

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-10-108130-04240A

02/04/2010

**Analyse critique des études
géomécaniques du stockage de
Stocamine**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Analyse critique des études géomécaniques du stockage de Stocamine

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

StocaMine

PREAMBULE

Le présent rapport a été établi sur la base des informations fournies à l'INERIS, des données (scientifiques ou techniques) disponibles et objectives et de la réglementation en vigueur.

La responsabilité de l'INERIS ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient portés par l'INERIS dans le cadre des prestations qui lui sont confiées, peuvent aider à la prise de décision. Etant donné la mission qui incombe à l'INERIS de par son décret de création, l'INERIS n'intervient pas dans la prise de décision proprement dite. La responsabilité de l'INERIS ne peut donc se substituer à celle du décideur.

Le destinataire utilisera les résultats inclus dans le présent rapport intégralement ou sinon de manière objective. Son utilisation sous forme d'extraits ou de notes de synthèse sera faite sous la seule et entière responsabilité du destinataire. Il en est de même pour toute modification qui y serait apportée.

L'INERIS dégage toute responsabilité pour chaque utilisation du rapport en dehors de la destination de la prestation.

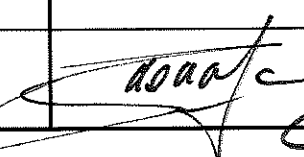
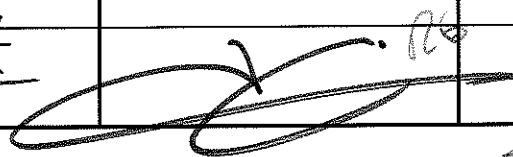
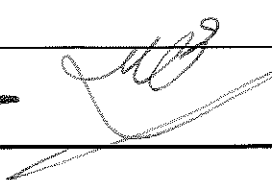
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	F. LAOUAFA	JC. PINTE M. GHOREYCHI	M. GHOREYCHI
Qualité	Ingénieur à l'unité Risques Naturels, Ouvrages et Stockages à la Direction des Risques du Sol et du Sous-sol	Chef de Projet Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. OBJECTIF	5
2. ANALYSE CRITIQUE DES ETUDES REALISEES.....	9
2.1 Hypothèse de symétrie axiale	9
2.2 Homogénéité du milieu.....	11
2.3 Modèle rhéologique.....	12
2.4 Impact de l'envoyage	14
2.5 Incendie et ses conséquences	15
3. CONCLUSION.....	17
4. REFERENCES	19

1. OBJECTIF

Cette note technique a pour objectif de présenter une analyse critique des études géomécaniques réalisées sur le stockage de déchets toxiques de Stocamine. Cette analyse porte sur les rapports d'études listés ci-dessous, transmis par Stocamine à l'INERIS.

- G. Vouille. Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème. Ecole des Mines de Paris, 1990.
- F. Hadj-Hassen, M. Tijani. Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie. Ecole des Mines de Paris, 2006.

F. Hadj-Hassen. STOCAMINE : Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après ennoyage Rappel des études réalisées

- du stockage, Mines-ParisTech, 2009.
- AVEC. Etude des conséquences sur l'aérage d'un incendie, 2009.

Nous rappelons d'abord brièvement les objectifs, les approches, les principaux résultats et les conclusions des différentes études réalisées dans l'ordre chronologique. Une analyse critique est ensuite présentée sur les phénomènes étudiés, les hypothèses retenues, les résultats obtenus et la nécessité ou non d'études complémentaires. Nous allons également identifier les phénomènes non étudiés qui peuvent avoir de l'importance pour le devenir du stockage.

L'analyse critique concerne en particulier trois aspects impactant la réversibilité du stockage et le processus de transport hydro-géochimique : la stabilité mécanique des ouvrages souterrains, leur vitesse de convergence et la fissuration des terrains.

Les études réalisées concernent le site de stockage qui se trouve à proximité des puits Joseph et Else, dans un massif de sel gemme situé à environ 500 m de profondeur, au mur des deux couches de potasse. Ces dernières furent exploitées par la méthode de longues tailles et foudroyage. Les études hydrogéologiques réalisées ont montré qu'après la fermeture du site et le remplissage des puits, ces derniers laisseraient passer un débit d'eau douce qui, au fil du temps, conduirait à un ennoyage lent de l'ensemble des vides souterrains. Ainsi, le site sera à terme rempli de saumure

L'Ecole des Mines de Paris a réalisé trois études sur le site de stockage, avec les objectifs suivants :

1. la première étude a été effectuée par Vouille en 1990, dans le cadre du dossier de demande d'autorisation du stockage de Stocamine. Cette étude a porté sur le dimensionnement et la tenue mécanique du stockage;

2. la seconde, réalisée par Hadj-Hassen et Tijani en 2006, a été motivée par la réactualisation de l'étude précédente, compte tenu de l'état du site après l'incendie survenu en 2002 dans le bloc 15. L'étude 2006 s'appuie sur les observations et les mesures de convergence réalisées. Cette étude avait également pour but de se prononcer sur la stabilité à long terme du stockage en particulier, au niveau des blocs creusés quelques mètres plus bas que les blocs précédents et qui ont manifesté des instabilités sous forme de chute de toit et de soufflage de mur ;
3. la troisième étude avait pour objectif de reprendre la modélisation du comportement à long terme du stockage en intégrant le remplissage des vides par la saumure et d'évaluer l'impact de ce remplissage sur le comportement des ouvrages au travers notamment de la vitesse et de l'amplitude du fluage.

