



Identification des scénarios de mouvements de terrain (en surface) dans une mine de sel sèche

Rapport d'avancement
BRGM/RP- 60174 -FR
Juin 2011



Identification des scénarios de mouvements de terrain (en surface) dans une mine de sel sèche

Rapport d'avancement

BRGM/RP- 60174 -FR

Juin 2011

Étude réalisée dans le cadre du projet
de recherche APMR03

A. Nachbaur

Vérificateur :

Nom : J. Rohmer

Date : 01/09/2011

Signature :



Approbateur :

Nom : H. Modaressi

Date : 02/09/2011

Signature :



En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2008.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Mots clés : Mine abandonnée, mine souterraine, puits de mine, sel, évaporite, fluage, dissolution, mouvement de terrain, affaissement, effondrement

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :
Nachbaur. A. (2011) - Identification des scénarios de mouvements de terrain (en surface) dans une mine de sel sèche. Rapport d'avancement. Rapport BRGM-RP-60174 -FR

Synthèse

L'objectif de cette étude préliminaire était d'établir un état des lieux exhaustif des problématiques liées à une mine de sel sèche, de manière à hiérarchiser ensuite les actions à conduire, dans un objectif d'amélioration des moyens d'évaluation des risques.

Les spécificités des évaporites (sel) complexifient les scénarios d'évolution à long terme des mines salifères. La stabilité d'une exploitation souterraine dépend essentiellement de la stabilité mécanique des structures souterraines qui la composent (toit, mur, pilier). L'évolution de cette stabilité dans le temps dépend du comportement mécanique du matériau (fluage, vieillissement...), mais également de ses évolutions particulières (dissolution du sel, endommagement...), sachant que ces phénomènes interagissent. Dans une perspective de gestion de sites miniers post-exploitation, nous nous sommes intéressés ici plus particulièrement à l'évolution à moyen et long terme des paramètres, sans détailler spécifiquement les scénarios de rupture court terme des structures souterraines (phase travaux).

La couche salifère exploitée est naturellement protégée de toute arrivée d'eau, ce qui a ainsi permis d'éviter jusqu'alors sa dissolution. Cependant, l'exploitation a détérioré cette protection naturelle, en créant notamment des drains de circulation préférentielle au travers du recouvrement (puits, fracturation...). Vis-à-vis de l'analyse de stabilité, deux régimes doivent donc être distingués :

- **l'état transitoire** pendant lequel les effets de la dissolution liés à l'intrusion d'eau perturbent l'équilibre mécanique du système minier
- **l'état permanent**, correspondant à l'état à très long terme, une fois que le seuil de solubilité maximale est atteint.

Dans cette optique, nous distinguerons l'eau non saturée, n'ayant pas atteint sa concentration maximale en sel et donc toujours capable de dissoudre du sel (régime transitoire) de l'eau saturée, soit une eau contenant du sel dissous à sa solubilité maximale (régime permanent).

Etant donnée la complexité et l'interaction des processus mis en jeu, l'effet des différents phénomènes physiques élémentaires spécifiquement attendus dans une mine de sel ont été abordés indépendamment : le fluage, l'arrivée d'eau, et plus spécifiquement la dissolution induite par l'arrivée d'eau non saturée.

Les éclairages sur ces processus physiques élémentaires ont permis d'identifier les scénarios de mouvement de terrain attendus à l'échelle d'une exploitation, sachant que nous nous sommes reportés aux définitions utilisées pour les risques liés aux exploitations minières en général. L'étude n'a pas porté sur les autres risques induits, comme les pollutions des nappes aquifères par les saumures.

Concernant les ouvrages, la dégradation mécanique des éléments constitutifs de l'ouvrage (colonne de puits, dalle de béton, remblayage, cuvelage, bouchon..) est susceptible de provoquer des mouvements de terrain dont l'emprise sera limitée à celle de l'ouvrage alors que la dégradation de la perméabilité initiale (dans le cas d'une mise en sécurité optimale) peut entraîner des instabilités majeures (plusieurs centaines de mètres), par dissolution du minerai au fond ou par celle des horizons évaporitiques présents dans le recouvrement le long de la colonne de puits. En effet, ces ouvrages constituent des drains préférentiels susceptibles de favoriser l'intrusion d'eau dans la mine (par écoulement vertical).

Au final, une liste exhaustive des scénarios envisageables a été établie reliant chaque configuration au fond (géométrie, méthode de travaux..) aux mouvements de terrain envisageables en surface, intégrant à la fois les spécificités du minerai de sel et les facteurs d'instabilité généraux. Parmi ces instabilités, les plus préjudiciables restent les mécanismes dit « généralisés », qui sont les affaissements et les effondrements généralisés, dont l'occurrence de l'un ou de l'autre, dépend principalement de la nature des terrains du recouvrement et notamment de leur capacité à encaisser les déformations. Cette analyse a également mis en évidence, qu'outre les travaux miniers, les gisements salifères non exploités à proximité ou à l'aplomb des travaux miniers, pouvaient à long terme, donner lieu à des instabilités en surface. Cette étude a mise en évidence la diversité des mécanismes d'instabilité intervenant dans une exploitation salifère.

Identifiés dans le cas général, ces scénarios sont déclinables à chaque configuration particulière et notamment aux méthodes des travaux employés au fond (exploitation remblayée, foudroyée ou exploitation partielle). Rappelons que les exploitations par dissolution n'ont pas fait l'objet de cette étude.

Il ressort que, dans une optique de gestion de sites miniers post-exploitation, les évaluations d'aléa devront traiter différemment le régime permanent (long terme) de l'état transitoire, sachant que ce dernier peut s'étendre sur une durée importante (dizaine d'années), selon les mécanismes considérés (équilibre de pression, équilibre de vitesse de fluage...) et les caractéristiques de certaines cavités (grande profondeur par exemple). En effet, si les processus fondamentaux nécessitent une évaluation de la stabilité à long terme en considérant un état stationnaire de tous les paramètres, notons l'importance de l'effet transitoire liée à l'intrusion d'eau et à la dissolution qui en découle. De même, il est important de définir l'emprise minière étudiée, que l'on peut considérer comme un système fermé.

Cette étude confirme la nécessité d'approfondir la connaissance des mécanismes, notamment le couplage et l'interaction des processus et leur effet relatif en termes de stabilité, notamment le rôle de l'eau. Citons également la prise en compte de l'endommagement, et donc de l'augmentation de la perméabilité, dans les modèles de fluage puisque la microfissuration (et l'augmentation de perméabilité induite) influencent les mécanismes de déformation viscoplastique.

Sommaire

1. Contexte.....	9
2. Synthèse des particularités du minéral de sel.....	11
2.1. CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DU SEL.....	11
2.2. LE FLUAGE (DEFORMATION VISCOPLASTIQUE) ET LES MODELES RHEOLOGIQUES ASSOCIES	11
2.3. RUPTURE.....	14
2.3.1. Rupture à court terme	14
2.3.2. Rupture à long terme.....	15
2.4. INFLUENCE DE L'ENDOMMAGEMENT SUR LE FLUAGE DU SEL (COUPAGE HYDROMECHANIQUE).....	15
3. Scénarios de risques spécifique d'une mine de sel	17
3.1. CONSEQUENCES DU FLUAGE DU MINERAL DE SEL	18
3.1.1. Modification des contraintes	18
a) <i>Dans le gisement</i>	18
b) <i>Dans le recouvrement</i>	18
a) <i>Report de charge latéral</i>	18
3.1.2. Diminution du volume des vides au fond	18
a) <i>Amélioration du compactage des terrains déconsolidés</i>	19
b) <i>Augmentation de la pression dans une cavité fermée</i>	19
c) <i>Amélioration de la stabilité</i>	19
3.1.3. Synthèse des conséquences du fluage	19
3.2. CONSEQUENCES LIEES A L'ARRIVEE D'EAU EN GENERAL	20
3.2.1. Scénario d'arrivée d'eau (écoulement vertical).....	20
3.2.2. Modification du comportement mécaniques du sel	21
3.2.3. Modification des propriétés mécaniques des roches non salines.....	22
3.2.4. Modification de l'état des contraintes effective.....	22
3.2.5. Gonflement de certaines formations du recouvrement	23
3.2.6. Confinement des cavités	23
3.2.7. Augmentation de la pression	23
3.2.8. Synthèse des conséquences liées à l'arrivée d'eau.....	24

3.3. CONSEQUENCES DE LA DISSOLUTION DU SEL LIEES A L'ARRIVEE D'EAU NON SATUREE.....	25
3.3.1. Augmentation du volume des vides au fond	25
a) <i>Modification de la géométrie des exploitations existantes</i>	25
b) <i>Extension des vides au-delà des exploitations existantes</i>	25
3.3.2. Dissolution d'autres horizons évaporitiques présents dans la formation salifère constituant le recouvrement	26
3.3.3. Synthèse des conséquences de la dissolution du sel induite par l'arrivée d'eau non saturée.....	26
3.4. CONSEQUENCES LIEES A L'EVOLUTION DE LA PRESSION DANS UNE CAVITE FERMEE LIEES AU COUPLAGE FLUAGE / ARRIVEE D'EAU SATUREE	27
3.5. PRINCIPAUX PARAMETRES SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LE COMPORTEMENT D'UNE CAVITE	29
4. Scénarios de risques liés aux ouvrages débouchant au jour (puits, forage ..) 31	
4.1. SCENARIO D'INSTABILITE DE L'OUVRAGE	31
4.1.1. Scénario de dysfonctionnement.....	31
4.1.2. Synthèse des facteurs de prédisposition envisageables	33
4.2. SCENARIO D'INFILTRATION DES EAUX	34
4.2.1. Descriptif des mouvements de terrain induits	34
4.2.2. Scénario de rupture d'étanchéité des éléments constitutifs	35
4.2.3. Scénario d'infiltration des eaux par inadéquation.....	37
4.3. SYNTHESE DES SCENARIO	37
5. Les mouvements de terrain redoutés en surface 39	
5.1. LES AFFAISSEMENTS	39
5.1.1. Description (issue du Guide PPRM)	39
5.1.2. Configurations pouvant engendrer un affaissement en surface	40
5.2. LES EFFONDREMENTS LOCALISES	43
5.2.1. Définition (issue du Guide PPRM)	43
5.2.2. Configurations concernées	43
5.3. LES EFFONDREMENTS GENERALISES	43
5.3.1. Définition (issue du Guide PPRM)	43
5.3.2. Configurations pouvant engendrer un effondrement généralisé en surface	44
5.3.3. Synthèse des configurations susceptibles d'entraîner un effondrement généralisé.....	45

5.4. LES TASSEMENTS	45
5.4.1. Description (issue du Guide PPRM)	45
5.4.2. Configurations concernées.....	46
5.5. SYNTHESE.....	46
6. Conclusion	49
7. Bibliographie	51

Liste des illustrations

Illustration 1 : Schéma des régimes permanents et transitoires à considérer dans une analyse de stabilité.....	9
Illustration 2 : Organisation de la démarche du présent rapport.....	10
Illustration 3 : Essai de fluage en compression simple. Sel d'Etrez (Charpentier, 1983)	12
Illustration 4 : Evolution de la vitesse de déformation viscoplastique en fonction de la contrainte déviatorique lors d'essai triaxiaux de compression (Cosenza, 1996) a) à gauche : à l'état sec, par palier de relaxation (au début de chaque palier) b) à droite : à l'état humide, par palier de fluage	16
Illustration 5 : Principaux effets induits par le fluage.....	20
Illustration 6 : Etat des contraintes lors du dépassement du critère de rupture (à gauche) et d'endommagement (à droite) selon les conditions sèches ou humides (Cosenza, 1996).....	22
Illustration 7 : Conséquence induite par l'arrivée d'eau, en général.....	24
Illustration 8 : Conséquence induite par l'arrivée d'eau non saturée.....	26
Illustration 9 : Evolution théorique de la pression suivant les phénomènes considérés (d'après Berest, 1997) à gauche : à faible profondeur (1000 m), à droite : à forte profondeur (2000 m)	28
Illustration 10 : Evolution théorique de la pression suivant le volume de la cavité (d'après Berest, 1997) à gauche : à faible profondeur (1000 m), à droite : à forte profondeur (2000 m)	28
Illustration 11 : Schéma de principe proposé par les MDPA sur l'allure des dissolutions le long de la colonne de puits, pendant l'ennoyage (Source : www.mdpa.fr).....	34
Illustration 12 : Scénario de défaut d'étanchéité (d'après Gasda et al. 2004, modifié)	36
Illustration 13 : Scénarios de dégradation d'un puits, susceptibles d'impliquer des mouvements de terrain perceptibles en surface	38
Illustration 14 : Evolution temporelle de l'affaissement, à partir du réseau de nivellement (Affaissement maximal observé sur le gisement de potasse d'Alsace = 4.5 m). Source (modifiée) : MDPA.....	40

Illustration 15 : Synthèse des configurations au fond susceptibles d'entraîner un affaissement en surface.....	42
Illustration 16 : Synthèse des configurations au fond entraînant un effondrement généralisé	45
Illustration 17 : Mouvements de terrain attendus en surface selon la configuration au fond.....	47

Liste des tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des principales lois rhéologiques de type visco-plastique sans seuil.....	14
Tableau 2 : Principaux paramètres intervenant dans le comportement d'une cavité	30
Tableau 3 : Principaux facteurs de prédisposition à considérer selon le scénario redouté.....	33

1. Contexte

La famille des évaporites comprend plusieurs types de roches salifères qui ont toutes pu être exploitées en mine souterraine. Les plus courantes sont le halite (ou sel gemme), l'anhydrite (CaSO_4), le gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). D'autres comme la sylvine (KCl), polyhalite et carnallite (sels de magnésium et de potassium) etc., sont moins répandues. Généralement, on retrouve l'ensemble de ces niveaux salifères au sein d'une même formation salifère, souvent principalement constituées de sel gemme et d'anhydrite.

Les spécificités des évaporites complexifient les scénarios d'évolution à long terme des mines salifères. En tenant compte de l'ensemble de ces scénarios, l'objectif est d'identifier les mouvements de terrain potentiels attendus en surface, à l'aplomb d'une mine de sel dite « sèche » (pour les distinguer des exploitations par dissolution, qui soulèvent des problèmes spécifiques, ne font pas l'objet de cette étude). Ce cadre général doit pouvoir ensuite être décliné à chaque configuration particulière et notamment aux méthodes de travaux employés (exploitation remblayée, foudroyée ou exploitation partielle). Cette étude ne traite pas d'autres risques comme les pollutions des nappes aquifères par les saumures.

La stabilité d'une exploitation souterraine dépend essentiellement de la stabilité mécanique des structures souterraines qui la composent (toit, mur, pilier). L'évolution de cette stabilité dans le temps dépend du comportement mécanique du matériau (fluage, vieillissement..) mais également de ses changements d'état (évolution de la perméabilité, dissolution du sel..), sachant que ces phénomènes interagissent. Dans une perspective de gestion de sites miniers post-exploitation, nous nous intéresserons ici plus particulièrement aux évolutions moyen et long terme des paramètres et à identifier les scénarios envisageables, sans détailler spécifiquement les scénarios de rupture court terme (phase travaux) des structures souterraines.

