre son activité aux cavités dans le sel et rassemble, à l'échelle mondiale, la quasi-totalité de la profession concernée ;

- **Antoine Duquesnoy** appartient au ministère des Affaires économiques aux Pays-Bas ; il y est notamment en charge de la sécurité des ouvrages réalisés dans le sel ;

- **Lothar Lohff** occupe des responsabilités analogues au *Landerbergamt* de Clausthal (Inspection des Mines) en Allemagne du Nord ;

- **Gérard Durup** est ingénieur dans une entreprise nationale du domaine de l'énergie, où il est en charge du stockage en cavernes dans le sel ; il est le vice-président pour l'Europe de l'institut qui était dirigé par Bill Diamond ;

- **Bernard Feuga**, ingénieur au BRGM, exerce des responsabilités liées à l'abandon des ouvrages dans le sel dans une agence de l'État ;

- **Pierre Bérest**, chercheur à l'École polytechnique, est l'auteur d'articles consacrés à divers aspects de la sécurité des stockages d'hydrocarbures dans le sel.

Assistaient par ailleurs aux réunions du groupe :

- **Alain Buffet**, choisi en raison de sa connaissance profonde du gisement de sel lorrain et des techniques de production qui y sont utilisées ;

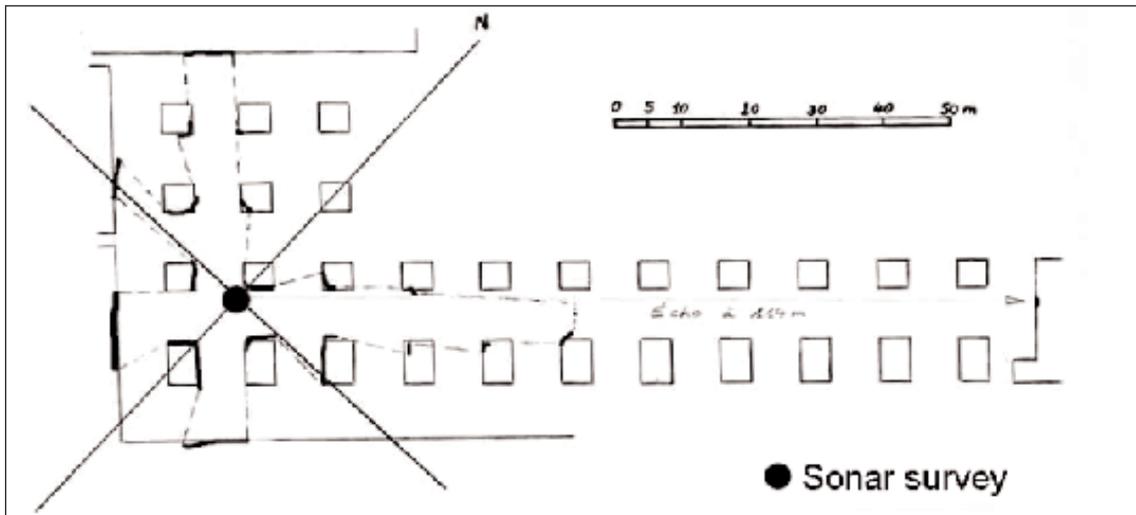
- **Ignace Salpeteur**, ingénieur au BRGM, qui a assuré l'organisation du travail bibliographique et le support logistique de l'activité du groupe.

Le groupe s'est réuni à trois reprises, en octobre 2002 à Bad Ischl (Autriche) en marge de la réunion du SMRI, puis à l'École des Mines de Paris, grâce à l'obligeance de la direction de l'École, en décembre 2002 et en février 2003. La réunion de Bad Ischl, qui n'a duré qu'une journée, a permis la mise en place du groupe, de sa méthode de fonctionnement, et a été l'occasion d'un premier exposé interne des conditions de l'exploitation du sel en Lorraine. Les deux réunions organisées à Paris, pendant trois journées chacune, ont permis de procéder à des auditions. Le groupe souhaitait voir éclairer son jugement par l'opinion de scientifiques et d'ingénieurs. Il a fait appel à **Emmanuel Ledoux**, professeur à l'École des Mines de Paris, et **Yves Babot**, ingénieur à Antea, hydrogéologues reconnus, et à trois experts extérieurs très engagés dans l'exploitation du sel dans d'autres pays européens, **David Challinor**, antérieurement ingénieur à *Imperial Chemical Industries* (Grande-Bretagne), **Andrzej Kunstman**, ingénieur à *Kemchop* (Pologne), **Roland Bekendam**, ingénieur d'un bureau d'études géomécaniques (Pays-Bas).

