

INCIDENCES DU COMPORTEMENT MECANIQUE ET DES PROCESSUS DE TRANSPORT SUR L'EVOLUTION A LONG TERME DES SITES D'EXPLOITATION DE SEL

GHOREYCHI Mehdi, DAUPLEY Xavier, BAUJARD Clément

INERIS - Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques, Parc Technologique ALATA, B.P. 2, 60550 Verneuil-en-Halatte, www.ineris.fr, Mehdi.Ghoreychi@ineris.fr, Xavier.Daupley@ineris.fr.

RESUME : En passant en revue les gisements de sel en France, les différentes techniques d'exploitation minière ou par dissolution sont présentées. Les principaux traits du comportement mécanique et les processus de transport de sel sont ensuite analysés dans le contexte de l'évolution à long terme des sites d'exploitation de sel abandonnés.

MOTS-CLEFS : exploitation, mécanique, transport, sel, dissolution

ABSTRACT : After a review of salt deposits in France, different mining or solution mining techniques are presented. Basic features of mechanical behaviour and transport processes of salt are then analysed in the context of long term evolution of abandoned exploitations of salt.

KEY-WORDS : exploitation, mechanical, transport, salt, solution

1. Introduction

Après une période d'exploitation intense de sel, notamment au cours des deux derniers siècles, la France, comme certains autres pays européens, est confrontée aux problèmes posés par la fermeture progressive de ces exploitations. On s'interroge sur l'évolution à long terme des sites concernés, d'un point de vue de la stabilité de surface du sol mais aussi de l'impact sur les eaux souterraines. En effet, un volume important de sel fut exploité et continue de l'être, en particulier par dissolution (la production annuelle de sel extrait du sous-sol en France est de l'ordre de 6,3 Mt (1993-98, source Comité des Salines de France) dont 90% environ proviennent de la dissolution ; ceci équivaut à la création de près de 3 millions de m³ de cavités chaque année). Dans bien des cas, peu de renseignements fiables sont disponibles sur la localisation, l'extension et l'état des cavités, réalisées notamment dans le passé. De plus, certains sites d'exploitation de sel se trouvent dans des contextes géologiques et hydrogéologiques spécifiques qui soulèvent la question de la dissolution à long terme (plus ou moins importante) de sel et les risques liés au transport et à la stabilité mécanique de la surface du sol.

On conçoit l'importance qu'il convient d'accorder à l'étude de l'évolution à long terme des sites d'exploitation abandonnée de sel. La présente communication s'inscrit dans ce contexte et vise en particulier les exploitations de sel en France. La première partie est consacrée à une présentation synthétique des gisements et des exploitations de sel. Ce travail est motivé par l'importance des contextes géologique et d'exploitation pour l'analyse de l'évolution à long terme des sites. Il se justifie également par le fait que les renseignements sur ces aspects sont dispersés dans la littérature mais ne sont, à notre connaissance, pas rassemblés dans un document synthétique. La deuxième partie de la communication porte sur les spécificités du sel de deux points de vues : le comportement mécanique et les processus de transport. Nous verrons comment ces aspects interviennent dans l'évolution à long terme des sites d'exploitations de sel.

2. Contexte des exploitations de sel en France

2.1. Gisements

Les gisements de sel français ont fait l'objet depuis deux siècles de nombreux travaux de reconnaissance localisés dans un premier temps là où l'existence de sel était connue par des sources salées (Lorraine, Jura, Sud-Ouest). Les exploitants de sel ou de potasse puis les pétroliers ont contribué depuis, par la réalisation de nombreux forages, à l'établissement d'une cartographie exhaustive des gisements de sel (fig. 1). Ils se localisent essentiellement dans l'Est de la France (Alsace, Lorraine), dans la Bresse et le Jura, la Drôme, le sud du fossé rhodanien et le Sud-Ouest.

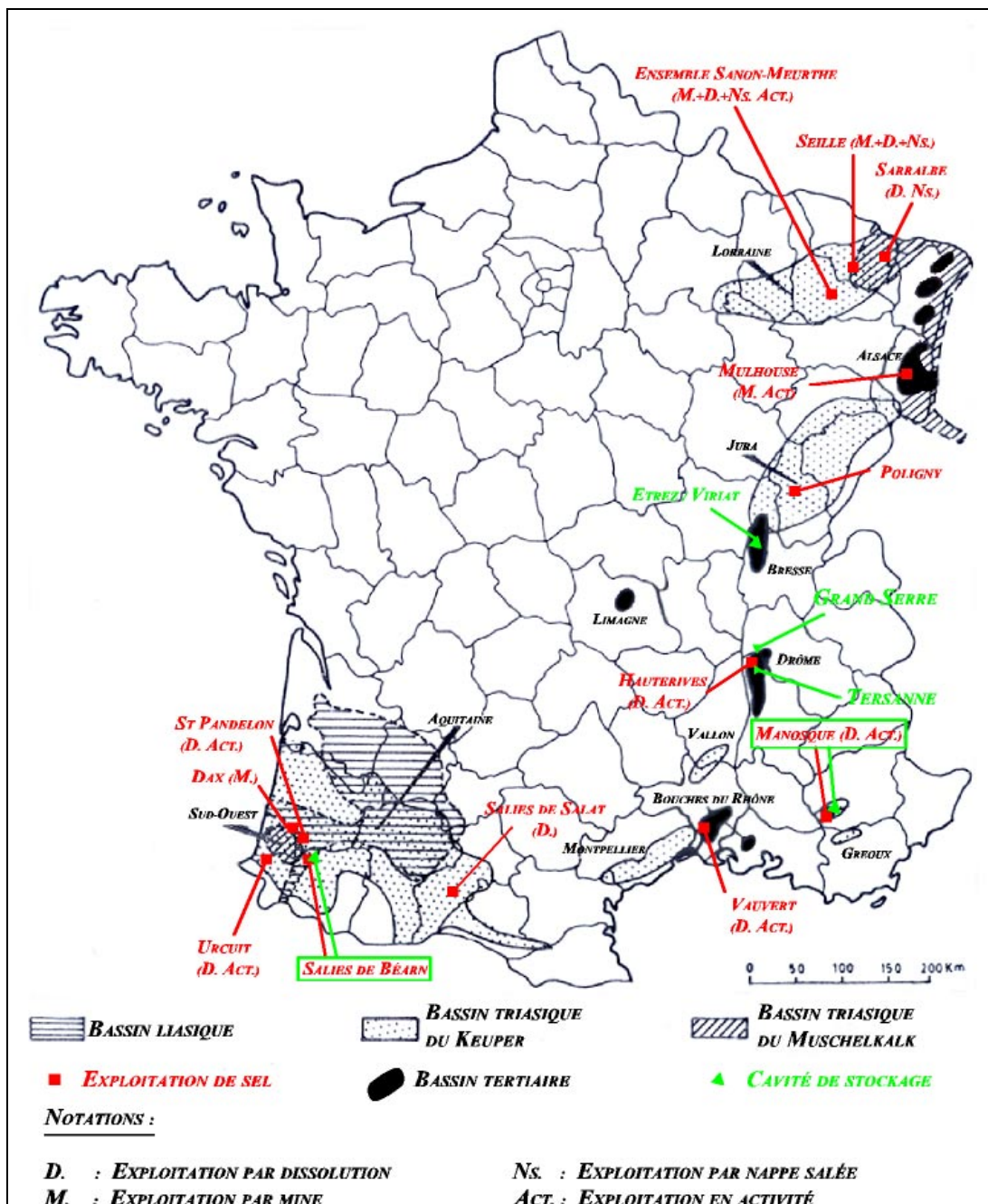


Figure 1 : Localisation des gisements de sel et des sites d'exploitation en France (complété à partir de Meriaux et Ganna, 1980)

