

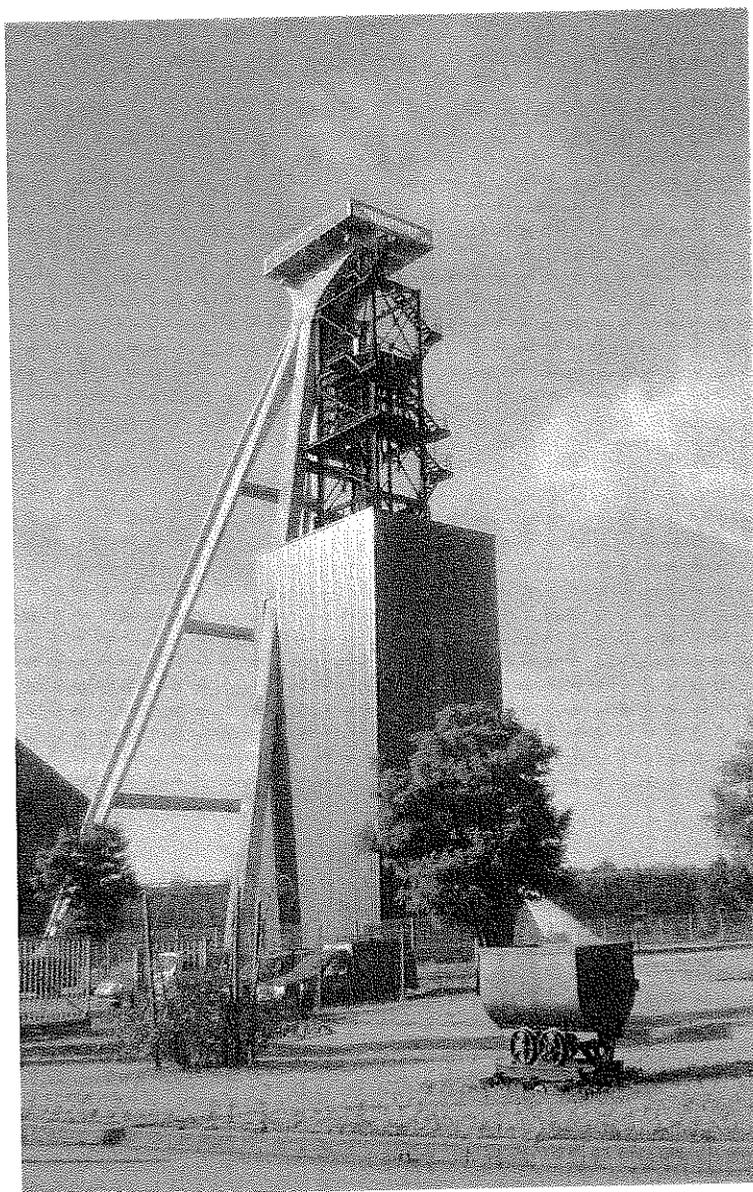
StocaMine

Avenue Joseph Else
68310 WITTELSHEIM

(37)

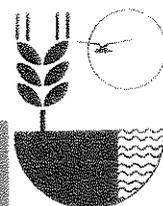
C.E.S.A.M.E
Bureau d'études

L'ENNOYAGE DE LA MINE DE POTASSE, secteur ouest



Septembre 2006

Conseil en Environnement, Sols, AMénagement



CESAME, Z.A. du Parc, secteur Gampille 42 490 FRAISSES Téléphone : 04 77 10 12 10 Télécopie : 04 77 10 12 11

Préambule

Les données techniques utilisées dans ce dossier sont issues de renseignements transmis par Stocamine.

La responsabilité de C.E.S.AME. ne pourra être engagée si les informations qui lui ont été communiquées sont incomplètes ou erronées.

Les données du présent document seront utilisées intégralement ou de manière objective. L'utilisation partielle ou erronée des informations incluses dans le présent dossier ne saurait engager la responsabilité du bureau C.E.S.AME.



SOMMAIRE

1. INTRODUCTION	1
2. GÉNÉRALITÉS	2
2.1 LOCALISATION (FIGURE 1).....	2
2.2 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE.....	2
2.3 CONTEXTE MINIER (FIGURE 3).....	4
2.3.1 <i>Le minerai</i>	4
2.3.2 <i>L'exploitation minière du secteur ouest</i>	4
2.4 STOCAMINE (FIGURE 4).....	6
3. LA FERMETURE	8
3.1 LA FERMETURE DES PUITTS, DÉBITS D'INFILTRATION	8
3.1.1 <i>Principe de fermeture et matériaux utilisés (figure 5)</i>	8
3.1.2 <i>Débits théoriques à travers les puits fermés</i>	8
3.2 L'ÉVOLUTION DES VIDES MINIERES	10
3.2.1 <i>Vides résiduels de la mine de potasse et évolution (figure 6)</i>	10
3.2.2 <i>Stocamine</i>	13
3.3 SITUATION HYDROGÉOLOGIQUE ACTUELLE ET ÉVOLUTION.....	14
4. PHÉNOMÈNES ASSOCIÉS À L'ENNOYAGE	15
4.1 SATURATION ET DISSOLUTION	15
4.1.1 <i>Solubilités</i>	15
4.1.2 <i>Effets de la dissolution</i>	16
4.2 ENNOYAGE DES DÉCHETS DE STOCAMINE.....	20
4.2.1 <i>1^{ère} phase : le niveau général de saumure est plus bas que le site du stockage</i>	20
4.2.2 <i>2^{ème} phase : lixiviation des déchets par contact avec la saumure</i>	21
4.3 LA FIN DE L'ENNOYAGE (NOTION DE FLUX SORTANT DU RÉSERVOIR MINIER).....	22
5. COMPARAISON DES SOLUTIONS POUR L'ENNOYAGE.....	26
5.1 SOLUTIONS ÉTUDIÉES : ENNOYAGE NATUREL, ENNOYAGE VOLONTAIRE AVEC DE LA SAUMURE, ENNOYAGE VOLONTAIRE AVEC DE L'EAU DOUCE.....	26
5.2 VITESSE ET DURÉE DE L'ENNOYAGE.....	26
5.3 FAISABILITÉ TECHNIQUE	28
5.4 LES DISSOLUTIONS.....	29
5.5 EXPULSION DE LA SAUMURE UNE FOIS LA MINE NOYÉE	32
5.6 SYNTHÈSE ET SUIVI OU PRÉCONISATIONS.....	39
6. CONCLUSION	40



LISTE DES FIGURES et ANNEXES

- Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (secteur ouest des MDP)
- Figure 2 : Log hydrogéologique
- Figure 3 : Les travaux miniers
- Figure 4 : Stocamine
- Figure 5 : Principe de fermeture des puits
- Figure 6 : Evolution des vides miniers
- Figure 7 : Augmentation du volume des vides par dissolution
- Figure 8 : Fin de l'ennoyage, dissolution au niveau des puits
- Figure 9 : Migration de l'air pendant l'ennoyage
- Figure 10 : Schéma de principe du calcul du débit d'échange maximal par la loi de Darcy
- Figure 11 : Mise en place d'un équilibre

BIBLIOGRAPHIE

GLOSSAIRE

- Annexe 1 Diagramme de solubilité du mélange NaCl/KCl
- Annexe 2 Recherche de l'équilibre hydrodynamique par la loi de Darcy (1 page)



1. Introduction

Dans le fossé rhénan, au nord de Mulhouse, un groupe d'industriels découvre en 1904 la présence de potasse à plus de 450 mètres de profondeur. 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 a été utilisée en engrais et dans l'industrie chimique.

Les deux couches de sylvinite sont situées au sein d'un épais faisceau salifère. Les venues d'eau dans la mine étaient ainsi quasiment nulles, provenant presque exclusivement d'infiltrations par l'intermédiaire des puits de mine. Dans ce contexte géologique et hydrogéologique favorable, un projet de stockage de déchets a vu le jour en parallèle à la fin de l'exploitation de la potasse.

En 1999, après de nombreuses études et deux enquêtes publiques, Stocamine démarre son activité de stockage souterrain de déchets. Le site de stockage est créé à partir de l'infrastructure minière existante : des déchets ultimes sont entreposés dans des galeries creusées dans le sel, une vingtaine de mètres sous l'exploitation de potasse.

En 2002, un incendie fait suspendre l'activité de Stocamine et provoque l'arrêt, anticipé de quelques mois, de l'activité d'extraction de potasse. L'entretien du site et de ses infrastructures se poursuit aujourd'hui, toutefois les activités d'extraction et de stockage de déchets étant arrêtées, **se pose le problème de la fermeture de la mine et de ses conséquences, entre autres vis-à-vis de Stocamine dans l'hypothèse du maintien en souterrain des déchets.**

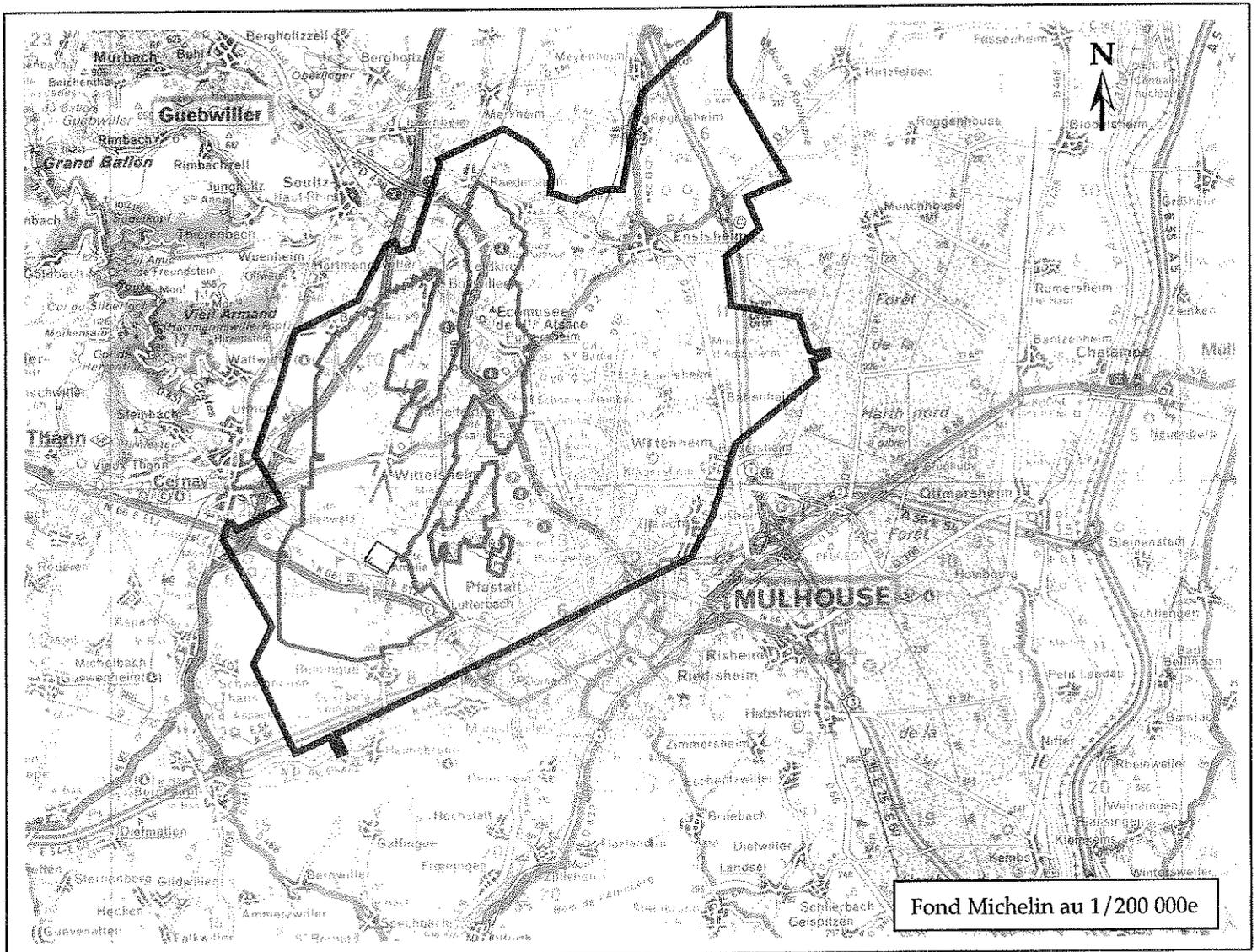
La présente étude hydrogéologique s'articule autour de 4 parties :

- *Généralités* : il s'agit de la description du contexte géologique, hydrogéologique et minier qui fait la particularité des mines de potasse d'Alsace et du site Stocamine.
- *La fermeture du secteur ouest* : ce chapitre rappelle que la fermeture du secteur ouest de la mine de potasse est entamée car 11 puits ont déjà suivi une procédure de mise en sécurité. Des bouchons de cendres de centrales thermiques (cendres volantes) limitent les infiltrations et dans le même temps la lente fermeture des vides résiduels souterrains a commencé.
- *Phénomènes associés à l'ennoyage* : l'ennoyage est une phase transitoire pendant laquelle on peut attendre des phénomènes de transformations de l'eau douce en saumure, de dissolution, de migration d'air, mais également la lixiviation des déchets de Stocamine.
- *Comparaison des solutions d'ennoyage* : l'étude hydrogéologique a été menée dans le but de comparer les solutions d'ennoyage. Ce chapitre reprend ce qui différencie un ennoyage naturel d'un ennoyage volontaire afin de donner un avis sur la solution à privilégier.

Ce dossier s'appuie, entre autres, sur les documents existants concernant le site de Stocamine, la mine de potasse, et son environnement, la bibliographie est fournie en annexe. Un glossaire reprend la définition de plusieurs termes techniques à la fin de ce document.



Figure 1 :
Localisation de la zone d'étude
(secteur ouest des MDPA)



-  Emprise approximative des concessions des Mines de Potasse d'Alsace
-  Emprise des travaux miniers du "secteur ouest"
-  Stockage Stocamine

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. Deux secteurs d'exploitation sont distingués, car isolés par une importante zone faillée : **seul le secteur ouest intéresse cette étude. Le site Stocamine est implanté à proximité des puits Joseph et 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 pétroliers.

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 de 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 petit niveau argilo-marneux qui l'isole des formations sous-jacentes.

- **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 au tarissement.

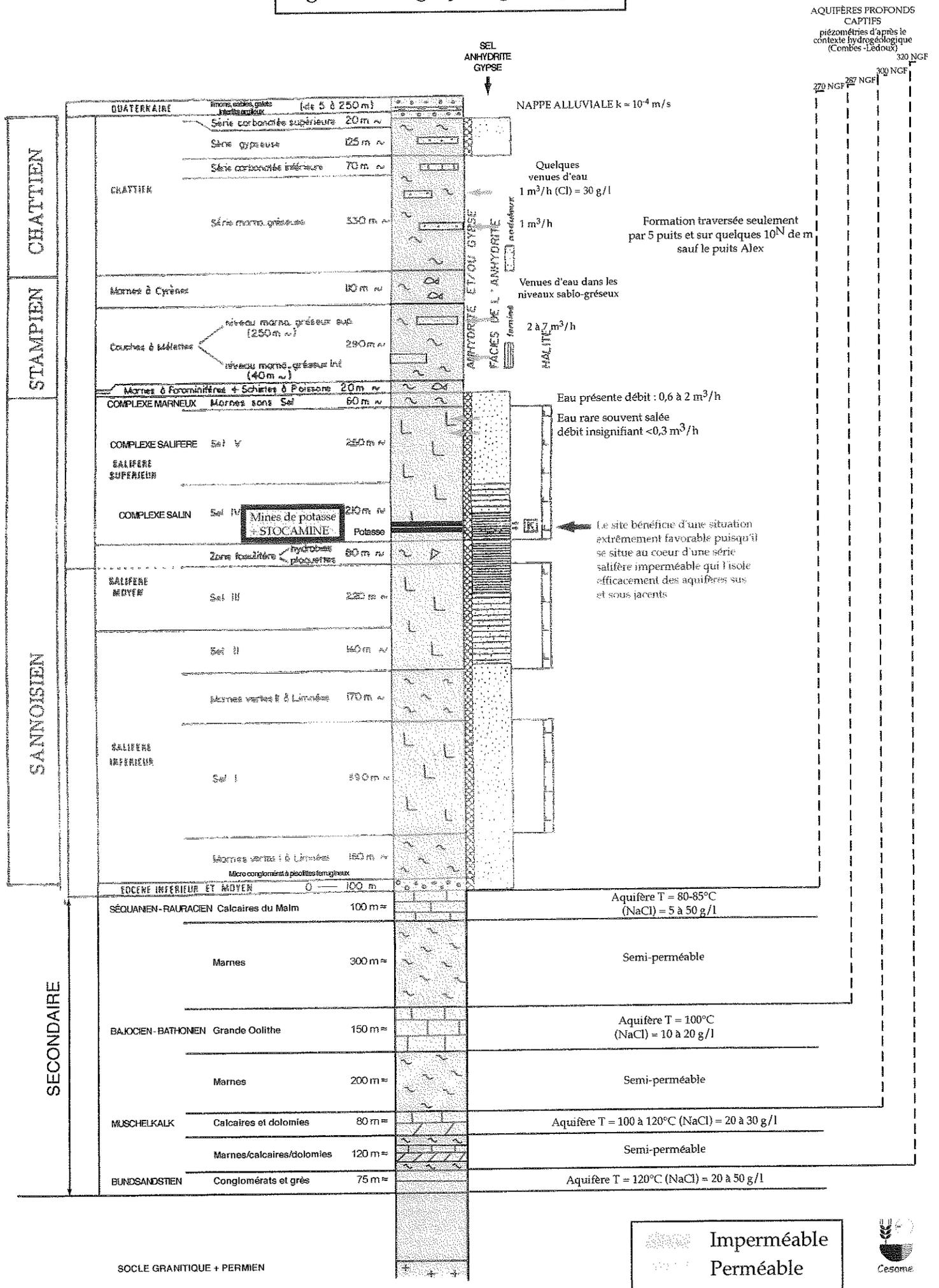
- **Zone salifère supérieure (Sannoisien supérieur)**

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.



Figure 2 : Log hydrogéologique



AQUIFÈRES PROFONDS CAPTIFS piézométries d'après le contexte hydrogéologique (Combes-Lédoux) 320 NGF



- Le complexe salifère, à bancs de sels gemme, d'une épaisseur moyenne de 300 mètres.
- Le complexe salin, d'une épaisseur moyenne de 100 mètres, **dans lequel se situe les deux couches de potasse. Les deux couches de potasse sont régulières, épaisses d'environ 2 mètres jusqu'à 6 mètres au maximum pour la couche inférieure, et sont séparées d'une vingtaine de mètres de « stérile ».**

Tous ces terrains sont exempts d'eau (sauf exceptionnellement quelques petites poches d'eaux 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. 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.

- 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 sublithologique (Séquanien et Rauracien),
 - calcaire oolithique (« grande oolithe » du Bajocien, réservoir à pétrole),
 - calcaires et dolomies (Muschelkalk),
 - grès (Bundsandtsein).

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

➔ Les couches de potasse exploitées s'inscrivent dans le tiers supérieur d'un épais complexe salifère daté du Sannoisien et formé à la faveur de l'effondrement du fossé rhénan.

L'ensemble du bassin est recouvert de formations alluviales récentes. Localement les formations salifères sont surmontées de terrains marneux. 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. La mine est également isolée des quelques aquifères profonds du Secondaire par une épaisseur de plusieurs centaines de mètres de terrains évaporitiques.



2.3 Contexte minier (figure 3)

2.3.1 Le minerai

Le minerai de potasse (sylvinite, mélange de sylvine et de halite) se trouve à la base du SALIFERE SUPERIEUR c'est-à-dire dans le tiers supérieur de l'épaisse série évaporitique. Dans le secteur qui nous intéresse, il se situe ainsi entre 450 et 1000 mètres de profondeur (cotes : -200 à -700 m NGF). Il se présente en deux couches séparées de 20 à 25 mètres :

- la couche supérieure minéralisée (Cs) est épaisse de quelques centimètres à 2 mètres,
- la couche inférieure minéralisée (Ci) est épaisse de quelques centimètres jusqu'à 4 ou 6 mètres.

Chacune des deux couches est composée de filets alternés (d'épaisseur variant du mm au cm) de KCl (sylvine), NaCl (halite = sel gemme) et marnes. L'interbanc stérile est constitué de sel gemme (NaCl), marnes et anhydrites (CaSO₄).

2.3.2 L'exploitation minière du secteur ouest

➤ Historique et méthode d'exploitation

L'exploitation de la potasse a débuté au sud, à partir des puits Amélie en 1910. **Le secteur ouest regroupe un total de 15 puits et l'activité d'extraction de la potasse s'est achevée en 2002.**

Les méthodes d'exploitation se sont succédé : exploitation partielle puis totale, avec remblayage ou foudroyage¹. **Au final 90 % du tonnage extrait a été exploité par des méthodes associées au foudroyage.**

Le foudroyage permet d'exploiter le gisement dans sa totalité. 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.

Il s'agit d'une des seules mines de potasse exploitées de cette manière dans le monde, la méthode 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).

➤ Liaisons et compartimentation

Les différents champs d'exploitation ont été reliés par des galeries ou par la fissuration du fait de la proximité des travaux (en effet l'influence de l'exploitation est nette sur une quarantaine

¹ : Autorembayage du vide minier provoqué par la chute du toit.



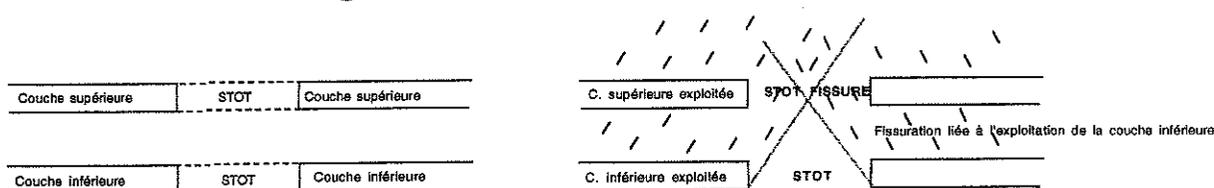
de mètres autour de la zone exploitée). Un stot est représenté sur la synthèse des travaux miniers : il s'agit d'une bande de minerai laissé volontairement en place pour assurer une séparation entre deux secteurs exploités.

