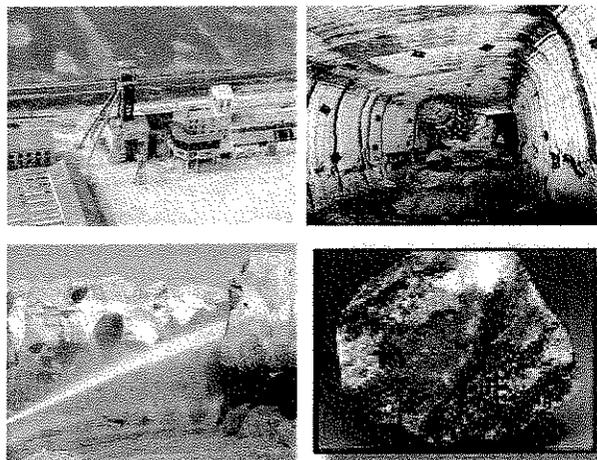


L'ennoyage des mines de potasse

Dossier commun : secteurs Est et Ouest



Ref : AB/1143/04/08

Avril 2008

Bureau d'études CESAME
ZA du Parc - Secteur Gampille
42 490 FRAISSES
tel : 04 77 10 12 10
Mail : cesame.environnement@wanadoo.fr



SOMMAIRE

1.	INTRODUCTION.....	1
2.	GÉNÉRALITÉS.....	2
2.1	LOCALISATION (FIGURE 1)	2
2.2	CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE.....	2
2.3	LE MINÉRAI	6
2.4	L'EXPLOITATION MINIÈRE – LE MASSIF SALIFÈRE	7
2.4.1	<i>Historique de l'exploitation</i>	7
2.4.2	<i>Les méthodes d'exploitation</i>	9
2.4.3	<i>La compartimentation</i>	10
2.5	L'EAU DANS LA MINE	12
2.5.1	<i>L'exhaure pendant l'exploitation</i>	12
2.5.2	<i>Fermeture de la mine et évolution de l'alimentation</i>	14
2.6	LES PARTICULARITÉS DE L'ENCAISSANT MINIER.....	19
2.6.1	<i>« Souplesse » du massif et affaissement</i>	19
2.6.2	<i>Fermeture des vides et fluage</i>	20
	➤ Les essais sur éprouvettes (Vigier)	21
	➤ Les modélisations de G. Vouille (1990 [1])	22
	➤ Synthèse.....	24
3.	DURÉE DE L'ENNOYAGE.....	26
3.1	ESTIMATION DES DÉBITS PÉNÉTRANT DANS LA MINE.....	26
3.1.1	<i>Secteur Est</i>	27
3.1.2	<i>Secteur Ouest</i>	28
3.2	ESTIMATION DU VOLUME DES VIDES RÉSIDUELS EN 2008.....	29
3.3	ESTIMATION DE LA DURÉE DE L'ENNOYAGE	31
3.4	DISCUSSION - CONCLUSION SUR LA DURÉE D'ENNOYAGE DE LA MINE	33



4.	ESTIMATION DE L'ÉTAT ACTUEL DE REMPLISSAGE.....	35
4.1	LE SECTEUR EST (FIGURE 7)	35
4.2	LE SECTEUR OUEST (FIGURE 8).....	38
5.	PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS À L'ENNOYAGE.....	41
5.1	LES DISSOLUTIONS	41
5.1.1	<i>Dissolution dans la mine</i>	41
5.1.2	<i>Dissolution au niveau des puits</i>	42
5.2	L' AIR	47
5.3	LA FIN DE L'ENNOYAGE.....	51
5.3.1	<i>Equilibre hydrostatique</i>	51
➤	Secteur Est	51
➤	Secteur Ouest.....	53
5.3.2	<i>Poursuite de la compaction</i>	55
➤	Secteur Est	57
➤	Secteur Ouest.....	57
➤	Synthèse	58
5.4	CONCLUSION SUR LES PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS - LE SUIVI	61
6.	CONCLUSION.....	63



Liste des illustrations

Figures :

- Figure 1 : Localisation de la zone d'étude
- Figure 2 : Contexte géologique
- Figure 3 : Les deux secteurs d'exploitation
- Figure 4 : Principe de fermeture des puits de mine
- Figure 5 : Coupe des puits du secteur Est, position des bouchons de cendres
- Figure 6 : Coupe des puits du secteur Ouest, position des bouchons de cendres
- Figure 7 : Ennoyage du secteur Est (niveau d'eau de 1986, remplissage actuel)
- Figure 8 : Ennoyage du secteur Ouest (estimation du remplissage actuel)
- Figure 9 : Mise en place d'un équilibre hydrostatique, secteur Est
- Figure 10 : Mise en place d'un équilibre hydrostatique, secteur Ouest

Graphiques :

- Graphique 1 : Evolution des vides par fluage selon les travaux de Vigier
- Graphique 2 : Comparaison de l'évolution des vides par fluage selon les travaux de G. Vigier et de G. Vouille
- Graphique 3 : Evolution des vides retenue dans la présente étude pour l'ensemble du bassin
- Graphique 4 : Estimation de la durée de l'ennoyage, secteur Est
- Graphique 5 : Estimation de la durée de l'ennoyage, secteur Ouest
- Graphique 6 : Expulsion de la saumure, secteur Est
- Graphique 7 : Expulsion de la saumure, secteur Ouest

Schémas :

- Schéma 1 : Séparation entre secteur Est et secteur Ouest
- Schéma 2 : Le stot du secteur Ouest
- Schéma 3 : Exemple de l'effet du fluage pour une galerie
- Schéma 4 : De l'éprouvette à la galerie
- Schéma 5 : La loi de Darcy
- Schémas 6 : Dissolution en phase finale d'ennoyage
- Schéma 7 : La diminution du volume disponible pour l'air



Tableaux :

- Tableau 1 : Historique
- Tableau 2 : Extraction
- Tableau 3 : Exhaure
- Tableau 4 : Alimentation du secteur Est
- Tableau 5 : Alimentation du secteur Ouest
- Tableau 6 : Age moyen des travaux
- Tableau 7 : Profondeur des travaux
- Tableau 8 : Volumes résiduels de vides
- Tableau 9 : Estimation des vides sous la cote -670 NGF (secteur Est)
- Tableau 10 : Secteur Est, estimation des volumes d'eau en 1986
- Tableau 11 : Estimation du volume d'eau dans le secteur Ouest en 2007
- Tableau 12 : Comparaison dissolution potentielle / volume de remblais des puits, secteur Est
- Tableau 13 : Comparaison dissolution potentielle / volume de remblais des puits, secteur Ouest
- Tableau 14 : Pressions hydrostatiques et stabilité des bouchons
- Tableau 15 : Montée de la saumure dans les puits aval, secteur Est
- Tableau 16 : Montée de la saumure dans les puits aval, secteur Ouest

Annexes :

- Annexe 1 : Saturation - dissolution
- Annexe 2 : Perméabilité de bouchons de cendre
- Annexe 3 : Pressions lithostatiques et stabilité des bouchons

Bibliographie

Lexique



RESUME DE L'ETUDE

La présente étude s'attache à décrire les phénomènes mécaniques, hydrogéologiques et chimiques accompagnant l'exploitation puis la fermeture de la mine, à apprécier leurs ordres de grandeur, dans le but d'estimer le temps de remplissage de la mine et les phénomènes secondaires qui pourraient accompagner ou suivre la phase de remplissage.

Au sein du fossé rhénan, au nord-ouest de Mulhouse, les mines de potasse d'Alsace s'inscrivent dans un ensemble de terrains **salifères** datés du Sannoisien. Deux couches de potasse, d'une épaisseur cumulée de moins de 7 mètres, ont été exploitées entre 470 et plus de 1000 mètres de profondeur. La mine et les terrains salifères sont **protégés des venues d'eau superficielles (en particulier de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace)** par un épais complexe argilo-marneux (Chattien, Stampien).

L'exploitation du minerai s'est faite en deux secteurs indépendants car isolés par une structure géologique importante :

- le secteur Est, fermé depuis 1989, avec un total de 9 puits,
- le secteur Ouest, avec un total de 15 puits dont l'exploitation est arrêtée depuis 2002 (le Nord a été fermé plus tôt) mais avec 3 puits encore ouverts actuellement (puits Joseph, puits Else, puits Amélie 2).

La mine a créé en souterrain un volume de vides important (270 millions de m³ de minerai extrait) qui du fait des méthodes d'exploitation employées (foudroyage essentiellement) s'est résorbé rapidement (3 ans) et en proportion importante (90 %), par affaissement.

Les vides résiduels continuent à se fermer au fil du temps¹, du fait du comportement particulier du sel qui est capable de fluer indéfiniment tant qu'il subit un différentiel de pression. Aujourd'hui les vides miniers sont ainsi estimés à environ 5% du volume initial de la mine et leur fermeture se poursuit.

Pendant l'exploitation, les débits d'eau pénétrant dans la mine étaient très faibles, puisque les valeurs d'exhaure incluant l'eau apportée volontairement pour le fonctionnement de la mine ne représentaient que :

- 4 à 12 m³/h pour le secteur Est,
- 6 à 11 m³/h pour le secteur Ouest.

La faiblesse de ces débits est liée à la nature de l'encaissant minier (terrains salins totalement exempts d'eau) et aux aménagements mis en place par l'exploitant pour protéger sa mine de la pénétration des eaux provenant de la surface (cuvelages étanches au droit des formations aquifères).

¹ Aujourd'hui ces vides sont constitués d'anciennes galeries n'ayant pas encore totalement fini de se refermer et de grands champs d'exploitation dans lesquels le vide franc a été comblé par effondrement du toit puis fluage et qui ne se distinguent du reste du massif que par l'existence d'une porosité plus forte répartie au niveau de l'ancienne couche exploitée et sur quelques dizaines de mètres de part et d'autre.



À la fin de leur exploitation, les puits de mine étaient bouchés dans le but de limiter les venues d'eau vers la mine car elles constituaient pour l'exploitant un danger du fait de la solubilité de l'encaissant minier. Chaque puits a ainsi été remblayé sur toute sa hauteur et équipé d'un bouchon de cendres volantes (matériau très peu perméable) d'au minimum 50 mètres d'épaisseur situé à la base de son cuvelage étanche.

Du fait de la très faible perméabilité de ces bouchons, les débits d'eau susceptibles de pénétrer dans la mine après fermeture de l'ensemble des ouvrages ont été estimés au maximum à environ 2,5 m³/h pour chacun des secteurs d'exploitation (Est et Ouest).

Malgré la faiblesse des débits, on admet donc que l'introduction d'eau douce dans la mine fermée reste possible. Cela conduirait ainsi à un ennoyage progressif des deux secteurs étudiés en :

- environ 100 ans pour le secteur Est,
- environ 150 ans pour le secteur Ouest.

Ces durées prennent en compte deux phénomènes antagonistes évoluant simultanément au remplissage par l'eau :

- la poursuite de la compaction des terrains,
- l'augmentation des vides (25 % environ) du fait de la dissolution du sel par les apports d'eau douce.

Les phénomènes associés à la fermeture puis au remplissage de la mine sont décrits dans le présent rapport.

- ❖ Du fait de l'apport d'eau et du fluage, le volume disponible pour l'air dans la mine va se réduire progressivement jusqu'à enfermer d'éventuelles bulles d'air à la base des bouchons les plus étanches.

La présente étude permet de démontrer que les bouchons de cendres, de par leur position dans les différents puits et la géométrie de ces puits, peuvent résister à la mise en pression de la mine en raison de son remplissage, même si certains d'entre-eux sont totalement étanches.

- ❖ Après la fin de l'ennoyage, il n'y aura pas d'écoulement depuis la mine vers la nappe superficielle car la densité de la saumure équilibrera les pressions dans tout le système minier, et la pression due à l'écart de niveau entre les puits amont et aval est insuffisante pour rompre cet équilibre².
- ❖ Les phénomènes de dissolution liés à l'intrusion d'eau douce dans la mine pendant toute la phase de remplissage se répartiront de façon diffuse dans l'exploitation compte tenu de l'existence d'un pendage dans les couches de potasse exploitées, et des aménagements mis en œuvre par l'exploitant au moment de la fermeture des puits (en particulier bouchon béton et drains à la base des ouvrages) pour préserver la base de

² Seuls 2 puits du secteur Est (Ensisheim 1 et 2) pourraient avoir une colonne de saumure s'élevant à une cote proche de la base de la nappe alluviale d'Alsace et pouvant de ce fait apporter un flux de saumure minime à la base de cet aquifère.



ses puits. Ce n'est qu'en phase finale de remplissage, que la dissolution autour des puits pourra éventuellement intervenir (car l'eau douce arrivant à pénétrer dans l'ouvrage flottera sur la saumure qui aura déjà envahi la mine). Cependant, les volumes dissous seront sans doute discontinus et inégaux et essentiellement développés dans les interstrates de matériaux solubles en périphérie des parements (pas de vides importants et continus susceptibles de déstabiliser totalement les ouvrages).

Ce phénomène pourrait éventuellement conduire à un coulisage des remblais dans les puits pour compenser le vide créé par dissolution.

Remarque : A proximité des puits fermés depuis plusieurs années, l'envoyage a déjà débuté. C'est notamment le cas dans le secteur Est, où le fait que les travaux miniers profonds soient noyés a été effectivement observé en 1986 dans la mine d'Ensisheim. Depuis 22 ans, l'envoyage de ce secteur a probablement progressé sans qu'aucun désordre n'ait été constaté en surface à son aplomb ni dans les puits de mine, ce qui permet d'admettre que la dissolution du sel est effectivement répartie au sein des travaux miniers souterrains et ne provoque pas de reprise d'affaissement à l'aplomb des travaux noyés ni de coulisage catastrophique de remblais dans les puits.

- ❖ Au terme du remplissage, seule une mise en pression supplémentaire de la mine peut mener à une sortie de saumure en surface ou dans la nappe alluviale. Cette hypothèse correspondrait alors à la poursuite du fluage des terrains encaissants malgré la présence de saumure dans les vides résiduels miniers. Elle ne pourrait alors se traduire que par l'émergence d'un débit de saumure minimale (moins de 0,5 m³/h pour chacun des secteurs) réparti sur l'ensemble des puits et menant à une augmentation de concentration en chlorures en aval des puits de quelques milligrammes par litre dans la nappe alluviale d'Alsace. L'échéance de ce phénomène serait de plusieurs centaines d'années.

En conclusion, aucun phénomène rapide ou incontrôlable n'est attendu suite à la fermeture des mines de potasse d'Alsace. Tous les phénomènes attendus seront lents et progressifs et leurs effets en surface devraient être nuls à très faibles. Le seul risque potentiel que l'on peut retenir serait un coulisage des remblais dans les colonnes de puits en liaison avec une dissolution intervenant sur la toute fin du remplissage de la mine (échéance ≥ 100 ans). C'est la raison pour laquelle il est proposé dans ce rapport de conserver une servitude de passage vers chaque puits de mine pour aller régulièrement vérifier que le niveau de remblai n'y a pas évolué (et compenser si nécessaire le vide apparu). L'existence des puits de mine, seules discontinuités dans la couverture, doit rester inscrite dans les documents d'urbanisme.

1. Introduction

L'exploitation de potasse dans la plaine d'Alsace a débuté au début du XX^{ème} siècle. Le minerai (la sylvinite) est constitué de NaCl (chlorure de sodium) et de KCl (chlorure de potassium) avec des intercalations d'argiles et petits lits de marnes. La potasse produite dans le bassin a été utilisée pour fabriquer des engrais et dans l'industrie chimique.

Après un siècle d'exploitation, l'arrêt de l'activité minière a été suivi par la mise en sécurité des puits, avec notamment la mise en place d'épais bouchons de cendres volantes de centrale thermique visant à limiter au maximum les venues d'eau dans la mine.

La présence de ces bouchons n'exclut toutefois pas la persistance d'un flux d'eau (aussi faible soit-il) pénétrant dans la mine et menant, à terme, à un remplissage des vides résiduels de l'exploitation souterraine.

Le rapport s'articule en 4 parties :

- dans la première partie, le contexte hydrogéologique local est rappelé : la mine s'inscrit dans un épais complexe salifère isolé des eaux de surface par des terrains globalement imperméables ;
- la deuxième partie aborde la description de l'exploitation minière : type et profondeur du minerai, secteurs d'exploitation, méthodes d'exploitation; etc...
- A partir de ces éléments, la durée d'ennoyage et l'état d'ennoyage actuel de chaque secteur de la mine sont estimés, en tenant compte des méthodes d'exploitation et de fermeture de la mine et des phénomènes spécifiques liés au type de minerai (fluage, dissolution...);
- La dernière partie du rapport s'attache à décrire les phénomènes associés à l'évolution de la mine après sa fermeture et leurs incidences potentielles (dissolution de l'encaissant par l'eau de remplissage, pression de l'air au sein de la mine, fluage...).

Ce dossier s'appuie sur de nombreux documents existants, la bibliographie est fournie en annexe. Un glossaire reprend la définition des termes techniques en fin de document.

N.B. : La présente étude n'a pas vocation à traiter la problématique particulière liée au stockage de déchets de Stocamine, qui devra faire l'objet d'un dossier spécifique.



2. Généralités

2.1 Localisation (figure 1)

Les concessions minières des Mines de Potasse s'étendent sur une quinzaine de kilomètres de large et de long, au nord-ouest de Mulhouse. L'emprise précise des concessions est de 222 km².

Au sein de cet ensemble, l'exploitation minière est divisée en deux secteurs, chacun redécoupé en « mines », qui sont des regroupements par infrastructures d'exploitation.

Ainsi on distingue :

- le **secteur Est**³, avec les « mines » d'Ensisheim, Théodore, Fernand et Anna,
- le **secteur Ouest** qui comprend les « mines » Ungersheim, Marie-Louise, Rodolphe/Alex, Amélie, Max et Joseph-Else.

2.2 Contexte géologique et hydrogéologique

Le bassin potassique alsacien est situé dans la partie méridionale du fossé d'effondrement rhénan. Au début du Tertiaire, l'affaissement marqué du fossé a favorisé des intrusions marines à l'origine de dépôts épais constitués de marnes et d'évaporites. Au sein de ces formations salifères sont incluses deux couches de potasse, découvertes en 1904, à l'occasion de forages de reconnaissance .

La succession des terrains est la suivante, du haut vers le bas (figure 2) :

- **Alluvions épaisses de la plaine du Rhin.**

Elles sont régulières sur l'ensemble du bassin et sont constituées dans l'environnement des mines de potasse par 20 à 50 m de limons, sables et galets avec des inter-lits marno-argileux.

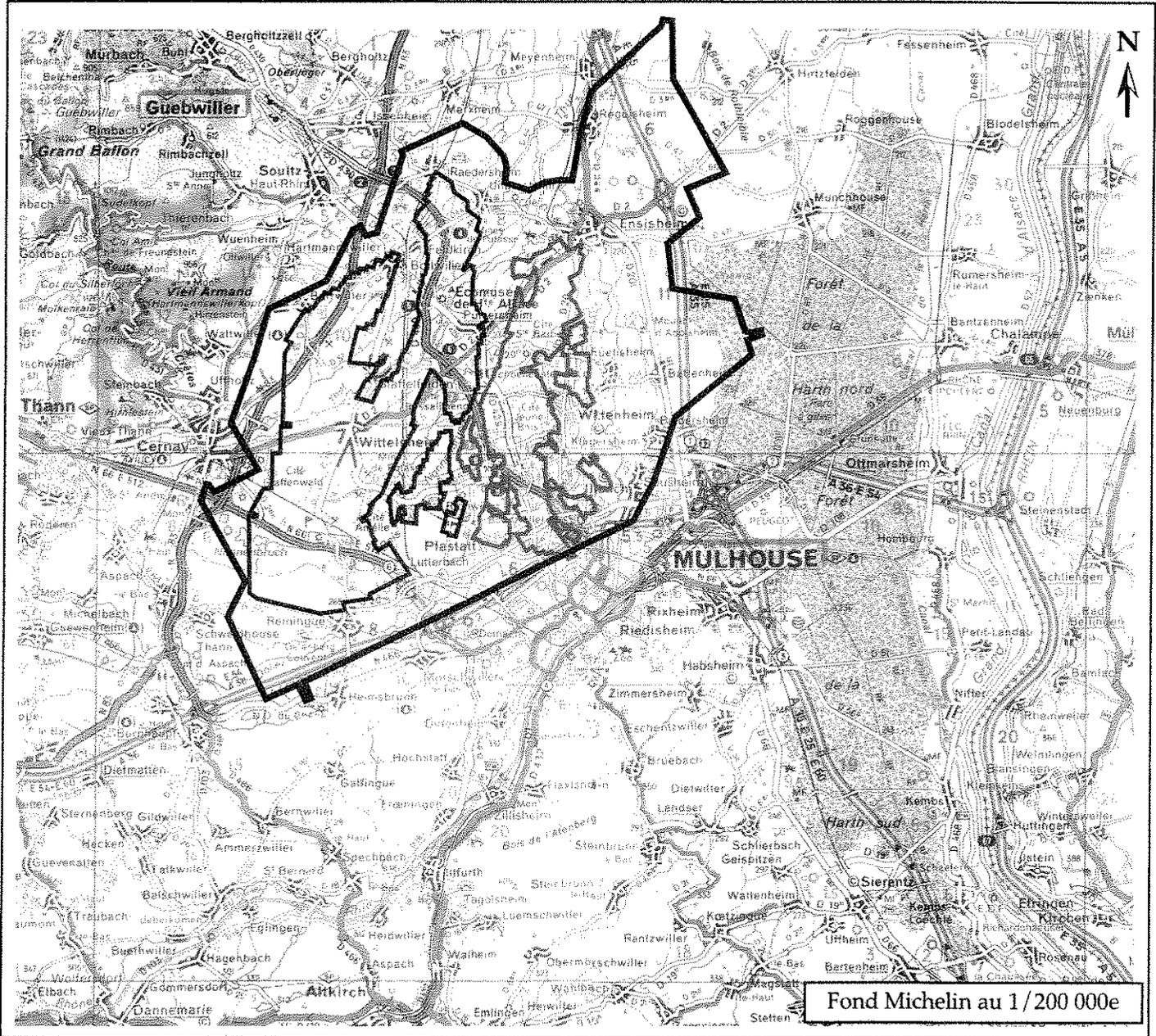
Ces formations, alimentées par les précipitations et les cours d'eau descendant des Vosges constituent le principal aquifère d'Alsace, ressource majeure pour l'alimentation en eau potable.

La nappe alluviale présente à sa base un niveau argilo-marneux d'une dizaine de mètres qui l'isole des formations sous-jacentes.

³ Pour faciliter la lecture Est et Ouest seront utilisés comme des noms propres.



Figure 1 :
Localisation de la zone d'étude



-  Emprise approximative des concessions des Mines de Potasse d'Alsace
-  Emprise des travaux miniers du "secteur Ouest"
-  Emprise des travaux miniers du "secteur Est"

- **Formations du Chattien et Stampien.**

Il s'agit de terrains majoritairement marneux renfermant des horizons sableux ou gréseux, et des niveaux calcaires et gréseux mal consolidés. Ces formations ne sont pas présentes sur l'ensemble du secteur minier.

Par nature, les marnes sont des formations très peu perméables et seuls les niveaux calcaires ou gréseux peuvent donner des venues d'eau dont le débit reste limité à quelques m³/h avec une tendance rapide au tarissement.

- **Zone salifère supérieure (Sannoisien supérieur).**

La zone salifère supérieure est constituée d'une alternance de marnes, d'anhydrites et de sels. Elle a été divisée en trois complexes :

- Le complexe marneux à rognons d'anhydrite et gypse, d'une épaisseur moyenne de 100 mètres.
- Le complexe salifère, à bancs de sel gemme, d'une épaisseur moyenne de 300 mètres.
- Le complexe salin, d'une épaisseur moyenne de 100 mètres, **dans lequel se situent les couches de potasse. Les deux couches exploitées, couche supérieure et couche inférieure, ont une épaisseur moyenne respective de 1,6 et 4 mètres. Elles sont séparées par une vingtaine de mètres de « stérile ».**

Tous ces terrains sont exempts d'eau (sauf exceptionnellement quelques petites présences d'eaux fossiles salées).

- **Zone salifère moyenne (Sannoisien moyen).**

Il s'agit d'une formation marneuse à bancs de sel gemme puis filets d'anhydrite. La formation, épaisse d'environ 300 mètres, présente à son sommet les marnes à hydrobies (bivalves). Ces terrains sont exempts d'eau.

- **Zone salifère inférieure (Sannoisien inférieur).**

Épaisse de plus de 800 mètres, cette formation marneuse renferme des niveaux à anhydrites et bancs de sel gemme, avec notamment le « grand banc de sel gemme » d'une épaisseur de 100 mètres environ. Ces terrains sont exempts d'eau.

- **Les formations du secondaire (calcaires, marnes).**

Ces formations sédimentaires sont situées à grande profondeur, suite à l'affaissement du fossé rhénan.

- L'Eocène n'est pas présent sur toute la zone, son épaisseur atteint au maximum 115 mètres. Il s'agit d'un niveau conglomératique à pisolithes ferrugineuses et rognons d'anhydrite.
- Le Trias et le Jurassique sont globalement marneux avec toutefois des bancs épais de :
 - calcaire sublithographique (Séquanien et Rauracien),
 - calcaire oolithique (« grande oolithe » du Bajocien, réservoir potentiel à pétrole),



COUPE AB (cf. localisation sur la carte géologique ci-dessous)

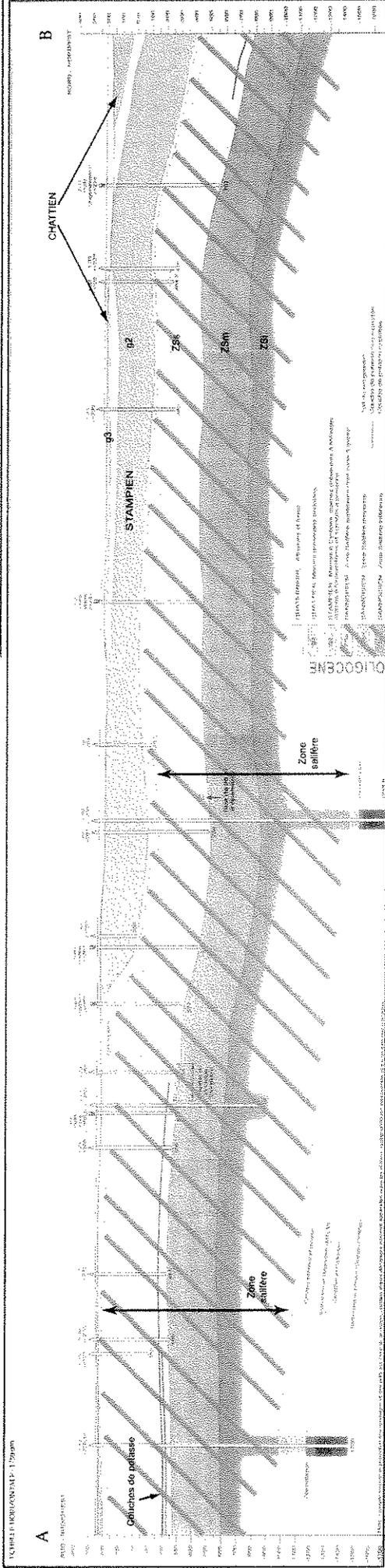
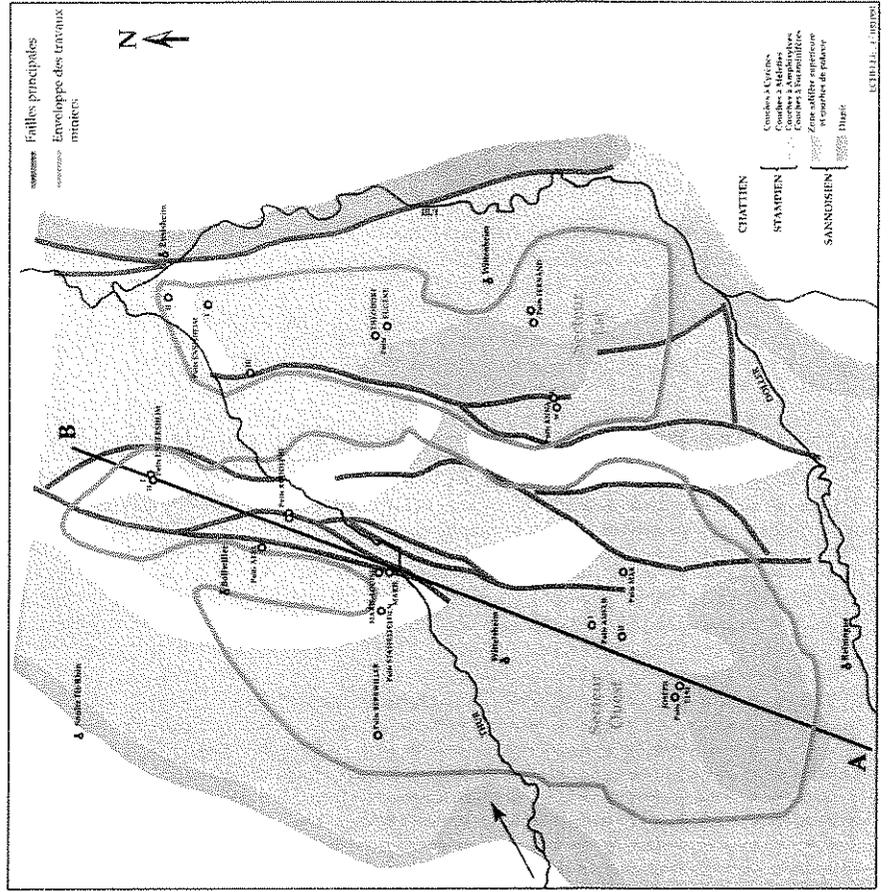
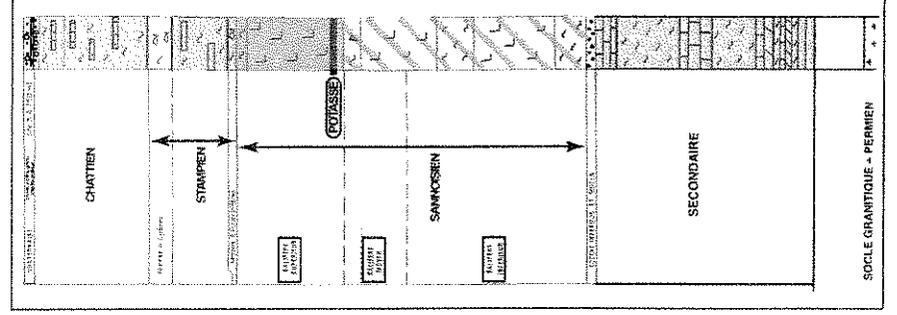


Figure 2 : Contexte géologique, mines de potasse d'Alsace



Carte géologique infra-quaternaire



Log stratigraphique simplifié



- calcaires et dolomies (Muschelkalk),
- grès (Bundsandstein).