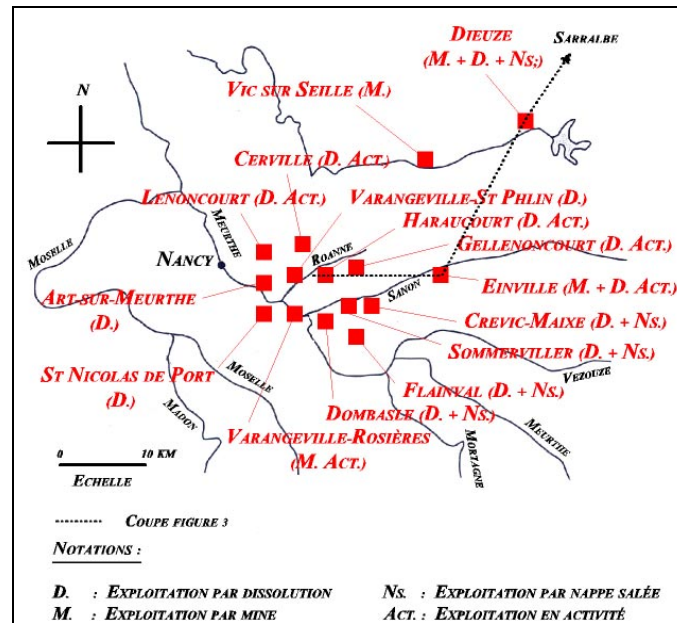


Figure 2 : Localisation des exploitations du gisement du Keuper en Lorraine (complété à partir de Marchal et al, 1994)

Les gisements du Trias (fig. 1, 2 et 3)

Il s'agit de dépôts sédimentaires organisés en couches, subhorizontales (Lorraine), tectonisées (Jura) ou encore affectées localement de déformations diapiriques (Dax, par exemple). Ils appartiennent, pour les plus anciens, au Muschelkalk (Sarralbe en Lorraine) et, pour l'essentiel, au Keuper.

On les rencontre à des profondeurs allant de quelques dizaines de mètres (Dax, Dieuze) jusqu'à 300m environ (Nancy). Leur épaisseur est variable, de l'ordre d'une centaine de mètres pour le gisement keupérien à Nancy à une vingtaine de mètres pour le Muschelkalk de Sarralbe. Ils sont constitués d'alternances de niveaux de sel primaire plus ou moins riches en halite et d'intercalations marno-anhydritiques dont la continuité est souvent remarquable à l'échelle d'un gisement.

Les terrains situés au toit et au mur de ces dépôts sont souvent constitués de niveaux marneux et marno-anhydritiques imperméables isolant hydrauliquement le gisement des aquifères sous et sus-jacents. Il en résulte, la plupart du temps, une conservation du gisement en l'état au cours des temps géologiques. Toutefois, localement, les gisements ont pu être affectés de dissolutions naturelles à l'origine de l'apparition d'une nappe d'eau salée au toit du gisement et de la disparition associée de tout ou partie du gisement. L'existence d'un faible recouvrement associée à la présence de discontinuités mettant en communication le gisement avec des aquifères dans le recouvrement semblent être les facteurs principaux de l'apparition de ce phénomène. Le cas de la nappe salée de Dombasle en Lorraine en est un bon exemple (Combes et al, 1984).

L'existence d'aquifères exploités est variable selon les gisements. En Lorraine, par exemple, les Grès du Trias inférieur situés sous les gisements du Keuper et du Muschelkalk constituent un aquifère régional, initialement artésien, largement exploité. Dans les terrains de recouvrement de ces gisements, certains niveaux, comme les grès du Rhétien, sont localement exploités. A Sarralbe, il n'existe pas d'aquifère exploité dans les terrains de recouvrement.

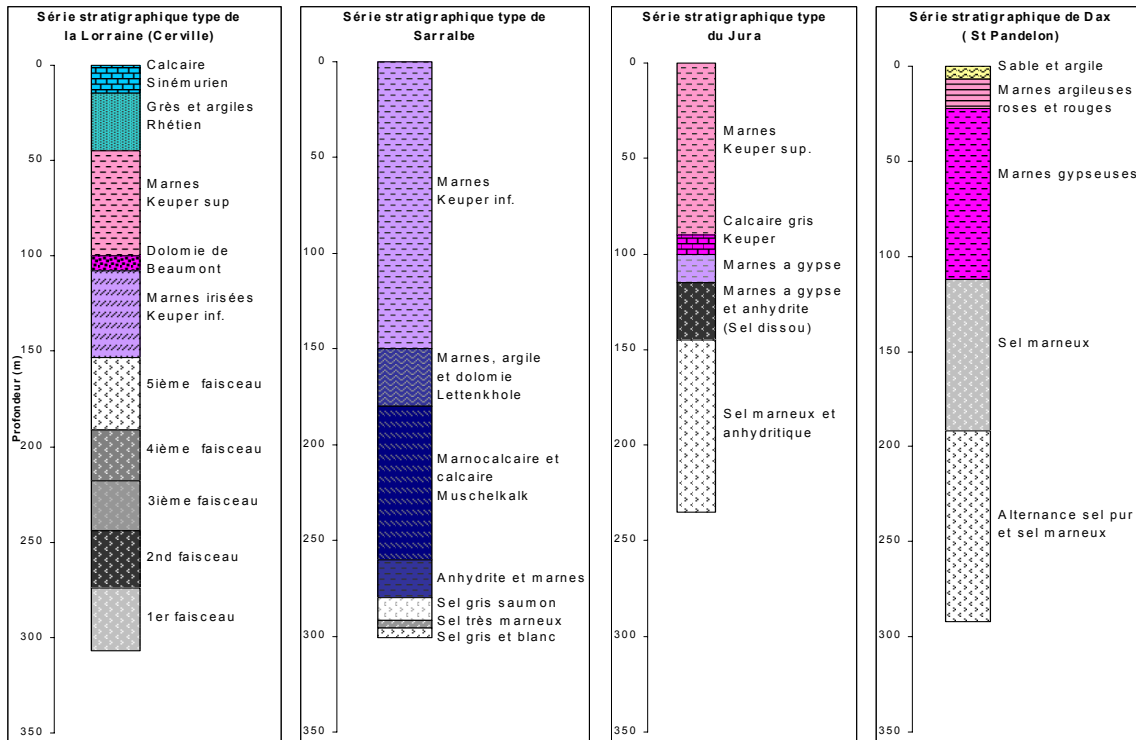


Figure 3 : Séries lithostratigraphiques types des gisements exploités du Trias (d'après Marchal, 1987 ; Banque Nationale du Sous-Sol)