Dans la suite de ce rapport, on retiendra les appellations suivantes (voir figure 3) :

- **COMPARTIMENT MARIE-LOUISE**, situé au nord du stot, il regroupe les mines **Marie-Louise, Rodolphe/Alex et Ungersheim**, l'exploitation qui lui est associée représente environ **110 millions de m³** de matériaux extraits.
- **COMPARTIMENT AMÉLIE**, situé au sud du stot, il regroupe les mines **Amélie, Max et Joseph-Else**, et représente une exploitation d'environ **90 millions de m³** de matériaux extraits. Concernant le compartiment Amélie, une petite structure se détache : celle des travaux du puits Max, à l'est. Plusieurs travers-bancs la relie cependant au reste de la mine Amélie.

Lorsque les deux compartiments du secteur ouest (Marie-Louise et Amélie) seront considérés comme un seul ensemble, on les désignera par l'appellation de **MINE de WITTELSHEIM** (ou secteur ouest).

Le stot qui isolait, à un moment donné, le nord et le sud de l'exploitation, a été probablement fissuré au moins dans la couche supérieure (comme représenté schématiquement ci-après). **L'hypothèse d'une compartimentation étanche de l'exploitation est donc peu probable même si elle reste envisageable.**



➤ Tonnage extrait

Pour l'ensemble du secteur ouest (= ensemble Wittelsheim), le tonnage extrait s'élève à 423 millions de tonnes, soit 201,4 millions de m³ (données MDPa).

Volumes liés à l'exploitation		
TOTAL (ensemble Wittelsheim)	Compartiment Marie-Louise	Compartiment Amélie
200 M. de m ³	110 M. de m ³	90 M. de m ³

➤ La mine et l'eau

Dans toute mine de sel, les venues d'eau constituent un danger permanent. En effet, au contact de l'eau le sel se dissout, agrandissant alors le chemin emprunté par l'eau. Si la venue d'eau continue à être alimentée, son débit augmente et le phénomène s'emballé, il devient

alors impossible de contrôler la venue d'eau et les phénomènes de dissolution associés. L'eau constitue donc un problème majeur pendant l'exploitation.

Dans le cas présent, malgré la méthode d'exploitation par foudroyage, la fissuration ne s'est jamais étendue au-delà d'une quarantaine de mètres autour des travaux (situés à plus de 450 mètres de profondeur). L'exploitation a entraîné une déformation souple des terrains sus-jacents (marnes et formations salifères) qui a produit des affaissements en surface sans intrusion d'eau depuis la nappe alluviale ou les niveaux plus perméables de la couverture.

Pendant l'exploitation, le principal risque d'intrusion d'eau se situait au niveau des sondages de reconnaissance et des puits de mine.

Un soin particulier a donc été apporté au rebouchage des sondages et les puits de mine ont été isolés en tête pendant leur fonçage puis équipés de pompes dans des puisards. **Ainsi, pendant l'exploitation, l'exhaure ne dépassait pas 14 m³/h (122 640 m³/an) pour l'ensemble du secteur ouest, ce qui est extrêmement faible pour une mine de cette importance (extension ≈ 600 ha).**

2.4 Stocamine (figure 4)

Le contexte géologique particulièrement favorable du bassin salifère et potassique (profond et exempt de venue d'eau) a conduit à proposer l'implantation d'un site de stockage souterrain de déchets ultimes.

Après études et accord des administrations, le site a ouvert en 1999. Des galeries de stockage ont été aménagées une vingtaine de mètres sous l'exploitation de potasse. La hauteur des galeries est comprise entre 2,8 et 3 m pour une largeur de 5,5 m, elles sont séparées par de larges piliers carrés de 20 m de côté. Un « bloc » est un ensemble de galeries de stockage. Il est prévu que l'ensemble des blocs forme un rectangle de 1000 m par 850 m (soit 0,8 km²).

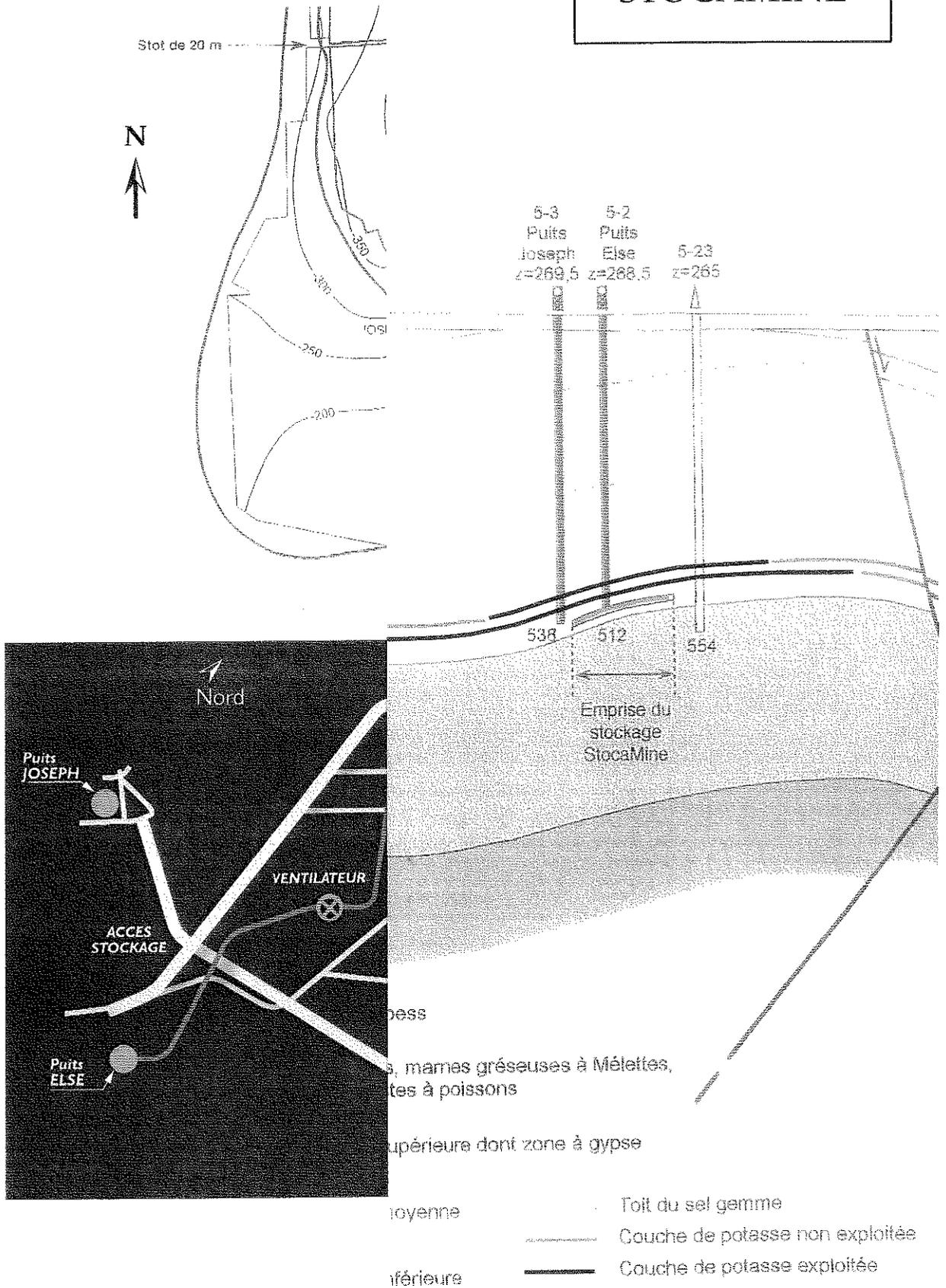
Selon leur nature, les déchets sont conditionnés en fûts métalliques, big-bag ou conteneurs et sont admis après une procédure stricte (prise d'échantillon - fiche d'identification - certificat d'acceptation).

La capacité totale de stockage, fixée par arrêté préfectoral, était de 320 000 tonnes, pour une durée d'activité de 30 ans. Les autorisations d'exploitation ont été accordées à Stocamine en stipulant que l'ensemble des dépôts devait être réversible, c'est-à-dire qu'il fallait garder la possibilité de les extraire soit en cas de danger, soit dans une hypothèse d'éventuelle revalorisation.

Le 10 Septembre 2002, soit 3 ans et demi après l'ouverture de Stocamine, un incendie s'est produit dans le bloc 15. L'intervention conjointe des pompiers et des mineurs a permis l'extinction progressive du feu en novembre 2002.

L'évaluation du taux réel de pollution engendré par le sinistre a montré que les fumées sortant du puits Else au moment de l'incendie n'ont pas créé de problème pour la santé des populations du voisinage (cf. rapport des experts nommés par la Commission Locale d'Information et de Surveillance (CLIS), [7]). L'impact sanitaire au niveau de

Figure 4 :
STOCAMINE



l'environnement a été inexistant, tant au niveau du sol que des végétaux. Aucun problème n'a été recensé à l'entrée d'air du bloc 15, mais un risque sanitaire par inhalation et contact cutané a été mis en évidence au niveau du retour d'air du bloc 15. Ce constat a entraîné l'obligation de mesures de protection individuelles dans ce bloc, limitant ainsi les interventions possibles. **Le bloc 15 a été confiné et les déchets du bloc 15 ne pourront pas être déstockés. La descente de déchets n'est plus autorisée et la société Stocamine a pris la décision d'arrêter tout nouveau stockage.**

Actuellement, le site est toujours entretenu et le listing des admissions de déchets permet de connaître les tonnages de matériaux toxiques stockés dans l'ensemble de Stocamine (cf. tableau ci-dessous extrait de l'étude BMG ENGINEERING [9]).

Catégorie	Quantité totale livrée	
	tonnage	%
A1 -Sels de trempe	2'155	5%
A2 -Sels de trempe non cyanurés	1'215	3%
B3 -Déchets arsénisés	6'969	16%
C4 -Déchets chromiques	428	1%
B5 -Déchets mercuriels	2'276	5%
B6 -Terres polluées	5'251	12%
D7 -Résidus de l'industrie	138	0%
C8 -Déchets de galvanisation	642	1%
E9 -Résidus d'incinération	20'713	47%
B10-Produits phytosanitaires	128	0%
D11-Catalyseurs usés	0	0%
D12-Déchets de laboratoire	76	0%
E13-Déchets amiantés	3'797	9%
TOTAL	43'786	100%



3. La fermeture

L'activité d'extraction de la potasse étant arrêtée et le projet Stocamine ne se poursuivant pas, il devient nécessaire d'en définir le devenir. La fermeture de la mine de potasse est déjà entamée puisqu'au fur et à mesure de l'arrêt des différents quartiers d'exploitation les puits de mine, seul lien avec la surface, ont été fermés et mis en sécurité.

La mise en sécurité des puits s'est traduite par leur remblayage complet avec mise en place d'un épais bouchon de cendre pour limiter les venues d'eau.

Bien que le débit alimentant la mine soit très faible, l'eau va tout de même progresser dans le volume résiduel des vides souterrains et à long terme, l'ensemble de l'ancienne exploitation sera noyé.

3.1 La fermeture des puits, débits d'infiltration

3.1.1 Principe de fermeture et matériaux utilisés (figure 5)

Sur les 15 puits du secteur ouest, 11 sont déjà fermés conformément au schéma de la figure 5. La totalité de la colonne de puits est remblayée avec des matériaux drainant, à la base du cuvelage c'est un bouchon de cendres volantes d'au moins 50 mètres qui limite les intrusions d'eau.

La perméabilité des cendres volantes a été approchée par mesures in situ réalisées pendant le remblayage du puits Marie : elle est au maximum de $5,8.10^{-7}$ m/s (INERIS, 2002).

→ Les venues d'eau dans la mine sont liées aux infiltrations par l'intermédiaire des puits de mine. L'épais bouchon de cendres volantes mis en place pour leur fermeture réduit le débit qui alimente les anciens travaux miniers souterrains.

3.1.2 Débits théoriques à travers les puits fermés

Le calcul du débit pouvant transiter à travers un matériau de perméabilité $5,8.10^{-7}$ m/s peut être effectué à partir de la loi de Darcy² qui s'appliquerait pour chaque puits, de la manière suivante :

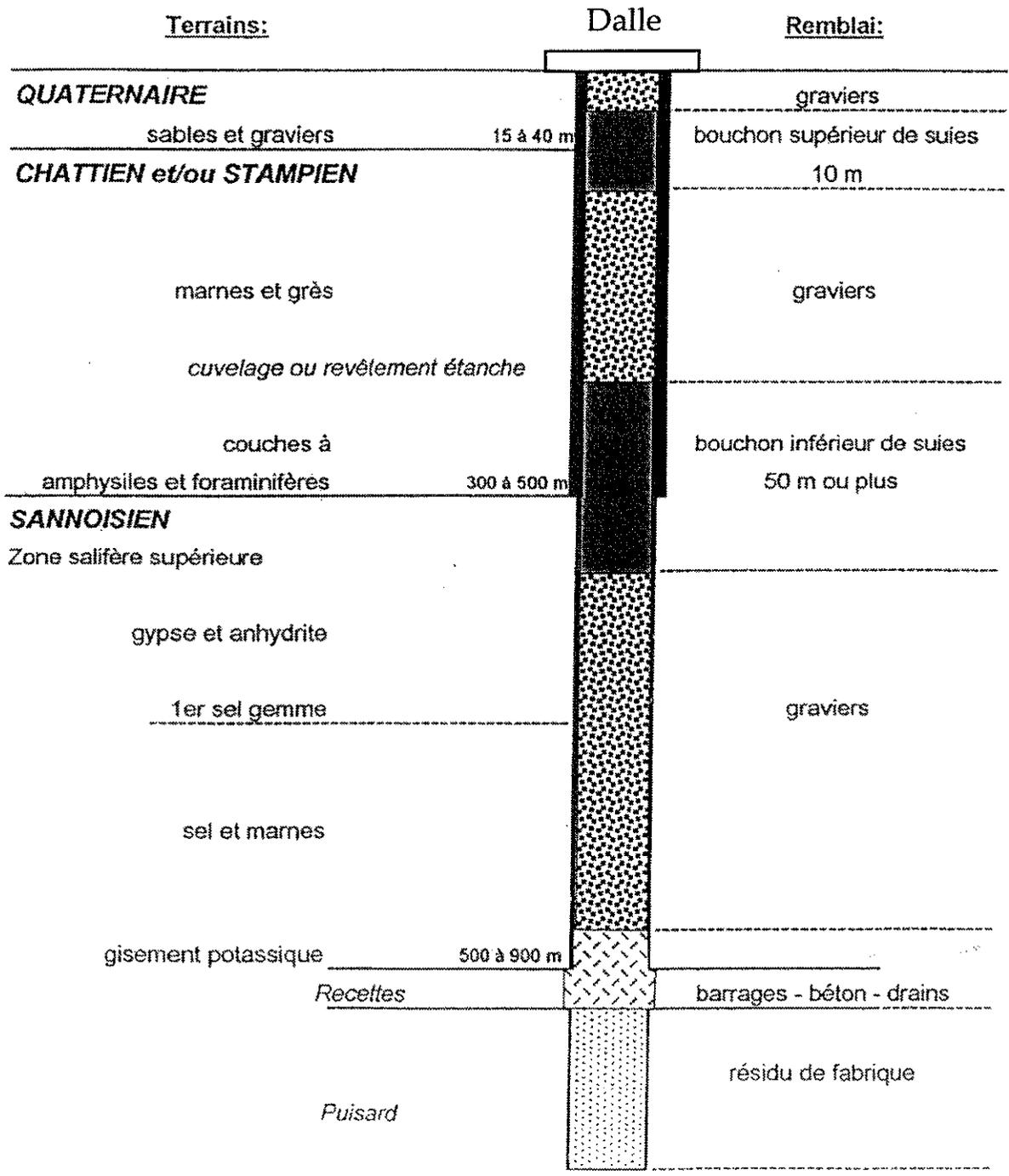
$$Q = SK (h+e)/e$$

Avec S : surface des puits
 K : perméabilité des cendres volantes
 h : hauteur d'eau au-dessus du bouchon
 e : épaisseur du bouchon

² 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 et fait intervenir en réalité des phénomènes complexes de rétention à l'interface des matériaux non saturés qui peuvent dans certaines conditions arrêter complètement l'écoulement.



Figure 5 :
Principe de fermeture des puits



Position et épaisseur des bouchons de puits interviennent dans les calculs du débit d'alimentation de la mine. Pour les quatre puits qu'il reste à fermer (Amélie 1 et 2, Joseph et Else) les hypothèses suivantes ont été retenues : bouchon de 185 mètres d'épaisseur, le sommet des cendres volantes étant à environ 70 mètres de profondeur. Les résultats sont présentés dans le tableau ci-après.

Puits	H nappe alluviale (m NGF)	Hauteur d'eau au-dessus du bouchon (m)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Débit d'alimentation	
					Q (m ³ /s)	Q (m ³ /mois)
Else	263	70	16	185	1,28E-05	33,6
Joseph	263	70	16	185	1,28E-05	33,6
Berrwiller	262	387	28,7	95	8,45E-05	221,8
Amélie 2	259	70	16	185	1,28E-05	33,6
Amélie 1	256	70	23,7	185	1,89E-05	49,8
Max	253	35	16	309	1,03E-05	27,1
Staffelfelden	250	253	31,2	176	4,41E-05	115,9
Marie	245	170	15,9	50	4,06E-05	106,6
Marie-Louise	245	185	15,9	50	4,33E-05	113,8
Schoenensteinbach	235	347	27,3	97	7,25E-05	190,4
Rodolphe 1	234	253	15,9	50	5,59E-05	146,8
Rodolphe 2	234	274	23,8	50	8,94E-05	234,9
Alex	234	110	15,9	254	1,32E-05	34,7
Ungersheim 1	223	280	23,8	64	7,42E-05	194,9
Ungersheim 2	223	275	23,8	47	9,46E-05	248,4
Somme des débits entrants (m ³ /s)					0,0007	
Somme des débits entrants (m ³ /mois)					1780	
Somme des débits entrants (m ³ /an)					21400	

 Hypothèse, les bouchons ne sont pas encore réalisés.

→ Sur la base de l'équation de Darcy, le débit susceptible de pénétrer dans la mine fermée, à travers les bouchons de cendres volantes, s'élèverait à environ ~~1780~~ ¹⁸¹⁰ m³/mois (ensemble Wittelsheim), se répartissant comme suit :

- Compartiment Amélie ≈ 170 m³/mois,
- Compartiment Marie-Louise ≈ 1610 m³/mois.

Ce débit représente environ ¹/₆ du débit d'exhaure en exploitation (le complément de débit, pendant l'exploitation, provenait essentiellement des fuites du réseau qui amenait l'eau nécessaire à l'exploitation).

3.2 L'évolution des vides miniers

Le sel a un comportement rhéologique particulier qui fait que toute cavité creusée a tendance à se refermer.

Concernant l'évolution des vides souterrains, il faut établir une distinction entre la mine de potasse et Stocamine. En effet, la mine de potasse est constituée majoritairement d'anciens travaux foudroyés (90 %), répartis entre 450 et 1000 mètres de profondeur ; la tenue des terrains devait être assurée pour la phase d'exploitation et n'avait pas d'intérêt à long terme. Au contraire, le site de Stocamine est d'extension réduite (1km x 650 m), récent (1999-2002), il est positionné entre 500 et 580 mètres de profondeur et les dimensions des galeries de stockage ont été définies pour offrir une bonne stabilité à moyen voire long terme.

Ainsi, les vides résiduels de la mine de potasse vont avoir tendance à se fermer relativement rapidement alors que les galeries de Stocamine resteront plus stables.

3.2.1 Vides résiduels de la mine de potasse et évolution (figure 6)

➤ Affaissement immédiatement après l'exploitation

L'exploitation a extrait un volume de 201,4 millions de m³. Toutefois, l'exploitation se faisant par foudroyage, les vides se sont rapidement comblés du fait de l'affaissement de l'ensemble de la colonne de terrains au-dessus de l'exploitation minière. **Dans le cas du bassin potassique alsacien, l'affaissement maximum en surface correspondait à 90 % de la hauteur de la couche exploitée. Cela signifie par exemple que pour la couche inférieure d'une puissance de 4 mètres, le vide en souterrain après affaissement ne représente que l'équivalent de 40 centimètres** (se répartissant sur une quarantaine de mètres d'épaisseur au niveau et au-dessus de la couche exploitée).

Le phénomène d'affaissement se produit très rapidement après l'exploitation et s'arrête au bout de 3 ans environ, pour le bassin alsacien. Comme tous les travaux ont plus de trois ans, le volume résiduel souterrain après affaissement serait de l'ordre de 20 M. de m³ (10 % de 200 M de m³ exploités, en négligeant le volume des galeries).