Les principales conclusions de ces trois études sont les suivantes :

Etude : G. Vouille (1990)

L'étude menée par Vouille (1990) a préconisé un stockage dans des galeries séparées par des piliers (nouveau quartier exploité par la méthode de chambres et piliers abandonnés). Plusieurs schémas de découpage ont été étudiés et ont conduit à un dimensionnement de référence, jugé stable, consistant à réaliser des galeries de 2,3 m de hauteur et de 5,3 m de largeur, protégées par des piliers carrés de 16 m de côté. Le nouveau quartier étaient conçu pour être isolé des anciens travaux miniers par une vingtaine de mètres de terrains vierges constitués de sel gemme et d'intercalaires marneux. Cette étude n'écarte pas le risque d'écaillage des parements des galeries mais prévoit une dégradation limitée affectant tout au plus une cinquantaine de centimètres de profondeur. En se basant sur l'intensité du déviateur des contraintes dans les piliers, calculée par le modèle numérique, G. Vouille conclut que la stabilité du stockage est assurée même à long terme. S'agissant de déformations différées, cette étude prévoit qu'un contact entre le toit des galeries et les déchets est inévitable à long terme. Cependant, le temps nécessaire à ce contact dépend du dimensionnement des galeries et piliers.

Etude : F. Hadj-Hassen & M. Tijani (2006)

Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Dans la configuration générale où les blocs sont situés à -23 m sous la couche inférieure de potasse et où les allées et les piliers ne sont pas affectés par les voies doubles, les résultats du modèle de Vouille (étude 1990) sont valables à la fois d'un point de vue de la stabilité mécanique du stockage et des phénomènes et mouvements de terrains prédits (convergence, affaissement, écaillage des piliers...).
- L'écaillage des piliers carrés, observé in situ est principalement localisé, selon l'Ecole des Mines, aux coins et n'affecte pas l'intégralité du pilier. Ce type de rupture ne pouvait pas être reproduit par le modèle numérique

axisymétrique adopté par Vouille. Celui-ci représente un pilier cylindrique de 20 m de diamètre.

- Les plots de mesure de convergence in situ, sont ancrés à proximité des coins des piliers. Les mesures de convergence horizontales sont fortement affectées et probablement accentuées par la dégradation de ces coins, ce qui expliquerait une convergence horizontale mesurée plus importante que la convergence verticale, contrairement aux prévisions du modèle numérique.
- Pour les bases de mesure de déplacement situées à proximité de la voie double de desserte, les mesures sont fortement influencées par la fracturation importante des piliers relativement minces de cette voie.
- L'écaillage des piliers avoisinants est aussi plus prononcé. Cependant, les auteurs concluent que tous ces phénomènes restent très localisés et ne s'étendent pas aux autres piliers et allées moins affectés par l'écaillage et la déformation.
- Les auteurs estiment que le modèle utilisé par Vouille pour l'étude du projet Stocamine est plutôt pessimiste et sécuritaire.
- A très long terme, les piliers minces des voies doubles se trouveraient en état de ruine. Cette situation conduirait au report de la surcharge verticale sur les piliers avoisinants et à l'augmentation de la largeur des voies. Cela se traduirait par l'accroissement de l'écaillage des parements des piliers voisins sans toutefois mettre en cause leur stabilité (d'après les auteurs), et par des chutes de toit dont la hauteur resterait limitée.
- La plupart des blocs creusés à -25 m sous la couche inférieure de potasse subissent la conjugaison de deux facteurs défavorables : un litage relativement fin du toit et du mur du fait de la présence, d'une part, des filets marneux qui découpent des bancs de sel de faible épaisseur, et d'autre part, d'un stot abandonné dans les deux couches de potasse, stot qui entraîne une forte concentration de contraintes en particulier verticales.
- Les deux facteurs défavorables cités ci-dessus affectent largement la stabilité des ouvrages. Le risque de chute de toit et de soufflage du mur est beaucoup plus important au niveau des allées et les piliers subissent un écaillage plus prononcé. Le modèle de Vouille (1990) ne pouvait pas rendre compte de ces phénomènes puisque ses hypothèses de base sont l'homogénéité des terrains et l'absence d'effet de l'exploitation sus-jacente. Les auteurs n'ont pas jugé utile de développer un modèle numérique spécifique à ces blocs, mais la stabilité à long terme des ouvrages a été évaluée en décrivant les mécanismes mis en jeu.
- Les auteurs estiment qu'en dépit d'un écaillage plus prononcé, la stabilité des piliers est également assurée, dans les blocs situés à -25 m. Il en est de même pour la stabilité globale du stockage, en dépit des ruptures jugées locales et isolées affectant les voies doubles ou les allées.
- Des éboulements sont toutefois envisageables au toit des voies doubles après la ruine des piliers, mais aussi au toit des allées et des carrefours des blocs situés à -25 m de la couche potassique inférieure. Toutefois, les auteurs concluent que ces éboulements seraient limités en hauteur et n'auraient pas d'incidence sur la stabilité globale du stockage.
- Le bloc 15 fermé après l'incendie de 2002, est affecté par deux facteurs défavorables à la stabilité mécanique : chutes de toit et soufflages de mur au niveau des allées.