La coupe présentée en figure 3 passant par les zones principales d'exploitation des gisements de sel en Lorraine (Haraucourt, Einville, Dieuze et Sarralbe, voir fig. 2) permet d'illustrer les variations notables du contexte géologique à l'échelle de cette région. On note en particulier la réduction de l'épaisseur du gisement du Keuper lorsque le recouvrement diminue, allant jusqu'à sa disparition totale à Sarralbe. Les nappes salées naturelles connues sont également localisées. On remarque également la position du banc de dolomie de Beaumont, présent à Haraucourt et Einville et absent à Dieuze et à Sarralbe, dont les caractéristiques mécaniques a priori élevées sont à l'origine, selon les modes d'exploitation mis en œuvre, de l'apparition d'effondrements brutaux en surface ou au contraire de la stabilité des cavités du moins, pendant la période d'exploitation.

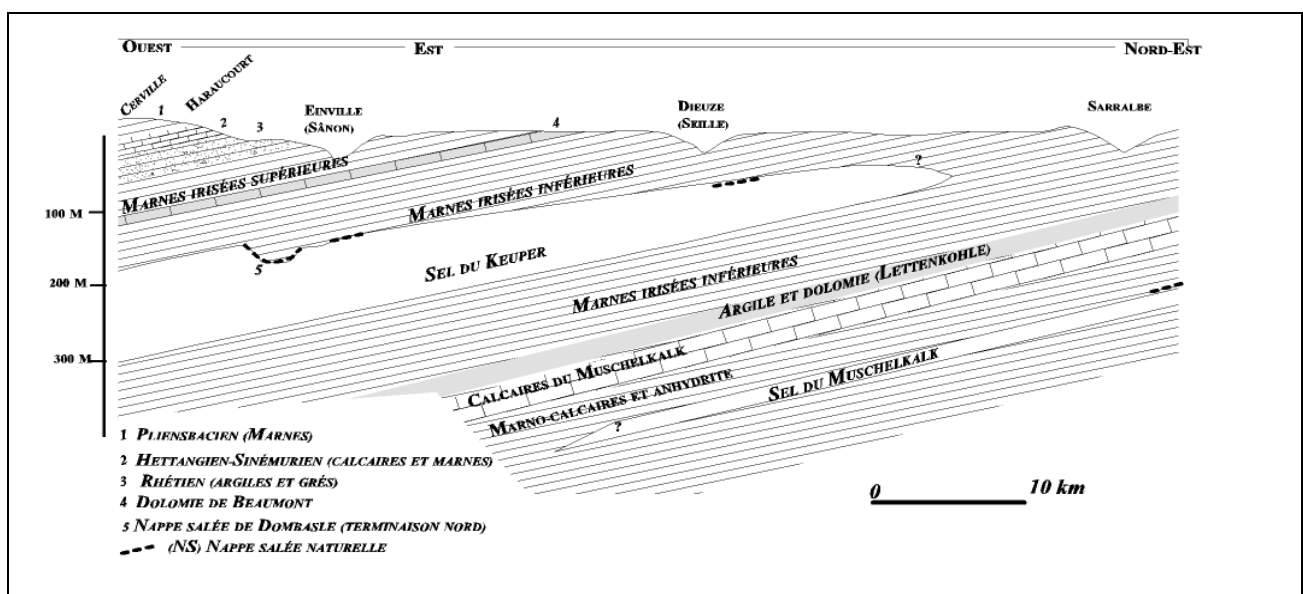


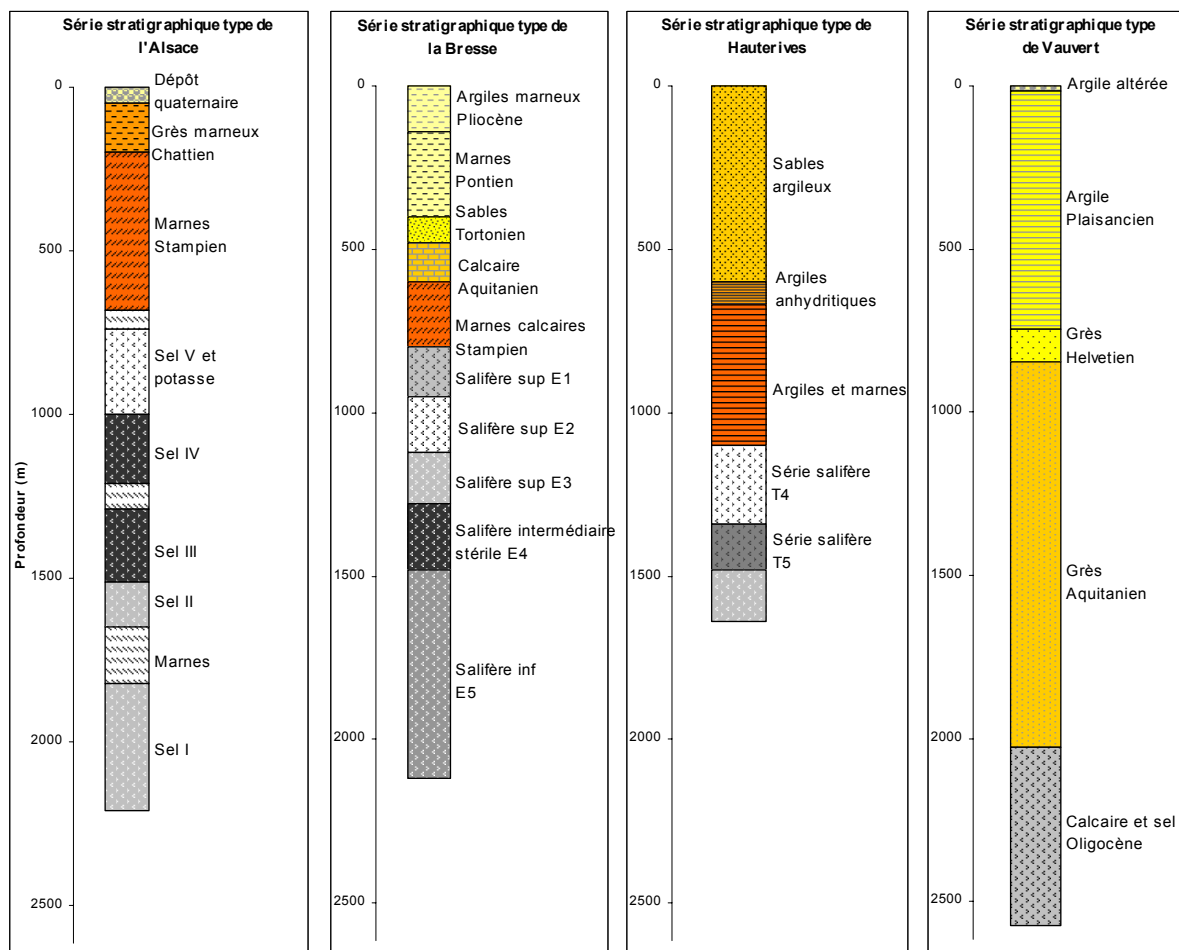
Figure 4 : Coupe géologique schématique des gisements de sel lorrains passant par les principales zones d'exploitation

