

RAPPORT D'ÉTUDE
DRS-10-108130-03801A

30/03/2010

Stockage souterrain de STOCAMINE (68)

**Synthèse critique des études hydrogéologiques
sur l'ennoyage du site.**

INERIS

maîtriser le risque |
pour un développement durable |

Stockage souterrain de STOCAMINE (68).

Synthèse critique des études hydrogéologiques sur l'ennoyage du site.

Direction des Risques du Sol et du Sous-sol

STOCAMINE

Document réalisé avec la participation de Fabrice QUIOT et d'Olivier BOUR, ingénieurs à la Direction des Risques Chroniques.

PREAMBULE

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

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

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

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

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

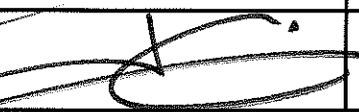
	Rédaction	Vérification	Approbation
NOM	Philippe GOMBERT	Jean-Claude PINTE	Mehdi GHOREYCHI
Qualité	Responsable de l'unité ESEG à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Chef de Projet à la Direction des Risques du Sol et du sous-sol	Directeur des Risques du Sol et du Sous-sol
Visa			

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	9
2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SITE	11
2.1 Stratigraphie.....	11
2.1.1 Terrains salifères du Tertiaire	12
2.1.2 Recouvrement plio-quadernaire	15
2.2 Perturbations de la continuité sédimentaire	16
2.2.1 Tectonique.....	16
2.2.2 Diapirisme.....	18
2.3 Contexte hydrogéologique	19
2.3.1 Aquifères du Secondaire	19
2.3.2 Aquifères du Tertiaire	19
2.3.3 Aquifère alluvial du Quadernaire	23
2.4 Conclusion du contexte géologique et hydrogéologique	28
3. SCENARIOS D'ENNOYAGE DU SITE.....	31
3.1 Présentation du phénomène	32
3.1.1 Origine et qualité des eaux de percolation.....	32
3.1.2 Etat actuel de l'ennoyage	34
3.2 Délimitation du bloc-hôte.....	36
3.2.1 Limites naturelles.....	36
3.2.2 Connexions entre le site de stockage et les autres compartiments	39
3.2.3 Conclusion sur la délimitation du bloc-hôte	52
3.3 Ennoyage de la mine après fermeture	52
3.3.1 Scénario d'ennoyage	52
3.3.2 Débit d'ennoyage.....	53
3.3.3 Volume de vides	55
3.3.4 Durée d'ennoyage	61
3.3.5 Conclusion des scénarios d'ennoyage	65
3.4 Devenir de la mine en fin d'ennoyage	65
3.4.1 Evolution des vides miniers	65
3.4.2 Comportement de la saumure après ennoyage.....	66
3.4.3 Débit de fuite lié au fluage du sel.....	75

3.4.4 Localisation des épanchements en surface.....	78
3.4.5 Conclusion sur le devenir de la mine en fin d'ennoyage.....	79
4. CONCLUSION GENERALE	81
4.1 Géologie.....	81
4.2 Hydrogéologie	81
4.3 Relations du bloc-hôte avec l'extérieur.....	82
4.4 Ennoyage de la mine après fermeture	83
4.5 Devenir de la mine en fin d'ennoyage	83
4.6 Suite de l'étude	84
5. BIBLIOGRAPHIE	87

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Coupe stratigraphique synthétique des terrains du bassin potassique [4]	11
Figure 2. Coupe générale Nord-Sud des terrains dans la région de Mulhouse [4]	12
Figure 3. Log géologique schématique des terrains salifères de l'Oligocène [4]	13
Figure 4. Carte géomorphologique de la plaine du Rhin (MDPA, 2008)	16
Figure 5. Profil Ouest-Est à travers la nappe d'Alsace (MDPA, 2008)	16
Figure 6. Schéma synthétique de l'hydrogéologie de la zone salifère supérieure [4]	21
Figure 7. Caractéristiques de la couche 1 d'alluvions récentes supérieures [MDPA]	24
Figure 8. Caractéristiques de la couche 2 d'alluvions anciennes supérieures [MDPA]	25
Figure 9. Caractéristiques de la couche 3 d'alluvions anciennes inférieures [MDPA]	25
Figure 10. Carte piézométrique de référence de juin 2002 [MDPA]	26
Figure 11. Extrait de la carte piézométrique du bassin potassique	27
Figure 12. Carte de la salure de la nappe en 2005 (MDPA, 2008)	28
Figure 13. Coupe stratigraphique simplifiée et caractéristiques hydrogéologiques à la verticale du site [15]	30
Figure 14. Carte du bassin potassique d'Alsace (EMC, 1996)	31
Figure 15. Estimation du remplissage actuel du secteur ouest (Cesame, 2008)	36
Figure 16. Etat des vides et de la fissuration à très long terme (MICA, 2004)	38
Figure 17. Flexure séparant les secteurs est et ouest du bassin potassique (Cesame, 2008)	39
Figure 18. Extrait du bloc-diagramme des exploitations minières [28]	41
Figure 19. Schématisation des hypothèses [37]	42
Figure 20. Schéma de principe du remblayage des puits aux MDPAs [28]	44
Figure 21 : cuvelage de type allemand (Source : MDPAs)	45
Figure 22. Schématisation des circulations d'eau à travers le puits Marie en cours de remblayage [15b]	46
Figure 23. Position des cuvelages étanches et des bouchons de suies des puits MDPAs (MICA, 2004)	47
Figure 24. Perméabilité mesurée et modélisée dans le cas d'une galerie d'avancement de section circulaire creusée à 700 m de profondeur avec une contrainte initiale de 17 MPa (Hou, 2003)	49
Figure 25. Plan de situation des sondages dans le bassin potassique [4]	50

Figure 26. Calcul du débit à travers un puits de 4,5 m de diamètre remblayé par un bouchon de suies sous une charge hydraulique de 520 m [28]	54
Figure 27. Evolution des vides résiduels après foudroyage d'après Combes et Ledoux [4]	57
Figure 28. Courbe d'évolution des vides retenue par Cesame pour le bassin [37]58	
Figure 29. Comparaison de la variation volumique des galeries du site de stockage dans trois situations (Hadj-Hassen, 2009)	59
Figure 30. Evolution du volume des vides résiduels du site de stockage avec et sans ennoyage par de la saumure (Hadj-Hassen, 2009)	60
Figure 31. Evolution du niveau de l'eau dans les travaux miniers [4]	61
Figure 32. Estimation de la durée d'ennoyage du secteur ouest [4]	63
Figure 33. Schéma d'écoulement de l'eau après ennoyage de la mine Amélie [28]	67
Figure 34. Schéma de mise en pace d'un équilibre hydrostatique dans le secteur Ouest (MDPA, 2008)	68
Figure 35. Position théorique de l'interface eau douce/saumure à l'équilibre hydrostatique dans le bassin de Wittelsheim pour différentes densités de saumure (MICA, 2004)	71
Figure 36. Schématisation des flux et des temps de transfert après l'ennoyage [28]	72
Figure 37. Cartographie des flux et des temps de transfert après l'ennoyage [28]74	
Figure 38. Estimation de l'expulsion de saumure dans le secteur Ouest en cas de poursuite de la compaction [28]	75
Figure 39. Comparaison des convergences verticales et horizontales avec saumure (ennoyage) et sans saumure [HH]	76
Figure 40. Evolution du volume des vides résiduels lors de l'ennoyage avec la saumure et lorsque les volumes restent vides [HH]	77

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Principales caractéristiques des aquifères de la série Secondaire [4]	19
Tableau 2. Analyse des ions majeurs de venues d'eau profondes (MICA, 2004)	33
Tableau 3. Résultat d'analyse de l'eau d'exhaure du puits Else [1].....	33
Tableau 4. Analyses récentes de salinité de l'eau issue du puits Amélie II	33
Tableau 5. Caractéristiques des horizons perméables du Tertiaire [13].....	37
Tableau 6. Débits de percolation retenus pour les puits de la mine Amélie [28] ..	53
Tableau 7. Valeurs de débits de percolation calculées ou estimées pour les puits de la mine Amélie.....	54
Tableau 8. Estimation des débits pénétrant dans le secteur ouest ou bassin de Wittelsheim (MDPA, 2008)	55
Tableau 9. Estimation de la durée d'envoyage de la mine Amélie isolée [28]	62
<i>Tableau 10. Estimation de la durée d'envoyage du bassin de Wittelsheim[28]....</i>	<i>62</i>
Tableau 11. Différentes durées d'envoyage du bassin de Wittelsheim (ans).....	64
Tableau 12. Estimation du temps de transit des eaux entre le site de stockage et les exutoires aval du bassin de Wittelsheim [28].....	64
<i>Tableau 13. Evaluation du débit d'épanchement à travers les puits du bassin de Wittelsheim (MICA, 2004)</i>	<i>73</i>

1. INTRODUCTION

Le présent document synthétise les études hydrogéologiques réalisées sur le site de stockage de Stocamine et de la mine Amélie à laquelle il appartient. Les résultats sont analysés et leur validité est discutée. Tous ces éléments devront permettre d'écrire le (ou les) scénario(s) le(s) plus probable(s) d'évolution à long terme du site de stockage et des vides miniers associés, ce qui sera l'objet d'un rapport ultérieur.

A cet effet, les principales questions qui se posent actuellement et auxquelles il faudra apporter une réponse sont les suivantes :

- Quel est le scénario d'envoyage le plus probable ?
- Quelle sera la durée prévisible de l'envoyage ?
- Quel est le rôle du fluage du sel et le comportement mécanique du stockage au cours de l'envoyage ?
- Quel sera le devenir du site de stockage et de la mine Amélie à la fin de l'envoyage ?
- Y aura-t-il des épanchements de saumure dans les compartiments superficiels et, dans l'affirmative, quels seront leur débit et leur localisation ?

La présente synthèse critique doit fournir les premiers éléments de réponse et déterminer s'il convient de lancer des études complémentaires pour répondre à l'une ou l'autre des questions posées.

Le risque de pollution éventuelle des compartiments superficiels par la saumure contaminée et par les émanations potentielles de gaz n'est pas abordé ici et fait l'objet d'une synthèse distincte de l'INERIS¹ concernant le terme source.

Note de lecture :

- Les phrases extraites de la bibliographie (notamment les rapports d'études réalisées à la demande de Stocamine) dans leur intégralité sont citées entre guillemets ;
- Les références bibliographiques sont citées de deux manières :
 - Le nom de l'auteur suivi de la date de parution, le tout entre parenthèses, lorsqu'il s'agit de généralités ; par exemple : (CESAME, 2006) ;
 - Le numéro de référence bibliographique (d'après la liste fournie par Stocamine : voir en bibliographie) suivi du numéro de page, le tout entre crochets, lorsqu'il s'agit d'un extrait cité intégralement ; par exemple : [28, 104] correspond à la page 104 du document [28], c'est-à-dire du rapport MICA (2004).

¹ Réalisée par C. Hulot et P. Hennebert de la Direction des Risques Chroniques (

2. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE DU SITE

2.1 STRATIGRAPHIE

Le site de stockage appartient à la série salifère du Tertiaire. La succession stratigraphique des terrains de part et d'autre du site est schématisée en Figure 1 et en Figure 2 ainsi qu'en Figure 3 pour ce qui concerne la série salifère.

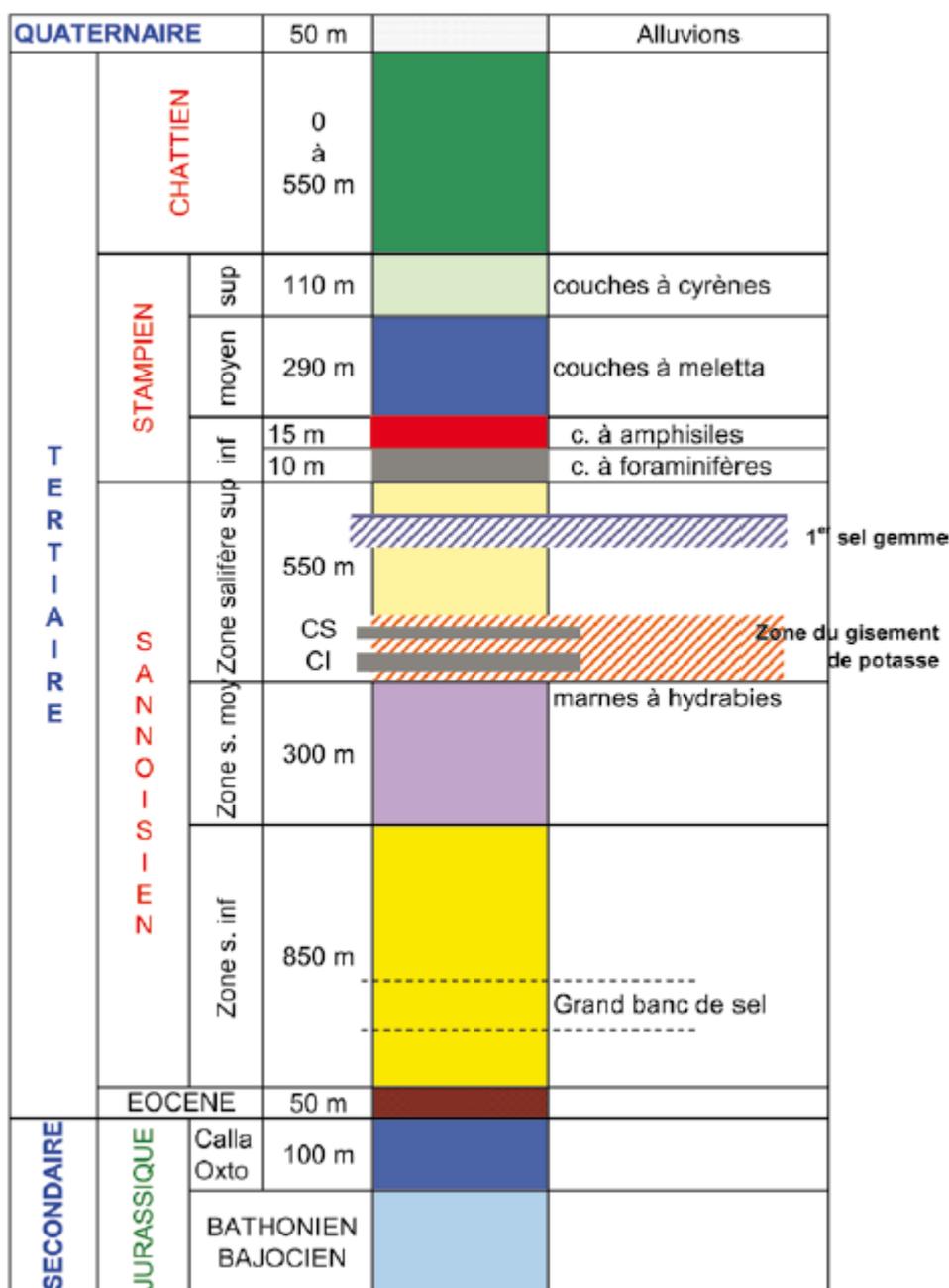


Figure 1. Coupe stratigraphique synthétique des terrains du bassin potassique [4]

Note : le site de stockage se trouve à 20 m sous la couche inférieure de potasse référencée « CI »

Le substratum de la série salifère est représenté, de bas en haut, par (Figure 2) :

- des grès du Buntsandstein, situés à 2400 m de profondeur et constitués de grès détritiques d'une épaisseur inférieure à 100 m ;
- des calcaires et dolomies du Muschelkalk, situés vers 2200 m dans la région de Mulhouse, également épais d'environ 100 m d'épaisseur ;
- des calcaires oolithiques massifs du Dogger, encore appelés « Grande Oolithe », situés à près de 2000 m de profondeur, épais d'environ 150 m ;
- des calcaires du Malm, dont le toit se trouve vers 1500-1600 m de profondeur, épais de moins de 100 m ; ils n'existent que dans la région de Mulhouse car ils ont été érodés ailleurs.

Allant du Trias au Jurassique, le substratum des terrains salifères est représenté par environ 1300 m de formations essentiellement marneuses qui renferment quatre niveaux lithologiques plus perméables.

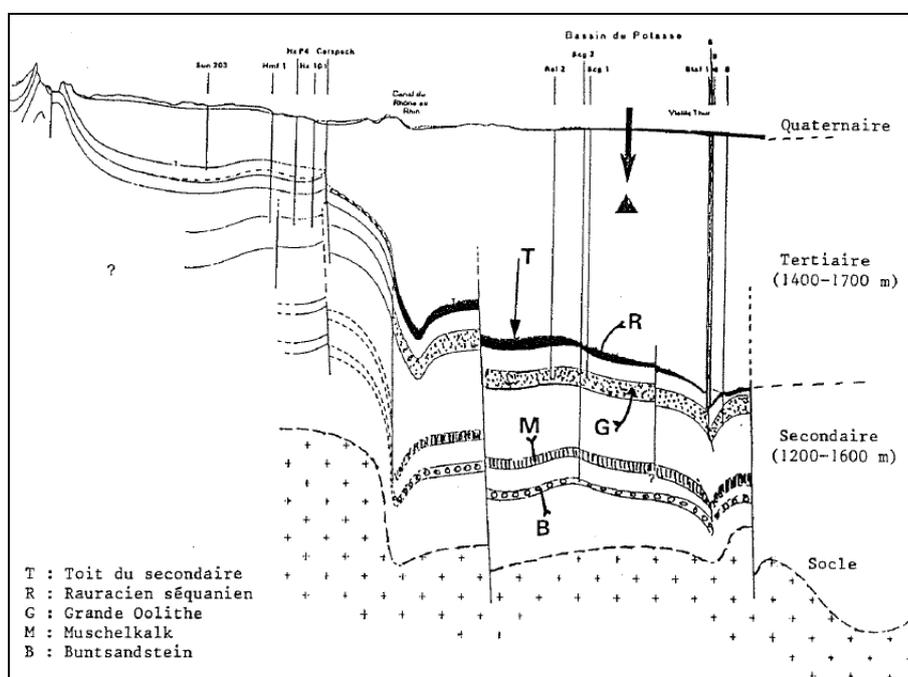


Figure 2. Coupe générale Nord-Sud des terrains dans la région de Mulhouse [4] (le Nord est à gauche ; le triangle noir schématise l'emplacement de Stocamine)

2.1.1 Terrains salifères du Tertiaire

2.1.1.1 L'Eocène

Cette formation, épaisse de 0 à 100 m, est discordante sur le substratum jurassique plissé dont la profondeur est d'environ 1600 à 1800 m au droit du site de stockage. Il s'agit de conglomérats marneux riches en pisolithes ferrugineux et en rognons d'anhydrite renfermant, parfois, un horizon de calcaire lacustre. D'après l'échelle chrono-stratigraphique des MDP, la limite Eocène-Oligocène

est fixée à l'apparition des marnes vertes à Limnées².

Situé à la base de la série salifère, notamment au droit du site de stockage, l'Eocène à dominante marneuse n'est pas partout présent.

2.1.1.2 Le Sannoisien

La série salifère du Sannoisien constitue l'essentiel du remplissage du bassin de Mulhouse et renferme notamment les horizons potassiques exploités par les MDPa ainsi que l'horizon salifère au sein duquel a été creusé le site de stockage (Figure 3).