Vis-à-vis de l'analyse de stabilité, deux régimes doivent ainsi être distingués, sachant que les mécanismes d'instabilité y sont distincts : **l'état transitoire** pendant lequel les effets de la dissolution liés à l'intrusion d'eau, perturbent l'équilibre mécanique du système minier et **l'état permanent**, correspondant au très long terme, une fois que le seuil de solubilité maximal est atteint. L'illustration 1 schématise ces phases successives d'évolution d'un système minier salifère.

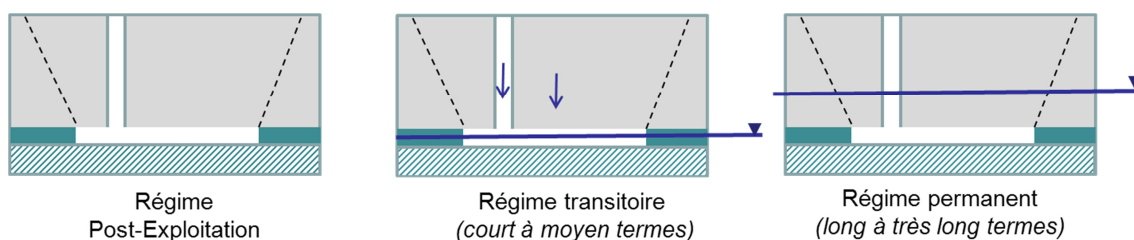


Illustration 1 : Schéma des régimes permanents et transitoires à considérer dans une analyse de stabilité

Dans un premier temps, les spécificités rhéologiques du sel ont été rappelées (chapitre 2). En effet, aux facteurs d'instabilité généraux, il faut ajouter plusieurs facteurs aggravants caractéristiques du sel qui influencent largement la stabilité d'un système minier (chapitre 3). Il s'agit en particulier du fluage et de la dissolution du minerai, liée à l'arrivée d'eau non saturée. Le chapitre 4 traite spécifiquement des scénarios d'évolution liés aux ouvrages débouchant en surface. Enfin, à partir de ces éclairages, le chapitre 5 synthétise les scénarios de mouvements de terrain susceptibles d'affecter la surface selon la configuration des travaux miniers, intégrant à la fois, les spécificités du minerai de sel et les facteurs d'instabilité généraux.

Ainsi, la démarche, schématisée sur l'illustration 2, différencie les effets attendus au fond, traités séparément les uns des autres (chapitre 3 et chapitre 4), des mouvements de terrain susceptibles d'affecter la surface à l'échelle d'une mine (chapitre 5).

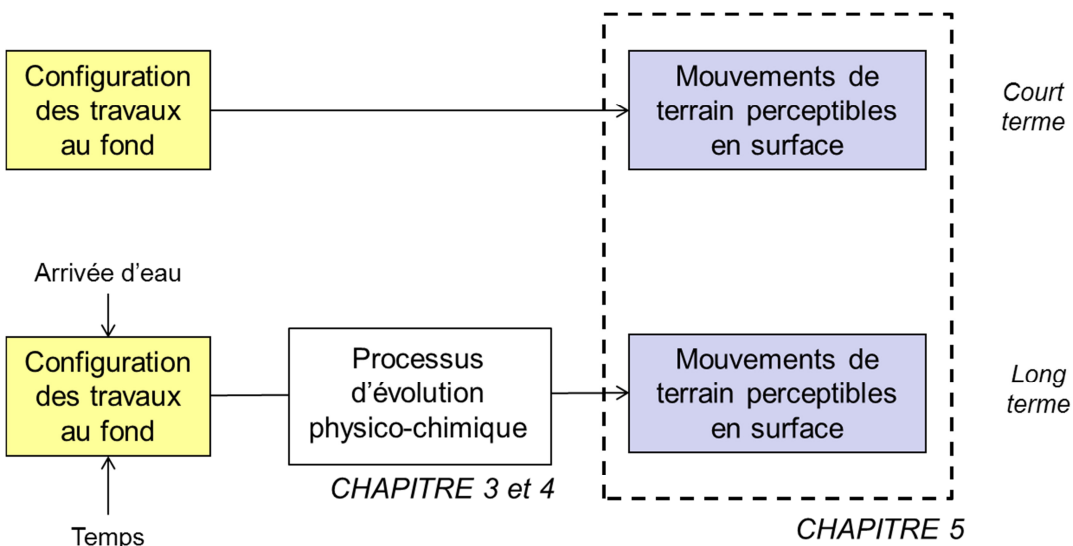


Illustration 2 : Organisation de la démarche du présent rapport

2. Synthèse des particularités du minerai de sel

2.1. CARACTERISTIQUES INTRINSEQUES DU SEL

La famille des évaporites comprend plusieurs sels minéraux qui ont toutes pu être exploitées en mine souterraine. Les plus courantes sont le halite (ou sel gemme) (chlorure de sodium NaCl), l'anhydrite (CaSO₄), le gypse (CaSO₄.2H₂O). D'autres comme la sylvine (chlorure de potassium KCl), polyhalite et carnallite (sels de magnésium et de potassium) etc., sont moins répandues. Généralement, on retrouve l'ensemble de ces niveaux salifères au sein d'une même formation salifère, souvent principalement constituées de sel gemme et d'anhydrite. Citons des gisements de potasse d'Alsace (sylvinite), où la sylvine, KCl est associé au sel gemme.

Parmi ces sels, le chlorure de sodium NaCl ou sel gemme, le plus couramment rencontré, a fait l'objet de nombreuses études. Il sera souvent le sujet des études expérimentales présentées par la suite.

Ses principales caractéristiques sont :

- Sa grande solubilité (environ 350 g/L à 400 g/L suivant la température) ;
- Sa faible porosité (de l'ordre du %) ;
- Sa très faible perméabilité (inférieure à 10^{-17} m²), si bien qu'il est souvent considéré comme imperméable. Cette perméabilité augmente avec la présence d'impuretés (argiles et anhydrite) qui peuvent constituer des chemins préférentiels d'écoulements des eaux, ou dès que le sel est endommagé (Consenza, 1996) ;
- Sa grande conductivité thermique ($K = 6 \text{ W m/}^\circ\text{C}$).

Pour plus de précision, Masal (1988) synthétise les propriétés physiques du sel gemme existant dans la littérature.

2.2. LE FLUAGE (DEFORMATION VISCOPLASTIQUE) ET LES MODELES RHEOLOGIQUES ASSOCIES

Le sel présente un comportement mécanique viscoplastique, typique des évaporites, dont les principales caractéristiques sont :

- la **vitesse de fluage ne dépend que de la partie déviatorique du tenseur des contraintes** (et donc, pas de la contrainte de confinement). Plus la pression dans la cavité est faible, plus la vitesse de fluage est importante ;
- le fluage se poursuit tant que le sel est soumis à une contrainte déviatorique, même très faible (déformation non bornée), jusqu'à ce que la roche soit soumise à un état de contrainte isotrope (Ghoreychi et Daupley, 2004). La convergence des cavités aura donc tendance à aboutir à leur fermeture complète ;

- la vitesse de déformation viscoplastique est **extrêmement sensible à la température**. Elle s'accroît de deux ordres de grandeur quand la température augmente de 100°C (Berest et al., 1997).

Rappelons ici que le tenseur des contraintes se décompose comme la somme de deux tenseurs : le tenseur sphérique et le déviateur des contraintes. La forme du tenseur sphérique correspond à celle du tenseur des contraintes pour une pression hydrostatique. Le déviateur des contraintes est proportionnel à la différence entre la pression lithostatique et la pression interne de la cavité. Ainsi, plus la pression dans la cavité est basse, plus les contraintes déviatoriques sont élevés.

D'une façon générale, on distingue trois types de fluage (cf. Illustration 3) :

- Le fluage primaire, caractérisé par une vitesse de déformation qui diminue, soit un écrouissage en déformation (durcissement de la roche) ;
- Le fluage secondaire, caractérisé par une vitesse de déformation constante lorsqu'il est considéré comme stationnaire ;
- Le fluage tertiaire, caractérisé par une vitesse de déformation qui augmente jusqu'à la rupture.

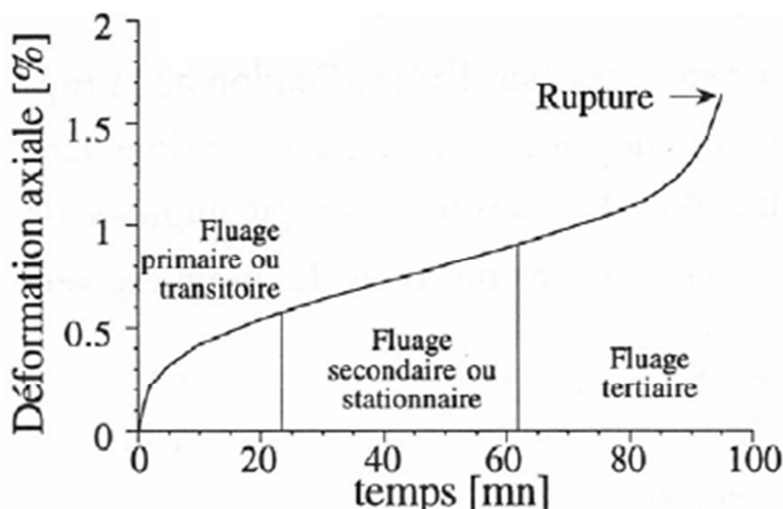


Illustration 3 : Essai de fluage en compression simple. Sel d'Étrez (Charpentier, 1983)

Les lois rhéologiques les plus courantes (cf. Tableau 1) considèrent que :

- la relation entre la vitesse de fluage et la contrainte déviatorique σ_d n'est pas linéaire ; elle est exprimée par une loi de puissance (plus précisément de la racine carré du second invariant du déviateur des contraintes) ;
- la valeur de cette puissance varie entre 3 et 5 selon le sel (Berest et al., 1997) ;
- la sensibilité à la température est exprimée par une loi de type Arrhenius (exponentielle de type $e^{-\frac{\Delta H}{RT}}$, où ΔH est l'énergie d'activation et R la constante des gaz).

Points de divergence entre les modèles les plus utilisés :

- **la prise en compte ou non de la stationnarité du fluage.** Ainsi, la loi de Norton et celle de Munson-Dawson supposent que la vitesse de fluage se stabilise au-delà d'une phase transitoire par l'effet compensatoire de la recouvrance (récupération lente et partielle de la déformation). A l'inverse, le modèle de Lemaitre admet l'existence d'un écrouissage en déformation, soit une vitesse de fluage qui diminue dans le temps (durcissement) ;
- **la prise en compte ou non d'un seuil de visco-plasticité, à partir duquel apparaissent les déformations différées.** Avant, le comportement est considéré comme élastique. Ce seuil est cependant souvent très faible, voire nul.

Parmi l'ensemble des modèles rhéologiques développés, les plus utilisés sont les modèles dits de puissance de Lemaitre ou de Norton (ou Norton Hoff). D'après Ghoreychi et Daupley (2004), ces deux lois « *peuvent être utilisées pour les études à long terme des exploitations de sel* ». La seule différence est la prise en compte ou non de la stationnarité du fluage.

La loi de Munson-Dawson **différencie les mécanismes de déformation** qui interviennent dans le processus de fluage du sel gemme, activé suivant l'état de contrainte et de température. Les mécanismes microscopiques responsables de la déformation du sel sont :

- le mécanisme de « dislocation climb », dominant à haute température et faible contrainte ;
- le mécanisme de « dislocation », dominant à basse température et faible contrainte ;
- le mécanisme de « dislocation slip » (glissement), dominant à forte contrainte.

La plupart des études expérimentales considèrent que la vitesse de déformation est égale à la somme des composantes élastique, stationnaire et transitoire.

Loi de Norton	Stationnarité du fluage	$\frac{d\varepsilon}{dt} = B \cdot e^{-\frac{\Delta H}{kT}} \cdot \sigma_d^n$	Expression uniquement du fluage transitoire
Loi de Lemaitre	Existence d'un écrouissage	$\frac{d\varepsilon}{dt} = B \cdot e^{-\frac{\Delta H}{kT}} \cdot \sigma_d^n \cdot \varepsilon^m$	Expression intégrant à la fois la phase transitoire et secondaire
Loi de Munson-Dawson	Stationnarité du fluage	$\frac{d\varepsilon}{dt} = \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{\text{climb}} + \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{\text{slip}} + \left(\frac{d\varepsilon}{dt}\right)_{\text{glide}}$ $\frac{d\varepsilon}{dt}_{\text{transitoire}} = F \frac{d\varepsilon}{dt}_{\text{stationnaire}}$ <p>F = fonction transitoire comportant trois phases : écrouissage, fluage stationnaire et recouvrance</p>	<p>Déformation totale décomposée en fluage transitoire et fluage stationnaire</p> <p>La composante stationnaire du fluage est déterminée selon les mécanismes de déformation dépendant des conditions de contraintes et de température.</p>

Tableau 1 : Caractéristiques des principales lois rhéologiques de type visco-plastique sans seuil

2.3. RUPTURE

La stabilité d'une cavité est garantie tant que la contrainte au voisinage de la cavité n'atteint pas les seuils suivant :

- résistance à la traction ;
- résistance au cisaillement à court terme ;
- résistance au cisaillement à long terme. Cette rupture se manifeste dans la phase tertiaire du fluage (cf. Illustration 3). Dans le cas du comportement viscoplastique, le critère de Tresca est couramment utilisé dans le domaine de la mécanique du sel (Ghoreychi, 1990).

D'après les caractéristiques viscoplastiques du sel gemme, il est d'usage de distinguer la rupture à court terme de la rupture différée. Cependant, le sel est un matériau susceptible de tolérer de grandes déformations sans se rompre, grâce au fluage. En dehors des cavités peu profondes, favorable à l'endommagement et la rupture à court terme, le problème mécanique lié aux cavités est plutôt l'évolution des déformations et des contraintes dans le massif que l'instabilité de la cavité proprement dite (Karimi, 2007).

2.3.1. Rupture à court terme

L'endommagement correspond à l'initiation de fissuration microscopique tandis que la rupture conduit à l'initiation d'une fissuration macroscopique (fracturation) qui peut entraîner le phénomène d'écaillage en paroi de la cavité.

L'hypothèse d'un critère de rupture en contrainte est généralement adoptée (Thorel, 1994). Ce critère dépend des contraintes déviatoriques mais également de la contrainte moyenne. Certains auteurs proposent que la rupture à court terme dépend également de la vitesse de déformation (Wallner, 1984).

L'endommagement du sel est plus précoce en extension qu'en compression (Cosenza, 1996).

Le comportement visco-plastique du sel gemme et les déformations associées n'est associée à aucune variation de volume (Thorel, 1994). On peut donc assimiler toute dilatance (déformation volumique) irréversible de la roche à une microfissuration de celle-ci (Cosenza, 1996). Ainsi, lors d'un essai triaxial, l'initiation de l'endommagement coïncide avec la perte de linéarité de la courbe contrainte moyenne- contrainte déviatorique (Cosenza, 1996). Notons que contrairement au fluage qui n'est régie que par la contrainte déviatorique, l'endommagement et la rupture dépendent de la contrainte moyenne et de la contrainte déviatorique.