Les gisements du Tertiaire (fig.3)

Ils appartiennent tous à l’Eocène et à l’Oligocène. Ils s’organisent en dépôts très épais (souvent supérieurs à 1000 m) à des profondeurs importantes de 500 à 2000 m. Il s’agit souvent d’un sel très pur parfois dissous et recristallisé dans une matrice de boue argilo-carbonatée (sel phénoblastique d’Etrez). Le bassin de Mulhouse a la particularité de renfermer, dans une puissante série salifère, deux couches de sylvinite (mélange de halite et de sylvite), de 4 et 1,5 m d’épaisseur, séparées par des intercalaires d’une vingtaine de mètres d’épaisseur. Ces deux couches sont à l’origine de l’exploitation du gisement depuis le début du XX^{ème} siècle, le sel gemme, dans ce cas, n’étant qu’un sous-produit.

On retrouve, comme pour les gisements du Trias, le cortège sédimentaire habituel au toit des formations salifères, marnes et anhydrites au toit immédiat du gisement mais avec toutefois des épaisseurs nettement plus importantes apportant, a priori, un confinement hydraulique supplémentaire. A titre d’exemple, le gisement de la Bresse possède près de 250 m de terrains marneux essentiellement entre le toit du sel et l’aquifère principal du Tortonien (Berest et al, 1984).

Les gisements du Lias (fig.1), très répandus dans le Sud-Ouest, ne sont cités ici que pour mémoire. Ils semblent qu’ils n’aient jamais été exploités.



Pour les niveaux salifères, plus la texture de remplissage est claire, plus le gisement est riche en sel

Figure 5 : Série lithostratigraphiques types des gisements du Tertiaire (synthétisées d’après Blanc-Valleron, 1990 ; George et Laporte, 1976 ; Moretto, 1987 ; Banque Nationale du Sous-Sol)

2.2. Exploitations

L'exploitation du sel a débuté bien avant l'ère industrielle, depuis l'époque gallo-romaine, par l'exploitation des sources salées dont subsistent de nos jours les vestiges historiques les plus récents (puits salés des anciennes salines royales, Dieuze en Lorraine, Arc-et-Senans dans le Jura ...).

La découverte des gisements de sel par sondages au début du XIX^{ème} siècle marque le début de l'exploitation industrielle du sel et par la suite le développement de différentes techniques minières d'extraction. On regroupe les méthodes d'exploitation en deux ensembles :

Mine souterraine

Il s'agit de la première méthode d'exploitation rationnelle du sel mise en œuvre dès le début du XIX^{ème} siècle, d'abord en Lorraine dans la vallée de la Seille (Vic-sur-Seille, Dieuze) puis à Varangéville et Einville dans la vallée du Sânon. Ces mines souterraines, dont celle de Varangéville est la seule encore en activité, ont été exploitées par la méthode des *chambres et piliers abandonnés* entre 100 et 200 m de profondeur laissant au toit de l'exploitation une partie importante du gisement (sel et intercalaires marneux) sur une épaisseur de 50 à 70 m environ. Il est notable que les premières exploitations de Vic et Dieuze ont dû être abandonnées suite à leur invasion par l'eau.

On recense également une exploitation par chambres et piliers abandonnés de très petites dimensions à Dax. Celle-ci a la particularité de se situer à très faible profondeur (\cong 30 m). Elle a été abandonnée suite à des éboulements successifs en 1883 après seulement 10 ans d'exploitation.

L'autre méthode d'exploitation par mine souterraine est celle mise en œuvre aux Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) par longue taille avec foudroyage du toit pour exploiter les deux couches de sylvinite s'intercalant dans le gisement de sel. Il s'agit du seul cas d'exploitation par longue taille dans un gisement salifère en France. Cette méthode a succédé à celle des chambres et piliers abandonnés pratiquée dans le passé dans la mine Amélie.

Pendant les années 1990, l'extraction du sel (hors sylvinite) par mine souterraine ne représentait que 10 % (700 000 t) de la production totale de sel en souterrain dont 4 % provenaient de la mine de Varangéville et 6 % des MDPA en tant que sous-produit de l'exploitation de la sylvinite.

Dissolution

Actuellement, l'extraction de sel par dissolution génère chaque année environ 2,7 millions de mètres cubes de cavité. Cette méthode étant utilisée, par endroit, depuis plus d'un siècle, elle a généré dans le sous-sol d'importants vides répartis sur des sites d'exploitations relativement peu étendus comparés à certains grands bassins miniers français (charbon, fer).

Initialement, les nappes salées naturelles étaient exploitées par pompages (Sarralbe, Dombasle). Dans ce cas, la dissolution pouvait s'opérer sur de très grandes superficies parfois très éloignées des zones de pompages.

Les gisements de sel ont ensuite été exploités par dissolution forcée par l'introduction d'eau douce dans des sondages foncés jusqu'au gisement de sel. Dans un premier temps, les sondages n'atteignaient que le toit du sel. La dissolution se développait alors préférentiellement latéralement au toit du sel conduisant à la création de cavités parfois très étendues et dont l'extension était souvent mal contrôlée par les exploitants.

Les méthodes plus récentes d'exploitation, toujours d'actualité, sont les suivantes :

- dans les gisements peu profonds (Lorraine, Jura, Sud-Ouest), le sel est exploité depuis sa base. Des cavités isolées ou communicantes sont créées. Les communications s'établissent soit par hydrofracturation, soit par dissolution progressive. Elles se développent ensuite latéralement et verticalement jusqu'à une taille critique, avec un banc de sel laissé au toit lorsque la stabilité de

la surface est recherchée ou jusqu'au toit du gisement de sel, lorsque la fermeture des cavités est recherchée. Cette dernière méthode conduit, selon les contextes géologiques à l'apparition en surface soit d'effondrements soit d'affaissements. L'existence ou non d'un banc raide dans le recouvrement tel que celui de la dolomie de Beaumont en Lorraine joue en effet un rôle a priori important sur l'apparition en surface d'effets de type effondrement ou affaissement ;

- pour les gisements profonds (Hauterives, Vauvert), l'exploitation consiste à dissoudre le sel entre deux sondages préalablement mis en communication. Des cavités isolées de grandes dimensions (100 à 200 m de hauteur à Hauterives) sont créées dans le gisement.

Les cavités lessivées pour le stockage de produits pétroliers, notamment celle de Gaz de France à Etrez ne sont citées ici que pour mémoire. On notera que certaines cavités réalisées dans les gisements du Tertiaire pour l'exploitation du sel ont été reconverties pour le stockage (Hauterive).