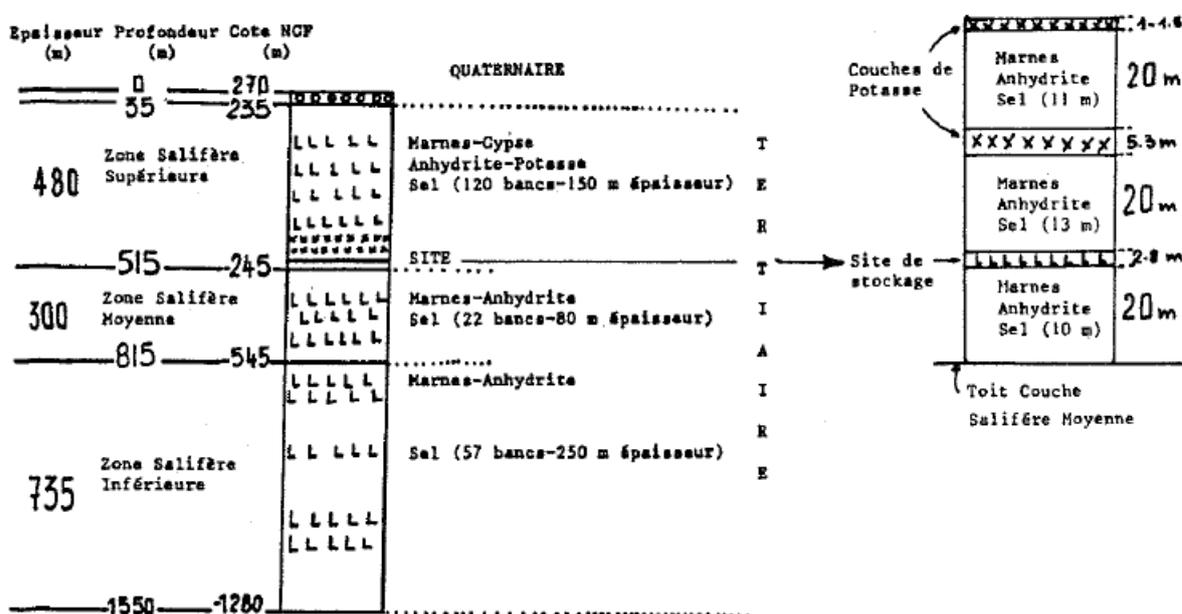


Figure 3. Log géologique schématique des terrains salifères de l'Oligocène [4]

Épaisse de 1450 à 1750 m, cette série a été subdivisée en 3 zones et en 9 unités distinctes qui sont, de bas en haut :

- la zone salifère inférieure, épaisse de 700 à 900 m, qui comprend les unités A (marnes à Limnées), B (grand banc de sel gemme surmonté d'une alternance de marnes et de couches de sel gemme), C (marnes à Limnées) et D (alternance de marnes et de couches de sel gemme) ;
- la zone salifère moyenne, épaisse de 300 m, qui comprend les unités E (ensemble salifère constituée d'alternances de marnes bitumineuses, de lits dolomitiques et de bancs de sel gemme) et F (zone fossilifère renfermant des marnes à anhydrite) ;
- la zone salifère supérieure, épaisse de 450 à 550 m, qui comprend les unités G, H et I.

² Ce repère correspondrait en fait à la limite entre Eocène moyen et supérieur, la véritable limite Eocène-Oligocène se trouvant au sommet de la formation de Sel III.

Cette dernière zone, qui renferme le site de stockage, est détaillée ci-après. De bas en haut, il s'agit de :

- Unité G ou « complexe salin » : formation de 200 m d'épaisseur elle-même subdivisée en :
 - o une partie inférieure de 100 m constituée de marnes bitumineuses, de couches de sel gemme, de strates d'anhydrite (souvent dolomitique mais jamais en rognons) ; c'est à ce niveau que se trouve le site de stockage ;
 - o deux niveaux exploités de potasse (un niveau inférieur de 6 m situé à 40 m au-dessus de la base de cette zone et un niveau supérieur de 2 m situé à 20-25 m au dessus) ;
 - o une partie supérieure de puissance et de composition identique à la partie inférieure sauf que l'anhydrite y est en rognons ;
- Unité H ou « complexe salifère » : renfermant 300 m de marnes, d'anhydrite en gros rognons et de couches de sel ;
- Unité I : complexe marneux sans sel mais renfermant des filets ou des rognons de gypse ou d'anhydrite.

Note : vers les bordures sud et ouest du bassin de Mulhouse, le sel des unités G et H disparaît peu à peu et la série devient entièrement marneuse.

Epaisse d'environ 1500 m, la série salifère du Sannoisien est donc essentiellement formée de terrains marneux et évaporitiques structurés en trois zones superposées. Le site de stockage se trouve vers 500 m de profondeur, à la base du « complexe salin » qui appartient lui-même à la base de la série salifère supérieure. Au sommet, sur environ 100 m d'épaisseur, l'anhydrite y est transformée en gypse.

2.1.1.3 Stampien

Cette série n'est pas présente au droit du site mais elle a été recoupée par de nombreux puits dont Amélie I³, Amélie II et Max. Elle est épaisse de 400 à 430 m et subdivisée en trois parties :

- 7 à 29 m de Stampien inférieur qui comprend des marnes pyriteuses (Couche à Foraminifères) puis bitumineuses (Couche à Amphisiles) ;
- 300 m de Stampien moyen correspondant aux « couches à Mélettes », marnes micacées renfermant à leur base de petits bancs de calcaire dolomitique ou de grès à ciment calcaire ;
- 100 m de Stampien supérieur qui forme les « couches à Cyrènes », alternance de marnes finement sableuses et de couches de grès tendres mal consolidés.

Bien qu'absent au droit du site, le recouvrement stampien de la série salifère a été recoupé par de nombreux puits de mine. Il est épais d'environ 400 m et formé de

³ où la série à Amphisiles et celle à Mélettes sont même répétées suite à un accident tectonique.

terrains marneux qui, vers le sommet, s'enrichissent de plus en plus, en dépôts carbonatés puis gréseux.

2.1.1.4 Chattien

Cette formation n'existe pas au niveau du site de stockage mais se retrouve à 5 km au nord-est, dans le secteur de Stattelfelden, Ungersheim et Ensisheim. Elle comprend des marnes à horizons gréseux renfermant, vers le sommet, des niveaux de calcaires vacuolaires et des nids de gypse en gros cristaux.

2.1.2 Recouvrement plio-quadernaire

Le Pliocène est peu représenté mais le Quaternaire correspond à un ensemble alluvial complexe, épais de 20 à 50 m, formé de dépôts à dominante sableuse renfermant des lentilles de dépôts fins et des chenaux plus grossiers. Ce complexe alluvial est doublement structuré :

- Dans le plan horizontal (Figure 4) avec, au-dessus du site de stockage, l'important cône alluvial de déjection de la Thur à l'ouest (épais de 80 m environ en bordure de l'Ill à 20-30 m près de Mulhouse) et le domaine des alluvions rhénanes à l'est (de 20 m près de Mulhouse à plus de 200 m vers Neuf-Brisach) ; bien que séparés par la plaine d'épandage de l'Ill, ces deux domaines alluviaux se recouvrent sur 2 à 3 km avec une interstratification des alluvions vosgiennes et rhénanes ;
- Dans le plan vertical (Figure 5) avec 3 couches d'âges différents
 - o la couche 1 d'alluvions récentes non à peu altérées et très perméables ;
 - o la couche 2 d'alluvions anciennes argilo-sableuses, moyennement à localement très peu perméable ; en domaine vosgien, elle est parfois séparée de la précédente et de la suivante par quelques mètres d'intercalations argileuses ;
 - o la couche 3 d'alluvions basales dont la perméabilité diffère selon le domaine considéré : souvent peu perméable en domaine rhénan, elle est plus perméable en domaine vosgien car constituée de sables grossiers à galets et blocs, formant des paléochenaux.

Le recouvrement plio-quadernaire de nature alluviale est donc relativement épais (20 à 50 m) au droit du site de stockage. Essentiellement formé de dépôts sableux, il montre localement l'existence de paléo-chenaux à remplissage plus grossier à leur base.

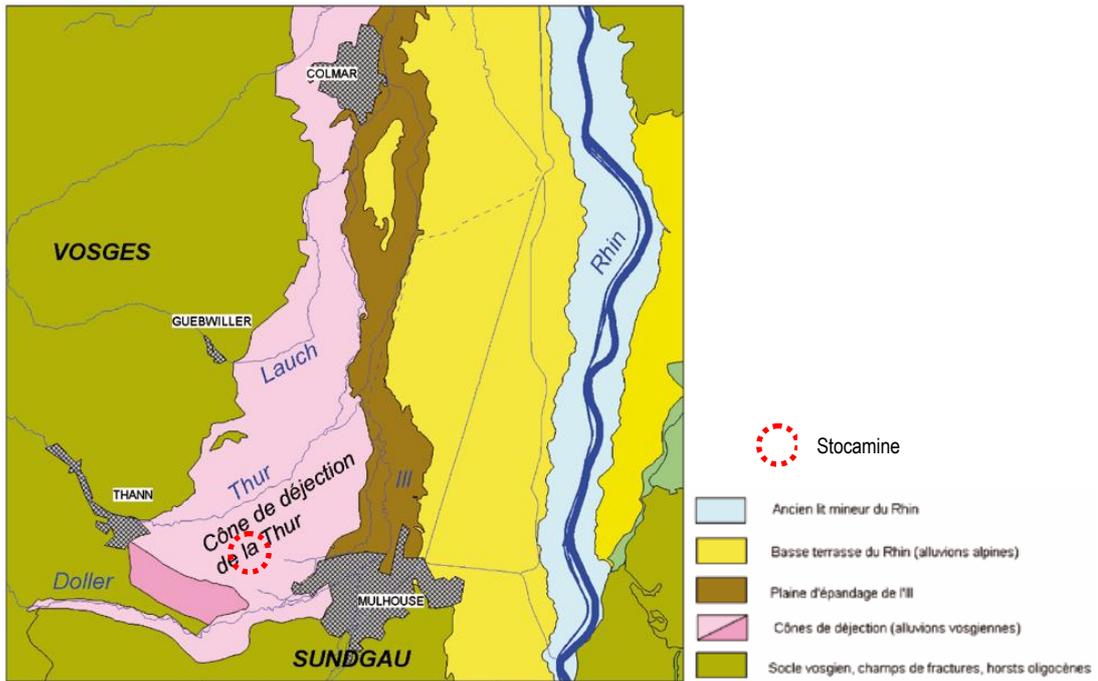


Figure 4. Carte géomorphologique de la plaine du Rhin (MDPA, 2008)

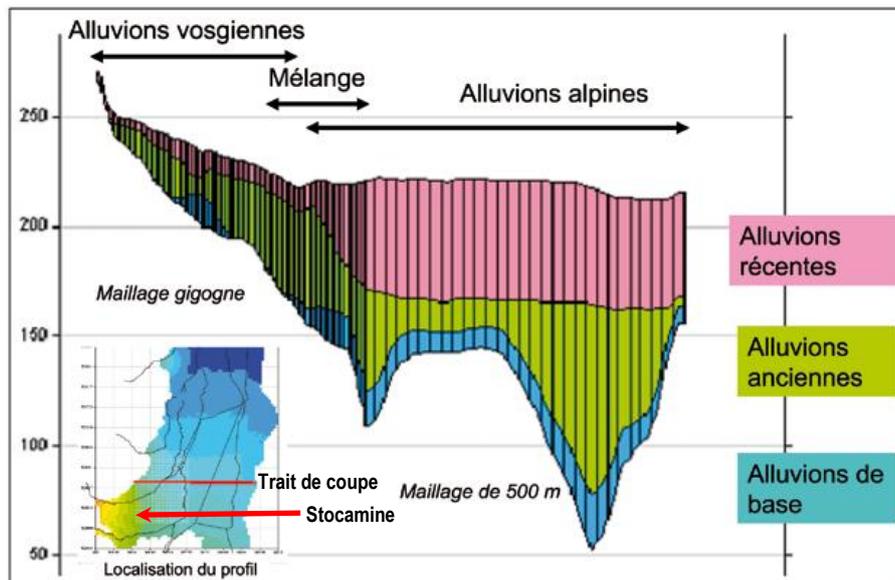


Figure 5. Profil Ouest-Est à travers la nappe d'Alsace (MDPA, 2008)

2.2 PERTURBATIONS DE LA CONTINUITÉ SEDIMENTAIRE

2.2.1 Tectonique

Le bassin potassique de Mulhouse se trouve dans le fossé d'effondrement rhénan, orienté NNE-SSW, limité de part et d'autre par une série de failles de même direction, datant de l'orogénèse hercynienne et disposées en baïonnette. A

l'exception de ces accidents bordiers qui sont synsédimentaires, les autres failles sont en générale post-sédimentaires [13, 60].

A la fin du Crétacé, les mouvements prémonitoires de l'orogénèse alpine ont affecté le substratum secondaire en y créant des plis à grand rayon de courbure orientés WNW-ESE. Ces reliefs n'étaient que partiellement érodés lors des premiers dépôts du Tertiaire qui se sont donc effectués dans des bassins séparés. Leur individualité va s'affirmer au cours de l'affaissement du fossé rhénan et va contribuer à accroître la diversité de leur remplissage sédimentaire. Au droit du site de stockage, la base du Tertiaire se trouve ainsi vers 1600 m de profondeur alors que dans le secteur du horst de Mulhouse, elle n'est que de 200 m.

L'effondrement du fossé, d'une amplitude totale de 5 km, débute à l'Eocène et atteint son paroxysme à l'Oligocène. Il permet l'invasion marine qui déposera les couches de sel et de potasse. Dans le bassin de Mulhouse, ce remplissage tertiaire est affecté d'ondulations de direction subméridienne, à grand rayon de courbure, parfois interrompues par des failles post-sédimentaires dont les rejets peuvent atteindre 500 m et qui découpent de grands panneaux monoclinaux.

Dans le secteur du stockage, la structure est monoclinale avec un pendage de 6 à 10° vers le nord-ouest qui correspond au flanc d'un bombement anticlinal d'axe NE-SW [4, 24]. Cette déformation souple à grand rayon de courbure est interrompue près du puits Max, à 1,5 km du site de stockage, par une faille de 170 m de rejet qui affaisse le bloc Amélie par rapport au bloc Max.

Il est également noté l'existence de deux autres accidents tectoniques affectant les formations du Stampien :

- une zone broyée recoupée par le puits Amélie I et qui a conduit à un dédoublement de la série géologique du Stampien ; dans ce puits, les couches à Mélettes et les schistes à Amphisiles, situés entre 25 et 135 m de profondeur, se retrouvent de nouveau entre 135 et 245 m de profondeur ; il est possible que cette zone broyée corresponde à une faille subhorizontale de type chevauchant ; son recoupement a été apparemment accompagné d'une faible venue d'eau (7 l/min) mentionnée à 137 m de profondeur dans ce puits ;
- le recoupement d'une faille dans les grès aquifères du Stampien à l'occasion du creusement du « travers banc T » qui devait relier les mines Marie-Louise et Berrwiller ; ce recoupement a donné lieu à une venue d'eau abondante puisque plusieurs interventions de colmatage ont été nécessaires pour la juguler [28, 144].

Le remplissage du fossé rhénan est donc affecté par un certain nombre de failles qui le découpent en panneaux monoclinaux. Aucune faille de ce type n'a été mentionnée aux environs immédiats du site de stockage mais on note l'existence d'une zone broyée à 135 m de profondeur dans le Stampien du puits Amélie I (soit plusieurs centaines de mètres au-dessus de la série salifère renfermant le site de stockage), d'une autre faille également recoupée dans le Stampien au travers-banc T et d'une faille située à 1,5 km de distance en direction du puits Max.

Cependant, le site de stockage se trouve « dans une région réputée sismiquement active (à l'échelle nationale) » [13, 63]. Une étude de l'impact de la sismicité sur le stockage a été menée par l'institut de Physique du Globe de Strasbourg (IPGS, 1990 ?) : les prédictions d'accélération du sol à 500 m de profondeur ont été

conduites en prenant un séisme de magnitude 5,5 à une distance de 8 km du site (équivalent au séisme de Remiremont de 1685) et de 6,5 à une distance de 32 km (équivalente au séisme de Bâle de 1356). Il ressort [3, 50] :

- d'une part que les accélérations au fond seraient « inférieures d'un facteur 4 à 5 par rapport aux accélérations de surface » avec, dans les hypothèses les plus pessimistes, « des accélérations horizontales inférieures à 0,1 g à la profondeur de 500 m et des accélérations verticales au moins deux fois plus faibles » ;
- d'autre part, que « les probabilités d'occurrence de ces séismes à des distances aussi rapprochées du site de stockage sont faibles » ; ainsi la probabilité d'occurrence d'un séisme de magnitude 6,5 au sud du fossé rhénan peut être estimée à environ 10^{-3} .

Les probabilités d'occurrence d'un séisme potentiellement destructeur dans la zone du stockage sont de l'ordre d'un par millénaire avec des accélérations très faibles au fond (< 0,1 g à -500 m). Cependant, dans la suite de l'étude, l'INERIS requerra l'avis d'un (néo)tectonicien spécialiste de cette région.

2.2.2 Diapirisme

Du fait de sa faible masse volumique⁴ et de son comportement viscoplastique, le sel peut migrer vers le haut à travers les terrains sus-jacents et former un dôme de sel ou un diapir⁵. Celui-ci déséquilibre alors l'encaissant et favorise ainsi l'émergence d'autres dômes de sel ou diapirs, généralement alignés.

Les conditions les plus favorables à l'apparition de dômes ou de diapirs sont une épaisseur de sel d'au moins 500 m et une profondeur d'enfouissement de 1 à 2 km minimum : sa vitesse d'ascension est alors de l'ordre de 0,1 à 0,5 mm/an [4].

Dans le fossé rhénan, les conditions sont assez peu favorables à la formation de diapirs, notamment dans le secteur étudié où le sel est peu épais et situé à faible profondeur : cela est d'ailleurs confirmé par la régularité des couches [4]. Il existe cependant quelques diapirs à Ensisheim, à 10 km à l'est du site de stockage, le long de l'III : une remontée du substratum liée à des phénomènes de diapirisme y est à l'origine du dôme de Hettenschlag et de la crête de Meyenheim (cf. Figure 7 et Figure 9).

Dans le secteur d'étude, l'absence d'un diapir « est en soi une preuve convaincante que le risque de formation d'un nouveau diapir est pratiquement inexistante » [13, 62]. D'autre part, les données des nombreux puits et sondages confirment la régularité des bancs de sel.

Les conditions nécessaires à l'apparition de dômes de sel ou de diapirs ne se rencontrent pas a priori au droit du site de stockage ni dans son environnement immédiat. Cependant, dans la suite de l'étude, l'INERIS requerra l'avis d'un spécialiste de ce sujet.

⁴ 2160 kg/m³ pour le sel gemme contre 2550 kg/m³ pour la moyenne des roches

⁵ Un diapir se forme essentiellement à la suite d'une instabilité mécanique de bancs de sel soumis à une forte poussée tectonique alors que la montée d'un dôme de sel est exclusivement liée à l'écart de densité du sel avec son encaissant.

2.3 CONTEXTE HYDROGEOLOGIQUE

2.3.1 Aquifères du Secondaire

Les aquifères situés sous la formation salifère correspondent aux quatre formations perméables précédemment décrites des grès du Buntsandstein et des calcaires du Muschelkalk, du Dogger et du Malm [4]. Des mesures faites en laboratoire avec ces roches fournissent une porosité matricielle inférieure à 10% mais, dans les trois réservoirs calcaires, la porosité de fracture est importante. Leur perméabilité, mesurée sur carotte, est faible (10^{-14} à 10^{-15} m²) sauf dans la Grande Oolithe (Dogger) en raison de sa fracturation et de sa « dolomitisation erratique » [4]. Enfin, leur salinité est comprise entre 5 et 50 g/l.

Les données piézométriques de ces nappes profondes sont rares mais on peut considérer qu'elles sont artésiennes au droit du site de stockage (voir Tableau 1). Ainsi, en ce qui concerne les sondages pétroliers réalisés dans le bassin potassique et qui ont atteint ces aquifères profonds, MICA (2004) signale que « lors de leur foration, ces ouvrages étaient pour la plupart légèrement artésiens. A titre d'exemple, au sud de l'exploitation minière, le sondage Reiningue 2 bis présentait un niveau piézométrique à 7 m au-dessus du sol tandis que le sondage Schweighouse 2bis présentait un niveau piézométrique à 9,82 m sous la surface » [28, 215].

Bien qu'en charge sous la série salifère sannoisienne, les aquifères du Secondaire en sont isolés par plus d'un millier de mètres de terrains imperméables, ce qui rend difficile - voire impossible - toute communication naturelle avec le site de stockage.

Tableau 1 : Principales caractéristiques des aquifères de la série Secondaire [4]

Aquifère	Epaisseur de l'horizon Productif	Piézométrie	t°C	Salinité des eaux (secteur de Mulhouse) Nacl
Calcaire du Malm	Moins de 100 m	270 m NGF	80°-85°	Très variable 5 à 50 g/l
Grande Oolithe (Dogger)	120 à 150 m	280 m NGF	100°	10 à 20 g/l
Calcaire du Muschelkalk	75 à 100 m	300 m NGF	100 à 120°	20 à 30 g/l
Grès du Buntsandstein	75 à 100 m	320 m NGF	120°	20 à 50 g/l

2.3.2 Aquifères du Tertiaire

2.3.2.1 Le Sannoisien

Il renferme des zones salifères dont le comportement hydrogéologique diffère significativement (Figure 6) :

- sous le site de stockage, les zones salifères moyenne et inférieure ainsi que la base de la zone salifère supérieure ne renferment aucun aquifère ;

- au-dessus du site de stockage, le reste de la zone salifère supérieure comprend environ 200 m de partie basale sans venue d'eau puis :
 - o la partie intermédiaire, épaisse de 180 m, constituée de marnes, d'anhydrite et de sel ; 6 puits sur 22 y ont rencontré des venues d'eau dont le tarissement a cependant été rapide, aboutissant à un débit < 4 l/min avec une salinité stable autour de 30-32 g/l ;
 - o la partie supérieure ou « zone à gypse », épaisse de 100 m, est imprégnée d'eau responsable de la transformation de l'anhydrite en gypse ; on y observe (voir ci-après) des suintements au débit insignifiant sauf dans les puits Joseph⁶ et Amélie II où, lors de leur forçage, les venues d'eau ont respectivement atteint 15 et 31 l/min.