Le dépassement du critère de rupture en traction est atteint quand la contrainte principale la moins compressive dépasse la résistance à la traction (faible contrainte déviatorique), ce qui est cas dans une cavité à très haute pression. La résistance à la traction du sel est faible, de l'ordre de 2 MPa pour le sel gemme (Thorel, 1994).

Le dépassement du critère de rupture en cisaillement est d'autant plus probable que la cavité est soumise à une contrainte déviatorique élevée et que la contrainte moyenne est faible. Ces conditions (faible contrainte moyenne, grand déviateur) sont en général réunies à court terme lorsque qu'une faible pression de fluide s'exerce sur la paroi.

2.3.2. Rupture à long terme

La rupture par fluage du sel gemme, qui se manifeste après un début de fluage tertiaire correspondant à une accélération de la déformation macroscopique, a été peu étudiée (Karimi, 2007).

Une vitesse modérée (typiquement inférieure à 1% par an) conduit rarement à des désordres mécaniques alors qu'une vitesse élevée de quelques pourcents par an, conduit à l'instabilité de l'ouvrage (Kazan et Ghoreychi, 1996). En effet, au-delà d'un seuil de contrainte, l'accélération du fluage se traduit par l'apparition du fluage tertiaire qui conduit à la rupture. Le mécanisme mis en jeu est la germination de vacuoles (cavités très petites), leur croissance puis coalescence, phénomène connu sous le nom de cavitation.

2.4. INFLUENCE DE L'ENDOMMAGEMENT SUR LE FLUAGE DU SEL (COUPLAGE HYDROMECHANIQUE)

L'effet de la microfissuration sur le comportement différé (fluage) semble avoir été peu étudié.

Cosenza (1996) suppose que les microfissurations (et l'augmentation de perméabilité induite) influencent les mécanismes de déformation viscoplastique : la perméabilité intervient dans le comportement viscoplastique d'un sel endommagé. Autrement, quand le seuil d'endommagement n'est pas dépassé, l'évolution de la perméabilité est

peu probable : le fluage ne résulte que d'une déformation viscoplastique des grains (Cosenza, 1996).

Cosenza (1996) a mis en œuvre des suivis expérimentaux en laboratoire pour qualifier l'influence de la microfissuration sur les processus de déformations viscoplastiques. Les résultats sont représentés en Illustration 4.

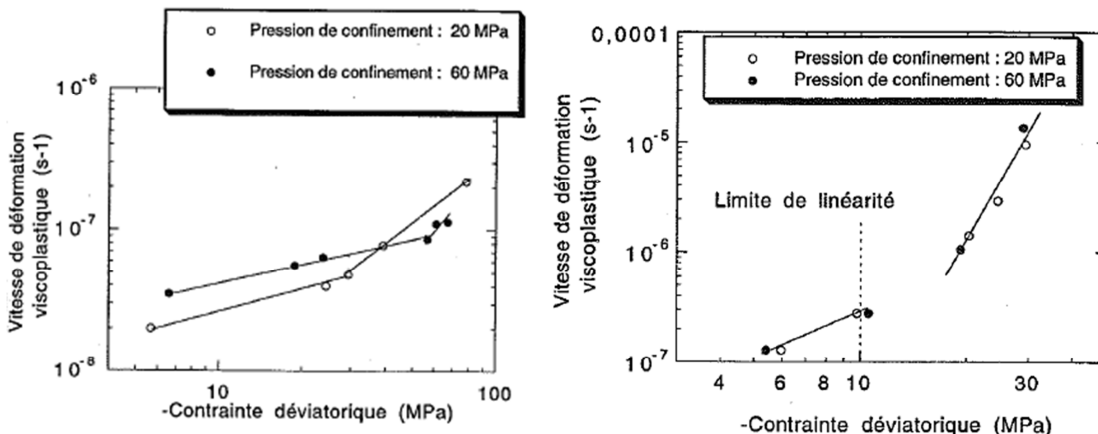


Illustration 4 : Evolution de la vitesse de déformation viscoplastique en fonction de la contrainte déviatorique lors d'essai triaxiaux de compression (Cosenza, 1996)
 a) à gauche : à l'état sec, par palier de relaxation (au début de chaque palier)
 b) à droite : à l'état humide, par palier de fluage

Le développement de microfissuration correspond au changement de linéarité des droites. Si la transposition aux cavités in situ de ces résultats en laboratoire reste délicate, il semblerait que l'endommagement du sel tend à accentuer la vitesse de déformation. Dans tous les cas, ces expériences témoignent de l'influence du comportement mécanique fragile (et notamment le développement de microfissures), avec le comportement viscoplastique différé.




3. Scénarios de risques spécifique d'une mine de sel

Etant donnée la complexité et l'interaction des processus mis en jeux, ce chapitre aborde séparément l'effet des différents phénomènes physiques élémentaires spécifiquement attendus dans une mine de sel : le fluage, l'arrivée d'eau, et plus spécifiquement la dissolution induite par l'arrivée d'eau non saturée. La dernière partie aborde l'effet combiné de ces phénomènes sur l'évolution de la pression.

Nous distinguerons **l'eau non saturée**, n'ayant pas atteint sa concentration maximale en sel et donc, toujours capable de dissoudre du sel (régime transitoire) de **l'eau saturée**, soit une eau contenant du sel dissous à sa solubilité maximale (régime permanent). On appellera de manière plus générale, **saumure**, une eau contenant du sel dissous.

Ce cadre général doit pouvoir être décliné à chaque configuration particulière et notamment aux méthodes de travaux employés. Elles peuvent être de trois types :

- exploitation totale du minerai puis le remblayage des vides par des matériaux ;
- exploitation totale du minerai puis le foudroyage des terrains du recouvrement, comblant les vides ;
- exploitation partielle (typiquement les exploitations par chambres et piliers abandonnés), laissant des vides.

	Exploitation remblayée
	Exploitation partielle
	Exploitation foudroyée

De manière à envisager tous les scénarios d'évolution, cette analyse vise à lister de façon exhaustive l'ensemble des effets induits attendus au fond sans se préoccuper des effets en surface. Ils permettront, dans un second temps seulement (chapitre 5), de relier à l'échelle d'une exploitation minière, les configurations au fond, aux mouvements de terrain qu'elles sont susceptibles d'entraîner en surface.

Rappelons que vis-à-vis de l'analyse de stabilité, les mécanismes d'instabilité sont distincts selon les stades d'évolution d'un système minier (cf. Illustration 1) : **l'état transitoire** pendant lequel les effets de la dissolution liés à l'intrusion d'eau, perturbent l'équilibre mécanique du système minier et **l'état permanent**, correspondant au très long terme, une fois que le seuil de solubilité maximal est atteint.

3.1. CONSEQUENCES DU FLUAGE DU MINERAI DE SEL

Le sel a la particularité d'être soumis à un comportement viscoplastique sans seuil, décrit au § 2.2. La mesure de ce fluage est donnée par les lois de comportement viscoplastiques détaillées dans le chapitre 2. Les principaux paramètres influençant la cinétique de ce fluage, sont listés dans le Tableau 2 ci-après.

Les effets induits par le fluage sont listés dans les paragraphes ci-après puis synthétisés dans le § 3.1.3.

3.1.1. Modification des contraintes

a) Dans le gisement

La déformation des massifs de sel résiduels de la mine peut mettre en cause la stabilité de la cavité. Plus précisément, quand il reste des vides résiduels, l'effet du fluage des piliers et/ou du bas-toit sur la stabilité d'ensemble, mériterait d'être précisé puisque ces deux éléments garantissent initialement la stabilité.

Pour mémoire, la vitesse de déformation différée des piliers des mines de sel en Lorraine est de quelques mm/an (Ghoreychi et Daupley, 2004).

b) Dans le recouvrement

Les déformations imposées par le fluage des massifs de sel résiduels de la mine, seront encaissées différemment selon les caractéristiques mécaniques des terrains du recouvrement et leur nature ductile ou fragile.

a) Report de charge latéral

Les déformations à l'aplomb des cavités impliquent également des déformations latéralement, sous l'effet d'une influence latérale des modifications de contraintes. Quand les caractéristiques des cavités souterraines, et donc l'ampleur du fluage, sont variables latéralement, il est donc important d'estimer les conséquences des modifications de contraintes sur les massifs voisins, notamment s'ils sont situés entre deux zones exploitées.

3.1.2. Diminution du volume des vides au fond

La convergence entraîne nécessairement la diminution du volume des vides résiduels au sein de la cavité.

a) Amélioration du compactage des terrains déconsolidés

Sur certains secteurs, des matériaux non en place subsistent, qu'ils consistent en des produits de remblayage ou des massifs éboulés suite au foudroyage par exemple. La convergence induite par le fluage du minerai de sel (s'il en restait avant le foudroyage ou le remblayage), aura tendance à compacter ces horizons et à réduire les vides résiduels liés à leur porosité.

b) Augmentation de la pression dans une cavité fermée

En réduisant le volume des vides, et dès que le système minier peut être considéré comme fermé, le fluage implique l'augmentation de la pression dans la cavité qu'elle soit ennoyée (régime long terme) ou sèche (régime transitoire). Cependant, l'évolution de la pression dépend également fortement d'autres phénomènes, elle sera évoquée globalement dans le § 3.4.

c) Amélioration de la stabilité

En réduisant le volume des vides disponible, le fluage aura tendance à ne pas accentuer, a priori, les critères d'instabilité des structures souterraines (diminution de l'élançement des piliers et de la portée des chambres par exemple). Cependant, l'effet de la déformation des piliers et du bas-toit, sur leur stabilité mériterait d'être précisé puisque ces deux éléments garantissent la stabilité des cavités (cf. § 3.1.1.c.).

3.1.3. Synthèse des conséquences du fluage

L'illustration 5 schématise les principales conséquences du fluage des massifs de sel résiduels de la mine, qui pourraient avoir des effets en termes de stabilité en surface. Retenons en les principales :

- la déformation des massifs de sel résiduels, dont l'effet sur la stabilité de la cavité doit être évalué ;
- les modifications des contraintes dans le recouvrement à l'aplomb des massifs de sel résiduels soumis au fluage ;
- le report de contrainte sur les massifs latéraux ;
- l'augmentation de la pression dans les cavités, si le système minier est considéré comme fermé.

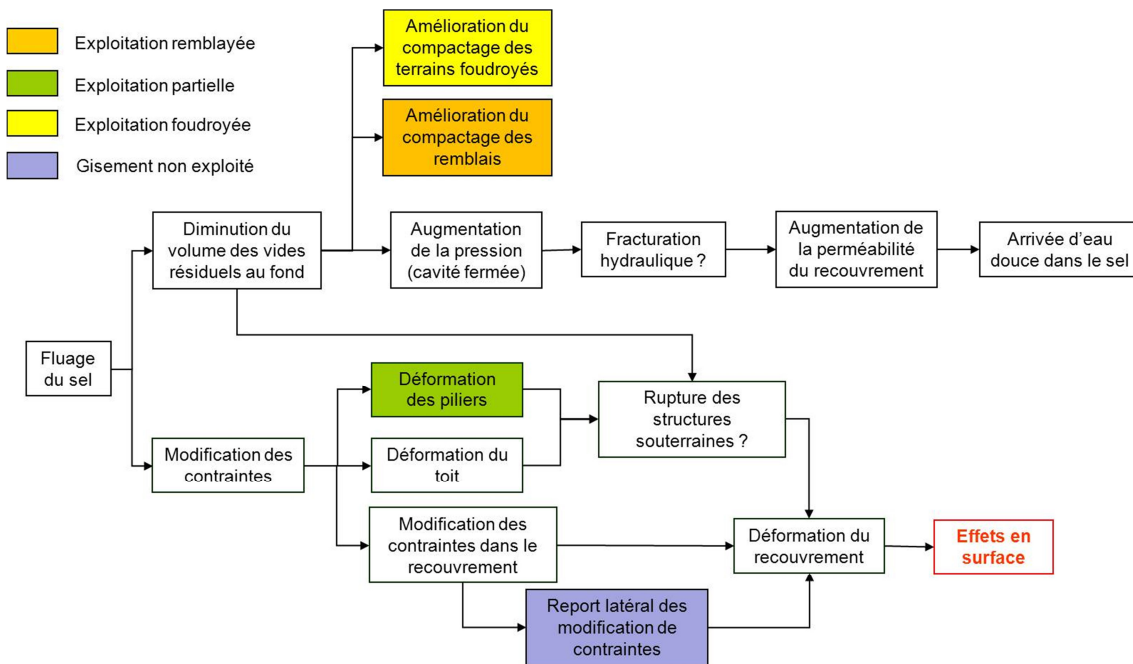


Illustration 5 : Principaux effets induits par le fluage

3.2. CONSEQUENCES LIEES A L'ARRIVEE D'EAU EN GENERAL

Les principales conséquences induites par l'arrivée d'eau sont listées dans les paragraphes ci-après puis synthétisées dans le § 3.2.7. Elles rejoignent plus généralement, les conséquences de l'ennoyage sur les bassins miniers, sujets de nombreuses recherches.

Les particularités liées à l'arrivée d'eau non saturée seront détaillées dans le chapitre suivant (§ 3.3).

3.2.1. Scénario d'arrivée d'eau (écoulement vertical)

La couche salifère exploitée est naturellement protégée de toute arrivée d'eau, ce qui a ainsi permis d'éviter jusqu'alors sa dissolution. Cependant, suite à l'exploitation, plusieurs scénarios peuvent détériorer cette protection naturelle.

L'augmentation de la perméabilité au droit d'une cavité minière, favorisant l'infiltration verticale, est envisageable par :

- la fracturation hydraulique à la paroi des cavités minières ;
- la déformation des terrains de recouvrement, notamment ceux qui se sont affaïssés ou effondrés ;
- la déformation des terrains de recouvrement d'exploitations voisines ;

- la création de drains de circulation induits par :
 - le défaut dans la mise en sécurité des puits (abordé spéciquement au § 4.2) ;
 - l'ouverture de nouveaux forages, indépendamment de l'exploitation minière, après la fin de celle-ci ;
 - l'augmentation de la perméabilité des discontinuités structurales naturelles existantes provoquée par la modification des contraintes liées à l'exploitation (Charmoille et Thoraval, 2010).

L'arrivée d'eau redoutée se fait principalement en provenance de la surface. L'enjeu majeur est donc l'écoulement vertical.

3.2.2. Modification du comportement mécaniques du sel

a) Diminution de la résistance mécanique du sel

La résistance mécanique du sel diminue avec l'humidité.