Tableau 1 : sites d'exploitation du sel en France

Lieu	Gisement (profondeur toit/mur)	Exploitation	Dates
Lorraine /Meurthe-Sânon	Trias-Keuper (150/300 m)	Mine (chambres et piliers abandonnés), dissolution, nappe salée.	Milieu XIXe – Mine et dissolution en activité
Lorraine/Seille	Trias-Keuper (55/110 m)	Puits salé (avant 1826) Mine (1826-1864) Dissolution et nappe salée (1885-1973)	1826-1973
Lorraine/Sarralbe	Trias-Mushelkalk (280/300)	Nappe salée et dissolution	1827-1983
Jura	Trias-Keuper (120/240 m)	Dissolution	En activité
Sud-Ouest (4)	Trias (100/250 m)	Dissolution, mine (stockage de produits pétroliers)	1825-en activité
Alsace	Tertiaire – Eocène (1000/2800 m)	Mine par chambres et piliers abandonnés puis longue taille	Depuis 1910
Bresse	Tertiaire – Eocène (800/2000 m)	Stockage de produits pétroliers	Actuel
Sud-Est (5)	Tertiaire – Eocène (1100/1600 ou 2000/2500 m)	Dissolution pour Vauvert et Hauterives, (stockage de produits pétroliers pour Tersannes, Manosque et Hauterives)	1965-en activité

2.3. Récapitulatif des principales caractéristiques des gisements et exploitations

L'analyse des différents contextes des exploitations de sel en France met en évidence des variations notables concernant :

- 1- *la géologie* : les contextes sont variés, aussi bien par la nature des terrains de recouvrement (présence ou non de bancs raides dans le recouvrement de type anhydrite ou dolomie de Beaumont ...) que par la profondeur des gisements (30 à 2000 m) et leur épaisseur (20 à plus de 1000 m). L'évolution des cavités, que ce soit pendant la période d'exploitation ou à long terme, peut se traduire selon les contextes géologiques par l'apparition d'affaissements ou d'effondrements en surface ;

- 2- *l'hydrogéologie* : certains sites d'exploitation présentent, dans les terrains sous-jacents et/ou de recouvrement du gisement, des aquifères exploités, parfois régionalement (Grès vosgiens en Lorraine) qui pourraient sous certaines conditions interagir avec le sel et occasionner, potentiellement, des dissolutions supplémentaires et le transport du sel ;
- 3- *les nappes salées* : il existe localement, au toit des gisements de sel, des nappes salées témoignant d'une dissolution active. Ces nappes, localement bien connues (Dombasle) ont, été exploitées dans le passé ;
- 4- *les méthodes d'exploitations* : on rencontre différentes méthodes d'exploitation minières (chambres et piliers abandonnés, longue taille) et de dissolution (au toit, au mur, par piste) dont certaines ont déjà conduit à un effondrement volontaire du toit. D'autres ont été dimensionnées pour rester stables, du moins pendant l'exploitation.

Compte tenu de ces éléments, on peut s'interroger sur la stabilité à long terme et le risque d'une dissolution de sel, après l'abandon de certaines exploitations. Ces questions doivent être étudiées en considérant le comportement mécanique spécifique et les processus de transport de sel. C'est l'objet des paragraphes qui suivent.

3. Principaux traits du comportement mécanique du sel

Les principaux traits du comportement rhéologique du sel sont les mêmes quelle que soit la variété considérée. Ils se résument ainsi (Langer, 1981 ; Vouille, 1981 ; Munson & Dawson, 1982 ; Ghoreychi, 1990 ; Carter, 1991) :

- 1- une aptitude au fluage plus ou plus importante. Elle se traduit par des déformations irréversibles (viscoplasticité) qui se manifestent sous contrainte déviatorique et ne dépendent pratiquement pas de la contrainte moyenne ;
- 2- le seuil de déclenchement du comportement différé est pratiquement nul. Ce phénomène se traduit par l'absence de tout seuil de viscoplasticité dans les modèles rhéologiques utilisés pour le sel. Cela a deux conséquences majeures pour les massifs salifères et les ouvrages réalisés en leur sein :
 - a- tout déviateur de contraintes dans le sel se relaxe entièrement dans le temps, ce qui signifie que le seul état de contraintes naturelles admissible dans le sel (massif vierge, loin des cavités) est un état isotrope ; un état déviatorique n'est pas compatible avec l'échelle du temps géologique ;
 - b- toute cavité creusée dans le sel est condamnée à se fermer entièrement dans le temps (sur une période dépendant de la profondeur), à moins que la convergence de la paroi puisse être arrêtée par une pression très élevée pouvant atteindre, à terme, la contrainte isotrope régnant initialement dans le massif. Cela signifie que la convergence de la paroi des ouvrages réalisés dans le sel ne peut être arrêtée par un soutènement habituel qui encaisserait, à terme, une pression trop élevée (poussée de terre) entraînant sa rupture. La convergence peut cependant être ralentie dans le temps, dans la mesure où le déviateur décroît lorsqu'une pression est appliquée à la paroi ;
- 3- les vitesses des déformations différées croissent, d'une manière non linéaire, avec la contrainte déviatorique. Dans les modèles rhéologiques, cette dépendance est exprimée à l'aide d'une loi de puissance. L'exposant du déviateur est en général compris entre 3 et 6, selon la variété de sel. Il en

découle que, toutes choses identiques par ailleurs, la vitesse de convergence peut être multipliée par un facteur compris entre 8 et 64, si la profondeur de l'ouvrage est doublée ;

4- la vitesse de fluage croît également d'une façon non linéaire avec la température. Cette dépendance est exprimée par une loi exponentielle du type Arrhenius (fréquemment utilisée en thermodynamique). A titre indicatif, la vitesse de fluage augmente d'un ou de deux ordres de grandeur (selon le sel), si la température passe de 20° à 100°C. Cette grande sensibilité tient, en particulier, au fait que le point de fusion du sel n'est que de 801°C, nettement plus faible que la plupart des roches ;

5- le fluage de sel est accéléré par suite d'une fissuration (d'où le fluage dit « tertiaire » observé au laboratoire qui conduit à la ruine de l'échantillon) ;

6- le fluage de sel est accéléré en présence de l'humidité et de la saumure ;

7- au-delà d'un certain seuil de sollicitation, le sel devient fissuré. A la différence de la viscoplasticité, le seuil d'endommagement de sel dépend aussi bien de la contrainte moyenne que du déviateur (comme la plupart des roches). Le risque d'endommagement est d'autant plus important que le matériau est soumis à une faible contrainte moyenne : la roche est endommagée plus facilement à la paroi d'un ouvrage que loin de la paroi ;

8- les seuils d'endommagement (micro-fissuration) et de rupture macroscopique (résistance maximum) du sel diminuent en présence de la saumure. Tout se passe comme si le matériau perdait sa capacité à mobiliser son frottement interne (Thorel et al, 1996).

3.1. Conséquences du comportement mécanique du sel pour les exploitations souterraines

La stabilité mécanique et l'évolution dans le temps de tout ouvrage réalisé dans le sel doivent être étudiés de deux points de vues :

- l'analyse du risque d'endommagement ou de rupture du sel encaissant l'ouvrage. Il s'agit de vérifier dans quelle mesure les critères d'endommagement et de rupture du sel peuvent être atteints ;
- l'analyse de l'évolution de l'ouvrage dans le temps. Cela consiste à étudier le comportement à long terme de l'ouvrage, en particulier les vitesses de déformations et l'état de contraintes vers lesquels évoluent l'ouvrage.