Les bancs de calcaires ou les grès constituent des niveaux aquifères. Leur état piézométrique a été estimé grâce à des forages pétroliers profonds, ils sont légèrement artésiens.

2.3 Le minéral

Le minéral de potasse est de la sylvinite, c'est-à-dire un mélange de sylvine (KCl) et de halite (NaCl). La sylvinite subsistait en surface (en général sur les carreaux même des puits de mine), un traitement visant à extraire le chlorure de potassium du minéral et éventuellement d'autres éléments intéressants comme le brome.

Les deux couches de minéral se trouvent à la base de l'ensemble des formations appelées « salifère supérieur » (voir figure 2), c'est-à-dire dans le tiers supérieur de l'épaisse sêite évaporitique du sannoisien, mais tout de même à une cote de l'ordre de -200 NGF, soit à près de **500 mètres de profondeur**. Vers le nord, les couches de potasse s'enfoncent et atteignent 800 NGF, soit **plus de 1000 mètres de profondeur**.

La couche supérieure (Cs) est épaisse de 0 à 2 mètres, alors que la couche inférieure (Ci) atteint 4 à 5 mètres. Dans la couche inférieure, plus épaisse, on distingue 3 à 4 bancs de sylvinite séparés par des niveaux marneux et du sel (NaCl).

Un interbanc stérile d'environ 20 mètres sépare les deux couches de potasse, il est constitué de sel gemme (NaCl), de marnes et d'anhydrites (CaSO₄).

→ **Les couches de potasse exploitées s'inscrivent dans le tiers supérieur d'un épais complexe salifère datant de l'ère tertiaire (étage sannoisien) et formé à la faveur de la subsidence du fossé rhénan.**

Localement les formations salifères (à forte proportion de marnes) sont surmontées de terrains à dominante marneuse (étages Stampien et/ou Chattien). L'ensemble est recouvert de formations sablo-graveleuses ou limoneuses récentes.

La mine de potasse se trouve protégée d'éventuelles venues d'eau par 300 à 400 mètres de terrains salifères et marneux, et 0 à 300 mètres de terrains marneux divers. Sa profondeur minimale par rapport au sol est de l'ordre de 450 mètres.

À sa base, la mine est également isolée des aquifères profonds d'âge secondaire par une épaisseur de plus de mille mètres de terrains évaporitiques.

2.4 L'exploitation minière – le massif salifère

2.4.1 Historique de l'exploitation

L'exploitation a débuté dans le secteur Ouest, par le puits Amélie 1 en 1910. Elle s'est ensuite étendue vers le nord et, dans le même temps, l'exploitation du secteur Est, partie des puits Fernand Est et Théodore en 1913, se développait au nord et au sud.

Le tableau 1 ci-dessous reprend les dates de fonctionnement de chaque puits d'exploitation. Le secteur Ouest regroupe un total de 15 puits, le secteur Est en présente 9 (cf. figure 3).

Les puits et leur période d'activité (classement Nord-Sud)			
Secteur Est		Secteur Ouest	
Ensisheim II	1920 - 1961	Ungersheim I	1946 - 1997
Ensisheim I		Ungersheim II	
Ensisheim III		Alex	1913 - 1964
Théodore	1913 - 1986	Rodolphe II	1929 - 1976
Eugène		Rodolphe I	
Fernand est	1913 - 1972	Louise	1913 - 1998
Fernand ouest		Marie	
Anna est	1923 - 1973	Schoenensteinbach	1973 - 1998
Anna ouest		Staffelfelden	1972 - 2001
		Berrwiller	1961 - 2001
		Amélie 1	1910 - 2002
		Amélie 2	1914 - 1950
		Max	1912 - 1952
		Joseph	1912 - 1966
		Else	

Tableau 1 : Historique

L'exploitation du secteur Est a été arrêtée en 1986, alors qu'elle a été prolongée jusqu'en 2002 à l'Ouest au puits Amélie 1. C'est durant les dernières années d'exploitation qu'ont été creusées des cavités à vocation de stockage de déchets ultimes à l'extrémité sud du gisement⁴.

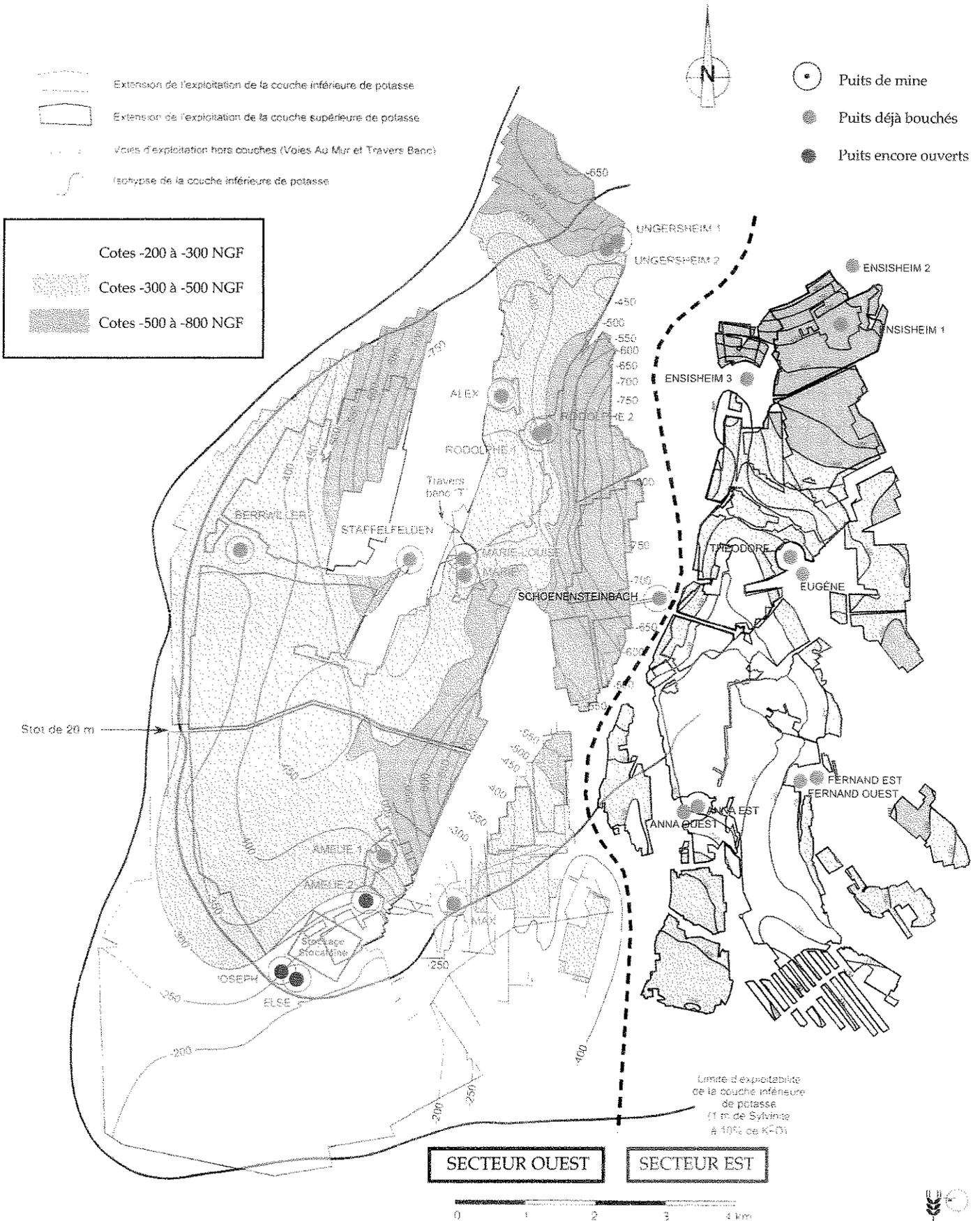
Extraction	
Secteur Est	Secteur Ouest
144 728 300 tonnes	422 996 700 tonnes
567 725 000 tonnes	

Tableau 2 : Extraction

⁴ StocaMine est un centre de stockage de déchets ultimes créé en 1998 une vingtaine de mètres sous la couche inférieure de potasse dans le secteur Ouest, en utilisant les puits MDPa proches (Joseph, Else, Amélie 1 et 2) pour la descente des déchets, l'exhaure et l'aéragé.



Figure 3 :
Les deux secteurs
d'exploitation



Le tonnage total de potasse extrait du bassin pendant sa phase d'exploitation s'élève à près de 568 millions de tonnes (minerai brut), ce qui représente (sur la base d'une densité de 2,1) **environ 270 millions de m³ de matériaux extraits, dont 200 millions provenant du secteur Ouest et 70 millions du secteur Est** (cf. tableau 2).

2.4.2 Les méthodes d'exploitation

● Les puits de mine

Le minerai étant situé à plus de 400 mètres de profondeur, n'a pu être atteint qu'avec la réalisation de **puits profonds**. Le fonçage de ces ouvrages se déroulait sur de nombreux mois, en particulier parce qu'il fallait étancher les premières dizaines de mètres en tête (au niveau des alluvions) pour éviter les intrusions d'eau dans la mine.

Les puits de mine ont donc tous été **équipés en tête d'un cuvelage étanche** (cuvelage en fonte ou corset métallique noyé dans du béton), se prolongeant généralement sur toute l'épaisseur des terrains qui pouvaient contenir de l'eau. Ces cuvelages n'ont pas été prolongés dans les terrains salifères, qui eux ne contiennent pas d'eau. À ce niveau, le parement des puits n'a plus vocation à être étanche et n'a qu'une fonction de soutien. Il est constitué de briques (ou de moellons ou d'un revêtement en béton sans corset métallique).

Sur certains ouvrages, des venues d'eau profondes ont pu être recoupées et nécessiter la mise en place d'un cuvelage complémentaire distinct du cuvelage systématiquement mis en place au niveau des alluvions : c'est le cas des puits Amélie 2, Marie, Alex. D'autres puits ont des cuvelages de grande hauteur car des venues d'eau étaient présentes dans les terrains tertiaires en dessous des alluvions : ce sont en particulier les puits situés dans la partie la plus septentrionale des gisements, là où les formations du Chattien et du Stampien prennent toute leur ampleur (voir figures 2, 5 et 6). Dans ce cas le cuvelage descend jusqu'à la base du Stampien.

● L'exploitation du minerai

L'exploitation d'une couche de minerai affecte et fracture les terrains sus-jacents, elle provoque des fissures dans le massif sur plusieurs dizaines de mètres au-dessus de l'exploitation et quelques mètres en dessous. Au-dessus de l'exploitation, au-delà de la zone fissurée (de 40 à 60 m d'épaisseur), la déformation souple prend le relais et se répercute de proche en proche sur les terrains sus-jacents jusqu'à produire en surface les affaissements miniers.

Pour optimiser l'exploitation et contrôler au maximum les affaissements de surface, les méthodes d'exploitation se sont succédées au fil du temps, avec tout d'abord des méthodes utilisant le remblayage (piliers tournés, méthode « stossbau »⁵) entre 1913 et 1930 puis des méthodes basées sur le foudroyage⁶ (longues tailles, soutènement marchant, etc.).

⁵ Exploitation à l'explosif puis remblaiement des tailles.

⁶ Autorembayage du vide minier provoqué par la chute du toit.



Selon les études MDP, 90 % du tonnage extrait dans le bassin potassique d'Alsace a été exploité par des méthodes associées au foudroyage⁷

Le foudroyage a permis de récupérer une grande proportion du gisement. Cette méthode ne peut cependant être appliquée que si la fissuration qu'elle génère ne pose pas de problème à son aplomb et n'est pas susceptible d'entraîner des venues d'eau, dangereuses pour l'exploitant. Dans le cas présent, l'exploitation par foudroyage a produit des affaissements en surface (90 % de la hauteur exploitée) mais sans altérer le caractère étanche de la couverture dont l'épaisseur (quelques centaines de mètres) dépasse largement l'emprise de la fissuration induite par l'exploitation (quelques dizaines de mètres).

Il s'agit d'une des seules mines de potasse exploitées de cette manière dans le monde, la méthode plus classique étant l'exploitation par chambres et piliers abandonnés (blocs de minerai laissés en place pour soutenir l'exploitation, le minerai n'étant extrait que dans les galeries).

L'essentiel de l'exploitation dans le bassin potassique s'est faite par foudroyage, ce qui signifie, en terme de vides résiduels souterrains, que dans les champs d'exploitation les vides ont été comblés au moment même de l'exploitation par l'affaissement des terrains du toit (foudroyage).

- L'infrastructure minière

Pour l'essentiel, les galeries constituant l'infrastructure minière et assurant la liaison entre les différents quartiers d'exploitation et les puits de mine ont été creusés sous les couches de potasse dans des terrains constitués d'alternances de marnes et de sel (non potassique) peu affectés par la fissuration liée à l'exploitation. On estime globalement que le vide créé pour les infrastructures représente environ 10 % du vide total créé par l'exploitation.

2.4.3 La compartimentation

Il existe une séparation franche entre le secteur Est et le secteur Ouest du bassin potassique (cf. figure 3). Elle correspond à une flexure décalant les couches de minerai d'environ 150 mètres en hauteur (cf. schéma 1) et rendant les couches inexploitable sur près de 300 m de large.

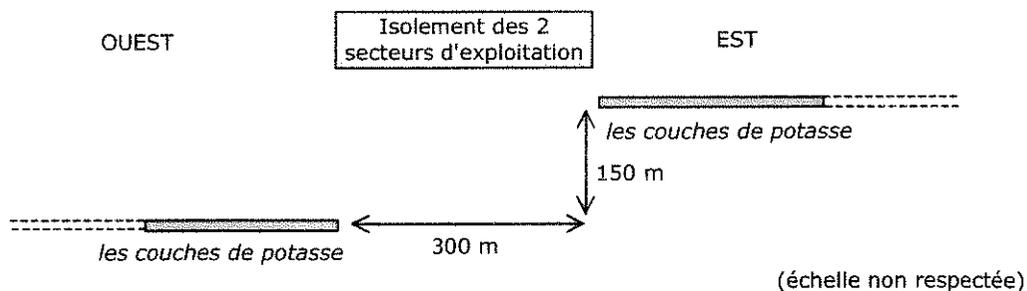


Schéma 1 : Séparation entre secteur Est et secteur Ouest

⁷ Source : extrait concernant les méthodes d'exploitation, document MDP, Y. Lourdel 2004.



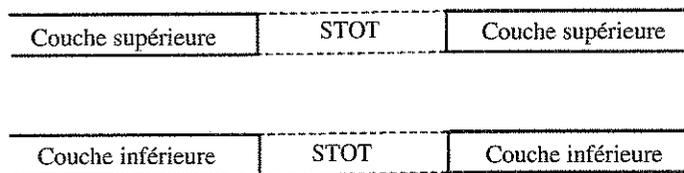
Dans chacune des deux parties ainsi individualisées (Est et Ouest), les différents champs d'exploitation sont reliés entre eux soit par des galeries soit par la fissuration quand les panneaux exploités sont proches les uns des autres.

Dans le secteur Ouest, un « stot ⁸ » non exploité d'une vingtaine de mètres d'épaisseur aurait pu être à l'origine d'une compartimentation de la mine entre un compartiment sud et un compartiment nord. Ce stot n'a semble-t-il jamais été recoupé par l'exploitation, toutefois son épaisseur (20 à 50 mètres selon les endroits) apparaît faible au regard de la zone d'influence de l'exploitation (fissuration, décompression des terrains) qui est nette sur une quarantaine de mètres autour de la zone exploitée.

Ainsi, si ce stot isolait, à un moment donné, le nord et le sud de l'exploitation Ouest, il a sans doute été fissuré au moins dans la couche supérieure (comme représenté dans le schéma 2).

L'hypothèse d'une compartimentation étanche de l'exploitation Ouest entre une partie nord et une partie sud est donc peu probable même si elle reste envisageable.

Minerai laissé en place dans le secteur Ouest (=stot)



L'exploitation de part et d'autre du stot a pu fissurer les terrains

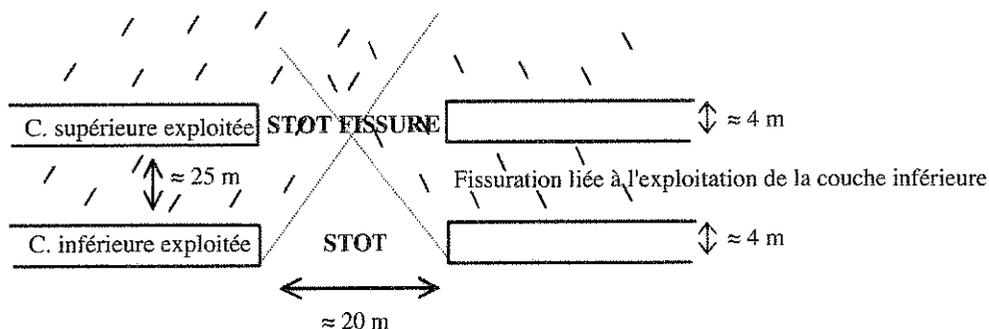


Schéma 2 : Le stot du secteur Ouest

Les secteurs Est et Ouest du bassin potassique sont clairement isolés l'un de l'autre par une structure géologique majeure. Ils constituent donc deux compartiments indépendants.

Dans le secteur Ouest, une compartimentation imparfaite entre le secteur nord (Marie-Louise) et le secteur sud (Amélie) peut être envisagée du fait de l'existence d'un « stot ⁵ » probablement fissuré par l'exploitation mais jamais recoupé par elle.

⁸ Un stot est une bande de minerai laissé volontairement en place pour assurer une séparation entre deux secteurs exploités.

2.5 L'eau dans la mine

La particularité des mines en terrains salins est que l'encaissant minier est soluble, si bien qu'au contact de l'eau douce pénétrant dans la mine, le sel constituant l'encaissant peut passer en solution. Si l'eau ne se renouvelle pas, la dissolution est limitée par la saturation de la saumure, et s'arrête (voir annexe 1). Si par contre, un secteur est soumis à une arrivée régulière d'eau douce, le massif peut se creuser et la venue d'eau s'accroître rapidement.

Pour l'essentiel, l'eau rejoignant la mine provenait des puits (qui constituent les seuls liens avec les terrains sus-jacents pouvant contenir de l'eau) et était immédiatement évacuée au jour dans le réseau d'exhaure.

2.5.1 L'exhaure pendant l'exploitation

Dans les mines de potasse d'Alsace, malgré la méthode d'exploitation par foudroyage et les affaissements engendrés en surface, la fissuration franche des terrains ne s'est jamais étendue à plus d'une quarantaine de mètres autour des travaux miniers. Il n'y a donc jamais eu dans la mine d'intrusion d'eau liée à la nappe alluviale superficielle ou aux niveaux plus perméables présents dans la couverture tertiaire⁹ par le biais des terrains.

Par conséquent, pendant l'exploitation, le principal risque d'intrusion d'eau se situait au niveau des puits de mine ou d'anciens sondages de reconnaissance ayant pu traverser les couches de potasse à la recherche de ressources pétrolifères ou minières profondes. Cependant aucun problème grave de dissolution n'a jamais été signalé pendant l'exploitation car :

- tous les puits de mine ont été isolés en tête pendant leur fonçage puis équipés de pompes dans des puisards pour capter immédiatement les éventuelles venues d'eau.
- les sondages de reconnaissance qui ont pu être recoupés par l'exploitation avaient été soigneusement rebouchés et n'ont jamais causé d'accident.

Les chroniques d'exhaure correspondant à la période d'exploitation donnent un volume d'eau extrait de la mine évoluant de 55 000 et 120 000 m³/an entre 1946 et 1979, ce qui représente 6 à 14 m³/h pour l'ensemble des exploitations du bassin potassique (cf. tableau 3).

Plusieurs facteurs expliquent l'augmentation de l'exhaure dans le temps :

- extension des travaux souterrains et fonçage de 3 nouveaux puits (Berwiller, Staffelfelden, Schoenensteinbach),
- développement des réseaux d'eau (prévention des poussières puis climatisation des chantiers profonds)
- développement du soutènement marchant.

⁹ Seul le quartier Ensisheim 1 (secteur Est) présentait des venues d'eau naturelles (de l'ordre de 1,2 m³/h) perceptibles dans l'exhaure. Selon l'exploitant, il s'agissait d'une venue d'eau saturée rejoignant les quartiers profonds d'Ensisheim du fait de la proximité d'une structure géologique en diapir jouxtant la mine à l'Est.



Dans le détail l'exhaure s'est répartie de la façon suivante :

Pour le secteur Est :	
Anna	Entre 1500 et 3 500 m ³ /an
Fernand	Moins de 500 m ³ /an (sauf de 63 à 66)
Théodore	Augmentation jusqu'à 27 000 m ³ /an
Ensisheim	Fluctuations entre 30 et 70 000 m ³ /an
Pour le secteur Ouest :	
Amélie 1 et 2	Fluctuations autour de 2 à 3 000 m ³ /an
Joseph - Else	Faible et très variable de 47 à 380 m ³ /an
Max	Maximum 3 500 m ³ /an, 0 quand le puits est passé en retour d'air
Marie et Marie-Louise	Augmentation de 1 400 à 12 000 m ³ /an
Berrwiller	Fluctuations de 3 à 7 000 m ³ /an (le puits a connu plusieurs campagnes d'étanchement)
Staffelfelden	20 000 m ³ /an
Schoenensteinbach	11 000 m ³ /an
Rodolphe et Alex	De l'ordre de 10 000 m ³ /an - Maximum 37 000 m ³ /an entre 1964 et 67 (Alex)
Ungersheim 1 et 2	Entre 1500 et 5 000 m ³ /an

Tableau 3 : Exhaure de 1946 à 1979

Une partie de l'eau constituant ces débits d'exhaure était en fait volontairement introduite dans la mine pour les besoins de l'activité (réseaux d'alimentation), mais dans le même temps, les flux d'air liés à l'aéragé de la mine extrayaient naturellement de l'eau¹⁰. Ces valeurs sont donc probablement de bons ordres de grandeur pour connaître les venues d'eau naturelles dans la mine.

Du fait du bon isolement géologique de la mine dans le massif salifère, les venues d'eau dans la mine étaient liées pour l'essentiel aux infiltrations par les puits. Les données d'exhaure tenaient compte de l'eau introduite volontairement pour le fonctionnement de l'activité et étaient naturellement réduites par le soutirage d'eau dans l'air du réseau d'aéragé (voir ex. du puits Max). L'ensemble des débits d'exhaure pendant l'exploitation ne représentait que 6 à 14 m³/h pour tout le bassin potassique. Sachant que le secteur d'Ensisheim présentait une venue d'eau naturelle par le terrain (eau saturée en sel) évaluée à 30 m³/j (1,2 m³/h).

¹⁰ Il n'était pas rare qu'un puits présentant une exhaure tant qu'il n'était pas utilisé pour l'aéragé (en particulier tant qu'il n'était pas utilisé en sortie d'air) n'en présente plus après. En effet, un débit d'aéragé de l'ordre d'une centaine de m³/s peut extraire 1 m³/s d'eau pour une augmentation de teneur en eau de 1% dans l'air.



2.5.2 Fermeture de la mine et évolution de l'alimentation

Après arrêt de son activité, chaque puits est mis en sécurité. Un soin particulier est apporté aux travaux de remblayage pour maîtriser la pénétration de l'eau par ces ouvrages.

La majorité des puits sont fermés conformément au schéma de la figure 4, c'est-à-dire que la totalité de la colonne de puits est remblayée avec des matériaux drainants excepté à la base du cuvelage étanche au niveau de laquelle un bouchon de cendres volantes de centrale thermique d'au moins 50 mètres d'épaisseur est mis en place pour limiter les intrusions d'eau dans l'ouvrage.

Un bouchon de béton ferme la base des puits au niveau de la recette. Il est traversé par des drains permettant d'évacuer loin de la base de l'ouvrage (vers les travaux miniers profonds) les éventuelles venues d'eau ayant réussi à pénétrer dans le puits. Ces drains protègent ainsi la stabilité de la base des puits en évitant d'éventuelles dissolutions à proximité.

Pour estimer les venues d'eau potentielles dans la mine fermée, il faut tenir compte des caractéristiques des bouchons de cendre mis en place dans les puits (cf. figures 5 et 6).

La perméabilité de ces cendres a été mesurée in situ pendant le remblayage du puits Marie¹¹. Compte tenu des conditions de mesure (mesure de baisse de niveau d'eau dans le puits après injection), la valeur mesurée intègre obligatoirement l'eau traversant effectivement le bouchon de cendres, mais également l'eau ayant pu percoler à l'extrados de ce bouchon, ou même à l'extrados du puits. Cette valeur ne peut donc être considérée que comme une approximation maximale de la perméabilité des cendres, elle s'établit à $5,8.10^{-7}$ m/s (INERIS, 2002).

Selon toute vraisemblance, cette valeur est surestimée, en effet, après le remblayage du puits Fernand est, des visites régulières ont été menées à sa base mais aucune venue d'eau mesurable n'y a été observée durant une période d'environ 2 ans. Cette observation plaide en faveur d'une très faible perméabilité des bouchons de cendre de ces puits, mais ne permet pas de la quantifier réellement.