La mine Amélie a été desservie par 5 puits. L'analyse de leurs coupes fournit les informations suivantes sur l'hydrogéologie de la zone salifère supérieure :

- Le puits Joseph, profond de 558 m, dispose d'un cuvelage en fonte jusqu'à 197 m ; durant son creusement, seule une venue d'eau a été mise en évidence au-dessous de la nappe alluviale, à 112,50 m dans le niveau à gypse de la partie supérieure, avec un débit de seulement 0,9 m³/h ;
- Le puits Else, profond de 515 m, dispose d'un cuvelage en fonte jusqu'à 121,4 m qui ne couvre que 5 des 7 venues d'eau qu'il a recoupées :
 - o 4 dans la zone à gypse de la partie supérieure avec des débits de 3 m³/h à 35 m, 6 m³/h à 79 m, 9 m³/h à 91 m et 6 m³/h à 104 m ;
 - o 2 dans la zone à anhydrite et sel gemme de la partie moyenne, avec des débits de 1,2 m³/h à 120 m et de 0,9 m³/h à 276 m ;
 - o 1 dans la « zone bitumineuse supérieure » de la partie inférieure avec un débit de 0,9 m³/h à 411 m⁷.
- Le puits Amélie 1, profond de 710 m, dispose d'un cuvelage en fonte jusqu'à 121 m qui ne laisse apparaître qu'une seule venue d'eau située dans le Stampien (voir plus bas) ; il possède cependant deux caractéristiques qui le différencient des autres puits:
 - o Il a été creusé sur 75 m dans des terrains préalablement congelés et, de ce fait, aucune venue d'eau n'a pu être mise en évidence dans les 25 m de Quaternaire ni dans les 50 m de Stampien immédiatement sous-jacents ;
 - o Il a recoupé deux zones broyées qui conduisent à un dédoublement de la série géologique du Stampien; ainsi, les couches à Mélettes et les schistes à Amphisiles, situés entre 25 et 135 m de profondeur, se retrouvent-ils de nouveau entre 135 et 245 m de profondeur.
- Le puits Amélie 2, profond de 683 m, dispose de deux cuvelages en fonte permettant de couvrir les deux venues d'eau identifiées dans la zone à rognons d'anhydrite⁸ et à sel gemme de la partie moyenne :

⁶ le site de stockage se trouve entre les puits Joseph, Else et Amélie II.

⁷ il conviendra cependant de vérifier la pertinence de cette profondeur car le bloc-hôte est réputé imperméable en dessous de 300 m de profondeur.

- le premier tubage, jusqu'à 140 m de profondeur, l'isole de l'aquifère quaternaire et du toit de la zone à gypse ;
- le second tubage, entre 189 et 241 m de profondeur, l'isole de la première venue d'eau située entre 140 et 164 m (avec un débit de 1,8 m³/h) et de la seconde à 236 m (avec un débit de 0,09 m³/h).
- Le puits Max⁹, profond de 556 m, dispose d'un cuvelage en fonte jusqu'à 226 m qui couvre l'ensemble des 6 venues d'eau intégralement mises en évidence dans le Stampien (voir ci-après).

Présente de 200 à 600 m de profondeur, la formation salifère du Sannoisien est donc susceptible de renfermer des venues d'eau significatives jusqu'à 411 m de profondeur.

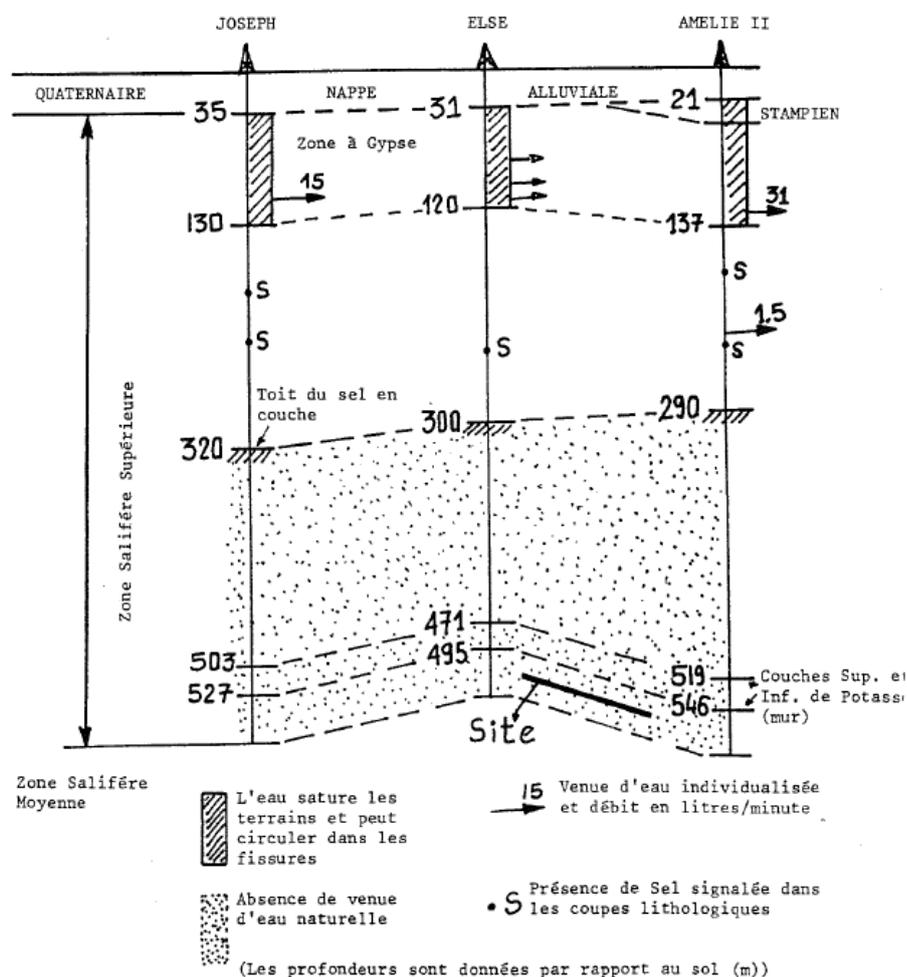


Figure 6. Schéma synthétique de l'hydrogéologie de la zone salifère supérieure [4]

⁸ Dans ce puits, l'anhydrite a en fait été transformée en gypse jusqu'à 215 m de profondeur, ce qui implique que de l'eau d'origine superficielle est probablement descendue jusqu'à ce niveau.

⁹ On rappelle que ce puits, situé à 1,5 km du site de stockage, ne se trouve pas dans le même compartiment tectonique que les précédents dont il est séparé par une faille de 170 m de rejet : le rôle hydrogéologique de cette faille, notamment en termes de transport, devra être discuté ultérieurement.

2.3.2.2 Le Stampien

Sur le plan hydrogéologique, il est divisé en deux parties :

- le Stampien inférieur, essentiellement marneux, qui peut être considéré comme imperméable, à l'exception du recoupement d'une petite fissure ayant fourni un débit de 7 l/min (soit 0,4 m³/h) au puits Amélie I ;
- le Stampien moyen et supérieur, puissant ensemble marneux renfermant des horizons sablo-gréseux, qui présente très souvent des horizons aquifères dont les débits sont faibles¹⁰ ; ainsi, au puits Amélie 1, la seconde couche à Mélettes¹¹ a fourni 0,42 m³/h à 137 m alors qu'au puits Max, la même couche a fourni 6 venues d'eau distinctes :
 - o 1,5 m³/h entre 46 et 47 m,
 - o 1,8 m³/h entre 70 et 73 m,
 - o 5,1 m³/h entre 91 et 93 m,
 - o 2,1 m³/h entre 114 et 116 m,
 - o 0,9 m³/h entre 188 et 194 m,
 - o 0,6 m³/h entre 198 et 206 m.

Toutefois, pour l'ensemble de ces formations du Stampien, MICA signale que les débits observés n'étaient pas stabilisés et que « lorsqu'ils ont été recoupés, ces horizons aquifères ont rapidement montré d'importantes chutes de débit » [15, 140].

Une information intéressante concerne le creusement du « travers banc T » qui devait relier les mines Marie-Louise et Berrwiller : il est noté que, après avoir recoupé une faille dans les grès aquifères du Stampien « plusieurs interventions de colmatage ont été nécessaires pour juguler cette venue d'eau » [28, 144].

Situés sous la nappe alluviale, entre 20-50 m et 200 m de profondeur, les terrains du Stampien peuvent donc être faiblement aquifères. Les quelques failles qui le traversent ont systématiquement montré des venues d'eau significatives : il s'agit donc là d'autant de chemins de transfert potentiels d'eau souterraines dont il conviendra de déterminer le rôle vis-à-vis des circulations profondes.

2.3.2.3 Le Chattien

Cette formation n'est pas présente à la verticale du site de stockage. Cependant, aux puits Marie, Marie-Louise, et Rodolphe - où elle mesure 20 à 51 m d'épaisseur - aucune venue d'eau notable n'y a été observée lors du fonçage.

En revanche, au puits Alex, où son épaisseur atteint 300 m, des venues d'eau importantes y ont été observées, avec un débit de 1 à 500 l/min. Les zones les plus productrices correspondent à des niveaux gréseux disloqués ou broyés, comme celui situé à 276 m de profondeur qui a fourni un débit initial de 500 l/min, tombé à 20 l/min au bout de 8 jours, avec une salinité de 30 g/l.

¹⁰ A l'exception du puits Marie où une venue d'eau a atteint 45 m³/h dans le Stampien qui se trouve ici directement en contact avec la nappe alluviale.

¹¹ On rappelle qu'il s'agit de la réplique de la première couche à Mélettes sous une faille, probablement chevauchante, située à 135 m de profondeur.

2.3.3 Aquifère alluvial du Quaternaire

Les alluvions sont ici formées de sables, graviers et de galets sur une trentaine de mètres d'épaisseur. Elles sont très perméables et constituent un réservoir aquifère très productif, d'intérêt régional, appelé nappe de la plaine d'Alsace ou, plus communément, « nappe d'Alsace ». Au débouché des vallées vosgiennes, elle s'écoule tout d'abord vers l'est puis, rejoignant la nappe d'accompagnement du Rhin, son écoulement s'oriente alors vers le nord-est. Elle est principalement alimentée par les précipitations et par les infiltrations des rivières vosgiennes. On doit également prendre en compte la présence de canaux, dont le Grand Canal d'Alsace qui double le Rhin, ainsi qu'un réseau de drains superficiels, localement assez dense.

Ces alluvions forment donc le principal aquifère de la plaine du Rhin et hébergent une nappe fortement exploitée pour l'alimentation en eau potable (AEP) des collectivités. Elle est encore exploitée par les MDPA pour la dissolution accélérée de certains terrils ainsi que pour l'extraction du sel, introduit dans la nappe par le lessivage des terrils¹², par le biais de puits de fixation et de puits de dépollution.

Du fait de l'enjeu que représente cette nappe pour les populations locales et des connaissances acquises sur son fonctionnement, le chapitre la concernant est plus détaillé.

2.3.3.1 Cartographie

La nappe d'Alsace circule dans les trois couches alluviales précédemment définies. Son fonctionnement a été modélisé par la BRGM (MDPA, 2008) en tenant compte de la spécificité de chacune de ces couches¹³. Il est important de les détailler afin de mieux apprécier l'impact de pollutions éventuelles.

La Figure 7 montre la représentation cartographique de la couche alluviale n°1 qui correspond aux alluvions récentes tant rhénanes que vosgiennes. On distingue:

- à l'est, dans les tons bleus, le domaine rhénan à matériau alpin¹⁴ à fortes perméabilités ($> 5 \cdot 10^{-3}$ m/s) et forte épaisseur (30 à 60 m) ; il occupe la plaine actuelle du Rhin et montre, à l'est, un chenal moins perméable et, à l'ouest, une frange de mélange de matériaux rhénans et vosgiens ; on note également la présence de diapirs qui réduisent l'épaisseur des alluvions le long de la ride de Meyenheim et du dôme d'Hettenschlag ;
- à l'ouest, dans les tons jaunes-oranges-rouges, le domaine vosgien dont la perméabilité est moindre ; il correspond aux cônes de déjection de la Thur et de la Doller avec quelques axes drainants (en vert) correspondant aux thalwegs actuels.

¹² La saumure extraite de la nappe étant envoyée dans le « saumoduc » qui aboutit au Rhin.

¹³ Les valeurs de perméabilité présentées ici sont celles utilisées par le BRGM pour le calage du modèle d'écoulement régional [MDPA, 773-775] ; elles résultent d'une extraction des données de transmissivités et de débits spécifiques issues des pompages d'essais, collectées dans le cadre de la Banque Régionale de l'Aquifère Rhénan ; « lorsque les résultats d'essais de pompage ne donnaient pas de transmissivité, celle-ci a été supposée égale au débit spécifique » par le biais d'une « assez bonne corrélation » entre ces deux paramètres [MDPA, 776].

¹⁴ C'est-à-dire renfermant des sédiments originaires des Alpes.

La Figure 8 représente la couche n°2 qui forme la partie supérieure des alluvions anciennes. Comme précédemment, on distingue :

- à l'est le domaine rhénan (en bleu) constitué de matériaux alpins peu altérés, présentant des perméabilités encore élevées ($> 10^{-3}$ m/s), en dehors de la frange de mélange avec les alluvions vosgiennes (en jaune) ;
- à l'ouest, le domaine vosgien (en rouge et orange) caractérisé par des graviers argileux assez peu perméables (10^{-4} m/s) entrecoupés de chenaux grossiers plus perméables (en jaune) mais également de zones argileuses moins perméables (en brun).

La Figure 9 présente enfin la couche n°3 correspondant à la séquence inférieure des alluvions anciennes. On y distingue toujours les deux domaines précédents, le domaine rhénan étant fortement prépondérant du fait de l'existence de paléoreliefs du substratum qui limitent l'extension des alluvions vosgiennes :

- à l'est, le domaine rhénan qui présente jusqu'à 30 m d'alluvions alpines (sauf au droit des diapirs où cette couche disparaît localement) dont la perméabilité est de l'ordre de 10^{-3} m/s ;
- à l'ouest, le domaine vosgien qui se résout à quelques paléochenaux d'alluvions basales, un peu plus perméables ($> 2,5 \cdot 10^{-4}$ m/s) que les alluvions anciennes sus-jacentes, orientés dans l'axe des paléovallées du substratum tertiaire ; l'une de ces paléostructures est notamment développée aux alentours des puits Joseph et Else.

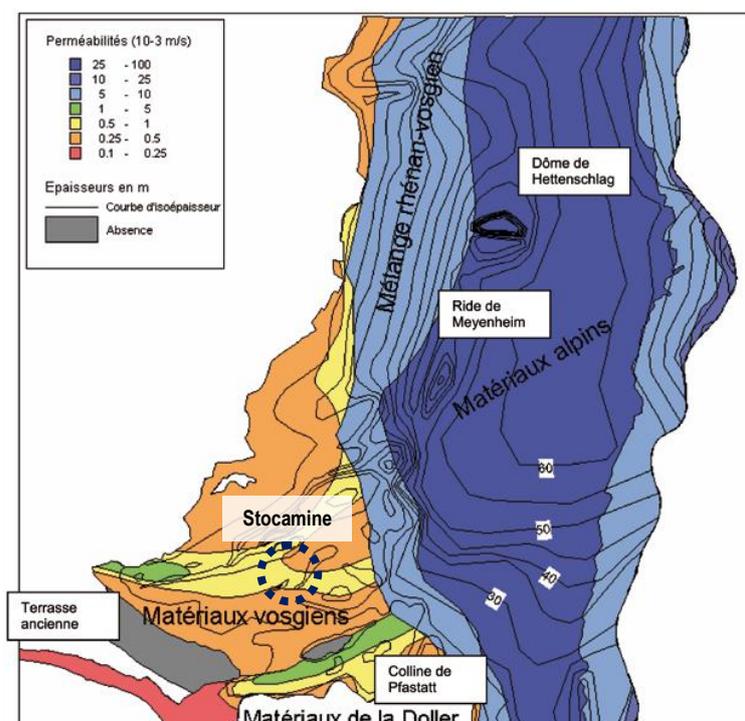


Figure 7. Caractéristiques de la couche 1 d'alluvions récentes supérieures [MDPA]

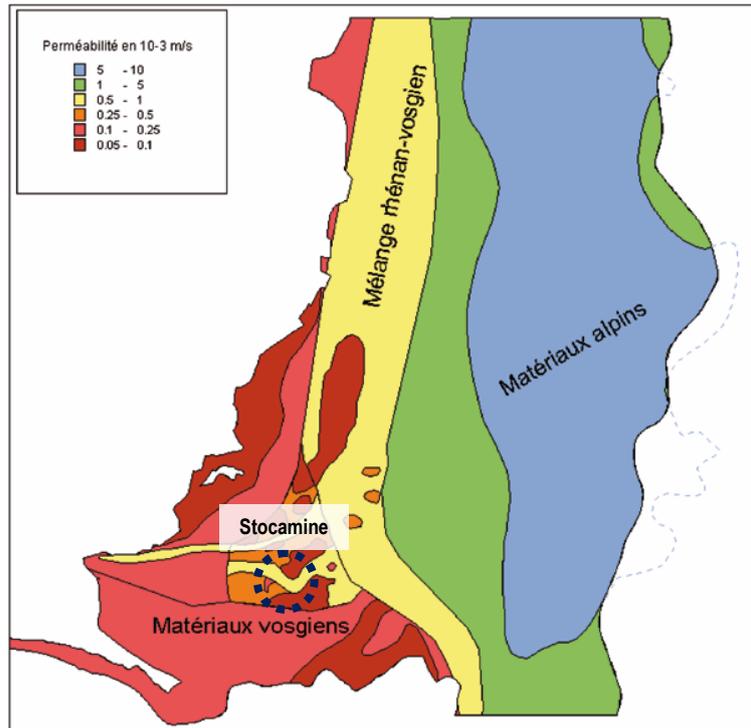


Figure 8. Caractéristiques de la couche 2 d'alluvions anciennes supérieures [MDPA]

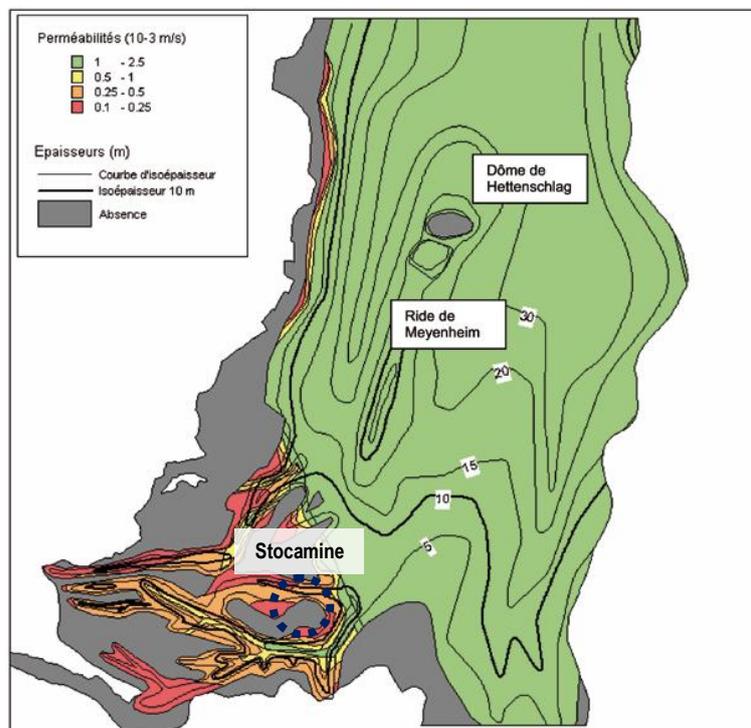


Figure 9. Caractéristiques de la couche 3 d'alluvions anciennes inférieures [MDPA]

2.3.3.2 Productivité

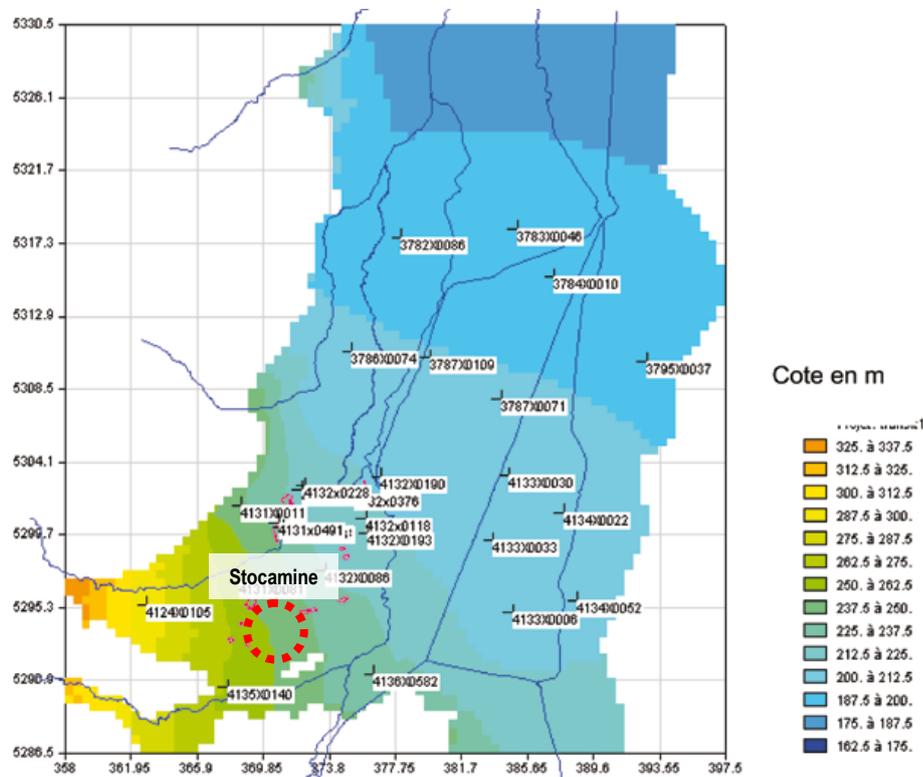
Au puits Joseph, le recouvrement d'alluvions quaternaires épais de 35 m a fourni 2 venues d'eau (MICA, 2004) débitant 60 m³/h entre 0 et 20 m et 2,4 m³/h à 29 m.