➤ Compaction au fil du temps

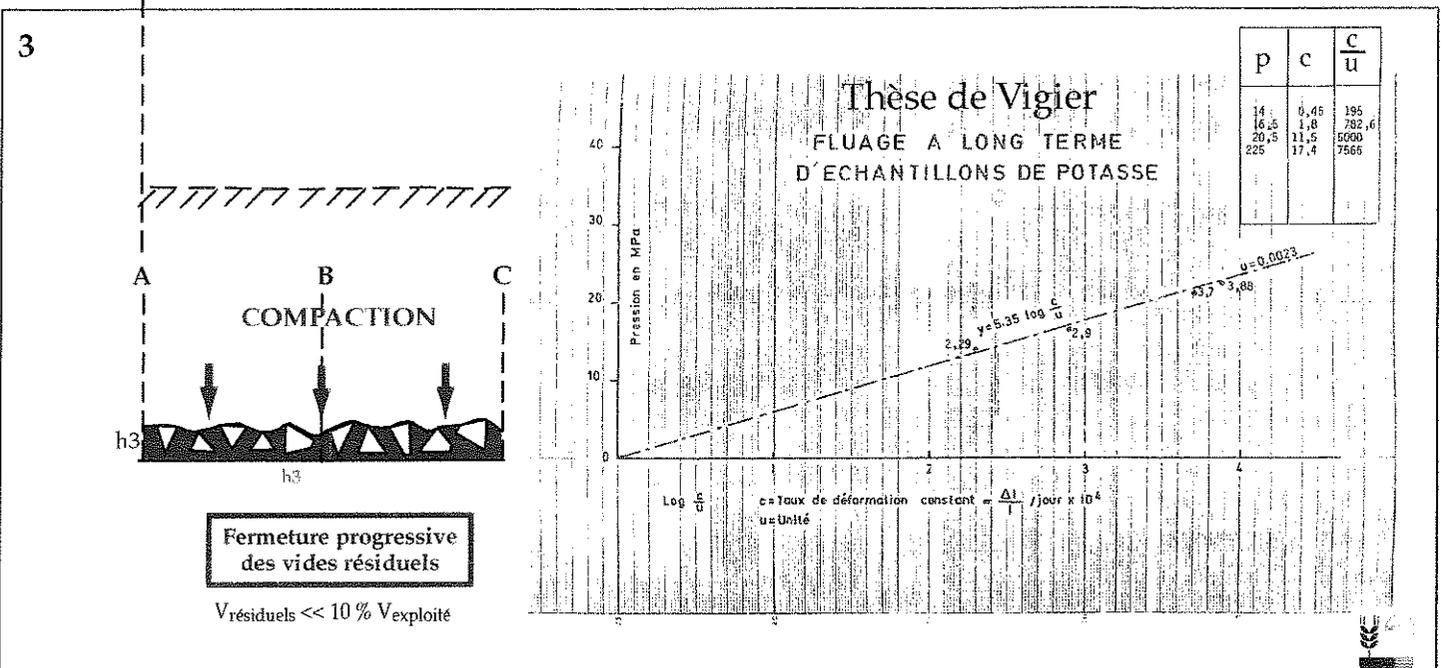
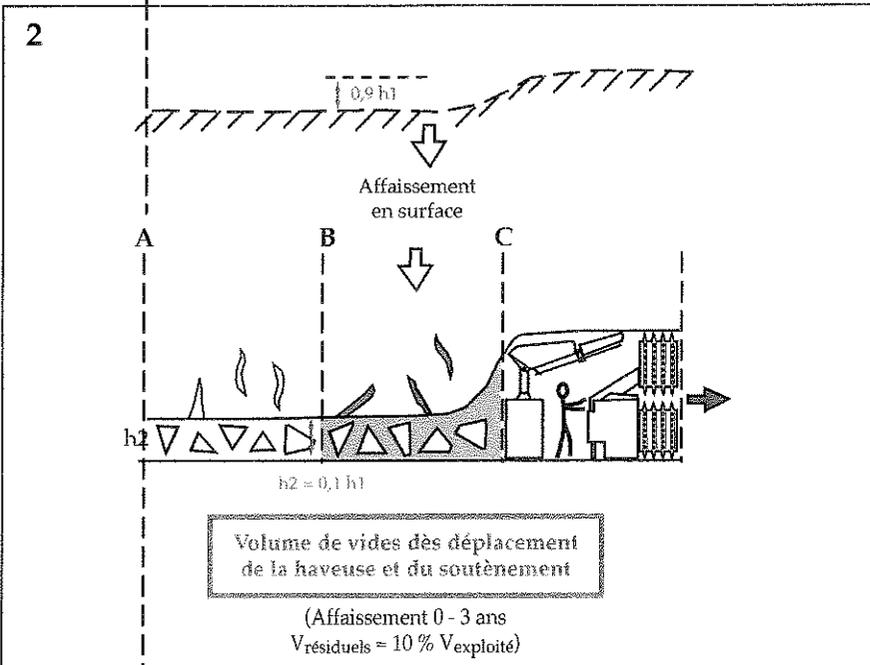
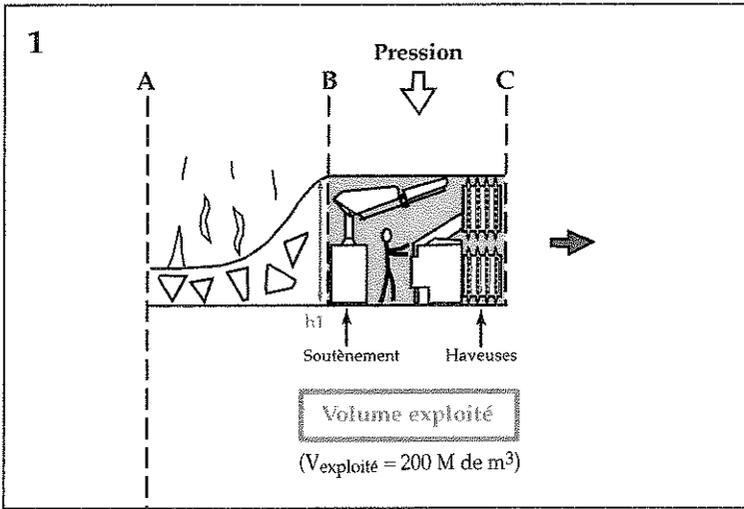
Après la phase d'affaissement, un autre phénomène intervient, diminuant les volumes de vides souterrains, nous l'appellerons ici la **compaction des vides résiduels**. Il s'agit d'une fermeture lente des vides, liée à l'évolution du massif (fluage³ du sel).

Contrairement à la phase d'affaissement, la compaction ultérieure des vides miniers, très étalée dans le temps, se traduit en surface par des mouvements difficilement mesurables car

³ : déformation continue d'un matériau dans le temps soumis à une contrainte constante et une température donnée



Figure 6 : MDPA,
évolution des vides miniers



ils sont de faible intensité et ne peuvent 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 le phénomène il faut se baser à la fois sur des essais mécaniques réalisés en laboratoire (thèse de G.Vigier [15]), et sur l'expérience de l'exploitant qui prend en compte la spécificité du massif dans sa totalité et les caractéristiques morphologiques des vides créés.

Des essais mécaniques de G.Vigier (essais de compression réalisés sur des éprouvettes de potasse du bassin alsacien) il ressort les points suivants :

- En laboratoire, le rapport de déformation verticale ($\Delta l/l$) est constant **dans le temps mais variable avec la pression (donc la profondeur)**.
- Vis-à-vis du fluage, la profondeur joue un double rôle puisqu'elle accroît simultanément la pression lithostatique et la température.
- Le taux de déformation s'établit à $0,45 \cdot 10^{-4}/j$ (1,6%/an) pour 14 MPa (ce qui est équivalent à ≈ 600 m de profondeur) et $1,8 \cdot 10^{-4}/j$ (6,6%/an) pour 16,5 MPa (≈ 750 m de profondeur) sur l'échelle de temps étudiée (150 jours).

Dans un article publié en mars 2004 [14], Ghoreychi et Daupley (INERIS) précisent qu'il existe deux lois rhéologiques pour caractériser le fluage du sel.

La première, **la loi de Norton**, prend en compte une **stabilisation de la vitesse de fluage après une phase transitoire**. Dans le cas présent, les travaux étant relativement anciens (âge moyen 37 ans), on peut effectivement penser que, s'il y a eu phase transitoire, celle-ci est terminée. Il est alors pragmatique d'appliquer un taux de déformation constant comme proposé par G.Vigier pour le gisement alsacien.

La deuxième loi, dite de Le Maître, traduit une **diminution la vitesse de fluage au cours du temps** (intégrant ainsi un facteur d'atténuation). C'est ce modèle qui a été appliqué par l'ENSMP, après expérimentation, pour le calcul de stabilité de Stocamine (cf. paragraphe 3.2.2) dans le cadre de la géométrie spécifique du stockage.

La fermeture complète des vides serait donc plus rapidement atteinte en utilisant le modèle de Norton repris dans la thèse de Vigier qu'en utilisant le modèle de Le Maître. En réalité, les deux modèles peuvent être appliqués, en fonction des caractéristiques du secteur étudié (géométrie, profondeur, sel gemme ou potasse, etc.).

Ainsi, l'exploitant confirme que certaines voies de liaison profondes ou consolidées peuvent se comporter comme les galeries de Stocamine : leur fermeture n'est perceptible qu'avec des instruments de mesure (convergence très inférieure à 1%/an). Par contre, la fermeture des vides dans l'exploitation de potasse était généralement plus proche du comportement décrit par les essais de Vigier : d'anciens champs d'exploitation d'une trentaine d'années ont été recoupés sans détecter de vide (convergence 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 100%/an). Ces exemples montrent que les taux de convergence peuvent être élevés dans des contextes particuliers, toutefois des taux de déformation de 1 à 10%/an paraissent trop élevés pour être appliqués à l'ensemble du volume de la mine, 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.**

Au vu de ces différents éléments, les données suivantes ont été retenues :

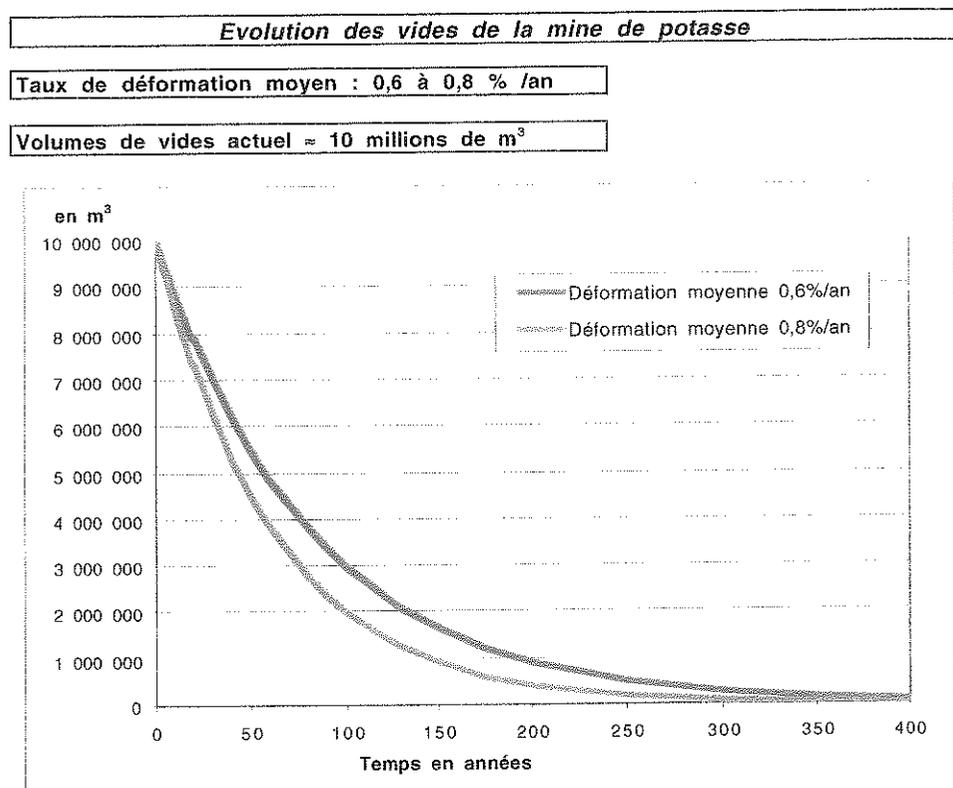
- Stocamine présente un comportement spécifique (cf. paragraphe 3.2.2.), il a été étudié par G. Vouille, le bureau Mica et récemment par M.Hadj Hassen de l'ENSMP [16]
- Concernant la mine de potasse :
 - o Les vides résiduels des secteurs profonds et anciens sont probablement presque fermés,
 - o Les galeries de liaisons sont par contre encore ouvertes,
 - o La majorité des vides (âge moyen 37 ans) se ferme lentement par fluage.

Au total, en tenant compte des affaissements, de la compaction rapide dans les secteurs profonds et de la compaction lente au niveau des galeries, les vides miniers actuels s'établissent autour de 5% du volume exploité, soit 10 millions de m³.

Ce volume est réparti sur l'emprise de l'exploitation (environ 100 km²) et se présente donc comme une augmentation localisée de la porosité (l'équivalent de 10 cm de vide sur la quarantaine de mètres fissurée au-dessus des secteurs exploités).

De plus, ce volume de vides résiduels souterrains se réduit au fil du temps par fluage du sel. Le taux de fermeture attribué à la mine de potasse dans son ensemble est d'environ 0,6 à 0,8% / an.

Cela signifie que dans 300 à 400 ans, les vides miniers seront globalement fermés (voir graphique ci-dessous).



3.2.2 Stocamine

G.Vouille [1], a établi des courbes de convergence verticale et horizontale traduisant la **fermeture progressive des parois des galeries de Stocamine au fil du temps**. La loi de comportement du sel qui a été retenue (ces galeries sont creusées dans le sel gemme) reflète une tendance à la **diminution du phénomène avec le temps**.

L'équation de la convergence retenue fait intervenir des paramètres qui sont fonction des propriétés intrinsèques du matériau considéré, mais aussi de la morphologie de la galerie concernée ce qui explique pourquoi la formule appliquée pour les galeries de Stocamine n'est pas directement transposable aux galeries de la mine de Potasse.

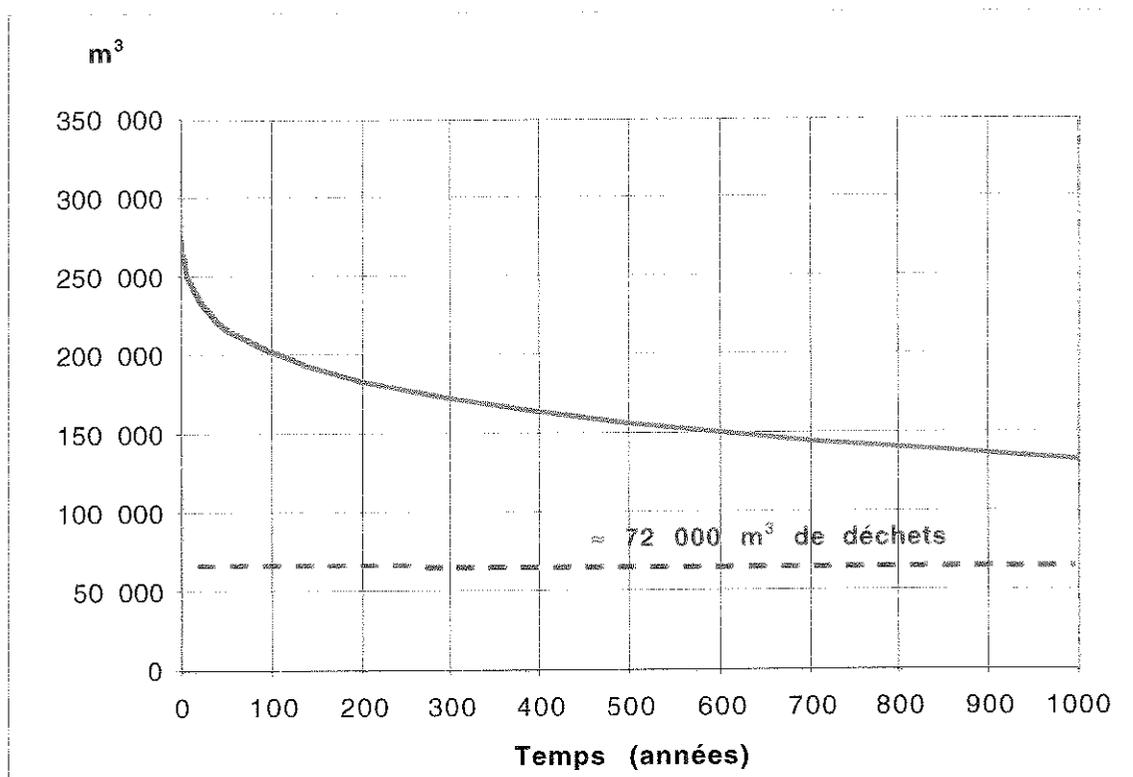
La fermeture des galeries de stockage est plus lente que celle des travaux de potasse.

Evolution des vides dans le site de Stocamine (d'après G. Vouille 1990)

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 (P20B)		
Convergence verticale	A	275,5
	α	0,2327
Convergence horizontale	A	253,4
	α	0,2285



3.3 Situation hydrogéologique actuelle et évolution

Actuellement, les vides miniers sont dans la phase de compaction résiduelle, mais les galeries sont encore ouvertes et l'ensemble forme une unité hydrogéologique d'un volume équivalent à environ 10 millions de m³, alimenté en eau par les infiltrations passant par les puits de mine fermés.

La carte des travaux miniers de la figure 3 met en évidence des points bas vers lesquels se dirigent gravitairement les eaux d'infiltration. L'exhaure ayant été arrêtée dans ces secteurs depuis plusieurs années, les points bas de la mine sont donc déjà remplis.

Pour le compartiment Marie-Louise (nord), sur la base d'un arrêt de l'exhaure dans les années 1997-1998, le débit d'alimentation ayant été estimé au maximum à 1610 m³/mois (19 320 m³/an) le volume d'eau douce introduit dans le compartiment s'élèverait en 2006 à 174 000 m³, à comparer aux 5,5 millions de m³ de vides miniers initiaux. Si l'on se réfère à la répartition des vides en fonction de la profondeur⁴ en négligeant l'augmentation des vides par dissolution⁵ (partiellement compensée par leur réduction par compaction), **le niveau piézométrique serait actuellement autour de -700 NGF dans le compartiment Marie-Louise.**

Dans le compartiment Amélie, l'exhaure se poursuit ce qui limite les arrivées d'eau dans ce compartiment. Seul le point bas de ce compartiment, entre -600 et -700 NGF serait noyé.

→ Avec l'arrêt des exhaures, l'ennoyage de la mine a déjà commencé mais à un rythme lent, seuls les points bas peuvent être considérés comme noyés.

Même si le rythme est lent, l'évolution du système conduit naturellement à la fermeture des vides résiduels en même temps que leur ennoyage.

L'hypothèse retenue dans ce document est le maintien des déchets de Stocamine en place, ils seront donc noyés à terme. Il convient par conséquent d'étudier l'évolution du système et d'en définir la situation à long terme afin de qualifier le risque d'un transfert de polluant depuis Stocamine vers le milieu naturel.

Enfin, dans certains pays, l'ennoyage de quartiers de mine est préconisé, c'est pourquoi l'hypothèse d'un ennoyage volontaire, c'est-à-dire avec injection de saumure ou éventuellement d'eau douce, a également été étudié. En opposition à l'ennoyage volontaire, l'ennoyage est dit naturel s'il se fait sans intervention particulière, une fois les puits de mine fermés.

⁴ voir étude Mica 2004.

⁵ voir chapitre spécifique sur la dissolution.

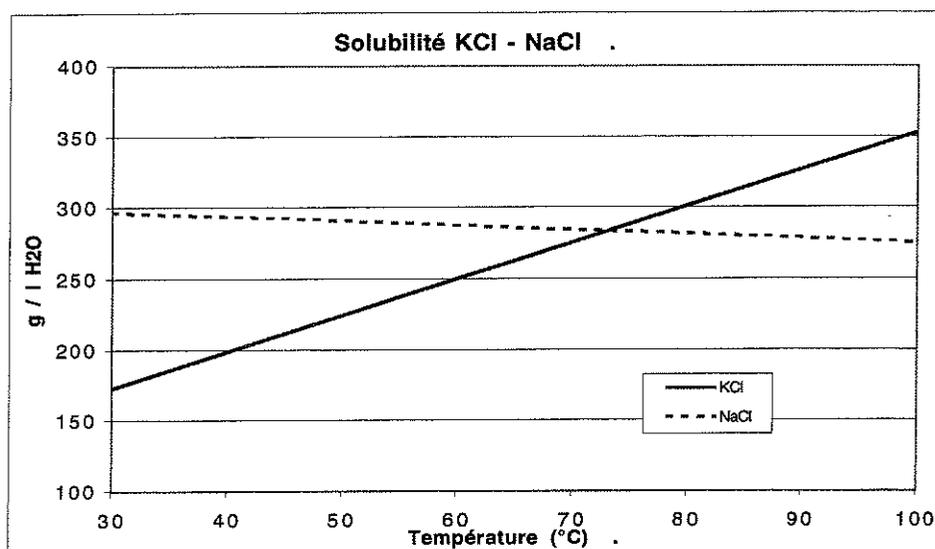


4. Phénomènes associés à l'ennoyage

4.1 Saturation et dissolution

4.1.1 Solubilités

Les solubilités des sels KCl et NaCl dépendent de la température comme on peut le visualiser sur le graphique ci-dessous. Pour le chlorure de sodium (trait pointillé), la dépendance reste peu marquée alors qu'elle est franche pour le chlorure de potassium (trait plein).



Ainsi, dans une saumure mixte, en fonction de la température (et donc de la profondeur), il y a évolution des concentrations en NaCl et KCl, c'est-à-dire variation de la concentration totale en sels mais aussi évolution de la proportion de l'un et de l'autre (cf. diagramme de solubilité du mélange de chlorure de potassium et du chlorure de sodium dissous dans de l'eau, annexe 1).

La figure 7 présente quelques schémas aidant à la compréhension des relations entre volume d'eau douce, volume de sels dissous et volumes de vides créés.