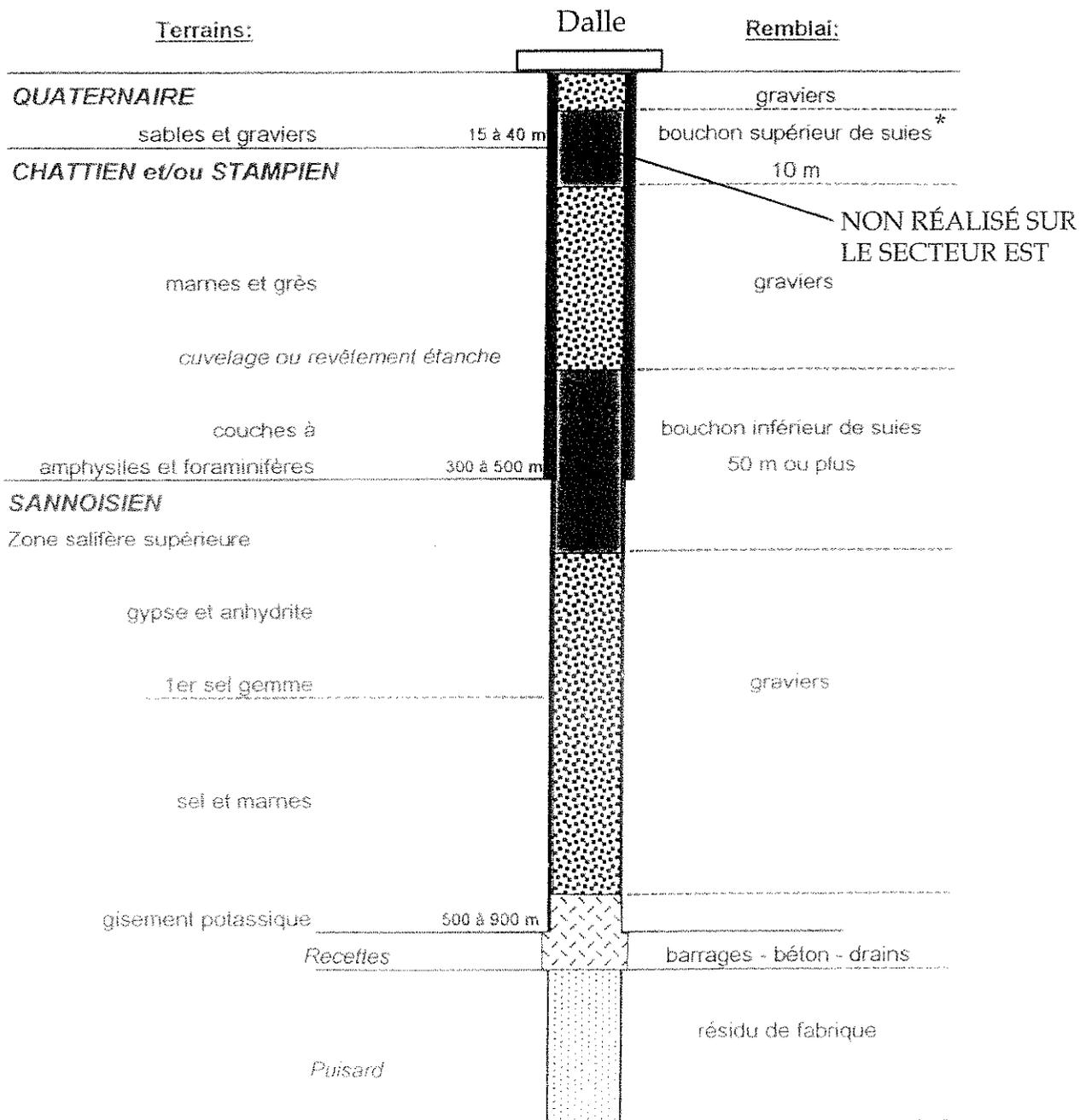
Quoi qu'il en soit, même si l'on peut discuter la valeur de la perméabilité des cendres volantes formant les bouchons des puits de mine (voir annexe 2), nous proposons de retenir dans la suite de ce rapport une valeur de perméabilité de l'ordre de 6.10^{-7} m/s.

En effet, le choix d'une valeur probablement surestimée dans les calculs de vitesse de remplissage de la mine conduit à prendre en compte des débits entrants plus forts, donc maximise les phénomènes associés et permet d'intégrer, d'une certaine façon, les éventuels débits susceptibles de transiter par l'extrados des ouvrages. En effet, la valeur de perméabilité mesurée in-situ par INERIS incluait, de fait, les éventuels débits ayant pu transiter à la périphérie du bouchon de cendres ou à l'extrados du cuvelage lui-même.

¹¹ INERIS 2002 : Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes.



Figure 4 :
Principe de fermeture des puits de mine



* Cendres volantes de centrale thermique

Une fois la mine fermée, les venues d'eau ne sont plus liées qu'aux infiltrations pouvant se produire par l'intermédiaire des puits de mine. L'épais bouchon de cendres volantes mis en place lors de la fermeture de ces ouvrages vise à réduire le débit pouvant alimenter les anciens travaux miniers souterrains. On ne peut toutefois pas considérer que le débit pénétrant dans la mine sera nul et ceci pour 2 raisons :

- la discontinuité créée dans la couverture géologique par la présence des puits de mine perdure : elle pourra toujours être le siège de passages d'eau aussi infimes soient-ils,**
- la perméabilité des bouchons de cendres n'est pas nulle et, aussi faible soit-elle, elle autorisera à une échelle de temps géologique la pénétration d'eau vers la mine.**

Ces deux éléments conduisent à envisager obligatoirement un remplissage de l'exploitation minière dont la présente étude doit tenter de définir la vitesse approximative et de décrire les phénomènes associés.

Figure 5 :
Coupe des puits du secteur Est,
position des bouchons de cendres

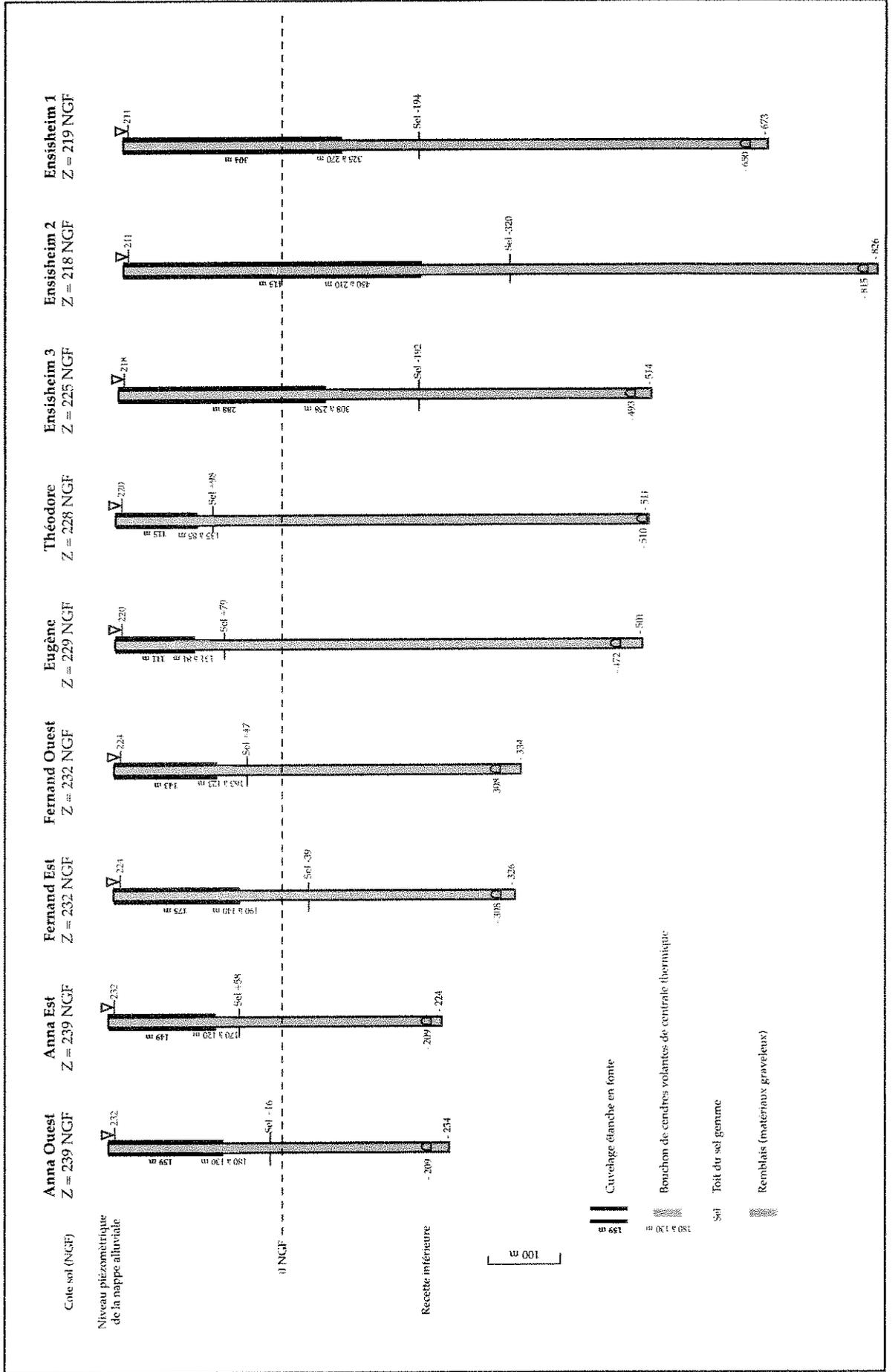
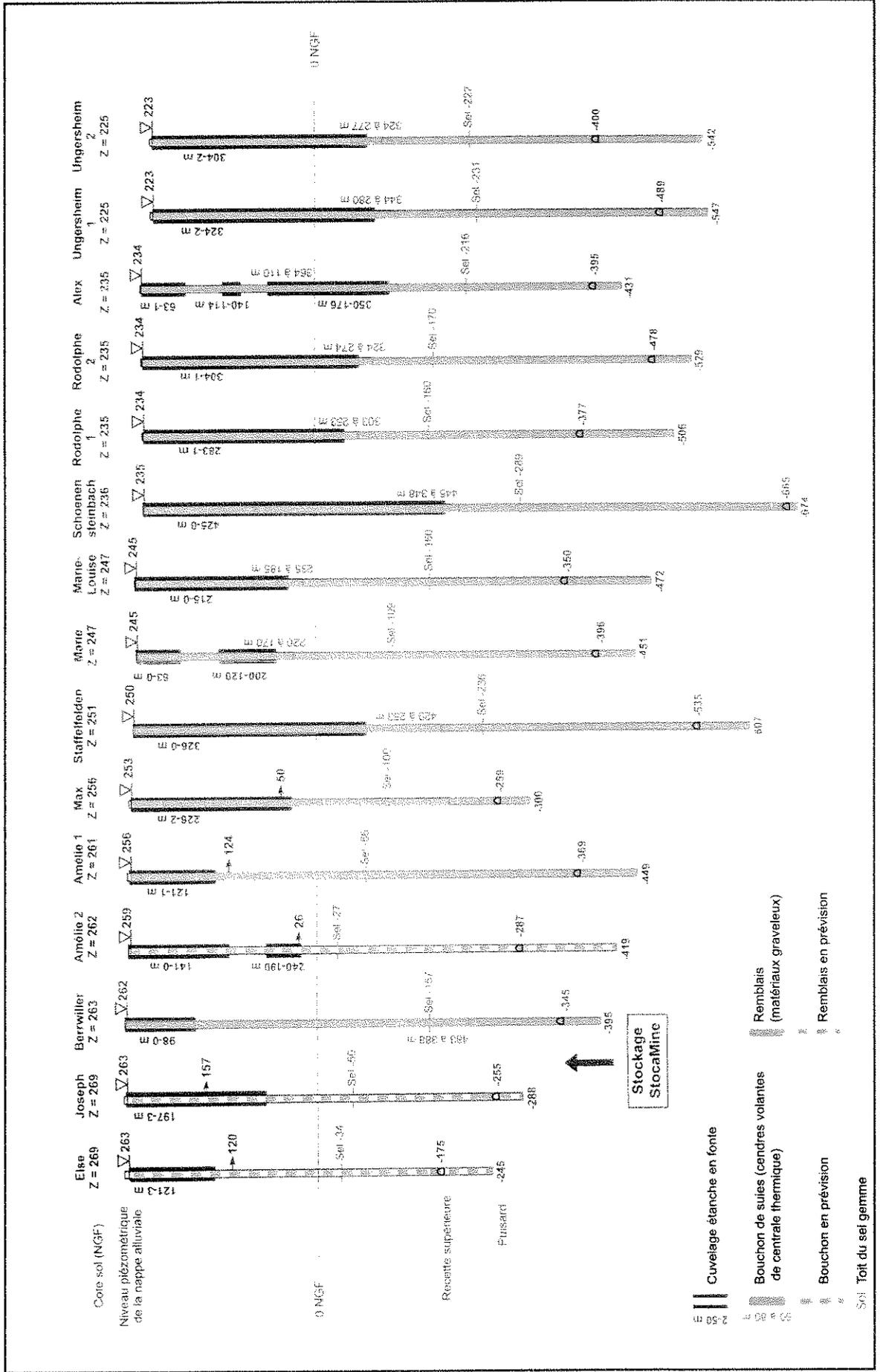


Figure 6 :
Coupe des puits du secteur Ouest,
position des bouchons de cendres



2.6 Les particularités de l'encaissant minier

Nous avons vu dans le paragraphe précédent, que la mine de potasse présente un encaissant particulier puisqu'il est soluble à l'eau. Cet encaissant présente également une spécificité géotechnique par rapport à d'autres types de faciès géologiques, c'est sa souplesse et sa capacité à fluier.

Ainsi, même si l'exploitation a laissé un volume résiduel souterrain minimum (puisque les vides étaient remblayés ou ont rapidement été refermés par foudroyage de la colonne de terrains sus-jacents), le système va continuer à évoluer après l'arrêt des travaux miniers, du fait de la spécificité du matériau sel, « souple » et soluble.

2.6.1 « Souplesse » du massif et affaissement

La souplesse du massif a rendu possible l'exploitation par foudroyage. Au fur et à mesure de l'avancement des chantiers, on assistait à des affaissements à l'aplomb des zones foudroyées.

Les affaissements en surface n'ont pas provoqué de phénomènes brutaux, les problèmes rencontrés se limitaient aux secteurs pour lesquels un différentiel se créait entre terrains s'affaisant et terrains non affectés par l'exploitation, c'est-à-dire en limite de la zone d'affaissement.

Les observations faites par les MDPa (voir rapport « Affaissements et dégâts de surface dans le bassin potassique alsacien » – janvier 2008) ont montré que l'affaissement observé en surface sur la majorité de la zone d'influence correspondait à 90 % de la hauteur de la couche exploitée. Le deuxième résultat majeur des observations sur les affaissements de surface est que le phénomène se produit pendant une période de 3 ans environ après l'exploitation.

Cela signifie par exemple que pour les 2 couches exploitées (puissance maximale de l'ordre de 6 mètres), le vide en souterrain 3 ans après arrêt de l'exploitation ne représente déjà plus que l'équivalent de 60 centimètres répartis, grâce à la fissuration, sur une quarantaine de mètres d'épaisseur au niveau et au-dessus de la couche exploitée.

Comme tous les travaux ont été arrêtés avant 2002 (1986 pour le secteur Est), la phase d'affaissement est terminée, et déjà depuis très longtemps pour les travaux les plus anciens (début de l'exploitation : 1910).

La création de vides en souterrain par l'exploitation minière n'a pas produit de ruptures en surface, mais un affaissement souple des terrains.

L'affaissement se produit sur une durée de 3 ans après une exploitation, et permet de transférer en surface près de 90 % des vides créés par l'exploitation. Le vide souterrain résiduel ne représente que 10% du volume de matériaux extrait et se présente sous forme d'une zone déstructurée et fissurée d'une quarantaine de mètres d'épaisseur autour des champs d'exploitation.



2.6.2 Fermeture des vides et fluage

Dans la mine de potasse, après la phase d'affaissement décrite dans le paragraphe précédent, un autre phénomène prend le relais, diminuant encore le volume de vides souterrains. Nous l'appellerons ici la **compaction des terrains foisonnés**, il s'agit d'une fermeture lente des vides, liée à la cicatrisation du massif par fluage¹² du sel.

Ce phénomène concerne tous les vides créés en souterrain dans la mine, c'est-à-dire aussi bien les galeries liées à l'exploitation que le vide persistant dans les zones foudroyées après la phase d'affaissement, puisqu'il apparaît et persiste tant que subsiste un différentiel de pression (un « déviateur ») entre 2 parties du massif salifère.

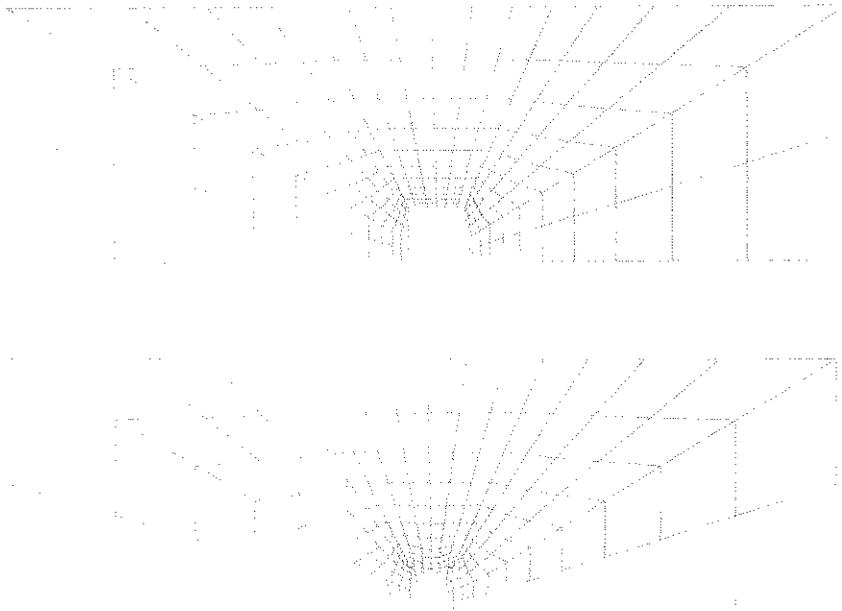


Schéma 3

Exemple de l'effet du fluage pour une galerie
(des modélisations ont été faites par exemple pour les galeries de StocaMine)

Cependant, contrairement à la phase d'affaissement, la compaction ultérieure des terrains par fluage est très étendue dans le temps et se traduit en surface par des mouvements difficilement mesurables car ils sont de faible amplitude et ne peuvent pas être différenciés de ceux produits par les autres causes naturelles telles que : gel, érosion, successions de périodes sèches et humides, battements de nappe, ...

Pour essayer de quantifier les phénomènes liés au fluage, on dispose de 3 sources d'information : des essais mécaniques réalisés en laboratoire sur des éprouvettes de minerai (thèse de G.Vigier [15]), des études spécifiques réalisées pour le creusement des galeries de StocaMine (galeries de stockage de déchets dont il fallait assurer la tenue à moyen terme) et l'expérience de l'exploitant qui prend en compte la spécificité du massif dans sa totalité et les caractéristiques morphologiques des vides créés.

¹² Le sel a un comportement rhéologique particulier qui fait que toute cavité creusée dans le sel a tendance à se refermer au fil du temps par une déformation continue s'il est soumis à une contrainte non nulle.

➤ *Les essais sur éprouvettes (Vigier)*

Des essais mécaniques réalisés par **G.Vigier** (thèse de 1981) sur des éprouvettes de sel du bassin alsacien, ont montré :

- que le rapport de déformation verticale ($\Delta l/l$) de ce matériau est constant **dans le temps mais variable avec la pression (donc la profondeur)**,
- que vis-à-vis du phénomène de fluage, la profondeur joue un double rôle puisqu'elle accroît simultanément la pression (lithostatique) et la température,
- que le rapport de déformation ($\Delta l/l$) s'établit à $0,45 \cdot 10^{-4}/j$ (soit 1,6 %/an) pour 14 MPa (ce qui est équivalent à la pression lithostatique à environ 600 m de profondeur) et $1,8 \cdot 10^{-4}/j$ (soit 6,6 %/an) pour 16,5 MPa (\approx 750 m de profondeur) sur l'échelle de temps étudiée (150 jours) : ce qui représente une évolution très importante du phénomène entre 600 et 750 m de profondeur.

Vigier a observé que, sous une pression constante, $\partial l/l$ est constant sur une éprouvette (avec l la longueur de l'éprouvette), ce qui se traduit par

$$l_{(t)} = l_{(0)} \cdot e^{(-at)}$$

avec $l_{(0)}$ la longueur initiale de l'éprouvette,
 a un taux fixe
 t le temps
 $l_{(t)}$ la longueur de l'éprouvette au temps t

Cette formule s'applique à une éprouvette et doit être transposée à une galerie, plus exactement au vide dans cette galerie.

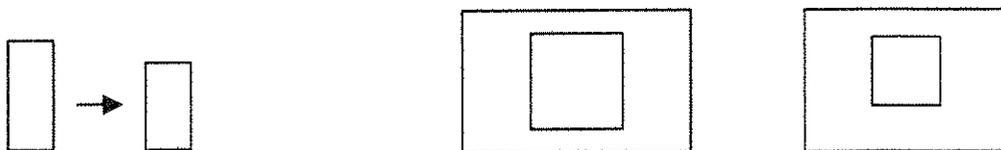


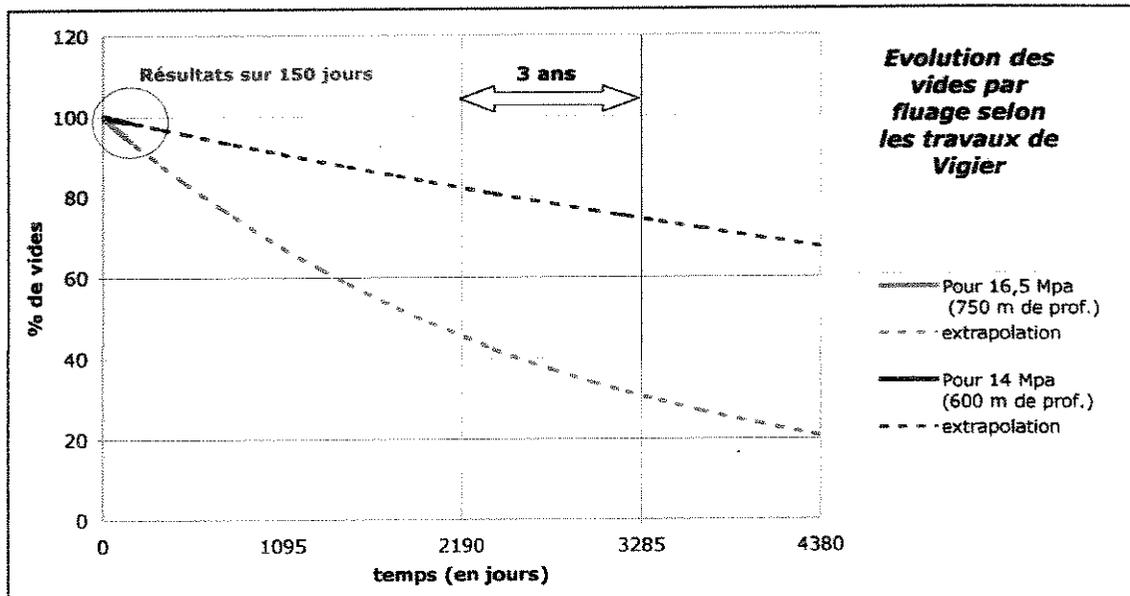
Schéma 4 : De l'éprouvette à la galerie

Les courbes du graphique 1 (page suivante) sont établies avec la formule suivante :

$$S_{(t)} = S_{(0)} \cdot e^{(-2at)}$$

S : Section (m^2)

Avec les valeurs de a établies par Vigier en laboratoire, fonction de la pression et valables pour une observation de 150 jours seulement.



Graphique 1

Les résultats sur éprouvettes, s'ils sont extrapolés à long terme pour les vides miniers, indiqueraient donc une fermeture rapide.

➤ *Les modélisations de G. Vouille (1990 [1])*

G.Vouille en 1990 [1], a étudié le phénomène de convergence¹³ des vides dans le massif salin, préalablement à la création des chambres de stockage de déchets dans des galeries sous la mine de potasse (site StocaMine au sud du secteur Ouest). Le but de cette étude était de définir les dimensions des galeries de stockage à creuser, pour que la fermeture progressive des parois des galeries au fil du temps ne gêne pas l'activité de stockage et garantisse la réversibilité de celui-ci au terme de 30 ans d'exploitation.

L'équation de la convergence fait intervenir des paramètres qui sont fonction des propriétés intrinsèques du matériau considéré, mais aussi de la morphologie de la galerie concernée. Dans ce cas précis, il s'agit de larges galeries situées dans des zones de moindre profondeur (<700 m), et localisées sous l'exploitation de potasse, c'est-à-dire dans un matériau légèrement différent du minerai exploité.

La formule de convergence utilisée par G. Vouille prend la forme suivante, et les paramètres retenus pour la géométrie des galeries Stocamine sont présentés dans le tableau ci-après :

¹³ La convergence est le rapprochement des parois d'une galerie au fil du temps (cf. schéma 3). Ce phénomène peut être mesuré en posant des repères sur les parois.

Formule de convergence $C = A \cdot \{t^\alpha - (10/365)^\alpha\}$

t exprimé en années, C exprimé en mm, et avec :

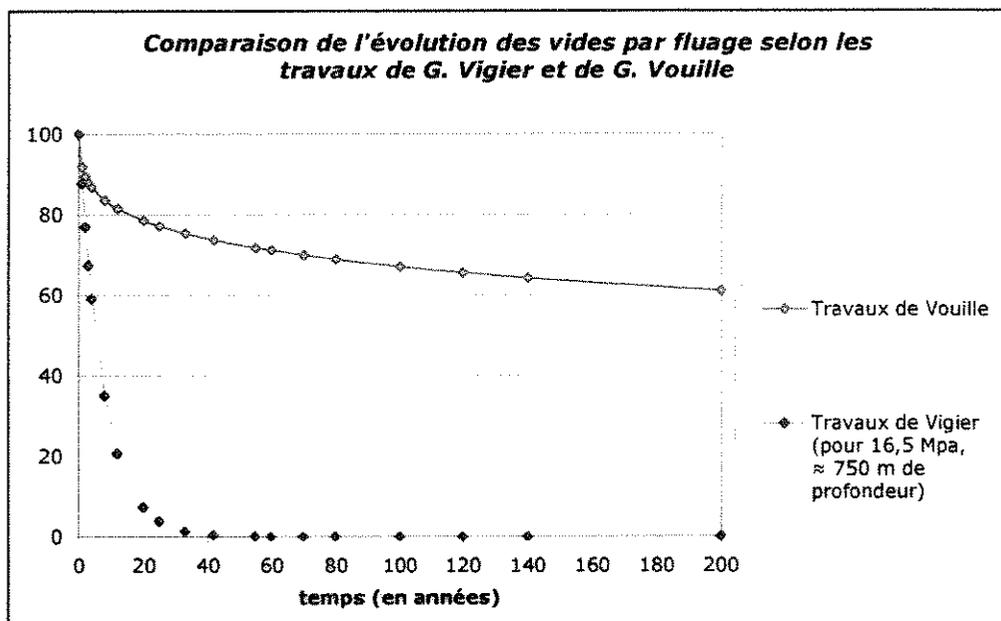
Paramètres définitifs du modèle Vouille pour des piliers de 20 m x 20 m et des galeries de 5,3 m de large et 2,8 m de haut		
Convergence verticale	A	275,5
	α	0,2327
Convergence horizontale	A	253,4
	α	0,2285

N.B. : les valeurs de A et α correspondent à une géométrie particulière, une distinction est faite entre la convergence verticale (plus forte) et la convergence horizontale.

On remarque que les lois de convergence des parements des galeries traduisent l'observation selon laquelle les mouvements suivent une évolution parabolique à vitesse décroissante avec le temps, en tenant pour acquis que la convergence mesurable au bout d'un temps donné correspond à la convergence calculée à laquelle on retranche une convergence initiale obtenue à la date T = 10 jours.

Les courbes de convergence obtenues par G. Vouille (exemple cf. graphique 2) ont été validées par les observations in situ et actualisées dans une récente étude menée par MM. Hadj-Hassen et Tijani de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris [35].

Cette récente étude a permis de valider la loi de convergence de Vouille et d'expliquer certaines anomalies de stabilité observées in-situ par la proximité d'une limite d'exploitation de la potasse au-dessus des galeries de stockage (entraînant dans les déviateurs une anomalie impossible à simuler avec une loi d'expression aussi simple).



Graphique 2

Le graphique 2 permet de comparer l'évolution potentielle du vide minier lié au fluage, calculée avec la formule de Vigier (issue d'essais sur éprouvettes de potasse avec un temps de suivi court) et celle de Vouille (correspondant à un type de galeries bien particulier creusées dans le sel (et non la potasse), avec une géométrie prévue pour durer et dans une zone de faible profondeur).

L'étude de G. Vouille montre que la fermeture des vides miniers peut être très lente (elle n'est que de 20% au bout de 20 ans et s'atténue ensuite avec le temps) si les dimensions des galeries sont calculées pour limiter les déformations si la profondeur est < 700 m et si la structure du massif est calme (pas de déformation tectonique ou d'exploitation minière dans l'environnement des galeries).