Pour compléter son information, le groupe a demandé à deux de ses membres d'effectuer une visite d'un jour à Madrid pour y rencontrer des experts espagnols réunis par **Pedro Ramirez**, professeur à l'École des Mines de Madrid.

Les experts ont veillé à ce que l'essentiel de leurs résultats soit traduit en langue anglaise, même si le texte français doit faire foi en cas d'ambiguïté. Les moyens de communication actuels permettent d'accéder à une information mondiale ; il est normal, réciproquement, que les points de vue français soient accessibles à l'utilisation ou à la critique internationales.

Bill Diamond est décédé quelques jours avant la dernière réunion plénière du groupe. Il avait apporté au groupe son énergie, sa compétence, son sens éthique, sa connaissance irremplaçable de l'industrie du sel. Plus âgé que la moyenne des membres du groupe, il y était devenu d'emblée le garant de la recherche raisonnée d'un équilibre entre le bon sens et la science, l'initiative privée et le contrôle, les intérêts de l'industrie et ceux de la communauté, les contraintes de l'instant et les préoccupations de long terme. Sa disparition, qui a été douloureusement ressentie par la communauté mondiale des exploitants du sel par dissolution, a été pour le groupe une perte irréparable.



Mine de Dieuze (Lorraine). La mesure par sonar réalisée à partir du sondage foré par Geoderis donne des échos qui coïncident presque parfaitement avec ce que laissait prévoir le plan de la mine dressé plus d'un siècle auparavant, témoignant du parfait état de conservation de la mine, un siècle après son ennoyage (d'après Feuga, SMRI Meeting, Chester).

structures souterraines de stockage) de l'École des Mines de Paris (Vouille, 1999 ; Humbert et Vouille, 2001).

Le groupe d'experts a rappelé que chaque site est spécifique. Les propriétés mécaniques des mêmes roches sont rarement identiques en deux sites différents. Par ailleurs, la compréhension des phénomènes mécaniques continue à progresser. L'IEG a estimé qu'il n'avait pas à approuver ou non des règles détaillées de dimensionnement des cavités. Il a en revanche examiné, du point de vue de l'état de l'art actuel, la méthode de dimensionnement préconisée dans les études citées.

Le dimensionnement des ouvrages souterrains se fait en général en comparant la résistance de la roche, mesurée en laboratoire, aux contraintes (calculées) qui résultent du

creusement de l'ouvrage. Cette méthode convient mal pour une roche viscoplastique comme le sel, car la résistance mesurée au laboratoire est « instantanée » et ne rend donc pas bien compte de son comportement à long terme.

On préfère donc, aujourd'hui, rechercher au laboratoire le « seuil d'apparition de la dilatance » de la roche, ou seuil d'apparition d'une augmentation du volume, notion qui rend mieux compte de la résistance à long terme. Ce seuil est déterminé en fonction de l'état de contrainte (par exemple, contrainte déviatorique, qui mesure l'écart à l'isotropie du tenseur des contraintes, et contrainte moyenne). Dans les études citées on utilise seulement la contrainte déviatorique pour définir ce seuil. Il faut alors que l'état de contrainte

calculé dans le massif rocheux ne dépasse nulle part ce seuil (sauf, peut-être, dans de très petites zones au voisinage des parois) et, aussi, qu'on dispose d'une large marge de sécurité (un facteur de 1,6 à 2, typiquement ; dans les études citées, la marge de sécurité est définie comme le rapport entre la contrainte déviatorique maximale admissible - définie par l'apparition de la dilatance - et la contrainte maximale calculée au centre des piliers de sel entre deux cavités voisines).