Au puits Else, aucune venue d'eau n'a été mise en évidence dans ces alluvions pourtant épaisses de 32 m. Il en a été de même aux puits Amélie 2 et Max, où leur épaisseur atteint respectivement 21 et 27 m.

On rappelle que le puits Amélie 1 a été creusé sur 75 m dans des terrains préalablement congelés et, de ce fait, aucune venue d'eau n'a pu y être mise en évidence dans le Quaternaire (épais ici de 25 m).

2.3.3.3 Piézométrie

Le niveau piézométrique de la nappe d'Alsace est en équilibre avec les précipitations efficaces qui la rechargent, avec les pompages qui la rabattent et avec les cours d'eau qui tantôt s'y infiltrent, tantôt la drainent. Les interactions de la nappe sont fortes avec ces cours d'eau (sauf pour le Rhin dont le cours a été artificialisé) mais également avec les canaux et les drains. La Figure 10 représente la piézométrie de juin 2002 qui a servi de référence à la modélisation en régime permanent réalisée par le BRGM [MDPA, 742] : la nappe s'écoule globalement du piémont vosgien où la piézométrie atteint 330 m NGF jusqu'à la région de Colmar où elle se trouve à 170 m NGF. Dans les conditions moyennes qui ont prévalu au tracé de cette carte, le niveau piézométrique au dessus du site de stockage se trouvait à environ 250 m NGF.



La Figure 11 représente la piézométrie détaillée au-dessus du site de stockage. L'écoulement de la nappe est globalement dirigé d'ouest en est¹⁵. Son niveau piézométrique passe de 260 m NGF aux puits Joseph et Else et à environ 250 m aux puits Amélie et Max.

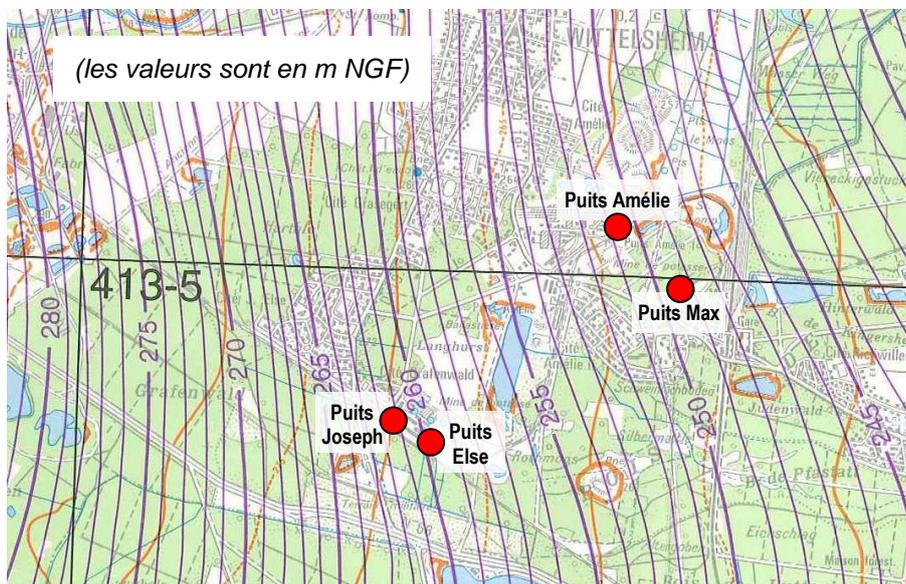


Figure 11. Extrait de la carte piézométrique du bassin potassique

La dissolution du sel des terrils par la pluie et son infiltration dans la nappe a principalement engendré deux panaches d'eaux souterraines salées de plus de 20 km de longueur, connus sous les noms de « langues salées » (Figure 12) :

- la langue salée est, issue des terrils de l'Ochsenfeld puis passant principalement par les terrils Joseph-Else, Amélie, Anna et Fernand ;
- la langue salée ouest, issue des terrils Marie-Louise, Alex et Rodolphe.

La langue est, plus longue, montre une première direction d'écoulement orientée ouest-est dans sa partie amont où elle signe une pollution par les terrils de l'Ochsenfeld issus du secteur de Thann : ce n'est qu'à partir de Mulhouse qu'elle se dirige vers le nord-nord-est, c'est-à-dire dans le sens d'écoulement régional de la nappe d'Alsace. La langue ouest, plus courte, ne comprend pas de partie en amont des terrils des MDPA : elle s'écoule donc directement vers le nord-nord-est, soit parallèlement à la partie aval de la langue est.

En outre, il existe des possibilités de salure naturelle de la nappe par remontée de saumures profondes le long de failles ou par dissolution de diapirs. Cela pourrait notamment être le cas entre Raedersheim et Ungersheim.

¹⁵ plus précisément de l'ouest-sud-ouest vers l'est-nord-est.

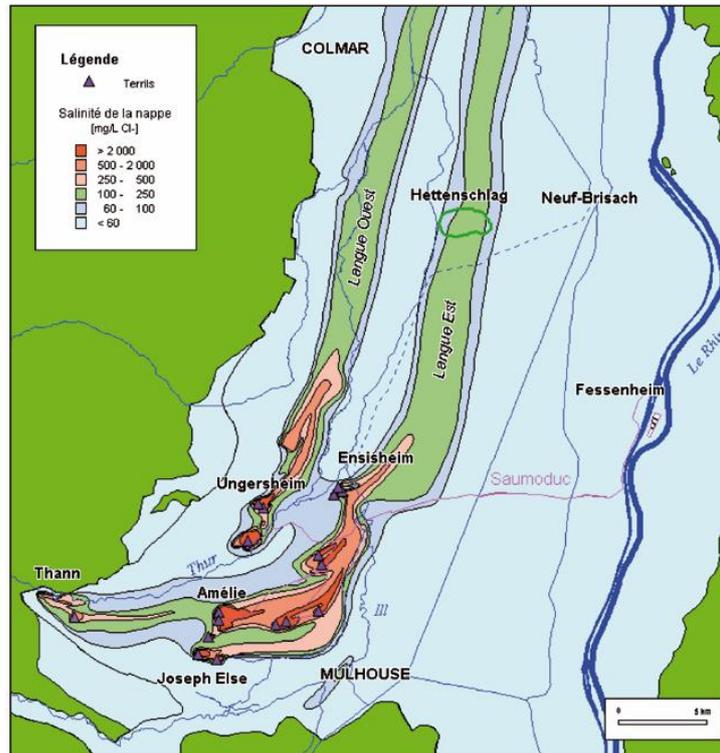


Figure 12. Carte de la salure de la nappe en 2005 (MDPA, 2008)

2.4 CONCLUSION DU CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Le site de stockage se trouve à environ 500 m de profondeur, à la base d'un « bloc-hôte » formé par la série salifère supérieure du remplissage tertiaire du fossé rhénan. Les données analysées montrent qu'il s'agit d'une zone exempte d'eau souterraine, qui peut donc être considéré comme a priori imperméable, reposant sur plus de 1000 m de série à dominante marneuse qui l'isole des aquifères captifs sous-jacents.

Cet ensemble a pour limite supérieure le toit du sel gemme en couches, situé vers 250 m de profondeur, et pour limite inférieure les terrains du Secondaire, vers 1500 m de profondeur. Aucune venue d'eau n'y a jamais été rencontrée dans le secteur qui nous intéresse à l'exception de celle mentionnée à 411 m au cours du creusement du puits Else.

Par contre, de part et d'autre de ce bloc-hôte se trouvent des formations où la présence de l'eau est plus ou moins marquée. En direction de la surface, il est notamment surmonté de formations de plus en plus perméables :

- un premier horizon de marnes, anhydrite et sel, épais de 170-180 m, renfermant quelques venues d'eau salée (30 g/l) et de faible débit (4 l/min) ;
- le niveau à gypse d'une centaine de mètres d'épaisseur au sein duquel l'eau est toujours présente ; lorsqu'il est recoupé, ce niveau peut produire un écoulement de 30 l/min d'eau douce ;
- la nappe alluviale d'Alsace, principal aquifère régional, qui alimente les deux niveaux sous-jacents par drainage.

Il résulte de cette configuration que le site de stockage bénéficie d'une situation favorable sur le plan hydrogéologique car il se trouve « au cœur d'une série salifère imperméable qui l'isole efficacement des aquifères sus et sous-jacents » [4, 22].

Sur le plan tectonique, il existe par contre quelques failles qui, lorsqu'elles ont été recoupées, ont fourni des venues d'eau significatives dans les niveaux superficiels du Stampien.

Le présent document est basé sur la synthèse des études réalisées par Stocamine ou les MDPA. La description de la succession géologique des terrains et du comportement néotectonique du secteur d'étude devront néanmoins faire l'objet d'une étude bibliographique complémentaire compilant des données issues de la littérature scientifique générale comme, par exemple, les travaux de Mme. Blanc-Valleron.

Il conviendra notamment de passer en revue les informations suivantes :

- rôle des failles dans les circulations aquifères (superficielles et profondes) ;
- vérification de l'impossibilité d'apparition de dôme de sel ou de diapir au droit du site de stockage ;
- isolement du bloc-hôte vis-à-vis des niveaux aquifères supérieurs et inférieurs.

La Figure 13 (page suivante) résume la situation hydrogéologique de ce site d'après les données analysées.

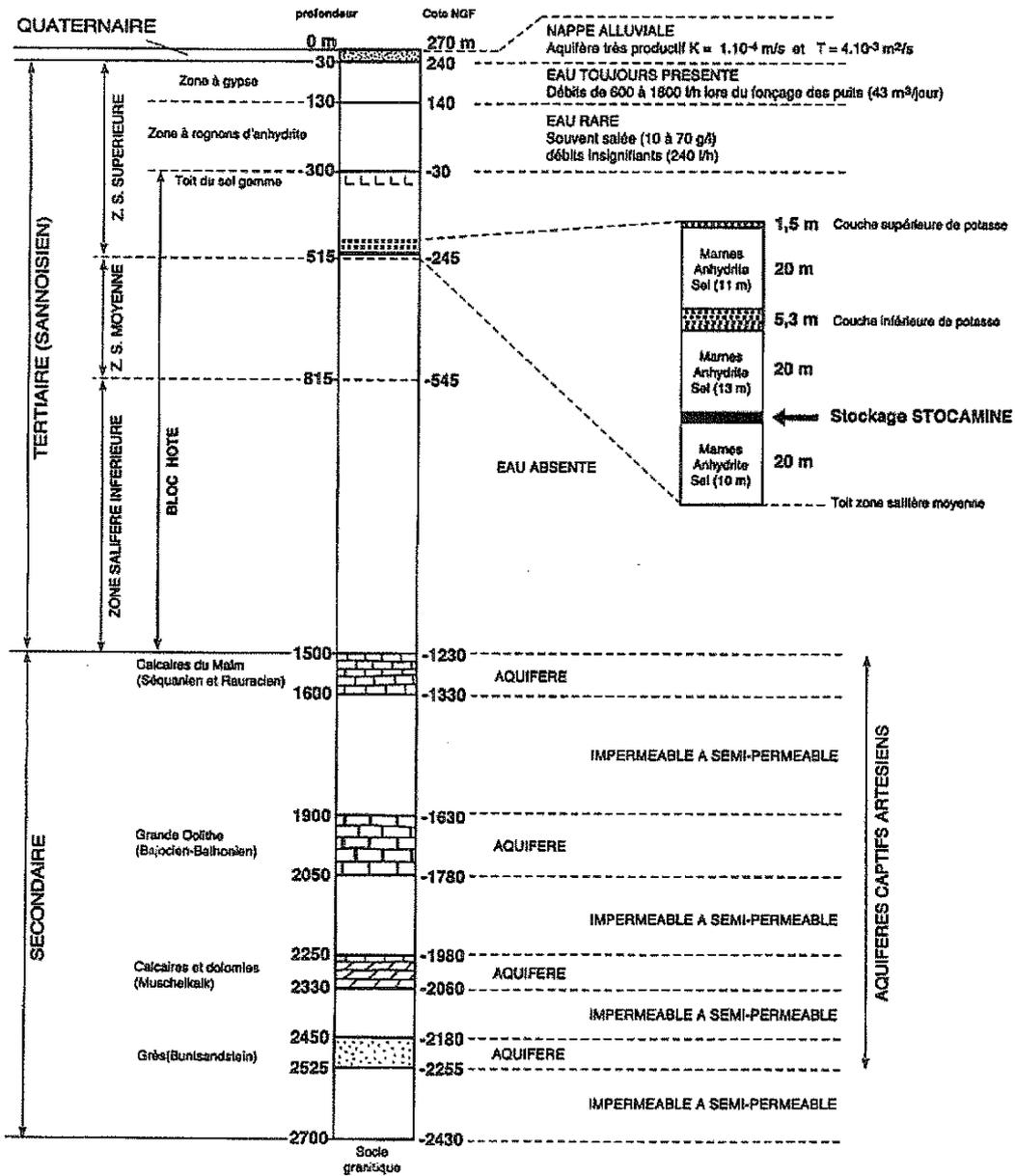


Figure 13. Coupe stratigraphique simplifiée et caractéristiques hydrogéologiques à la verticale du site [15]

3. SCENARIOS D'ENNOYAGE DU SITE

Nous avons illustré le bassin potassique et ses puits par la Figure 14. Il est rappelé que le bassin comporte 15 puits dont 2 seulement sont encore ouvert (Joseph et Else) pour la desserte du site de stockage.

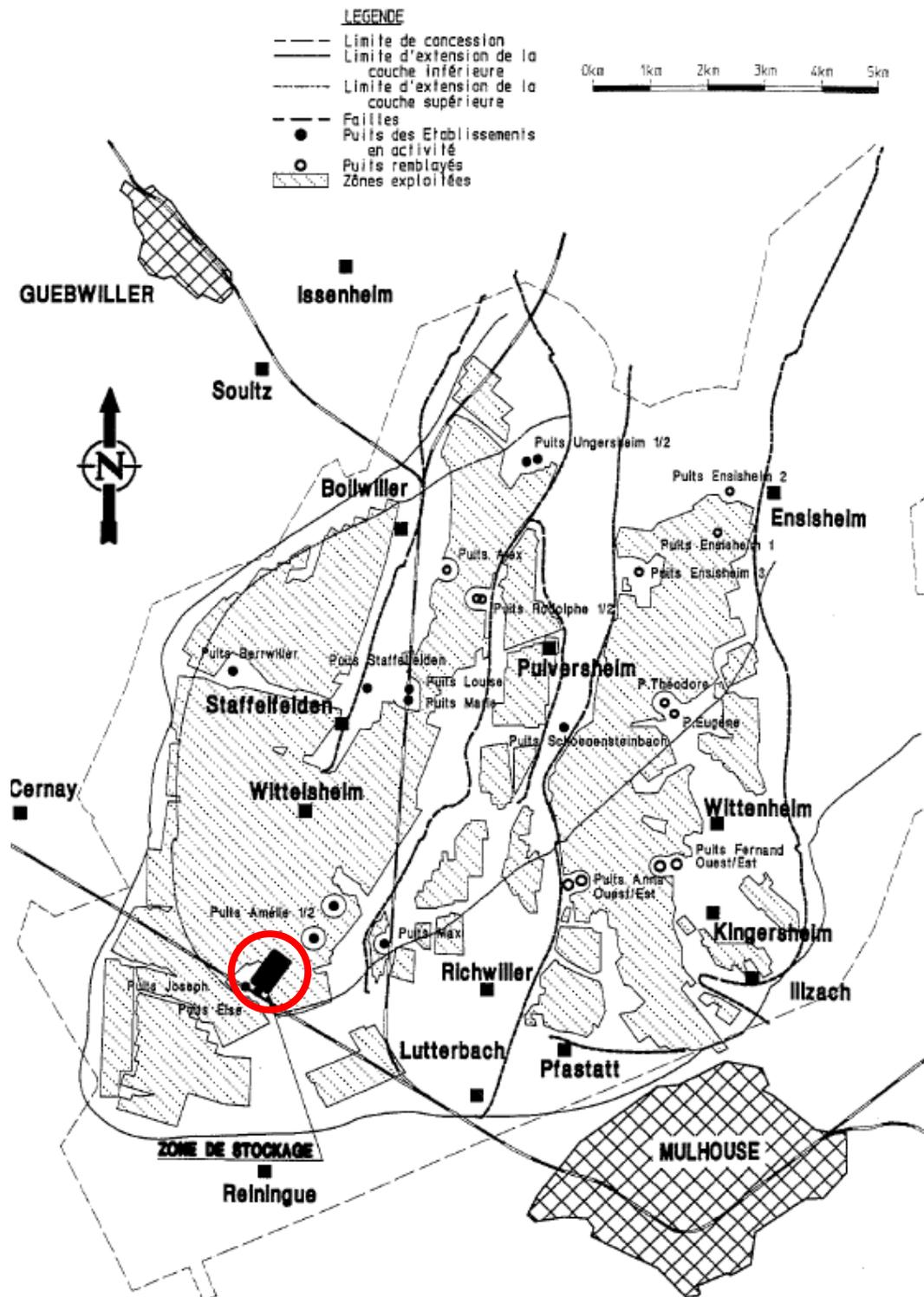


Figure 14. Carte du bassin potassique d'Alsace (EMC, 1996)

3.1 PRESENTATION DU PHENOMENE

3.1.1 Origine et qualité des eaux de percolation

Il a été précisé précédemment que les bancs de sel et de potasse sont exempts d'eau souterraine, mis à part quelques poches très localisées d'eaux salées et fossiles. La quasi totalité des venues d'eau observées dans les différentes mines provient des puits qui recoupent les terrains surmontant les vides miniers [39, 9]. Bien que ces puits aient été munis de cuvelage destinés à « aveugler » les venues d'eau rencontrées, il y a toujours eu un débit d'écoulement significatif à leur base. Autrefois, comme cela est encore pratiqué aux puits Joseph et Else, cette eau était récupérée dans des puisards creusés à la base des puits et rejetée en surface.