Etude : F. Hadj-Hassen (2009)

Pour étudier l'impact de l'ennoyage sur le comportement à long terme des vides souterrains, deux hypothèses extrêmes ont été adoptées :

- les puits d'accès demeurent hydrauliquement ouverts (non étanches) après traitement (remblayage, scellement...) : la pression de la saumure reste alors constante après le remplissage hydraulique total des vides miniers ;
- les puits sont supposés hydrauliquement fermés (étanches) : la pression de saumure augmente alors avec la réduction des volumes des vides résultant du fluage des piliers et de la convergence des galeries.

Cette étude conclut qu'en toute hypothèse, l'ennoyage conduit à une diminution de la vitesse de convergence des vides souterrains. Cette diminution est d'autant plus importante que le système est hydrauliquement étanche. Les résultats de la modélisation indiquent que dans l'hypothèse d'un système ouvert, avant l'ennoyage, la diminution du volume des vides est estimée à 25% au bout de 20 ans et à 52 % au bout de 500 ans. Or, en présence de l'ennoyage et toujours pour un système hydraulique ouvert, la diminution du volume des vides est estimée à 31,4% au bout de 500 ans et à 31,7% au bout de 1600 ans (fin de la période étudiée).

Dans l'hypothèse de puits fermés hydrauliquement, la perte du volume des vides serait négligeable : seulement 0,072 % au bout de 1600 ans ; cela tient à la mise en surpression de la saumure dont la valeur est estimée à environ 2 MPa.

2. ANALYSE CRITIQUE DES ETUDES REALISEES

2.1 HYPOTHESE DE SYMETRIE AXIALE

Les modélisations numériques effectuées à l'Ecole des Mines de Paris reposent sur plusieurs hypothèses plus ou moins fortes.

La première est la représentation axisymétrique intégrant un pilier cylindrique inscrit dans le pilier réel (carré) et un cylindre se limitant à mi-galerie (Figure 1).

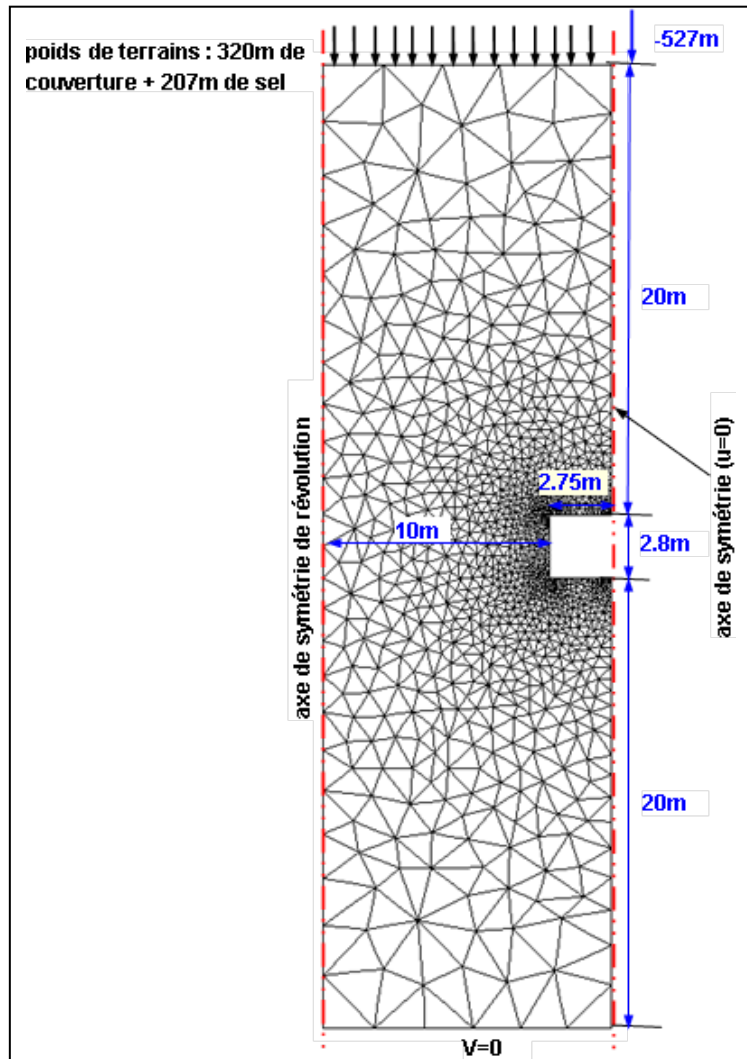


Figure 1 : Modèle numérique du stockage (F. Hadj-Hassen, 2009)

La représentation axisymétrique et les conditions aux limites cinématiques adoptées (notamment sur les frontières verticales du modèle) reviennent à supposer, d'une part, un schéma d'exploitation répétitif à l'infini, et d'autre part, une «individualisation» du comportement mécanique du stockage. En effet, dans cette configuration, chaque couple « pilier + galerie » se comporte de manière indépendante sans interaction mécanique avec les autres parties de l'ouvrage souterrain.

Cette hypothèse de travail revient à supposer que chaque pilier reprend intégralement la surcharge (imposée par le recouvrement) qui lui est tributaire. La contribution mécanique du toit qui peut soulager les piliers par un report de charge sur les bords fermes est alors négligée. Cette démarche surestime la contrainte verticale régnant en moyenne dans les piliers mais les modifications des contraintes horizontales (radiales et orthoradiales en symétrie axiale) qui en résultent sont difficiles à estimer.