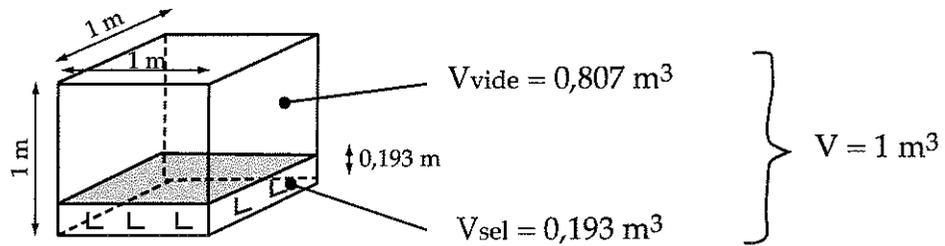
Pour un vide initial de 1 m³, 1 m³ d'eau douce pénétrant dans la mine dissoudra environ 0,239 m³ de sel⁶ pour former 1 m³ de saumure saturée, laissant ainsi 0,239 m³ de vide.

La densité de la saumure saturée varie en fonction de la teneur en sels dissous à saturation, elle est supérieure à 1,2⁷.

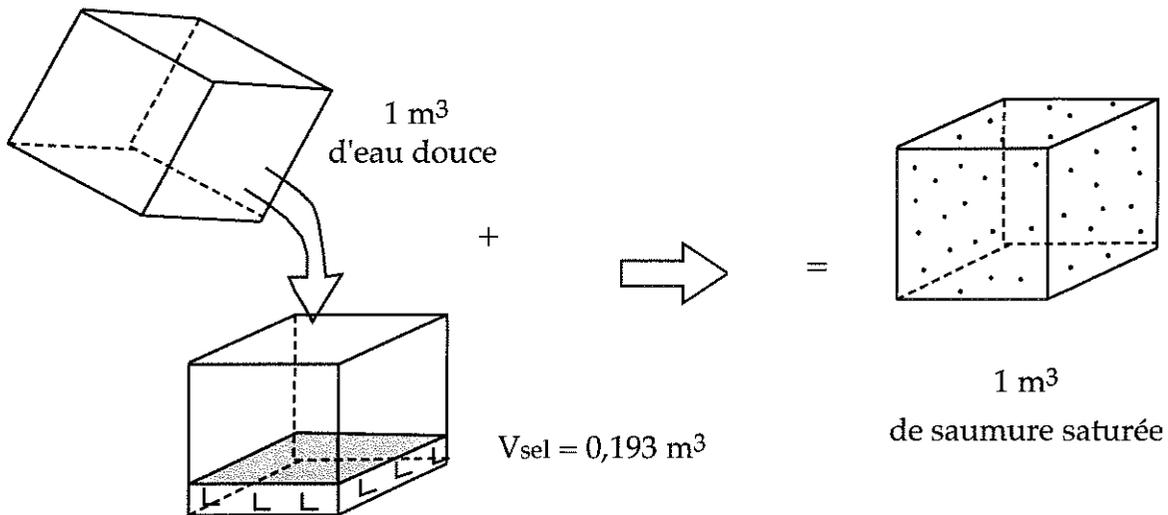
^{6 7} Il s'agit d'ordres de grandeur puisque la saturation globale d'une saumure ainsi que sa composition sont variables avec la température.

Figure 7 : Augmentation du volume des vides par dissolution

Si on considère un volume de 1 m³ dans la zone d'influence de la mine :



Le volume d'eau douce pour atteindre la saturation est de 1 m³ pour 0,193 m³ de sels



Pour remplir un volume de vide minier de 0,807 m³ on a créé un volume de saumure de 1 m³ et utilisé un volume d'eau de 1 m³.

V vide (m ³)	V sels (m ³)	V eau douce (m ³)	V saumure (m ³)
0,807	0,193	1	1
1	0,239	1,239	1,239

Remarque :
Ordre de grandeur qui varie légèrement avec la température (donc la profondeur) et le minéral.

⇨ Il faut 1,239 m³ d'eau douce/m³ de vide initial.
Le vide lié à la dissolution correspond au volume de sel dissous (0,239 m³/m³ de vide initial)

➔ **Le volume d'eau douce nécessaire à l'ennoyage des vides miniers correspond à 1,24 fois le volume de vide résiduel ou réciproquement l'ennoyage par de l'eau douce crée une augmentation des vides de l'ordre de 24%.**

La courbe de fermeture des vides peut donc être corrigée et il convient d'évoquer les conséquences éventuelles de cette augmentation des vides souterrains par dissolution.

4.1.2 Effets de la dissolution

➤ *Dissolution dans la mine*

La mine est constituée de zones de travaux foudroyés et de galeries. Leur pendage (voir morphologie du gisement, figure 3) permet un cheminement gravitaire rapide des eaux 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 progressivement sur son parcours en formant des rigoles sur la sole des galeries, mais la présence d'intercalaires marneux non solubles 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 répartira sur l'ensemble de la zone d'exploitation. Le vide souterrain supplémentaire ainsi créé ne représentera que quelques centimètres de hauteur.

Pendant l'exploitation, les vides créés en souterrain se propageaient jusqu'à la surface par des phénomènes d'affaissement mais sans rupture brutale. Le vide supplémentaire créé par la dissolution ne devrait donc pas avoir d'incidence en surface, étant donné la relative plasticité des terrains sus-jacents et leur épaisseur.

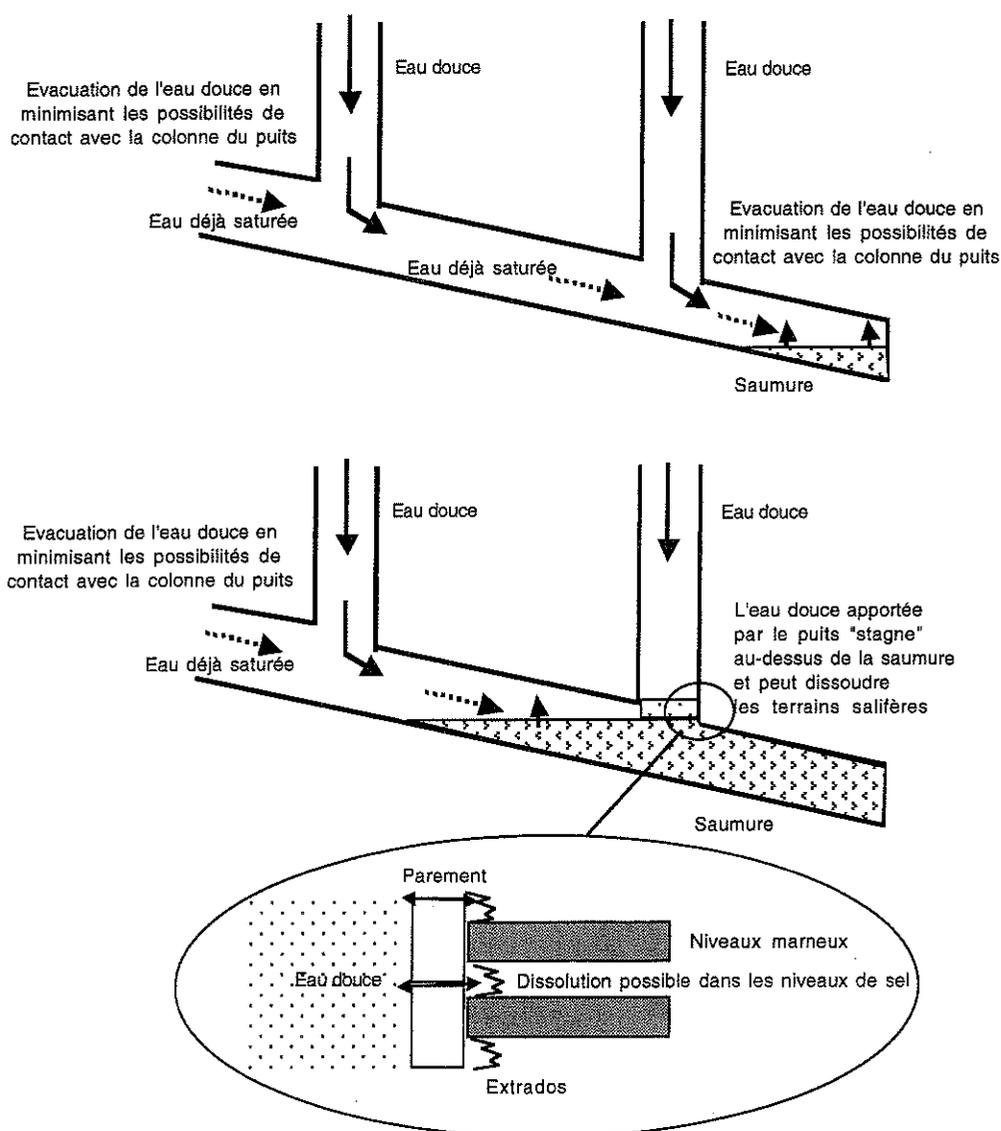
➔ **La stabilité d'ensemble de l'ancienne mine n'est pas remise en cause par les infiltrations d'eau douce au niveau des puits, mais le renouvellement continu de l'eau douce se faisant autour des puits, la dissolution se produira dans un premier temps dans ces secteurs. Une fois les intercalaires marneux atteints, la dissolution se déplacera vers l'aval grâce au pendage des couches exploitées.**

➤ *Dissolution dans les colonnes de puits et autour des puits*

L'eau douce pénètre dans la mine par l'intermédiaire des puits de mine, qui sont alimentés par les aquifères supérieurs (alluvions quaternaires essentiellement). À hauteur des terrains salifères, les puits sont remblayés par des matériaux pulvérulents très perméables (graviers) (cf. schéma de principe de la fermeture des puits) qui conduisent rapidement l'eau douce à la base des puits sans qu'il y ait imprégnation des terrains salifères (par ailleurs protégés par un parement en briques et moellons). Au pied des puits, l'eau est évacuée par des drains en dehors de leur environnement immédiat.

• 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 drainants) et il n'y a pas de risque de dissolution importante au droit des colonnes de puits.

Dans la phase finale de l'ennoyage, le niveau d'eau dans la mine atteindra progressivement la base de chaque puits et l'eau douce pénétrant dans le fût du puits finira par flotter sur la saumure qui aura envahi la mine. Toutefois, le puits continuera à participer à l'ennoyage de l'exploitation minière, et ceci jusqu'à l'ennoyage complet du système. Le coulisage continu de l'eau douce, ralenti par la saumure à la base du puits permet alors d'envisager un phénomène de dissolution localisé sur la périphérie de l'ouvrage, phénomène qui se poursuivra en se déplaçant lentement vers le haut, tant que le vide résiduel ne sera pas rempli en totalité.



En effet, si les puits de mine sont cuvelés de façon étanche au droit des terrains supérieurs potentiellement aquifères, en revanche leurs parements ne sont pas étanches dans les niveaux inférieurs qui eux sont secs en cours d'exploitation. L'élévation du niveau d'eau dans ces

parties basses des puits entraînera donc la possibilité d'une stagnation d'eau douce ou peu salée en contact avec les niveaux salifères en périphérie des puits, donc une dissolution.

Dans les faits, la saturation de la colonne d'eau ($\emptyset > 4$ m) à partir de l'extrados se fera de façon lente et probablement incomplète car le parement du puits constitue malgré tout une barrière protectrice et la saturation se fera très progressivement par et au profit de mouvements très lents.

Quoi qu'il en soit, le volume total d'eau susceptible de transiter par un puits donné pendant la fin de la phase de remplissage de la mine (après que le niveau d'eau dans la mine ait atteint la base du puits), définira le volume maximum de dissolution envisageable à l'extrados de ce puits.

Le tableau de la figure 8 montre le calcul réalisé pour l'ensemble des puits du secteur ouest et pour les hypothèses suivantes :

- Débit d'alimentation maximum calculé pour chaque puits par la loi de Darcy en fonction de la géométrie du bouchon de cendres volantes et du niveau d'eau sus-jacent (soit au total 1780 m³/mois pour l'ensemble ouest),
- Volume des vides résiduels actuels $\approx 5\%$ de V initial soit 10 M m³, et vitesse de convergence calculée par la méthode de Vigier (avec un coefficient de convergence de 0,8%/an) conduisant à une durée d'ennoyage totale de l'ordre du siècle.

Ce tableau donne un **ordre de grandeur des volumes de dissolution maximaux envisageables dans les niveaux salifères à l'extrados de chaque puits**. Ces volumes sont calculés sur la base d'une saturation complète de l'eau douce se faisant dans la seule colonne du puits, alors que celle-ci ne sera que partielle et se complètera en fait dans la mine, à la base du puits et dans son environnement immédiat.

Les volumes de vide annoncés ici se développeront uniquement dans les niveaux salifères (cf. figure 5, terrains « sel et marne » en dessous du premier sel). Ces niveaux salifères susceptibles de subir une dissolution sont à une profondeur partout supérieure à 300 m (sauf au droit du puits Amélie 2 prof 289 m, puits peu sensible car situé en partie haute de la mine). Par ailleurs, les niveaux salifères sont constitués d'alternances métriques de niveaux salins et marneux, il y aura donc probablement colmatage progressif des zones de dissolution par l'accumulation des marnes interstratifiées. Enfin, la profondeur des niveaux concernés et leur nature conduira à un fluage plus ou moins rapide de l'ensemble qui contribuera à limiter les vides au fur et à mesure par convergence de l'encaissant.

De plus, même si le parement des puits devenait instable à la base, du fait de la dissolution des niveaux salins, le phénomène sera lent, il pourra être compensé au fur et à mesure par un coulissage des remblais dans le puits (voir dernière colonne du tableau). La ruine n'atteindra alors pas la partie supérieure des ouvrages puisque celle-ci est, dans tous les cas, cuvelée avec beaucoup de soin (corset métallique avec parfois béton) pour protéger la mine des intrusions d'eau et située dans des terrains non solubles. Le phénomène devrait donc se traduire en surface par une baisse progressive du niveau des remblais dans les puits.

Globalement, on retiendra de ce calcul que **plus le puits est profond** (cf. colonnes a et b du tableau) **et plus le débit de transit d'un puits est important** (cf. colonnes c et d), **plus il sera vulnérable à ces phénomènes de dissolution**, à l'extrados, dans les niveaux salifères de sa partie basse.



Figure 8 :
Fin de l'ennoyage, dissolution au niveau des puits

Ensemble de Wittelsheim, ordres de grandeur maximaux d'une dissolution au niveau des puits

Cas choisi :

Volume de vides résiduels, au début de l'ennoyage = 10 M de m³

Volume de vides résiduels noyés à la fin de l'ennoyage = 2,5 M de m³

Au début de l'ennoyage les vides correspondent à peu près aux vides initiaux, puis les vides ont été réduits par la compaction et l'ennoyage est plus rapide.

Durée de l'ennoyage total 100 ans

	(a) Début de la possibilité de dissolution		(b) Durée de la dissolution (années)	(c) Q eau douce par puits (m ³ /an)	(d) V eau douce passant dans le puits pendant cette phase (m ³)	V de dissolution potentielle (m ³)	Profondeur à partir de laquelle la dissolution pourrait se faire		Hypothèse maximale d'une dissolution se produisant en totalité dans la formation salifère au contact de la colonne du puits		Coulissage du remblai du puits du fait d'une dissolution dans sa partie basse			
	38 ans	64 ans					Profondeur du premier sel (m)	Hauteur de terrain salifère (m)	V de dissolution par m de puits en terrain salifère (m ³)	Partie basse du puits	Rayon avec dissolution (m)	V de matériaux dans le puits (m ³)	(e) Hauteur résiduelle de remblais en fond de puits	% de puits qui reste remblayé (depuis la base)
1	Schoensteinbach	38 ans	62	2 284	141 608	26 906	525	376	71,6	2,95	5,61	24 565	248,5	27,6
2	Stattfelden	64 ans	36	1 390	50 040	9 508	487	299	31,8	3,15	4,48	24 521	389,3	49,5
3	Ungersheim 1	70 ans	30	2 339	70 170	13 332	466	258	51,7	2,75	4,90	16 938	224,4	31,5
4	Rodolphe 2	74 ans	26	2 819	73 294	13 926	405	308	45,2	2,75	4,69	16 938	245,5	34,5
5	Ungersheim 2	79 ans	21	2 981	62 601	11 894	447	178	66,8	2,75	5,37	14 868	164,1	26,3
5'	Alex	79 ans	21	416	8 736	1 660	451	179	9,3	2,25	2,83	10 008	397,4	63,2
5''	Marie	79 ans	21	1 278	26 838	5 099	356	287	17,8	2,25	3,27	10 199	302,8	47,2
5'''	Amélie 1	79 ans	21	597	12 537	2 382	327	303	7,9	2,75	3,17	14 935	473,1	75,1
6	Rodolphe 1	82 ans	18	1 761	31 698	6 023	395	217	27,8	2,25	3,73	9 721	222,6	36,4
7	Marie-Louise	85 ans	15	1 366	20 490	3 893	407	190	20,5	2,25	3,40	9 467	260,1	43,7
7'	Bernwiller	85 ans	15	2 662	39 930	7 587	420	188	40,4	3,02	4,69	17 419	252,3	41,6
8	Amélie 2	85 ans	15	403	6 045	1 149	289	260	4,4	2,26	2,55	8 736	427,9	78,4
9	Max	86 ans	14	292	4 088	777	356	159	4,9	2,42	2,72	9 389	404,3	79,0
10	Joseph	87 ans	13	403	5 239	995	313	205	4,9	2,26	2,58	8 288	397,4	76,7
11	Elise	91 ans	9	403	3 627	689	303	141	4,9	2,26	2,58	7 104	340,1	76,6

(a) Durée nécessaire pour que le niveau de remplissage de la mine atteigne la base du puits.

(b) Durée de remplissage de la mine entre le moment où l'eau atteint la base du puits et celui où l'eau a terminé de remplir la mine.

(e) Compte tenu du diamètre du puits après dissolution et du volume total de matériaux présents dans le puits

Les puits les plus sensibles au phénomène seraient en priorité les puits Schoenensteinbach, Ungersheim 1 et 2 et Rodolphe 2 pour lesquels le volume maximum de vide créé par dissolution est du même ordre de grandeur que le volume de matériaux présents dans la colonne de puits. Viennent ensuite les puits Staffelfelden Rodolphe 1 et Berwiller (dans une moindre mesure Marie et Marie-Louise), pour lesquels l'augmentation de rayon atteinte par les puits dans la zone de dissolution peut être important ($\approx +1,5$ m).

On remarque que pour les 7 ouvrages les plus sensibles, le phénomène se produirait à environ 400 m de profondeur ou plus (prof. du premier sel) ce qui en limite significativement l'incidence potentielle en surface.

Pour les autres ouvrages, le phénomène sera probablement encore plus limité.

Au niveau de chaque colonne de puits, on assiste à une « concurrence » entre la montée générale du niveau de saumure, qui met en contact une eau déjà saturée avec le parement du puits (pas de dissolution), et les apports d'eau douce par le puits lui-même qui rendent la dissolution possible. Cette remarque met en évidence **l'aspect favorable d'un ennoyage volontaire. En effet, dans le cas d'un ennoyage volontaire, on assurerait de manière artificielle une montée rapide de la saumure dans toute la mine et dans les colonnes des puits. Grâce au remplissage par de la saumure, les colonnes de puits se trouveraient alors « protégées » de la dissolution.**

• **Au moment où le niveau général de la saumure atteindra la base d'un puits, une dissolution de l'encaissant salifère autour du puits pourra se produire car le contact sera alors possible entre eau douce et terrain salifère.**

Un ennoyage provoqué en introduisant l'eau sans contact avec le fût des puits limiterait le phénomène de dissolution possible à la base du puits (l'eau atteignant la base des puits étant alors saturée).



4.2 Ennoyage des déchets de Stocamine

Dans l'hypothèse où les déchets sont laissés in situ, les polluants ne présentent un risque de contamination que s'ils peuvent migrer vers l'environnement (surface ou nappe alluviale).

4.2.1 1^{ère} phase : le niveau général de saumure est plus bas que le site du stockage

Tant que la saumure n'a pas atteint les déchets, la seule voie de transfert des polluants est un passage en phase gazeuse puis une migration vers l'extérieur de la mine par l'intermédiaire des puits.

Pendant l'ennoyage, les volumes d'eau introduits par les puits de mine devront être compensés par une perte de volume de l'air : par évacuation ou par compaction s'il y a mise en pression (cf. paragraphe 4.3.1). L'hypothèse pessimiste concernant la migration de l'air éventuellement pollué par les déchets est de considérer que les bouchons, parce qu'ils sont perméables à l'eau, sont également perméables à l'air. La perméabilité d'un matériau est en général plus élevée pour l'air que pour l'eau car la viscosité de l'air est plus faible.

L'air, poussé par la fermeture des vides et par l'introduction d'eau, va se répartir entre les points hauts de la mine et les colonnes des puits (cf. figure 9). Etant donné la grande épaisseur de terrain (sel+marnes+anhydrites) au-dessus des points hauts de la mine, on considère que le massif empêche une éventuelle migration de l'air par ce biais, les seuls points de sortie sont donc les puits. La migration de l'air se faisant vers le haut, les puits concernés par la migration de l'air issu de Stocamine, donc potentiellement pollué, sont les puits Joseph et Else.

Si l'air se fraie un chemin à travers le bouchon, originellement saturé d'eau, un dégagement d'air pourra se faire au niveau du puits, cette situation est peu probable au début de l'ennoyage, la pression dans la mine étant proche de la pression atmosphérique, elle ne devient envisageable qu'avec la mise en pression de l'air, une fois l'ennoyage déjà bien entamé.

□ Teneur en polluants de l'air issu de Stocamine

Concernant un éventuel phénomène de dégazage des déchets stockés, l'étude de risque menée par BMG Engineering [9] précise que celui-ci « *correspondra uniquement à l'établissement d'un équilibre thermodynamique entre les polluants contenus dans les déchets et l'air à l'intérieur du stockage* ». Cet équilibre se met déjà actuellement en place à l'intérieur des emballages de déchets. Les concentrations en gaz dans l'atmosphère de Stocamine (volume environ 300 000 m³) seront inférieures à celles mesurées à l'intérieur des emballages lors de l'étude de risques. Or celles-ci sont « *pour la grande majorité, inférieures à la limite de détection de l'appareil utilisé. Les concentrations maximales mesurées sont les suivantes : AsH₃ : 0,02 ppm (0,06 mg/m³), Hg⁰ : 0,005 ppm (0,04 mg/m³), HCN : 6 ppm (7 mg/m³)* ».