Ce propos sera précisé à l'aide des exemples qui suivent.

Analyse du comportement des piliers d'une mine de sel

La figure 6 présente l'évolution de la contrainte verticale régnant, en moyenne, dans les piliers d'une exploitation par la méthode de chambres et piliers abandonnés. Nous considérons que l'hypothèse de l'aire tributaire est vérifiée (le poids du recouvrement est supporté exclusivement par les piliers). Ainsi, la contrainte verticale se déduit facilement du taux de défrètement et de la profondeur de l'exploitation.

Compte tenu des valeurs habituelles des caractéristiques mécaniques du sel, plusieurs domaines peuvent être identifiés sur ce diagramme. La transition entre deux états extrêmes « sain » et « évoluant vers la ruine » peut être repérée aisément en fonction de la profondeur et du taux de défrèvement.

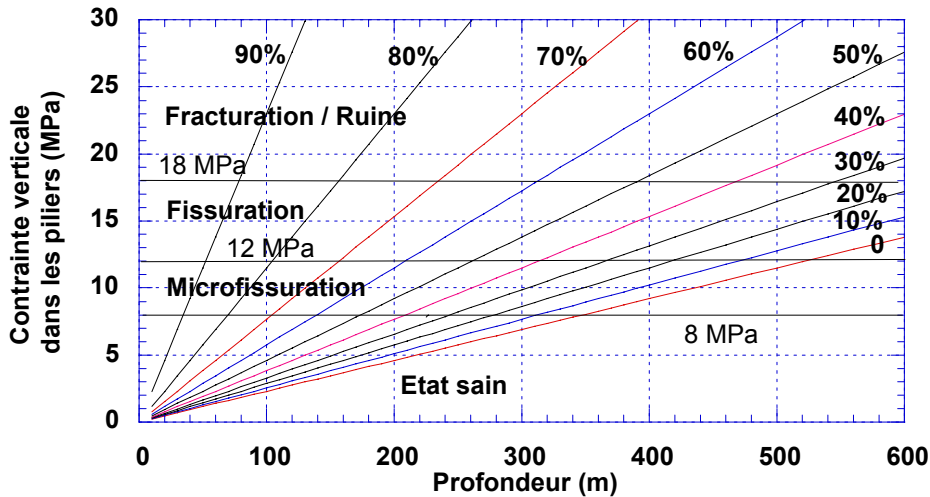


Figure 6 : Evaluation de la stabilité mécanique des piliers dans une exploitation de sel par la méthode de chambres et piliers abandonnés (hypothèse de l'aire tributaire)

Par ailleurs, la vitesse de la déformation longitudinale des piliers peut être estimée à partir de caractéristiques viscoplastiques du sel étudié. Un exemple est donné sur la figure 7 en prenant les résultats des essais de fluage réalisés, au laboratoire, sur le sel de la mine Amélie aux MDPa (Ghoreychi et al, 1993). Ces résultats correspondent aux essais dont la durée n'excède guère un mois. Leur généralisation et leur extrapolation à long terme à partir de la loi de comportement utilisée (loi de Norton, basée sur le maintien de la vitesse de fluage dans le temps) est donc délicate et doit être confirmée par des mesures in situ.

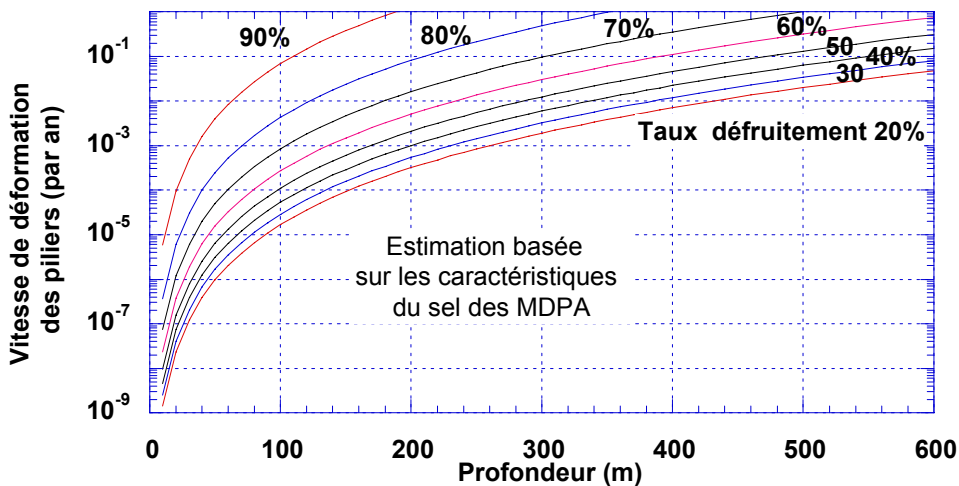


Figure 7 : Estimation de la vitesse de fluage des piliers à partir d'essais de laboratoire.

Largeur critique de cavités

Qu’il s’agisse d’une exploitation par chambres et piliers abandonnés ou d’une exploitation par dissolution, l’élargissement des chambres et des cavités conduit à une flexion croissante du toit. Le risque d’une instabilité apparaît lorsque la contrainte résultant de cette flexion dépasse la somme de la poussée horizontale des terrains frettant le toit et la résistance à la flexion de celui-ci (cette dernière est très faible ou négligeable à long terme).

Deux cas de figures peuvent se présenter :

- un banc raide existe au toit (par exemple, la dolomie de Beaumont en Lorraine). Le bas-toit s’en détache alors progressivement et se rompt sous son propre poids (figure 8) ;
- le recouvrement est constitué de bancs déformables qui pèsent, en partie ou intégralement, sur la dalle du toit immédiat des cavités. La largeur critique des cavités est alors plus faible que dans le cas précédent (figure 9).

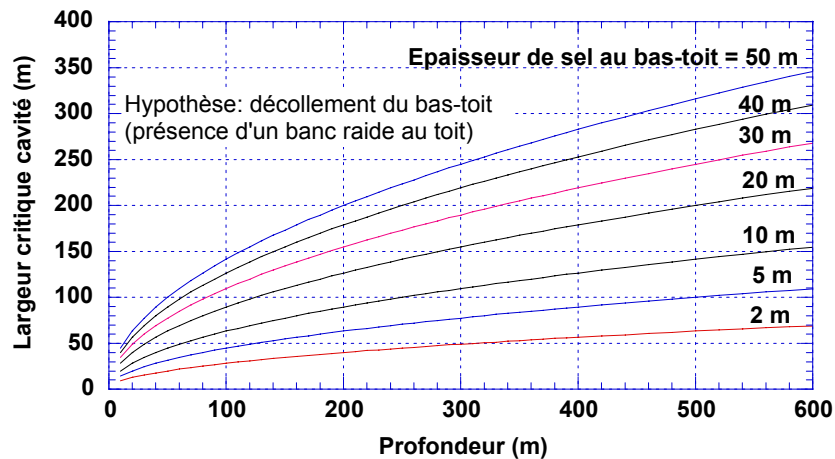


Figure 8 : Estimation de la largeur critique des cavités conduisant à la rupture du toit immédiat détaché d’un banc raide (toit assimilé à une poutre doublement encastree).