De ce fait, le modèle axisymétrique ne peut prédire des ruptures (mêmes localisées) aux pourtours des piliers carrés et des mécanismes de rupture non nécessairement symétriques ou induits par les parties voisines. Nous pensons que cela explique pourquoi l'étendue de la zone affectée par des fractures de traction et des écaillages en paroi des piliers est estimée par Vouille (1990) au plus à 50 cm alors qu'in situ la zone affectée par l'écaillage s'étend à 1,5 - 2 m (Hadj-Hassen, 2009).

La modélisation axisymétrique fut adoptée par Vouille (1990) puis Hadj-Hassen (2006 et 2009) alors que le schéma d'exploitation est régulier (Figure 2). Nous sommes tout à fait conscients que ce type d'approche est largement employée en France et à l'étranger, du fait de sa simplicité et en dépit de ses limites reconnues.

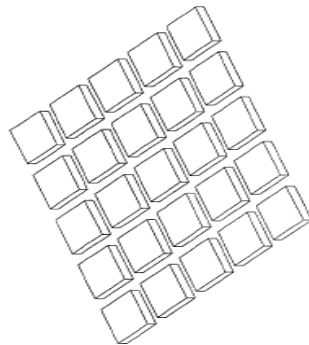


Figure 2 : Schéma d'exploitation en chambres et piliers (Vouille, 1990)

Un autre aspect, à notre avis important mais non étudié par l'Ecole des Mines de Paris, est l'étude de la stabilité globale de l'infrastructure du stockage. Il est probable que cet aspect ne faisait pas partie du cahier des charges de ces études. En tout cas, il ne pouvait être abordé par l'approche adoptée qui a consisté à recourir soit à un modèle 2D en déformations planes, soit à un modèle en axisymétrie. En effet, l'exploitation dans son ensemble ne présente pas de symétrie axiale et l'interaction mécanique des différentes galeries perpendiculaires ou parallèles ne peut pas être étudiée par un modèle plan. Dès lors, il est difficile de se prononcer sur la représentativité réelle des résultats des modélisations effectuées par l'Ecole des Mines. Une chose est certaine et est constatée clairement lors de la visite du site : les piliers des voies doubles sont très fracturés et ne tiennent actuellement que par cerclage. D'autres piliers bien qu'aujourd'hui a priori stables, sont également fissurés en bordure. Ces observations soulèvent des sérieuses interrogations sur la tenue à moyen terme des ouvrages souterrains et nous conduisent à envisager une étude complémentaire sur la stabilité globale du stockage, par une modélisation en trois dimensions sur une partie représentative du stockage (figure 3).

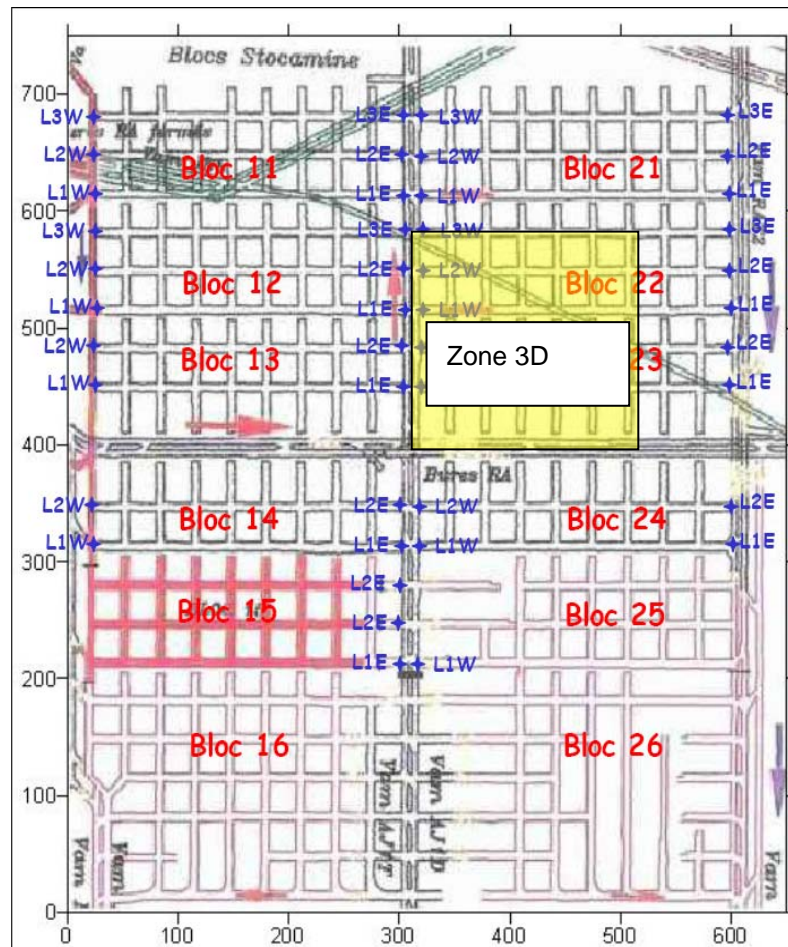


Figure 3 : Vue en plan d'un secteur pouvant être modélisé en 3D

2.2 HOMOGENEITE DU MILIEU

D'un point de vue lithologique, le modèle numérique de l'Ecole des Mines, n'intègre pas les faciès marneux notamment présents au toit des blocs situés à -25 m du mur de la couche potassique inférieure. Ces zones de faiblesses peuvent être le siège des contraintes de cisaillement ; les bancs peuvent s'y décoller et donner lieu à des chutes de toit et des soufflages de mur. Ces mécanismes, bien que soulignés dans les différents rapports ne sont pas considérés dans le modèle numérique de l'Ecole des Mines et ne peuvent être prédits convenablement par les modèles utilisés. Notons également qu'à notre connaissance, les caractéristiques mécaniques des intercalaires marneux n'ont pas fait l'objet d'une étude expérimentale de laboratoire

Concernant la chute de toit, un mécanisme non pris en compte est la possibilité de rupture par flambement des bancs peu épais soumis à une compression horizontale. Ce phénomène concerne également le soufflage du mur qui est la manifestation susceptible d'être accentuée par un poinçonnement partiel des piliers dans le mur.