Plus précisément, Cosenza (1996) a mis en évidence l'effet de fluide sous pression sur les critères de rupture, à partir d'essais triaxiaux sur des échantillons de sel des MDPAs. Leur présence diminue la résistance à la compression et le seuil d'endommagement (cf. Illustration 6). Le comportement ductile du sel en condition sèche (encaissant de forte déformation sans se rompre) semble devenir fragile au contact de fluide. La pression interstitielle semble donc jouer un rôle dans les mécanismes d'initiation et de propagation de la microfissuration bien que la transposition de ces résultats à des situations réelles soit délicate (i.e. mise à l'échelle..). L'effet de cette pression interstitielle nécessite la pénétration de la saumure dans le massif, donc, une perméabilité, même faible, du massif (Ghoreychi et Daupley, 2004). Notons par ailleurs que l'augmentation de la contrainte moyenne (pression de confinement) n'améliore pas la résistance à la compression d'un sel lorsqu'il est en contact avec un fluide (cf. Illustration 6).

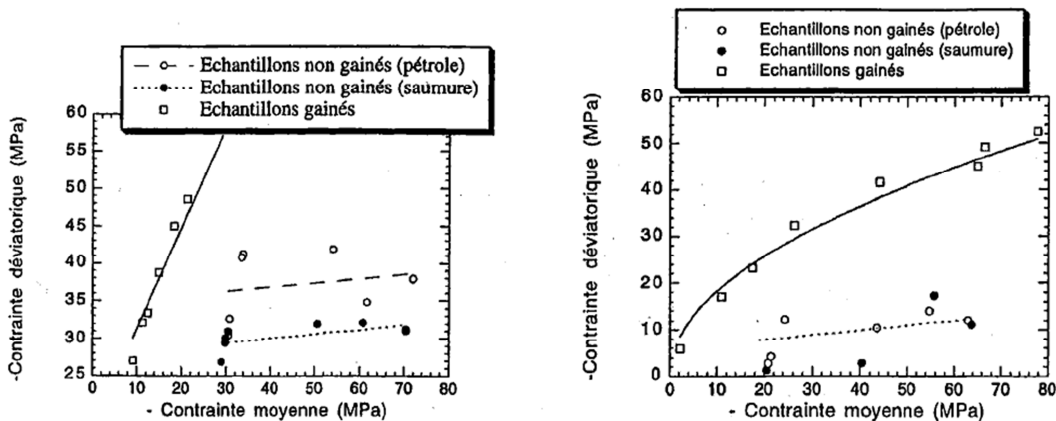


Illustration 6 : Etat des contraintes lors du dépassement du critère de rupture (à gauche) et d'endommagement (à droite) selon les conditions sèches ou humides (Cosenza, 1996)

b) Accélération du fluage

Les études expérimentales montrent que la vitesse de fluage du sel augmente avec l'hygrométrie ; plus précisément, cette accélération concerne principalement la phase de fluage transitoire (Ghazali, 1995).

3.2.3. Modification des propriétés mécaniques des roches non salines

Il est convenu que l'eau modifie les propriétés mécaniques des terrains. Certaines formations sensibles à l'eau peuvent perdre la moitié de leur résistance mécanique en passant d'un état sec à saturé (Main et al., 2008).

Ainsi, en Lorraine, le poinçonnement des piliers de la mine de Varangéville serait lié à une arrivée de saumure qui aurait dégradé les propriétés mécaniques des marnes du mur (« Marnes Irisées Inférieures », entraînant le soufflage de ce dernier. Cette hypothèse n'a cependant pas été clairement confirmée.

Par ailleurs, l'effondrement historique des cavités à Gellenoncourt aurait été causé par la dégradation des propriétés mécaniques du toit, au contact avec la saumure après dissolution du bas-toit. Il se trouve que cet horizon appartient à la même formation lithostratigraphique que le mur de la mine de Varangéville (Synthèse des travaux du Gisos, 2006).

3.2.4. Modification de l'état des contraintes effective

La remise en équilibre des pressions interstitielles, modifie les contraintes effectives au sein du massif et est susceptible d'entraîner un endommagement des terrains de recouvrement.

Plus précisément, cette modification de l'état des contraintes peut entraîner un réajustement des terrains déconsolidés (foudroyés ou éboulés), voire un soulèvement

de la surface. Lors de l'envoyage des vides souterrains dans des bassins houillers, il a été mis en évidence que la surface subit une surrection, gouvernée par la dilatation d'un réservoir constitué par les roches foudroyées sous l'effet des pressions interstitielles (cf Synthèse des travaux du GISOS 2009).

3.2.5. Gonflement de certaines formations du recouvrement

Certains horizons, comme les minéraux argileux, subissent un gonflement au contact de l'eau. Dans le cadre du programme européen RFCS (Research Fund for Coal and Steel), il a effectivement été montré que le gonflement des roches argileuses au contact de l'eau participe au soulèvement de la surface observé lors de l'envoyage, bien que cette participation reste limitée par rapport au rôle de la pression interstitielle (cf Rapport de Synthèse du GISOS 2009). Ce phénomène de gonflement ne peut se produire que lorsque la contrainte verticale est inférieure à la pression de gonflement ; il est, par conséquent, tributaire de la profondeur de l'exploitation. Ainsi, pour les schistes lorrains, le gonflement ne contribue au soulèvement de la surface qu'à moins de 250 m de profondeur (cf Synthèse des travaux du GISOS, 2009).

Par ailleurs, l'anhydrite est une roche évaporitique qui a la particularité de s'hydrater en gypse au contact d'eau, en s'accompagnant d'un gonflement (30 % du volume initial de l'anhydrite). Cette modification de volume peut entraîner le délitage macroscopique ou la fissuration des parties non sensibles à la dissolution (Ghazali, 1995).

3.2.6. Confinement des cavités

Dans ce cas spécifique, deux phénomènes ont a priori des effets opposés en termes de stabilité : le confinement de la cavité et la diminution de la résistance du sel. L'état des connaissances sur l'action mécanique d'une eau saturée (non réactive) sur la stabilité à long terme de cavités minières est discuté par Ghoreychi et Daupley (2004), qui mettent effectivement en évidence la complexité des mécanismes mis en jeu.

Il semble que dans le cas où le sel est très peu perméable et où la dissolution n'est plus possible (eau saturée), la pression de fluide semble effectivement participer au confinement de la cavité (Main et al., 2008). Ghoreychi et Daupley (2004) expliquent, que, dans le cas où le cœur de pilier reste imperméable, la pression exercée par le fluide ne pourrait alors être assimilée à une pression interstitielle mais agirait plutôt comme une pression de confinement.

3.2.7. Augmentation de la pression

L'arrivée d'un fluide dans un système minier fermé aura tendance à augmenter la pression dans la cavité. Cependant, l'évolution de la pression dépend également fortement d'autres phénomènes, elle sera évoquée globalement dans le § 3.4.

3.2.8. Synthèse des conséquences liées à l'arrivée d'eau

Dans le cas général, les principaux phénomènes induits par l'intrusion d'eau (saturée ou non), synthétisés dans la Illustration 7 sont :

- la diminution de la résistance mécanique du sel
- l'augmentation de la vitesse de fluage ;
- la modification des propriétés mécaniques des terrains sensibles à l'humidité voire leur gonflement, pouvant déclencher ainsi des instabilités du mur, du toit ou du recouvrement ;
- la modification des contraintes dans le recouvrement entrainant notamment le réajustement des terrains déconsolidés par l'exploitation.

Notons que la migration de la saumure peut être induite à l'échelle d'un massif l'effet d'un gradient thermique et s'écouler vers une source chaude à l'intérieur des travaux miniers, à l'instar des processus se déroulant dans la galerie de stockage de déchets radioactifs (Ghazali, 1995).

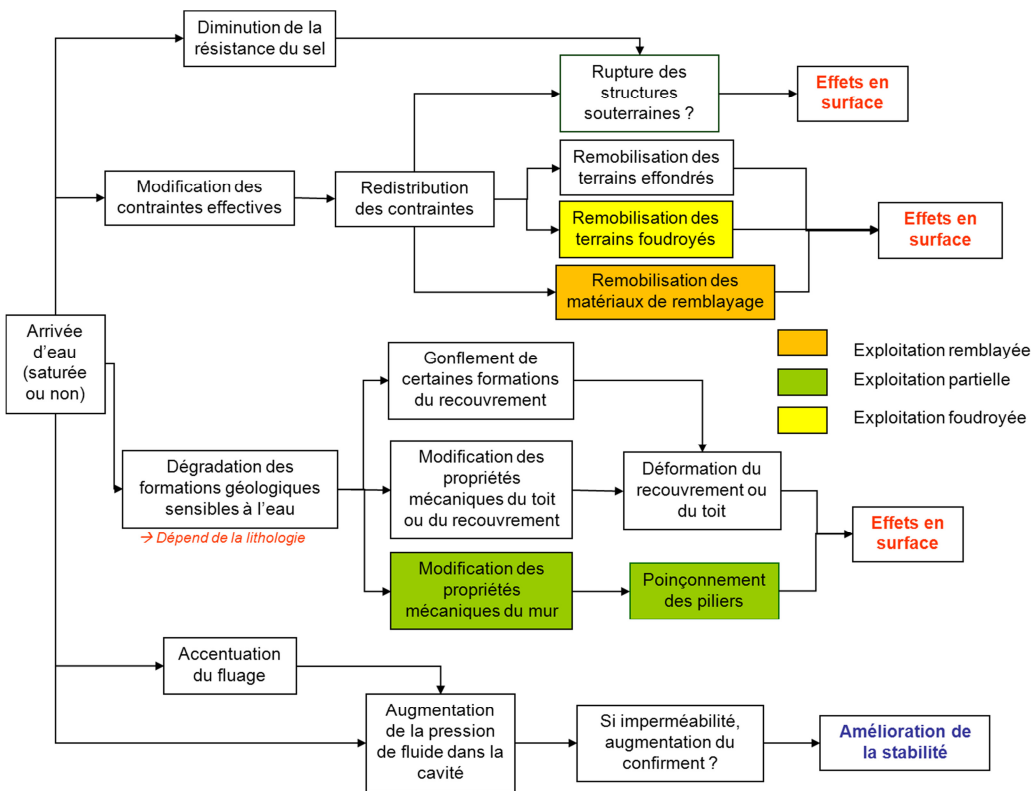


Illustration 7 : Conséquence induite par l'arrivée d'eau, en général

3.3. CONSEQUENCES DE LA DISSOLUTION DU SEL LIEES A L'ARRIVEE D'EAU NON SATUREE

3.3.1. Augmentation du volume des vides au fond

a) Modification de la géométrie des exploitations existantes

Une modification de la géométrie de la cavité se traduit mécaniquement par une redistribution des contraintes autour de la cavité, phénomène non instantané et correspondant à un comportement transitoire de la cavité saline dit « géométrique » à distinguer du comportement transitoire lié au fluage « rhéologique » observée lors de tests sur échantillons en laboratoire et décrit au chapitre 2 (Karimi, 2007).

Ainsi, en augmentant notamment la portée du toit ou l'élanement de pilier, la dissolution du sel peut remettre en cause la stabilité des structures souterraines (notamment des piliers ou du bas toit). L'effet complémentaire du fluage (cf. § 3.1.2.c.) nécessite d'être pris en compte.

Il faut noter que la dissolution du sel et les volumes de vides créés ne sont pas uniformément répartis et dépendent du point d'intrusion de l'eau et de la vitesse d'écoulement (Berest et al., 2003).

b) Extension des vides au-delà des exploitations existantes

Cette dissolution peut également concerner les massifs de sel environnants latéralement l'exploitation, comme les extrémités des travaux ou les massifs de protection laissés entre deux exploitations voisines.

c) Diminution de la pression

Etant donnée la différence de densité entre le sel et la saumure¹, l'augmentation de volume de saumure dans la cavité reste inférieure au volume de sel dissous. La dissolution stricto sensu, aura donc tendance à entraîner une diminution de la pression dans la cavité (Karimi, 2007), ce qui se traduira mécaniquement par une redistribution des contraintes (fluage géométrique). Cependant, l'évolution de la pression dépend également fortement d'autres phénomènes ; elle sera évoquée globalement dans le § 3.4.

¹ A titre d'exemple, d'après Berest et al. (1997), $\rho_{\text{saumure}} = 1200 \text{ kg/m}^3$ et $\rho_{\text{sel}} = 2200 \text{ kg/m}^3$

3.3.2. Dissolution d'autres horizons évaporitiques présents dans la formation salifère constituant le recouvrement

Cette forte solubilité peut également concerner d'autres horizons évaporitiques présents dans le recouvrement, puisque le minerai de sel exploité appartient à une formation salifère dans laquelle la présence d'autres niveaux salifères est très probable. Citons par exemple, la formation par dissolution, d'une cavité de plusieurs centaines de mètres de diamètre, dans un niveau évaporitique du recouvrement, dans le champ pétrolifère d'Haoud Berkaoui, en Algérie (Morisseau, 2000).

3.3.3. Synthèse des conséquences de la dissolution du sel induite par l'arrivée d'eau non saturée

L'arrivée d'eau non saturée s'avère particulièrement préjudiciable en termes de stabilité vu la forte solubilité du sel gemme. Les principaux phénomènes induits par l'intrusion d'eau non saturée, synthétisés en Illustration 5, sont :

- la modification de la géométrie des exploitations, entraînant la redistribution des contraintes, pouvant remettre en cause la stabilité des structures souterraines ;
- la dissolution d'autres horizons évaporitiques présents dans le recouvrement, associés à la formation salifère.

Avec l'arrivée d'une eau non saturée, notons que deux phénomènes ont a priori des effets opposés en termes de volume des vides : le fluage qui tend à le diminuer et la dissolution qui tend à l'augmenter.

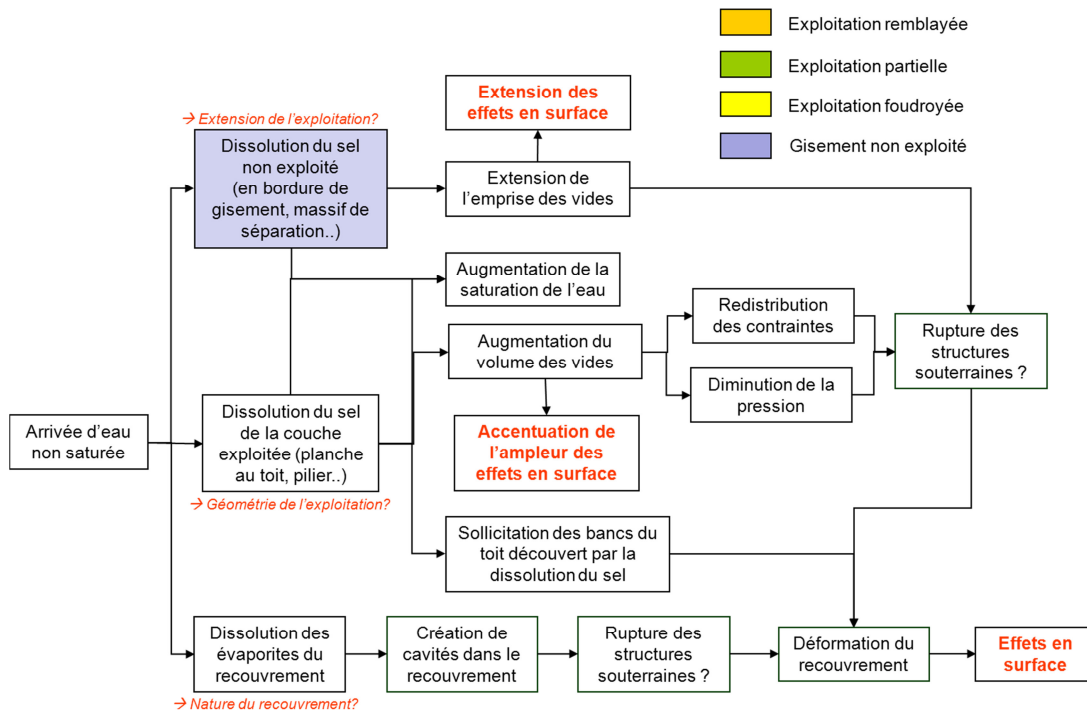


Illustration 8 : Conséquence induite par l'arrivée d'eau non saturée

3.4. CONSEQUENCES LIEES A L'EVOLUTION DE LA PRESSION DANS UNE CAVITE FERMEE LIEES AU COUPLAGE FLUAGE / ARRIVEE D'EAU SATUREE

Nous évoquerons l'interaction de plusieurs phénomènes (fluage, dilatation thermique, compressibilité du sel, ..), qui régissent la pression dans une cavité saline, à partir notamment des études de Berest et al. (1997) et Karimi (2007) avec une eau saturée, i.e. une eau contenant du sel dissous à sa solubilité maximale. Notons donc que la dissolution du sel n'entre donc pas en jeu.