Figure 9 : Migration de l'air pendant l'envoyage



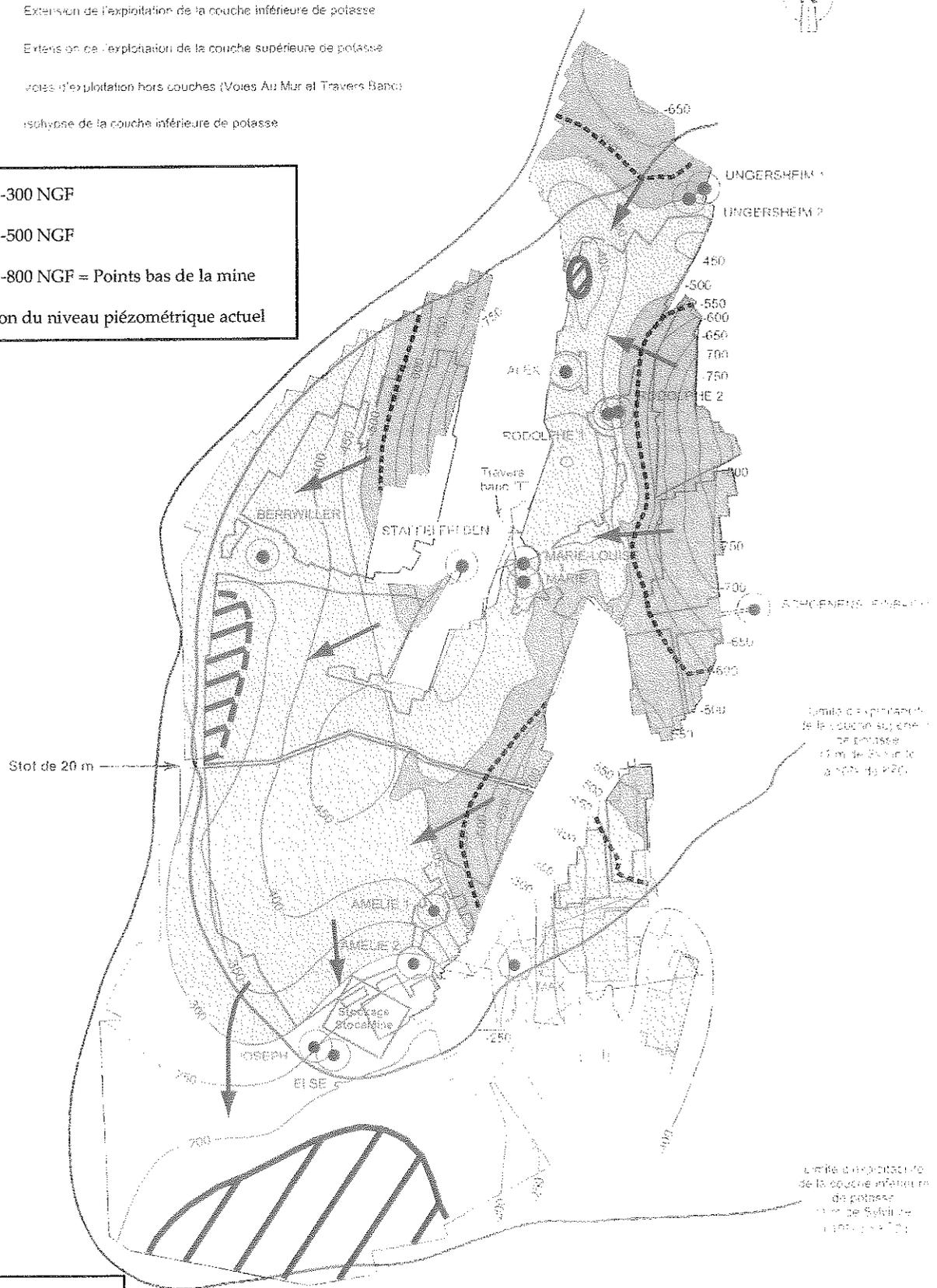
- Extension de l'exploitation de la couche inférieure de potasse
- Extension de l'exploitation de la couche supérieure de potasse
- Voies d'exploitation hors couches (Voies Au Mur et Travers Banc)
- Isohyse de la couche inférieure de potasse

Cotes -220 à -300 NGF

Cotes -300 à -500 NGF

Cotes -500 à -800 NGF = Points bas de la mine

Estimation du niveau piézométrique actuel



Secteurs concernés :

- Les colonnes des puits
- Les points hauts de la structure
- Sens de migration de l'air



Ces valeurs sont à comparer aux seuils en vigueur (dans le cadre du code du travail) :

VME (valeur moyenne d'exposition) : Concentration en dessous de laquelle des individus sains peuvent être exposés pendant 8 heures sans risque pour leur santé (42 h hebdomadaires pendant de longues périodes).

VLE (valeur limite d'exposition) : Concentration en dessous de laquelle des individus sains peuvent être exposés pendant 15 minutes sans risque pour leur santé.

Gaz dans les emballages des déchets			
	<i>Valeurs mesurées dans les emballages de déchets</i>	VLE	VME
AsH ₃	0,02 ppm	0,2 ppm	0,05 ppm
Hg ⁰	0,04 mg/m ³		0,05 mg/m ³
HCN	6 ppm	10 ppm	2 ppm

Dans le confinement des emballages, seul l'acide cyanhydrique (HCN) est susceptible d'atteindre des concentrations supérieures à la VME. Il suffit ensuite que la concentration soit divisée par 3 pour que la teneur devienne inférieure à la VME, or le volume des vides résiduels miniers hors Stocamine est plus de 10 fois supérieur au volume de Stocamine, assurant un bon facteur de dilution. Par ailleurs, la mise en place de bouchons au niveau des accès de Stocamine limitera la possibilité de migration du gaz potentiellement pollué. Ainsi la concentration de l'air sortant par les puits ne présentera pas de teneur élevée en polluant.

De plus, le débit d'air associé à chacun des puits Else et Joseph sera limité par la présence du bouchon et par le différentiel de pression entre la mine et la surface. En imaginant que tout l'air de la mine passe par l'un des deux puits, en négligeant la présence des bouchons, le débit d'air sera lié à la perte du volume de vides souterrains par compaction plus le débit d'eau d'alimentation, soit de l'ordre de 6000 m³/mois (2,3.10⁻³ m³/s). Ce débit d'air sera rapidement mélangé à l'air ambiant en surface.

Face à l'éventualité d'une sortie d'air irrégulière (liée éventuellement à la désaturation par à coups des bouchons de cendres volantes) ou d'une accumulation du gaz à l'aplomb du puits, ~~on pourra rappeler~~ les préconisations édictées par les MDPA pour les dalles de puits : permettre un accès aisé et éviter l'insertion dans une construction. On peut également envisager de coiffer les regards de visite des dalles des puits Joseph et Else d'une cheminée amovible de deux mètres de haut (évent) pour assurer la dilution des gaz dans l'atmosphère sans risque qu'il soit respiré par un être humain (HCN est plus léger que l'air).

4.2.2 2^{ème} phase : lixiviation des déchets par contact avec la saumure

À partir du moment où l'eau ou la saumure entreront en contact avec les déchets, les polluants pourront cette fois passer en solution, toutefois *cette lixiviation ne pourra avoir un impact que si elle dispose d'une voie de transfert vers l'extérieur ce qui n'est pas le cas pendant la phase d'ennoyage, les sens d'écoulement étant dirigés en direction de la mine.* Ce n'est donc qu'après l'ennoyage complet que les polluants sont susceptibles de migrer si une voie de transfert apparaît (cf. paragraphes ci-après : la fin de l'ennoyage).

4.3 La fin de l'ennoyage (notion de flux sortant du réservoir minier)

Que l'ennoyage soit naturel ou volontaire, il aboutira à deux situations voisines, même si l'intensité des phénomènes va varier comme on le détaillera dans le chapitre 5 en comparant les solutions pour l'ennoyage.

□ Aspect dissolution

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 risques de dissolution.

Des cristallisations de sel sont envisageables, car en cas de migration de la saumure vers le haut, la baisse de pression et de température tend à une précipitation du sel. Ce phénomène a été étudié par l'école de chimie de Mulhouse [3] qui conclut que la cristallisation va avoir tendance à étanchéfier l'ensemble souterrain, limitant ainsi les possibilités de migration vers la surface de la saumure ou des polluants dissous.

□ Aspect eau, pression hydrostatique

Comme rappelé précédemment, tant que la mine n'est pas pleine, il n'y a possibilité de transfert de polluants vers l'extérieur qu'en cas de migration des polluants sous forme gazeuse (les teneurs et débits associés seront alors faibles).

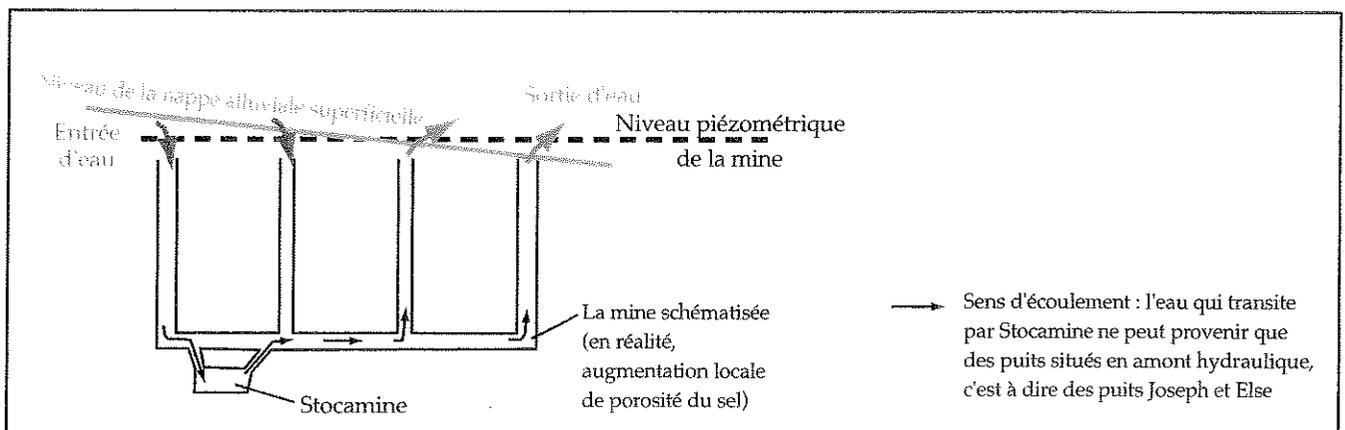
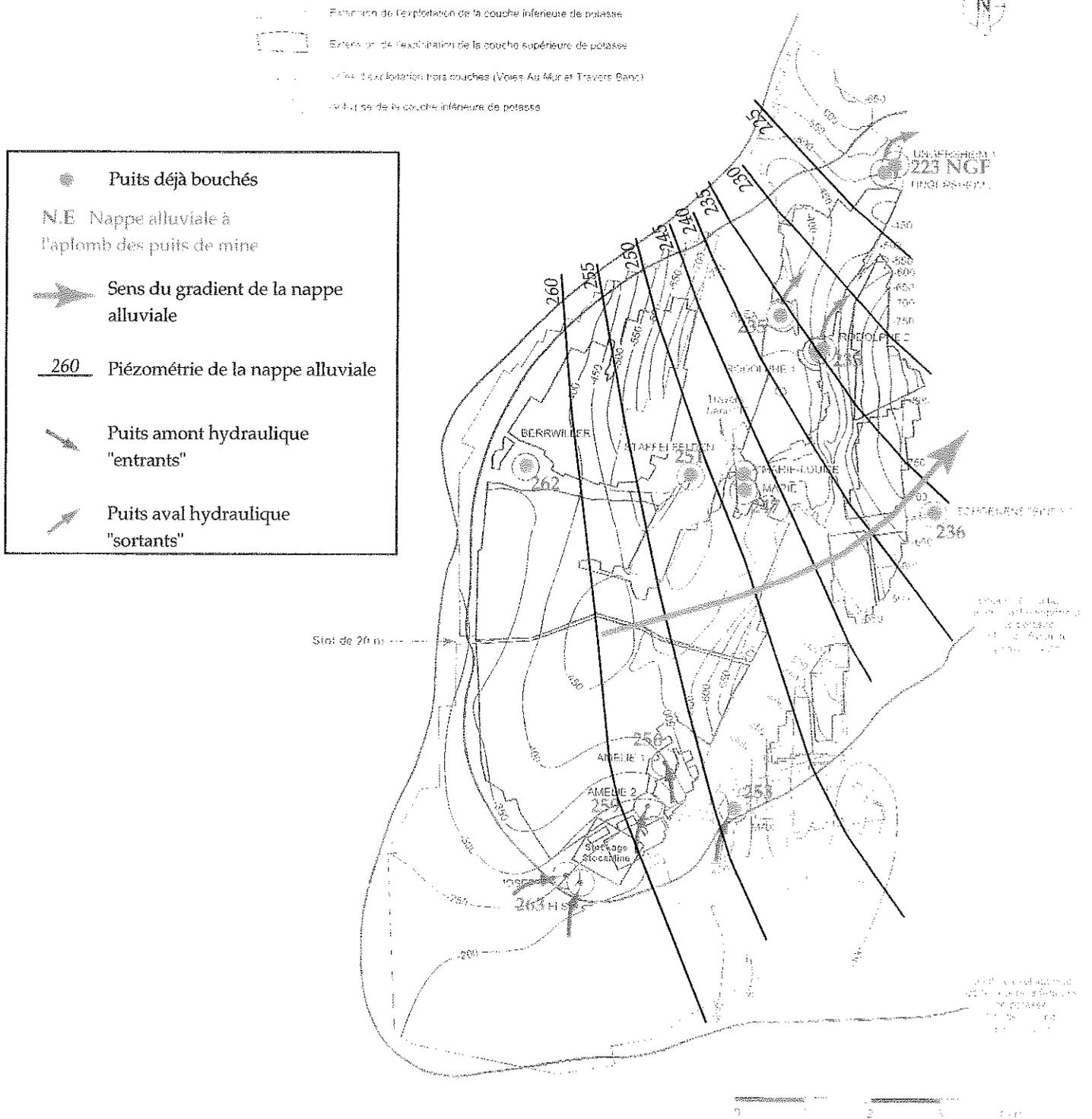
Une fois que la saumure aura atteint Stocamine, les déchets laissés en place dans le stockage seront lessivés et les polluants pourront passer en solution. La saumure « polluée » restera en place et ne pourra migrer vers la surface que si un flux s'instaure depuis la mine vers le milieu superficiel.

Un écoulement peut se mettre en place si une différence de pression hydrostatique existe. Il se fait alors du point piézométrique haut vers le point piézométrique bas. Dans le cas présent, on considère qu'à la fin de l'ennoyage de la mine le niveau piézométrique de chaque puits s'équilibrera avec celui de la nappe alluviale à son niveau (alimentation par la nappe alluviale). Se définissent alors des puits « amont » (niveaux piézométriques plus hauts que les autres), par lesquels l'eau s'introduit, et des puits « aval » (niveaux piézométriques plus bas), par lesquels l'eau pourra sortir. La somme des débits entrants et sortants s'équilibre (cf. figure 10). Le calcul de cet équilibre peut se faire sur la base de la loi de Darcy ($Q_{\text{puits}} = S_{\text{puits}} \times K_{\text{cendres}} \times ((H_{\text{nappe pour ce puits}} - H_{\text{mine}}) / \text{Epaisseur bouchon de ce puits})$). Le débit associé à chaque puits est présenté dans les tableaux en annexe 2. Pour l'ensemble de la mine de Wittelsheim, le débit d'alimentation de la passerait ainsi de 21360 m³/an (cf. page 10) pendant la phase d'ennoyage à 375 m³/an (cf. annexe 2) à la fin de l'ennoyage (une fois les colonnes des puits remplis également).

Avec ce modèle, le sens global d'écoulement en souterrain suivrait celui de la nappe alluviale sus-jacente, c'est-à-dire du sud-ouest vers le nord-est. Les puits Joseph et Else seraient donc en amont hydraulique, les puits Ungersheim en aval. Les eaux traversant Stocamine proviendraient ainsi exclusivement des puits Joseph et Else (cf. encart de la figure 10), avec un débit associé variant selon les hypothèses de compartimentation de la mine par le « stot » non exploité séparant les compartiments sud et nord. Le débit de transit (cf. annexe 2) varierait ainsi entre 13 m³/an (compartiment Amélie isolé) et 72 m³/an (une seule unité hydrogéologique). En effet si la différence de charge s'établit depuis Joseph-Else jusqu'aux



Figure 10 :
Schéma de principe du calcul du débit
d'échange maximal par la loi de Darcy



puits Ungersheim, le débit de transit sera plus élevé que si les puits aval sont Amélie 1 et 2 (cf. figure 10).

Loi de Darcy, transit mine noyée (cf. annexe 2)		
Pour Koendres = $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s et eau douce		
Ensemble Wittelsheim	Compartiment Amélie isolé	Compartiment Marie-Louise isolé
375 m ³ /an	13 m ³ /an	275 m ³ /an

Ce modèle a été utilisé par BMG ENGINEERING [9] pour définir l'impact des sorties d'eau par les puits aval, en imaginant la dissolution complète des déchets de Stocamine puis leur mise en mouvement. Avec ce modèle d'écoulement (eau douce), le volume de la mine ralentit l'arrivée des polluants aux puits aval et en permet une dilution telle que les concentrations dans les eaux de surface à l'aval immédiat des puits à potentielles sorties d'eau restent inférieures aux normes actuelles pour l'utilisation en AEP (Alimentation en Eau Potable). Sur la base d'une série d'hypothèses majorantes⁸, le calcul des flux de polluants issus de Stocamine et pouvant sortir de la mine sur le principe d'un écoulement souterrain de l'amont hydraulique vers l'aval permet de conclure à l'absence de risque environnemental et sanitaire.

Toutefois, dans le cas particulier des mines de potasse, le réservoir minier sera rempli de saumure (saturation par contact avec les terrains salifères) et non d'eau douce. Or la saumure présente une densité supérieure à celle de l'eau douce (1,2 au lieu de 1), ce qui aura pour effet de la maintenir au fond.

C'est donc plus probablement le scénario suivant qui se produira (voir figure 11) :