C'est ce qui est fait dans les études citées, qui proposent que la contrainte déviatorique reste inférieure à 9 MPa (seuil d'apparition de la dilatance pour le sel considéré) et qui retiennent des dimensionnements tels que, calculée au centre des piliers de sel entre deux cavernes, elle soit nette-

ment inférieure à cette limite de 9 MPa. Les experts ont estimé que la méthode employée était conforme à l'état de l'art et que les chiffres proposés, qu'il ne leur appartenait pas de valider, n'étaient pas déraisonnables. Ces chiffres impliquent de respecter une dimension horizontale maximale des cavités de 80 mètres environ et un espacement entre cavités voisines de 40 mètres au moins.

L'épaisseur de sel laissée entre le sommet d'une cavité et le toit de la formation salifère est, en Lorraine, un paramètre important. En effet, s'il y a contact direct entre la saumure de la caverne et les horizons surmontant le sel, une dégradation de ces derniers est probable. Il faut donc éviter un tel contact. Les calculs semblent montrer qu'une épaisseur assez faible de sel (de l'ordre de 2,5 mètres) est suffisante pour assurer la stabilité du toit. Mais les incertitudes sont assez nombreuses (sur la forme du toit, par exemple), et on ne peut être complètement à l'abri d'une fausse manœuvre pendant les opérations. Dans ces conditions, la présence d'une

planche de sel de 10 mètres d'épaisseur environ, laissée au toit de la formation salifère, est, pour le groupe d'experts, une précaution souhaitable dans le cas de la Lorraine, parce que le contact de la saumure avec les matériaux argileux situés au-dessus de la formation salifère doit être absolument évité.

Dans une des études récentes citées, il est suggéré que la résistance, semble-t-il assez faible, des roches constituant le mur de la onzième couche du gisement dans laquelle se trouve généralement placée la base des cavités - doit conduire à y laisser aussi une planche de sel assez épaisse. Cette suggestion conduirait à abandonner le sel de la base de la onzième couche dans les exploitations futures.

Les experts n'ont pas été entièrement convaincus que cela soit nécessaire du point de vue de la stabilité et estiment que cette idée nouvelle mériterait confirmation. Ils souhaitaient juger la conformité à l'état de l'art des principes de dimensionnement proposés dans les études récentes. Elle leur a paru

satisfaisante. Il ne leur appartenait pas de juger les chiffres exacts proposés, sinon pour dire qu'ils n'étaient pas déraisonnables. Ces chiffres devront être réexaminés quand une expérience suffisante sera disponible et permettra de confirmer un bon accord entre prévisions et observations, pour des grandeurs telles que la subsidence mesurée à la surface du sol, l'évolution de la forme des cavernes, etc.

L'utilisation de moyens de mesure adaptés

Des moyens de mesure adéquats doivent être mis en œuvre, conformément aux règles qui résultent de l'état de l'art et des recommandations émises par la communauté technique et scientifique internationale, de façon à vérifier, de manière permanente, l'adéquation entre l'évolution réelle des cavernes et les évolutions prévues. Sans souci d'exhaustivité, les experts relèvent l'importance des relevés de forme par sonar et des mesures de position du toit par diagraphies telles que le gamma-ray. Des périodicités annuelles pour le sonar, et mensuelles pour le gamma-ray, sont raisonnables ; mais la fréquence réelle doit tenir compte de facteurs tels que la taille et la forme de la caverne, son rythme d'exploitation, etc.

Une mesure fréquente par sonar aurait sans doute permis d'évi-

Dans beaucoup de pays, par exemple aux Pays-Bas, en Espagne et dans l'Etat de New-York, un plan d'abandon est soumis aux autorités lors de l'arrêt de l'exploitation. Il comporte une prévision des évolutions attendues pendant les deux ou trois dizaines d'années suivantes et un programme de mesures visant à vérifier ces prévisions.

ter plusieurs des évolutions non souhaitées survenues dans le passé. La méthode d'exploitation doit conduire à créer des cavernes de forme simple, qui puissent être complètement reconnues par sonar.