Phénomènes régissant la pression dans une cavité saline

Rappelons les phénomènes auxquels est soumis un fluide entrant dans une cavité saline :

- A une profondeur donnée, la température est donnée par le gradient géothermique, généralement faible dans le sel, vu la conductivité de cette roche. Le fluide entrant dans le gisement, va se réchauffer par mélange avec le sel dissout et par conduction thermique avec le massif. L'augmentation de la pression dans la cavité participe également à augmenter la température du fluide par compression adiabatique (Karimi, 2007) ;
- L'expansion thermique de la saumure est une augmentation de volume régit par le coefficient d'expansion thermique² et l'écart de température ;
- La pénétration de la saumure dans le massif salifère est particulièrement faible en général, puisque liée à la perméabilité du sel, mais on a vu que celle-ci augmente avec la présence d'impuretés (argiles et anhydrite) ou dès que le sel est endommagé.

La pression va avoir tendance à augmenter dans une cavité fermée sous l'effet du fluage du sel. L'arrivée d'une saumure puis son expansion thermique (phénomène contrôlé par le gradient géothermique), accentuera cette augmentation de pression. Cette augmentation doit cependant tenir compte de deux phénomènes ayant tendance à diminuer cet effet : la pénétration du fluide dans le massif et la migration par les puits. L'influence relative de ces phénomènes dépend de la taille de la cavité, de sa profondeur et des caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sel (perméabilité et pression interstitielle).

Pendant une période transitoire, il y a un pic de pression dans la cavité lié essentiellement à l'expansion thermique de la saumure, ce que montre l'illustration 9. La durée de cette phase transitoire, durant laquelle l'écart de température diminue, est liée essentiellement à la taille de la cavité ; elle peut durer entre 1 et 16 ans d'après Berest et al. (1997). L'illustration 9 montre également que l'effet de l'expansion est plus important à grande profondeur, où les écarts thermiques sont plus grands.

² Le coefficient d'expansion thermique vaut $4.4 \cdot 10^{-4}/^{\circ}\text{C}$ d'après Boucly (1981)

En régime permanent, l'écart de température entre la saumure et la cavité diminuant avec le temps, le fluage et la pénétration dans le massif deviennent les phénomènes régissant la pression (Karimi, 2007). L'effet de la pénétration dans le massif est d'autant plus marqué que la perméabilité du sel est petite et que la cavité est grande (cf. Illustration 10).

Il existe donc une pression d'équilibre pour laquelle le débit expulsé de la cavité dans le massif (et fuites), s'équilibre avec la vitesse de perte de volume de la cavité par fluage (Berest, 1997). Notons que par ailleurs, la vitesse de fluage diminue puisque la pression augmente.

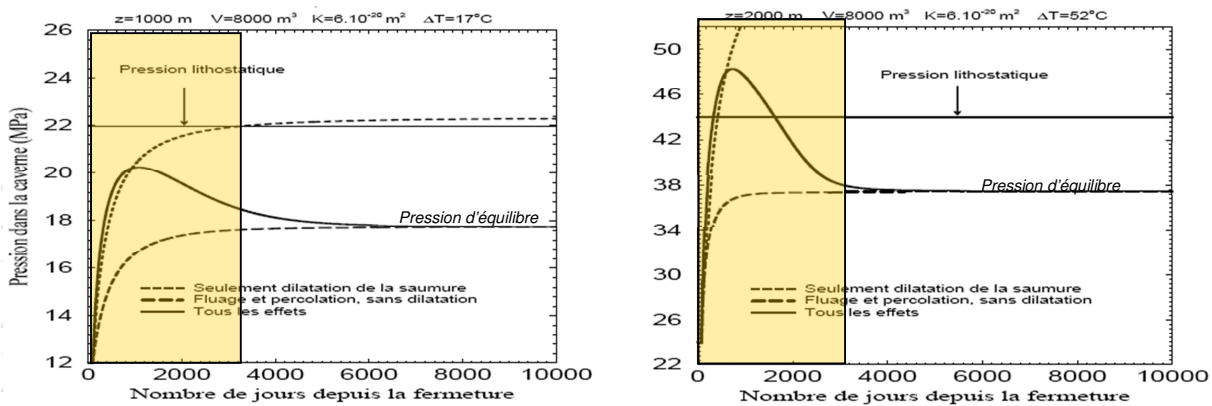


Illustration 9 : Evolution théorique de la pression suivant les phénomènes considérés (d'après Berest, 1997)
à gauche : à faible profondeur (1000 m),
à droite : à forte profondeur (2000 m)

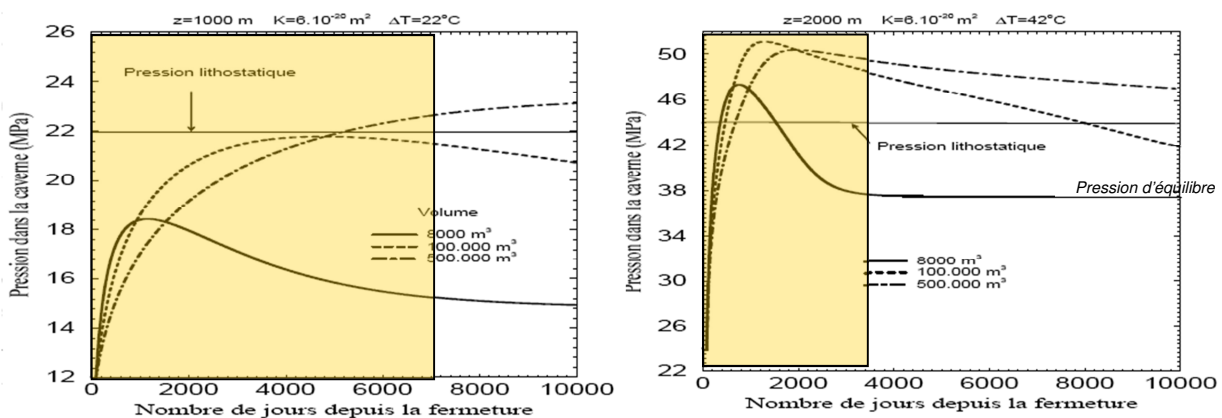


Illustration 10 : Evolution théorique de la pression suivant le volume de la cavité (d'après Berest, 1997)
à gauche : à faible profondeur (1000 m),
à droite : à forte profondeur (2000 m)

Risque de fracturation hydraulique de la cavité

L'augmentation de la pression de fluide peut engendrer une fracturation hydraulique à la paroi de la cavité, accompagnée d'une augmentation de la perméabilité (Karimi, 2007). Le fluage participe à augmenter cette pression, bien qu'il faille tenir compte de la pénétration de la saumure dans le massif et des fuites latérales (puits, faille..), comme décrit ci-dessus. Cette rupture est atteinte quand la pression de fluide dans la cavité dépasse la pression lithostatique. La pression d'équilibre permettant d'éviter la fracturation naturelle est donc inférieure à la pression lithostatique et supérieure à la pression halmostatique.

D'après les conclusions de Berest et al. (1997) décrites ci-dessus, le risque de fracturation est donc maximum en période transitoire (par l'effet d'expansion thermique) et accentué aux grandes profondeurs.

Du fait des contrastes de densité entre la saumure et le sel, ces ruptures interviennent préférentiellement dans la partie haute de la cavité (Chamoille et Thoraval, 2010).

3.5. PRINCIPAUX PARAMETRES SUSCEPTIBLES D'INFLUENCER LE COMPORTEMENT D'UNE CAVITE

Ce chapitre a présenté séparément l'effet des différents phénomènes physiques élémentaires spécifiquement attendus dans une mine de sel, dans l'objectif d'être exhaustif. Cet état des lieux général doit pouvoir être décliné ensuite à chaque configuration particulière, notamment pour prendre en compte l'interaction entre les processus.

Le Tableau 2 synthétise les paramètres influençant la perméabilité de la cavité, la résistance du sel et les caractéristiques du fluage.

	Perméabilité de la cavité	Résistance du sel	Vitesse de fluage
Profondeur de la cavité		X	X
Forme de la cavité			X
Voisinage d'autres cavités	X		X
Discontinuités structurales et géologiques	X		
Propriétés pétrologiques du sel	X	X	X
Gradient géothermique (naturel et anthropique)		X	X
Nature du recouvrement (épaisseur, caractéristiques..)	X		X
Pression dans la cavité	X		X
Planche³ de sel au toit	X		

Tableau 2 : Principaux paramètres intervenant dans le comportement d'une cavité

³ Une planche de sel est une épaisseur de sel laissée volontairement par l'exploitant au toit de la mine, pour assurer la stabilité pendant l'exploitation

4. Scénarios de risques liés aux ouvrages débouchant au jour (puits, forage ..)

L'état d'un puits et notamment sa mise en sécurité, déterminent les scénarios de risque sachant que les différents modes de traitement d'un ouvrage (qui peuvent être cumulés) sont :

- une obturation superficielle, prenant appui sur les terrains superficiels (ex : dalle, plancher en bois) ;
- une obturation ancrée dans la colonne de puits (ex : bouchon béton) ;
- un remblayage de la colonne de puits ;
- la colonne de puits laissée vide.

A long terme, la mise en sécurité des puits doit assurer :

- d'une part, comme toutes les exploitations minières, la stabilité du puits au risque de provoquer un mouvement de terrain (dont l'emprise sera limitée à celle de l'ouvrage) ;
- d'autre part, spécifiquement pour les exploitations salines, une étanchéité suffisante au risque de déclencher indirectement ensuite un mouvement de terrain (dont l'emprise peut être beaucoup plus étendue que celle de l'ouvrage) par dissolution du minéral. En effet, ces ouvrages constituent des drains préférentiels susceptibles de favoriser l'intrusion d'eau dans la mine (par écoulement vertical).

Rappelons que les problématiques de pollutions liées à une fuite de saumure vers des nappes supérieures, ne sont pas étudiées.

4.1. SCENARIO D'INSTABILITE DE L'OUVRAGE

Les instabilités de type mouvement de terrain qu'on peut attendre au droit d'un puits, dépendent essentiellement de l'état de l'ouvrage et de son mode de traitement.

Les scénarios à envisager sont la rupture du revêtement de l'ouvrage, la rupture du mode de traitement (dalle, bouchon béton) ou le débouillage des remblais. Les facteurs de prédisposition à étudier sont notamment les surcontraintes spécifiques (surcharge mécanique, modification hydraulique, secousse sismique..) et les caractéristiques des obturations (dimension, résistance..) par rapport aux caractéristiques mécaniques des terrains d'ancrage. Ces facteurs sont synthétisés en fin de chapitre, dans le Tableau 3.

Dans ces scénarios de risques, l'effondrement se circonscrit généralement au seul diamètre de puits, augmentée d'une zone d'influence dépendant de la compétence et de la cohésion des terrains superficiels environnants. Le rayon de l'emprise autour du puits peut atteindre jusqu'à 10 - 20 m, dans les cas les plus défavorables.

4.1.1. Scénario de dysfonctionnement

Les scénarios de rupture sont décrits individuellement, sachant que selon les caractéristiques de chaque ouvrage, il s'agira d'évaluer plutôt la combinaison de ces

événements unitaires pour qu'un mouvement de terrain puisse être perceptible en surface. En effet, l'écoulement des remblais sous un bouchon béton autoportant aura peu d'incidence mais pourra déstabiliser une obturation qui prend appui dessus.

a) Rupture de l'obturation superficielle

La rupture de l'obturation superficielle peut, soit venir de la rupture de la structure en elle-même soit, être entraînée par la rupture des terrains d'ancrage, ceci dépendant des caractéristiques relatives de ces deux éléments.

Leur dimensionnement (épaisseur, section, résistance..) doit prendre en compte les caractéristiques mécaniques des terrains d'ancrages. Le facteur de sécurité doit également tenir compte des surcharges sismiques envisageables.

L'obturation est généralement surélevée par rapport au niveau du sol de façon à signaler de manière apparente la position exacte du puits et à limiter ainsi les surcharges supplémentaires.

Pour les puits pour lesquels la dalle a été ancrée sous le niveau du terrain naturel, il est nécessaire de tenir compte d'éventuelles surcharges applicables en surface (stockage de surface, sollicitations vibratoires lié à la circulation routière).

b) Rupture de la colonne de puits

La colonne de puits peut être foncée directement au rocher, revêtue d'un cuvelage étanche ou maçonnée en briques, selon la nature des terrains traversés (zone aquifère, rocher compétent..). Suivant leur caractéristiques mécaniques et notamment leurs caractéristiques de fluage, les terrains traversés peuvent déformer le revêtement et pourrait provoquer sa rupture.

c) Rupture du bouchon béton

Les critères de dimensionnement d'un bouchon autoportant doivent tenir compte des caractéristiques mécaniques des terrains d'ancrage et également des surcontraintes spécifiques (modification hydraulique, secousse sismique..).

d) Ecoulement (ou débouillage) des remblais

Les remblais mis en place dans le puits peuvent être amenés à s'écouler.

La présence de galeries (recettes), non obturées le long de la colonne de puits est un facteur défavorable, puisque les remblais peuvent s'y écouler. Des sollicitations hydrauliques accentueront ces mouvements de matériaux.

La nature des matériaux (calibrage, triage...) de remblayage est également importante pour évaluer leur prédisposition au tassement vertical et au fluage latéral. Ainsi des gros blocs resteront plus facilement en place que des particules fines qui auront tendance à s'écouler gravitairement.

4.1.2. Synthèse des facteurs de prédisposition envisageables

Le Tableau 3 énumère les principaux facteurs de prédisposition à considérer, selon le scénario redouté.