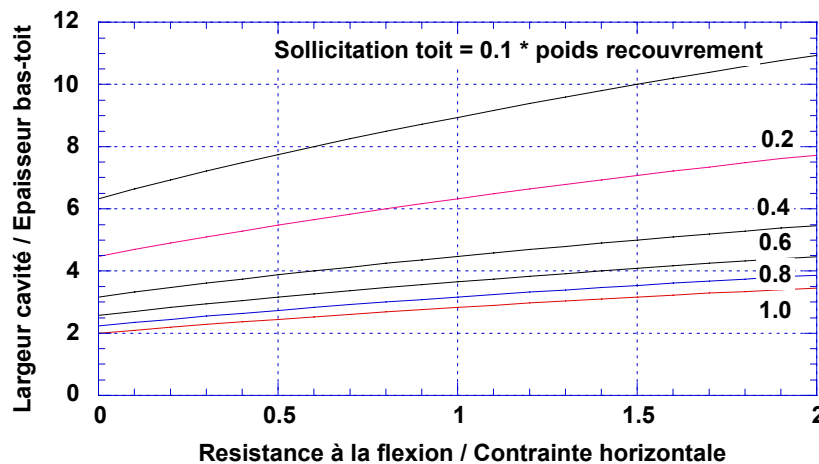


Figure 9- Evaluation de la stabilité du bas-toit soumis à une fraction ou à la totalité du poids du recouvrement (toit assimilé à une poutre doublement encastree).

4. Phénomènes de transport

Dans les exploitations de sel par dissolution, les cavités réalisées étant en principe remplies de saumure, on peut s'interroger sur le risque d'un transport à long terme du sel, au toit ou au mur, après l'abandon de ce type d'exploitation. Cette question peut être soulevée du fait de son incidence éventuelle sur deux aspects distincts de l'évolution à long terme du site :

- d'un point de vue de la stabilité mécanique à long terme de la surface du sol : on peut se demander si, dans l'hypothèse d'une dissolution progressive du sel, même lente, les cavités ne peuvent pas s'agrandir et entraîner une évolution de l'affaissement, voire une instabilité mécanique de la surface du sol ;
- sous l'angle d'une communication éventuelle entre les cavités et les aquifères : on peut s'interroger sur les conséquences d'un transport à long terme du sel pour la salinité des eaux souterraines.

Ces questions sont analysées à partir d'une discussion sur les mécanismes de transport des solutés.

4.1. Mécanismes de transport du sel et leur temps caractéristique

D'une manière générale, le transport du sel peut être opéré par le biais de trois mécanismes, plus ou moins importants pour tout soluté : la solution-précipitation (cinétique chimique), la dispersion (diffusion) et l'advection). Ces mécanismes apparaissent dans l'équation de conservation de la masse (soluté et solvant) :

$$\partial(\phi C) / \partial t = \text{div}[D \cdot \text{grad}(C) - C \cdot U] + \phi K_c(C - C_s)$$

C : concentration ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)

C_s : concentration à la saturation (liée à la pression et à la température)

t : temps

K_c : constante de cinétique contrôlant la vitesse de dissolution :

$$K_c = R_d A/V$$

R_d : constante de dissolution, voisine de $10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ pour un cristal de halite dans l'eau ;

A/V : surface spécifique de soluté par unité de volume de solution

(m^{-1}) ; pour un milieu poreux, $A/V = 0,1$ à $0,5$ selon la géométrie des pores (Lasaga, 1984)

U : vitesse d'écoulement

grad : opérateur gradient

D : dispersion

div : opérateur divergence

ϕ : porosité

L'importance relative des trois mécanismes de transport, cités ci-dessus, tient aux échelles de temps et d'espace considérées. Ces deux notions, intimement liées, apparaissent à travers une discussion sur les temps caractéristiques des différents processus (Cosenza & Ghoreychi, 1996) :

- le temps caractéristique de la solution-précipitation $\tau_c = 1/R_d \cdot V/A$;
- le temps caractéristique de l'advection $\tau_a = a \phi / U$; a : dimension caractéristique du problème ;

- le temps caractéristique de la diffusion de masse $\tau_d = a^2 \phi / (\phi d_0 + \alpha_d U)$ (de Marsily, 1988) ;
 - d_0 : coefficient de diffusion moléculaire ($d_0 = 1,3 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ pour le sel dans l'eau, à température ambiante, (de Marsily, 1981) ; ce paramètre est pris égal à $5 \cdot 10^{-9}$ dans certaines études).
 - α_d : coefficient de dispersion intrinsèque (inférieur à 0,01 m, pour un milieu poreux).

En l'absence d'un mouvement de fluide ($U=0$), $\tau_d = a^2/d_0$, ce qui peut conduire, pour des faibles valeurs de dimension caractéristique (a), à des temps caractéristiques particulièrement élevés, de plusieurs dizaines de siècles, compte tenu de la très faible valeur de la diffusivité d_0 .

Afin d'identifier le mode de transport prépondérant pour une période donnée, on se base communément sur les rapports des différents temps caractéristiques. On obtient ainsi les nombres sans dimension appelés « Peclet ». Le plus connu est celui donné par $Pe = \tau_d/\tau_c = a \cdot U / (\phi d_0 + \alpha_d \cdot U)$ soit approximativement $Pe = a \cdot U / (10^{-9} + 10^{-2} U)$. Deux cas extrêmes sont envisageables :

- $Pe \gg 1$: l'advection est prépondérante (son temps caractéristique est plus petit que celui de la dispersion) ;
- $Pe \ll 1$: la dispersion est dominante.

La transition ($Pe = 1$) se fait pour $U = 1 / (10^9 a - 10^7)$ soit $U = 10^{-9}/a$ dans la plupart des cas où on se place à une distance (a) plurimétrique de la cavité. On voit que le passage d'un mode de transport à l'autre dépend du couple de valeurs vitesse d'écoulement (U) et distance considérée (a). A une distance donnée de la cavité, il existe une valeur seuil de vitesse au-delà de laquelle l'advection devient nécessairement le mode de transport dominant. Ce seuil est d'autant plus faible que l'on s'écarte de la cavité. Par exemple, au-delà d'une distance de 10 m de la cavité, le transport par dispersion devient négligeable devant le transport advectif si la vitesse d'écoulement est supérieure à 10^{-10} m/s. Cette condition peut être satisfaite, par exemple, en présence d'un faible gradient hydraulique de 10^{-3} (1 m/1 km) et d'une faible perméabilité de terrains de 10^{-7} m/s. Pour des terrains à plus forte perméabilité (à l'échelle de la matrice ou à l'échelle de la fracturation naturelle ou induite par l'exploitation), l'absence de tout risque de transport advectif de sel implique des gradients hydrauliques pratiquement négligeables.