Les experts soulignent l'importance d'un bilan géochimique et hydraulique permanent des fluides injectés et soutirés qui doivent être comparés, en tenant compte des lois de saturation, pour détecter en temps réel tout début d'évolution anormale.

Ils attirent l'attention sur les relevés topographiques, qui doivent bénéficier, quand cela est possible, d'une mesure d'un état de référence avant le début de l'exploitation et, de façon générale, se conformer aux recommandations internationales telles que celles proposées par le SMRI. La fréquence de toutes ces mesures, pour laquelle on a indiqué un ordre de grandeur, doit être adaptée au stade de l'exploitation auquel on est parvenu, au niveau du débit de production et aux enseignements tirés des premières expériences de l'exploitation, mais sans trop s'écarter néanmoins des fréquences suggérées.

Les experts sont convaincus qu'une application correcte des recommandations qui précèdent permet de réaliser des cavernes stables au sens défini plus haut.

La méthode par effondrement délibéré

Les méthodes comportant un effondrement délibéré de la surface du sol (*intentional collapse*), appelées aussi méthodes « par pistes intensives » dans le contexte lorrain, ne sont pas très largement utilisées dans le monde, où l'effondrement de la surface du sol est souvent considéré comme une conséquence indésirable de l'activité minière.

Ces méthodes, qui conduisent à concentrer l'exploitation et donc certains de ses inconvénients sur une surface réduite, présentent par ailleurs des désavantages avérés, d'autres potentiels. Elles entraînent des transformations irréversibles de la surface du sol, inconvénient dont les conséquences doivent évidemment être jugées au cas par cas, d'autant qu'on peut en réduire certains effets. Ces conséquences doivent être évaluées en tenant compte des utilisations de la surface qu'elles interdisent aujourd'hui, mais aussi de celles qu'elles interdiront à plus long terme, dans quelques dizaines d'années notamment.

Des moyens de mesure adéquats doivent être mis en œuvre, conformément aux règles qui résultent de l'état de l'art et des recommandations émises par la communauté technique et scientifique internationale, de façon à vérifier, de manière permanente, l'adéquation entre l'évolution réelle des cavernes et les évolutions prévues.

Le groupe d'experts ne s'est pas essayé à cet exercice pour les exploitations existantes. Il a constaté que ces inconvénients n'étaient pas jugés, aujourd'hui, inadmissibles. Le groupe d'experts était plus sensibilisé au risque potentiel soulevé par des évolutions ultérieures permises par l'apparition de discontinuités verticales ouvertes, conséquence des effondrements.

Ces évolutions n'excluent pas des risques de dissolutions

incontrôlées sous l'effet de circulations d'eaux douces provenant, soit de l'entonnoir créé lors de l'effondrement, qui capte les eaux de surface, soit des formations aquifères superficielles situées au-dessus de la formation salifère et mises en contact avec celles-ci par la cheminée d'effondrement. Il existe des obstacles à la mise en place d'une circulation intense de fluides de cette nature - la densité du fluide créé après dissolution du sel, par exemple - et il est vraisemblable que, dans bien des cas, les évolutions resteront négligeables.

Néanmoins, les hydrogéologues consultés par le groupe d'experts estiment qu'il est difficile de faire des prévisions complètement assurées dans

ce domaine. L'existence d'une pente du toit du sel, la présence de gradients hydrauliques, même modérés, peuvent être propices à des évolutions dont les effets cumulés après une période assez longue pourraient être significatifs. Il existe d'ailleurs quelques cas bien documentés où des dissolutions parasites se sont produites à distance de zones d'effondrement, du fait de circulations au toit du sel, en rapport avec ces effondrements.