➤ Synthèse

Il existe effectivement deux lois rhéologiques pour caractériser le fluage du sel, comme le précisent Ghoreychi et Daupley (INERIS) dans un article publié en mars 2004 [14].

La loi dite de Lemaître, traduit une **diminution de la vitesse de fluage au cours du temps** (intégrant ainsi un facteur d'atténuation).

La loi de Norton, prend en compte une **stabilisation de la vitesse de fluage après une phase transitoire**.

La fermeture complète des vides (par convergence d'une paroi vers l'autre) serait plus rapidement atteinte en utilisant les formules appliquées par Vigier (pas d'atténuation du phénomène) que celles utilisées par Vouille (qui concernaient StocaMine).

En réalité, les deux modèles peuvent être appliqués à la mine de potasse, en fonction des caractéristiques de chaque secteur de travaux, notamment :

- la géométrie des vides ou des épontes (vide de type galerie ou champs d'exploitations foudroyés),
- la profondeur,
- le type d'encaissant : sel gemme ou potasse, proportion de non solubles,
- etc.

De fait, l'exploitant confirme que :

- certaines voies de liaison peu profondes ou consolidées peuvent se maintenir sans fermeture visible pendant toute la durée d'exploitation d'un secteur (la fermeture n'est perceptible qu'avec des instruments de mesure et la convergence est très inférieure à 1%/an).
- par contre, la fermeture des vides dans les parties profondes de l'exploitation de potasse était généralement très proche du comportement décrit par les essais de Vigier : d'anciens champs d'exploitation d'une trentaine d'années ont été recoupés par de nouveaux travaux sans détecter de vide (convergence de l'ordre de 10%/an) et certaines galeries proches des zones profondes et tectonisées se refermaient excessivement rapidement (créant des problèmes d'entretien à l'échelle de quelques mois, convergence de l'ordre de 100%/an).

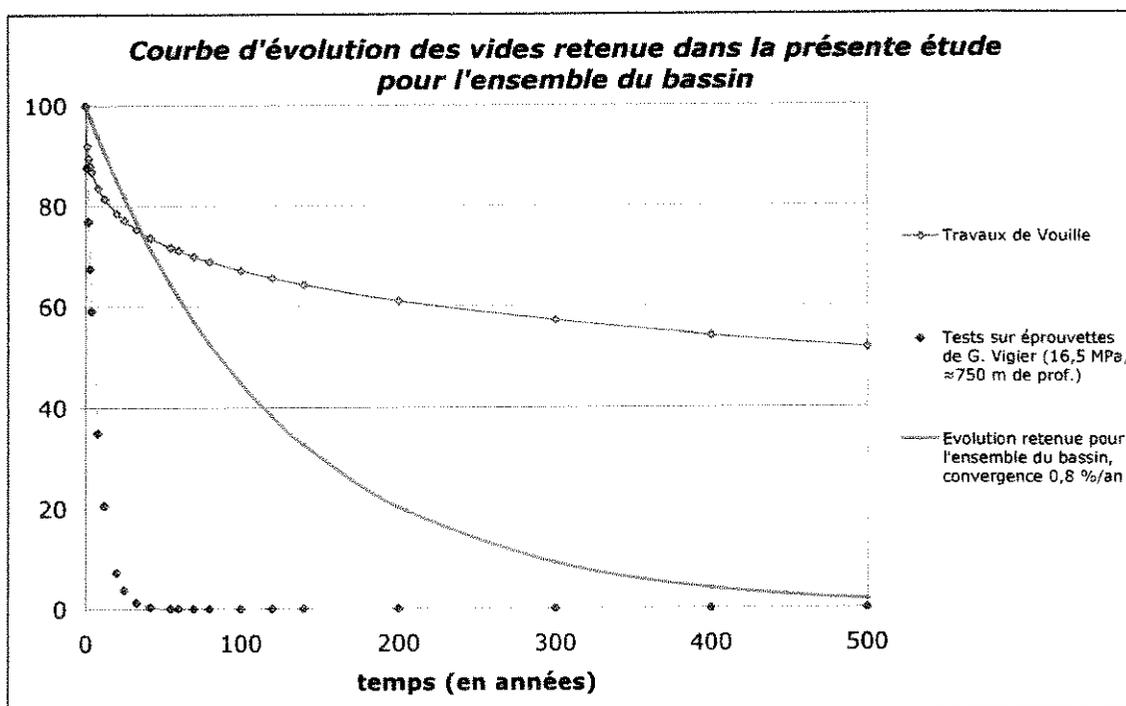


En conclusion, les taux de convergence observés dans la mine peuvent être élevés dans certains contextes particuliers mais apparaissent très variables à l'échelle de l'ensemble du bassin.

Des taux de déformation de l'ordre de 1 à 10 %/an paraissent trop élevés au regard de l'exploitant pour être appliqués à l'ensemble du volume minier, d'autant que la déformation horizontale est généralement plus faible que la déformation verticale.

L'expérience de l'exploitant permet raisonnablement de retenir, pour la mine de potasse, une valeur moyenne de réduction des vides de 0,6 à 0,8%/an correspondant à une évolution intermédiaire entre les observations de Vigier et celles de Vouille (cf. courbe verte sur le graphique 3).

Avec cette valeur, le vide minier résiduel serait de l'ordre de 1% au bout de 500 ans environ (graphique 3).



Graphique 3

Après exploitation, la phase d'affaissement conduit à une diminution franche et mesurable des vides créés par l'exploitation minière de -90% environ en 3 ans.

Par la suite, la fermeture des vides se poursuit, plus ou moins rapidement selon les secteurs de travaux (galeries, champs foudroyés, proximité de faille, ...) mais de façon plus douce (pas de conséquence en surface). En moyenne pour l'ensemble de la mine il y aurait encore une diminution de 50% des vides résiduels en 100 ans environ.

A long terme, ces phénomènes conduisent à une fermeture lente mais quasi complète du massif en environ 500 ans.

3. Durée de l'ennoyage

La vitesse d'ennoyage des mines de potasse d'Alsace sera une fonction de la vitesse de remplissage des vides résiduels par l'eau susceptible de pénétrer par les puits de mine fermés et de la vitesse de fermeture des vides par fluage.

L'estimation des vitesses de fluage est donnée dans le paragraphe précédent, il reste donc à estimer le débit potentiel susceptible de pénétrer dans la mine, pour le superposer ensuite à l'évolution du volume des vides et estimer la durée d'ennoyage de l'exploitation minière.

3.1 Estimation des débits pénétrant dans la mine

Le calcul du débit pouvant transiter à travers les bouchons de cendres volantes, en fonction de leur perméabilité peut être effectué à partir de la loi de Darcy¹⁴ qui peut s'appliquer de la manière suivante (tant que la base des puits n'est pas atteinte par le niveau de l'eau de la mine) :

$$Q = SKH/e$$

- Avec Q : débit traversant le bouchon (m³/s)
 S : surface des puits (m²)
 K : perméabilité des cendres volantes (m/s)
 H : hauteur d'eau au-dessus de la base du bouchon (m)
 e : épaisseur du bouchon (m)

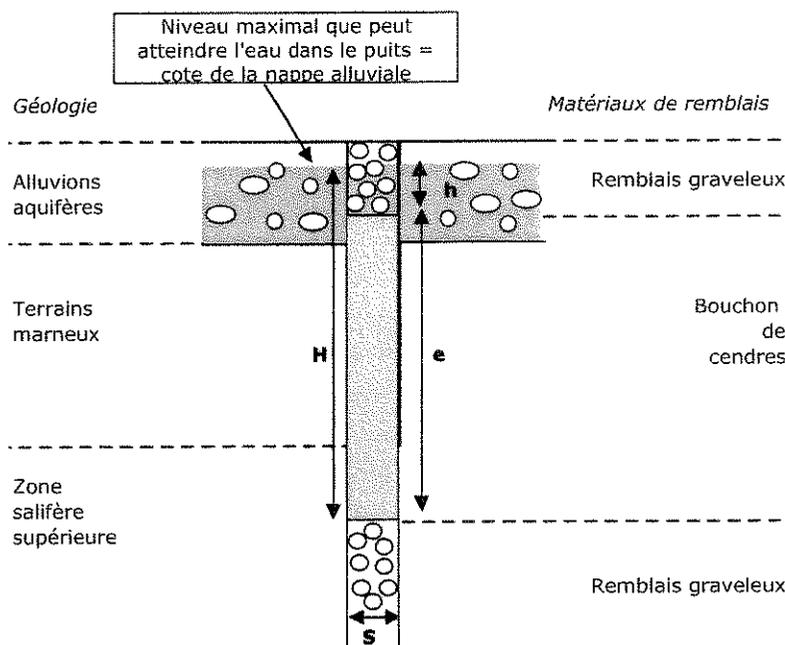


Schéma 5 : la loi de Darcy

¹⁴ Dans le cas présent, la loi de Darcy ne donne qu'un ordre de grandeur, majorant, car l'ensemble de la colonne du puits n'est pas saturée ce qui fait intervenir, en réalité, des phénomènes complexes de résistance à l'écoulement à l'interface des matériaux non saturés, phénomènes qui peuvent dans certaines conditions arrêter complètement l'écoulement.



Le schéma 5 montre que la position et l'épaisseur des bouchons de puits interviennent dans les calculs du débit d'alimentation de la mine : il est donc nécessaire de faire un calcul individuel pour chaque ouvrage.

Ce schéma admet également qu'il y a de l'eau dans les puits au-dessus du bouchon de cendres, ce qui suppose que de l'eau arrive à passer la barrière du cuvelage étanche en tête de chaque puits et qu'un équilibre hydraulique s'instaure entre l'intérieur et l'extérieur du puits au niveau de la nappe alluviale superficielle.

La perméabilité des bouchons de cendres volantes a été estimée par l'INERIS par des mesures in-situ réalisées sur les puits Marie et Louise. Du fait de la méthode de mesure, la valeur trouvée (de l'ordre de 6.10^{-7} m/s) intègre, de fait, les éventuelles circulations pouvant se produire à la périphérie du bouchon de cendres ou du puits lui-même.

Nous retenons dans les calculs suivants cet ordre de grandeur de perméabilité qui nous semble pouvoir fournir une bonne approche des débits susceptibles de rejoindre la mine par l'intermédiaire des puits remblayés.

3.1.1 Secteur Est

Le secteur Est est alimenté par 9 puits fermés. Le calcul par la loi de Darcy du débit susceptible de pénétrer dans chacun de ces ouvrages est présenté dans le tableau 4. Il faut noter que ce secteur a présenté pendant l'exploitation une venue d'eau d'environ $30 \text{ m}^3/\text{jour}$ dans le quartier d'Ensisheim, ce débit est à ajouter au débit qui peut transiter par les puits, sachant qu'au fur et à mesure de l'ennoyage ce débit aura plutôt tendance à diminuer du fait de la baisse du gradient de pression entre la venue d'eau et la mine.

Le tableau 4 montre que les bouchons de cendres volantes des puits du secteur Est permettent de réduire les possibilités d'infiltration d'eau dans la mine à moins de $1,5 \text{ m}^3/\text{h}$ environ. La venue d'eau souterraine de la mine d'Ensisheim, si elle se poursuit, doublerait ce débit. Le débit d'alimentation du secteur Est s'établirait ainsi à environ $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$ ($22\ 000 \text{ m}^3/\text{an}$).

SECTEUR EST					Débit d'alimentation calculé par la loi de Darcy	
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	Hauteur d'eau au-dessus du bouchon (m)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /mois)
Anna ouest	232	123	15,9	50	0,12	86,7
Anna est	232	113	15,9	50	0,11	81,7
Fernand est	224	132	15,9	50	0,13	91,2
Fernand ouest	224	105	15,9	50	0,11	77,7
Eugène	220	72	19,6	50	0,10	75,5
Théodore	220	77	19,6	50	0,11	78,6
Ensisheim III	218	251	23,8	50	0,31	225,4
Ensisheim I	211	262	15,9	50	0,21	156,4
Ensisheim II	211	203	15,9	240	0,06	46,3
Venues d'eau Ensisheim					1,25	912
Perméabilité des bouchons de cendres en m/s	Somme des débits entrants hors venues d'eau d'Ensisheim (m ³ /h)				1,3	
	Somme des débits entrants totaux (m ³ /h)				2,5	
6.10 ⁻⁷	Somme des débits entrants totaux (m ³ /mois)				1 832	
	Somme des débits entrants totaux (m ³ /an)				21 990	

Tableau 4 : Alimentation du secteur Est

3.1.2 Secteur Ouest

Le secteur Ouest est alimenté par 15 puits, dont 3 restent ouverts. Pour ces trois puits, l'épaisseur de bouchon retenue correspond aux projets en cours (décembre 2007).

Le calcul par la loi de Darcy du débit susceptible de pénétrer dans chacun de ces ouvrages est présenté dans le tableau 5.

SECTEUR OUEST					Débit d'alimentation calculé par la loi de Darcy		
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	Hauteur d'eau au-dessus du bouchon (m)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /mois)	
Eise	263	35	16	410	0,04	27,4	
Joseph	263	35	16	410	0,04	27,4	
Berrwiller	262	387	28,7	95	0,31	229,5	
Amélie 2	259	35	16	150	0,04	31,1	
Amélie 1	256	35	23,7	150	0,06	46,1	
Max	253	35	16	309	0,04	28,1	
Staffelfelden	250	253	31,2	176	0,16	119,8	
Marie	245	170	15,9	50	0,15	110,3	
Marie-Louise	245	185	15,9	50	0,16	117,8	
Schoenensteinbach	235	347	27,3	97	0,27	196,9	
Rodolphe 1	234	253	15,9	50	0,21	151,8	
Rodolphe 2	234	274	23,8	50	0,33	243,0	
Alex	234	110	15,9	254	0,05	35,9	
Ungersheim 1	223	280	23,8	64	0,28	201,6	
Ungersheim 2	223	275	23,8	47	0,35	257,0	
Perméabilité des bouchons de cendres en m/s					Somme des débits entrants (m ³ /h)		2,5
6.10 ⁻⁷					Somme des débits entrants (m ³ /mois)		1 810
					Somme des débits entrants (m ³ /an)		21 800

 Proposition du rapport MICA (2004) les bouchons ne sont pas encore réalisés.

Tableau 5 : Alimentation du secteur Ouest

Au total, ce calcul montre qu'un débit maximum de l'ordre de 2,5 m³/h (22 000 m³/an) pourrait atteindre le secteur Ouest en traversant les bouchons de cendres des puits rebouchés.

Les débits susceptibles de pénétrer dans les deux zones d'exploitation des mines de potasse d'Alsace sont comparables et s'établissent à environ 2,5 m³/h pour chaque secteur, soit environ 22 000 m³/an.

Pour mémoire, ces débits peuvent être comparés au débit total d'exhaure du bassin en exploitation qui est passé de 6 à 14 m³/h entre 1947 et 1979. Ils représenteraient donc environ 1/3 de ce qu'était l'exhaure pendant l'exploitation, ce qui apparaît très élevé (puisque les puits ont été bouchés) et confirme que la perméabilité prise en compte dans le calcul de Darcy est une estimation maximale.

3.2 Estimation du volume des vides résiduels en 2008

Après avoir estimé le débit susceptible de pénétrer dans la mine après remblayage des puits de mine, il faut à présent estimer le volume qu'il reste à remplir au moment de la présente étude afin de pouvoir simuler le remplissage de ce vide en tenant compte de la poursuite de son évolution par fluage.

Le tableau 6 donne une répartition approximative des âges d'exploitation dans le bassin potassique.

Dates	% de l'extraction	Age moyen en 2008
De 1910 à 1919	0,44%	92 ans
De 1920 à 1929	3,34%	82 ans
De 1930 à 1939	4,43%	72 ans
De 1940 à 1949	6,46%	62 ans
De 1950 à 1959	13,22%	52 ans
De 1960 à 1969	19,91%	42 ans
De 1970 à 1979	20,84%	32 ans
De 1980 à 1989	19,47%	22 ans
De 1990 à 1999	10,97%	12 ans
De 2000 à 2002	0,92%	7 ans
Moyenne		38 ans

Tableau 6 : Age moyen des travaux (d'après données Y.Lourdel)

Ce tableau permet de constater que les travaux miniers souterrains ont un âge moyen de l'ordre de 40 ans en 2008.

Pour estimer leur taux de fermeture, on ne peut pas utiliser la courbe verte du graphique 3 (fluage de 0,8 % par an) car, dans cette tranche d'âge (0 à 50 ans) elle n'est pas du tout représentative des observations faites par Vigier ou Vouille qui ont tous les deux observé des vitesses de déformation beaucoup plus élevées que ne le laisserait supposer cette courbe (voir graphique 4).

Au regard de ces courbes d'évolution et de l'historique de l'exploitation minière on peut raisonnablement envisager que les 40 ans d'âge moyen des travaux aient pu conduire à une fermeture des vides de l'ordre de 50 % conduisant à un **vide résiduel actuel, après affaissement et début de fluage, de 5 % du vide initial créé par l'exploitation.**

Cette estimation s'appuie sur les éléments suivants :

- Après une phase d'affaissement laissant un vide résiduel de 10 % dans les trois premières années suivant la fin de l'exploitation, les vides résiduels dans le massif ont évolué différemment suivant leur structure et leur position.
- Un taux de fermeture moyen de l'ordre de 1%/an peut être appliqué aux galeries d'infrastructure correspondant aux voies au mur de la couche inférieure peu sollicitées par le foudroyage (4,5% du volume total de vides initiaux).

Alors que les voies d'infrastructure en couche ou au mur de la couche supérieure (5% du volume total de vides initiaux) peuvent être affectées d'un taux de fermeture allant



jusqu'à plus de 5 % par an.

- Un taux de fermeture moyen de l'ordre de 1%/an peut être appliqué aux travaux foudroyés peu profonds (≈ 60 % du volume total de vides initiaux), alors que les travaux anciens, situés à grande profondeur ou à proximité d'une instabilité géologique (≈ 30 % du volume total de vides initiaux) peuvent être affectés d'un taux de fermeture allant jusqu'à 5 % par an.

A titre indicatif, la répartition en % des volumes des vieux travaux en fonction de la profondeur est indiquée dans le tableau suivant :

Cotes NGF de l'exploitation	Profondeur des travaux (pour une cote de surface de référence voisine de +250 NGF)	% du total de l'exploitation du secteur EST	Profondeur moyenne du secteur EST	% du total de l'exploitation du secteur OUEST	Profondeur moyenne du secteur OUEST
< -850 NGF	1110 m	0,09%	641 m	0,00%	627 m
-800 à -850 NGF	1075 m	0,53%		0,18%	
-750 à -800 NGF	1025 m	1,06%		0,29%	
-700 à -750 NGF	925 m	1,46%		1,95%	
-650 à -700 NGF	925 m	4,38%		2,94%	
-600 à -650 NGF	875 m	4,29%		2,52%	
-550 à -600 NGF	825 m	6,59%		2,01%	
-500 à -550 NGF	775 m	6,76%		4,96%	
-450 à -500 NGF	725 m	7,92%		11,71%	
-400 à -450 NGF	675 m	10,27%		14,64%	
-350 à -400 NGF	625 m	13,72%		18,64%	
-300 à -350 NGF	575 m	9,70%		12,33%	
-250 à -300 NGF	525 m	10,58%		5,88%	
-200 à -250 NGF	475 m	11,14%		8,40%	
-150 à -200 NGF	425 m	10,93%		13,55%	
> -150 NGF	390 m	0,58%	0,00%		

Tableau 7 : Profondeur des travaux

Ainsi, le volume du « réservoir » minier peut être estimé à ce jour à environ 10 millions de m³ pour le secteur Ouest et 3,5 millions de m³ pour le secteur Est (tableau 8).

Ce calcul reste un **ordre de grandeur**, car aucune loi rhéologique n'est directement applicable pour la mine dans sa complexité. Les éléments pris en compte, basés sur l'historique de l'exploitation, la structure du gisement et la connaissance de l'exploitant, permettent toutefois d'avoir une approximation raisonnable du volume des vides résiduels souterrains au moment de la fermeture de la mine. On peut considérer qu'ils reflètent l'écart observé dans les 50 premières années entre la courbe théorique du graphique 3 (courbe verte : page 25) et les courbes rose et bleue (relevant de l'observation).

	Secteur Est	Secteur Ouest	Total
Extraction	145 millions de tonnes	423 millions de tonnes	568 millions de tonnes
Volumes extraits	69 millions de m3	201 millions de m3	270 millions de m3
Volumes résiduels actuels	3,5 millions de m3	10 millions de m3	13,5 millions de m3

Tableau 8 : Volumes des vides résiduels

L'existence en 2008, d'un vide résiduel de l'ordre de 5% du vide initial créé par l'exploitation souterraine apparaît être un ordre de grandeur raisonnable au regard de l'historique de l'exploitation, de la structure du gisement et de la connaissance de l'exploitant.

3.3 Estimation de la durée de l'ennoyage

Le calcul de la durée résiduelle d'ennoyage de la mine fait intervenir :

- le vide actuel de la mine,
- son évolution par fluage,
- le débit d'eau pouvant pénétrer dans ce vide, le volume qu'il produit en se transformant en saumure,
- le volume de vide supplémentaire créé par dissolution pour former de la saumure,
- la fermeture par fluage de ce volume de vide supplémentaire.

Pour chacun de ces phénomènes, les hypothèses retenues sont les suivantes :

- le volume des vides à la fermeture de la mine a été estimé précédemment (10 M de m³ pour le secteur Ouest, 3,5 M de m³ pour le secteur Est),
- ce volume continue à évoluer par fluage avec une fermeture de l'ordre de 0,8%/an,
- le volume d'eau qui s'introduit dans la mine a été estimé par la loi de Darcy en fonction des caractéristiques des bouchons et des venues d'eau naturelles observées à Ensisheim (secteur Est) : débit total s'établissant à environ 22 000 m³/an et par secteur.
- ce volume d'eau douce crée chaque année un volume de vide supplémentaire créé par dissolution de l'encaissant pour former de la saumure (24% du vide initial), lequel est affecté du même taux de fluage que précédemment (0,8%/an).

Sur les graphiques 4 et 5 (page suivante) :

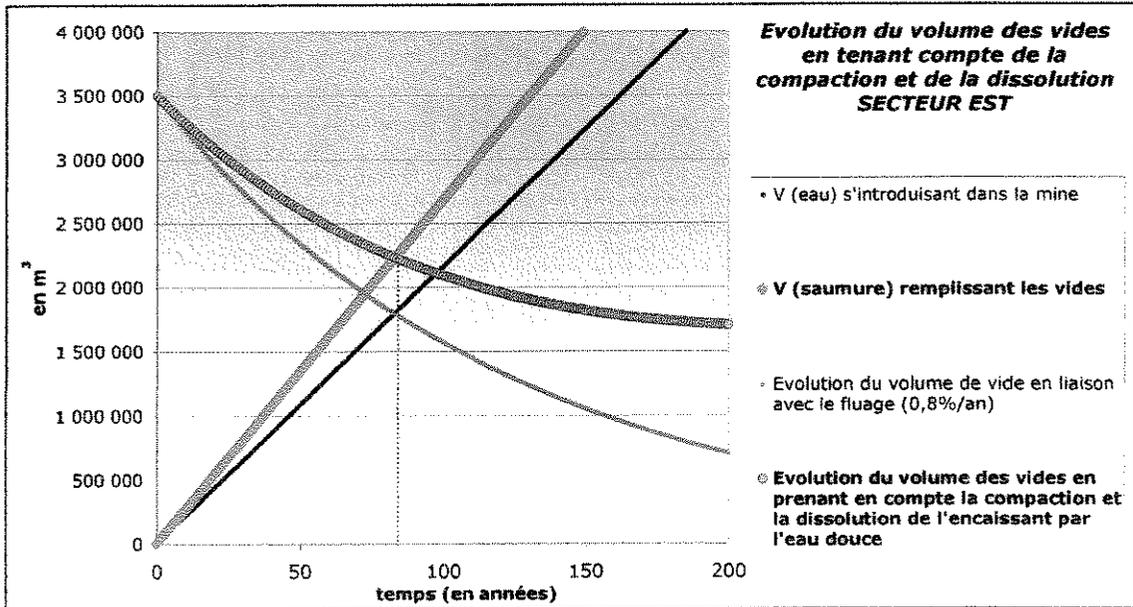
- la courbe bleue traduit la potentielle introduction d'eau douce par les puits,
- la courbe bleu clair traduit le volume de saumure produit au fil du temps,
- la courbe verte l'évolution du vide initial par fluage
- et la courbe rose l'évolution du vide initial en tenant compte de l'augmentation régulière de ce vide du fait de la dissolution des parois par l'eau douce.

La mine est noyée lorsque le volume d'eau introduit par les puits est équivalent au volume de vide résiduel.

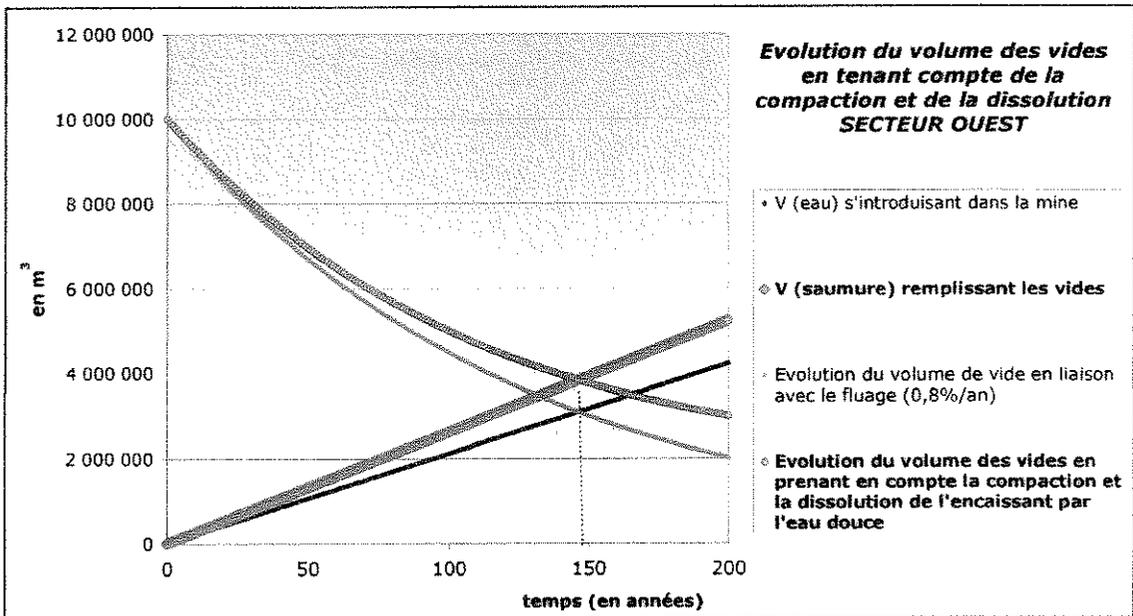
→ Pour le secteur Est (graphique 4), la durée de l'ennoyage s'établirait à environ 100 ans.

→ Pour le secteur Ouest (graphique 5), la durée de l'ennoyage s'établirait à un peu plus de 150 ans.





Graphique 4 : Estimation de la durée d'envoyage, secteur Est



Graphique 5 : Estimation de la durée d'envoyage, secteur Ouest



3.4 Discussion - Conclusion sur la durée d'ennoyage de la mine

Le fluage du sel réduit progressivement le volume des vides souterrains résiduels liés à l'exploitation minière. Ce phénomène devrait conduire à une **cicatrisation totale du massif au bout de 500 ans environ**. Mais, en même temps que les vides se réduisent, l'eau douce peut pénétrer par les puits de mine (sauf colmatage total des épais bouchons de cendres qui ont été mis en place). **Si l'eau douce pénètre effectivement dans la mine, elle va se transformer en saumure par dissolution d'un volume de sel** et augmenter le volume de vides souterrains (se refermant également par fluage).

En terme de volume global, la dissolution par l'eau douce n'est pas très significative (peu de différence entre les courbes vertes et roses des graphiques 6 et 7) car les débits d'eau douce pris en compte dans cette simulation sont faibles (1 à 3 m³/h), **c'est donc l'évolution des vides par fluage qui influence majoritairement la durée de l'ennoyage**.