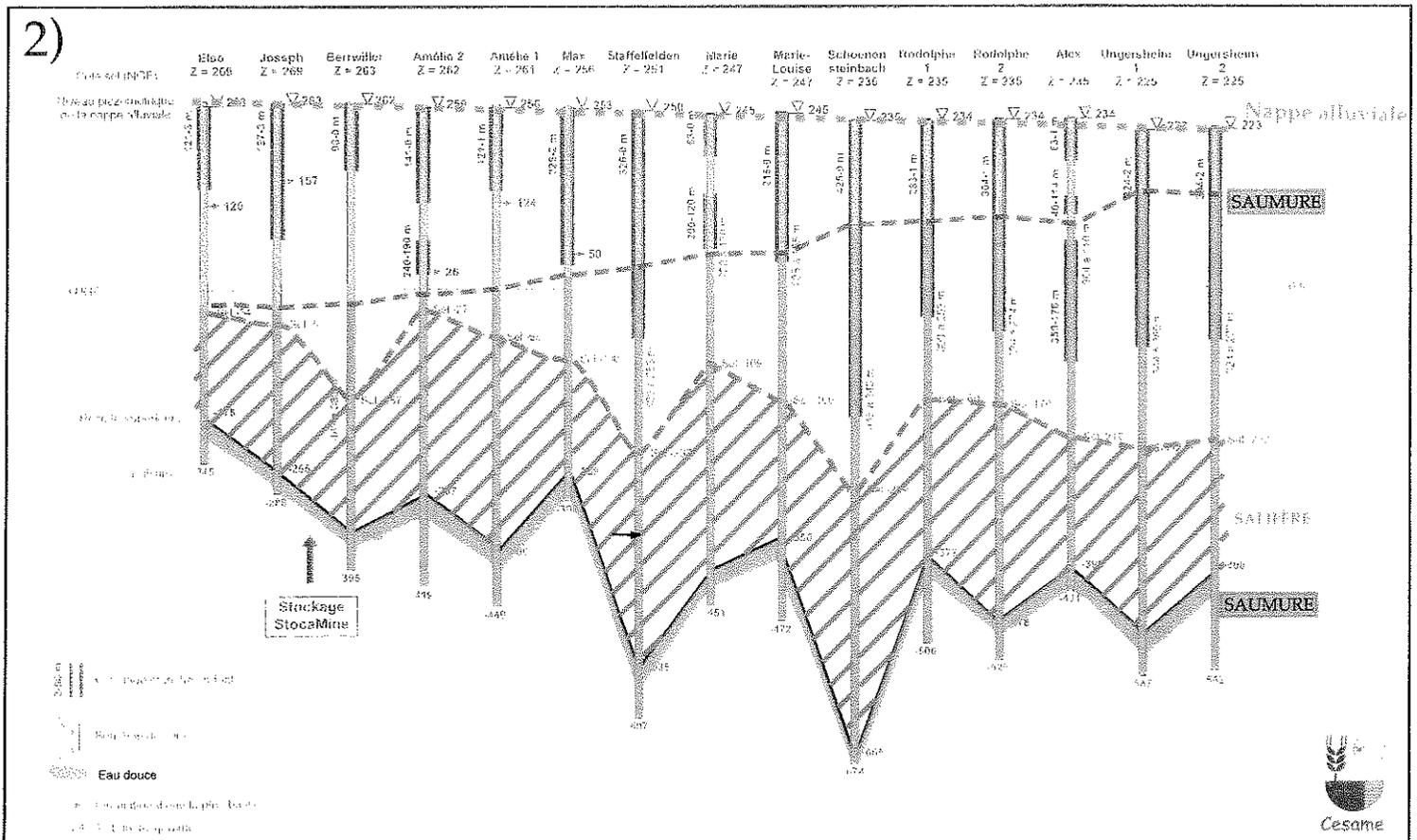
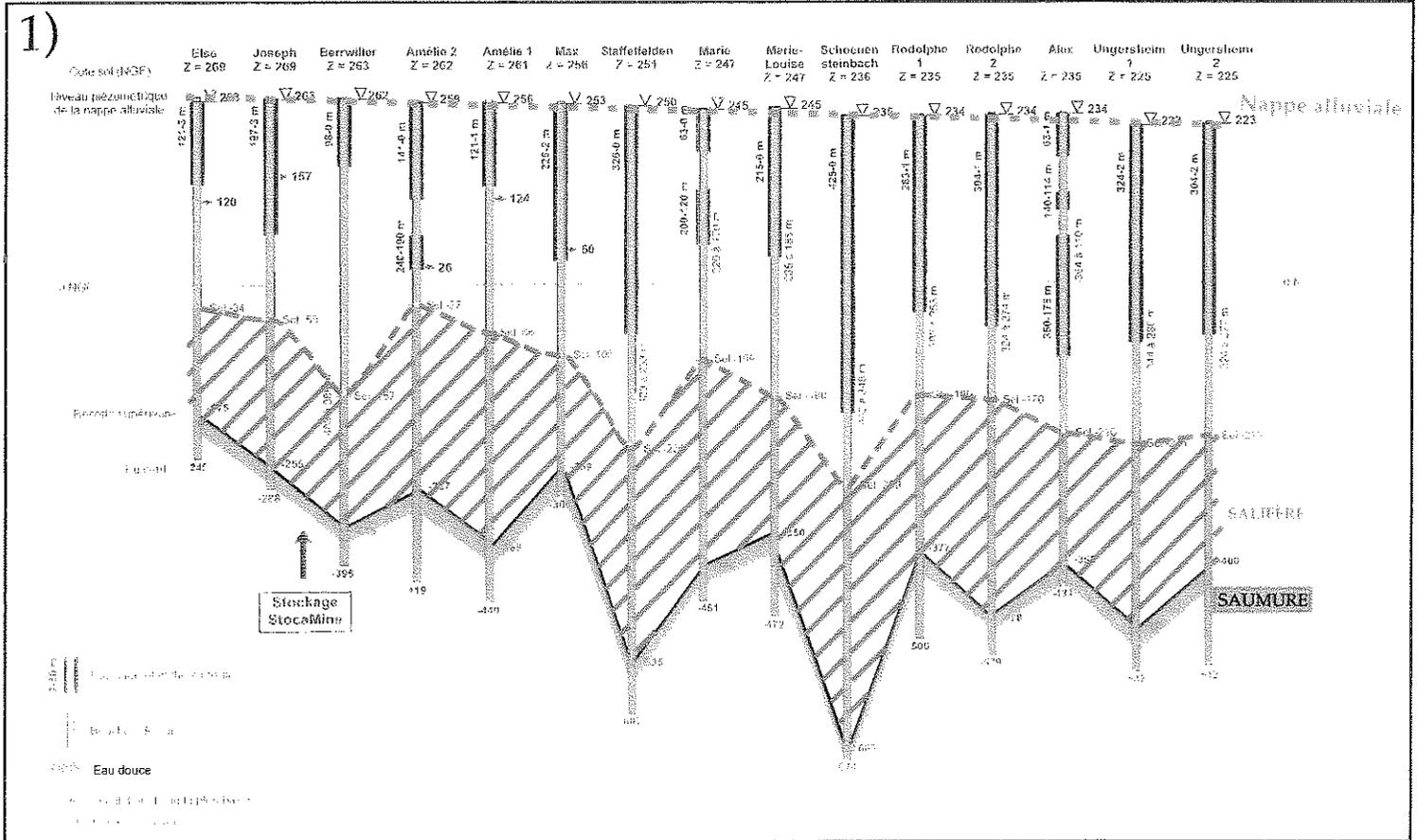
- La cote **initiale** de la saumure à la fin de l'ennoyage des travaux miniers correspondra dans chaque puits au moins à la cote des couches géologiques salifères.
- Pour que la pression exercée à une cote z soit identique en tout point de la mine, la saumure va se déplacer dans les colonnes de puits pour compenser la pression de la colonne de saumure et eau douce la plus haute, en l'occurrence celle du puits Else (le 1^{er} sel est situé dans ce puits à la cote -30 NGF). Autrement dit la saumure aura tendance à remonter dans les puits « aval ».
- Or la hauteur des colonnes des puits aval est suffisante pour permettre la mise en place d'un équilibre : la montée de la saumure dans les puits créera des pressions suffisantes pour s'équilibrer avec la pression au puits Else et le mouvement dans la mine s'arrêtera.

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.

⁸ Notamment en considérant un passage en solution immédiat de la totalité des polluants stockés.



Figure 11 : Mise en place d'un équilibre



→ Au terme du remplissage de la mine, l'hypothèse la plus réaliste est la mise en place d'un équilibre hydrostatique lié à la densité élevée de la saumure dans le réservoir minier. Dans ces conditions, aucun échange ne se produirait entre la mine et la nappe alluviale, malgré le gradient hydraulique de cette dernière.

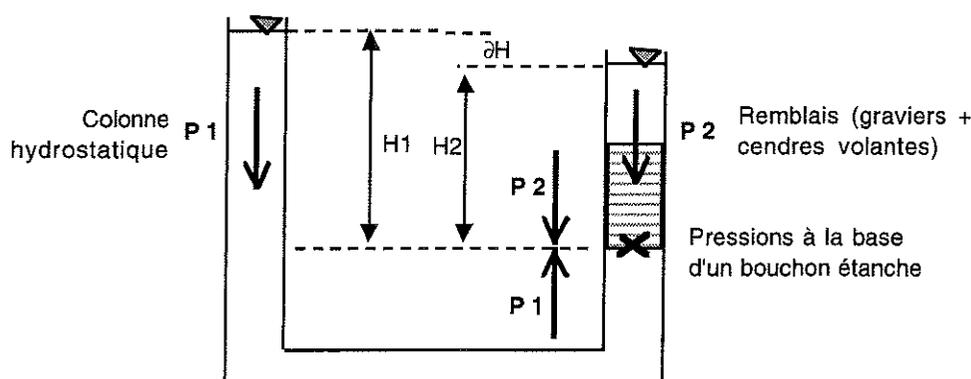
Toutefois, pour l'aspect « flux à terme », un autre facteur est à considérer dans le cas spécifique des mines de potasse : la possibilité d'une expulsion progressive de la saumure avec la poursuite de la compaction des vides miniers. Du fait de la présence en souterrain des déchets de Stocamine, d'éventuels polluants pourraient alors migrer vers les puits Jospeh et Else.

Dans ce cas, la vitesse de fermeture des vides, à l'origine de l'expulsion, définira les flux mobilisés, ce qui signifie que la durée d'ennoyage devient l'un des paramètres dominants. L'ampleur de ce phénomène est fonction de la solution d'ennoyage proposée qui est développée dans le chapitre 5.

□ Aspect gaz

Au fur et à mesure de l'ennoyage, des poches d'air se seront formées dans les points hauts de la mine. Celles-ci, bloquées par le massif qui peut être considéré comme étanche, seront comprimées lorsque le niveau général de saumure les dépassera. La principale bulle est celle située au sud de la mine Amélie (cf. figure 9), bloquée à environ -180 NGF soit ≈ 440 mètres de profondeur (cf. étude Mica). La pression hydrostatique montera, avec l'ennoyage des puits, à environ 47 bars (calcul prenant en référence la colonne hydrostatique dans les puits Else ou Amélie soit ≈ 290 m d'eau douce ($d = 1$) et ≈ 150 de saumure ($d \approx 1,2$)). **La compressibilité de l'air permet que tout l'air initialement contenu dans la mine puisse ainsi rester bloqué dans le volume de ce point haut.**

N.B : Dans les colonnes de puits, si un bouchon s'avérait étanche, du fait par exemple d'un colmatage des cendres volantes par des cristallisations de sel, ce bouchon serait soumis à une pression, transmise par la saumure et/ou le gaz piégés, liée au remplissage des colonnes des autres puits par la saumure et l'eau douce (cf. schéma ci-dessous, P1).



Pour chaque puits, la stabilité du bouchon a été vérifiée en comparant la pression hydrostatique transmise à sa base avec le poids exercé par les matériaux de remplissage (cf. tableau ci-dessous).

Densité de l'eau (+ saumure), ρ_1 , maximum : 1,2

Densité des matériaux de remblayage des puits (graviers ou cendres avec eau), ρ_2 , minimum : 2

Puits	H nappe alluviale (m NGF)	$\partial H = H_{\text{puits}} - H_{\text{max}}$	Cote de la base du bouchon (m NGF)	H1	H2*	P1 = H1 x ρ_1	P2 = H2 x ρ_2	P2 > P1 (stabilité)
Eise	263	0	14	249	249	298,8	498	oui
Joseph	263	0	14	249	249	298,8	498	oui
Berrwiller	262	1	-220	483	482	579,6	964	oui
Amélie 2	259	4	7	256	252	307,2	504	oui
Amélie 1	256	7	6	257	250	308,4	500	oui
Max	253	10	-174	437	427	524,4	854	oui
Staffelfelden	250	13	-178	441	428	529,2	856	oui
Marie	245	18	27	236	218	283,2	436	oui
Marie-Louise	245	18	12	251	233	301,2	466	oui
Schoenensteinbach	235	28	-209	472	444	566,4	888	oui
Rodolphe 1	234	29	-68	331	302	397,2	604	oui
Rodolphe 2	234	29	-89	352	323	422,4	646	oui
Alex	234	29	-129	392	363	470,4	726	oui
Ungersheim 1	223	40	-119	382	342	458,4	684	oui
Ungersheim 2	223	40	-99	362	322	434,4	644	oui

 Hypothèse, les bouchons ne sont pas encore réalisés.

* Les puits sont remblayés au moins jusqu'à hauteur de la nappe alluviale.

Les hauteurs des colonnes hydrostatiques (H1) sont voisines des hauteurs de remblais au-dessus des bouchons (H2), ce qui assure la stabilité des bouchons ($P2 > P1$).

Avec le fluage du sel, la pression dans la mine pourrait progressivement augmenter si tous les bouchons étaient totalement étanches. En réalité, si l'on admet que la mine se remplit c'est que l'on admet qu'il existe une perméabilité de certains bouchons à l'eau. Cette perméabilité permettra alors réciproquement une évacuation des saumures remobilisées par le fluage de l'encaissant. Il est donc difficile d'envisager une mise en pression importante dans la mine, donc une déstabilisation des bouchons.



5. Comparaison des solutions pour l'ennoyage

5.1 Solutions étudiées : ennoyage naturel, ennoyage volontaire avec de la saumure, ennoyage volontaire avec de l'eau douce

L'**ennoyage naturel** consisterait à boucher les galeries d'accès de Stocamine et à envisager la fermeture finale de la mine de potasse comme elle a débuté : les seuls ouvrages en liaison avec les formations superficielles et la surface sont les puits de mine, il sont mis en sécurité en conséquence et selon le procédé déjà validé par les experts et les administrations. L'ennoyage se prolongerait alors, comme il a déjà commencé avec la fermeture des autres puits.

Dans d'autres pays et notamment en Allemagne, l'abandon des mines de sel a parfois créé d'importants problèmes en surface. Les études de cas ont conduit à préconiser, dans certains contextes, d'envoyer volontairement des exploitations ou panneaux d'exploitation. Pour limiter les dissolutions, l'ennoyage se fait alors avec une saumure. Cette solution **d'ennoyage volontaire** a été examinée, elle nécessite entre autres de trouver une ressource en **saumure adaptée au volume de vides à noyer**. En l'absence d'une ressource suffisante en sel, l'ennoyage volontaire ne pourrait être réalisé qu'avec de l'**eau douce**. Dans ce dernier cas, la différence avec l'ennoyage naturel, qui se fait avec l'eau des aquifères supérieurs, donc de l'eau douce, se situe dans les débits d'alimentation donc la vitesse de remplissage.

5.2 Vitesse et durée de l'ennoyage

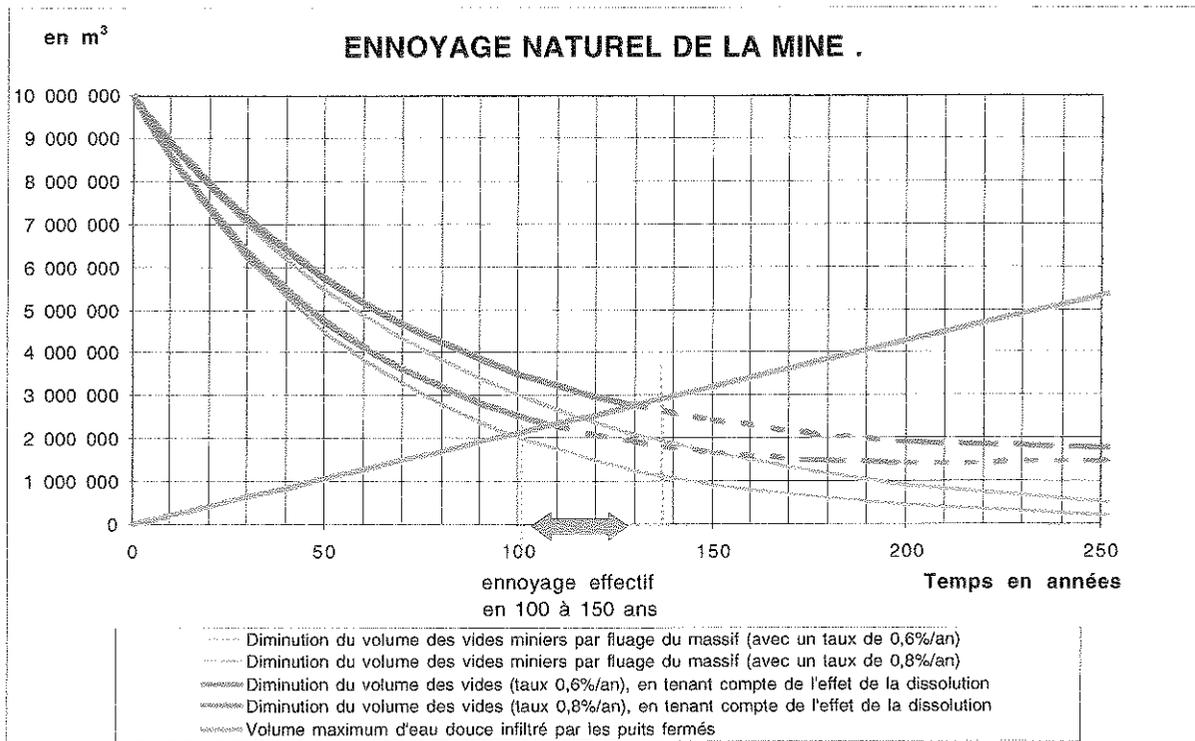
□ Ennoyage naturel

Au vu du mode de fermeture des puits, l'alimentation en eau douce de la mine fermée se fera avec un débit qui ne dépassera pas 1780 m³/mois. Parallèlement, les vides se ferment même si l'eau douce a tendance à augmenter temporairement leur volume, c'est ce qui est représenté sur le graphique suivant, avec en vert et en orange les courbes de réduction du volume des vides à remplir, corrigées en gras pour tenir compte de l'effet d'ouverture lié à la dissolution. La courbe bleue représente l'évolution du volume d'eau introduit dans la mine au travers des bouchons. Pour un débit d'eau infiltré de 1780 m³/mois, l'ennoyage est effectif en une **centaine d'années (voir graphique ci-après)**.

Plus probablement le débit d'alimentation sera plus faible, ce qui allongerait encore la durée d'ennoyage. Dans ce cas la durée de l'ennoyage sera **malgré tout limitée** par la fermeture des vides, ce qui conduit à envisager un ennoyage complet en **250 ans environ**.

Cette longue durée d'ennoyage présente avantages et inconvénients :

- les phénomènes associés à l'ennoyage (migration de l'air et dissolution) se feront à un rythme associé au faible débit d'alimentation, c'est-à-dire avec une intensité réduite mais sur une longue période,
- le suivi des 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 longue.



➔ **Durée de l'ennoyage naturel de la mine : ordre de grandeur de 100 ans à 150 ans au vu des taux de convergence moyens envisageables pour cette exploitation.**

Ennoyage volontaire

Si l'ennoyage est volontaire, le débit d'alimentation devient contrôlable.

Dans le cas d'un ennoyage avec de l'eau douce, comme la nappe alluviale peut être utilisée comme ressource (prélèvement sans influence quantitative⁹), le débit d'injection peut être défini en fonction des éventuelles contraintes techniques internes.

Dans le cas d'un ennoyage avec de la saumure, le débit devient dépendant du mode d'approvisionnement en saumure. Si la ressource est liée à la création de cavités dans le sel (voir plus loin, paragraphe ressource en sel) une durée d'ennoyage de l'ordre de 4 ans reste envisageable.

➔ **Durée de l'ennoyage volontaire de la mine :**

- avec de l'eau douce : ajustable aux contraintes techniques, ordre de grandeur a priori : 1-5 ans
- avec de la saumure : dépendante du mode d'approvisionnement en saumure, ordre de grandeur 3-4 ans.

⁹ Pour un ennoyage en 5 ans environ, le débit équivalent est de 220 à 570 m³/h, ce qui est 10 fois moins que le débit actuellement pompé par les MDPA dans le cadre de la désalinisation de la nappe alluviale (3600 m³/h).

L'ennoyage volontaire aurait pour avantage principal d'accélérer l'ennoyage de la mine, permettant :

- de réduire les possibilités de dissolution au niveau des puits,
- de permettre de suivre l'apparition d'éventuels flux gazeux ou liquides dans les puits en liaison avec la fermeture de la mine par fluage.

5.3 Faisabilité technique

L'**ennoyage naturel** se fera après fermeture des derniers puits de mine sur le même principe que celui déjà appliqué. La fermeture des puits a déjà été éprouvée si bien qu'il n'y a pas de difficulté spécifique nouvelle pour ce mode d'ennoyage.

Par contre l'**ennoyage volontaire** nécessitera, qu'il soit réalisé avec de l'eau douce ou avec de la saumure, de gros investissements techniques :

- études techniques préalables à l'implantation des points d'injection,
- travaux de réalisation des forages d'injection (2 à 5), de grande profondeur pour atteindre les anciens travaux miniers (plus de 850 mètres),
- création éventuelle de nouvelles stations de pompage pour satisfaire aux besoins de l'injection,
- réalisation de l'injection proprement dite par du personnel spécialisé avec présence en continu et surveillance pendant toute la durée du chantier soit environ 4 ans,
- mise en place d'un suivi gaz et eau (gaz pendant l'injection, eau après) avec prises d'échantillons et analyses, et suivi de stabilité en surface.

De plus, concernant l'ennoyage avec de la saumure, le premier problème reste l'approvisionnement en saumure puisque la ressource n'existe pas actuellement.

En effet, le volume de saumure nécessaire pour l'ennoyage correspond, en ordre de grandeur, au volume de vides résiduels calculé au moment de la fermeture de la mine, soit environ 10 millions de m³, ce qui est important. Sans envisager la création d'une saumure mixte (NaCl + KCl) précisément équilibrée avec l'encaissant (ce qui serait encore plus satisfaisant mais très difficile à obtenir), la production de la saumure NaCl nécessiterait autour de 3,6 millions de tonnes de NaCl solide.

Après avoir envisagé les pistes suivantes : utilisation des résidus salés stockés en surface pendant l'exploitation de la potasse et aquifères salés situés à proximité du gisement, il s'avère que ces solutions ne permettront pas de satisfaire les besoins en termes de volume et de saturation¹⁰.

La seule possibilité à ce jour est d'envisager une production de saumure de NaCl par création de cavités de stockage d'hydrocarbures dans le gisement salifère. L'encaissant salifère est un bon site hôte pour des projets de stockage dans des cavités créées par dissolution. Pour

¹⁰ L'utilisation du NaCl encore disponible sur les terrils des MDPAs impliquerait une décision d'arrêt immédiat des dissolutions de terrils. Même dans ce cas, le tonnage disponible ne permettrait qu'une saturation partielle en NaCl.

Les aquifères ou venues d'eaux salées rencontrées dans les formations sous-jacentes ou sus-jacentes à la mine sont très loin de la saturation.



satisfaire les besoins d'une injection de saumure dans la mine de potasse, il faut toutefois imaginer un projet de grande envergure (jusqu'à 8 cavités de 300 000 m³).

➔ L'ennoyage volontaire présentera de grosses difficultés techniques, une des premières, concernant l'ennoyage par de la saumure, étant de trouver la ressource en saumure adaptée. L'ennoyage naturel est le plus simple techniquement, sur ce plan il présente un net avantage.

5.4 Les dissolutions

On rappellera en préambule que la mine de potasse d'Alsace présente un contexte hydrogéologique et un mode d'exploitation très favorables pour la bonne tenue des terrains pendant la phase d'ennoyage puisque :

- le niveau exploité est surmonté d'un massif au comportement suffisamment plastique pour que, pendant l'exploitation, le foisonnement lié au foudroyage n'affecte pas plus de 40 mètres de haut malgré la répercussion en surface des vides (affaissement). Les terrains sus-jacents s'affaissent sans être affectés dans leur structure,
- l'exploitation par foudroyage a abouti à un foisonnement sur une hauteur d'environ 40 mètres au-dessus de la couche exploitée (hauteur cumulée de vides en souterrain <0,4 m). Les galeries d'infrastructure ont tendance à se fermer avec le temps,
- la formation salifère renferme de nombreux intercalaires marneux non solubles qui limiteront les volumes dissous.