Le groupe d'experts a examiné, pour le cas de la Lorraine, la situation des exploitations « intensives » existantes et les conditions qui permettraient d'accepter une telle méthode dans des exploitations à venir. Pour les exploitations existantes, deux facteurs particuliers doivent être pris en compte :

✓ la compagnie qui prévoit de continuer à utiliser cette méthode peut appuyer ses prévisions sur une expérience empirique accumulée depuis plusieurs dizaines d'années, qui confère à ces prévisions une fiabilité satisfaisante, par exemple pour ce qui concerne les conditions présidant à l'effondrement ;

✓ il n'existe pas, au-dessus du massif salifère, de ressource significative en eau potable dont la protection devrait être assurée.

Les experts se sont demandé s'ils devaient fixer des limites de temps pour les prévisions relatives au devenir des cavernes. Cette question, qui concerne la vision que la société a de ses responsabilités vis-à-vis des générations futures, dépasse les compétences de l'IEG

Cette méthode exige néanmoins qu'une grande attention soit portée au risque de création de circulations incontrôlées. Des études hydrogéologiques ont déjà été conduites. Le groupe d'experts

recommande que ces études soient poursuivies et, notamment, que le fonctionnement hydrogéologique des cratères dans leur environnement soit éclairci ; les doutes qui pourraient subsister sur le devenir à long terme des vides et leur évolution doivent être levés. Cette approche doit s'intégrer dans une étude des relations entre différents aquifères à l'échelle du système hydrogéologique tout entier.

De façon plus générale, s'agissant d'éventuelles exploitations futures utilisant ce type de méthode, plusieurs conditions devraient être satisfaites :

✓ disposer d'une méthode permettant de préciser, avec une faible incertitude, les conditions qui provoquent l'effondrement des terrains, et d'obtenir à coup sûr cet effondrement ;

✓ prouver que les conditions hydrogéologiques ne permettront pas l'apparition de dissolutions ultérieures dans le voisinage des cavités effondrées et au-delà ;

✓ s'assurer qu'un aménagement durable de la surface du sol après l'effondrement sera possible, et que l'effondrement ne compromettra pas les utilisations futures prévisibles de la surface ;

✓ vérifier qu'il n'existe pas de ressources en eau potable qui puissent être menacées par les effets de l'exploitation ;

✓ garantir la sécurité publique autour des cavernes effondrées ;

✓ ne pas faire reposer la sécurité publique et la protection des eaux souterraines sur l'entretien d'ouvrages permanents, sur des programmes d'injection ou de pompage de fluides à l'issue indéfinie ou toute autre sujétion de cette nature.

L'exploitation au toit du sel et l'hydrofracturation

Les méthodes d'obtention de la saumure consistant à faire circuler directement les eaux souterraines vers le massif salifère ou vers son toit, sont qualifiées de « lessivage sauvage » (*wild brining*). Le groupe d'experts déconseille absolument ces méthodes, quelle que soit la variante considérée. Ces

méthodes induisent des dissolutions, et donc des risques ultérieurs d'effondrement, ou tout au moins d'affaissements progressifs pouvant atteindre de fortes amplitudes cumulées, dont la date d'occurrence et la localisation sont largement imprévisibles.

Il existe en Lorraine une exploitation qui utilise cette méthode. Une reconversion vers une méthode permettant un contrôle devrait être opérée aussi vite que possible.

L'hydrofracturation, qui conduit également à des situations incontrôlées, doit être exclue.

La surveillance après l'abandon

L'abandon de champs de dissolution

L'exploitation achevée, les champs de production doivent être surveillés, pendant une période suffisante pour s'assurer de l'absence d'évolutions mécaniques ou hydrogéologiques défavorables et de la conformité des observations aux prévisions. Aux Pays-Bas, la période de surveillance est de 30 ans. Elle doit être d'au moins 20 ans selon les experts. Un objectif sera de vérifier la conformité entre les prévisions

quantitatives d'évolution, formulées au moment de l'arrêt de l'exploitation, et les observations, afin d'asseoir la crédibilité de ces prévisions pour le plus long terme.