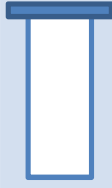



		Scénario unitaire de dysfonctionnement			
					
		Rupture de la dalle	Rupture du bouchon de béton	Rupture de la colonne de puits	Ecoulement des remblais
Facteur de prédisposition aggravant	<i>Surcontrainte appliquée en surface (vibrations, surcharge.)</i>	X	X		
	<i>Sollicitation sismique</i>	X	X	X	X
	<i>Modification hydraulique (remontée de nappe, battement, infiltration..)</i>				X
Facteur de prédisposition permanent	<i>Mode d'obturation des recettes</i>				X
	<i>Présence de niveaux évaporitiques</i>			X	
	<i>Caractéristique des obturations (dimensions, résistances mécaniques..)</i>	X	X		
	<i>Caractéristiques des terrains superficiels</i>	X			
	<i>Caractéristiques de terrains encaissants</i>		X	X	

Tableau 3 : Principaux facteurs de prédisposition à considérer selon le scénario redouté

4.2. SCENARIO D'INFILTRATION DES EAUX

4.2.1. Descriptif des mouvements de terrain induits

Dans le cas des exploitations salines, la mise en sécurité des puits doit assurer une imperméabilité suffisante pour limiter l'intrusion d'eau et éviter ainsi la dissolution du minerai au fond et celle des horizons évaporitiques présents dans le recouvrement le long de la colonne de puits. Les mouvements de terrain induits peuvent être considérables. On se reportera à ce sujet au § 3.3. Les exemples d'instabilités majeures provoquées par une dissolution initiée par un puits sont nombreux comme en témoigne l'accidentologie détaillée par Chamoille et Thoraval, (2010). Citons par exemple, le déclenchement d'un effondrement généralisé de 300 m de diamètre et 75 m de profondeur provoqué par un forage, dans le champ pétrolifère d'Haoud Berkaoui, en Algérie (Morisseau, 2000).

Le long de la colonne de puits, selon l'épaisseur des niveaux évaporitiques soumis à la dissolution, l'ampleur de la dissolution peut en effet, entraîner un sous-cavage de la partie supérieure et accentuer le vide résiduel autour de la colonne de puits. Dans le schéma de principe que proposent les MDPA (cf. Illustration 11), le vide annulaire désolidarise progressivement le parement du rocher.

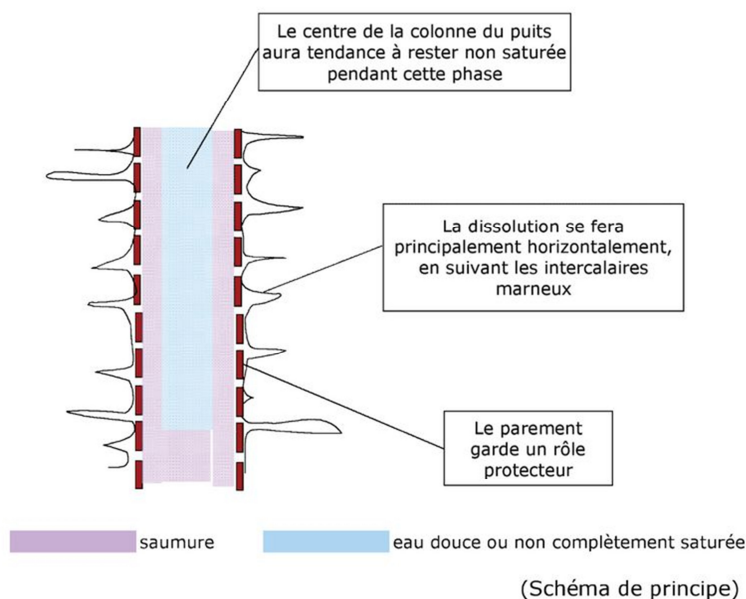


Illustration 11 : Schéma de principe proposé par les MDPA sur l'allure des dissolutions le long de la colonne de puits, pendant l'ennoyage (Source : www.mdpa.fr)

Dans le cas général, l'étanchéité est garantie par celle de tous les éléments constitutifs de l'ouvrage d'une part (cf. § 4.2.2) et par l'adéquation de ces constituants avec les caractéristiques des terrains traversés, d'autre part (cf. § 4.2.3) (Chamoille et Thoraval (2010).

4.2.2. Scénario de rupture d'étanchéité des éléments constitutifs

Les composants d'un puits visant l'étanchéité sont :

- Le cuvelage, partie étanche du revêtement d'un puits, visant à garantir l'étanchéité latérale ;
- Le ciment primaire, mis en place dans l'annulaire du puits, et participant en partie à l'étanchéité verticale et latérale ;
- Le bouchon béton, visant à garantir l'étanchéité verticale.

Chacun de ces éléments a une perméabilité intrinsèque qui, bien que faible, n'est jamais nulle. D'autre part, plusieurs processus, qu'ils soient chimiques ou mécaniques, altèrent ensuite cette perméabilité.

a) Perméabilité intrinsèque

Chacun de ces éléments a une perméabilité intrinsèque, qui dépend des caractéristiques de chaque constituant.

Les liants hydrauliques, pulvérulents, réagissent avec l'eau et d'autres matériaux (granulat et sable pour le béton) pour donner un produit final cohésif comme le mortier ou le béton. Le ciment est typiquement, un liant hydraulique.

Ces liants hydrauliques sont généralement associés à des charges minérales inertes qui améliorent certaines propriétés. Citons par exemple, les cendres volantes (issues des centrales de charbons), les laitiers de hauts-fourneaux (issus de l'industrie sidérurgique) ou les roches pouzzolanes. En utilisant les cendres volantes comme charge inerte, on obtient un produit de très bonne résistance mécanique, d'une pérennité remarquable (Tritsch, 2007).

Ainsi, les caractéristiques mécaniques et hydrauliques des bétons obtenus dépendent notamment du choix du liant hydraulique (ciment), de son dosage par rapport aux granulats, de l'ajout de charge inerte type cendres volantes...

b) Scénario de dégradation de la perméabilité

L'illustration 12 synthétise les scénarios de dégradation de la perméabilité initiale, dans le cas d'une obturation visant l'étanchéité maximale.

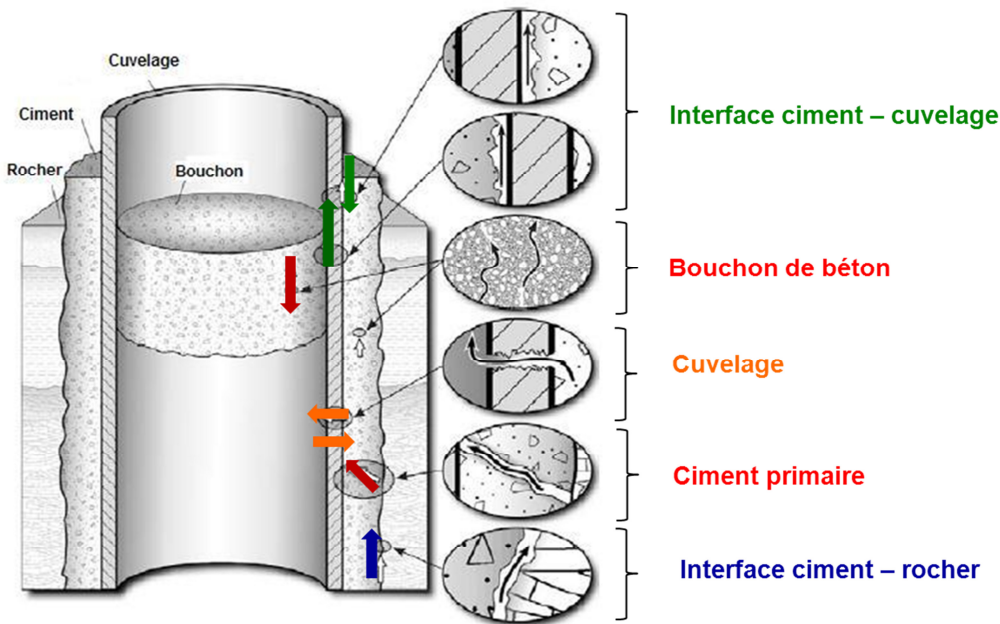


Illustration 12 : Scénario de défaut d'étanchéité (d'après Gasda et al. 2004, modifié)

L'étanchéité ciment-cuvelage

L'intégrité de la cimentation peut également être remise en cause par les contraintes générées par le volume occupé par les oxydes de fer, issus de la corrosion de l'acier.

L'étanchéité à l'interface ciment-rocher et dans le ciment

Un défaut de cimentation lors du remplissage initial par exemple, est possible.

Suivant les caractéristiques des terrains recoupés, les matériaux et notamment le ciment au contact vont s'altérer de manière différente (vitesse, effets sur la porosité, etc.). Les principaux processus de dégradation sont une altération physico-chimique, pouvant produire des ruptures d'interfaces et donc une augmentation de la perméabilité. Les milieux agressifs vis-à-vis d'un ciment sont principalement les milieux acides et salins. Les attaques du ciment par les sels sont essentiellement dues à la présence de sulfates, qui réagissent avec les matériaux cimentaires provoquant une augmentation de volume (formation de gypse ou d'ettringite) (Fabbri et al., 2010). Cette expansion peut provoquer l'apparition de microfissures, augmentant ainsi la perméabilité du ciment et diminuant sa résistance.

A ces conditions, s'ajoute la dégradation mécanique de l'encaissant pouvant modifier les contraintes appliqués sur le ciment, par fluage par exemple (particulièrement lors de la traversée de formations évaporitiques) ou par le jeu de fracturation induite. Egalement, les variations de contraintes effectives induites par les variations de pression de pores ou de température (Charmoille et Thoraval, 2010).

L'étanchéité du cuvelage

Le principal processus de dégradation d'un cuvelage est la corrosion, mécanisme de dissolution du métal suivant une réaction d'oxydo-réduction.

Dans des conditions normales, la cimentation primaire protège le cuvelage des risques de corrosion (phénomène de passivation)⁴ (Fabbri et al., 2010). A contrario, l'existence d'un espace entre le cuvelage et le ciment (mauvaise cimentation par exemple) ou la présence d'ions chlorures (présents à très forte concentration dans les saumures) sont deux facteurs qui accentuent les risques de corrosion, par dépassivation.

Un autre processus de dégradation de la perméabilité du cuvelage est sa rupture, suite à la modification des contraintes appliquées par la déformation mécanique de l'encaissant (fluage, fracturation induite..), puis du ciment.

L'étanchéité du bouchon de béton

Les processus de dégradation sont les mêmes que ceux du ciment.

Un point sensible particulier d'une obturation de type bouchon de béton est la partie située à sa base, potentiellement en contact avec des conditions thermiques ou chimiques particulières, comme lors d'un contact avec la saumure (Charmoille et Thorabal, 2010). Ainsi, lors de l'ennoyage, la pression de fluide exercée à la base du bouchon peut être amenée à augmenter et à provoquer des fortes surpressions.

Les oxydes de fer produites lors de la corrosion du cuvelage étant plus volumineuses que l'acier, ce phénomène de gonflement peut générer des contraintes sur le béton qui pourraient ensuite dépasser sa résistance à la traction et provoquer la formation de fissures (Fabbri et al., 2010).

4.2.3. Scénario d'infiltration des eaux par inadéquation

Les terrains vulnérables sont les niveaux aquifères. Ce sont leur traversée que doivent protéger les constituants étanches (cf. § 4.2.2). La coupe géologique précise de chaque puits, conditionne donc leur position dans la colonne de puits et leur hauteur.

4.3. SYNTHESE DES SCENARIO

L'illustration 13 synthétise les scénarios de dégradation d'un puits, susceptibles d'impliquer des mouvements de terrain perceptibles en surface.

La dégradation mécanique des éléments constitutifs de l'ouvrage (colonne de puits, dalle de béton, remblayage, cuvelage, bouchon..) peut provoquer des mouvements de terrain dont l'emprise sera limitée à celle de l'ouvrage alors que la dégradation de la perméabilité initiale (dans le cas d'une mise en sécurité optimale) peut entraîner des instabilités d'une ampleur considérable, par dissolution du minerai.

⁴ Phénomène de passivation : création, à la surface de l'acier, d'une pellicule protectrice

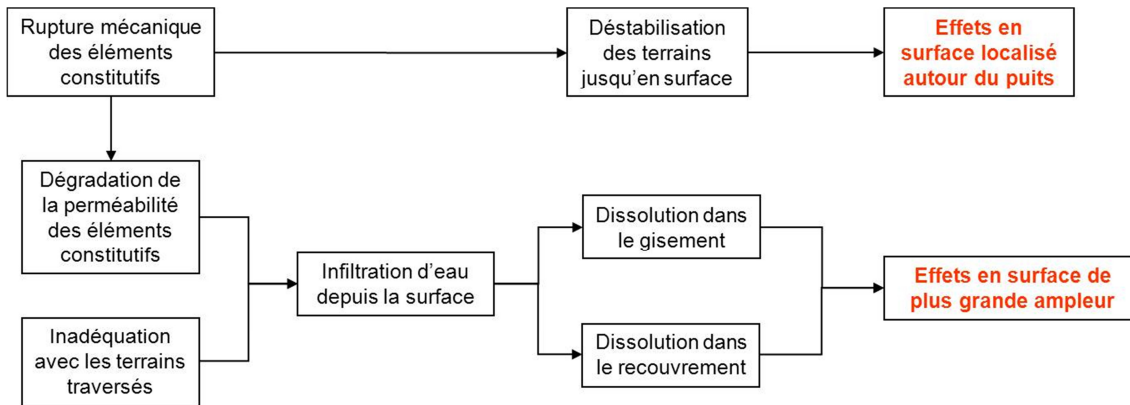


Illustration 13 : Scénarios de dégradation d'un puits, susceptibles d'impliquer des mouvements de terrain perceptibles en surface

5. Les mouvements de terrain redoutés en surface

Les chapitres précédents ont donné des éclairages sur les processus physiques élémentaires mis en jeu, permettant d'identifier ici les scénarios de mouvement de terrain attendus à l'échelle d'une exploitation. A partir de ces constats, ce chapitre énumère les instabilités envisageables en surface et les associe aux configurations au fond concernées, étant donnés les scénarii de rupture intégrant à la fois les spécificités du minerai de sel et les facteurs d'instabilité généraux.

Les définitions des mouvements de terrain sont celles utilisées pour les exploitations minières en général. On se reportera donc au guide méthodologique élaboré par un collectif d'organisme et piloté par l'INERIS, pour aider à l'élaboration des Plans de Prévention des Risques Miniers (PPRM).

5.1. LES AFFAISSEMENTS

5.1.1. Description (issue du Guide PPRM)

L'affaissement se manifeste par un réajustement des terrains induit par l'éboulement de cavités souterraines. Les désordres, dont le caractère est généralement lent et souple, prennent la forme d'une dépression topographique sans rupture cassante importante.