Or la modélisation de l'évolution des vides peut être très variable car il existe deux lois rhéologiques (avec ou sans atténuation au fil du temps) et de nombreux paramètres tels que la forme des vides, la profondeur, la température qui interviennent. C'est donc principalement l'expérience de l'exploitant qui a été retenue pour fixer une moyenne de 0,8%/an pour le taux de fluage moyen de l'exploitation après 2008. Cette valeur est encadrée par les résultats des expériences de G. Vigier sur des éprouvettes de potasse issues du bassin alsacien et les calculs de G. Vouille (Ecole des Mines de Paris) pour les galeries de stockage de StocaMine situées dans des niveaux de sel sous les couches de potasse.

Si l'ordre de grandeur des vitesses de fermeture a pu être fixé avec l'aide de l'exploitant, en revanche l'ordre de grandeur du débit pénétrant dans la mine résulte uniquement d'une mesure de perméabilité réalisée in situ sur les puits Marie et Louise au moment de leur remblayage. Cette mesure de perméabilité réalisée in situ en suivant la baisse du niveau d'eau dans les puits après injection artificielle d'un certain volume d'eau constitue en fait une mesure de la « perméabilité apparente » de l'ouvrage et non de la perméabilité des cendres, puisque la baisse de niveau d'eau observée peut être due à des infiltrations aux travers du bouchon de cendres, mais également (pour une part difficile à apprécier) à des infiltrations en périphérie de ce bouchon.

La valeur de perméabilité mesurée ($5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s) apparaît cependant cohérente avec le type de matériau mis en place dans les puits (cendres volantes de centrale thermique) et a le mérite d'intégrer de façon informelle les phénomènes périphériques énoncés ci-dessus.

Quoi qu'il en soit, selon l'ampleur des dits phénomènes périphériques (fonction du mode de mise en place des cendres, du mode de désarmement des puits, de l'état des cuvelages, etc...), la « perméabilité apparente » des ouvrages est probablement très variable (un facteur 10, voire 100 n'étant pas à exclure dans un sens ni dans l'autre). Si bien que les vitesses de remplissage annoncées ci-dessous doivent être considérées comme l'ordre de grandeur acceptable des phénomènes intégrant le fait que le bassin minier compte 24 puits dont certains peuvent avoir une « perméabilité apparente » beaucoup plus élevée que la valeur annoncée et d'autres une « perméabilité apparente » beaucoup plus faible que la valeur annoncée ci-dessus, la moyenne des « perméabilités apparentes » des ouvrages s'établissant à $6 \cdot 10^{-7}$ m/s.



Compte tenu des ordres de grandeur retenus dans la présente étude pour le taux de fermeture des vides miniers par fluage et le débit d'eau susceptible de pénétrer dans la mine souterraine, l'envoyage des mines de potasse d'Alsace serait effectif en 150 ans environ pour le secteur Ouest, et 100 ans pour le secteur Est.

Si le débit qui passe par les puits s'avérait plus faible que les valeurs annoncées, l'envoyage du système serait évidemment plus long mais devrait dans tous les cas s'achever dans une limite d'environ 500 ans correspondant raisonnablement à la cicatrisation complète du massif influencé par l'exploitation minière.



4. Estimation de l'état actuel de remplissage

L'objectif de ce chapitre est d'estimer le niveau d'envoyage actuel de la mine dans les secteurs Est et Ouest, en retenant les hypothèses de débits et de vitesse de fermeture des vides énoncées dans le chapitre précédent.

4.1 Le secteur Est (figure 7)

Les travaux du secteur Est forment un ensemble d'exploitation unique dont la morphologie est globalement celle d'un dôme dont le sommet serait situé au puits Anna, avec une pointe plus profonde dans la partie Nord du gisement (Puits Ensisheim).

Les travaux d'Ensisheim ont la particularité de présenter une venue d'eau naturelle de faible débit et saturée en sel (donc non dangereuse pour l'exploitation) probablement liée à la proximité d'une structure en diapir jouxtant la mine dans ce secteur.

En effet, en 1986, avant le remblayage du puits Ensisheim 1 (alors que le puits Ensisheim 2 avait été remblayé 5 ans auparavant), l'exploitant a noté la présence de saumure dans les travaux miniers situés en aval pendage du puits.

Le secteur Ensisheim correspond aux travaux miniers les plus profonds du secteur Est, c'est donc naturellement vers lui que l'eau (la saumure) en provenance de l'ensemble du secteur Est a tendance à s'accumuler.

Au moment de la fermeture du puits Ensisheim 1, l'exhaure du secteur Est avait été en grande partie arrêté puisque 6 des 9 puits étaient déjà remblayés en 1986. L'eau observée par l'exploitant en aval pendage du puits pouvait donc provenir :

- des infiltrations se produisant par les puits de mine bouchés,
- des venues d'eau profondes citées précédemment.

En connaissant l'historique de l'exploitation et les volumes d'eau en jeu, on peut estimer le volume d'eau ayant pu gagner la mine en 1986 et vérifier sa cohérence par rapport au niveau d'eau observé par l'exploitant :

- la base du puits Ensisheim 1 est à environ -670 NGF. Sous cette cote, **le volume de vides résiduels pour le secteur Est est théoriquement d'environ 200 000 à 250 000 m³** (voir tableau 9, en 1986 : vides résiduels 6-7% du vides initial),
- en 1986, le volume d'eau qui aurait pu être apporté par les puits de mine remblayés peut être estimé à 35 000 m³ (voir tableau 10). On sait qu'il existait des venues d'eau profondes dans ce secteur, il faut donc ajouter ces venues d'eau aux apports à prendre en compte, elles représenteraient environ 219 000 m³. Au total, entre l'infiltration par les bouchons de puits et les venues d'eau profondes, la mine en 1986 aurait pu recueillir de **254 000 m³**.

Il y a donc une bonne cohérence entre le volume de vides théoriques sous la cote -270 NGF (200 000 à 250 000 m³) et le volume d'eau calculé (254 000 m³).



Estimation des vides sous la cote -670 NGF (secteur Est)					
	Surfaces exploitées (d'après la carte d'exploitation) (en m ²)	Ouverture des couches (en m)	Volumes exploités (en m ³)	Volumes résiduels en 1986	
				6% des volumes exploités	7% des volumes exploités
Couche supérieure	1 M	2,4	2 400 000	144 000	168 000
Couche inférieure	1 M	1,5	1 500 000	90 000	105 000
TOTAL en m³				234 000	273 000

Tableau 9

Secteur Est, estimation des volumes d'eau en 1986			
Puits	Débit potentiel par chaque bouchon (m ³ /h)	Temps écoulé entre la fermeture du puits et l'observation (ans)	Volume d'eau associé (m ³)
Ensisheim 2	0,06	5	2 628
Ensisheim 3	0,3	5	13 140
Fernand Est	0,12	8	8 410
Fernand Ouest	0,1	5	4 380
Anna Est	0,11	5	4 818
Anna Ouest	0,11	2	1 927
Total venant potentiellement des puits (m ³)			35 303
+ Venues d'eau d'Ensisheim	≈10950 m ³ /an depuis l'arrêt de l'exhaure dans ce secteur.		219 000
Total des volumes d'eau (m³)			254 303

Tableau 10

Depuis 1986, le niveau de la saumure a très probablement encore progressé. En reprenant la même méthode de calcul, on peut estimer le volume d'eau ayant pénétré dans la mine : les infiltrations calculées pour chaque puits, additionnées des venues d'eau naturelles d'Ensisheim représentent un volume d'environ 22 000 m³ par an (tableau 5), il y aurait donc en 11 ans 242 000 m³ de vides noyés supplémentaires soit un total actuel de 400 à 500 000 m³ de vides noyés pour le secteur Est.

Le niveau de remplissage actuel dans la mine serait donc voisin de -500 à - 550 NGF.

En 1986, la présence d'eau (transformée en saumure) en dessous de la cote -670 NGF à Ensisheim est avérée. À cette époque, les seules venues d'eau naturelles d'Ensisheim pouvaient toutefois expliquer ce remplissage, ce qui ne permet pas de mettre en cause la qualité de remblayage du puits. Au maximum, en admettant toutefois de potentielles infiltrations par les puits de mine fermés, le niveau de remplissage actuel se situerait entre - 500 à -550 NGF. L'emprise de la zone noyée est présentée sur la figure 7. Aucun désordre de surface à l'aplomb de cette zone n'a été constaté.



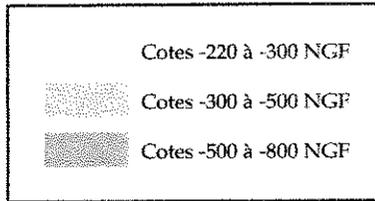
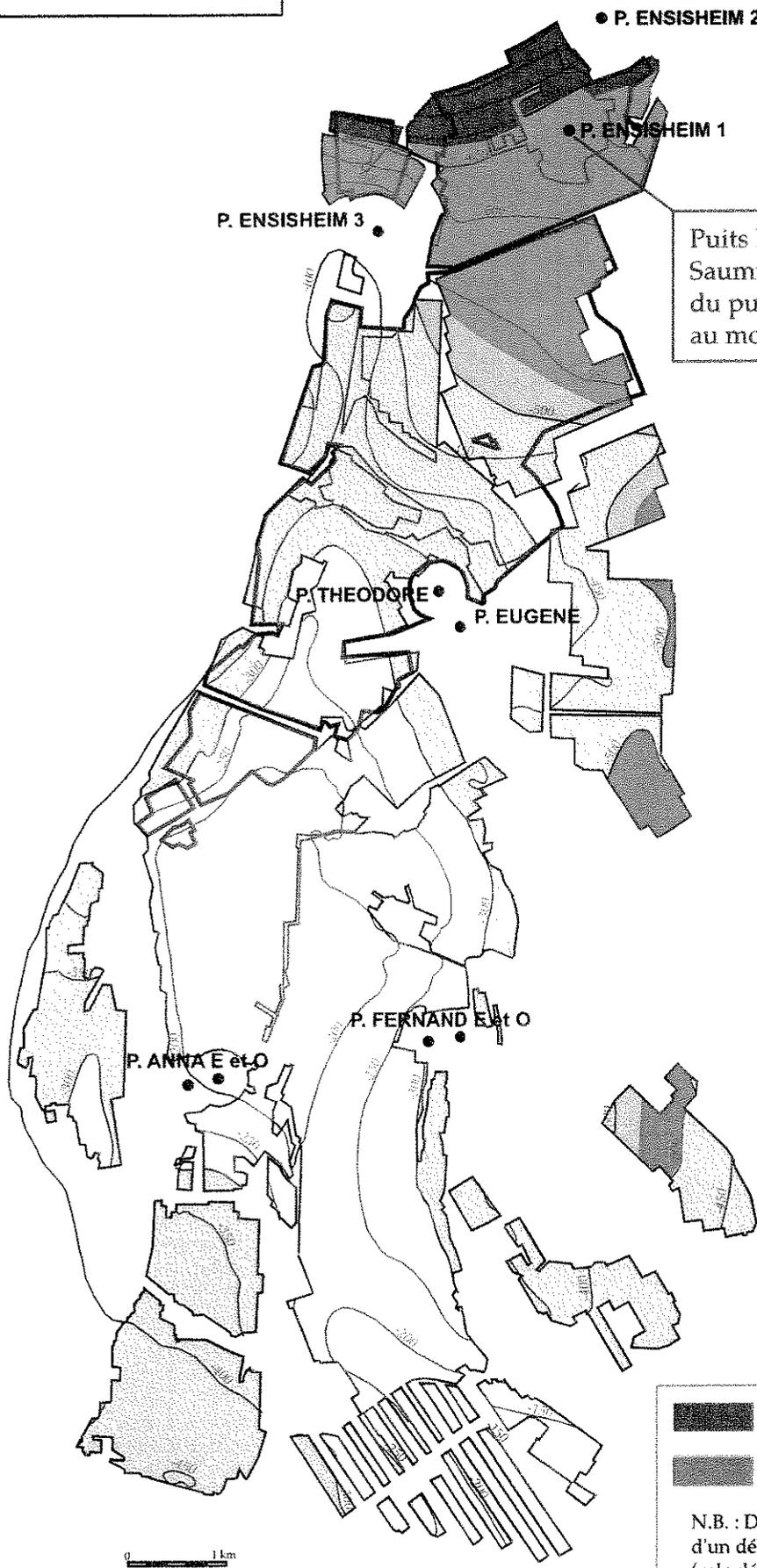


Figure 7 :
Ennoyage du secteur Est
 (niveau d'eau de 1986, niveau de remplissage actuel)



Puits ENSISHEIM 1 :
 Saumure à proximité du fond
 du puits ≈ -670 NGF
 au moment de sa fermeture en 1986

	Travaux noyés en 1986
	Noyés en 2007

N.B. : Dans les puits remblayés, passage possible
 d'un débit de l'ordre de 0,1 m³/h/puits
 (calculé)

4.2 Le secteur Ouest (figure 8)

Aucune observation sur le niveau de saumure n'a été retrouvée pour le secteur Ouest. L'arrêt de l'activité y est plus récent mais les travaux les plus profonds sont très certainement déjà noyés si l'on admet que de l'eau peut passer par les 11 puits de mine remblayés.

On peut estimer le volume potentiel d'eau (de saumure) déjà présent dans la mine en 2007 en tenant compte du nombre d'années passées depuis le remblayage des puits, et des débits de transit potentiels au travers chaque bouchon (cf. tableau 11).

Puits	Années depuis le remblayage	Débit ¹⁵ associé au puits (cf. tableau 4)	Volume d'eau (en m ³)
Ungersheim 1	9	2420 m ³ /an	21 800
Ungersheim 2	9	3080 m ³ /an	27 700
Alex	13	430 m ³ /an	5 600
Rodolphe 2	12	2920 m ³ /an	35 000
Rodolphe 1	12	1820 m ³ /an	21 800
Marie-Louise	8	1420 m ³ /an	11 400
Marie	8	1320 m ³ /an	10 500
Schoenensteinbach	9	2360 m ³ /an	21 200
Staffelfelden	5	1440 m ³ /an	7 200
Berrwiller	5	2660 m ³ /an	13 310
Max	3	340 m ³ /an	1 020
Total			≈175 000 m³

Tableau 11 : Estimation du volume d'eau dans le secteur Ouest en 2007

Le volume d'eau ayant pu pénétrer dans l'exploitation du secteur Ouest depuis la fermeture des différents puits de mines est de l'ordre de 175 000 m³.

La morphologie de l'exploitation dans le secteur Ouest est un peu plus complexe qu'à l'Est (cf. figures 3 et 8).

En effet :

- vers le Nord, le gisement se divise en deux langues qui s'approfondissent respectivement en direction de l'Est,
- il existe un stot non exploité entre le sud et le nord de l'exploitation,
- il existe un compartiment (puits Max) excentré du reste de l'exploitation.

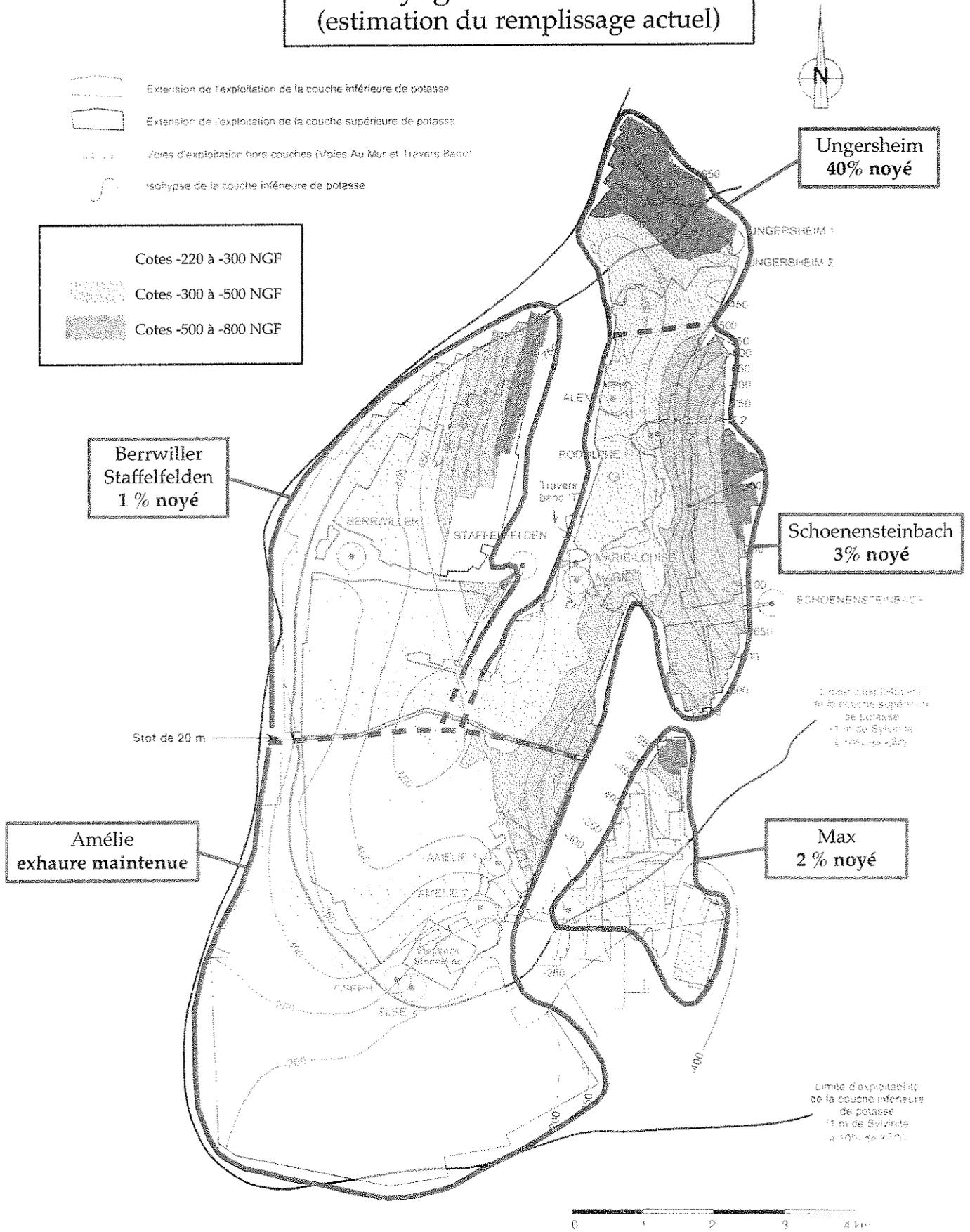
Cette structure particulière permet de distinguer au moins 4 points bas au niveau desquels a pu s'accumuler l'eau des différents quartiers d'exploitation. On peut associer à chacun de ces points bas un débit et un volume de vides :

- *Max* : Alimentés par le seul puits Max, les travaux miniers de ce compartiment seraient à peine noyés (1 à 2%), si l'on compare les 2,7 M de tonnes exploitées (soit ≈ 64 000 m³ de vides résiduels) et les 1000 m³ d'eau ayant pu passer par le puits Max depuis 3 ans (tableau 11). Cette estimation ne tient pas compte de l'eau supplémentaire apportée par l'exploitation dont l'estimation du volume est incertaine.

¹⁵ Les débits sont estimés comme présenté dans le chapitre 4.1, sur la base de la loi de Darcy à travers les bouchons, et ne représentent donc que des ordres de grandeur.



Figure 8 :
Ennoyage du secteur Ouest
 (estimation du remplissage actuel)



Legend:

- Noyés
- Probablement noyés car les vides profonds devaient être déjà très réduits

- *Schoenensteinbach* : Les venues d'eau de plusieurs puits (Schoenensteinbach, Marie, Marie-Louise, Rodolphe 1 et 2 et Alex) sont susceptibles d'alimenter ce secteur, représentant un volume potentiel d'eau introduit dans la mine de l'ordre de 105 000 m³ (tableau 11), à comparer avec un volume résiduel de vides de l'ordre de 3,2 M de m³ (135 M de tonnes exploitées) : seulement 3% de cet ensemble de travaux miniers serait noyé.
- *Ungersheim* : Ce secteur peut recevoir des eaux provenant d'autres puits, toutefois si l'on associe à ce secteur les seuls puits Ungersheim, le volume d'eau théorique ayant pénétré dans la mine est de moins de 50 000 m³ pour une exploitation de 5,5 M de tonnes (vides résiduels ≈ 130 000 m³). Ce secteur serait donc déjà en bonne partie noyé (40%) et la saumure monte déjà probablement dans la colonne des puits.
- *Berwiller-Staffelfelden* : Le volume d'eau potentiellement introduit par ces deux puits depuis leur remblayage est d'environ 20 000 m³ (tableau 11) pour une exploitation de 92 M de tonnes (vides résiduels ≈ 2 M de m³), soit un ennoyage théorique de 1%.
- *Amélie* : Dans ce secteur, l'exhaure est maintenue, le remplissage des travaux miniers n'a donc pas débuté.

Si l'on admet que de l'eau peut passer au niveau des puits de mine remblayés, force est d'admettre que l'ennoyage des mines de potasse d'Alsace a déjà débuté.

Cependant, eu égard aux ordres de grandeur des débits envisageables, seuls les travaux les plus profonds peuvent être déjà noyés. On peut estimer que le taux d'ennoyage de la mine est de moins de 5% dans l'ensemble, sachant que les secteurs les plus septentrionaux (Ungersheim et Ensisheim) sont déjà en grande partie noyés alors que le sud de l'exploitation (le moins profond) sera la dernière zone gagnée par les eaux. À noter qu'aucun des secteurs miniers déjà partiellement noyé n'a fait l'objet de mouvements de surface.

5. Phénomènes associés à l'ennoyage

L'hypothèse que de l'eau puisse pénétrer dans la zone d'exploitation par l'intermédiaire des puits de mine n'ayant pas été exclue dans la présente étude (même si les débits pris en compte sont faibles), il en découle des questions concernant :

- la dissolution du sel par l'eau douce arrivant dans le massif salifère,
- la migration de l'air chassé par la remontée du niveau d'eau dans la mine,
- une éventuelle sortie de saumure une fois les réservoirs totalement remplis.

L'ensemble de ces questions est débattu dans le chapitre suivant.

5.1 Les dissolutions

L'eau douce ne peut rejoindre la mine qu'en traversant la couverture étanche qui la protège au droit des points de faiblesse que constituent les puits de mine.

L'eau douce provient de la nappe alluviale superficielle ou des petits niveaux aquifères éventuellement présents dans les terrains du Chattien ou du Stampien. Elle pénètre dans la colonne des puits si le cuvelage n'est pas totalement étanche puis migre vers le bas en percolant au travers des bouchons de cendre ou en suivant les parements de l'ouvrage.

5.1.1 Dissolution dans la mine

Comme on l'a vu au début de ce rapport, l'eau douce pénétrant dans la mine va dissoudre du sel jusqu'à former une saumure saturée. Le volume de sel nécessaire à cette transformation conduit à une augmentation de vide dont l'ordre de grandeur est de 25 % du volume d'eau introduit.

Les débits d'eau douce susceptibles de pénétrer dans la mine ont été estimés à environ 22 000 m³/an pour chaque secteur, dont la moitié est déjà une eau salée dans le secteur Est (venue d'eau d'Ensisheim).

Dans l'hypothèse où la dissolution se répartirait de façon uniforme sur chacun des secteurs, elle ne représenterait que :

- 0,15 mm/an dans le secteur Est (2 750 m³/an répartis sur 18 km² environ),
- 0,1 mm/an dans le secteur Ouest (5 500 m³/an répartis sur 48 km² environ).

Au total, la dissolution pour une durée de remplissage de 100 ans à l'Est et 150 ans à l'Ouest créerait un vide uniformément réparti d'environ 15 mm d'épaisseur.

La hauteur de vides créée ne peut être plus importante que s'il y a répétition du phénomène de dissolution en un même endroit. Or, le gisement alsacien présente des ondulations des couches géologiques avec un pendage voisin de 14 % dans le secteur Est et 5 à 20 % à l'Ouest. Ce pendage (voir morphologie du gisement, figure 3) permet un cheminement gravitaire rapide des eaux vers les aval pendages, ce qui évite des points de stagnation où l'eau douce pourrait créer des attaques localisées du sel. La saturation de l'eau en sel se fait donc progressivement sur son parcours dans la mine en formant des rigoles sur la sole des galeries. Toutefois la présence d'intercalaires marneux non solubles au sein des niveaux



exploités par la mine de potasse arrête la progression verticale de la dissolution. Les insolubles ont de plus tendance à se déposer au fond des rigoles de dissolution, limitant ainsi la progression de la dissolution vers le bas.

D'après l'expérience de l'exploitant, qui a réalisé dans le passé divers essais de dissolution dans la mine, la dissolution se répartit effectivement sur l'ensemble de la zone d'exploitation.

Compte tenu de la lenteur du phénomène, on voit que l'incidence en surface du vide souterrain supplémentaire créé par la dissolution peut aisément être absorbée par les terrains sus-jacents souples et épais. Ceci est d'ailleurs indirectement confirmé par les observations faites sur le secteur Est puisque depuis 1986 les travaux miniers les plus profonds (secteur Ensisheim) sont déjà partiellement noyés et aucune reprise d'affaissement n'a été constatée en surface.

5.1.2 Dissolution au niveau des puits

Au niveau des puits (voir principe de fermeture figure 4), tout est fait pour que l'eau puisse s'évacuer rapidement dans les galets de remplissage et gagner la mine grâce aux drains mis en place à la base des ouvrages. Une fois dans la mine, cette eau provoquera une dissolution répartie dans l'ensemble des travaux miniers (voir paragraphe précédent).

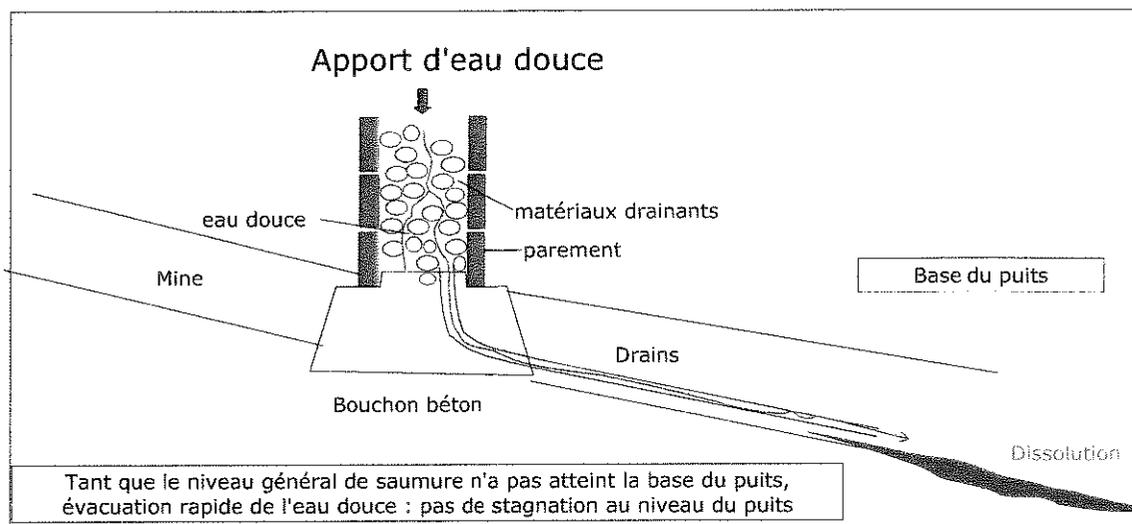


Schéma 6 a

Cependant, ce système d'évacuation rapide des eaux douces loin des puits ne fonctionne que tant que le niveau général de la saumure dans la mine n'a pas atteint la base des ouvrages.

En effet, dans la phase finale de l'ennoyage, le niveau de saumure dans la mine atteindra progressivement la base de chaque puits, et l'eau douce pénétrant dans le fût du puits aura alors tendance à flotter sur la saumure qui aura envahi la mine, car la densité de l'eau douce est plus faible que celle de la saumure. L'eau douce ainsi « ralentie » au pied du puits, risque alors de se saturer dans l'environnement immédiat de l'ouvrage (cf. schéma 6b). La base du puits étant exposée à un risque de dissolution localisée, dont la conséquence extrême pourrait être une déstabilisation des remblais ou du parement du puits.