2.3 MODELE RHEOLOGIQUE

Le modèle numérique de base proposé par Vouille (1990) puis repris par Hadj-Hassen (2006 et 2009) suppose que les terrains salifères sont continus, homogènes et isotropes. Le comportement du sel gemme est décrit par un modèle de puissance, baptisé « Lemaitre » qui peut adopter, dans le cadre d'une sollicitation uniaxiale (essai de compression simple en laboratoire) l'expression suivante :

$$\varepsilon_{VP} = \left(\frac{\sigma}{K} \right)^{\beta} t^{\alpha}$$

ε_{VP} : déformation viscoplastique

σ : contrainte déviatorique

t : temps

K , α , β : paramètres du modèle de Lemaitre

Ce modèle considère que pour un échantillon de sel soumis à une contrainte constante dans le temps (σ) la déformation évolue comme t^{α} .

Le tableau ci-dessous rassemble les valeurs moyennes des paramètres, retenues par l'Ecole de Mines, pour le sel étudié :

Masse volumique (kg/m ³)	Module de Young (MPa)	Coefficient de Poisson	Résistance en compression uniaxiale (MPa)	α	β	K (*)	Indice de fluage (%)
2160	25 000	0,23	32,9	0,27	2,296	0,266	2
* le temps est en jour, les contraintes sont en MPa et les déformations sont en micron/mètre							

Tableau 1 : valeurs des paramètres de la loi rhéologique retenue par l'Ecole des Mines de Paris

L'indice de fluage, défini par l'Ecole des Mines, correspond à la déformation viscoplastique obtenue au bout d'une année sous un déviateur de contrainte fixé à 10 MPa. Cet indice montre que le sel étudié est moyennement fluant ; les sels peu fluants ont des indices inférieurs à 1 % et ceux très fluants peuvent avoir des indices dépassant les 10 %.

Les valeurs des paramètres de la loi de Lemaitre, déterminées en 1990 par des essais de fluage en laboratoire, n'ont pas été remises en cause dans les études postérieures (2006 et 2009) mais la représentativité des résultats n'a pas été démontrée d'une manière convaincante (Hadj-Hassen (2006)).

Si l'on se réfère aux mesures de déplacements réalisés in situ et présentés dans le rapport de l'Ecole de Mines (2006), on constate au delà d'une phase transitoire, une évolution plutôt linéaire des déplacements. Cela suggère que le comportement du sel étudié s'exprime davantage par une loi de Norton que par le modèle de Lemaitre. En effet, d'après le modèle de Norton (Langer (1981), Munson et Dawson (1982), Carter et Hansen (1991), Pouya, 1991)), le fluage de sel devient stationnaire (à vitesse constante, « steady-state ») au-delà d'une phase d'évolution transitoire (transient creep) alors que modèle de Lemaitre considère une décroissance progressive de la vitesse de fluage.

Rappelons cependant que le modèle de Lemaitre est systématiquement utilisé par l'Ecole des Mines de Paris pour les études réalisées dans le sel (mine de sel de Varangéville, cavités de stockage de sel, etc.) et que ce modèle reproduit en général bien le comportement des ouvrages étudiés et les mesures qui y sont réalisées.

Il n'en demeure pas moins qu'à l'étranger (Allemagne, Etats-Unis, Royaumes Unis....), c'est le modèle de Norton qui est employé pour le comportement mécanique du sel gemme. Nous pensons qu'en dépit des controverses qui opposent les partisans et les adversaires du concept de fluage établi (stationnaire), ces deux modèles s'accordent, pour l'essentiel, sur les principaux traits du comportement du sel gemme : ils conduisent aux conclusions très proches en ce qui concerne la stabilité mécanique des ouvrages mais les déformations à long terme sont plus faibles d'après le modèle de Lemaitre comparé à celui de Norton. C'est pourquoi, plutôt que prendre position en faveur ou contre l'un de ces modèles rhéologiques, nous préférons étudier dans la suite leur influence en termes du comportement à long terme du stockage.

Critères de stabilité

Notons en outre que dans l'étude réalisée par l'Ecole des Mines de Paris, l'analyse de la stabilité est effectuée a posteriori, elle n'est pas intégrée explicitement dans la modélisation numérique. En fait, le degré de dégradation des piliers est estimé en comparant les valeurs du déviateur des contraintes à un certain seuil. De plus, on cherche à identifier l'existence, l'amplitude et l'extension de zones où des contraintes de tractions apparaissent, lors des calculs viscoplastiques. Le modèle rhéologique employé n'intègre pas l'initiation et la propagation de l'endommagement et de la rupture dans le sel.