5. Conclusion

La prise en compte de la sécurité des personnes et des biens et de la protection de l'environnement dans les sites d'exploitations abandonnées de sel doit s'appuyer sur trois types de considérations :

- 1- le contexte géologique, hydrogéologique et tectonique de chaque site (nature et épaisseur du recouvrement de sel (bancs raides, terrains imperméables, etc.), discontinuités, aquifères...) ;
- 2- les caractéristiques de l'exploitation (méthode, profondeur, dimensions de cavités, présence ou non d'un banc épais de sel laissé au toit) ;
- 3- les spécificités du sel (fluage, endommagement, solubilité).

L'analyse présentée soulève la nécessité de mettre au point une méthodologie spécifique pour l'étude de fermeture et de post-fermeture des exploitations de sel. Les principaux phénomènes à intégrer apparaissent à travers cette analyse et sont pris en compte dans les études en cours.

6. Bibliographie

- Berest P., Ghoreychi M. *Rock Salt Solution, The concept of overburden*. 2nd Conf. on Salt, Hanovre (Allemagne), Proc. Trans Tech Publication, 1984.
- Berest P., Ghoreychi M. Geoltrain S. *Risques liés à la dissolution du sel gemme : la notion de « couverture » appliquée à l'analyse d'un gisement*. C.R. de la journée sur sel, 1^{er} mars, L.M.S., Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1984.
- Blanc-Valleron M.M. Les formations paléogènes évaporitiques du bassin potassique de Mulhouse et des bassins plus septentrionaux d'Alsace. Thèse Docteur ès Sciences Naturelles, Université Louis Pasteur, Strasbourg, 1990.
- Bonvallet J. *Historique de l'exploitation du sel gemme en Lorraine*. Société d'Histoire Naturelle de la Moselle, 43^e Cahier, 41-79, 1981.
- Carter N.L., Hansen F.D. *Creep of rocksalt*. Tectonophysics. vol. 92, 275-333, 1991.
- Combes P., Ledoux E., de Marsily G. *Etude des dissolutions de sel en couche*. C.R. de la journée sur sel, 1^{er} mars, L.M.S., Ecole Polytechnique, Palaiseau, 1984.
- Cosenza P., Ghoreychi M. *Coupling between mechanical behavior and transfer phenomena in salt*. 3rd Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Ecole Polytechnique, France, Trans Tech Publications, 14-16 septembre 1993, Trans Tech Publications, Ghoreychi et al (eds), 285-307, 1996.
- Cosenza P., Ghoreychi M. *Evolution de la perméabilité du sel sous sollicitations mécano-chimiques*. Bull. Société Géologique de France, t ,168, n° 3, 313-324, 1997.
- Cosenza P., Ghoreychi M. , Su K. *Modeling of chemico-mechanical coupled effects in halitic porous media*. Biot conference on Poromechanics, Louvain la Neuve, Belgium, September 14-16, 1997, AA. Balkema, Rotterdam, ISBN 9058090035, Thimus et al (eds), 385-390, 1998.
- Cosenza P., Ghoreychi M. *Effect of fluid-rock interaction on mechanical behavior of rock salt*. 5th Conf. Mechanical Behavior of Salt, Bucharest (Romania), August 9-11, Proc. "Basic & Applied Salt Mechanics", Cristecu et al (eds), AA. Balkema, 57-72, 1999.
- Fries G., Berest P., Beaudoin B. *Eléments d'un inventaire des gisements de sel français*. Annales des mines, 39-46, 1983.
- George B., Laporte P. *Exploitation de sel par dissolution à Hauterives (France)*. Rev. Industrie minérale – Mine, 219-226, 1976.
- Ghoreychi M. *Synthèse des études thermomécaniques sur le Sel*. Document édité par G.3S, Ecole Polytechnique à l'occasion du Conseil Scientifique de G.3S, 1993.
- Ghoreychi M., Berest, Hardy H.R.Jr., Langer M. *The Mechanical Behavior of Salt*. Proc. the Third Conference, Trans Tech Publisher, Germany, ISBN 0-87849-1000-7, 1996.
- Ghoreychi M. *Conséquences du comportement thermomécanique du sel pour la conception et la sûreté d'un enfouissement de déchets radioactifs*. Stockage en Souterrain, Presses des Ponts et Chaussées, 229-243, 1990.
- Marchal C. *Géométrie du gîte évaporitique keupérien de la Lorraine-Champagne. Application à la reconnaissance de l'évolution paléogéographique du bassin de sédimentation*. Sci. Terre, mém. 44, 1987.

- Marchal P., Oger R., Plaid C., Romac M., Wéber A. *La mémoire du sel au Pays du Sânon*. Les Foyers Ruraux « Au Pays du Sânon », 1994.
- de Marsily G. *Quelques considérations pratiques pour la modélisation des flux thermiques et hydrauliques dans les milieux naturels*. La thermomécanique des roches, Ed. BRGM, n° 16, 1988
- de Marsily G. *Hydrogéologie quantitative*, Ed. Masson, 1981.
- Meriaux M., Gannat E. *Connaissances actuelles sur la potasse en France*. Annales des Mines, 167-175, 1980.
- Moretto R. *Etude sédimentologique et géochimique des dépôts de la série salifère paléogène du bassin de Bourg-en-Bresse (France)*. Sci. Terre, mém. 50, 1987.
- Munson D.E., Dawson P.R. *A work hardening/recovery model of transient creep of salt during loading and unloading*. Proc 23rd US Symp. Rock Mech. 299-307, 1982.
- Langer M. *The rheological behavior of rock salt*. Proc. First Conf. Mech. Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Germany, 201-240, 1981.
- Lasaga A.C. *Chemical kinetics of water-rock interaction*. Journal of Geophysical Research, Vol. 89, n° B6, 4009-4025, 1984.
- Lemaître J., Chaboche J.L. *Mécanique des matériaux solides*. Dunod, Paris, 1988.
- Spiers C.J., Peach C.J. *Development of dilatancy and permeability in rocks during creep: experiments on rock salt as rock analog*. Int. Geol. Congr., Washington D.C., vol. 3, 162-173, 1989.
- Stokes R.J. *Mechanical properties of polycrystalline NaCl*. Int. Geol. Congr., Proc. British Ceramic Society, vol 8-6, 189-207, 1989.
- Thorel L., Ghoreychi M. *Plasticité et endommagement du sel gemme*. Revue Française de Géotechnique, n° 77, 4^{ème} trimestre, 1996.
- Thorel L., Ghoreychi M., Cosenza P., Chanchole S. *Damage and failure of Salt Rock under dry or wet conditions*. 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Montréal (Canada), 1996.
- Thorel L., Pouya A., Ghoreychi M. *Modélisation micro-macro auto-cohérente du comportement du sel gemme : comparaison avec l'expérience de laboratoire*. 31^{ème} Colloque du Groupe Français de Rhéologie Metz, 1996.
- Vouille G., Tijani M., de Grenier F. *Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt*. Proc. the First Conf. On "the Mechanical Behaviour of Salt", Pennsylvania State University, 1981.