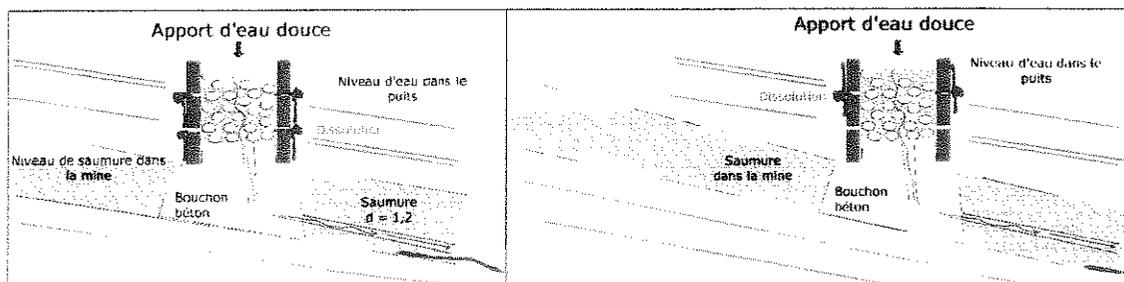


Schéma 6b : Pistonnage lent de l'eau douce dans la mine : dissolution au niveau du puits

Les tableaux 12 et 13 présentent le calcul du volume de dissolution maximal calculé pour chaque puits, en fonction de la durée de la phase sensible (c'est-à-dire dès que le niveau général de la saumure dans la mine atteint la base de l'ouvrage).

Ce calcul montre que les volumes de dissolution induits par ce phénomène sont souvent nettement inférieurs aux volumes de matériaux présents dans les colonnes de puits, mais que dans certains cas les volumes sont du même ordre de grandeur en particulier pour les puits profonds plus exposés au risque de dissolution à leur base car plus rapidement gagnés par le niveau de remplissage de la mine.

Les MDPA ont pris en compte cette possibilité de dissolution en base des puits puisque l'équipement de fermeture des puits comprend à la base un bouchon de béton qui bloque les remblais du puits, et que ce bouchon est traversé par des drains qui se prolongent pour évacuer l'eau douce en dehors de l'environnement immédiat du puits.

SECTEUR EST, Durée de l'ennoyage ≈ 100 ans						
	Dissolution potentielle à proximité de chaque puits					Comparaison avec les matériaux du puits V de matériaux dans le puits (m ³) h x π x r ²
	Durée pendant laquelle la dissolution est possible (années)	Q eau douce par puits (m ³ /an)	V eau douce passant dans le puits pendant cette phase (m ³)	V de dissolution potentielle (m ³) (25% de V eau douce)	V de dissolution diminuée de la compaction (m ³)	
Ensisheim II	100	555	55 500	13 875	9 400	16 600
Ensisheim I	100	1 880	188 000	47 000	32 000	14 200
Ensisheim III	70	2 700	189 000	47 250	32 100	17 600
Théodore	60	940	56 400	14 100	9 600	14 500
Eugène	60	900	54 000	13 500	9 200	14 400
Fernand ouest	50	930	46 500	11 625	7 900	9 000
Fernand est	50	1 095	54 750	13 688	9 300	8 900
Anna est	0	980	0	0	0	7 400
Anna ouest	0	1 040	0	0	0	7 500

Tableau 12 : Comparaison dissolution potentielle / volume de remblais, secteur Est

SECTEUR OUEST, Durée de l'ennoyage = 150 ans						
	Dissolution potentielle à proximité de chaque puits					Comparaison avec les matériaux du puits
	Durée pendant laquelle la dissolution est possible (années)	Q eau douce par puits (m ³ /an)	V eau douce passant dans le puits pendant cette phase (m ³)	V de dissolution potentielle (m ³) (25% de V eau douce)	V de dissolution diminuée de la compaction (m ³)	V de matériaux dans le puits (m ³) $h \times \pi \times r^2$
Schoenensteinbach	93	2 360	219 480	54 870	37 300	24 600
Staffelfelden	54	1 440	77 760	19 440	13 200	24 500
Ungersheim 1	45	2 420	108 900	27 225	18 500	16 900
Rodolphe 2	39	2 920	113 880	28 470	19 400	16 900
Ungersheim 2	31,5	3 080	97 020	24 255	16 500	14 900
Alex	31,5	430	13 545	3 386	2 300	10 000
Marie	31,5	1 320	41 580	10 395	7 100	10 200
Amélie 1	31,5	550	17 325	4 331	2 900	14 900
Rodolphe 1	27	1 820	49 140	12 285	8 400	9 700
Marie-Louise	22,5	1 420	31 950	7 988	5 400	9 500
Berrwiller	22,5	2 750	61 875	15 469	10 500	17 400
Amélie 2	22,5	370	8 325	2 081	1 400	8 700
Max	21	340	7 140	1 785	1 200	9 400
Joseph	19,5	330	6 435	1 609	1 100	8 300
Else	13,5	330	4 455	1 114	800	7 100

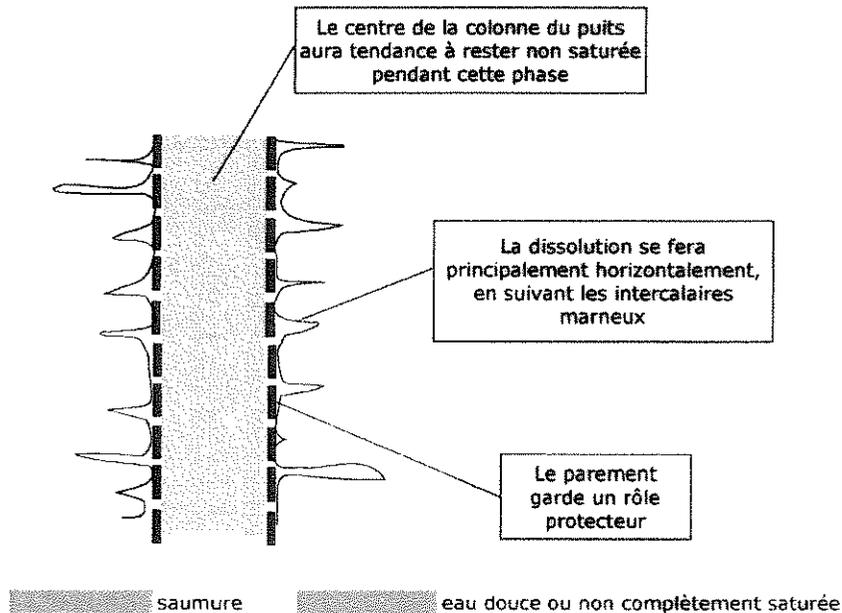
Tableau 13 : Comparaison dissolution potentielle / volume de remblais, secteur Ouest

Par ailleurs, dans la colonne du puits, la montée progressive du niveau piézométrique de la mine va régulièrement éloigner l'interface eau-douce/eau salée (zone préférentielle de dissolution) de la base du puits, qui est la zone la plus sensible.

Les volumes de dissolution calculés dans les tableaux précédents ne vont donc pas se concentrer à la base des puits en un volume unique mais se répartir sur toute la hauteur des terrains potentiellement solubles en périphérie du puits et dans les travaux miniers au niveau de l'extrémité des drains.

En effet, selon toute vraisemblance seule une partie de la saturation de l'eau pourra se faire par dissolution autour du puits, car le parement du puits séparera l'eau douce des terrains salifères. Il faut donc imaginer des circulations à travers ce parement, et des mouvements de convection au sein de la colonne de remblais pour que le sel passe de l'extérieur du puits jusqu'au centre du puits (et les puits font environ 4 m de diamètre) jusqu'à saturer la totalité de la colonne d'eau. On peut donc raisonnablement envisager que la dissolution se produisant dans la colonne du puits ne représente que 10 à 30% du vide total calculé dans les tableaux 12 et 13.

Cette dissolution évoluera progressivement du bas vers le haut ce qui favorisera sa répartition sur toute la hauteur de la zone salifère et donc en limitera l'extension latérale. Elle se fera irrégulièrement, car elle sera limitée verticalement par les bancs de stériles intercalaires (cf. schéma 6c), les zones de dissolution progresseront donc horizontalement ce qui favorisera leur fermeture rapide par fluage (le fluage vertical étant plus rapide que le fluage horizontal).



(Schéma de principe)

Schéma 6 c

La dissolution en périphérie des puits n'est donc pas de nature à créer des « cavernes » susceptibles de provoquer des mouvements rapides pouvant se répercuter vers la surface, même si un mouvement lent n'est pas exclu au niveau du puits, ce qui nécessite de maintenir une surveillance.

Par ailleurs, la dissolution est restreinte aux terrains profonds salifères (> 300 mètres de profondeurs à l'Ouest et 130 mètres à l'Est) toutes les colonnes de puits sont cuvelées en tête, sur une hauteur de 120 à 425 mètres qui devrait assurer la tenue des terrains en surface et l'absence d'apparition de phénomènes de type fontis en tête d'ouvrage en cas de coulissage du remblai dans le parement.

➤ Conclusion

Au niveau des colonnes de puits, tout est fait pour éviter le contact entre eau douce et terrain salifère. Tant que le niveau général de la saumure dans la mine n'a pas atteint la base des puits, le milieu est non saturé, l'écoulement est rapide grâce à la grande perméabilité des matériaux de remplissage sous le bouchon de cendres et il n'y a pas de risque de dissolution importante au droit des colonnes de puits.

Lorsque le niveau général de saumure atteindra la base d'un puits, ce sont les drains mis en place à la base des puits qui permettront d'éloigner le phénomène de dissolution vers la mine (où niveaux marneux, pendage des couches et fluage permettent une répartition horizontale du phénomène).

Au sein de la colonne du puits, des échanges peuvent se produire malgré le parement, ils ne produiront probablement qu'une saturation partielle de l'eau douce présente dans l'ouvrage.

Les volumes de dissolution ainsi créés auront des effets limités parce que :

- **restreints aux seuls terrains salifères, c'est-à-dire à grande profondeur (donc loin de la surface et sensibles à la fermeture par fluage),**
- **bornés par les intercalaires marneux qui structurent les terrains salifères,**
- **et répartis le long de la hauteur du puits.**

Par ailleurs, la stabilité des puits est assurée par leur remblayage sur la totalité de la colonne, et le cuvelage en tête joue un rôle stabilisateur dans les terrains moins profonds et non solubles.

Dans le secteur Est, l'envoyage a déjà débuté sans qu'aucun désordre en surface n'ait été constaté, toutefois la pérennisation d'un périmètre de sécurité autour de chaque puits est à envisager pour suivre le niveau des remblais dans la colonne et compenser si nécessaire un éventuel coulisage des matériaux.

5.2 L'air

Qu'il y ait ou non passage de l'eau par les puits de mine, le massif se referme par fluage du sel, or de l'air¹⁶ remplit actuellement les vides résiduels miniers. Cet air aura donc tendance à être chassé au fil du temps vers des points hauts où il trouvera moyen de s'échapper ou bien se retrouvera piégé puis éventuellement comprimé.

A la fermeture du dernier puits, l'air dans la mine sera à une pression voisine de la pression atmosphérique.

On admet que dans la mine, la charge piézométrique correspond à celle de la nappe alluviale qui se transmet au réservoir souterrain par l'intermédiaire d'un ou plusieurs puits dont le bouchon présente une certaine perméabilité.

À l'inverse, certains puits peuvent avoir un bouchon très étanche, si bien que l'air qu'ils contiennent va progressivement se mettre en pression au fur et à mesure du remplissage de la mine et finira par être piégé dans la colonne du puits quand le niveau de saumure dépassera la recette la plus haute.

Nous tentons dans le présent paragraphe de quantifier ce phénomène afin de vérifier, au regard de la géométrie du système minier et des bouchons mis en place dans les puits si un éventuel problème pourrait apparaître en liaison avec un éventuel piégeage d'air dans les puits des Mines de Potasse d'Alsace.

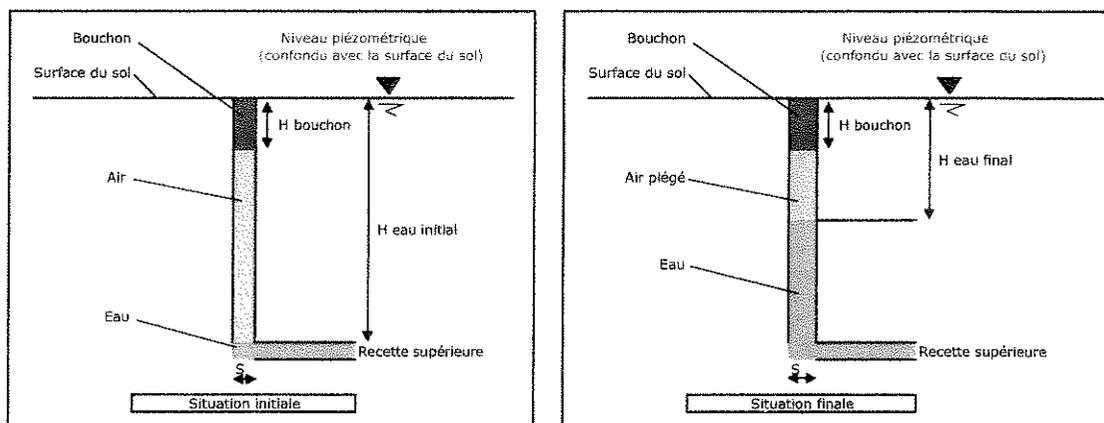


Schéma 7

Les calculs présentés ci-après s'appuient sur les considérations présentées sur le schéma ci-dessus (schéma 7) :

- les puits susceptibles de poser problème sont ceux dont le bouchon est totalement imperméable à l'air (comme on ne sait pas quels sont ces puits, le calcul est fait pour tous les puits du bassin).
- chaque puits est équipé d'un bouchon de cendres (supposé totalement imperméable), surmonté de matériaux graveleux. La base du bouchon de cendres est à une profondeur H (m) par rapport à la surface du sol. La surface du puits est S (m^2).

¹⁶ Pendant l'exploitation, la mine était classée en mine grisouteuse. Du méthane piégé dans les pores de la roche pouvait être libéré lorsque la roche était fragmentée par l'exploitation. Par contre aucun dégagement de gaz n'a jamais été constaté une fois l'exploitation arrêtée, l'air minier ne peut donc plus être classé grisouteux.



- L'ensemble des matériaux constituant le bouchon de cendres et les remblais sus-jacents a une masse volumique de 2000 kg/m^3 et exerce une contre-pression $P = \rho_w \cdot g \cdot H_{\text{bouchon}}$.
- Pour que la pression de l'air dans la colonne du puits soit susceptible de soulever le bouchon, il faut qu'elle exerce une force supérieure au poids du bouchon.
- La pression de l'air dans la colonne du puits fixe la position $H_{\text{eau final}}$ (profondeur par rapport au sol) de l'interface eau-air à la base de la bulle d'air. Au niveau de cet interface la pression de l'eau (P_f) est la même que celle de l'air et s'élève à $P_f = \rho_w \cdot g \cdot H_{\text{eau final}}$ (avec $\rho_w =$ masse volumique de l'eau 1000 kg/m^3).
- La situation devient donc critique si $H_{\text{eau final}}$ (la profondeur de l'interface eau-air par rapport au sol) devient $\geq 2 \cdot H_{\text{bouchon}}$ (profondeur de la base du bouchon étanche par rapport au sol). En l'absence d'information sur $H_{\text{eau final}}$ (par définition non mesurable puisque le puits est fermé de façon étanche), on peut seulement calculer quel serait le $H_{\text{eau final}}$ critique pour chacun des puits. Il faut ensuite chercher quelle serait la profondeur ($H_{\text{eau initial}}$) d'un puits qui (s'étant mis en pression du fait de la poussée de la saumure dans la mine) aboutirait à une profondeur d'interface air-eau égale à $H_{\text{eau final}}$.
- Ce nouveau calcul est effectué en considérant que l'air se comporte comme un gaz parfait et que l'on peut négliger l'effet de la température. Dans ces conditions : $P_i V_i = P_f V_f$, la pression initiale de l'air dans le puits (P_i) multipliée par le volume initial de l'air dans le puits ($V_i = (H_{\text{eau initial}} - H_{\text{bouchon}}) \cdot S$) est égale à la pression finale de l'air dans le puits (P_f) multipliée par le volume final de l'air dans le puits ($V_f = (H_{\text{eau final}} - H_{\text{bouchon}}) \cdot S$).
- En fixant P_f et V_f comme étant les paramètres limites de déstabilisation du bouchon (calculés à l'étape précédente) et en retenant une pression initiale dans le puits comprise entre 1 et 10 bars (suivant l'état de remplissage de la mine (donc la pression d'air dans la mine) au moment où la saumure atteint la base du puits), on peut calculer V_i donc $H_{\text{eau initial}}$ (profondeur initiale de l'interface eau-air aboutissant à une situation finale d'instabilité).

Le tableau 14 ci-après montre que la profondeur des recettes des puits est toujours très inférieure à la profondeur $H_{\text{eau initial}}$ calculée, si bien qu'aucun des puits du bassin potassique ne présente une géométrie telle que son bouchon de cendre (et graviers sus-jacents) soit susceptible d'être déstabilisé par la bulle d'air qui aurait pu être piégée dans sa colonne même une fois que la mine sera complètement remplie.

Le calcul de la pression maximale et de la hauteur des bulles d'air dans les différents puits au terme du remplissage de la mine, fait l'objet des dernières colonnes du tableau 14 et confirme que tous les puits répondent à la condition initiale qui est que la hauteur de la bulle piégée ($H_{\text{eau final}} - H_{\text{bouchon}}$) soit \leq à la hauteur du bouchon H_{bouchon} .

Le même calcul peut être fait en admettant que la pression hydrostatique dans la mine est imposée par une saumure (densité saumure = 1,2 densité eau) et là encore l'équilibre est conservé. En revanche, si la pression dans la mine continue à augmenter après la fin du remplissage (en liaison avec le phénomène de fluage du massif), on peut imaginer à l'extrême que sa valeur s'élève à la pression lithostatique ($P_{\text{lithostatique}} = 2,5 * P_{\text{hydrostatique}}$)... dans ce cas, la condition première de notre raisonnement sera obligatoirement dépassée.

De nombreux phénomènes peuvent cependant intervenir avant d'en arriver à ce stade de l'évolution du système minier :

- tout d'abord la résistance au cisaillement des parois du bouchon de cendres opposera à

- la pression de l'air une force proportionnelle à la surface de contact bouchon-puits¹⁷.
- ensuite la bulle d'air (quelques dizaines de mètres à la base du bouchon de cendres) pourra se dissiper au moins partiellement dans la porosité du massif en périphérie de puits et/ou finir par vaincre la résistance à l'écoulement du bouchon de cendres se dissiper dans sa porosité ou s'évacuer à travers celui-ci (le perméabilité à l'eau des cendres entraîne une perméabilité à l'air au-delà d'une certaine pression),
 - la bulle d'air peut également se dissiper dans la porosité de l'interface bouchon/puits ou puits/encaissant ou s'évacuer à ce niveau.

Chacun de ces phénomènes est de nature à réduire la pression de la bulle d'air ou à la faire disparaître, si bien que le risque qu'un même puits présente à la fois un bouchon de cendres complètement imperméable, mais insuffisamment épais pour résister au cisaillement, un encaissant non poreux, un interface bouchon puits parfait et un interface puits encaissant parfait apparaît négligeable.

Qu'il y ait ou non ennoyage de la mine, si le fluage se poursuit indéfiniment, il entraînera :

- une poursuite de la sortie des fluides contenus dans la mine par l'intermédiaire des puits les moins résistants,
- si l'air ou la saumure ne peuvent pas s'échapper par les puits, la mise en pression de la mine se continuera.

Ce deuxième scénario conduirait alors à une déstabilisation possible des bouchons puisque la poursuite du phénomène de compaction revient à admettre que la pression lithostatique (pression du massif) finira par se transmettre aux fluides de la mine. La stabilité des bouchons ne serait assurée que s'ils sont placés le plus bas possible dans les puits (le poids complet des remblais servant alors à leur stabilité). On notera toutefois que dans le cas où la pression dans la mine continuait à monter, cette pression ralentirait le phénomène de fluage. En effet, le fluage crée la pression dans la mine mais la baisse de différentiel de pression massif/mine diminue le fluage (voir également paragraphe 6.3.2). On tendra donc très probablement vers une pression pour laquelle le fluage s'arrête (faute de déviateur de contraintes).

C'est ce qui a été par exemple observé (Brouard, Bérest et Durup, 1997 [38]) pour d'anciennes cavités créées dans le sel¹⁸ : « l'accroissement de la pression de la saumure, engendré par le fluage du sel (...) conduit à une pression d'équilibre finale plus petite que la pression lithostatique, pourvu que la formation salifère présente une certaine porosité ». Autrement dit, la pression s'évacue en poussant les fluides dans les pores du massif salifère, or dans le cas présent, la porosité a été augmentée par l'exploitation ce qui rend possible ce phénomène.

¹⁷ Sans rentrer dans les détails, même en admettant que la bulle d'air soit totalement comprimée (c'est-à-dire que $H_{\text{eau final}}$ devienne égal à $H_{\text{bouchon}} + \epsilon$), l'égalité première deviendrait :

$$\rho_{\text{lithost}} \cdot g \cdot H_{\text{eau final}} \cdot S \geq \rho_{\text{bouchon}} \cdot g \cdot H_{\text{bouchon}} \cdot S + 2 \cdot \pi \cdot R \cdot H_{\text{cendres}} \cdot C$$

$$\text{Si } H_{\text{eau final}} = H_{\text{bouchon}} \text{ et } g = 10 \text{ alors } 5 H_{\text{bouchon}} R \geq H_{\text{cendres}} C$$

en retenant une résistance au cisaillement faible ($C = 50$ kPa), on obtient un équilibre si $H_{\text{cendres}}/H_{\text{bouchon}} \leq 0,05 R$. En connaissant les rayons des puits et la hauteur H_{bouchon} (base du bouchon), on peut vérifier que la hauteur de cendres H_{cendres} est telle que l'équilibre du bouchon est préservé.

¹⁸ La morphologie de ces cavités de stockage (sortes de citernes souterraines) est totalement différente de la mine de potasse, mais accentue probablement les possibilités de mise en pression, avec notamment des dilations liées au réchauffement de la saumure observées dans ce type de structures de réservoir (1 seul gros volume).



Tableau 14 : Pressions hydrostatiques et stabilité des bouchons

Puits	H bouchon hauteur de bouchon + graviers au-dessus du bouchon (m)	Poids de bouchon par unité de surface P/S (pour poids volumique de 2000 kg/m ³)	H eau final limite (=2H) (m)	Pf (en m d'eau)	Avec Pf = 10 m d'eau on calcule H eau initial tg H _{eau initial} - H _{bouchon} = (H _{eau final} - H _{bouchon}) * Pf/Pi	Profondeur de la dernière recette, considérée comme profondeur maximale H eau initial (m)	Facteur multiplicatif de Pf lié à position du puits dans la mine (fct du taux de remplissage de la mine quand le niveau d'eau arrive à la base du puits)	Nouveau calcul de H eau initial tenant compte de la mise en pression de la mine	calcul de Pf pour chaque puits tq $H_{bouchon} * Pf = (H_{eau initial} - H_{bouchon}) * Pf$	Facteur de sécurité = pression limite/pression calculée	Hauteur finale de la bulle (m)
SECTEUR EST											
Anna ouest	180	360000	360	360	6 660	448	3	2 340	21,70	1,66	37,04
Anna est	170	340000	340	340	5 950	448	3	2 097	20,98	1,62	39,76
Fernand est	190	380000	380	380	7 410	540	1,2	6 207	21,00	1,81	20,00
Fernand ouest	163	326000	326	326	5 477	540	1,2	4 591	18,72	1,74	24,17
Eugène	131	262000	262	262	3 563	701	1,3	2 771	17,37	1,51	42,67
Théodore	135	270000	270	270	3 780	738	1,3	2 939	17,88	1,51	43,83
Ensisheim III	308	616000	616	616	19 281	718	1,05	18 377	32,14	1,92	13,39
Ensisheim I	312	624000	624	624	19 781	1033	1,05	18 854	33,46	1,86	22,62
Ensisheim II	443	886000	886	886	39 693	869	1,05	37 824	45,29	1,96	9,88
SECTEUR OUEST											
Else	444	888000	888	888	39 871	444	10	4 387	44,40	2,00	0,00
Joseph	524	1048000	1048	1048	55 439	524	10	6 016	52,40	2,00	0,00
Berrwiller	483	966000	966	966	47 141	608	3	16 036	49,06	1,97	7,64
Amélie 2	312	624000	624	624	19 781	549	3,5	5 875	33,66	1,85	24,64
Amélie 1	275	550000	550	550	15 400	631	3	5 317	30,95	1,78	34,51
Max	450	900000	900	900	40 950	515	1,1	37 268	45,16	1,99	1,58
Staffelfelden	429	858000	858	858	37 237	786	1,3	28 743	43,96	1,95	10,56
Marie	220	440000	440	440	9 900	643	1,3	7 666	24,27	1,81	22,66
Marie-Louise	235	470000	470	470	11 280	597	1,3	8 731	25,36	1,85	18,56
Schoensteinbach	445	890000	890	890	40 050	901	1	40 050	45,50	1,96	10,02
Rodolphe 1	303	606000	606	606	18 665	612	1,2	15 605	31,48	1,93	11,78
Rodolphe 2	324	648000	648	648	21 319	713	1,2	17 820	33,78	1,92	13,82
Alex	364	728000	728	728	26 863	630	1,3	20 748	37,33	1,95	9,26
Ungersheim 1	344	688000	688	688	24 011	714	1,1	21 860	35,55	1,94	11,45
Ungersheim 2	322	644000	644	644	21 059	625	1,1	19 174	33,20	1,94	10,04

5.3 La fin de l'ennoyage

5.3.1 Equilibre hydrostatique

A la fin de l'ennoyage des vides miniers et des colonnes de puits, le système hydrogéologique minier sera constitué d'une couche d'eau profonde saturée en sel (densité 1,2) et de colonnes d'eau douce (densité 1) « flottant » sur cette saumure au droit de chaque puits. **La cote initiale de la saumure à la fin de l'ennoyage des travaux miniers correspondra dans chaque puits au moins à la cote des couches géologiques salifères** (cf. figures 9-1 et 10-1)).

Comme les puits sont en liaison les uns avec les autres par l'intermédiaire du vide résiduel des travaux miniers, la charge hydraulique au niveau de chacun d'entre eux va naturellement s'égaliser de sorte que le poids de la colonne de saumure ajouté au poids de la colonne d'eau douce soit le même partout.

Par ailleurs, le niveau piézométrique de chaque puits s'équilibrera avec celui de la nappe alluviale dans son secteur, ce qui va distinguer des puits « amont » où le niveau de la nappe alluviale est plus haut, et des puits « aval » dans lesquelles la nappe est plus basse du fait de son gradient d'écoulement.

Pour compenser cette charge piézométrique plus basse de l'eau douce en surface, **le niveau de saumure dans les puits aval va s'élever** (poids de la colonne d'eau douce plus faible donc augmentation du poids de la colonne de saumure pour rester à égalité avec les puits amont) de façon à atteindre un équilibre des pressions hydrostatique (eau douce) et halmostatique (saumure).

Si la colonne de saumure dans les puits aval s'élève suffisamment haut, il se pourrait qu'elle atteigne des cotes correspondant à celles des nappes aquifères supérieures qui pourraient alors subir des intrusions de saumure.