Lors de l'exploitation de la mine Amélie, à laquelle appartient le site de stockage, les vides miniers étaient desservis par 5 puits :

- le puits Joseph par lequel se faisait la descente du personnel et des déchets à stocker ;
- le puits Else servant de retour d'air ;
- les puits Amélie 1 (puits d'extraction), Amélie 2 et Max qui desservaient l'exploitation de potasse sus-jacente et qui ont été comblés depuis.

Lors de l'étude MICA en 2004, ces 5 puits étaient encore ouverts et accessibles et les arrivées d'eau observées à leur base étaient de [28, 163] :

- 300 m³/mois pour les puits Joseph et Else ;
- 360 m³/mois pour les puits Amélie I et II ;
- 0 m³/mois pour le puits Max en cours de fermeture par un épais bouchon.

Le débit total d'exhaure était donc de 660 m³/mois, soit environ 0,9 m³/h. L'eau provenait des formations supérieures¹⁶, peu productives mais alimentées par l'aquifère alluvial sus-jacent.

Ces données sont cohérentes avec le débit de « moins de 100 m³/mois » mesuré au puits Else en phase d'exploitation, sachant en outre que ce puits servait de retour d'air [1, 130 et 140].

La qualité de cette eau a été analysée à de rares reprises, notamment (Tableau 2) :

- dans le puisard du puits Joseph, le 31/07/1997 ;
- en mai 1943 dans le travers-banc T (TBT) de la mine Marie-Louise à 350 m de profondeur ;
- en octobre 1982 dans la voie au mur (VAM) 601 à 4 m sous la couche au nord du puits Max.

¹⁶ Zone à gypse du sannoisien pour les puits Joseph, Else et Amélie II, zone à Mélette du Stampien pour les puits Amélie I et Max.

Tableau 2. Analyse des ions majeurs de venues d'eau profondes (MICA, 2004)
(les valeurs sont en mg/l)

Venue d'eau	Ca	Mg	Na	K	Cl	SO4	HCO3*	NO3
Puisard Joseph	39,9	4,75	280	23	476	52,5	26,31	13,7
TBT	6 180	2 070	111 750	1 340	189 620	1 130	586	Non dosé
Voie 601	5 100	1 200	114 900	5 000	193 800	1 300	Non calculable	Non dosé

*Teneurs calculées à partir du bilan ionique

Les eaux récupérées dans la mine montrent trois degrés de minéralisations :

- les eaux profondes issues du TBT et de la VAM, pourtant distantes de 5 km, présentent un faciès similaire, de type chloruré-sodique, avec une forte minéralisation (respectivement de 313 g/l et de 322 g/l) ; de même, l'eau d'exhaure issue du puisard du puits Else possède une salinité¹⁷ de 262 g/l (Tableau 3) [1, 130] ; par ailleurs, lors d'une réunion tenue en février 2010, les MDPA ont signalé l'existence de percolations¹⁸ d'eau fortement salée (275 g/l) à l'étage -286 m du puits Amélie et d'eau à saturation à la base des puits Amélie II (cf. Tableau 4) et Max ;
- les eaux provenant de faciès plus superficiels sont moins chargées en sels ; ainsi, il a été vu précédemment que les venues d'eau de la partie intermédiaire de la zone salifère supérieure avaient une salinité stable autour de 30 à 32 g/l ; le Tableau 5 montre que les eaux du Chattien ont également une salinité de 30 g/l ; la Figure 13 signale la présence rare d'eau « souvent salée (10 à 70 g/l) » dans la couche à rognons d'anhydrite de la zone salifère supérieure, entre 130 et 300 m de profondeur ;
- par contre, l'eau récupérée dans le puisard du puits Joseph est très peu minéralisée (0,9 g/l) bien qu'elle présente toujours le même faciès chloruré-sodique ; la présence de nitrates atteste également de son origine superficielle.

Tableau 3. Résultat d'analyse de l'eau d'exhaure du puits Else [1]

Cl ⁻	155 g/l	Na ⁺	96 g/l
SO4 ²⁻	5,3 g/l	K ⁺	2,5 g/l
KCO3 ⁻	0,08 g/l	Ca ⁺⁺	1,7 g/l
NO3 ⁻	0,04 g/l	Mg ⁺⁺	1,2 g/l

Tableau 4. Analyses récentes de salinité de l'eau issue du puits Amélie II

¹⁷ dont paradoxalement 40 mg/l de nitrates qui sont des ions principalement issus des épandages d'intrants agricoles en surface ; il s'agit donc d'une eau dont l'origine est (partiellement ou totalement ?) superficielle et qui a acquis une forte minéralisation au cours de sa percolation descendante.

¹⁸ Dans les puisards situés à la base de ces puits, il a été constaté que le niveau d'eau pouvait être stabilisé en pompant au débit de 4,2 m³/j à Amélie I, de 3,2 m³/j à Amélie II et de 0,8 m³/j à Max.

(d'après des documents fournis par les MDPAs)

Amélie 2	Date	Sodium (mg/l)	Chlorures (mg/l)
Puisard Nord	01/09/2009	240 130	194 922
Puisard Sud	01/09/2009	283 850	182 092
Niveau -286 m Est	22/10/2010	103 250	169 928
Niveau -286 m Nord	22/10/2010	101 125	174 859

Les analyses isotopiques réalisées en 1981 et 1985 sur des échantillons d'eaux profondes fournissent des teneurs en tritium de 8 à 38 UT pour les eaux minières et de 61 à 68 UT pour les eaux de la nappe d'Alsace. Il ressort que les eaux minières, pour la plupart échantillonnées en profondeur, « contiennent une part non négligeable d'eau qui a mis moins de 30 ans pour s'infiltrer de la surface jusqu'aux travaux miniers » [28, 149].

Ces analyses isotopiques confirment donc la participation d'eaux d'origine superficielle à l'alimentation des venues d'eau profondes. Ces données sont en désaccord avec l'hypothèse selon laquelle il s'agirait de poches d'eaux fossiles profondes et avec l'observation de leur tarissement rapide. Ce point devra être éclairci dans la suite de l'étude.

3.1.2 Etat actuel de l'ennoyage

Si l'on admet que de l'eau peut passer au niveau des puits de mine remblayés, force est d'admettre que l'ennoyage des mines de potasse d'Alsace a déjà débuté [MDPA, 1035]. Le taux d'ennoyage actuel serait de l'ordre de 5% des vides miniers, sachant que les secteurs les plus profonds et les plus septentrionaux (Ungersheim et Ensisheim) sont probablement déjà en grande partie noyés (Figure 15) : on rappelle en effet que seuls les puits Joseph et Else possèdent encore une exhaure qui empêche actuellement l'ennoyage de ce secteur minier. Cependant, les données de terrain manquent pour valider ce taux d'ennoyage.

Concernant l'ennoyage, Combes & Ledoux (1990) envisagent deux cas de figure [4,29] :

- dans le premier cas, la concession Amélie est maintenue dans son état actuel ; les opérations de maintenance des puits sont effectuées régulièrement et les eaux de fuite sont pompées et rejetées en surface ; dans cette hypothèse, seules les galeries de circulation creusées dans les horizons salifères vont se refermer par suite du fluage du sel et la sûreté du stockage sera conservée tant que cet état sera maintenu ;
- dans le second cas, la concession Amélie est abandonnée après le rebouchage des derniers puits de mine ; si ce rebouchage était parfait et qu'aucune venue d'eau ne parvenait à la base des puits, on retomberait dans le cas précédent ; cependant, cette hypothèse est peu réaliste du fait de l'existence d'eaux percolant au travers des bouchons de puits ainsi qu'à l'extrados des tubages.

Le premier cas n'apparaissant pas envisageable sur le long terme, seul est étudié ici le second cas.

La principale question qui se pose concerne la durée d'envoyage qui est fonction du débit d'envoyage et du volume des vides.

Le volume des vides va évoluer au cours de l'envoyage sous l'influence de deux effets antagonistes :

- d'une part, le fluage du sel qui tend à refermer les vides ;
- d'autre part, le remplissage des vides par l'eau d'envoyage qui tend à augmenter le volume de vide par dissolution du sel (jusqu'à saturation de la saumure) mais qui peut également avoir une incidence sur le fluage du sel du fait de la pression de saumure et de l'influence de cette dernière sur les propriétés mécaniques du sel.

La durée d'envoyage de la mine est un paramètre majeur qui conditionne pour partie le devenir du site de stockage car il agit sur la vitesse de fermeture des vides. Ce paramètre pourrait affecter significativement le débit d'épanchement en surface de saumure potentiellement contaminée en provenance du site de stockage.

A cet effet, il est indéniable que la connaissance du niveau d'envoyage actuel des secteurs abandonnés serait une information importante pour mieux estimer la durée d'envoyage du secteur qui nous intéresse.

Après avoir délimité la zone d'étude, le document va donc traiter successivement le débit d'envoyage, la durée d'envoyage et le débit d'épanchement de saumure après envoyage.

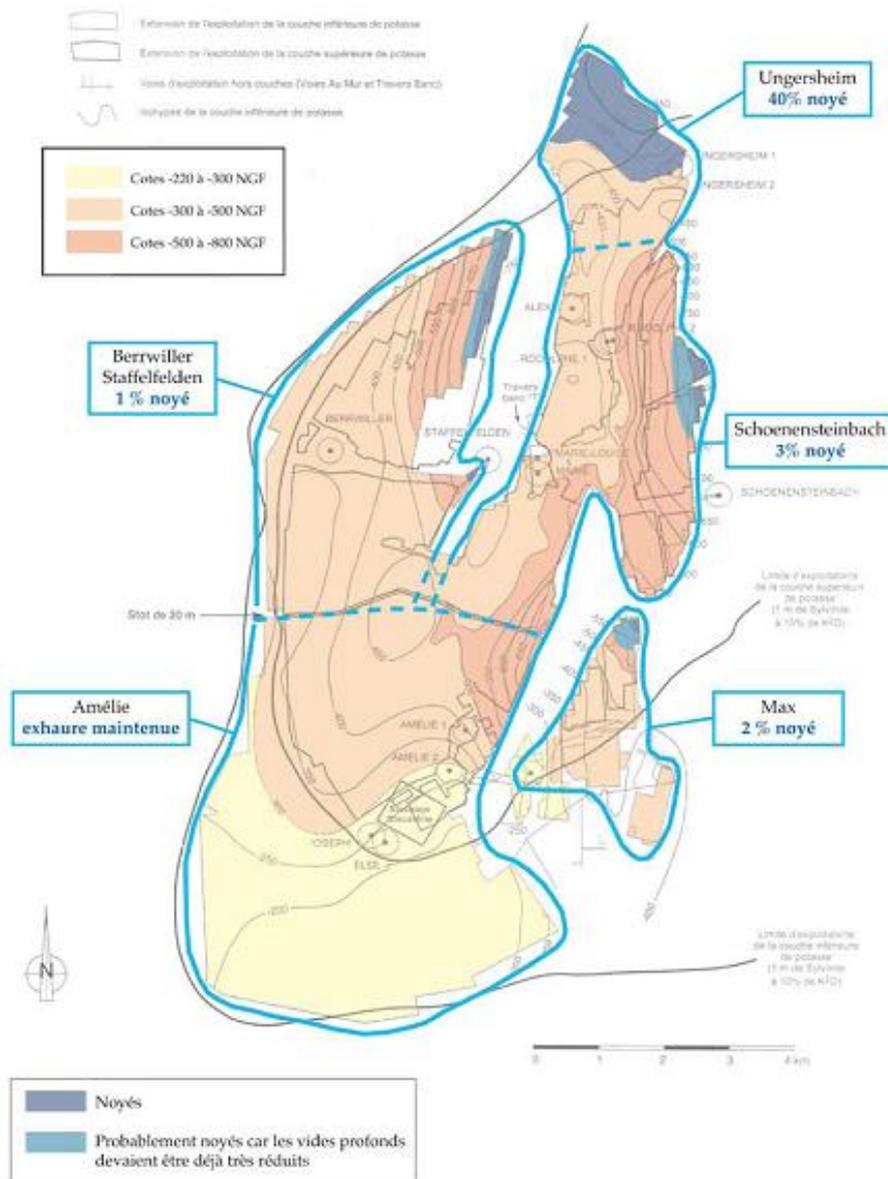


Figure 15. Estimation du remplissage actuel du secteur ouest (Cesame, 2008)

3.2 DELIMITATION DU BLOC-HOTE

3.2.1 Limites naturelles

3.2.1.1 Limite verticale

Le bloc-hôte qui renferme le site de stockage a pour limite supérieure le toit du sel gemme en couches, situé vers 300 m de profondeur, et pour limite inférieure les terrains du Secondaire, vers 1500 m de profondeur (voir Figure 13 en page 30).

Au sein de cette série salifère, globalement imperméable, il n'y a pas d'aquifère à proprement parler mais « quelques horizons gréseux plus ou moins perméables dans lesquels l'eau peut être présente » [13, 61]. Le Tableau 5 synthétise leurs principales caractéristiques.

Aucune venue d'eau n'aurait été signalée au-delà de 300 m de profondeur, ce qui valide la cote du toit du bloc-hôte [13, 61]: il faut toutefois signaler le cas du puits Else qui a montré une venue d'eau de 0,9 m³/h à 411 m de profondeur au toit des marnes bitumineuse du sommet du complexe salin qui renferme le site de stockage [28, 70].

Tableau 5. Caractéristiques des horizons perméables du Tertiaire [13]

Horizon perméable		Terrains	Épaisseur (m)	Puits débitant de l'eau	Débit (l/mn)	Salinité	Niveau productif (profondeur) (m)
Chattien (absent dans le secteur du stockage)		Grès	20-50	Marie-Louise, Rodolphe Alex	- 1-500 (20 après 8J)	- 30	276
Stampien	Inf.	Marnes à foraminifères et Amphisiles	20	Amélie I	7	-	
	Moy-sup.	Marnes à Melettes et à Cyrène	Importante	Marie	4-120 exception 750	-	25-85
Sannoisien	Partie sup. du salifère sup.	Zone à Gypse	100	Amélie II Joseph	31 15	eau douce	
	Partie int. du salifère sup.	Marne + anhydrite + sel	180	6 puits sur 22 Amélie II	<4 35 réduit à 1,5	élevée	236
	Partie inf. du salifère sup.	Marne + anhydrite + sel	200-250	Aucun	-	-	-

Si, dans le secteur étudié, une seule venue d'eau de faible importance a été rencontrée au sein du bloc-hôte, par contre, de part et d'autre de celui-ci, se trouvent des formations où la présence de l'eau est plus ou moins marquée :

- à son toit, il est surmonté par trois formations de plus en plus perméables en direction de la surface :
 - o la zone à rognons d'anhydrite, renfermant quelques venues d'eau peu salée (30 g/l) et de faible débit (4 l/min) ;
 - o la zone à gypse, au sein de laquelle l'eau est toujours présente avec des écoulements pouvant atteindre 30 l/min d'eau douce ;
 - o la nappe alluviale d'Alsace, principal aquifère régional qui alimente notamment en eau douce les deux niveaux sous-jacents par drainance.
- à sa base, le premier aquifère est représenté par les calcaires du Malm, hydrauliquement en charge mais séparés du stockage par environ 1000 m de zone salifère moyenne et inférieure, formée d'un ensemble marneux et salifère au sein duquel aucun niveau aquifère n'a été signalé

Le sel gemme intact présente des perméabilités très faibles, comprises entre 10^{-19} et 10^{-21} m² (Ghoreychi, 2003 ; Tsang, 2004). Une étude sur les risques de transport des polluants par diffusion à travers le sel sain lors de l'ennoyage du site de stockage a été menée par BMG (2004) : elle estime qu'il faudrait plus de 100 millions d'années pour qu'un flux s'établisse entre le fond et la surface à travers les terrains naturels non perturbés. Les auteurs concluent que « à 50, 100 ou 1000 ans après la fermeture du stockage, les polluants ne peuvent en aucun cas atteindre la nappe phréatique [...] suite à une diffusion à travers la zone salifère » [30, 40].

Il est vrai que le phénomène de diffusion au sein du sel intact doit être très lent. Cela signifie que le sel intact est très fortement imperméable et ne peut pas véhiculer d'eau souterraine : la question qui se pose est de savoir si l'exploitation de la mine de potasse, le creusement du site de stockage et/ou l'incendie qui s'y est déclaré, ont pu affecter les terrains sus-jacents en créant une zone décomprimée ou fissurée susceptible d'avoir atteint des zones aquifères ?

D'après MICA (2004), les remontées de fissures au-dessus des couches de potasse exploitées affecteraient une bande de terrain dont l'épaisseur varie de 60 m dans la zone sud-est de l'exploitation à 200 m au droit du stockage (Figure 16).

Les MDPAs confirment cette évaluation en précisant que l'exploitation minière n'a pas produit de rupture en surface mais seulement un affaissement souple des terrains. Les vides souterrains résiduels se présentent sous la forme « d'une zone déstructurée et fissurée d'une quarantaine de mètres d'épaisseur autour des champs d'exploitation » [MDPA, 1015].

Comme cela a été précisé dans l'offre de l'INERIS, l'existence, l'extension et l'amplitude de la zone endommagée au toit du stockage feront l'objet d'une modélisation numérique. Cette étude prendra également en considération les sollicitations thermo-mécaniques liées à l'incendie du bloc 15.

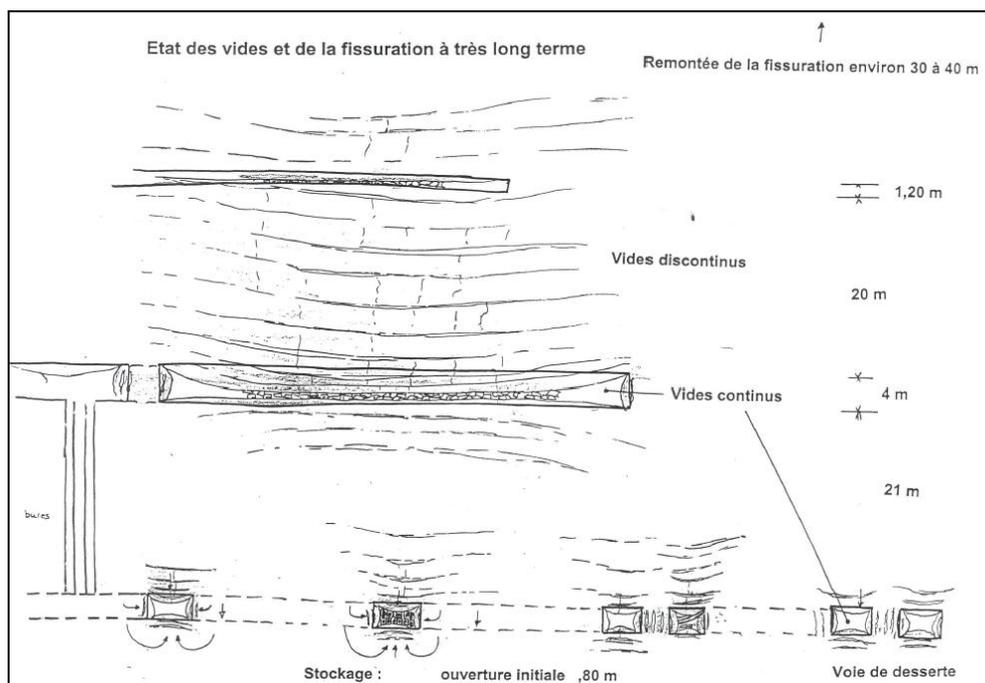


Figure 16. Etat des vides et de la fissuration à très long terme (MICA, 2004)

3.2.1.2 Limite latérale

Si les limites verticales du bloc-hôte apparaissent bien tranchées, il n'en va pas de même de ses limites latérales.

Cesame (2008) rappelle qu'il existe une séparation franche entre le secteur est et le secteur ouest du bassin potassique [39, 10]. Elle correspond à une flexure qui

décale les couches de minerai d'environ 150 m en hauteur et qui rend les couches inexploitable sur près de 300 m de largeur (Figure 17). Cette flexure est également bien représentée sur la Figure 18 en page 41. Elle se trouve près du puits Max, à 1,5 km de du site de stockage. Cependant, malgré un rejet important, cette structure tectonique n'a montré aucune venue d'eau lorsqu'elle a été recoupée par une galerie de service.