□ Ennoyage naturel

Dans le cas de l'ennoyage naturel, l'alimentation en eau se fait, à travers les bouchons de cendres volantes, par l'eau douce de la nappe alluviale et des niveaux aquifères du Stampien. Puisqu'il s'agit d'eau douce (ou peu salée pour le Stampien), il y aura dissolution du sel gemme du gisement une fois la mine atteinte. La dissolution se fait donc en théorie dès le début de l'ennoyage par l'eau douce. Or certains secteurs, dont les puits sont fermés depuis une vingtaine d'années (Rodolphe, Alex, mine est pour partie etc.) sont sans doute déjà partiellement noyés et **aucun mouvement n'a jamais été constaté en surface.**

La dissolution a pour effet d'augmenter le volume de vides dans la mine, dans la limite de la saturation de l'eau par les sels soit environ 25 % du volume initial de vide. Cette dissolution correspond à une hauteur de 0,05 mm/an dans l'hypothèse où elle se fait de façon uniforme sur la totalité de l'exploitation et sera au moins partiellement compensée par la fermeture des vides par fluage

(Hypothèse de répartition sur l'emprise totale des travaux : ensemble Wittelsheim, débit d'alimentation < 21400 m³/an, volume dissous < 5300 m³/an. Comme on peut le voir sur le graphique de la page 27, l'introduction d'eau douce ne modifie que faiblement le volume des vides si on prend en compte leur fermeture simultanée par fluage.)



L'ennoyage naturel met en jeu de faibles débits d'eau douce, et donc une dissolution associée lente et de faible amplitude. Toutefois, une accumulation localisée du phénomène au fil du temps pourrait entraîner des conséquences en surface, du type reprise d'affaissement, principalement dans l'environnement des puits et plutôt à la fin de l'ennoyage.

Les risques résiduels au niveau des puits concernent une éventuelle instabilité des remblais liée à la création de vides dans la partie basse du puits. A la base des puits, les remblais sont toutefois bloqués par des barrages béton. Le risque de coulissage des remblais n'apparaît donc qu'en cas d'accumulation de facteurs défavorables : puits avec un débit d'alimentation (eau douce) élevé, ruine du parement à la base du puits, création de vides de dissolution d'un volume tel que ni la fermeture des vides par fluage, ni le foisonnement des remblais ne le comble. Les puits les plus sensibles à cet égard semblent être **Schoenensteinbach, Ungersheim 1 et 2 et Rodolphe 2** (cf. paragraphe 4.1.2).

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 du niveau des remblais comme les MDPA le font actuellement, depuis les regards de visites des dalles. Toutefois si le coulissage atteint le haut de la colonne du puits, cela signifie que le phénomène sera déjà nettement entamé. De même pour tout suivi en surface : l'absence de signal en surface ne sera pas significative d'une absence de phénomène en profondeur. **Le maintien de servitude d'accès aux dalles des puits remblayés répond à l'heure actuelle aux nécessités de contrôle, les méthodes de contrôle (géophysique, etc.) restent toutefois à étudier.**

□ Ennoyage volontaire avec de l'eau douce

L'ennoyage volontaire présente un avantage concernant la problématique des dissolutions : si la phase d'ennoyage est accélérée, la durée pendant laquelle les dissolutions sont possibles devient plus courte, la connaissance minière sera alors encore présente et la surveillance à court terme en surface est possible.

Concernant les puits, l'eau douce injectée par des forages spécifiques, ailleurs que par les colonnes des puits, aura le temps de se saturer dans la mine avant de remonter dans les colonnes de puits dans la phase finale de l'ennoyage. Le remplissage des colonnes de puits se fera alors prioritairement par le bas, par la saumure déjà saturée, et non par les venues d'eau douce à travers les bouchons de cendres volantes. **Toutefois, la dissolution est inéluctable autour des points d'injection.** En effet, les débits injectés seront élevés, et si ces débits ont du mal à s'évacuer dans la mine, des stagnations pourront se produire à la base des ouvrages, favorisant une dissolution localisée. De plus, des débits élevés peuvent provoquer des remous et aider la dissolution locale par des phénomènes mécaniques (entre autres destruction des intercalaires marneux). Par ailleurs, la fermeture des vides par fluage peut compenser une éventuelle création de vide, seulement si les vitesses des deux phénomènes sont comparables. Dans le cas d'un débit élevé, une cavité se créerait rapidement, la fermeture naturelle du vide deviendrait négligeable.

→ La dissolution associée à un ennoyage volontaire par de l'eau douce est sans commune mesure avec le phénomène de dissolution en liaison avec un ennoyage naturel. La création de cavités de dissolution à la base des ouvrages d'injection est inévitable.



□ Ennoyage volontaire avec de la saumure

Si l'ennoyage volontaire est réalisé avec une saumure saturée en NaCl, le volume supplémentaire de vides ne correspondra globalement qu'à la dissolution des autres sels (KCl, etc.), ce qui **peut engendrer la création d'un volume de vides supplémentaire de l'ordre 3 à 5 % du volume de vide initial, et reste donc limité.**

Toutefois, les températures et pressions souterraines peuvent également permettre une « sursaturation » de la saumure profonde en comparaison de la saumure injectée, qui était à une température et une pression de surface, entraînant une dissolution supplémentaire malgré la première saturation.

De plus, comme pour l'ennoyage volontaire avec de l'eau douce, l'**effet mécanique** de l'injection d'un débit élevé peut produire une érosion des terrains à la base des forages d'injection, détruisant notamment les intercalaires marneux qui permettent, dans le cas de l'ennoyage naturel, de limiter verticalement la dissolution.

Concernant les colonnes des puits, elles seront remplies par la montée générale du niveau de saumure si bien que les venues d'eau douce à travers les bouchons de cendres volantes (débits très faibles en comparaison des débits injectés) ne pourront pas engendrer de dissolution à leur base.

Concernant l'aspect dissolution, la solution de l'ennoyage volontaire avec de la saumure serait plus réaliste qu'avec de l'eau douce. Elle nécessiterait toutefois de grandes précautions pour éviter une dissolution à la base des ouvrages d'injection.



5.5 Expulsion de la saumure une fois la mine noyée

La fermeture des vides miniers a été étudiée précédemment sans prendre en compte l'effet de la présence de saumure lorsque la mine sera noyée.

Les observations, et l'interprétation mathématique de la loi de fluage, conduisent à envisager un net ralentissement de la compaction une fois l'ennoyage effectif. M. Vouille confirme l'hypothèse d'un très net ralentissement du phénomène de fermeture des vides si une pression de fluide diminue le déviateur de contraintes.

En effet, dans toutes les lois rhéologiques proposées pour le sel, la vitesse de fluage est uniquement 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 $2,2^3$ (≈ 10) à $2,2^5$ (≈ 50) : une fois la mine pleine de saumure, la vitesse de fluage ne représenterait que 2 à 10% de la vitesse initiale.

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** ».

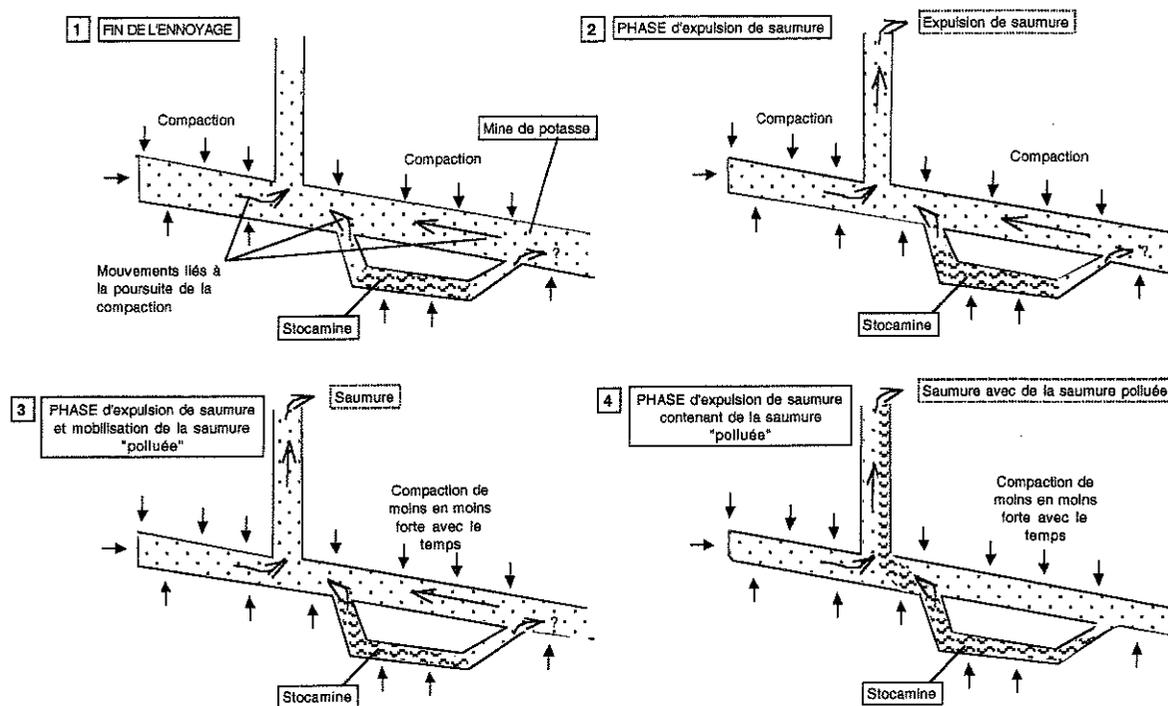
Si la compaction (plus précisément la fermeture des vides par fluage des terrains) se poursuit malgré la présence de saumure, elle va avoir tendance à comprimer la saumure remplissant les vides miniers. Il est alors possible que, une fois la mine noyée, la saumure soit mobilisée puis « expulsée » par l'intermédiaire des anciens 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.

La saumure susceptible d'être évacuée correspond en premier lieu à la saumure « propre » contenue dans la colonne des puits. Puis, petit à petit, la saumure contenue dans les vides miniers va également remonter en direction des puits (cf. schémas ci-après). Ainsi, la saumure ayant été en contact avec les polluants de Stocamine est également concernée par le



phénomène. Il faudra toutefois que la saumure « polluée » parcoure le chemin depuis Stocamine jusqu'aux têtes des puits les plus proches, sous le seul effet de la compaction résiduelle, avant de pouvoir éventuellement émerger.

Ainsi on distinguera deux phases, tout d'abord l'expulsion de saumure non polluée puis l'apparition possible de la saumure issue de Stocamine et potentiellement polluée.



□ Première phase d'expulsion de saumure

Le débit de saumure expulsé (cf. tableau page suivante) correspondra à la variation de volume de l'ensemble de la mine par unité de temps, il peut être estimé en retenant un encadrement de 2 à 10 % de la compaction initiale, encadrement proposé d'après les estimations de diminution de la vitesse de fluage du fait de la présence de saumure dans les vides (cf. page précédente).

Si l'ennoyage est naturel, la mine n'est noyée qu'au bout de 100 à 130 ans (pour un taux de compaction initial compris entre 0,6 et 0,8 %/an). Pendant ce laps de temps, le volume des vides résiduels aura déjà diminué et lorsque l'expulsion de saumure deviendra possible, le débit associé sera compris entre 600 m³/an (compaction résiduelle après ennoyage 2 % de la compaction initiale) et 3400 m³/an (compaction résiduelle après ennoyage 10 % de la compaction initiale).

Dans le cas d'un ennoyage volontaire, s'étalant sur environ 5 ans, la variation du volume des vides sera encore élevée à la fin de l'ennoyage, d'où une possibilité d'expulsion de saumure plus importante : entre 2300 m³/an (compaction résiduelle après ennoyage 2 % de la compaction initiale) et 18000 m³/an (compaction résiduelle après ennoyage 10 % de la compaction initiale).

La mine de potasse, secteur ouest

Estimation du débit de saumure pouvant être généré par compaction, mine noyée

Compaction initiale (réduction du vide minier) 0,8 %/an				Durées d'ennoyage calculées : Ennoyage naturel = 100 ans Ennoyage volontaire = 5 ans				Compaction initiale (réduction du vide minier) 0,6 %/an				Durées d'ennoyage calculées : Ennoyage naturel = 130 ans Ennoyage volontaire = 5 ans			
Débits de saumure (pour l'ensemble du secteur ouest)								Débits de saumure (pour l'ensemble du secteur ouest)							
Compaction résiduelle, une fois la mine pleine de saumure	Ennoyage NATUREL	Ennoyage VOLONTAIRE (Eau Douce)	Ennoyage VOLONTAIRE (Saumure)*	"Taux de compaction" résiduel, une fois la mine pleine	Ennoyage NATUREL	Ennoyage VOLONTAIRE (Eau Douce)	Ennoyage VOLONTAIRE (Saumure)*	2 % de la compaction initiale	Ennoyage NATUREL	Ennoyage VOLONTAIRE (Eau Douce)	Ennoyage VOLONTAIRE (Saumure)*	10 % de la compaction initiale	Ennoyage NATUREL	Ennoyage VOLONTAIRE (Eau Douce)	Ennoyage VOLONTAIRE (Saumure)*
2 % de la compaction initiale	770 m ³ /an	3 650 m ³ /an	2 940 m ³ /an	2 % de la compaction initiale	605 m ³ /an	2 795 m ³ /an	2 250 m ³ /an	2 % de la compaction initiale	605 m ³ /an	2 795 m ³ /an	2 250 m ³ /an	10 % de la compaction initiale	2660 m ³ /an	13 830 m ³ /an	11 150 m ³ /an
10 % de la compaction initiale	3380 m ³ /an	17 995 m ³ /an	14 510 m ³ /an	10 % de la compaction initiale	2660 m ³ /an	13 830 m ³ /an	11 150 m ³ /an	10 % de la compaction initiale	2660 m ³ /an	13 830 m ³ /an	11 150 m ³ /an	10 % de la compaction initiale	2660 m ³ /an	13 830 m ³ /an	11 150 m ³ /an

* Si l'ennoyage se fait avec de la saumure, le vide initial n'est que peu augmenté par la dissolution.

Remarque : Ces débits sont des moyennes sur les 10 années après la fin de l'ennoyage, ils baisseront ensuite au fil du temps.

Les ordres de grandeur de l'expulsion de saumure par poursuite de la compaction sont finalement plus élevés que l'estimation donnée par la loi de Darcy d'un transit de l'amont vers l'aval (375 m³/an, cf. page 21) du système minier et peuvent atteindre des valeurs du même ordre de grandeur que le débit maximum calculé lors du remplissage de la mine (21 360 m³/an).

□ Mobilisation des polluants issus de Stocamine, puis sortie de ces polluants par Joseph et Else

Les puits concernés par une éventuelle sortie de saumure « polluée » sont Joseph et Else, les puits Amélie 1 et 2 étant beaucoup plus éloignés de la zone de dépôt des déchets. Comme représenté schématiquement précédemment, la saumure polluée doit d'abord migrer depuis Stocamine jusqu'aux puits avant de sortir du système. Ceci prendra un certain temps, temps pendant lequel le phénomène de compaction va diminuer (volume de vides concerné de plus en plus faible).

La quantification du phénomène fait donc intervenir :

- la réduction de volume par compaction immédiatement après la fin de l'ennoyage pour estimer le temps pour que la saumure « polluée » atteigne la tête des puits,
- la réduction de volume par compaction une fois la tête des puits atteinte, pour estimer le débit résiduel de saumure « polluée » qui pourrait sortir du système.

La mobilisation de la saumure, polluée ou non, ne commencera qu'une fois la mine pleine. **Si l'ennoyage est naturel,** la phase d'ennoyage durera au moins une certaine d'année si bien que lorsque le phénomène de mobilisation de la saumure deviendra possible, Stocamine sera déjà en grande partie fermé. La compaction résiduelle de Stocamine ne serait alors que de 30 m³/an au maximum (cf. tableau page suivante, ennoyage naturel). **Si l'ennoyage est volontaire (durée ≈ 5 ans),** le débit associé à la remobilisation de la saumure issue de Stocamine à la fin de l'ennoyage sera plus important : 30 à 200 m³/an (cf. tableau page suivante, ennoyage volontaire).



Stocamine

Estimation du débit de saumure issue du secteur Stocamine pouvant être mobilisé par la compaction du secteur Stocamine juste après la fin de l'ennoyage

Formules de convergence initiale $C_v = 275,5 \cdot \{t^{0,2327} - (10/365)^{0,2327}\}$ $C_h = 253,4 \cdot \{t^{0,2285} - (10/365)^{0,2285}\}$

C_v : Convergence verticale C_h : Convergence horizontale

Estimation du débit de saumure

Mine pleine, Convergence après l'ennoyage	Débits de saumure (Q1)			
	Ennoyage NATUREL		Ennoyage VOLONTAIRE	
	100 ans	130 ans	Eau Douce	Saumure
2 % de la convergence initiale	5,8 m ³ /an	2,2 m ³ /an	39 m ³ /an	31 m ³ /an
10 % de la convergence initiale	29 m ³ /an	11 m ³ /an	194 m ³ /an	156 m ³ /an

Sur ces bases, il est possible d'estimer la durée nécessaire pour que la saumure issue de Stocamine atteigne les puits. Ce temps de parcours sera plus court dans le cas de l'ennoyage volontaire.

Les tableaux de la page 36 présentent les résultats des estimations du temps nécessaire pour que la saumure polluée puisse apparaître en tête de puits sur les bases suivantes ($T = V/Q1$) :

- V : Volume des galeries qui relient la zone des déchets de Stocamine aux puits Joseph et Else : volume initial, non remblayé, environ 18 000 m³.
- Q1 : débit lié à la compaction : ennoyage naturel 2 à 30 m³/an, ennoyage volontaire 30 à 200 m³/an.

Dans le cas de l'ennoyage naturel, le temps de parcours (T) pour que la saumure polluée atteigne la tête des puits Joseph ou Else serait de 600 ans (compaction résiduelle 10%) à 8000 ans (compaction résiduelle 2%).

Dans le cas de l'ennoyage volontaire, il serait compris entre 100 et 600 ans.

Le temps de parcours est donc long, si bien qu'à la fin de cette période, les débits associés à la compaction résiduelle de Stocamine auront nettement diminué (Q2 dans les tableaux page suivante). Par ailleurs, ces débits se répartiront entre les deux puits Joseph et Else (Q).

Etant donné les incertitudes de calcul, liées entre autres au trajet que devrait parcourir la saumure pour atteindre les têtes de puits, on ne retiendra que les remarques et **ordres de grandeur suivants** :

- **cas d'un ennoyage naturel (durée ≈ 100-130 ans) :**
 - o La saumure polluée sortirait du système longtemps après la fin de l'ennoyage (> 600 ans).
 - o Le débit associé à chacun des puits Else et Joseph serait de moins de **2 m³/an** (**2,3.10⁻⁴ m³/h**) de saumure polluée (auquel il faut ajouter un débit de saumure « saine »)
- **cas d'un ennoyage volontaire (durée ≈ 4 ans) :**
 - o La saumure polluée sortirait du système après un temps minimum de 100 ans après la fin de l'ennoyage.

- Le débit associé à chacun des puits Else et Joseph serait compris entre 1 et 17 m³/an.

De ces différentes estimations on retiendra que l'ennoyage volontaire présente l'inconvénient d'augmenter d'un facteur 10 le débit potentiel de saumure « polluée » provenant de Stocamine qui pourrait passer par les puits Joseph et Else (100 à 600 ans après la fin de l'ennoyage).

Exemple d'estimation des débits de saumure « polluée » pouvant sortir à terme de la mine, dans le cas d'un ennoyage naturel					
	(A) Hypothèse ennoyage 100 ans (taux 0,8%/an) (B) Hypothèse ennoyage 130 ans (taux 0,6%/an)	Hypothèse compaction résiduelle à 2% de l'initiale		Hypothèse compaction résiduelle à 10% de l'initiale	
		(A)	(B)	(A)	(B)
Q1 (m ³ /an)	Débit expulsé par Stocamine à la fin de l'ennoyage	2,2	5,8	11	29
T (ans)	Après la fin de l'ennoyage, temps de parcours jusqu'aux têtes de puits (estimation grossière)	> 8000	> 3000	> 1600	> 620
Q2 (m ³ /an)	Débit expulsé par Stocamine lorsque la saumure polluée arrive aux têtes de puits	< 0,1	< 0,4	< 1,7	< 3,4
Q = Q2/2 (m ³ /an)	Débit expulsé par à Stocamine en sortie de chacun des puits Joseph et Else	< 0,05	< 0,2	< 0,85	< 1,7

Exemple d'estimation des débits de saumure « polluée » pouvant sortir à terme de la mine, dans le cas d'un ennoyage volontaire					
		Hypothèse compaction résiduelle à 2% de l'initiale		Hypothèse compaction résiduelle à 10% de l'initiale	
		Saumure	Eau douce	Saumure	Eau douce
Q1 (m ³ /an)	Débit expulsé par Stocamine à la fin de l'ennoyage	31	39	156	194
T (ans)	Après la fin de l'ennoyage, temps de parcours jusqu'aux têtes de puits (estimation grossière)	580	460	115	93
Q2 (m ³ /an)	Débit expulsé par Stocamine lorsque la saumure polluée arrive aux têtes de puits	< 1,4	< 2,1	< 24	< 35
Q = Q2/2 (m ³ /an)	Débit expulsé par à Stocamine en sortie de chacun des puits Joseph et Else	< 0,7	< 1,05	< 12	< 17,5

Impact de la sortie éventuelle des polluants

A partir de la liste des déchets entreposés à Stocamine et du volume du site, des concentrations en polluants ont pu être associées à Stocamine (étude BMG) sur la base d'une dissolution complète de l'ensemble des déchets.



La nappe alluviale étant une ressource AEP, un calcul d'impact peut être avancé avec l'hypothèse de la mise en place d'une station de pompage en aval immédiat d'un puits par lequel sortirait des polluants (cas de figure déjà formulé dans l'étude BMG). Retenant cette même situation, un dépassement des normes AEP ne peut être complètement écarté s'il y a sortie de polluant par les puits Joseph et Else. En effet, le tableau ci-après reprend les concentrations en polluants associées à Stocamine et présente, pour les éléments étudiés, le débit à partir duquel un dépassement de norme serait constaté si un captage AEP de 100 m³/h était implanté en aval immédiat du puits Joseph ou Else.