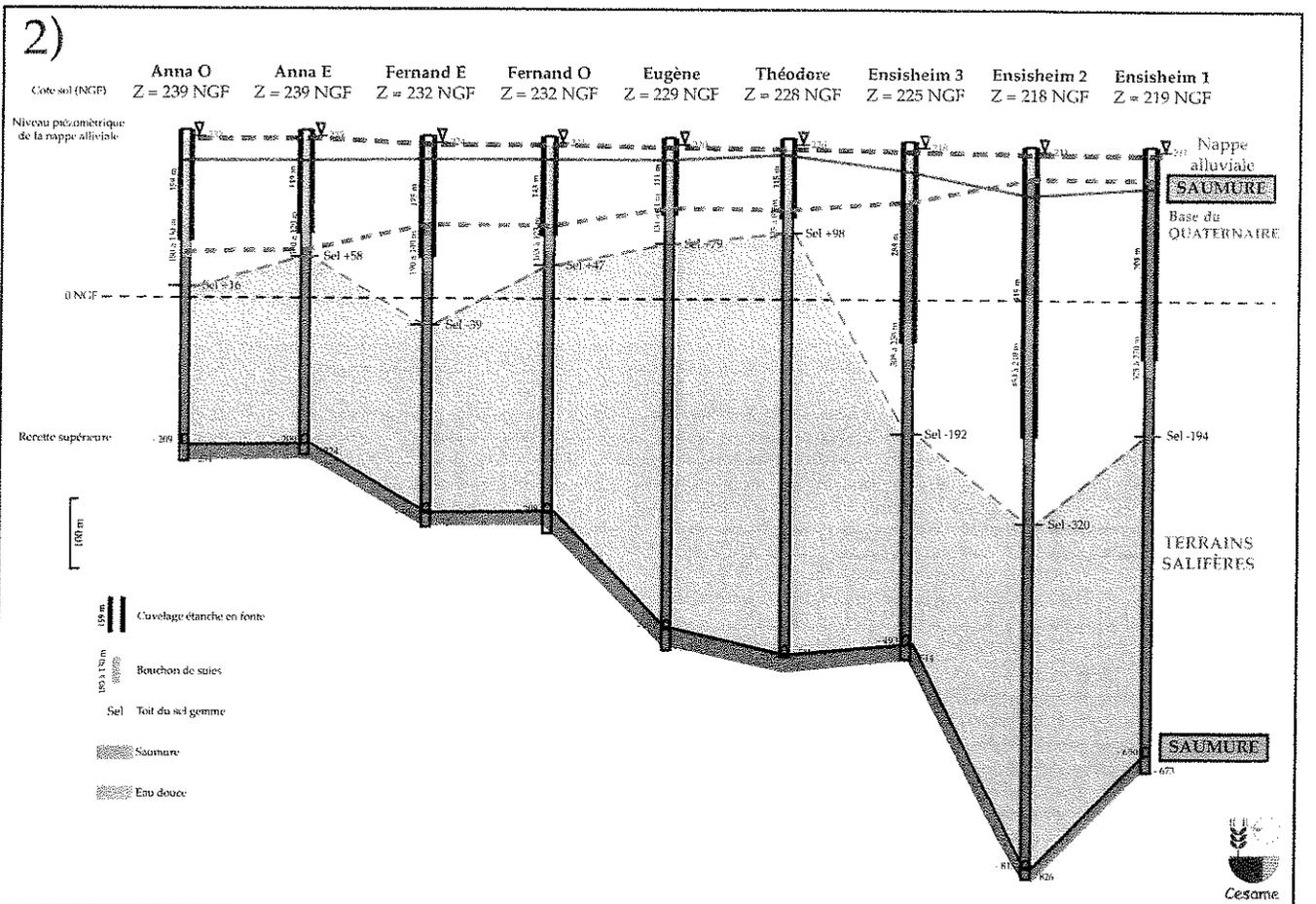
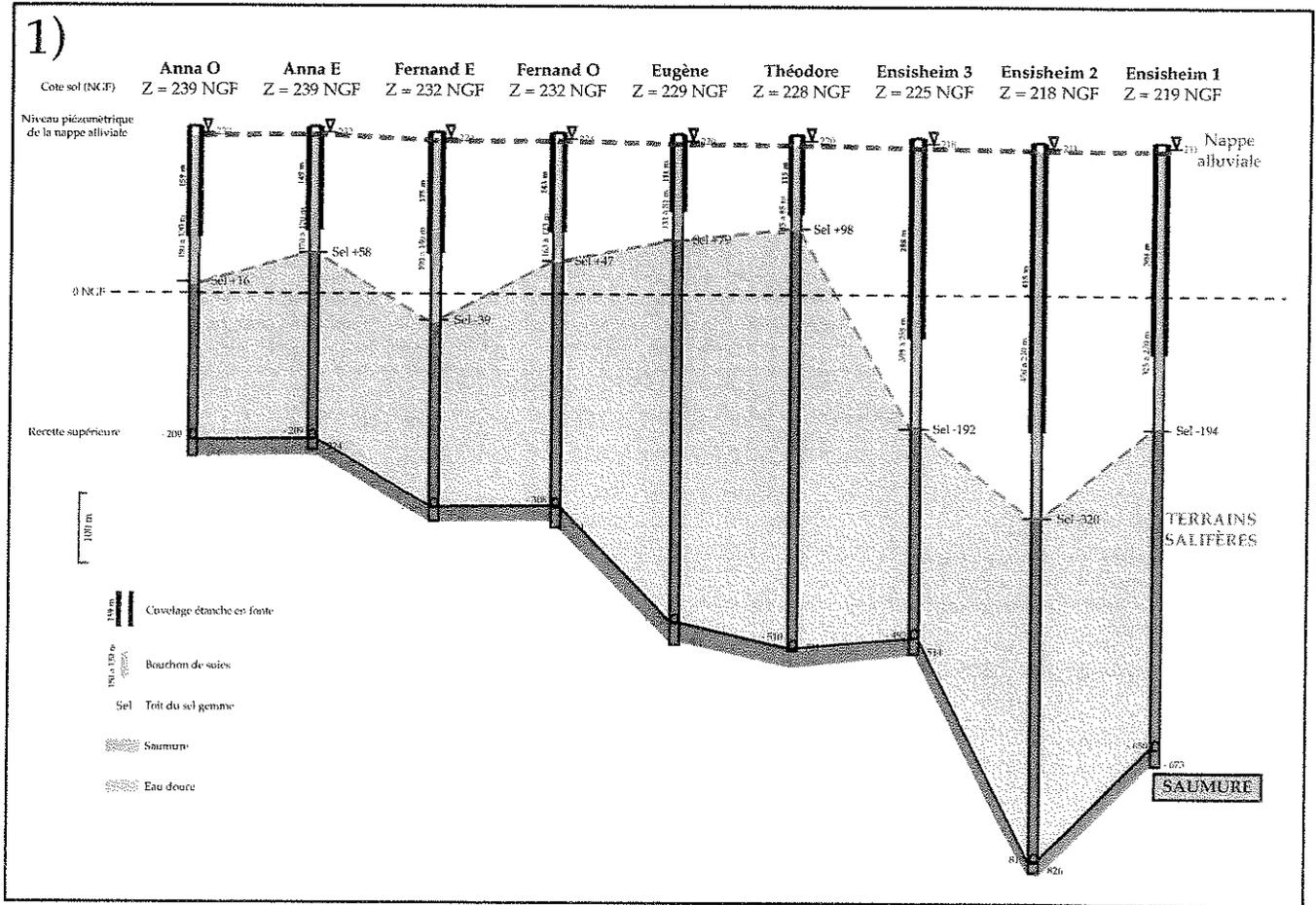
➤ *Secteur Est*

Dans le secteur Est, la nappe alluviale est plus haute dans les puits Anna. Le premier sel est plus haut dans les puits Eugène et Théodore (cf. tableau 15 page 53).

L'équilibre des pressions hydrostatique et halmostatique dans la mine passe par une remontée assez importante de la saumure dans les puits Ensisheim notamment. La hauteur des colonnes de puits est suffisante (figure 9,2°) pour que cet équilibre se fasse, il n'y aura donc pas de sortie de saumure en surface. On note cependant qu'au niveau des puits Ensisheim 1 et 2, la saumure dans les puits peut se trouver à une cote proche de la base de la nappe alluviale, ce qui suppose un échange possible d'un débit très réduit entre la saumure de la mine et la base de la nappe alluviale.



Figure 9 : Mise en place d'un équilibre hydrostatique, secteur Est



Z de référence		SECTEUR EST						
densité de l'eau		1						
densité de la saumure		1,2						
Puits	H nappe (NGF)	Situation de départ				P associée /unité de surface	montée de la saumure dans chaque puits (m)	Cote saumure (NGF) pour équilibre
		Cote sel (NGF)	H sel (m)	H eau (m)				
Anna Ouest	232	16	336	216	619,2	42	58	
Anna Est	232	58	378	174	627,6	0	58	
Fernand Est	224	-39	281	263	600,2	137	98	
Fernand Ouest	224	47	367	177	617,4	51	98	
Eugène	220	79	399	141	619,8	39	118	
Théodore	220	98	418	122	623,6	20	118	
Ensisheim 3	218	-192	128	410	563,6	320	128	
Ensisheim 2	211	-320	0	531	531	483	163	
Ensisheim 1	211	-194	126	405	556,2	357	163	

Valeurs de référence pour l'équilibrage du système

Tableau 15

➤ *Secteur Ouest*

Dans le secteur Ouest, le puits de référence est le puits Else, qui présente à la fois le « premier sel » le plus haut et le niveau de nappe alluviale le plus haut (cf. tableau 16).

Z de référence		SECTEUR OUEST						
densité de l'eau		1						
densité de la saumure		1,2						
Puits	H nappe (NGF)	Situation de départ				P associée /unité de surface	montée de la saumure dans chaque puits (m)	Cote saumure (NGF) pour équilibre
		Cote sel (NGF)	H sel (m)	H eau (m)				
Else	263	-34	255	297	603	0	-34	
Joseph	263	-50	239	313	599,8	16	-34	
Berrwiller	262	-157	132	419	577,4	128	-29	
Amélie 2	259	-27	262	286	600,4	13	-14	
Amélie 1	256	-66	223	322	589,6	67	1	
Max	253	-100	189	353	579,8	116	16	
Staffelfelden	250	-236	53	486	549,6	267	31	
Marie	245	-109	180	354	570	165	56	
Marie-Louise	245	-160	129	405	559,8	216	56	
Schoenensteinbach	235	-289	0	524	524	395	106	
Rodolphe 1	234	-160	129	394	548,8	271	111	
Rodolphe 2	234	-170	119	404	546,8	281	111	
Alex	234	-216	73	450	537,6	327	111	
Ungersheim 1	223	-231	58	454	523,6	397	166	
Ungersheim 2	223	-222	67	445	525,4	388	166	

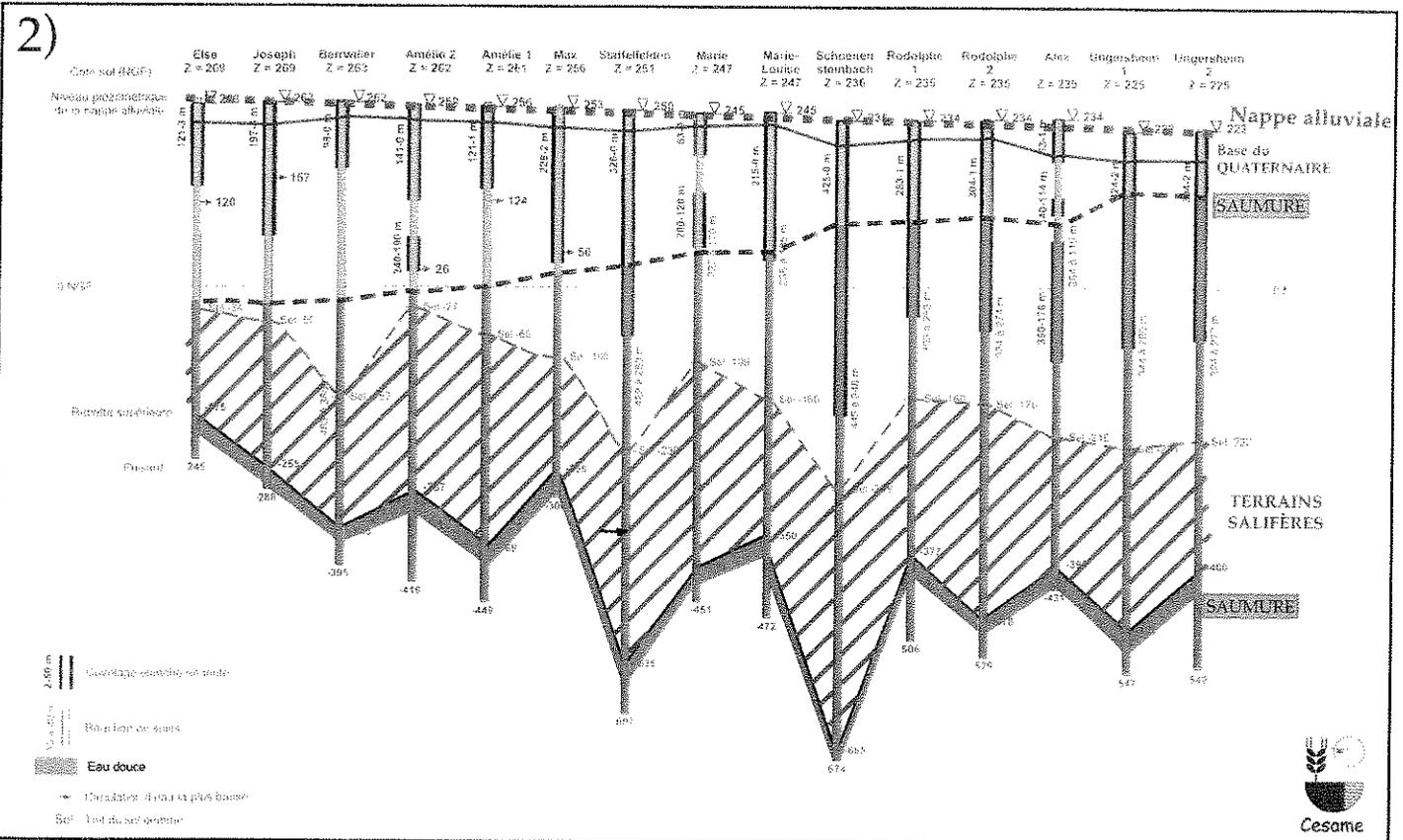
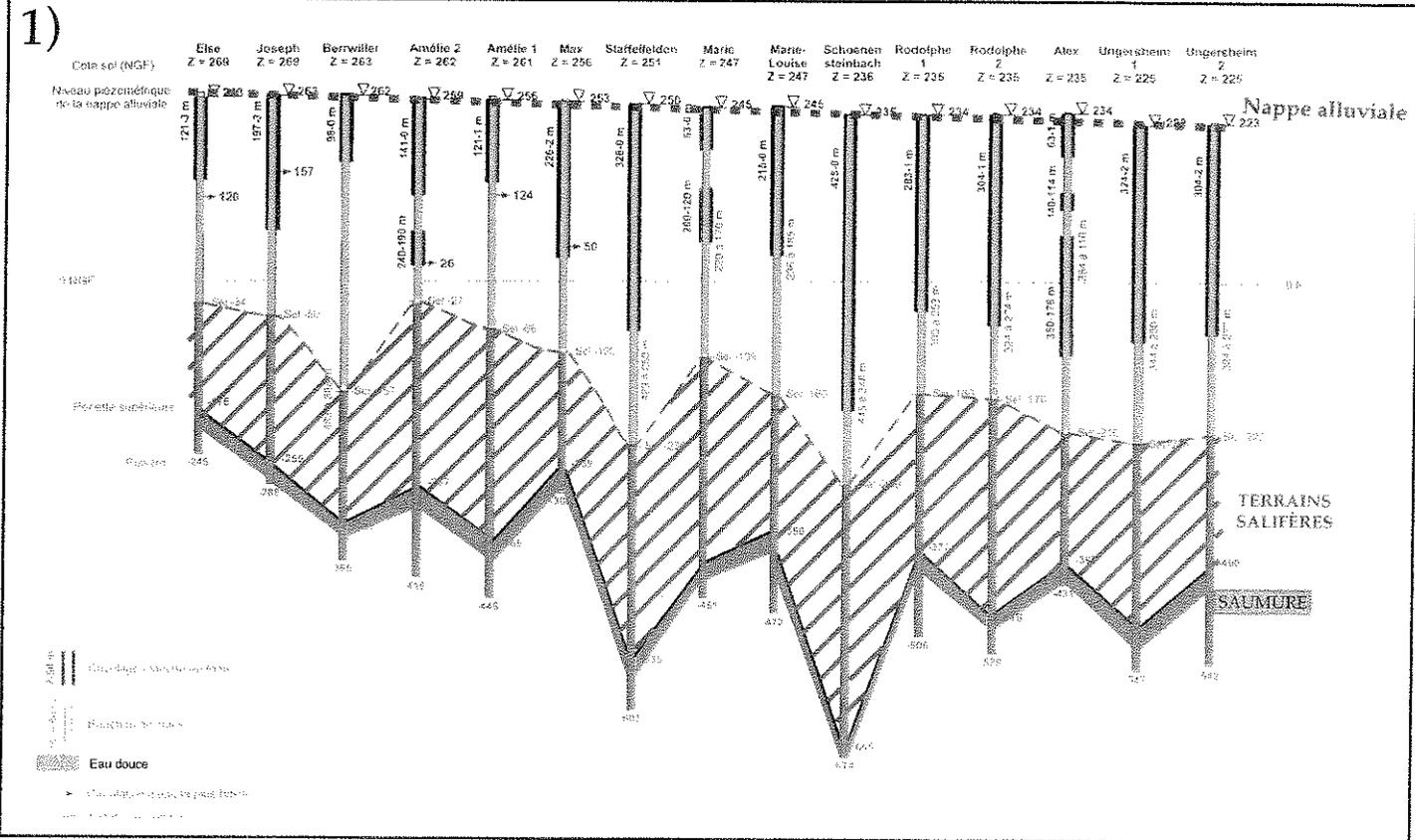
Valeurs de référence pour l'équilibrage du système

Tableau 16

La saumure aura tendance à remonter dans les puits « aval » (figure 10, 2°). Le tableau 16 présente les résultats des calculs d'équilibre, il permet de constater que la hauteur des colonnes des puits aval est suffisante pour permettre la mise en place d'un équilibre sans que le niveau de saumure dans les puits aval n'atteigne les terrains du quaternaire, c'est-à-dire sans qu'il n'y ait de contact entre la nappe alluviale de la Plaine d'Alsace et la saumure de la mine.



Figure 10 :
Mise en place d'un équilibre hydrostatique,
secteur Ouest



Au final, cette possibilité spécifique d'équilibrer les pressions par déplacement de la saumure va permettre la stabilisation du système et la disparition de tout écoulement au sein de la mine.

➔ **Au terme du remplissage de la mine, l'hypothèse la plus réaliste est la mise en place d'un équilibre hydrostatique s'imposant du fait de la densité plus élevée de la saumure qui permet son maintien au fond et l'instauration d'un équilibre entre les différents puits de la mine.**

L'apparition d'un équilibre hydrostatique supprime les possibilités d'écoulement dans la mine donc entre la mine et l'extérieur. Dans le secteur Ouest, aucun échange ne se produirait entre la mine et la nappe alluviale. Dans le secteur Est, des échanges très limités pourraient être observés puisque la saumure pourrait atteindre le même niveau que la base de la nappe alluviale dans les puits Ensisheim 1 et 2.

Au terme du remplissage, un autre facteur peut intervenir dans le cas spécifique des mines de potasse, c'est la possibilité d'une expulsion progressive de la saumure du fait de la poursuite de la compaction des terrains par fluage.

Remarque :

A la fin de l'ennoyage, les vides résiduels souterrains qui étaient situés dans des terrains solubles seront remplis par de l'air ou par de la saumure, **ce qui met un terme aux phénomènes de dissolution**. L'équilibre hydrostatique traduit de plus l'arrêt des apports d'eau douce vers la mine (fin des dissolutions).

5.3.2 Poursuite de la compaction

Une fois l'ennoyage effectif, les observations, et l'interprétation mathématique de la loi de fluage, conduisent à envisager un net ralentissement de la compaction, sans toutefois arrêter le phénomène qui conduirait à terme à la fermeture complète du massif.

M. Vouille confirme l'hypothèse d'un très net ralentissement du phénomène de fermeture des vides si une pression de fluide dans le milieu contribue à diminuer le déviateur de contraintes.

En effet, dans toutes les lois rhéologiques proposées pour le sel, la vitesse de fluage est dépendante de la partie déviatorique (σ_d) du tenseur de contrainte et y est reliée par une loi de puissance :

- $\dot{\epsilon}^0$ vitesse de fluage, $\dot{\epsilon}^0 = a(\sigma_d)^n$ pour la loi de Norton (vitesse de fluage stable dans le temps au-delà d'une phase transitoire non représentée)
- $\dot{\epsilon}^0$ vitesse de déformation visco-plastique, $\dot{\epsilon}^0 = a(\sigma_d)^n \epsilon^m$ pour la loi de Lemaître, avec la déformation $\epsilon = at^\alpha$.

Le facteur n (exposant de contrainte) varie selon la nature du sel de 3 à 5, cela signifie (toutes choses égales par ailleurs) que si l'on diminue la contrainte verticale (et la contrainte déviatorique sur les piliers ou blocs soutenant le toit) d'un facteur 2, la vitesse de convergence sera diminuée d'un facteur 8 à 32 (2^3 à 2^5).

Or la présence de saumure dans la mine (une fois qu'elle sera pleine) équivaut à une diminution de la contrainte proportionnelle à la différence de masse volumique entre le sel et la saumure :

- avant remplissage la contrainte verticale est proportionnelle à la masse volumique des



terrains (2,2)

- après remplissage la contrainte verticale devient proportionnelle à la masse volumique des terrains moins la masse volumique de la saumure (1,2)

⇒ soit un rapport de contrainte avant/après d'environ 2,2

La diminution du déviateur de contrainte de 2,2 entraînerait une diminution de la vitesse de fluage de $2,2^3$ (≈ 10) à $2,2^5$ (≈ 50) : une fois la mine pleine de saumure, la vitesse de fluage ne représenterait plus que 2 à 10% de la vitesse initiale.

N.B. : Comme on l'a déjà précisé, dans le cas où la mine pourrait se mettre en pression (cas d'une absence de fuite au niveau de tous les bouchons), cette pression ralentirait le phénomène de fluage en diminuant le déviateur de contrainte. On tendrait alors très probablement vers une pression pour laquelle le fluage devient négligeable dans la mine et le système se bloquerait sans qu'il n'y ait fermeture complète de la mine.

Quoi qu'il en soit « **si le remplissage par la saumure ralentit le processus de fermeture de la mine, il ne change pas son issue ultime, qui est la fermeture complète** » (Van Sambeek et Thoms, 2000).

Il est tout à fait possible que la compaction s'arrête une fois que les vides résiduels seront pleins de saumure. Toutefois, étant donné la difficulté à préciser les pressions à terme en tenant compte de la complexité du réservoir minier étudié (il s'agit plus de porosités que de vides), l'hypothèse d'une poursuite de la compaction n'est pas écartée.

Si la fermeture des vides par fluage des terrains se poursuit malgré la présence de saumure, elle va avoir tendance à comprimer la saumure remplissant les vides miniers. Il est alors possible que, une fois la mine noyée, la saumure soit mobilisée puis « expulsée » par l'intermédiaire des puits de mine. Le terme d'expulsion est donné entre guillemets car il ne s'agirait pas d'un phénomène violent, mais d'une lente remontée de la saumure sous l'effet de l'écrasement progressif des vides résiduels.

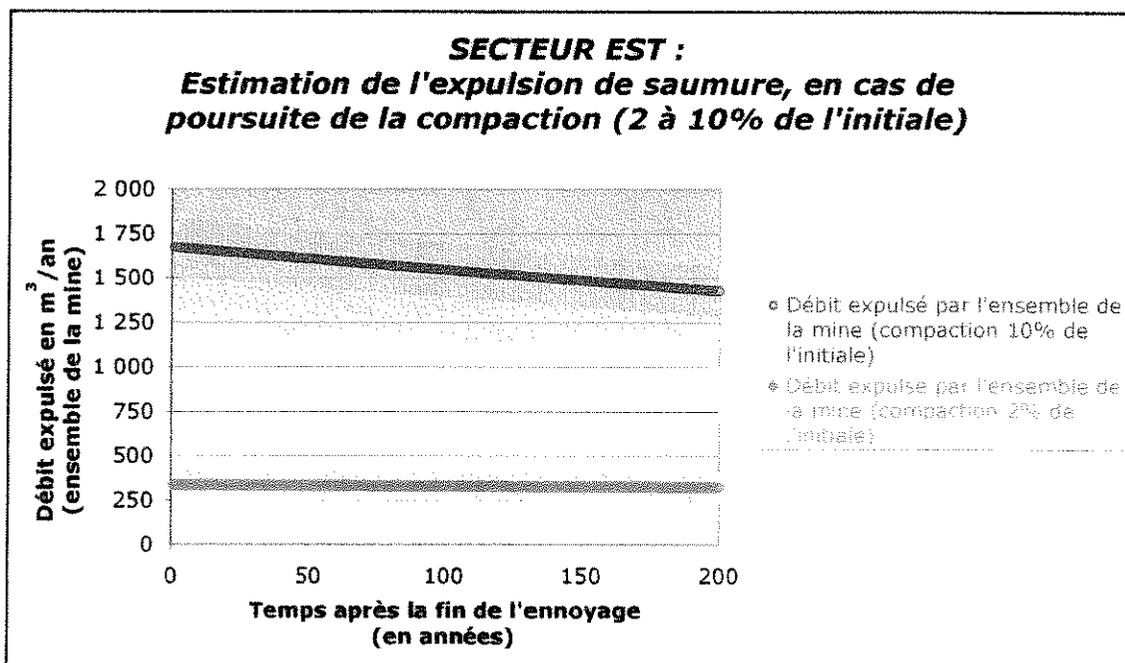
Si des barrières se sont créées au sein de la mine (rappelons que l'ennoyage se fait en plus de 100 ans), la saumure aura tendance à sortir par le puits le plus proche. Dans le cas contraire, c'est par les puits offrant le moins de résistance que la saumure pourra sortir. La résistance à l'écoulement dans chaque puits vient du bouchon et de la charge d'eau au-dessus de ce bouchon, c'est au niveau des bouchons les moins épais et les plus hauts que la résistance est théoriquement la plus faible (puits Marie et Marie-Louise dans le secteur Ouest, puits Théodore et Eugène dans le secteur Est).

➤ **Secteur Est**

Pour le secteur Est, les ordres de grandeur des débits qui pourraient être poussés par la compaction seraient (graphique 6) :

- De l'ordre de 1700 m³/an si la compaction résiduelle représente encore 10% de la compaction en l'absence de saumure,
- Environ 300 m³/an si la compaction résiduelle représente 2% de la compaction en l'absence de saumure.

Au total cela représenterait, pour l'ensemble du secteur Est, un débit potentiel de 0,04 à 0,2 m³/h de saumure expulsés de la mine, avec là encore une diminution régulière dans le temps. (graphique 6).



Graphique 6

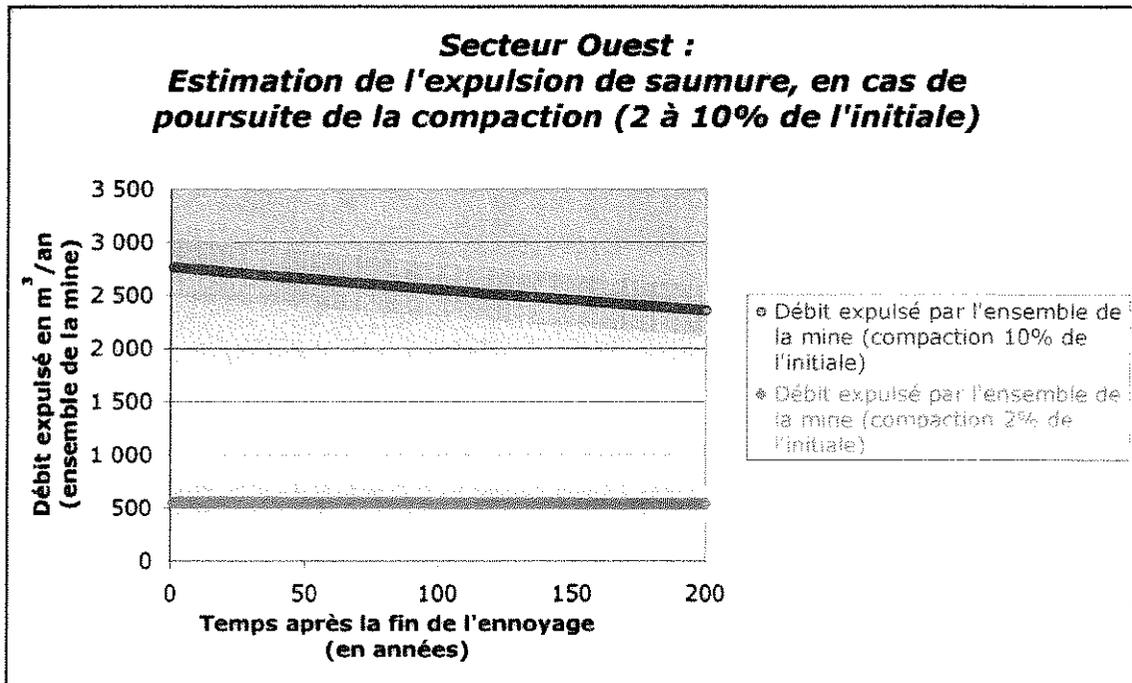
➤ **Secteur Ouest**

Les ordres de grandeur des débits qui pourraient être poussés par la compaction sont ainsi de (graphique 7) :

- environ 3000 m³/an si la compaction résiduelle représente encore 10% de la compaction en l'absence de saumure,
- environ 500 m³/an si la compaction résiduelle représente 2% de la compaction en l'absence de saumure.