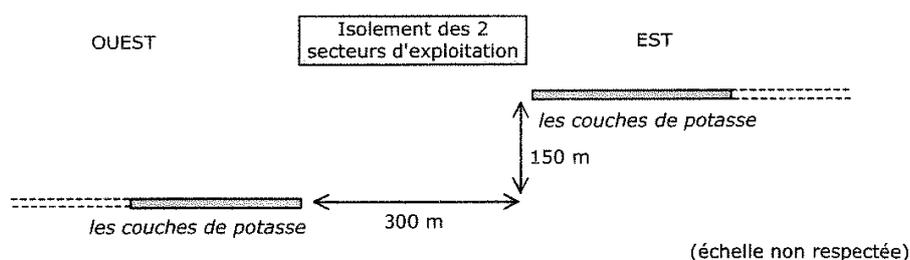


Figure 17. Flexure séparant les secteurs est et ouest du bassin potassique (Cesame, 2008)

3.2.2 Connexions entre le site de stockage et les autres compartiments

3.2.2.1 Rôle des failles

Aux environs du site de stockage, la structure tectonique est monoclinale et présente peu de failles. L'une d'entre elles, précédemment décrite, se trouve à 1,5 km du site de stockage : caractérisée par un rejet de 170 m, elle n'a montré aucune venue d'eau lorsqu'elle a été recoupée par une galerie de service.

Il a également été vu précédemment que le creusement du « travers banc T », qui devait relier les mines Marie-Louise et Berrwiller, a recoupé une faille dans les grès aquifères du Stampien : cette faille a fourni une abondante quantité d'eau qui a nécessité « plusieurs interventions de colmatage » pour la juguler [28, 144]. Il est toutefois rappelé que ces grès aquifères se trouvent à l'extérieur du bloc-hôte et à plusieurs centaines de mètres au-dessus du site de stockage dont ils sont séparés par la partie supérieure de la dernière zone salifère.

Ces mêmes formations du Stampien ont également montré une zone broyée qui a conduit à un dédoublement de la série géologique du Stampien au droit du puits Amélie I : dans ce puits, les couches à Mélettes et les schistes à Amphisiles, situés entre 25 et 135 m de profondeur, se retrouvent de nouveau entre 135 et 245 m de profondeur. Au niveau de cette zone broyée, à 137 m de profondeur, se trouve une petite venue d'eau de 7 l/min.

Enfin, au puits Alex, où son épaisseur atteint 300 m, des venues d'eau importantes ont été observées dans le Chattien. Les zones les plus productrices correspondent à des niveaux gréseux disloqués ou broyés, comme celui situé à 276 m de profondeur qui a fourni un débit initial de 500 l/min.

Les quelques données en faveur d'un rôle hydrogéologique des failles concernent les failles « superficielles » qui recoupent des terrains aquifères sus-jacents au bloc-hôte (Stampien et Chattien). La seule information disponible sur le rôle hydrogéologique des failles profondes affectant le bloc-hôte est le recoupement de la faille située à 1,5 km du site de stockage en direction du puits Max : aucune venue d'eau n'a été notée. Cependant, une étude complémentaire devra être conduite par l'INERIS sur le rôle potentiel des failles (existantes ou futures) comme chemin de transfert de saumure ou de gaz, en s'appuyant sur les conclusions d'un expert en néotectonique régionale.

3.2.2.2 Connexion par les vides miniers

On sait que le site de stockage et l'exploitation de potasse communiquent par des galeries de desserte et par des puits. Pour MICA (2004), ces communications sont « nombreuses et difficilement dissociables » [28, 41] : il convient donc de considérer que le site de stockage fait partie intégrante de la mine Amélie. Par ailleurs, ce site communique également par plusieurs voies avec la mine Max [28 41], laquelle est elle-même en relation avec la mine Amélie par des galeries de desserte [28, 10]. Malgré la flexure qui les sépare, les mines Amélie et Max sont donc en communication par le biais des galeries creusées pour l'exploitation.

Ces deux mines sont théoriquement isolées de la mine Marie-Louise par un stot de 20 m d'épaisseur dont il sera question en détail dans le chapitre suivant. Dans l'hypothèse où ce stot existe bel et bien - et qu'il reste intègre dans l'avenir - les mines interconnectées avec le stockage sont donc les mines Amélie, Max et Joseph-Else. Cet ensemble, qui représente environ 90 Mm³ de matériaux extraits, est dénommé « compartiment Amélie » par Cesame [37, 5]. Son pendant, de l'autre côté du stot, est le « compartiment Marie-Louise » qui regroupe les mines Marie-Louise, Rodolphe, Alex et Ungersheim et qui concerne 110 Mm³ de matériaux extraits.

Dans l'hypothèse où ce stot ne joue plus son rôle, ces deux compartiments peuvent être considérés comme un seul ensemble totalisant un volume de matériaux extraits de 200 Mm³. Ce vaste ensemble minier est alors désigné par MICA (2004) sous l'appellation de « Mine de Wittelsheim » ou de « bassin de Wittelsheim » et par Cesame (2006) sous l'appellation de « Secteur Ouest ».

3.2.2.3 Connexion par le biais du stot

Entre les mines Amélie et Marie-Louise, il existe donc un stot d'une largeur de 20 à 50 m [39, 11], représenté sur la Figure 15, ou sur la Figure 18. Il est cependant mentionné dans plusieurs rapports¹⁹ que ce stot a été percé plusieurs fois par des trous de sondages réalisés pour le bouclage des cheminements topographiques.

Il sera vu à diverses reprises dans ce document que le rôle de ce stot est très important sur le plan hydrogéologique. En effet, le débit d'ennoyage, le volume de vides à envoyer (donc la durée d'ennoyage), la concentration de la saumure en

¹⁹ [4], [28], [31], [37]

polluants et les points potentiels d'épanchement de saumure en surface seront différents suivant que le stot est intègre ou pas.

Le bloc-diagramme de la Figure 18 permet de mieux visualiser la position de ce stot par rapport au site de stockage et aux principales mines intéressées.

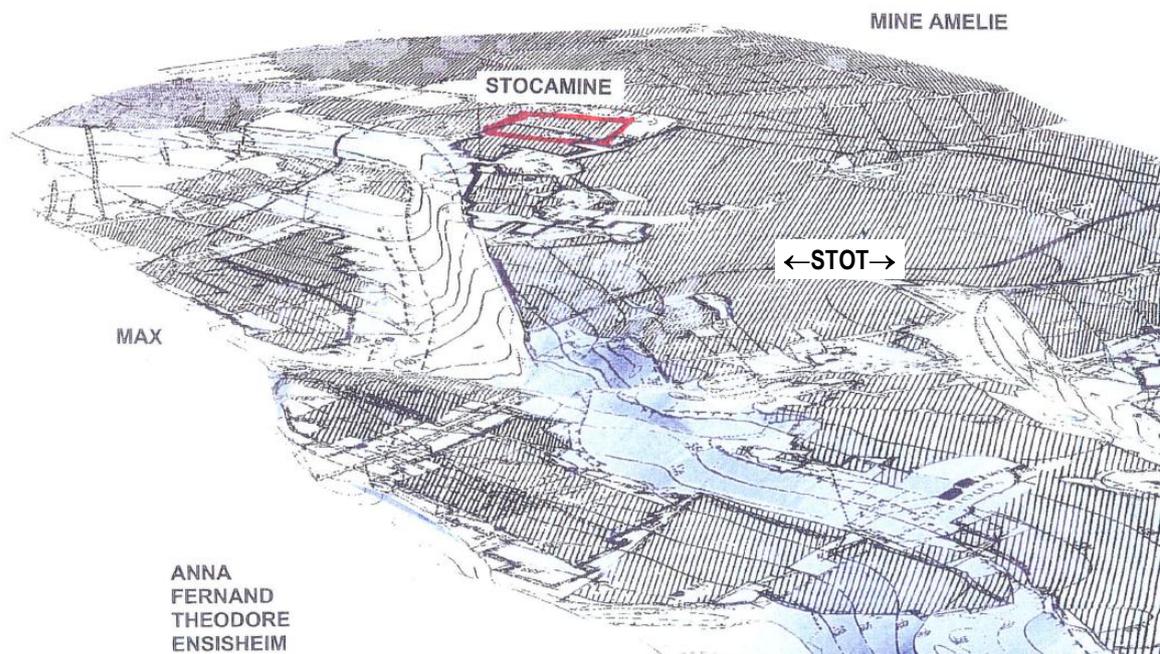


Figure 18. Extrait du bloc-diagramme des exploitations minières [28]

Il nous a paru intéressant de citer ci-après quelques extraits de documents traitant du rôle de ce stot afin de donner une idée de l'ambiguïté qu'il représente. En règle générale, les auteurs qui abordent ce sujet et qui mentionnent l'existence de ce stot, précisent qu'il est – ou qu'il sera – fragilisé en cours d'ennoyage mais, au final, ils ne se prononcent pas quant à son rôle hydrogéologique précis.

Ainsi, Combes & Ledoux (1990) considèrent deux hypothèses d'ennoyage suivant l'état et la résistance de ce stot tout en précisant que, pour eux (et en 1990), il ne permet pas la communication actuelle entre les deux mines [4, 27]. Ils considèrent donc ce stot comme le point sensible du bloc-hôte, notamment sur le long terme. Du fait du pendage des couches exploitées, le cul-de-sac que forme ce stot au nord de la mine Amélie se trouvera en aval pendage du côté de cette mine : « il est donc raisonnable de penser que l'attaque par dissolution sera très réduite sur cette face du stot car l'eau qui baignera sera peu mobile et peu agressive » [4, 33]. Cependant, du côté de la mine Marie-Louise, ce stot se trouvera alors en amont pendage, ce qui pourrait favoriser ici « une érosion régressive par de l'eau non saturée qui a tendance à remonter » [4, 33]. De ce fait, « on ne peut donc exclure un percement du stot à très long terme qui ne pourrait en tout état de cause intervenir, qu'après l'ennoyage de la mine Marie-Louise ». Par contre, pour MICA (2004), « il est peu probable qu'une quelconque dissolution [de ce stot] intervienne malgré sa situation en amont pendage » car les puits entrants sont trop éloignés du stot pour que l'eau ne soit pas déjà saturée, que ce soit en amont pendage (1 à 4 km) ou en aval pendage (> 2 km) [28, 204].

Pour IDS (2004), la seule prise en compte de la largeur trop faible du stot « conduit à envisager l'existence d'une relation hydraulique entre les deux exploitations au travers d'une zone foudroyée » [31, 22]. Cependant, au final, IDS a réalisé ses calculs en considérant conjointement le cas de la mine Amélie isolée et en connexion avec le reste du bassin de Wittelsheim.

Pour MICA (2004), le stot « a cependant été percé plusieurs fois par des trous de sondages réalisés pour effectuer les bouclages de cheminements topographiques » [28,14]. Ces auteurs rappellent qu'il n'y a pas de communication franche avec la mine Marie-Louise mais que l'existence de ce maigre stot conduit à penser « qu'une communication hydraulique peut s'établir entre la mine Amélie et toutes les mines du Nord du bassin de Wittelsheim qui communiquent entre elles » [28, 31].

Pour Cesame (2006), « 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 » [37, 5].

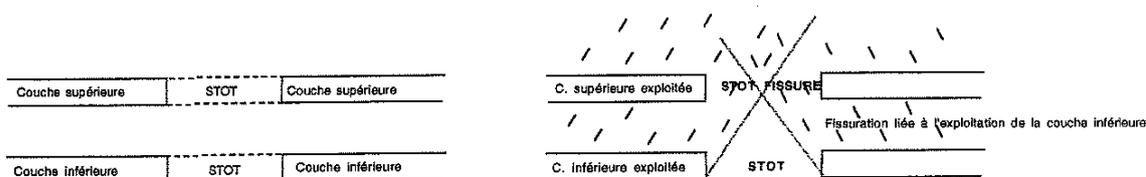


Figure 19. Schématisation des hypothèses [37]

Enfin, pour Cesame (2008), l'épaisseur de ce stot (20 à 50 mètres selon les endroits) « apparaît faible au regard de la zone d'influence de l'exploitation (fissuration, décompression des terrains) qui est nette sur une quarantaine de mètres autour de la zone exploitée » [39, 11]. De ce fait, il a sans doute été fissuré « au moins dans la couche supérieure », comme représenté en Figure 19.

On constate d'une part que l'hypothèse de la pérennité (voire de l'existence même) de ce stot est importante et que d'autre part, les prises de position des uns et des autres ne sont pas franches, même si la probabilité est plus forte que ce stot - du moins à long terme - ne joue pas son rôle d'isolement de la mine Amélie.

En accord avec Cesame (2006), nous considérerons donc que l'hypothèse d'une compartimentation étanche de l'exploitation de part et d'autre de ce stot est peu probable mais qu'elle reste envisageable : les calculs effectués avec et sans ce stot seront donc présentés conjointement et notre avis sur son rôle sera donné en conclusion.

Il existe donc les deux hypothèses suivantes:

- la mine Amélie constitue un système isolé par son stot, appelé « compartiment Amélie » ;
- la mine Amélie forme un tout avec l'ensemble des autres mines sous le terme de « bassin de Wittelsheim » ou de « secteur ouest ».

Ainsi, dans le premier cas, le bloc-hôte serait délimité de la manière suivante [4, 27] :

- au sud et à l'ouest, par la disparition naturelle de la série salifère au contact des reliefs vosgiens, située à plus de 5 km de Stocamine ;
- à l'est, par la zone de flexure séparant les mines Amélie et Anna (voir Figure 18) ;
- au nord, par le stot séparant les mines Amélie et Marie-Louise.

Dans le second cas, la limite nord serait repoussée à l'extrémité du bassin de Wittelsheim [28, 14].

3.2.2.4 Connexion par les puits de mine

Les puits de mine traversent tous les niveaux aquifères sus-jacents aux vides miniers : alluvions quaternaires, Chattien, Stampien et partie supérieure de la zone salifère supérieure du Sannoisien. Ils représentent donc des voies de transfert privilégiées entre les vides miniers (donc le site de stockage) et les compartiments superficiels dont un certain nombre sont aquifères.

a) Cuvelage :

Les puits traversent plusieurs niveaux aquifères dont le premier (alluvions) est le plus important. Ils ont donc été équipés d'un cuvelage afin de maîtriser les venues d'eau rencontrées. Leur schéma d'équipement est le suivant [28, 67] :

- en tête, un cuvelage métallique au droit des terrains aquifères, formé :
 - o d'un cuvelage en fonte pour les puits anciens ;
 - o de « corsets métalliques noyés dans du béton [...] qui descendent dans la plupart des cas plus bas que la dernière venue d'eau recoupée lors du fonçage » pour les puits récents ;
- en dessous, des cuvelages en béton, briques ou moellons, sans corset métallique, qui n'ont « qu'une vocation de soutien mais ne permettent pas de bloquer d'éventuelles venues d'eau » puisque les terrains salifères ont toujours été réputés non aquifères.

b) Remblayage :

Le schéma de remblayage adopté par les MDPAs suite à la première expérience de 1961 sur le puits Alex est présenté en *Figure 20*. Il est basé sur la mise en place d'un bouchon de matériau imperméable dénommé tantôt « suies », tantôt « cendres volantes », tantôt « cendres » selon l'époque et/ou les auteurs considérés.

Notons que la description présentée ci-après ne préjuge en rien de l'avis qu'exprimera l'INERIS sur le remblayage des deux derniers puits de mine.

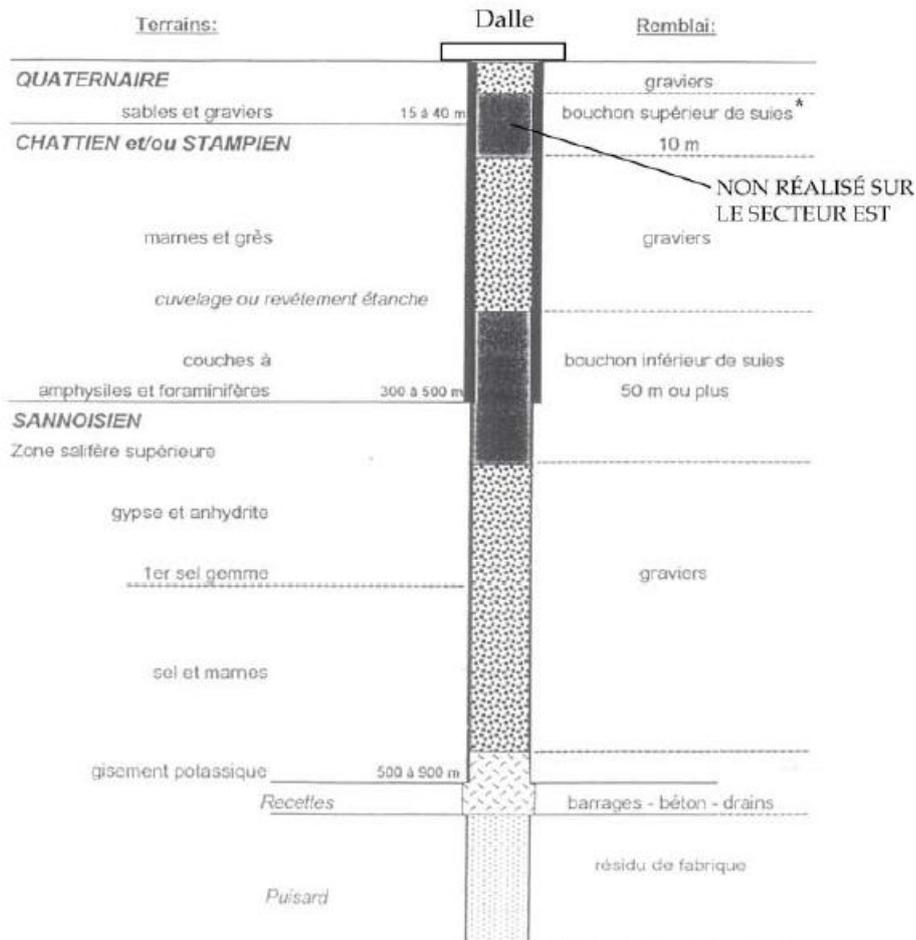


Figure 20. Schéma de principe du remblayage des puits aux MDPAs [28]

Sur certains ouvrages, des venues d'eaux profondes ont pu être recoupées et nécessiter la mise en place d'un cuvelage complémentaire, distinct du cuvelage systématique de la tête de puits : c'est le cas des puits Amélie II, Marie et Alex.

L'ajustement des éléments du cuvelage a été réalisé pour assurer autant que possible son étanchéité. Ces éléments, en fonte ou en acier (cuvelage Henricot ou de type Allemand) subissent une corrosion et la pression des terrains. L'entretien courant et le remplacement des éléments assurent en temps normal (c'est-à-dire pendant l'exploitation) l'étanchéité du cuvelage. Lors de la fermeture des puits le remplissage par des graviers et des suies permet de contrebalancer la pression des terrains. L'étanchéité du cuvelage est sensible à la corrosion des éléments, elle-même fonction de la circulation des eaux et de leur teneur en oxygène, en fer et en sels.

Nous pensons qu'une dégradation lente de la fonction d'étanchéité du cuvelage est attendue pour les puits remblayés. Cette dégradation sera accélérée dans les zones du cuvelage ne comportant pas de suies, du fait des circulations plus rapides des eaux (« bouchons courts »).

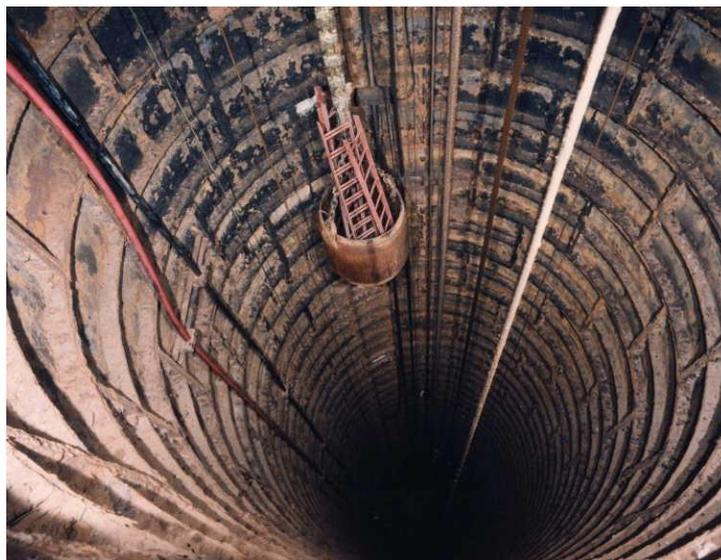


Figure 21 : cuvelage de type allemand (Source : MDPa)

La plupart des puits a été remblayée avec un bouchon de cendres de seulement 50 m d'épaisseur : il s'agit des puits Rodolphe 1 et 2, Fernand E et O, Anna E et O, Ensisheim 1 et 3, Théodore et Eugène. Certains puits ont bénéficié d'une épaisseur plus importante de suies comme Ensisheim 2 (240 m), Alex (254 m) ou Max²⁰ (410 m).