Les calculs sont réalisés sur la base de teneurs « initiales » dans la nappe alluviale correspondant à la moitié des normes fixées pour l'AEP (exemple : Cd, norme AEP 5µg/l, teneur théorique dans la nappe alluviale en amont des puits 2,5 µg/l).

Élément	Norme AEP	Valeur théorique dans la nappe en amont	Débit pompé par le captage théorique	Concentration maximale du polluant dans Stocamine	Débit (par puits) susceptible d'entraîner un dépassement de norme du captage
	µg/l	µg/l	m ³ /an	g/l	m ³ /an
Cd	5	2,5	876000	0,46	4,8
Cr	50	25	876000	0,34	64,4
Hg	1	0,5	876000	0,15	2,9
Pb	10	5	876000	0,79	5,5
CN	50	25	876000	0,53	41,3
As	10	5	876000	8,5	0,5

Pour information, les valeurs actuellement mesurées dans la nappe alluviale en amont de Stocamine sont :

Cd : <0,2 µg/l, Cr : <5 µg/l, Hg : <0,5µg/l, Pb : <2,5 µg/l, CN : <100 µg/l, As : ≤ 3 µg/l.

Les valeurs théoriques retenues sont donc globalement pessimistes.

De faibles débits (0,5 m³/an dans le cas de l'arsenic) peuvent entraîner une élévation des concentrations dans le puits de captage jusqu'à des valeurs dépassant les normes AEP. Toutefois, l'ordre de grandeur de ces débits est voisin - voire supérieur - aux débits théoriques d'expulsion calculés précédemment dans le cas de l'ennoyage naturel (0,05 à 1,7 m³/an). Cela signifie que, pour l'ennoyage naturel, même si les polluants sortent effectivement du fait de la poursuite de la compaction, un impact qualitatif ne peut être envisagé que :

- si on néglige les effets de dilution par le volume minier,
- si on néglige les phénomènes de dispersion des polluants,
- si on imagine l'implantation d'un captage AEP à l'aval immédiat de l'un des puits Joseph ou Else.

Un inconvénient de l'ennoyage volontaire est par contre mis en évidence : les ordres de grandeur des débits qui pourraient sortir de la mine entraîneraient plus probablement un impact sur la nappe alluviale, en particulier pour ce qui concerne la teneur en arsenic mais très probablement également pour plomb, mercure, cadmium.

Par rapport à ce problème d'expulsion potentielle de saumure, l'avantage va donc à la solution de l'ennoyage naturel, même s'il faut rappeler que l'expulsion de saumure polluée concerne, si elle se produit, seulement les puits en liaison directe avec Stocamine et les plus proches, c'est-à-dire Joseph et Else.

Le fait que le secteur d'expulsion soit bien localisé permettrait d'envisager la mise en place d'un périmètre de restriction d'usage, la nappe alluviale présentant par ailleurs une capacité



de dilution suffisante pour assurer rapidement des taux conformes aux normes et une extension suffisante pour localiser un captage dans un autre secteur.

On rappellera par ailleurs qu'une analyse préalable et ensuite permanente de l'eau est toujours réalisée lors de l'implantation d'un captage AEP, et que les teneurs en polluants ne pourraient que croître graduellement et lentement. Les mesures correctives peuvent donc être prises avant qu'un problème ne se pose.



5.6 Synthèse et suivi ou préconisations

L'ennoyage volontaire avec de la saumure présenterait deux avantages majeurs qui concernent la dissolution dans les anciens travaux miniers et la dissolution autour des puits. Toutefois cette solution est difficilement envisageable dans notre cas car il n'existe pas de ressource en saumure suffisante pour assurer l'ennoyage de l'ensemble du volume de la mine. Par ailleurs, si cette ressource était trouvée, dans le cas de projets de création de cavités de stockage dans le sel par exemple, les travaux de réalisation de l'injection seront complexes. De plus, comparativement à l'ennoyage naturel, les débits de sortie de saumure, puis d'éventuels polluants issus de Stocamine une fois l'ennoyage effectif, seraient plus élevés.

L'ennoyage volontaire avec de l'eau douce supprimerait le problème de la recherche d'une ressource en saumure, mais la difficulté technique reste importante, nécessitant là encore des travaux complexes et onéreux. Seule la réduction de la durée d'ennoyage est favorable pour la problématique de dissolution autour des puits, par contre la dissolution autour des points d'injection serait plus importante et constitue un inconvénient majeur qui pousse à écarter cette solution. Les débits expulsés, une fois l'ennoyage effectif, seraient proches de ceux générés après un ennoyage volontaire avec de la saumure et donc plus importants que si l'ennoyage est naturel.

L'avantage majeur de l'ennoyage naturel est la faisabilité technique, beaucoup plus simple que dans le cas de l'ennoyage volontaire. De plus, concernant la possibilité de fuite de saumure par compaction résiduelle, le débit associé dans ce cas est faible et conduirait à des teneurs en polluants limitées dans la nappe alluviale (même dans le cas de l'implantation théorique d'un pompage en aval immédiat des puits Joseph et Else).

Le mode de fermeture des puits appliqué par MDPA vise, entre autres, à minimiser les débits d'eau douce pouvant passer par les puits. L'équipement d'un puits de mine dans le but de suivre directement la montée du niveau d'eau est donc exclue (par exemple risque de percolations si on met en place un tube piézométrique au travers du bouchon). Par ailleurs, la durée d'ennoyage étant estimée à un siècle au minimum, il faudra tenir compte de ce paramètre pour la définition d'un suivi de surface, permettant de contrôler les éventuels effets induits par l'ennoyage.

Les propositions suivantes ont été établies :

- Mise en place d'évents sur les dalles des puits Joseph et Else. Ces événements ont pour but d'assurer l'évacuation des éventuels gaz, au-dessus de la hauteur d'un homme debout. Ils permettront également de réaliser des mesures pour un suivi éventuel de qualité et de quantité de gaz.
- Maintien des piézomètres existants sur le site de Stocamine ou mise en place de nouveaux piézomètres en aval immédiat des puits Joseph et Else. Ces ouvrages permettront de réaliser, en cas de nécessité, des prélèvements pour le suivi de la nappe alluviale.
- **Maintien de servitudes d'accès aux puits remblayés, dans le but de permettre un suivi de la stabilité des colonnes de puits** (par des moyens restant à définir, géophysique ou mesure directe du niveau des remblais). **On rappelle que la présence de ces puits est mentionnée au livre foncier.**



- au terme de l'ennoyage, possibilité d'échange avec la nappe alluviale (éventuel transfert de polluants issus des déchets de Stocamine).

L'intensité de l'un ou l'autre des phénomènes peut varier selon le mode d'ennoyage, naturel ou volontaire, avec de l'eau douce ou de la saumure. Il ressort principalement que :

- L'ennoyage volontaire avec de l'eau douce présente un inconvénient majeur et rédhibitoire concernant la faisabilité technique, en liaison à un risque élevé de dissolution au niveau des points d'injection.
- L'ennoyage volontaire ne pourrait être envisagé qu'avec injection de saumure mais il n'existe pas de ressource locale suffisante pour assurer la saturation d'un volume d'eau comparable au volume résiduel souterrain de la mine.
- La comparaison des autres avantages et inconvénients des 3 solutions d'ennoyage tend à confirmer que la solution de l'ennoyage naturel reste la plus favorable :
 - *Aspect dissolution* : Le mode de fermeture des puits et la faiblesse des débits infiltrés pendant l'ennoyage naturel permettront une évacuation rapide de l'eau dans la mine. Le pendage des couches exploitées assurera alors une répartition de la dissolution. Le désavantage principal de l'ennoyage naturel en comparaison d'un ennoyage volontaire concerne la problématique de la dissolution au niveau des puits de mine. En effet, des dissolutions dans la partie basse des puits seront possibles lorsque le niveau général de saumure atteindra leur base. Toutefois les conséquences de ces dissolutions seront limitées par : la grande profondeur à laquelle elles pourront avoir lieu, la faible vitesse du phénomène qui permettra une fermeture partielle par compaction du vide éventuellement créé, la composition des terrains (la présence d'intercalaires marneux empêchent la progression verticale du vide), et enfin les caractéristiques techniques du puits (bouchon béton à sa base, parement puis cuvelage très solide dans les 50 mètres en tête, remblayage total de la colonne, bouchon de cendres volantes dans les terrains non salifères).
 - *Aspect évacuation des gaz* : L'ennoyage volontaire aurait permis de garder des ouvrages ouverts pour évacuer une partie de l'air de la mine, toutefois c'est dans le sud de la mine Amélie que l'air sera principalement bloqué (pas de lien avec la surface, du fait de l'épaisseur du massif). En ce qui concerne l'évacuation des gaz par les puits, les situations sont identiques quel que soit le mode d'ennoyage étudié. Elle se fera si les bouchons sont perméables à l'air, dans le cas contraire les poches d'air se comprimeront à leur base avec une pression en équilibre avec la pression hydrostatique finale.
 - *Possibilité d'échange avec la nappe alluviale* : Une fois la mine noyée, la solution de l'ennoyage naturel présente un avantage en comparaison de l'ennoyage volontaire. En effet, si la fermeture des vides se poursuit malgré la présence de saumure, la saumure pourrait être progressivement expulsée, or la saumure ayant été en contact avec les déchets sera potentiellement polluée. Si l'ennoyage est naturel, les débits concernés par ce phénomène sont moindres, d'où un impact peu sensible sur la nappe alluviale et des mesures de protection simples à mettre en œuvre.



Au vu de ces éléments, l'envoyage naturel de la mine peut être envisagé. Le suivi direct de la montée du niveau piézométrique dans la mine ne sera toutefois guère envisageable, à cause de la lenteur du phénomène (au minimum un siècle) et parce que les puits seront fermés de façon à en limiter la perméabilité (la pose d'un tube piézométrique risquerait de favoriser les écoulements d'eau). C'est donc en surface que pourront être mis en place des ouvrages de contrôle, pour assurer une surveillance des phénomènes induit par la montée du niveau d'eau (moyens de contrôle : événements sur les dalles de puits, servitudes d'accès autour des puits, contrôle des remblais, piézomètres dans la nappe alluviale en aval immédiat).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - G. VOUILLE – 1990 :
Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie –
Aspect mécanique du problème.
- [2] Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris - MM . Ledoux et Combes -
1990 :
Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie –
Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie.
- [3] Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Mulhouse - MM . Muller et Kille -
Novembre 1990 :
Etude de sécurité chimique puis : Etude de sécurité chimique – Comportement à long
terme puis Etude de sécurité chimique – Procédure d'acceptation et de suivi des
déchets.
- [4] PecSie – Mars 1991 : Etude des dangers.
- [5] INERIS – Octobre 1996 : Avis d'expert relatif à la demande de création de
stockage souterrain de déchets industriels ultimes (Contre-expertise de l'étude des
dangers PecSie).
- [6] INERIS – Décembre 2001 - Octobre 2002 : Etude de comportement
hydrogéologique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes
(bibliographie puis synthèse).
- [7] EXPERTS MANDATÉS PAR LA CLIS – Juillet 2003 : Rapport final relatif à
l'impact de l'incendie du bloc 15.
- [8] MICA Environnement – Avril 2004 : Etude géologique, hydrogéologique et
géotechnique du centre de stockage de STOCAMINE.
- [9] BMG ENGINEERING – Juillet 2004 : Stockage souterrain de Wittelsheim :
évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus
aux substances chimiques.
- [10] INSTITUT SUISSE POUR LA PROMOTION DE LA SECURITÉ – Juillet
2004 : Etude d'impact (rapport de synthèse des trois études précédentes et résumé).
- [11] P. BEREST, B. BROUARD, B. FEUGA– Mars 2004 : Abandon des mines de sel :
faut-il envoyer ? – Publication Les Techniques de l'industrie minière n°21.



GLOSSAIRE

A.E.P. : Alimentation en eau potable.

AFFAISSEMENT : Descente des terrains de surface au-dessus d'une exploitation minière.

AQUIFERE : Terrain poreux ou fissuré, perméable, susceptible d'autoriser l'existence d'une nappe d'eau souterraine ; par extension, parfois employé pour la nappe souterraine.

CHAMBRES ET PILIERS : Méthode dans laquelle le soutènement principal est assuré au moins temporairement par des piliers de minerai laissés en place.

- *chambres et piliers abandonnés* : les piliers sont laissés tels quels après l'exploitation
- *chambres et piliers remblayés* : les chambres sont remblayées pour améliorer la stabilité de l'ensemble. Cette méthode peut permettre dans un deuxième temps la récupération de tout ou partie du minerai des piliers.
- *chambres et piliers foudroyés* : la récupération méthodique des piliers provoque un foudroyage contrôlé du toit. Ce foudroyage assure le comblement des vides d'exploitation et réduit les pressions de terrain sur les zones avoisinantes.

CONCESSION : Privilège d'exploitation accordé par l'Etat, pour une durée déterminée ou non ; désigne également le terrain ou le territoire ainsi concédé.

CONVERGENCE : Diminution de distance entre les parois d'une excavation.

DISSOLUTION (exploitation par) : Méthode applicable aux minerais solubles qui consiste à envoyer de l'eau pour dissoudre le produit à extraire et à pomper les solutions vers le jour à partir d'un sondage.

EXHAURE : Pompage pratiqué au sein d'une exploitation minière pour la maintenir hors d'eau.

FONÇAGE : Action de creuser en descendant une voie verticale (puits, bure).

FLUAGE : Déformation continue dans le temps, d'un matériau soumis à une contrainte constante et une température donnée.

FOUDROYAGE : Autoremblayage du vide minier dû à la chute du toit. Il suit la suppression du soutènement qui marque la limite arrière des zones de travail d'une taille.

GRADIENT (piézométrique) : pente de la surface piézométrique* (i.e. différence de niveau d'eau entre deux points d'un aquifère séparés par une certaine distance).

MUR : Epente située au-dessous du minerai. Surface inférieure d'une formation.

PIEZOMETRIE : niveau de l'eau d'une nappe dans un tube qui y est enfoncé (piézomètre) ; niveau de la nappe.



SATURATION : État d'un liquide ou d'une solution qui, à une température et à une pression données, renferme la quantité maximale d'une substance dissoute. Lorsqu'on est à saturation, on ne peut plus dissoudre un soluté à une température et une pression déterminées.

SOUTÈNEMENT : Dispositif de soutien des parois, soit par appui (cadres, cintres métalliques, piles, béton), soit par suspension (boulons).

STOT : Volume de minéral laissé en place pour protéger une voie ou une installation du fond ou de la surface.

VOIE : Nom général désignant tout ouvrage de communication souterraine.



ANNEXES

- Annexe 1 Diagramme de solubilité du mélange NaCl/KCl (1 page)
- Annexe 2 Recherche de l'équilibre hydrodynamique par la loi de Darcy (1 page)



Annexe 1

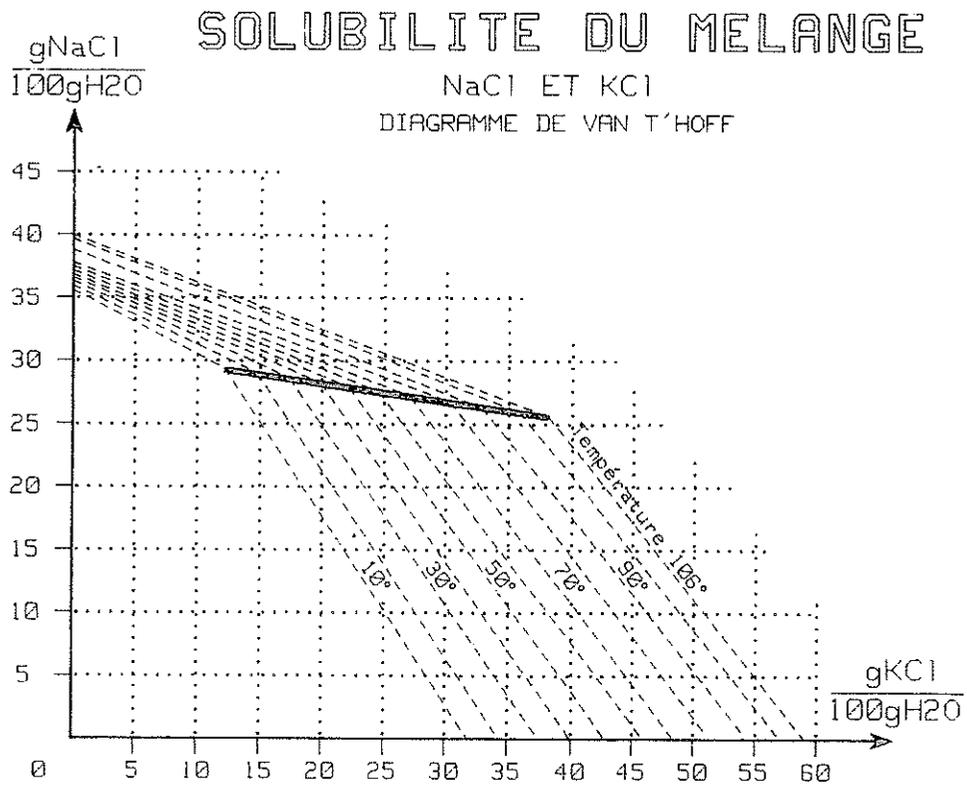
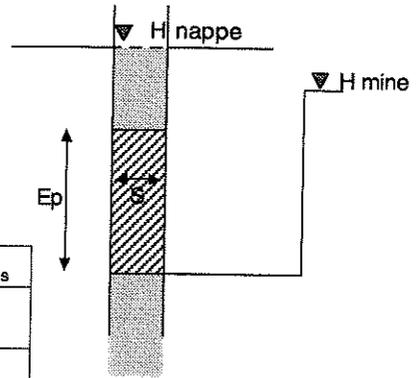


Diagramme de solubilité du mélange de chlorure de potassium et de chlorure de sodium dissous dans de l'eau (10° C à 108° C).

Annexe 2

Recherche de l'équilibre hydrodynamique par la loi de Darcy

Equilibre piézométrique :
 $\Sigma (Q \text{ entrants}) = \Sigma (Q \text{ sortants})$
 avec, pour chaque puits :
 $Q = S \cdot K \text{ bouchon} \cdot (H \text{ nappe} - H \text{ mine}) / Ep$



Perméabilité des bouchons de cendres

K bouchon	5,8E-07 m/s
-----------	-------------

Ensemble Wittelsheim				Recherche de l'équilibre, encadrement des valeurs testées	
				H mine (m NGF) 239,5	H mine (m NGF) 239,6
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /mois)	Q (m ³ /mois)
Eise	263	16	185	3,08	3,06
Joseph	263	16	185	3,08	3,06
Berrwiller	262	28,7	95	10,29	10,24
Amélie 2	259	16	185	2,55	2,54
Amélie 1	256	23,7	185	3,20	3,18
Max	253	16	309	1,06	1,05
Staffelfelden	250	31,2	176	2,82	2,79
Marie	245	15,9	50	2,65	2,60
Marie-Louise	245	15,9	50	2,65	2,60
Schoenensteinbach	235	27,3	97	-1,92	-1,96
Rodolphe 1	234	15,9	50	-2,65	-2,70
Rodolphe 2	234	23,8	50	-3,96	-4,03
Alex	234	15,9	254	-0,52	-0,53
Ungersheim 1	223	23,8	64	-9,29	-9,34
Ungersheim 2	223	23,8	47	-12,64	-12,72
Somme des débits entrants et sortants (m ³ /mois) (recherche de l'équilibre)				0,381	-0,159
				> 0	< 0
Somme des débits entrants (m ³ /mois)				31,4	31,1
Somme des débits entrants (m ³ /an)				376	373

1 seul compartiment

Equilibre piézométrique
= 239,5 NGF

Débit de transit
375 m³/an

Mine Amélie isolée				Recherche de l'équilibre, encadrement des valeurs testées	
				H mine (m NGF) 258,9	H mine (m NGF) 259
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /mois)	Q (m ³ /mois)
Eise	263	16	185	0,54	0,52
Joseph	263	16	185	0,54	0,52
Amélie 2	259	16	185	0,01	0,00
Amélie 1	256	23,7	185	-0,56	-0,58
Max	253	16	309	-0,46	-0,47
Somme des débits entrants et sortants (m ³ /mois) (recherche de l'équilibre)				0,062	-0,005
Somme des débits entrants (m ³ /mois)				1,1	1,0
Somme des débits entrants (m ³ /an)				13	13

Mine Amélie isolée

Equilibre piézométrique
= 259 NGF

Débit de transit
13 m³/an

Mine Marie-Louise isolée				Recherche de l'équilibre, encadrement des valeurs testées	
				H mine (m NGF) 236,8	H mine (m NGF) 236,9
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /mois)	Q (m ³ /mois)
Berrwiller	262	28,7	95	11,52	11,48
Staffelfelden	250	31,2	176	3,54	3,51
Marie	245	15,9	50	3,95	3,90
Marie-Louise	245	15,9	50	3,95	3,90
Schoenensteinbach	235	27,3	97	-0,77	-0,81
Rodolphe 1	234	15,9	50	-1,35	-1,40
Rodolphe 2	234	23,8	50	-2,02	-2,09
Alex	234	15,9	254	-0,27	-0,27
Ungersheim 1	223	23,8	64	-7,77	-7,82
Ungersheim 2	223	23,8	47	-10,58	-10,65
Somme des débits entrants et sortants (m ³ /mois) (recherche de l'équilibre)				0,217	-0,257
Somme des débits entrants (m ³ /mois)				23,0	22,8
Somme des débits entrants (m ³ /an)				275	273

Mine Marie-Louise isolée

Equilibre piézométrique
= 237 NGF

Débit de transit
= 275 m³/an