Dans beaucoup de pays, par exemple aux Pays-Bas, en Espagne et dans l'Etat de New-York (exploitation de Tully), un « plan d'abandon » est soumis aux autorités lors de l'arrêt de l'exploitation. Ce plan comporte une prévision des évolutions attendues pendant les deux ou trois dizaines d'années suivantes et un programme de mesures visant à vérifier ces prévisions. Le plan peut prévoir une adaptation de la fréquence des mesures, dans un sens ou dans un autre, au vu des résultats obtenus.

Les paramètres à mesurer comportent le nivellement effectué à la surface du sol. C'est un paramètre important, ne serait-ce que parce qu'il est d'acquisition relativement facile. On attend, pour les méthodes préconisées, que les évolutions post-exploitation soient extrêmement réduites. L'IEG recommande fortement de rendre de tels plans d'abandon obligatoires.

Dans le cas des exploitations par cavernes stables, il est généralement envisagé de laisser un puits ouvert au moins pour chaque groupe de cavités hydrauliquement connectées. C'est indispensable pour deux raisons.

La première c'est qu'on doit attendre le réchauffement de la saumure contenue dans la cavité qui s'étalera sur une période assez longue, et d'autant plus longue que la cavité est plus grande. Ce réchauffement, qu'il faudra mesurer par des capteurs de température placés dans la cavité, provoque une dilatation thermique de la saumure, et donc une augmentation de pression dans une cavité fermée. Il faut attendre que l'essentiel de ces effets se soit dissipé avant de fermer définitivement, et réaliser des purges périodiques par le puits laissé ouvert.

La seconde c'est que la mesure de l'évolution de pression permettra de valider pendant cette période les modèles d'évolution mis au point. Elle permettra, en particulier, de faire la part des effets thermiques, qui sont transitoires, et des effets qui tiennent au fluage du sel, qui sont plus durables.

Il sera souhaitable de compléter ces mesures, très utiles mais indirectes ou globales, par d'autres mesures qui confirment l'absence de toute évolution notable des cavités. Le ou les puits ouverts permettront de réaliser des mesures par sonar ou par diagraphies (telles que le gamma-ray), qui fourniront au moins une information locale. On devra se tenir informé de tous les progrès techniques qui pourraient

contribuer à confirmer le pronostic de stabilité à long terme. Ce pronostic devra être très solidement étayé au moment de la renonciation à la concession.

Le plan d'abandon devra également décrire les moyens de suivi des nappes dans le voisinage de l'exploitation. Des sondages seront équipés en piézomètres à différents niveaux (aquifères d'eau douce et saumure) et la salinité (et sa distribution avec la profondeur, qui peut varier avec le temps) sera mesurée périodiquement. Ici encore, une prévision des évolutions attendues devrait être produite au moment de l'arrêt de l'exploitation. Une attention particulière devrait être portée à ces paramètres dans le cas des exploitations avec effondrement puisque, avec cette méthode, les risques de circulation constituent une préoccupation particulièrement aiguë. Le plan d'abandon devra décrire la remise en état du site.

Les experts se sont demandé s'ils devaient fixer des limites de temps pour les prévisions relatives au devenir des cavernes. Cette question, qui concerne la vision que la société a de ses responsabilités vis-à-vis des générations futures, dépasse les compétences de l'IEG. L'IEG a essayé d'évaluer ce qui est scientifi-

quement possible. Il estime que la période de surveillance de 20 à 30 ans permettra de formuler des prévisions quantitatives pour une durée d'un siècle et des conclusions qualitatives (sens d'évolution des phénomènes, etc.) pour plusieurs siècles.

La circulation le long des sondages

Dans beaucoup de configurations géologiques, le sel en couche est protégé des eaux souterraines sous ou sus-jacentes par des couches imperméables. Même si les différents aquifères n'ont pas un potentiel hydraulique identique, aucune circulation d'eau ne peut alors s'effectuer à travers la formation salifère. Il en va de même si la formation a été traversée par un sondage qui a été convenablement tubé et cimenté. Mais une cimentation défectueuse, la corrosion de l'acier, etc., peuvent créer les conditions d'une circulation verticale, d'une dissolution du sel et de la création d'une cavité, ainsi que d'une contamination des aquifères situés au-dessus du sel. Un tel accident n'est en rien caractéristique des mines ou exploitations par dissolution mais, comme il est déjà survenu une fois en Lorraine, les experts souhaitent attirer l'attention sur ce risque qui peut appeler des précautions particulières.