Cela ne constitue pas une critique : nous sommes conscients qu'en dépit du progrès scientifique important enregistré ces dernières décennies sur la modélisation des évaporites (notamment dans le contexte des stockages de déchets radioactifs et d'hydrocarbures), une analyse rigoureuse de la stabilité n'est pas triviale pour des ouvrages en milieu salifère marqué par un comportement viscoplastique (fluage). Dans la plupart des cas, l'endommagement ou la rupture du sel sont étudiés à l'aide d'un modèle élastoplastique (Hunsche et Cristescu et Hunsche (1991), Thorel et Ghoreychi (1996)) en introduisant, dans le modèle numérique, des critères d'initiation d'endommagement et de rupture. Le premier est exprimé à partir des seuils de dilatance (la fissuration de sel se traduit par un foisonnement de la roche) alors que la rupture (fracturation) de sel est caractérisée par la résistance maximum (à la rupture) de ce matériau.

Ce type d'approche a été bien mise en œuvre, il y a une quinzaine d'années, pour le sel de la mine d'Amélie aux MDPAs, dans le cadre d'une thèse de doctorat préparée à l'Ecole Polytechnique (Luc Thorel, 1994). Les résultats de nombreux essais de laboratoire réalisés sur le sel d'Amélie ainsi que les modèles d'endommagement et de rupture développés seront mis à profit dans la suite de cette étude. Il ne s'agit pas nécessairement de faire appel au modèle complet développé, tous les mécanismes pris en compte n'étant pas présents dans le contexte de cette étude. Toutefois les résultats disponibles seront utilisés dans l'étude de stabilité réalisée par l'INERIS.

2.4 IMPACT DE L'ENNOYAGE

L'impact mécanique de l'ennoyage des vides souterrains a été étudié à partir de deux hypothèses :

- remplissage des vides à pression de saumure constante (système ouvert),
- remplissage des vides à volume constant (système fermé).

Dans les deux configurations, les résultats de la modélisation réalisée par l'Ecole des Mines indiquent que la pression de saumure s'exerçant sur les piliers, le toit et le mur peut ralentir considérablement le fluage du sel et la fermeture progressive des vides. Ce phénomène est expliqué par l'action de la pression de saumure qui joue le rôle d'une pression de soutènement (confinement) des piliers. Elle fait diminuer le déviateur des contraintes dans les piliers et la charge verticale, par l'application d'une pression au toit des cavités.

Dans cette approche purement mécanique, la présence de saumure est traduite uniquement par l'application d'une pression constante, dans le cas d'un système ouvert, et d'une pression croissante dans le cas d'un système fermé.

L'influence de certains facteurs évoqués dans l'étude de l'Ecole des Mines de Paris (Hadj-Hassen, 2009) en particulier, la température et la présence éventuelle de poches de gaz dans la mine, ne nous semble pas être de grande importance dans le contexte de cette étude. Une discussion sera menée par l'INERIS dans la suite pour étayer ces propos.

Un autre aspect à examiner est le rôle éventuel d'un mouvement convectif de fluide et son influence sur la dissolution-précipitation de la saumure et de ce fait sur le transport de polluants.

Trois autres aspects plus ou moins importants non pas été examinés :

- 1- le caractère progressif de l'ennoyage de la mine : l'étude hydrogéologique effectuée par CESAM permet d'en préciser les principales caractéristiques :
 - le débit résiduel d'eau douce qui pourrait alimenter les vides souterrains après la fermeture et le remblayage des puits est évalué à $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$;
 - le remplissage de l'ensemble des vides souterrains s'étalerait sur une durée d'environ 150 ans (cette estimation ne tient pas compte de la convergence progressive des vides liée au fluage).

L'eau douce ne devrait pas lessiver de manière uniforme l'intégralité de la mine. On peut dès lors s'attendre à des dissolutions différentielles, significatives sur le long terme. On rajoutera que sous l'effet du gradient géothermique, un mouvement du fluide sera induit par le différentiel de masse volumique de la saumure. Même si ce phénomène est lent sur un intervalle de temps très long, les effets peuvent ne pas être négligeables. Le moteur du mouvement d'origine thermique peut entretenir une dissolution-précipitation lente mais permanente ;

- 2- la dégradation des propriétés de résistance (cohésion et angle de frottement interne) de sel au contact de la saumure. Ce phénomène a été bien mis en évidence dans le mémoire de doctorat de P. Cosenza, préparé à l'Ecole Polytechnique (Cosenza (1996), Cosenza et Ghoreychi (1999)). De plus, la présence d'une zone endommagée en paroi d'une cavité dans le sel conduit à une augmentation substantielle de la perméabilité du sel, pouvant atteindre plusieurs ordres de grandeur (Stormont (1991)). La saumure peut alors s'introduire facilement dans des fissures et agir sur le comportement mécanique par le biais de sa pression ;
- 3- l'influence de la saumure sur le fluage du sel : les essais de fluage réalisés en laboratoire ont mis en évidence une accélération du fluage de sel au contact de la saumure. Ce phénomène semble affecter le fluage transitoire et non le fluage stationnaire (Munson (1982)). Cela signifie qu'au-delà d'une phase transitoire, la vitesse de fluage est la même en présence et en absence de la saumure mais la phase transitoire ne peut s'achever tant que l'engorgement n'est pas stabilisé. On peut donc considérer que pendant toute la durée d'engorgement, la vitesse de convergence des galeries est plus importante que celle estimée sur un sel sec.