Du fait du comportement des cendres volantes, la perméabilité à l'eau attendue de ces bouchons est comprise entre 10^{-6} et 10^{-9} m/s. Or, les estimations réalisées par l'INERIS (2002) lors du suivi du remblayage des puits Marie et Louise ont permis d'évaluer à $6 \cdot 10^{-7}$ m/s la perméabilité à l'eau d'un bouchon de 50 m. Pour ce faire, les niveaux d'eau dans les puits en cours de remblayage et dans un piézomètre implanté à proximité dans la nappe alluviale ont été suivis pendant plusieurs jours.

Les calculs ont été basés sur l'hypothèse que « la descente de l'eau dans le puits est contrôlée par les infiltrations dans le bouchon de cendres et par celles provenant du cuvelage vers la nappe » (voir Figure 22) [15b, 12]. La valeur obtenue de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s, qui correspond à la fourchette haute de la gamme de perméabilités, correspond en fait à « une estimation par excès de l'infiltration maximale par le bouchon » car elle intègre les infiltrations au travers du bouchon et, pour partie, à l'extrados du cuvelage. Bien que spécifié comme étanche, ce cuvelage a en effet permis des arrivés d'eaux au sein du Chattien et du Quaternaire, comme le montre leur tarissement progressif, observé lors de la remontée du niveau d'eau dans le puits au cours du remblayage. Du fait de la faible perméabilité attendue pour les cendres volantes, il en a été déduit que la mesure obtenue devait intégrer les circulations à l'extrados en contexte drainant (remontée dans le puits) et d'alimentation (remontée artificielle du plan d'eau).

²⁰ Ce puits a été remblayé différemment des autres à cause d'une « mauvaise gestion du puisard du fond de puits [qui] a conduit progressivement, par dissolution du sel, à un déchaussement de la base du cuvelage du puits » [28, 74]. De ce fait, la base du puits a été fermée par un bouchon de béton muni de drains, recouvert de 70 m de graviers drainants puis d'un bouchon de suies beaucoup plus épais « dans le but d'empêcher autant que possible toute infiltration d'eau ».

Il est important de comprendre que la mesure réalisée intègre la percolation d'eau depuis l'extrados du puits vers le bouchon mais pas depuis l'extrados en direction du fond (voir Figure 22) : cette valeur ne correspond donc pas strictement à la « perméabilité équivalente » d'un puits remblayé, laquelle est probablement supérieure. En outre, cette valeur correspond au cas d'un bouchon de cendres de 50 m de hauteur positionné en tête de puits, ce qui n'est pas le cas de tous les puits remblayés.

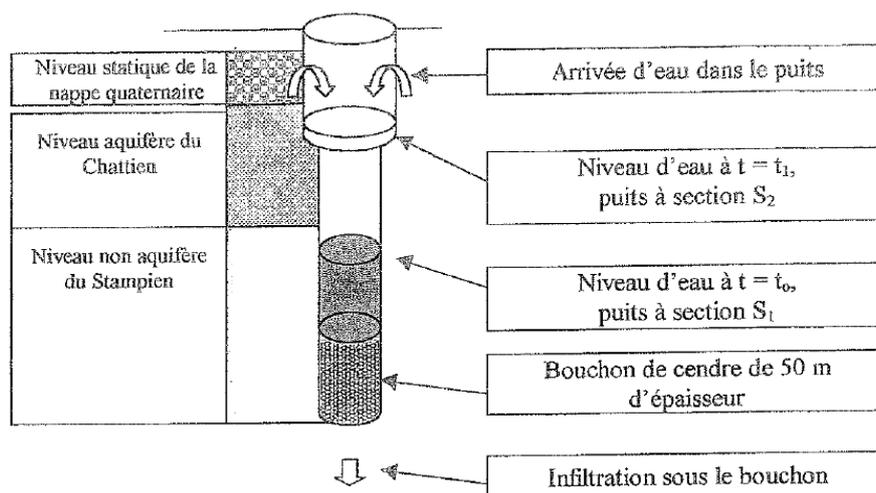


Figure 22. Schématisation des circulations d'eau à travers le puits Marie en cours de remblayage [15b]

La perméabilité équivalente de $6 \cdot 10^{-7}$ m/s mesurée lors du suivi du remblayage des puits Marie et Louise correspond donc au cas particulier d'un bouchon de 50 m d'épaisseur positionné en tête de puits avec percolation d'eau depuis la partie supérieure de l'extrados vers le puits et à travers le bouchon de cendres. Ainsi, elle n'intègre pas les écoulements de l'extrados vers la base du puits. Il s'agit donc à la fois d'une estimation par excès de la perméabilité réelle d'un bouchon de cendres et d'une estimation par défaut de la perméabilité équivalente de l'ensemble du puits.

La Figure 23 permet de se rendre compte des différences de positionnement et d'épaisseur des bouchons de cendres ainsi que des cuvelages métalliques dans les 15 puits du bassin de Wittelsheim.

Pour l'INERIS, les caractéristiques des puits de mine remblayés et des sondages également remblayés semblent suffisamment documentées. Néanmoins, il conviendra de compléter ces informations pour ce qui est du puits Amélie II qui a été remblayé récemment (en fin d'année 2009) et pour le sondage pétrolier Fel 101 qui semble t'il n'a pas été rebouché suite à un projet d'utilisation géothermique [MDPA, 32].

En ce qui concerne les puits encore ouverts, la technique de remblayage nécessitera une étude approfondie et le choix d'un nouveau procédé n'est pas a priori exclu

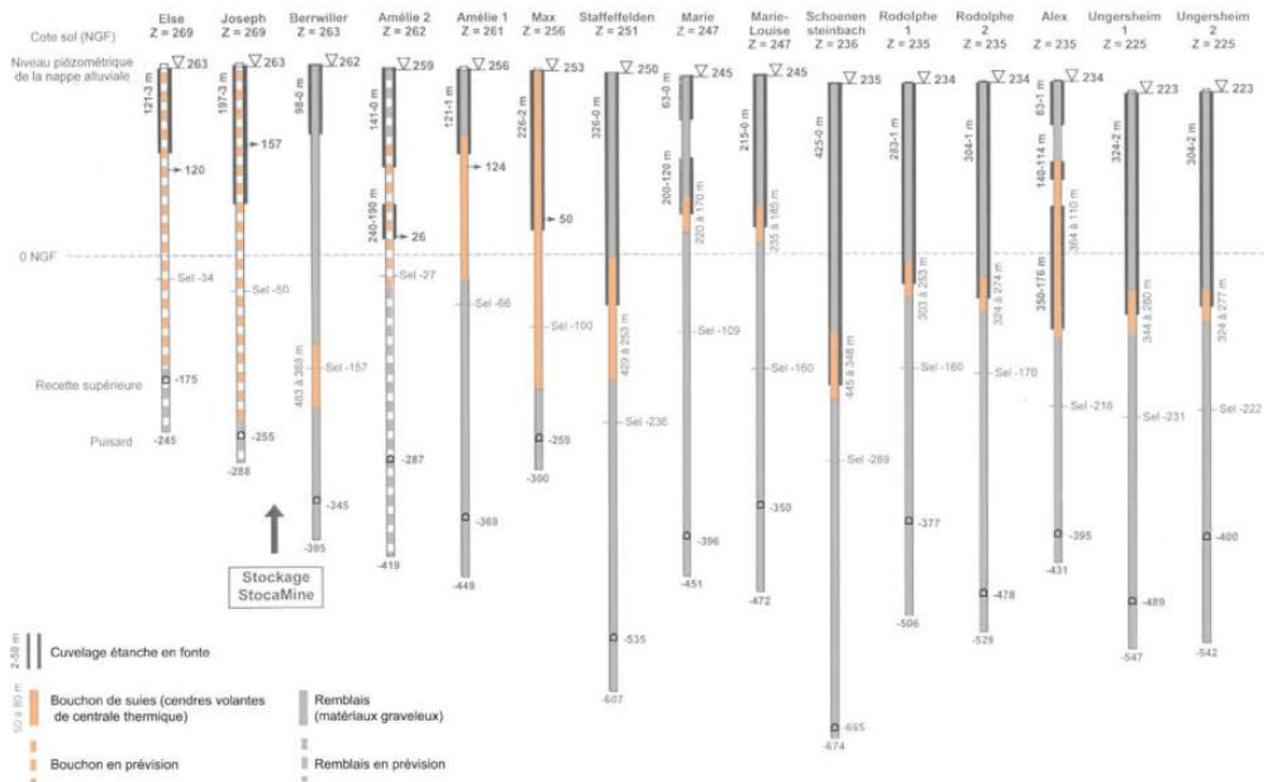


Figure 23. Position des cuvelages étanches et des bouchons de suies des puits MDP (MICA, 2004)

c) Circulations à l'extrados des puits :

Les circulations à l'extrados des puits vont dépendre de la qualité de l'injection du béton derrière le cuvelage. Cette injection de béton va créer deux types d'interface : une interface béton/cuvelage et une interface béton/terrain. La perméabilité à l'eau associée à ces interfaces peut atteindre une valeur de 10^{-5} à 10^{-6} m/s sur quelques centimètres.

Dans le cas du bassin de Wittelsheim, on dispose de deux types de mesures :

- des mesures de remontée et descente du plan d'eau des puits lors du remblaiement des puits Marie et Louise ; elles intègrent des circulations entre le puits et l'extrados, en particulier dans la zone au dessus des bouchons ;
- des mesures directes de fuites au fond, réalisées sur les puits Amélie I, Amélie II et Max ; elles prennent en compte l'ensemble des infiltrations, liées à l'extrados et aux fuites du bouchon de cendres volantes.

Si la mesure de débit récemment réalisée à la base du puits Max ($0,8 \text{ m}^3/\text{j}$) est proche de celle évaluée par le débit des bouchons ($0,9 \text{ m}^3/\text{j}$), cela n'est pas le cas pour les puits Amélie I et Amélie II où le débit évalué par l'expression mathématique liée au bouchon est nettement sous-évalué :

- 1 et $1,5 \text{ m}^3/\text{j}$ pour les débits calculés
- 3,2 et $4,2 \text{ m}^3/\text{j}$ pour les débits mesurés.

Dans le cas de bouchons ne recoupant pas la plus grande partie du cuvelage et des formations immédiatement sous-jacentes (dont le Stampien), il est probable que le flux lié à l'extrados soit alors prédominant.

La prise en compte de ces mesures récentes de débit de percolation à la base des puits remblayés de la mine Amélie risque de conduire à des estimations de flux d'ennoyage 2 à 3 fois plus élevés que celles déduites des fuites provenant des bouchons. En appliquant ce raisonnement à l'ensemble des puits remblayés, le débit total d'ennoyage pourrait ainsi augmenter significativement. L'impact de ces nouvelles valeurs de débit sur la durée d'ennoyage sera recalculé par l'INERIS et il est alors possible que la durée d'ennoyage soit diminuée d'un facteur équivalent. Il apparaît important que Stocamine ou les MDPA procède à de nouvelles mesures in situ à la fois à la base des puits remblayés mais également à la base des puits encore ouverts en distinguant autant que faire se peut les circulations à l'intrados et à l'extrados. L'INERIS souhaite être associé à ces mesures.

d) Zone endommagée :

Une autre voie de transfert liée aux puits est l'existence d'une zone endommagée due à la phase de creusement et/ou à l'exploitation. Il a été précisé précédemment que le sel gemme intact présente des perméabilités très faibles, comprises entre 10^{-19} et 10^{-21} m². Celle de la zone endommagée est supérieure de plusieurs ordres de grandeur : les données reportées par Tsang (2004) présentent une augmentation de perméabilité atteignant 6 ordres de grandeur à une distance du mur de la galerie égale au rayon de celle-ci. L'augmentation de perméabilité lors de l'excavation serait limitée à 4 à 5 ordres de grandeur dans le sel et sur une distance d'environ 0,5 m dans le toit et de 1,5 m dans le mur selon ce même auteur.

Cependant, le sel présente la particularité de permettre une cicatrisation des micro-fractures de la zone endommagée par déformation visco-plastique ou par processus de recristallisation. Toutefois, ce processus est lent : en Allemagne, il a été observé sur une zone endommagée de la mine d'Asse à une profondeur de 700 à 800 m au bout d'une durée de 90 ans. La perméabilité mesurée a atteint 10^{-18} m², soit une valeur plus faible que celle estimée initialement (10^{-16} m²), tout en restant plus élevée que celle du massif non endommagée (10^{-20} m²) (Tsang et al., 2004).

Les résultats de mesures de perméabilité effectuées in situ sur le site salifère de W.I.P.P. (Waste Isolation Power Plant) au Nouveau-Mexique, Etats Unis (Stormont et al., 1991) relatés dans Ghoreychi et al. (2003) corroborent les estimations précédentes : la perméabilité de la paroi est de 5 à 6 ordres de grandeur supérieure à celle du massif intact situé loin de la paroi. Cette augmentation de perméabilité est attribuée à la micro-fissuration, invisible à l'œil nu.

L'épaisseur de la zone endommagée dépend de la profondeur de la cavité (c'est-à-dire de son état de contrainte), de sa taille et de son mode de creusement : la *Figure 24* montre qu'elle peut atteindre 1,5 à 3 m pour des cavités décimétrique (Hou, 2003) alors que, dans le cas d'avancement par creusement, la perméabilité du sel reste faible et la zone endommagée est d'importance décimétrique (avec une perméabilité atteignant 10^{-9} m/s d'après les mesures effectuées).

Il s'agit cependant de résultats obtenus dans un cas spécifique qui n'est pas forcément généralisable. Ainsi, dans le cas de bancs plus raide d'argiles indurées, la zone endommagée autour du puits pourra être plus importante.

Tsang (2004) envisage deux régimes d'évolution de la perméabilité de la zone endommagée dans le sel:

- une augmentation initiale de la conductivité hydraulique de 4 à 5 ordres de grandeur par augmentation de la connectivité des fractures ;
- une augmentation plus tardive, liée à l'ouverture des fissures, pouvant atteindre environ 2 ordres de grandeur.

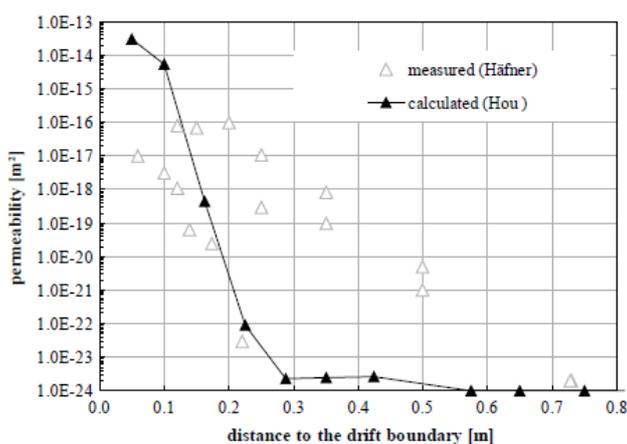


Figure 24. Perméabilité mesurée et modélisée dans le cas d'une galerie d'avancement de section circulaire creusée à 700 m de profondeur avec une contrainte initiale de 17 MPa (Hou, 2003)

3.2.2.5 Connexion par les ouvrages débouchant au jour

La question peut également se poser du risque éventuel de pénétration d'eau de surface dans la mine par le biais des ouvrages débouchant au jour. Cette hypothèse a été étudiée par EMC (1996) qui conclut que, dans l'état actuel, le risque d'inondation du carreau Joseph-Else par les crues de la Doller (située à 4 km au sud) ou de la Thur (située à 3 km au nord-ouest) est nul, « comme cela a été constaté depuis le début de l'exploitation des puits Joseph-Else en 1912, et notamment au cours des dernières crues exceptionnelles de 1983 et de début 1990 » [1, 127]. La mine Amélie et le site de stockage sont donc totalement isolés d'un éventuel risque d'intrusion d'eau de surface [1, 142].

Cependant, compte tenu de la durée probable de l'ennoyage (plusieurs siècles) et dans le contexte d'un changement climatique attendu, on peut aussi se demander si la probabilité d'occurrence de ce risque ne serait pas susceptible d'évoluer dans le temps : ce point devra donc être vérifié ultérieurement.

3.2.2.6 Connexion par les sondages

Dans les 200 km² de concessions des Mines de Potasse d'Alsace (incluant les anciennes concessions MDPa et KST), 181 sondages de recherche de potasse

ont été réalisés de 1904 à 1967 [MDPA-SA, 2] (Figure 25). A ces sondages s'ajoutent, outre les 24 puits de mine forcés dans le bassin :

- 24 sondages de recherche d'hydrocarbures,
- 1 sondage d'expérimentation de la fracturation (Max),

Dans le bassin de Wittelheim, MICA (2004) signale que les travaux miniers ont été recoupés par 43 sondages comprenant 33 sondages pour la reconnaissance des veines de potasse et 10 pour la recherche pétrolière [28, 80]. Ce chiffre est corroboré par les MDPA qui dénombrent environ 45 sondages recoupés par les travaux d'exploitation avec la remarque suivante : « ce décompte est valable à une ou deux unités près, imprécision liée à l'absence d'identification formelle au fond de quelques uns des sondages rencontrés (incertitude sur la localisation au jour, déviations non mesurées ou inconnues) » [MDPA-SA, 8]

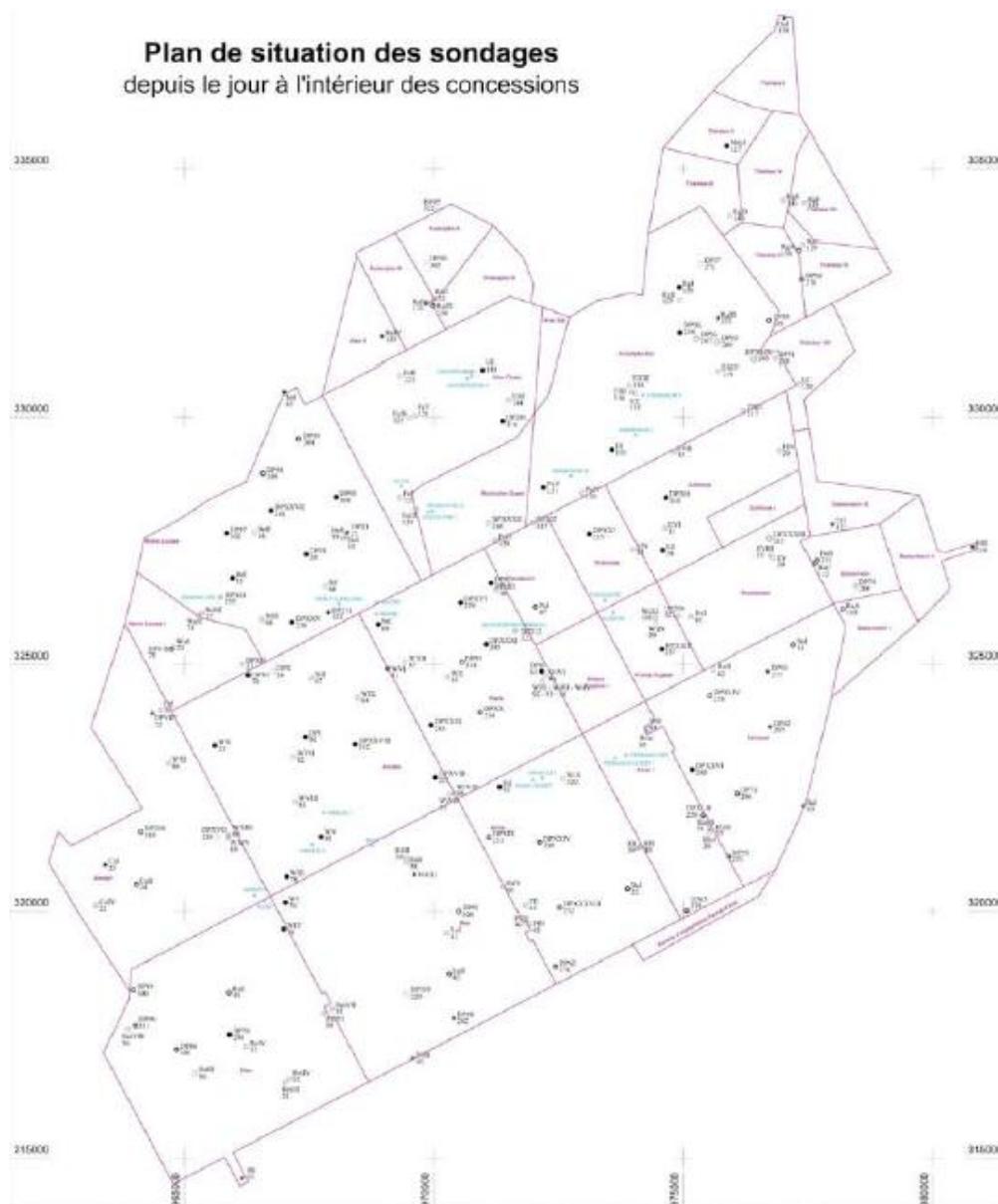


Figure 25. Plan de situation des sondages dans le bassin potassique [4]

La technique employée pour le rebouchage de ces sondages est basée, pour les plus anciens d'entre eux²¹ datant d'avant 1913, sur un comblement avec de l'argile ou un mélange d'argile, de graviers et/ou de ciment. A partir de 1953, la partie traversant les alluvions a été intégralement cimentée, le reste étant comblé par « du gravier mêlé d'un peu de ciment ».