Au total cela représenterait, pour l'ensemble du secteur Ouest, un débit potentiel en début de phénomène de l'ordre de 0,06 à 0,3 m³/h de saumure expulsés de la mine vers la surface ou vers les milieux poreux en périphérie des puits miniers (dont, en dernier recours, la nappe alluviale).





Graphique 7

Les débits calculés correspondent à l'ensemble du système minier, ils sont donc susceptibles de se répartir sur tous les puits et **ne peuvent que diminuer dans le temps** (graphique 8), puisque les volumes concernés par le phénomène de compaction sont également en constante diminution.

➤ Synthèse

Au total, dans le pire des cas (c'est-à-dire si la mine de potasse se remplit rapidement de saumure parce que les bouchons des puits sont effectivement perméables¹⁹), **on pourrait assister avec la poursuite de la réduction des vides par fluage, à des sorties de saumure au niveau des puits de mine.** Cela représenterait un débit cumulé de 4700 m³/an maximum²⁰. Ce débit se répartirait sur les 24 puits du bassin potassique, représentant **en moyenne environ 200 m³/an/puits.**

Pour fixer des ordres de grandeur, on peut comparer ces éléments à la fois aux apports de saumure qui ont pu exister par le passé avant traitement des terrils des MDPA, et au débit total du transit de la nappe alluviale du Rhin à l'aplomb du bassin minier.

- Le débit percolant à travers les terrils des MDPA peut être estimé en prenant en compte :
 - la surface cumulée des terrils avant leur prise en charge et leur traitement par les MDPA, soit 158 ha,
 - la pluie totale qu'ils peuvent recevoir : environ 760 mm/an.

¹⁹ Débits de remplissage calculés avec la loi de Darcy pour une perméabilité sans doute surestimée de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s.

²⁰ Superposition des débits maximum des secteurs Est (maximum 1700 m³) et Ouest (maximum 3000 m³)



Il s'établirait à environ 1,2 millions de m³/an. Ce débit, réparti en une vingtaine de lieux dans le bassin potassique, a été à l'origine des « langues » salines de la nappe d'Alsace dans ce secteur.

Pour comparaison, les débits d'expulsion maximum, au terme du remplissage de la mine, représenteraient l'équivalent de 0,4% de celui des terrils.

- La nappe alluviale d'Alsace présente une surface de 3040 km², un volume de 30 à 50 milliards de m³ et un débit de transit de 1,3 à 1,5 milliards de m³/an (40 à 50 m³/s) (source SDAGE du bassin Rhin-Meuse).

Les concessions minières des MDPA présentent une surface de 220 km². Elles ne se situent pas dans les parties les plus productives de la nappe, on peut donc leur attribuer un débit par unité de surface qui serait de l'ordre de 70 à 80 % du débit moyen de la nappe. Le débit de transit de la nappe alluviale au droit des concessions minières serait donc de 70 à 80 millions de m³/an.

Le débit maximum de saumure s'échappant par les puits de mine à cause du fluage résiduel (4700 m³/an) représenterait alors 0,006 % du débit de la nappe.

Pour donner à présent un ordre de grandeur en terme de qualité de l'eau, on peut calculer la teneur en chlorures dans la nappe à proximité immédiate des points d'émergence et, plus globalement, à l'aplomb du bassin minier.

- A proximité des puits par lesquels se produirait l'émergence de la saumure, la concentration en chlorures de la nappe pourrait atteindre des valeurs relativement élevées. Pour apprécier ces valeurs, on peut estimer qu'à l'aval immédiat de ces ouvrages une largeur de nappe de 10 m et une profondeur de 20 m seraient affectées par le flux sortant. Sachant que la vitesse d'avancement de la nappe est de l'ordre de 1 km/an, en admettant que la saumure a une concentration en chlorures de 230 g/l (voir annexe) et que le débit sortant est de 200 m³/an/puits, on aboutit à une concentration de chlorures dans la nappe de l'ordre de 230 mg/l dans la zone la plus sensible, valeur qui reste inférieure à la norme de potabilité.

- A l'échelle de la nappe alluviale à l'aplomb de la zone minière, le débit total émergeant est de 4700 m³/an, concentré à 230 g/l de chlorures, alors que le débit de transit total de la nappe est de 70 millions de m³/an. La concentration moyenne induite n'est donc que de 17 mg/l, ce qui est sans conséquence significative sur les usages de l'eau.



Il est possible que le phénomène de compaction des terrains s'arrête une fois que l'ensemble des vides sera noyé par la saumure. Si le phénomène ne s'arrête pas, il sera en tout cas fortement réduit, car la présence de saumure diminue le différentiel de pression qui est le moteur du fluage. Ainsi, sur la base d'une compaction résiduelle de 2 à 10% de la compaction initiale, les débits de saumure potentiellement expulsés par la mine sont :

- 300 à 1700 m³/an pour l'ensemble du secteur Est,
- 500 à 3000 m³/an pour l'ensemble du secteur Ouest.

Ces débits, déjà très faibles (0,006%) au regard des débits de transit de la nappe alluviale à l'aplomb de la mine, ne peuvent ensuite que diminuer au fil du temps. Leur impact maximum sur la nappe alluviale (à l'aval immédiat des points d'émergence) élèverait la concentration en chlorures à des valeurs proches de la limite de potabilité de l'eau (≤ 250 mg/l). A l'échelle de la zone minière, l'enrichissement moyen en chlorures de la nappe restera minime et sans conséquence sur les usages de l'eau (≤ 20 mg/l).



5.4 Conclusion sur les phénomènes associés - le suivi

Les débits qui alimentent la mine sont limités à quelques m³/h, sur la base de l'équation de Darcy et en négligeant les nombreux phénomènes de colmatage, tassement, forces de tension superficielles, etc. qui auront très certainement pour effet de diminuer considérablement la perméabilité réelle des bouchons de cendre.

Ainsi, les durées d'ennoyage, probablement sous-estimées puisqu'elles considèrent des débits maximums, s'élèvent à :

- une centaine d'années pour le secteur Est,
- environ 150 ans pour le secteur Ouest.

Ces longues durées d'ennoyage présentent avantages et inconvénients :

- les phénomènes associés à l'ennoyage (migration de l'air et dissolution de l'encaissant) se feront à un rythme associé au faible débit d'alimentation, c'est-à-dire avec une intensité réduite mais sur une durée longue,
- le suivi de ces phénomènes sera difficile, tout d'abord parce qu'il ne pourrait se faire qu'avec une instrumentation de surface mais surtout parce que la durée de suivi est longue²¹

Comme le montre la présente étude, les trois phénomènes susceptibles d'avoir une incidence en surface sont :

- la dissolution liée à la pénétration d'eau douce par les puits de mine qui pourrait dissoudre l'encaissant à la base des ouvrages et provoquer un coulissage de la colonne de remblais dans les puits (l'hypothèse d'une déstabilisation complète des ouvrages n'est pas envisagée compte tenu de la présence des cuvelages en tête de puits) ;
- des remontées d'air au niveau des puits de mine au travers ou en périphérie des bouchons de cendres volantes donc dans le cuvelage ou bien en périphérie de celui-ci (dans la zone déstructurée liée au fonçage de l'ouvrage), donc dans la nappe alluviale ;
- des remontées de saumure par l'intermédiaire des puits de mine au terme du remplissage de la mine et si le fluage se poursuit malgré la présence de saumure au sein des vides résiduels.

Concernant la dissolution, surveiller ce qui se passe à la base des puits (au minimum à 290 mètres de profondeur) depuis la surface n'est guère envisageable : on se situe en effet aux limites d'action de la géophysique actuelle.

Par contre il est possible de préconiser une surveillance en surface du niveau des remblais, depuis les regards de visites des dalles (comme les MDPA le font actuellement).

Toutefois si des phénomènes de dissolution dans les ouvrages conduisaient à un coulissage des remblais dans les puits le phénomène ne pourrait probablement pas intervenir avant la fin du remplissage de la mine, soit à échéance de 100 à 150 ans.

²¹ L'ennoyage volontaire qui aurait permis d'accélérer l'ennoyage de la mine a été abandonné par impossibilité de maîtriser d'éventuelles dissolutions localisées et accessoirement par manque de ressource en saumure sur place (et l'introduction d'eau douce à des débits de plusieurs centaines de m³/h a été écartée).



Quoi qu'il en soit la surveillance minimale et suffisante apparaît effectivement être celle du niveau de remblai dans les puits de mine et elle nécessite :

- **le maintien de servitudes d'accès aux dalles des puits remblayés,**
- **la mention aux documents fonciers de l'existence de ces puits.**

Les remontées d'air minier dans les puits n'auront a priori aucune incidence, on peut cependant vérifier qu'il n'y a pas d'air vicié sous les dalles des ouvrages à l'aide d'appareils de mesure in situ (mesure de CO₂, CO, CH₄, H₂S, ...), chaque fois que le niveau des remblais sera vérifié. En cas de présence de l'un ou l'autre de ces gaz, l'ouverture de la trappe et l'aération du petit volume présent sous la dalle devrait suffire à résoudre le problème car les débits expulsés seront selon toute vraisemblance limités car liés à des fuites diffuses et non à une rupture de bouchon (la stabilité des bouchons étant assurée par leur propre poids et celui des remblais qui les recouvre jusqu'au terme du remplissage de la mine).

En cas de poursuite du processus de fluage après la fin du remplissage de la mine, le suivi des éventuelles fuites de saumure (ou d'air) est encore plus délicat à mettre en œuvre car il ne peut intervenir qu'après la fin du remplissage de la mine et probablement à une échéance de plusieurs centaines d'années et ne pourrait provoquer que :

- des expulsions d'air diffuses au niveau de certains puits (même les bouchons les plus imperméables finiront sans doute par laisser passer l'air si la mine se met en pression, toutefois ils ne devraient pas être déstabilisés car le frottement des cendres sur les parois et le poids des matériaux les constituant permettra de résister à la pression de la mine, d'autant que le fluage s'exercera aussi sur les parois des puits augmentant ainsi les coefficients de frottement des bouchons dans les ouvrages).
- des expulsions de saumure entraînant une augmentation minimale de salinité de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace sans toutefois dépasser à l'aval immédiat des puits la norme actuelle de potabilité pour les chlorures (250 mg/l).



6. Conclusion

La présente étude, après avoir présenté le contexte géologique et hydrogéologique du bassin potassique Alsacien et analysé la structure de l'exploitation minière de potasse, s'est attachée à décrire et quantifier au regard du contexte hydrogéologique, les phénomènes physiques susceptibles de découler de la fermeture de cette exploitation.

Les deux secteurs d'exploitation du bassin (Est et Ouest) sont séparés l'un de l'autre par une structure géologique les rendant indépendants tant en terme de structure minière que d'hydrogéologie.

Ils sont situés à grande profondeur et protégés d'éventuelles intrusions d'eau superficielle par plusieurs centaines de mètres de terrains très peu perméables. Si bien que malgré une exploitation faite majoritairement avec des méthodes de foudroyage (effondrement du toit des champs d'exploitation), les mines de potasse d'Alsace n'ont jamais eu à souffrir d'accidents liés à des venues d'eau incontrôlables.

Malgré tout, chacun des puits creusés pour l'exploitation crée une discontinuité dans la couverture de la mine et autorise, malgré toutes les précautions d'équipement (cuvelage etc...), la pénétration d'un petit débit d'eau issu des aquifères sus-jacents (dont le plus important et le plus sensible est la nappe alluviale de la plaine d'Alsace).

Pendant l'exploitation de la mine, les débits d'exhaure liés à ces petites pénétrations d'eau par les puits et aux eaux introduites dans l'exploitation étaient extrêmement faibles puisqu'ils sont de l'ordre de 6 à 10 m³/h pour l'ensemble du bassin minier.

L'eau constituant un risque pour l'exploitant dans toute mine présentant un encaissant soluble, les puits des mines de potasse d'Alsace ont tous été bouchés avec un grand soin quand ils étaient mis hors service. Chaque ouvrage est ainsi doté au minimum d'un bouchon de cendres volantes de centrales thermiques (perméabilité <10⁻⁶ m/s) de 50 m positionné à la base de son cuvelage étanche. Le reste de l'ouvrage (au-dessus et en dessous des cendres) est remblayé avec des matériaux graveleux.

Une fois que tous les puits seront arrêtés, l'évolution du système minier se poursuivra en liaison avec plusieurs phénomènes :

- fermeture progressive des vides miniers résiduels par fluage de l'encaissant salin (l'essentiel (90%) du vide créé par l'exploitation s'est résorbé par affaissement très rapidement après exploitation, mais le vide restant continue à évoluer lentement),
- pénétration lente d'eau par les puits remplissant progressivement les vides résiduels,
- dissolution de l'encaissant par l'eau pour former une saumure saturée.

L'évolution simultanée de ces trois phénomènes devrait conduire à un remplissage complet du vide résiduel en environ 100 ans pour le secteur Est et 150 ans pour le secteur Ouest. Actuellement les mines ne sont donc que très partiellement remplies de saumure. Toutefois les secteurs d'aval pendage (tels qu'Ensisheim à l'Est et Ungersheim à l'Ouest) sont déjà remplis de saumure sans qu'aucun phénomène n'ait été observé en surface...



En cours de remplissage, l'air, poussé vers les points hauts de la mine sera progressivement expulsé au niveau des puits, sans doute au niveau des mêmes ouvrages qui auront permis la pénétration de l'eau. Toutefois si certains bouchons de puits étaient totalement étanches, l'étude montre que leur stabilité ne pourrait pas être remise en cause par les bulles d'air coincées à leur base du fait que les pressions atteintes dans ces bulles resteraient partout inférieures à la seule force exercée par le poids du bouchon de cendres et des remblais sus-jacents (sans même tenir compte de la résistance au cisaillement du bouchon de cendres sur les parois du puits).

Compte tenu de l'existence d'un pendage dans les couches de potasse exploitées, et des aménagements mis en œuvre par l'exploitant au moment de la fermeture des puits (en particulier bouchon béton et drains à la base des ouvrages), la dissolution entraînée par l'eau pénétrant dans la mine se répartira dans l'ensemble de l'exploitation et préservera la base des puits jusqu'à la phase finale du remplissage. En phase finale, la dissolution autour des puits pourra éventuellement créer des vides discontinus et inégaux dans les interstrates de matériaux solubles en périphérie des parements, mais a priori pas de vides importants et continus susceptibles de déstabiliser totalement les ouvrages.

Ce phénomène pourrait éventuellement conduire à un coulisage des remblais dans les puits pour compenser le vide créé par dissolution, c'est la raison pour laquelle un suivi du niveau des remblais en surface apparaît nécessaire pour compenser éventuellement ce coulisage. Ce suivi nécessite le maintien de servitudes d'accès aux dalles des puits remblayés et la mention aux documents fonciers de l'existence de ces puits.

En cas de poursuite du processus de fluage après la fin du remplissage de la mine²² l'évolution du système pourrait mener à :

- des expulsions d'air diffuses au niveau de certains puits (même les bouchons les plus imperméables finiront sans doute par laisser passer l'air si la mine se met en pression, toutefois ils ne devraient pas être déstabilisés car le frottement des cendres sur les parois et le poids des matériaux les constituant permettra de résister à la pression de la mine, d'autant que le fluage s'exercera aussi sur les parois des puits augmentant ainsi les coefficients de frottement des bouchons dans les ouvrages).
- des expulsions de saumure entraînant une augmentation minime de salinité de la nappe alluviale de la plaine d'Alsace sans toutefois dépasser à l'aval immédiat des puits la norme actuelle de potabilité pour les chlorures (250 mg/l).

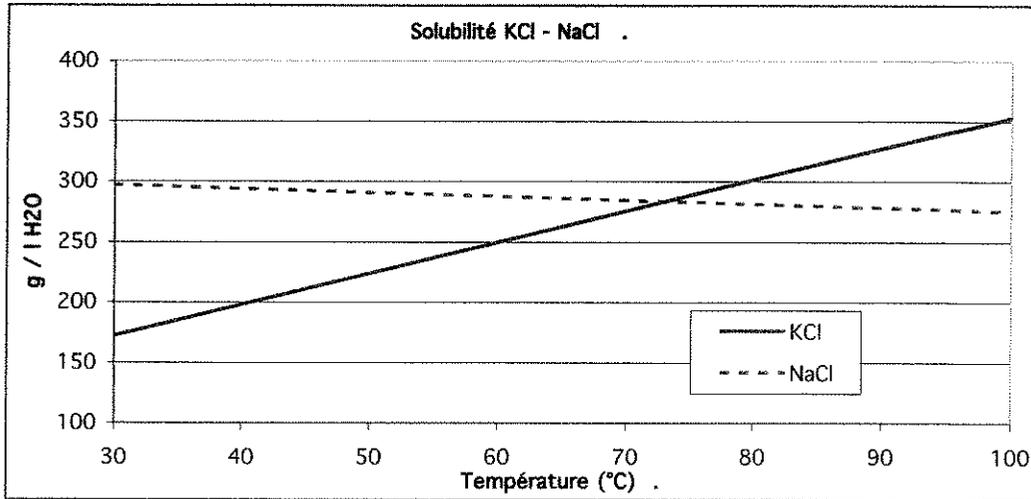
Ces phénomènes devant intervenir à des échéances de plusieurs centaines d'années et avec des évolutions extrêmement lentes ne paraissent pas devoir faire l'objet d'un suivi.

²² Phénomène incertain car il est probable qu'un équilibre s'instaure dans la mine une fois que la présence de saumure réduira l'incidence de la pression lithostatique donc du fluage.



ANNEXE 1
SATURATION – DISSOLUTION

Pour saturer une saumure au contact de la sylvinite, il faut dissoudre environ 450 g/l de sels (NaCl + KCl). Cette valeur ainsi que les proportions entre NaCl et KCl sont fonction de la température, comme on peut le visualiser sur le graphique ci-dessous (la dépendance vis-à-vis de la température est marquée en particulier pour le chlorure de potassium).



Par exemple, à 40°C, 1 m³ de saumure saturée contient :

830 kg d'eau

406 kg de sels (NaCl+KCl)

représentant 1236 kg. La densité de la saumure est donc voisine de 1,2 (1,24 à 40°C).

Pour un vide initial de 1 m³, l'eau douce pénétrant dans la mine dissoudra environ 0,24 m³ de sel²³ pour former 1,24 m³ de saumure saturée, créant ainsi 0,24 m³ de vide supplémentaire.

En ordre de grandeur, la création supplémentaire de vide par dissolution de l'encaissant quand de l'eau douce pénètre dans la mine est de l'ordre de +25% du vide initial.

La densité de la saumure, variable en fonction de la teneur en sels dissous est supérieure à 1,2, la saumure aura donc tendance à « plonger » par rapport à de l'eau douce.

En ordre de grandeur, 1 m³ de saumure saturée dans la mine contient environ 400 kg de sels se répartissant en 300 kg de NaCl et 100 kg de KCl, soit environ 230 kg de chlorures, 52 kg de potassium et 118 kg de sodium.

²³ Il s'agit d'ordres de grandeur puisque la saturation globale d'une saumure ainsi que sa composition sont variables avec la température.

ANNEXE 2

Perméabilité des bouchons de cendres

On peut penser que compte tenu de la hauteur des bouchons, il existe une réduction naturelle de la perméabilité des cendres par un phénomène d'autocolmatage des parties basses par les particules issues des parties hautes, cependant rien ne permet de le démontrer.

De plus, l'observation montre que la porosité moyenne des argiles évolue avec le tassement, cette constatation est applicable aux cendres volantes, qui sont également des matériaux très fins. Des expériences faites par Athy (1930) ont montré par exemple que des argiles présentant une porosité moyenne de 45 à 50 % en surface voyaient leur porosité baisser à 25 à 30 % à 300 m, 10 à 15 % à 600 m, 5 à 10 % à 1200 m. La presque totalité de la diminution de porosité est certainement due au ré-arrangement des particules et il est possible qu'il puisse y avoir un effet de recristallisation bouchant les pores extrêmement fins²⁴.

Bien sûr, la porosité n'est pas la perméabilité, mais en diminuant la taille des pores, les tassements augmentent de facto l'importance des forces d'adsorption dans le matériau²⁵, donc la perte de charge entre les grains, ce qui conduit à une diminution de la perméabilité. Il existe d'ailleurs plusieurs relations liant la perméabilité des matériaux avec la taille des grains²⁶. De plus, la surface spécifique des grains (surface/unité de volume) intervient de façon importante dans l'intensité des forces de rétention et d'adsorption or les particules constituant les cendres volantes sont peu sphériques donc présentent des surfaces spécifiques élevées.

Par ailleurs, le fait de mettre en contact à leur base ces cendres avec des niveaux drainants non saturés, diminue également leur perméabilité apparente car la couche désaturée superficielle est le siège de forces de capillarité (tension superficielle au contact air-eau) très élevées du fait de la faible granulométrie et de la forte surface spécifique des matériaux.

La perméabilité des bouchons de cendre, telle que mesurée en laboratoire ou in-situ à faible profondeur est donc obligatoirement surévaluée de façon importante par rapport à la perméabilité réelle en profondeur.

²⁴ « Les eaux souterraines », H. SCHOELLER, 1962, Masson éd.

²⁵ Les forces entrant en jeu pour définir le potentiel (Φ) de l'eau dans un sol sont :
 - les forces d'adsorption qui s'établissent à la surface de séparation eau-solide ($-\Phi_1$),
 - les forces de capillarité ($-\Phi_2$), dues à la tension superficielle au contact air et eau, (elles forment avec les forces d'adsorption le « potentiel de rétention » ($-\Phi_1$))
 - les forces osmotiques (généralement négligeables par rapport aux autres),
 - les forces de gravité avec le potentiel newtonien ($+\Phi_4=gh$),
 - la pression ($+\Phi_5$),
 - le potentiel total de l'eau = $\Phi_1 + \Phi_2 + \Phi_3 + \Phi_4$

²⁶ Lois du type $K = [\gamma/\mu].d_{10}^2.f(m)$
 - d_{10} = taille effective des grains
 - m Porosité du matériau
 - γ Poids spécifique du liquide
 - μ viscosité du liquide

ANNEXE 3

Pressions lithostatiques et stabilité des bouchons

Annexe 3 : Equilibre lithostatique et tenue des bouchons

Puits	(A)				(B)				rapport (A) / (B')	
	H bouchon hauteur de bouchon + graviers au-dessus du bouchon (m)	R, rayon du puits (m)	H cendres, hauteur de bouchon seulement (m)	0,05*R	H cendres / H bouchon	rapport (A) / (B)	H bulle, Hauteur finale de la bulle calculée dans tableau précédent (m)	Soit H' à retenir = H bulle+ H bouchon (m)		H cendres / H'
SECTEUR EST										
Anna ouest	180	2,25	50	0,113	0,278	0,405	37,04	217,04	0,230	0,468
Anna est	170	2,25	50	0,113	0,294	0,383	39,76	209,76	0,238	0,472
Fernand est	190	2,25	50	0,113	0,263	0,428	20,90	210,00	0,238	0,473
Fernand ouest	163	2,25	40	0,113	0,245	0,458	24,17	187,17	0,214	0,526
Eugène	131	2,5	50	0,125	0,382	0,328	42,87	173,67	0,288	0,434
Théodore	135	2,5	50	0,125	0,370	0,338	43,83	178,83	0,280	0,447
Ensisheim III	308	2,75	50	0,138	0,162	0,847	13,39	321,39	0,156	0,884
Ensisheim I	312	2,75	240	0,113	0,769	0,146	22,62	334,62	0,717	0,157
Ensisheim II	443	2,25	55	0,113	0,124	0,906	9,88	452,88	0,121	0,926
SECTEUR OUEST										
Eise	444	2,26	444	0,113	1,000	0,113	0,00	444,00	1,000	0,113
Joseph	524	2,26	524	0,113	1,000	0,113	0,00	524,00	1,000	0,113
Bernwiller	483	3,02	95	0,151	0,197	0,768	7,64	490,64	0,194	0,780
Amélie 2	312	2,26	210	0,113	0,673	0,168	24,64	336,64	0,624	0,181
Amélie 1	275	2,75	210	0,137	0,764	0,180	34,51	309,51	0,678	0,202
Max	450	2,42	440	0,121	0,978	0,124	1,58	451,58	0,974	0,124
Staffelfelden	429	3,15	176	0,158	0,410	0,384	10,56	439,56	0,400	0,394
Marie	220	2,25	50	0,113	0,227	0,495	22,66	242,66	0,206	0,546
Marie-Louise	235	2,25	50	0,113	0,213	0,529	18,56	253,56	0,197	0,571
Schoenensteinbach	445	2,95	97	0,147	0,218	0,676	10,02	455,02	0,213	0,691
Rodolphe 1	303	2,25	50	0,113	0,165	0,882	11,78	314,78	0,159	0,708
Rodolphe 2	324	2,75	50	0,138	0,154	0,892	13,82	337,82	0,148	0,930
Alex	364	2,25	254	0,113	0,698	0,161	9,26	373,26	0,680	0,165
Ungersheim 1	344	2,75	64	0,138	0,186	0,740	11,43	355,43	0,180	0,764
Ungersheim 2	322	2,75	47	0,138	0,146	0,943	10,04	332,04	0,142	0,972

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Le stockage en mine de déchets industriels, Stocamine, février 1996.
- [2] Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Aspects mécaniques du problème, G. Vouille, Ecole des Mines de Paris, document non daté (antérieur à février 1997).
- [4] Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la Mine Amélie. Approche des problèmes liés à l'hydrologie, P. Combes, E. Ledoux, Ecole des Mines de Paris, document non daté (antérieur à février 1997).
- [8] Etude de sécurité chimique, J. Muller, G. Kille, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, 30 novembre 1990.
- [9] Etude de sécurité chimique sur le projet MDPA de stockage profond des déchets industriels dans la mine Joseph-Else à Wittelsheim, Comportement à long terme, G. Kille, S. Walter, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, document non daté.
- [12] Etude de sécurité chimique, procédure d'acceptation et de suivi des déchets, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse, 21 janvier 1991.
- [15a] Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, étude bibliographique, INERIS, 21 décembre 2001.
- [15b] Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, synthèse (Projet), INERIS, 15 octobre 2002.
- [25] Plan des travaux du fond et aérage, MDPA.
- [26] Affaissement et dégâts de surface dans le bassin potassique alsacien, MDPA, 7 juillet 1999 et janvier 2008.
- [27] Caractérisation des cendres volantes, MDPA, 30 mars 2004.
- [28] Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de Stocamine, Wittelsheim (Haut Rhin), MICA Environnement, avril 2004.
- [29] Détermination des dangers, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.
- [30] Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus aux substances chimiques, BMG Engineering AG, juillet 2004.
- [35] Actualisation de l'étude de stabilité du stockage de déchets toxiques dans la mine d'Amélie, F. Hadj-Hassen, M. Tijani, Ecole des Mines de Paris, Février 2006.
- [37] Synthèse sur l'ennoyage de la mine de potasse Secteur Ouest, CESAME, Septembre 2006.
- [38] Abandon des cavités salines, Bérest, Brouard et Durup, Mai 1997.

LEXIQUE

aérage :	ventilation des travaux souterrains – action de faire circuler l'air dans les galeries et chantiers.
affaissement :	descente des terrains de surface au-dessus d'une exploitation minière.
anhydrite :	sulfate hydrate de calcium (forme sans H ₂ O du gypse), roche dure généralement associé au sel gemme (elle cristallise en même temps que le gypse en présence de sel NaCl).
aquifère :	Terrain poreux ou fissuré, perméable, susceptible d'autoriser l'existence d'une nappe d'eau souterraine ; par extension, parfois employé pour désigner la nappe souterraine.
cuvelage :	soutènement métallique étanchant le puits dans la partie où il traverse les terrains aquifères.
évaporites :	Terme général désignant les dépôts riches en chlorures et sulfates alcalins. La précipitation de ces sels se produit par évaporation intense, dans des lagunes, bras de mer ou lacs salés. Par ordre de cristallisation, on a les principaux minéraux suivants : gypse, anhydrite, sel gemme (ou halite), carnallite, sylvine.
fluage :	déformation continue dans le temps, d'un matériau soumis à une contrainte constante et une température donnée.
grisou :	mélange gazeux inflammable composé surtout de méthane, qui se dégage parfois dans les mines (principalement de charbon).
pilier :	volume de minerai non abattu participant au soutènement du chantier.
recette :	lieu où se trouvent les dispositifs assurant la manutention des produits et du matériel aux abords du puits.
serrement :	ouvrage permettant d'obturer une galerie.
soutènement :	dispositif de soutien des parois.
stot:	volume de minerai laissé en place pour protéger une voie ou une installation du fond ou de la surface.