Ces éléments nous conduisent à étudier, d'une manière plus approfondie, l'impact de l'engorgement sur la stabilité mécanique et la convergence des ouvrages de Stocamine et plus généralement des MDP.

2.5 INCENDIE ET SES CONSEQUENCES

D'après le rapport d'étude réalisée par la société AVEC (Aérage-Ventilation-Etude-Conseils), la température au droit des barrages a varié entre 216 et 268°C pendant l'incendie. En l'absence de flamme, la température était vraisemblablement plus faible au toit du bloc 15 tout en demeurant probablement très élevée. Par ailleurs, le comportement du sel gemme est très sensible à la température et ce pour deux raisons:

- le coefficient de dilatation thermique linéaire de sel (typiquement $3.10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$) est trois fois plus grand que la moyenne des roches. On peut donc estimer que la contrainte d'origine thermique (proportionnelle au coefficient de dilatation et au module de Young (de l'ordre de 25000 MPa pour le sel) peut être 0,75 MPa/°C, soit 75 MPa au toit immédiat du bloc 15, en prenant une température de 100 °C. C'est une valeur de contrainte très élevée par rapport à la contrainte lithostatique régnant au niveau du stockage à 500 m de profondeur (de l'ordre de 12 MPa). On conçoit que le risque d'un endommagement n'est pas exclu au toit du bloc 15 et doit être étudié comme cela a été envisagé dans l'offre INERIS. L'extension et l'intensité de

cet endommagement seront étudiées par une modélisation thermomécanique et leur impact sur la perméabilité du toit et le transport de polluants sera analysé.

- la viscosité de sel décroît exponentiellement en fonction de la température (selon la loi d'Arrhenius, Langer, 1981, Vouille, 1981, Munson et Dawson, 1982). Cette décroissance varie d'un sel à l'autre mais reste substantielle quelque soit le sel. Cela tient au fait que le point de fusion de la halite (NaCl) est 800 °C, significativement inférieur à la plupart des roches. La vitesse de fluage augmente donc de plusieurs ordres de grandeur lorsque la température atteint 100 à 200 °C.

La conjugaison de ces deux facteurs : endommagement et accélération du fluage du massif salifère fera l'objet de la modélisation thermomécanique qui sera entreprise par l'INERIS.

3. CONCLUSION

A - Documents analysés

1. G. Vouille : Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème. Ecole des Mines de Paris, 1990.
2. F. Hadj-Hassen, M. Tijani : Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie. Ecole des Mines de Paris, 2006.
3. F. Hadj-Hassen. STOCAMINE : Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après ennoyage du stockage, Mines ParisTech, 2009.
4. Bureau d'étude AVEC. Etude des conséquences sur l'aéragé d'un incendie, 2009.

B- Avis sur les études réalisées par l'Ecole des Mines de Paris sur le comportement mécanique du stockage et préconisation de l'INERIS

1) Ces études reposent sur trois principaux éléments :

- essais de laboratoire, notamment de fluage, réalisés en 1990 pour le dossier d'autorisation de Stocamine. Ces essais ont permis d'identifier un modèle rhéologique, celui de Lemaître, pour le sel d'Amélie. C'est un modèle largement employé par l'Ecole des Mines en France (mines de sel, cavités salines de stockage) bien qu'à l'étranger ce soit un autre modèle, celui de Norton qui est très utilisé.
- mesures de convergence réalisées in situ : Bien que parfois perturbées par des dégradations locales des matériaux, elles indiquent une évolution quasi-linéaire dans le temps, ce qui est plus conforme au modèle de Norton qu'à celui de Lemaitre. Les conséquences de ces modèles pour la prévision du comportement à long terme du stockage seront étudiées par l'INERIS.
- modélisations numériques : effectuées en 2D, en axisymétrie ou en déformations planes, elles n'ont pas pour vocation de prendre en compte les interactions entre les galeries et les piliers. Elles ne peuvent donc pas statuer sur la stabilité globale du stockage. En particulier, la fracturation des voies doubles d'infrastructure n'a pas fait l'objet d'étude. C'est pourquoi, l'INERIS prévoit de réaliser une modélisation 3D, bien que celle-ci ne soit pas prévue dans l'offre.

2) Etude des conséquences mécaniques de l'ennoyage :

- L'effet mécanique de l'ennoyage a été étudié en supposant que ce dernier exerce une pression de confinement sur la paroi des piliers, au toit et au mur. Cette configuration revient à considérer que tous les matériaux sont parfaitement intacts et étanches. Cela nous semble discutable notamment à long terme. Par ailleurs, l'influence de la saumure sur les propriétés

mécaniques du sel (résistance, fluage) n'a pas été étudiée. Enfin, l'une des hypothèses adoptée consistant à supposer que le système est hydrauliquement fermé à long terme, ne nous semble pas justifiée. Les valeurs calculées de pression de confinement sont dans ce cas surestimées et la vitesse de fluage sous évaluée. Compte tenu de l'importance de la problématique, ce point fera l'objet d'une discussion argumentée dans le rapport final.

3) Etude des conséquences mécaniques de l'incendie

- Cet aspect n'ayant pas fait l'objet d'étude, il sera traité par l'INERIS (voir ci-dessous).

C- Prise en compte du rapport AVEC (2009) dans l'étude INERIS

Nous avons retenu de cette étude que l'incendie n'a pas provoqué de flammes et que la température n'a pas dépassé 300 degrés Celsius. L'INERIS se servira de ces données pour estimer l'augmentation de la température au toit du stockage et en évaluer les conséquences d'un point de vue thermomécanique, en termes d'endommagement et de propriétés de transport hydro-géochimique dans le massif, conformément à l'offre.