Généralement, ce ne sont pas tant les déplacements verticaux qui affectent les bâtiments et infrastructures de surface, mais plutôt les déformations du sol (déplacements différentiels horizontaux, mise en pente...). Les déplacements différentiels horizontaux prennent la forme de raccourcissements vers l'intérieur de la cuvette (zones en compression) ou d'extension vers l'extérieur de la cuvette (zones en traction).

Ces déformations sont proportionnelles au déplacement vertical maximum au centre de la cuvette et inversement proportionnelles à la profondeur de l'exploitation. Ainsi pour une même épaisseur exploitée, les effets seront d'autant plus faibles que l'exploitation est profonde.

Comme la plupart des phénomènes d'instabilité, les affaissements miniers ne se limitent pas au strict aplomb des contours de travaux souterrains. On appelle « angle d'influence », l'angle défini entre la bordure souterraine de l'exploitation et la limite extérieure de la cuvette d'affaissement en surface. En fonction de la nature et de l'épaisseur des terrains constituant le recouvrement, cet angle varie classiquement entre une dizaine et une quarantaine de degrés. L'existence d'un pendage influence également sur ces valeurs, tout comme la présence d'accidents géologiques majeurs.

Généralement, l'évolution temporelle d'un affaissement se décompose en deux phases, que l'on distingue sur les affaissements du bassin potassique alsacien schématisés en Illustration 14 :

- La première phase se développe classiquement sur une période variant de quelques jours à plusieurs mois, durant laquelle la plus grande partie de l'affaissement se donne en surface ;

- La seconde phase, appelée « affaissement résiduel », peut se prolonger sur des périodes assez longues (plusieurs années), les mouvements sont généralement très limités. Le retour d'expérience disponible sur différents bassins miniers français et européens indique que la durée de l'affaissement résiduel se limite à quelques années. Les MDPA considèrent qu'à partir de 3 ans, il n'est plus possible de distinguer l'affaissement résiduel des autres causes naturelles de mouvement de sol (cf. Illustration 14).

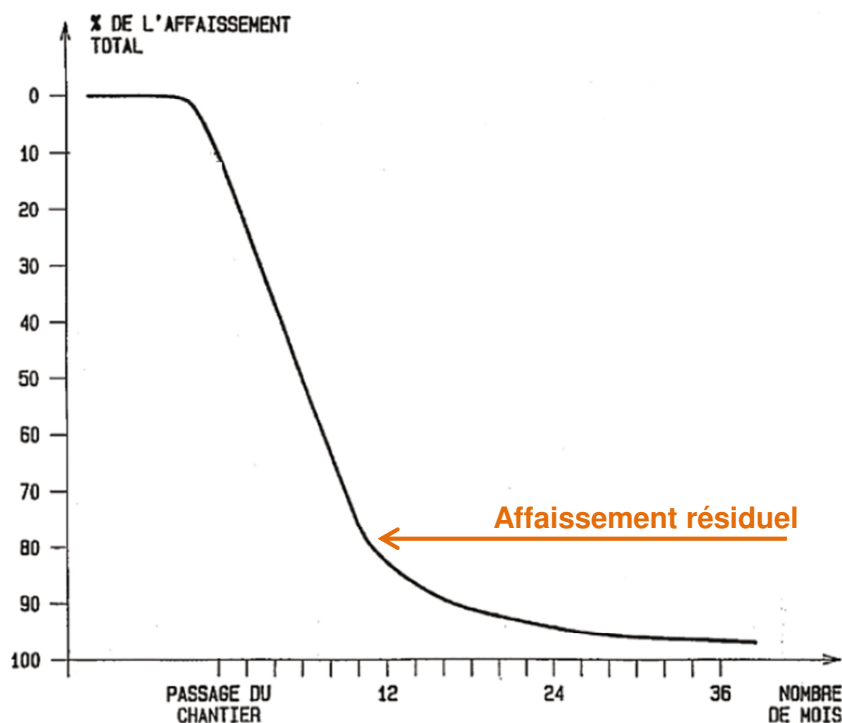


Illustration 14 : Evolution temporelle de l'affaissement, à partir du réseau de nivellement (Affaissement maximal observé sur le gisement de potasse d'Alsace = 4.5 m).
Source (modifiée) : MDPA.

5.1.2. Configurations pouvant engendrer un affaissement en surface

A l'aplomb d'exploitations salines, plusieurs configurations de travaux miniers peuvent provoquer des affaissements en surface. On distingue l'affaissement provoqué par l'exploitant par foudroyage, de l'affaissement post-exploitation non prévu, déclenché par la dégradation des structures souterraines, initialement stables.

a). Affaissement provoqué par la rupture des structures souterraines

Exploitation totale (secteurs foudroyés ou remblayés)

Une exploitation totale, quelle qu'en soit la profondeur, induit un éboulement des premiers bancs du toit des travaux souterrains, qui génère des blocs de formes et de tailles variables. Ces éboulis présentant une forte compressibilité, les bancs rocheux

sus-jacents préalablement découpés par les discontinuités naturelles qui les affectent fléchissent progressivement avec, pour conséquence, la formation d'une cuvette en surface.

Dans le cas des exploitations foudroyées, le déclenchement de l'affaissement a la particularité d'être concomitant avec l'exploitation et d'être provoqué volontairement par l'exploitant. Dans une moindre mesure sont également concernées les exploitations remblayées, étant donnée le réajustement des terrains et la compressibilité des remblais mis en place.

Tout type d'exploitation, par dissolution des massifs de sel résiduel

L'arrivée d'eau drainée par l'exploitation minière, peut créer, par dissolution, des cavités de grande taille au sein des évaporites, aussi bien dans le gisement (cf. § 3.2.2.b) que dans le recouvrement (cf. § 4.2.1). Cette nouvelle cavité, qui se comporte ensuite comme une exploitation partielle, est susceptible de se rompre et d'entraîner des affaissements en surface.

Exploitations partielles

On appelle exploitation partielle toute exploitation ayant laissé des vides résiduels, ce qui concerne majoritairement les méthodes par chambres et piliers abandonnées mais également les exploitations par chambres vides ou les exploitations partiellement remblayées.

Dans ces configurations, la rupture des éléments assurant initialement la stabilité (piliers, intercalaires entre couches, toit, mur) peut être initiée plusieurs années ou décennies après la fermeture des travaux. Cette dégradation mécanique peut être provoquée par l'effet du temps (vieillessement, fluage), de l'évolution de la saturation en eau (cf. § 3.2.2), de la dissolution des parties salines (cf. § 3.3.1.a).

Lorsque l'éboulement des travaux miniers est réalisé sur une surface suffisante, les mécanismes de foisonnement et de flexion des bancs sus-jacents sont similaires au cas des exploitations totales.

Dans ce cas, l'ampleur des mouvements est également proportionnelle au taux de défruitement, puisque la présence de piliers limite le volume des vides et donc de l'amplitude du mouvement.

b). Affaissement provoqué par le fluage

Les cavités salines tendent à se refermer du fait des caractéristiques rhéologiques particulières du sel. Ceci nécessite cependant, qu'il existe encore suffisamment de sel au toit ou au mur des travaux.

Pour les cavités peu profondes (jusqu'à quelques centaines de mètres), le phénomène est négligeable. Ce n'est plus le cas pour les cavités profondes (plus de 1000 m) qui se referment assez rapidement. Il en résulte un affaissement en surface d'amplitude souvent réduite, mais sur une surface nettement plus importante que l'aire d'influence habituellement définies.

Une partie seulement de la perte de volume au fond est généralement reportée en surface. Sur le site de stockages de Tersanne (Drôme), Durup (1991) a mesuré que le

volume de la cuvette d’affaissement en surface ne représentait qu’un 60% de la perte de volume de la cavité lié au fluage.

Les relations entre caractéristique du fluage et de la cavité d’un côté et la géométrie de la cuvette d’affaissement attendue en surface de l’autre, méritent d’être approfondies, à partir des modèles existants en géologie minière en général.

c). Synthèse des configurations susceptibles d’entraîner des affaissements en surface

L’Illustration 15 synthétise les configurations de travaux au fond susceptibles d’engendrer un affaissement perceptible en surface. Il s’avère important de distinguer les affaissements provoqués pendant l’exploitation, dont l’effet peut se prolonger bien après et les affaissements qui sont déclenchés après la fermeture de la mine, que cela soit par l’effet du fluage, de la rupture des structures souterraines ou par l’effet combiné des deux.

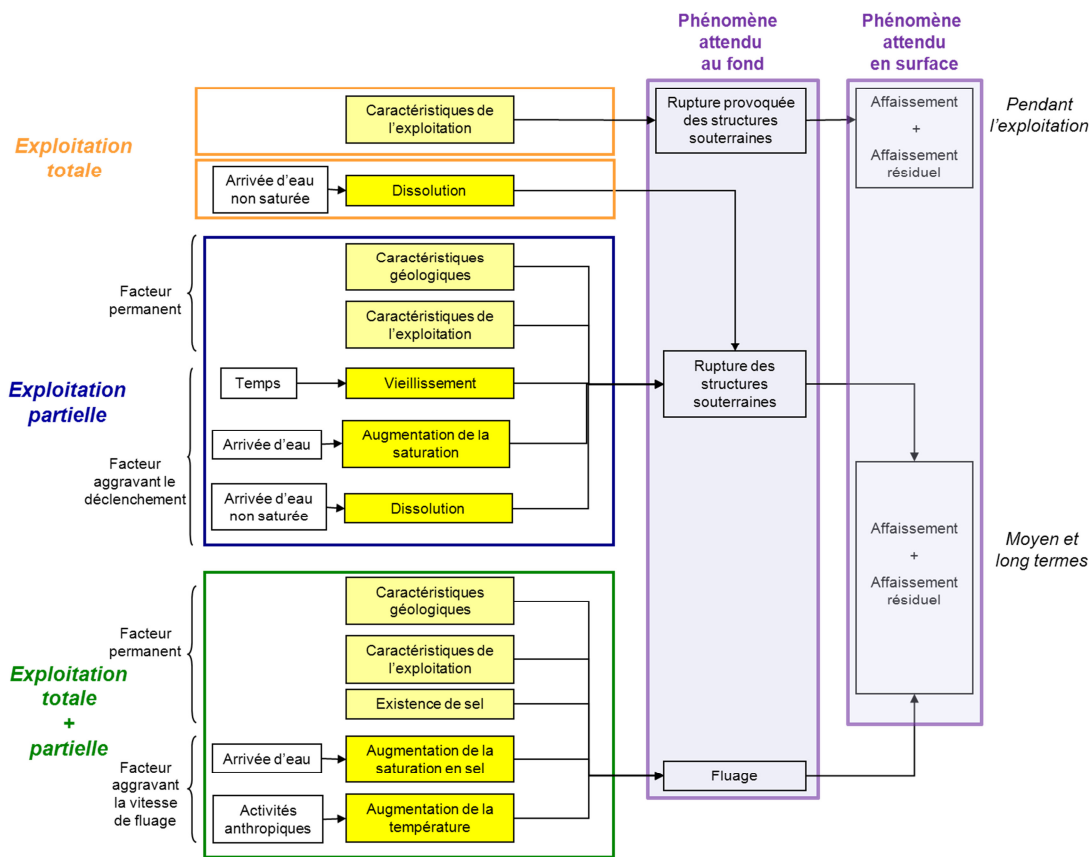


Illustration 15 : Synthèse des configurations au fond susceptibles d’entraîner un affaissement en surface

5.2. LES EFFONDREMENTS LOCALISES

Ce phénomène qui ne présente pas de particularités par rapport aux exploitations salines, ne sera pas détaillé dans la suite du rapport.

5.2.1. Définition (issue du Guide PPRM)

Un effondrement localisé se caractérise par l'apparition soudaine en surface d'un cratère d'effondrement dont l'extension horizontale varie généralement de quelques mètres à quelques dizaines de mètres de diamètre. La profondeur du cratère dépend principalement de la profondeur et des dimensions des cavités souterraines ou des galeries.

5.2.2. Configurations concernées

Travaux et galeries peu profonds

Les configurations concernées par ce phénomène localisé sont l'ensemble des travaux et des galeries ayant laissé des vides à faible profondeur. En effet, au-delà d'une certaine profondeur (dépendant notamment du volume des vides), la voûte d'instabilité initiée se stabilisera mécaniquement par le processus d'autocomblement des matériaux éboulés.

Si, dans la majorité des cas, cette profondeur se limite à quelques dizaine de mètres, dans certaines configurations particulières, elle peut atteindre voire dépasser la cinquantaine de mètres.

Ouvrages débouchant en surface

Les instabilités de type mouvement de terrain provoqués par la dégradation du puits lui-même, sont qualifiés d'effondrement localisé. Elles dépendent essentiellement de l'état de l'ouvrage et de son mode de traitement et sont abordés plus en détail au § 4.1.

Dans ces scénarios de risques, l'effondrement se circonscrit au seul diamètre de puits, augmentée d'un cône d'influence dépendant de la compétence et de la cohésion des terrains superficiels environnants.

5.3. LES EFFONDREMENTS GENERALISES

5.3.1. Définition (issue du Guide PPRM)

Les effondrements généralisés, également appelés effondrements en masse, se manifestent par la rupture, souvent dynamique (quelques secondes), de tout ou partie d'une exploitation, affectant ainsi la stabilité des terrains de surface sur des étendues pouvant atteindre plusieurs hectares. La hauteur d'effondrement affectant la partie centrale peut atteindre plusieurs mètres et même plusieurs dizaines de mètres. Cette zone centrale est bordée par des fractures ouvertes, sub-verticales, délimitant des « marches d'escalier ».

Ces phénomènes qui génèrent une quantité considérable d'énergie, peuvent s'accompagner de secousses sismiques, parfois détectables jusqu'à plusieurs centaines de kilomètres. Notons également l'effet de souffle susceptible de projeter, sur de grandes distances, des matériaux par les galeries et les puits ouverts, mettant ainsi en péril les personnes et installations se trouvant à proximité (phénomène « d'air blast »).

Les effondrements généralisés peuvent affecter des exploitations profondes comparativement aux effondrements localisés. Leur développement exige également une extension horizontale des travaux suffisante au regard de leur profondeur.

5.3.2. Configurations pouvant engendrer un effondrement généralisé en surface

Les effondrements brutaux exigent une combinaison de deux conditions simultanées : une rupture au fond (piliers et/ou toit) et une rupture fragile des terrains de recouvrement. Ainsi, ces phénomènes se développent préférentiellement sous des recouvrements présentant un (ou des) horizon(s) raide(s), capable(s) de reprendre tout ou partie du poids des terrains de surface en le reportant sur les bords fermes.

Exploitations partielles en terrains stratifiés

De tels phénomènes exigent l'existence d'une configuration d'exploitation au fond que l'on peut caractériser de « fragile ». L'existence de taux de défruitement élevés, de volumes de vides importants et la présence de configurations d'exploitation peu robustes (piliers sous-dimensionnés, présentant un fort élancement, exploitation multi-niveaux avec mauvaise superposition des piliers) sont autant de paramètres favorables au développement d'une rupture en masse au fond. La rupture finale est attendue par flexion ou cisaillement du toit lorsque la portée dépasse la flèche admissible assurant la stabilité initiale de l'ouvrage.