L'abandon des mines de sel sèches

Le groupe d'experts a examiné le problème de l'abandon des mines de sel sèches.

Deux mines de cette sorte sont encore ouvertes en Lorraine.

L'une de ces mines est toujours en activité, les galeries minières sont séparées des niveaux aquifères sus-jacents par une épaisseur de 60 m de sel ou de matériaux peu perméables. Le taux de défruitement est faible, en particulier sous les zones les plus densément habitées, sauf dans les quartiers les plus anciens au nord de la Meurthe. Il est recommandé que des études soient conduites dans un délai d'un à deux ans pour définir une méthode d'abandon.

L'autre mine, plus petite, soulève des interrogations plus immédiates. Elle n'est plus en activité depuis une cinquantaine d'années. Le taux de défruitement est important et, par endroits, il ne subsiste plus qu'une faible épaisseur de sel entre les vides miniers et la nappe salée sus-jacente. Celle-ci est probablement exploitée du fait de pompages réalisés au toit du sel à une faible distance de la mine. Une méthode d'abandon doit être définie et mise en œuvre au plus tôt.

Le groupe d'experts s'est efforcé de rassembler des infor-

mations relatives aux accidents d'ennoyage de mines de sel et aux méthodes d'abandon dans d'autres pays que la France. L'ennoyage des mines de sel est un accident très fréquent, mais souvent inopiné.

Une venue d'eau ou de saumure, qui est restée faible pendant une très longue période, peut s'accroître brutalement et si rapidement qu'il est souvent impossible de la maîtriser. L'ennoyage peut produire une dissolution du sel intense et localisée, et la formation de fontis dont la profondeur peut excéder de beaucoup la hauteur de sel exploitée. Il a été observé, au moins dans les mines creusées dans des dômes de sel, mais aussi

dans le cas de la mine de Dieuze, que la plus grande partie de la mine est aussi plus stable après qu'avant l'ennoyage.

Quatre méthodes d'abandon peuvent être envisagées :

- ✓ l'effondrement provoqué de la mine ;
- ✓ le remblayage par des déblais solides ;
- ✓ le bouchage des puits et/ou la surveillance du site ;
- ✓ l'ennoyage volontaire de la mine, à l'eau ou à la saumure.

L'ennoyage volontaire avant abandon présente plusieurs avantages importants. Le risque de mouvement ultérieur des eaux souterraines vers la mine en est considérablement diminué, et la mine est plus stable lorsqu'elle est complètement remplie de saumure (puits compris). Le groupe d'experts a noté que l'ennoyage

volontaire avant abandon est obligatoire dans les dômes de sel du nord de l'Allemagne.

Toutefois, l'existence de niveaux marneux dans le voisinage des niveaux de sel exploités par galeries soulève des interrogations, car ces couches pourraient voir leurs propriétés significativement dégradées dès qu'elles seraient mises en contact avec de l'eau ou de la saumure ; l'option de l'ennoyage volontaire pourrait en être moins séduisante.

Les données empiriques issues de l'exploitation ne permettent toutefois pas de conclure nettement : la vieille mine de Dieuze, par exemple, est restée parfaitement intacte plus d'un siècle après avoir été ennoyée. Le groupe d'experts recommande fortement que des études com-

plémentaires soient entreprises afin d'évaluer cette option. Dans le cas de la seconde des mines évoquées, le groupe d'experts considère qu'une telle évaluation est urgente.

Conclusions et recommandations

✓ La première conclusion du groupe d'experts est que la méthode dite « par caverne stable » est la méthode de production de saumure considérée dans le monde entier comme la plus souhaitable. Cette méthode, à condition d'être convenablement mise en œuvre, sous réserve d'un examen qui tienne compte des particularités de chaque exploitation, n'induit à long terme que des risques négligeables pour la sécurité et la protection de l'environnement.