D- Remarques supplémentaires

- Le présent rapport ne contient pas d'éléments du rapport de Bernard FEUGA¹ (reçu en mars 2010). Des analyses sont menées à l'INERIS depuis réception de ce rapport, sur le stockage souterrain de déchets industriels en Allemagne, de façon à situer StocaMine par rapport aux stockages allemands y compris d'un point de vue du comportement mécanique à long terme, suite à un ennoyage.
- Actuellement, l'INERIS ne demande aucune étude mécanique supplémentaire qui serait réalisée par un tiers.

En plus des données disponibles dans les documents transmis par Stocamine, l'INERIS utilisera pour ses études mécaniques et thermomécaniques, des données issues de la littérature (thèses, articles scientifiques, rapports, etc.).

¹ Bernard Feuga. *Comparaison entre les conditions d'isolement des déchets dans le site de stockage de Stocamine et dans quelques sites allemands de stockage en mines de sel ou de potasse.* Mars 2010.

4. REFERENCES

Blanc-Valleron, M.M. (1990). 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.

Carter N.L., Hansen, F.D. (1991). "Creep of rock salt". Tectonophysics, vol. 92, pp 275-333.

Cosenza, P. (1996). Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme. Thèse de l'Université Paris 6

Cosenza, P., Ghoreychi, M. (1999). 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.

Cosenza, P., Ghoreychi, M., Bazargan, B., de Marsily, G. (1999). In situ rock salt permeability for long term safety assessment of storage. International Journal of Rock Mechanic & Mining Sciences, N° 36, pp 509-526

Cristescu, N., Hunsche, U. (1991). A constitutive equation for salt. 7th Int. Cong. Rock Mech., Aachen, Sept. 16-20, Balkema

Ghoreychi, M., Daupley, X. (2004). Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel. Revue Française de Géotechnique, N° 106-107, 1^{er} et 2^{ème} semestre

Ghoreychi, M. (1991). Comportement du sel broyé sous l'effet d'une source de chaleur dans des sondages réalisés dans une mine de sel. Edition CCE, EUR 13638FR

Ghoreychi M., Berest, P. , Hardy, H.R.Jr., Langer, M. (1996). The Mechanical Behavior of Salt. Proc. the Third Conference, Trans Tech Publisher, Germany, ISBN 0-87849-1000-7.

Ghoreychi, M. (1990). 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.

Ghoreychi, M., Daupley, X. (2002). Incidences du comportement mécanique et des processus de transport sur l'évolution à long terme des sites d'exploitation de sel. Journées Nationales de Géologie et de Géotechnique (JNGG 2002), Nancy.

Hunsche, U. (1993). Failure behaviour of rock salt around underground cavities, 7th symp. on Rock Salt, Kakihana H. Ed., Elsevier B., Amsterdam.

Kazan, Y. N. (1994). Comportement Thermo-Elasto-Viscoplastique des ouvrages souterrains dans le sel gemme. Thèse de l'ENSMP.

Kazan, Y., Ghoreychi M. (1996). Essai in situ CPPS : Etude thermomécanique d'un puits de stockage de déchets radioactifs dans le sel. EUR16946FR.

Kazan, Y., Ghoreychi, M. (1997). An in situ test on Near Field of Waste Repositories-Experimentation, Results and Interpretation. ISRM International Symposium, 36th U.S. Rock Mechanics Symposium, Columbia University, New York, USA, June 29 - July 2.

Kazan, Y., Ghoreychi, M. (1997). Convergence des galeries dans les formations salifères, mesures in situ et Interprétation. Revue Française de Géotechnique n° 79.

Langer, M. (1981). The rheological behavior of rock salt. Proc. First Conf. Mech. Behavior of Salt, Trans Tech Publications, Germany, 201-240.

Lemaitre J., Chaboche, J. L. (1988). Mécanique des matériaux solides. Dunod, Paris.

Munson, D.E., Dawson, P.R. (1982) A work hardening/recovery model of transient creep of salt during loading and unloading. Proc 23rd US Symp. Rock Mech. 299-307.

Pouya, A. (1991). Comportement rhéologique du sel gemme. Application à l'étude des excavations souterraines. Thèse de l'ENPC.

Spiers, C. J., Peach, C. J. (1989). Development of dilatancy and permeability in rocks during creep : experiments on rock salt as rock analog. Int. Geol. Congr. July, 1989, Washington D.C., vol. 3, pp 162-173.

Stormont, J.C., Howard, C.L., Damen, J. J. K. (1991). Changes in rock salt permeability due to nearby excavation, Rock Mechanics as a multidisciplinary science, Ed. Roggiers, Rotterdam

Thorel, L. (1994). Plasticité et endommagement des roches ductiles – Application au sel gemme. Thèse de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

Thorel, L., Ghoreychi, M. (1996). Plasticité et endommagement du sel gemme. Revue Française de Géotechnique, n° 77.

Thorel, L., Ghoreychi, M., Cosenza, P., Chanchole, S. (1996). Damage and failure of Salt Rock under dry or wet conditions. 4th Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Montréal (Canada).

Vouille, G., Tijani, S.M. & de Grenier, F. (1981). Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt. Proc. Of the First Conf. On "the Mechanical Behaviour of Salt", Pennsylvania State University.