L'instabilité au fond peut également résulter d'une rupture progressive « en chaîne » de piliers. Ce type de manifestation exige que les piliers aient, dans leur grande majorité, atteint un « état-limite » de stabilité. La modification ou le développement d'un facteur déclenchant peut alors suffire à initier la rupture d'une partie des piliers. En se ruinant, ces derniers induisent un report de charge sur les piliers voisins qui, à leur tour, se rompent. Le recouvrement s'effondre alors en suivant le front d'éboulement souterrain. Le phénomène n'est pas aussi violent que celui décrit ci-dessus.

Dans tous les cas, cette dégradation mécanique est accentuée par l'effet du temps (vieillesse, fluage), par l'arrivée d'eau (cf. § 3.2.23.2), ou par la dissolution des massifs salins résiduels entraînant la redistribution des contraintes (cf. § 3.3.1.a).

Tout type d'exploitation, par dissolution des massifs de sel résiduel

L'arrivée d'eau non saturée dans des exploitations évaporitiques peut induire des dissolutions aussi bien dans le gisement, en continuité des travaux (cf. § 3.2.2.b) que dans le recouvrement (cf. § 4.2.1). Cette nouvelle cavité, qui se comporte ensuite comme une exploitation partielle, est susceptible de se rompre et d'entraîner ensuite un effondrement généralisé, si la nature du recouvrement le permet.

5.3.3. Synthèse des configurations susceptibles d'entraîner un effondrement généralisé

L'illustration 16 synthétise les configurations susceptibles d'engendrer un effondrement généralisé.

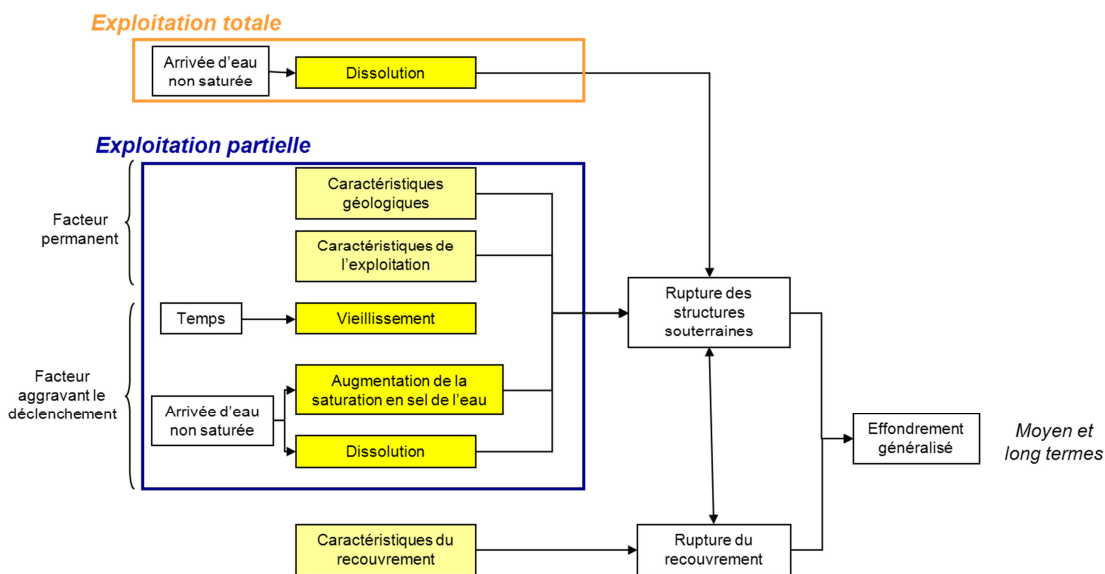


Illustration 16 : Synthèse des configurations au fond entraînant un effondrement généralisé

5.4. LES TASSEMENTS

5.4.1. Description (issue du Guide PPRM)

Dans le cadre de l'après-mine, on parle de tassements lorsque les mouvements du sol s'expliquent par une remobilisation, postérieure à l'exploitation, des terrains affectés par les anciens travaux miniers.

Sous l'action de perturbations extérieures (applications de surcharge en surface, mouvements de nappes au sein des terrains concernés, sollicitations vibratoires...), les terrains qui présentent des vides résiduels (assimilable à une porosité apparente) peuvent être amenés à se compacter et provoquer des mouvements de faible ampleur en surface (sauf exception, l'amplitude maximale est d'ordre décimétrique), susceptibles d'engendrer des effets sur les bâtiments et les infrastructures.

Ce type de manifestation peut avoir des conséquences assez similaires avec le phénomène de retrait-gonflement des sols argileux, sous l'effet de battements de nappe ou de variations du profil hydrique dans le proche sous-sol.

Les manifestations les plus perceptibles se développent à l'aplomb des secteurs peu profonds (quelques dizaines de mètres sous la surface).

5.4.2. Configurations concernées

Exploitations totales (foudroyées ou remblayées) ou anciennes zones effondrées

Les secteurs ayant subis un affaissement ou un effondrement sont sujets à des mouvements résiduels, s'assimilant à des tassements.

En effet, sur ces secteurs déconsolidés par l'exploitation, le poids des terrains surmontant les anciens chantiers miniers n'est pas suffisant pour garantir une recompaction complète des terrains foudroyés ou éboulés. Ceci permet la persistance d'une porosité artificielle élevée, qui pourra être remobilisée sous l'action de perturbations extérieures.

Exploitations soumis à l'ennoyage

Pendant l'exploitation, les terrains encaissants ont été désaturés par les pompages d'exhaure. La resaturation des terrains pendant l'ennoyage peut, dans certaines configurations, se traduire par une remontée lente des terrains liée à la modification des contraintes (cf. § 3.2.4) ou au gonflement de certaines formations (cf. § 3.2.5). L'amplitude des mouvements verticaux observés peut atteindre quelques décimètres. Le mécanisme initiateur est sensiblement le même que celui à l'origine des tassements.

5.5. SYNTHÈSE

Les paragraphes précédents ont mis en évidence la diversité des mécanismes d'instabilité et les mouvements de terrain associés. Parmi ceux-là, les plus préjudiciables sont les mécanismes d'instabilité dit « généralisée », qui sont les affaissements et les effondrements généralisés, dont l'occurrence de l'un ou de l'autre, dépend principalement de la nature des terrains du recouvrement et notamment de leur capacité à encaisser les déformations. Un recouvrement formé de terrains plastiques aura tendance à entraîner un affaissement alors que la présence d'un banc raide et résistant pourra provoquer un effondrement brutal de la surface.

Dans une mine de sel, les configurations où peuvent s'initier des instabilités, sont :

- A) les vides résiduels susceptibles d'exister encore au fond : les secteurs d'exploitation partielle (chambres et piliers, chambre vide..), les secteurs partiellement remblayés, les galeries et les puits ;
- B) les secteurs affaissés et effondrés à l'aplomb desquels les conditions du recouvrement ont été modifiées ;
- C) les parties non exploitées du gisement de sel, sujettes à la dissolution, qu'elles soient en continuité des travaux au fond ou situées dans le recouvrement et recoupées par les puits.

Chaque configuration de travaux miniers est susceptible d'engendrer des instabilités spécifiques. Le Tableau ci-dessous synthétise, les mouvements de terrain attendus selon la nature des travaux au fond. Les terminologies sont issues du guide méthodologique PPRM.

Configuration au fond	Mouvements de terrain attendus en surface
Exploitation partielle	Affaissement, Effondrement généralisé, Effondrement localisé
Exploitation foudroyée	Affaissement, tassement
Galerie	Effondrement localisé
Exploitation affaissée	Affaissement résiduel, reprise d'affaissement
Puits	Effondrement localisé
Gisement de sel non exploité à proximité d'exploitation	Affaissement, Effondrement généralisé, Effondrement localisé

Illustration 17 : Mouvements de terrain attendus en surface selon la configuration au fond

6. Conclusion

L'objectif de cette étude préliminaire était d'établir un état des lieux exhaustif des problématiques liées à une mine de sel sèche, de manière à hiérarchiser ensuite les actions à conduire, dans un objectif d'amélioration des moyens d'évaluation des risques.

Cette étude a mis en évidence la diversité des mécanismes d'instabilité intervenant dans une exploitation salifère et à viser à en faire une liste exhaustive. Les éclairages donnés sur les processus physiques élémentaires qui différencie le minerai de sel des autres, soit le fluage, la dissolution et l'arrivée d'eau, ont permis de dresser ensuite, les scénarios de mouvement de terrain attendus à l'échelle d'une exploitation minière. L'interaction des processus et leur effet relatif et combiné en termes de stabilité reste à approfondir, notamment l'effet de l'eau.

Ainsi, une liste exhaustive des scénarios envisageables a été établie reliant chaque configuration au fond aux mouvements de terrain envisageables en surface, intégrant à la fois les spécificités du minerai de sel et les facteurs d'instabilité généraux. Parmi ces instabilités, les plus préjudiciables restent les mécanismes dit « généralisés », qui sont les affaissements et les effondrements généralisés, dont l'occurrence de l'un ou de l'autre, dépend principalement de la nature des terrains du recouvrement et notamment de leur capacité à « encaisser » les déformations. Cette analyse a également mis en évidence, qu'outre les travaux miniers, les gisements salifères non exploités à proximité ou à l'aplomb des travaux miniers, pourraient à long terme, donner lieu à des instabilités en surface.

Identifiés dans le cas général, ces scénarios sont déclinables à chaque configuration particulière et notamment aux méthodes des travaux employés au fond (exploitation remblayée, foudroyée ou exploitation partielle). Il ressort que, dans une optique de gestion de sites miniers post-exploitation, les évaluations d'aléa devront traiter différemment le régime permanent (long terme) de l'état transitoire, sachant que ce dernier peut s'étendre sur une durée importante, selon les mécanismes considérés (équilibre de pression, équilibre de vitesse de fluage..) et les caractéristiques de certaines cavités (grande profondeur par exemple). En effet, si les processus fondamentaux nécessitent une évaluation de la stabilité à long terme en considérant un état stationnaire de tous les paramètres, notons l'importance de l'effet transitoire liée à l'intrusion d'eau et à la dissolution qui en découle. De même, il est important de définir l'emprise minière étudiée, que l'on peut considérer comme un système fermé.

Cette étude confirme la nécessité d'approfondir la connaissance des mécanismes, notamment le couplage et l'interaction des processus et leur effet relatif en termes de stabilité, notamment le rôle de l'eau. Citons également la prise en compte de l'endommagement, et donc de l'augmentation de la perméabilité, dans les modèles de fluage puisque la microfissuration (et l'augmentation de perméabilité induite) influencent les mécanismes de déformation viscoplastique.

7. Bibliographie

- Auvray C., Homand F., Hohxa D., Didier C. (2003). Influence du temps sur le comportement du gypse. Actes du Colloque « Après-mine 2003 », Nancy, 5-7 février 2003. CD ROM. ISBN 2-85555-057-2.
- Bérest P., Brouard B. and Durup, G. (1997). Abandon des cavités salines, Revue Française de Géotechnique, n°82, pp. 23–36.
- Berest P., Brouard B., Feuga B. (2003). Abandon des mines de sel : Faut-il envoyer ? Après-mines 2003, 5-7 Février 2003, Nancy
- Boucly P. (1981). In situ experience and mathematical representation of the behavior of rock salt used in storage gas. 1st Conf. Mech. Behavior of salt, Penn State Univ. Trans Tech Pub., pp. 453-471.
- Charmoille A., Thoraval A. (2010). Synthèse de l'état des connaissances et des pratiques en matière d'abandon des stockages souterrains. Rapport INERIS - DRS-08-86168-00481D.
- Cosenza P. (1996). Sur les couplages entre comportement mécanique et processus de transfert de masse dans le sel gemme. Thèse de doctorat, université Paris VI, 28 octobre 1996.
- Durup J.G.(1991). Relationship between subsidence and cavern convergence at Tersanne (France). S.M.R.I., spring meeting, Atlanta, USA.
- Fabbri A., SY S., Jacquement N., Seyedi D., Garaffa L. H. (2010). Integmeca09, Volet « Intégrité des puits ». Rapport final BRGM / RP-57966-FR, 70 p., 11 ill., 5 tabl.
- Gasda S.E., Nordbotten J. M., Celia M.A. (2008). Determining effective wellbore permeability from a field pressure test : a numerical analyses of detection limits. Environmental Geology (54). 1207-1215.
- Ghazali A. (1995). Etude par analyse texturale du rôle de l'humidité dans la déformation des roches salifères. Application au sel du Bassin Bressan et au sel de dôme de la mine d'Asse. 1995. Ecole nationale des ponts et chaussées - ENPC PARIS / MARNE LA VALLEE.
- Ghoreychi M., Daupley X. (2004). Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel. Revue Française de Géotechnique, N° 106-107, pp. 73-8.
- Guide PPRM, 2006 : « L'élaboration de Plans de Prévention des Risques Miniers – Guide Méthodologique – Volet technique relatif à l'évaluation de l'aléa – Les risques de mouvements de terrain, d'inondations et d'émissions de gaz de mines ». Ouvrage collectif résultant des contributions de divers organismes INERIS, BRGM, GEODERIS, ENSMP, IRSN, CSTB. Sous la direction de l'INERIS. Rapport INERIS référencé DRS-06-51198/R01, 140 pages
- Karimi-Jafari M. (2007). Comportement transitoire des cavités salines profondes. Doctorat LMS, LMS, Paristech. EP/X p.225.

Kazan, Y, Ghoreychi, M., Essais In Situ CPPS – Etude Thermomécanique du Champ Proche d'un Puits de Stockage de Déchets Radioactifs dans le Sel, Rapport de la Commission Européenne EUR 16946 Fr, Luxembourg (1996).

Laouafa F., Ghoreychi M. (2006) – Une méthode pseudo-analytique pour l'analyse du fluage des piliers des mines de sel. Actes des journées nationales de géotechnique et de géologie de l'ingénieur 2006, 27-29 juin 2006, Lyon, 8 p.

Mainz, M. et al. (2008): Mine Closure and Post-mining Management, International State-of-the-Art , International Commission on Mine Closure, International Society of Rock Mechanics.

Massal.P. Rhéologie, propriétés physiques du sel gemme et phénomènes de migration dans le sel. Analyse bibliographique. BRGM/88-SGN-191-STO. Février 1988

Morisseau J.M., 2000 : « Uncontrolled leaching of salt layer in an oil field in Algeria », In Proc. S.M.R.I. Fall Meeting Technical Session, San Antonio, pages 330-333, 2000.

Tritsch J.J. (2007). Mise en sécurité des cavités souterraines d'origine anthropique : surveillance – Traitement. Guide technique. Programme EAT-DRS-02. Rapport INERIS – DRS-07-86042-02484A

GISOS - Synthèse des travaux de recherche « Après mine Sel » 2006. Mai 2007. LG.FH.SOS.PSI.RPRE.07.0132.C.doc. GISOS.

GISOS - Synthèse des travaux de recherche 2009.



**Centre scientifique et technique
Service RNSC**

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34