✓ La méthode dite « lessivage sauvage » ou « *wild brining* » est une méthode sans possibilité de contrôle, qui ne satisfait pas aux exigences résultant de l'évolution récente des techniques. Les exploitations qui l'utilisent doivent se reconvertir à d'autres méthodes.

✓ La méthode avec « effondrement délibéré », ou « méthode intensive », qui présente l'avantage d'un taux élevé de défructement, crée des sujétions pour l'usage futur de la surface du

sol, en sus des problèmes de sécurité, d'hydrogéologie et de protection de l'environnement qu'elle soulève. Pour qu'une entreprise soit autorisée à la mettre en œuvre, il faut que les effondrements puissent être prévus avec certitude, qu'aucun dommage ne puisse être porté à des ressources en eau potable, qu'il n'existe aucun risque de dissolution parasite favorisé par les effondrements, et que l'abandon n'exige la mise en place d'aucun ouvrage demandant un entretien permanent.

✓ La situation la pire est celle de cavernes qui s'avèrent instables, alors qu'elles avaient été conçues pour rester stables, ou qui restent provisoirement stables alors qu'elles devraient s'effondrer. Ce cas, qui a existé en Lorraine, doit absolument être évité à l'avenir :

- le développement des cavernes doit être contrôlé pendant toute la vie de la caverne. Les techniques permettant un tel contrôle, comme le sonar et le gamma-ray, sont disponibles ;
- les conditions conduisant à l'effondrement des cavernes en Lorraine sont encore insuffisamment comprises. Il faut tirer, de manière scientifique, tous les enseignements de l'expérience des entreprises qui ont opéré en Lorraine ;
- pour obtenir des cavités durablement stables, des

règles de dimensionnement doivent être établies. Les méthodes conduisant à de telles règles sont suggérées dans le cours du texte ;

- les prévisions de comportement à long terme formulées au moment de l'arrêt de la production de saumure doivent être vérifiées au moyen des observations effectuées pendant la période de surveillance de 20 à 30 ans qui suit ;
- les prévisions relatives au comportement sur le long terme doivent reposer sur une base scientifique solide. Des prévisions quantitatives sont possibles pour une période d'un siècle, dès lors que la période de surveillance de 20 à 30 ans a permis de vérifier que le comportement après l'abandon est conforme aux prévisions faites avant celui-ci. Des prévisions qualitatives peuvent être envisagées pour une période de quelques siècles après l'abandon.

✓ Un plan d'abandon, incluant la description des mesures topographiques, de température, de pression, de remplissage, de remédiation, etc., devrait être soumis aux autorités avant l'arrêt d'un champ de production de saumure. Ce plan doit spécifier les évolutions prévues des paramètres mesurés, afin de permettre une comparaison avec les évolutions ultérieurement observées.

✓ L'ennoyage délibéré est considéré comme la meilleure option dans le cas des mines sèches creusées dans du sel en dôme. Dans le cas du sel en couche, il faut conduire des études pour évaluer les conséquences de l'ennoyage sur la stabilité de la mine.

Bibliographie

Briggs P., Sanford K. (2000) - *The Ups and Downs of Post-Closure Subsidence Monitoring at the Tully Valley Brine Field*, New York. Proc. SMRI Tech. Class and Tech. Meeting, San Antonio, p. 57-74.

Buffet A. (1998) - *The collapse of the Compagnie des Salins SG4 and SG5 drillings*. Proc. SM RI Fall Meeting, Roma, p. 79-105.

Humbert B., Vouille G. (1999) - *Novacarb, Étude d'un schéma d'exploitation extensive comportant cinq pistes*.

Humbert B., Vouille G. Guillet 2001) - *Compagnie des Salins du Midi et des Salines de l'Est. Étude de l'exploitation du secteur de Gellenoncourt-Est par un réseau de cavités isolées*. R2001/5/ROC/MR.

Notes

(*) Cf l'encadré pour la composition du groupe des experts.

(**) Direction de l'action régionale et de la petite et moyenne industrie au ministère de l'Industrie, représentée par MM. Eugène Trombone et Paul Cattaert.