Pour les MDPA, « dans la majorité des cas, les manifestations lors de la rencontre furent limitées à quelques suintements et à des faibles venues d'eau saturées. L'analyse des modes de rebouchage d'une part, et l'expérience de la traversée de certains sondages de l'autre permettent donc d'affirmer que ceux-ci ne sont pas susceptibles de mettre en relation différents niveaux aquifères » [MDPA-SA, 8]. Il n'y a pas eu de véritable venue d'eau que ce soit en provenance des aquifères sus-jacents aux terrains salifères [28, 81] ou sous-jacents [28, 145]. MICA (2004) considère donc que les sondages ne sont pas des vecteurs potentiels d'entrée d'eau dans la mine, d'autant plus que, avec le temps, leur faible ouverture a dû se refermer par fluage.

Quelques émanations gazeuses²² ont également été rencontrées lorsqu'il s'agissait de sondages de recherche d'hydrocarbures. A cet effet, on notera que le sondage pétrolier Fel 101, situé au Nord, n'aurait pas été rebouché car il aurait fait l'objet en 1990 d'un projet d'utilisation à des fins géothermiques [MDPA-SA, 5 ; [MDPA, 32]

Cependant, cinq sondages parmi les plus anciens ont donné lieu, au moment de leur recoupement par les travaux miniers, à des coulées de boue : il s'agit d'un sondage de 1927 et de quatre sondages antérieurs à 1913. Ces coulées de boues ont atteint 20 m³ pour la plus importante à Cernay II en 1984, ce qui correspond, pour un sondage de 8,5 pouces de diamètre, à un linéaire de plus de 500 m de longueur. Ces coulées proviennent du recoupement des sondages qui ont été remblayés par l'introduction de « boules d'argiles » dans la boue de forage salée [MDPA, 33].

Les MDPA notent également que, pour les sondages antérieurs à 1913, « certains de ces sondages ont probablement été détubés en totalité pour des raisons d'économie de casing » [MDPA, 33].

Il semble donc que le traitement des sondages liés à la recherche de potasse ou d'hydrocarbures ainsi que celui d'expérimentation de la fracturation, ait été effectué dans les « Règles de l'Art » de l'époque afin d'empêcher toute pénétration d'eau dans les terrains salifères et dans les vides miniers. Toutefois, un complément d'information sera nécessaire en ce qui concerne les sondages antérieurs à 1913 qui ont été rebouchés par la méthode des boules d'argile et dont certains ont été détubés, ainsi que l'état actuel du sondage pétrolier Fel 101 qui n'aurait pas été rebouché suite à un projet d'utilisation géothermique vers 1990. Nous préconisons de réaliser un positionnement aussi précis que possible des sondages dont le rebouchage est antérieur à la mise en place de ciment car le plan de localisation présenté en Figure 25 est peu lisible.

²¹ soit 113 sondages

²² Les mines des MDPA sont également elles-mêmes grisouteuses.

3.2.3 Conclusion sur la délimitation du bloc-hôte

Le site de stockage se trouve dans un puissant ensemble salifère, appelé « bloc-hôte » par Combes & Ledoux (1990). Dans le plan vertical, cet ensemble est considéré comme très peu perméable à imperméable sur plusieurs centaines de mètres au-dessus et au-dessous du site de stockage.

Latéralement, le site de stockage est en communication, par le biais de diverses galeries, avec les mines Joseph-Else, Amélie et Max qui forment le « compartiment Amélie ». Ce compartiment est séparé de la mine Marie-Louise par un stot de 20 à 50 m d'épaisseur dont on ne connaît pas l'état actuel ni futur. Si ce stot venait à ne plus jouer son rôle de compartimentage, le site de stockage serait alors en communication avec la mine Marie-Louise, laquelle est elle-même en relation avec toutes les autres mines du bassin de Wittelsheim.

Il est mentionné quelques accidents tectoniques qui affectent la série salifère et/ou les formations superficielles (Stampien) : dans ce dernier cas seulement, il a été mis en évidence des venues d'eau, parfois importantes.

Les puits, sondages et buses d'aéragé constituent autant de voies de communication verticale entre la mine qui héberge le stockage et les zones sus-jacentes. Malgré leur cuvelage métallique destiné à « aveugler » les venues d'eau rencontrées en cours de creusement, certains puits ont montré des venues d'eau pendant toute la phase d'exploitation, y compris jusqu'aux limites du bloc-hôte. Bien que la plupart de ces puits soit remblayée, il existe un faible débit de percolation d'eau en provenance des compartiments superficiels. Cette eau percole à travers les bouchons de cendres volantes et à la des cuvelages avec le terrain naturel (extrados).

En ce qui concerne les sondages, aucun n'a montré de venue d'eau à l'occasion de leur recoupement par la mine mais certains d'entre eux ont fait l'objet d'émanations de gaz (a priori sondages d'hydrocarbures) ou de coulées de boue (anciens sondages colmatés par de l'argile).

Néanmoins, nous préconisons le repérage des sondages dont le rebouchage est antérieur à la mise en place de ciment, afin de vérifier l'intégrité des rebouchages.

3.3 ENNOYAGE DE LA MINE APRES FERMETURE

3.3.1 Scénario d'ennoyage

Actuellement, tous les puits du bassin de Wittelsheim sont fermés et remblayés à l'exception des puits Joseph et Else qui desservent encore le site de stockage. Il est cependant possible d'estimer ce que sera l'ennoyage de la mine après sa fermeture sur la base des données disponibles pour les puits déjà remblayés.

En ce qui concerne le débit d'eau douce pénétrant dans la mine après remblayage des puits, Combes et Ledoux (1990) ont posé les bases du « scénario de référence » qui permet de le calculer [4, 29] :

- chaque puits est rempli par des matériaux peu perméables de sa base jusqu'à la surface du sol ;

- l'épaisseur de remplissage prise en compte pour le calcul du débit de percolation est celle « comprise entre l'horizon perméable le plus profond rencontré lors du creusement du puits et la cote de la recette supérieure de ce puits » ;
- la charge hydraulique est égale à la différence entre le niveau piézométrique de la nappe alluviale et la cote de la recette supérieure du puits ; cette charge sera par ailleurs considérée comme constante dans le temps, ce qui est une hypothèse majorante.

Il a cependant été vu précédemment que le débit de percolation récemment mesuré à la base des puits remblayés de la mine Amélie était supérieur d'un facteur 2 ou 3 au débit théorique calculé.

3.3.2 Débit d'ennoyage

3.3.2.1 Mine Amélie isolée

Pour Combes et Ledoux (1990), sur la base d'une perméabilité des matériaux de remplissage de 5.10^{-7} m/s, l'apport d'eau serait de 200 m³/mois dans la seule mine Amélie.

Cesame (2006) confirme cet ordre de grandeur avec un débit d'ennoyage de 170 m³/mois pour le compartiment Amélie (voir plus loin Tableau 7, repris par les MDPA dans le Tableau 8) [MDPA, 1024 ; 39, 28].

Pour MICA (2004), dans un premier temps, « les bouchons de cendres volantes se comportent comme s'ils étaient totalement étanches » [28, 166]. En effet :

- au puits Alex, après un premier essai infructueux, la mise en place de bouchons de cendres volantes a permis d'arrêter les venues d'eau [28, 164] ;
- au puits Fernand Est, la base du puits est restée accessible pendant 2 ans après son remblayage et, alors que le débit de percolation était auparavant de 30 m³/mois, aucune venue d'eau n'a plus été observée [28, 165] ;
- au puits Anna Est, aucune venue d'eau n'a été constatée pendant les 2,5 ans qui ont suivi le remblayage [28, 165].

Tableau 6. Débits de percolation retenus pour les puits de la mine Amélie [28]

Puits	Else	Joseph	Amélie 1	Amélie 2	Max
Débit de percolation au travers du bouchon de cendres volantes (m ³ /mois)	38	32	46	43	41

Cependant, MICA (2004) indique, plus loin dans son rapport, que le débit résiduel de percolation sera finalement de l'ordre de 200 m³/mois pour la mine Amélie sur la base d'une perméabilité de $5,8 \cdot 10^{-7}$ m/s pour le remblayage (Tableau 6). Le débit de percolation a été calculé, d'après la loi de Darcy, en fonction de l'épaisseur du bouchon de cendres. Ainsi, pour un puits comparable au puits Max, c'est-à-dire de 4,5 m de diamètre et avec un bouchon de 410 m d'épaisseur, la

courbe de la Figure 26 indique un débit de percolation de l'ordre de 30 m³/mois pour une charge hydraulique de 520 m.

Le débit ainsi calculé à la base du puits Max est conforme à celui récemment mesuré par les MDPA : 0,8 m³/j (soit 24 m³/mois) à Max. De même, il est probable que le débit de percolation futur des puits Joseph et Else soit du même ordre de grandeur car ils devraient être munis d'un bouchon également très épais.

En revanche, les débits mesurés par les MDPA à la base des puits remblayés Amélie I et Amélie II valent respectivement 4,2 m³/j (soit 126 m³/mois) et 3,2 m³/j (soit 96 m³/mois),

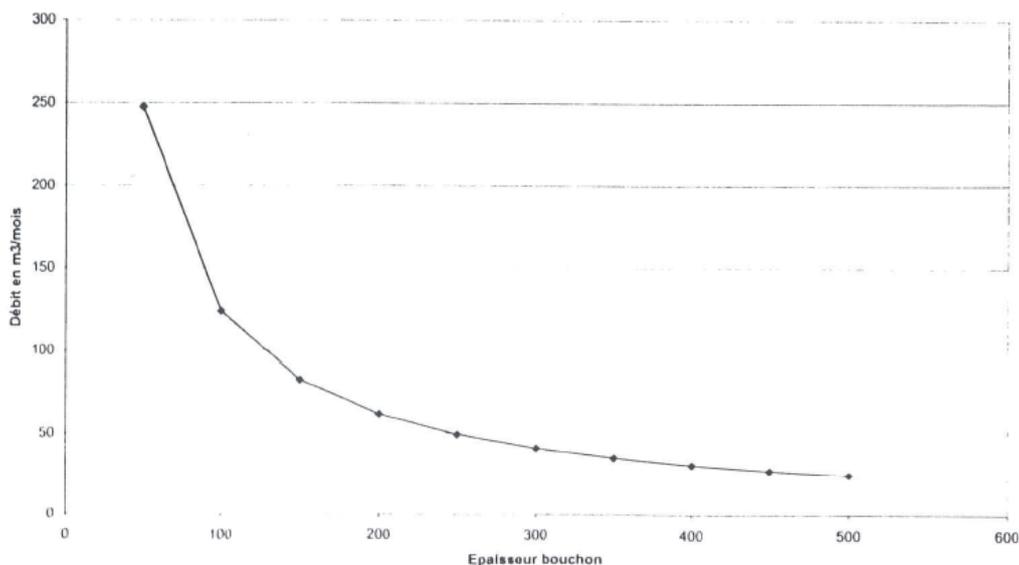


Figure 26. Calcul du débit à travers un puits de 4,5 m de diamètre remblayé par un bouchon de suies sous une charge hydraulique de 520 m [28]

Il existe donc des différences significatives entre le débit de percolation calculé pour chaque puits, paramètre important d'estimation de la durée d'ennoyage de la mine (Tableau 7). En supposant que les puits Joseph et Else seront remblayés par un bouchon de cendres plus épais, leur débit de percolation sera du même ordre de grandeur que celui actuellement observé au puits Max. Le débit total d'ennoyage de la mine Amélie serait alors compris entre 160 et 300 m³/mois.

Tableau 7. Valeurs de débits de percolation calculées ou estimées pour les puits de la mine Amélie

Puits	Joseph	Else	Amélie I	Amélie II	Max	Total
C. et L.* (1990)	(31)	(31)	41	56	41	200
MICA (2004)	(32)	(38)	46	43	41	170
CESAME (2006)	(27,4)	(27,4)	46,1	31,1	28,1	160
MDPA** (2010)	(24)	(24)	126	96	24	294

* Combes et Ledoux, ** Communication orale lors de la réunion de février 2010

En conclusion, le débit de percolation actuellement observé au puits Max par les MDPA est du même ordre de grandeur que la valeur calculée par Mica (2004) mais il vaut le double voire le triple pour les puits Amélie I et II. Ces valeurs devront être confortées par de nouvelles mesures réalisées in situ par l'exploitant.

3.3.2.2 Bassin de Wittelsheim

Pour Cesame (2006), si l'on prend en compte la totalité du bassin de Wittelsheim, le débit d'ennoyage calculé par la loi de Darcy sur la base d'une perméabilité de $6 \cdot 10^{-7}$ m/s atteindra $1810 \text{ m}^3/\text{mois}$ [37, 9]. Ces données sont reprises par les MDPA dans le Tableau 8 [MDPA, 1024 ; 39, 28].

Tableau 8. Estimation des débits pénétrant dans le secteur ouest ou bassin de Wittelsheim (MDPA, 2008)

SECTEUR OUEST					Débit d'alimentation calculé par la loi de Darcy	
Puits	H nappe alluviale (m NGF)	Hauteur d'eau au-dessus du bouchon (m)	S puits (m ²)	Ep bouchon (m)	Q (m ³ /h)	Q (m ³ /mois)
Else	263	35	16	410	0,04	27,4
Joseph	263	35	16	410	0,04	27,4
Bernwiller	262	387	28,7	95	0,31	229,5
Amélie 2	259	35	16	150	0,04	31,1
Amélie 1	256	35	23,7	150	0,06	46,1
Max	253	35	16	309	0,04	28,1
Staffelfelden	250	253	31,2	176	0,16	119,8
Marie	245	170	15,9	50	0,15	110,3
Marie-Louise	245	185	15,9	50	0,16	117,8
Schoenensteinbach	235	347	27,3	97	0,27	196,9
Rodolphe 1	234	253	15,9	50	0,21	151,8
Rodolphe 2	234	274	23,8	50	0,33	243,0
Alex	234	110	15,9	254	0,05	35,9
Ungersheim 1	223	280	23,8	64	0,28	201,6
Ungersheim 2	223	275	23,8	47	0,35	257,0
Perméabilité des bouchons de cendres en m/s	Somme des débits entrants (m ³ /h)				2,5	
	Somme des débits entrants (m ³ /mois)				1 810	
$6 \cdot 10^{-7}$	Somme des débits entrants (m ³ /an)				21 800	

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

On constate que le débit moyen pris en compte par puits est ici de $120 \text{ m}^3/\text{mois}$ mais que les mesures récemment effectuées par les MDPA aux puits de la mine Amélie ne sont toujours correctement simulées.

Il est donc probable que ce résultat corresponde à une fourchette basse du débit réel d'ennoyage. En se basant en effet sur les mêmes écarts que ceux constatés pour la seule mine Amélie dans le Tableau 7, on peut estimer que le débit d'ennoyage du bassin de Wittelsheim est compris entre 1810 et $3330 \text{ m}^3/\text{mois}$.

3.3.3 Volume de vides

3.3.3.1 Estimation du volume de vides

Combes et Ledoux (1990) considèrent que le volume de vides de la mine Amélie est de 135 Mm^3 sur la base des calculs suivants :

- une superficie de $9\,880\,000 \text{ m}^2$ et une hauteur de $1,5 \text{ m}$ en couche supérieure, soit un volume de 15 Mm^3

- une superficie de 24 040 000 m² et une hauteur de 4 m en couche supérieure, soit un volume de 120 Mm³.

Les mêmes calculs appliqués au reste du bassin donnent un volume de 163 Mm³ [4, 33] soit un volume total de vides miniers de 298 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim.

MICA (2004) estiment le volume de vides miniers d'après le tonnage total extrait : les valeurs sont de 423 Mt pour le bassin de Wittelsheim dont 190 Mt pour la seule mine Amélie [28, 34]. En considérant une densité de 2,1 pour le sel, ils transforment ces tonnages en un volume de vides miniers de 200 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim et de 90 Mm³ pour la mine Amélie.

Les vides résiduels susceptibles de s'envoyer correspondent aux vides miniers après déduction de l'affaissement des terrains et de la compaction due au fluage du sel. Les observations réalisées par les MDPAs montrent que « l'affaissement observé en surface sur la majorité de la zone d'influence correspondait à 90% de la hauteur de la couche exploitée » [MDPA, 1015]. D'autre part, cet affaissement se produit sur une durée de 3 ans après l'exploitation. De ce fait, le vide souterrain résiduel ne représente plus, selon les MDPAs, que 10% du volume de matériau extrait.

Cependant, le retour d'expérience de l'INERIS sur l'affaissement au droit des exploitations minières indique que la « porosité résiduelle » d'une zone foudroyée demeure non négligeable même si l'affaissement maximal au centre de la cuvette créée en surface est comparable à la hauteur exploitée. Nous sommes donc surpris de la valeur de 10% évoquée ci-dessus qui devra être confirmée par les MDPAs, éventuellement par le biais du cubage des volumes affaissés en surface.

Néanmoins, dans les études consultées, le volume des vides résultant du foudroyage est d'environ 20 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim et varie de 9 à 13,5 Mm³ pour la mine Amélie. L'hypothèse basse repose cependant sur une densité du sel de 2,1 qui sous-estime probablement la densité réelle du minerai extrait (une valeur de l'ordre de 2,2 étant plus probable si l'on se base d'une densité de 2,16 pour le sel pur et que l'on tient compte des impuretés).

La modélisation réalisée par Combes et Ledoux (1990) montre que 50% de ces vides ne seront toujours pas fermés 100 ans après leur exploitation et 38% après 1000 ans (voir *Figure 27*). De ce fait, ces auteurs considèrent que la compaction n'évoluera plus que d'environ 15% au cours de la période d'envoyage maximale estimée à 3800 ans, ce qui - pour MICA (2004) - « ne devrait engendrer qu'une incertitude de l'ordre d'une centaine d'années sur le temps de remplissage de l'exploitation minière » [28, 154]. Pour Combes et Ledoux (1990), les vides résiduels sont donc de l'ordre de 6,75 Mm³ pour la mine Amélie et de 14,9 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim.

MICA (2004) estime que, au bout de 500 ans, le volume des travaux miniers à envoyer sera alors égal à 5% du volume des zones foudroyées plus 40% du volume des galeries situées au-dessus de 650 m de profondeur (celles situées en dessous étant considérées comme complètement obturées par fluage). Le volume de vides résiduels est ainsi estimé entre 2,9 et 8,0 Mm³ pour la mine Amélie isolée [28, 172] et estimé entre 5,8 et 17,3 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim [28, 176].

Pour MDPAs [1027], le volume de vides résiduels du bassin de Wittelsheim vaut 10 Mm³ en 2008, date de début supposé de la phase d'envoyage.

Les différentes estimations du volume de vides résiduels au début de la phase d'ennoyage oscillent entre 3 et 8 Mm³ pour la mine Amélie et entre 6 et 17 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim. Ces données sont basées sur un transfert en surface de 90% des vides par affaissement lors du foudroyage des galeries puis d'une compaction par fluage dont la vitesse varie selon les auteurs. Ces hypothèses sont à vérifier par l'INERIS.

3.3.3.2 Prise en compte du fluage du sel

Les calculs de Combes et Ledoux (1990) ne tiennent pas compte de la compaction des vides souterrains par fluage du sel car l'hypothèse admise est que la perméabilité des zones foudroyées restera grande devant celle des bouchons et « indépendante de la compaction » [4, 35]. Ainsi, le volume des vides résiduels a été pris constant et égal à la valeur qu'il devrait avoir au moment de l'abandon du stockage : la Figure 27 montre que 50% des vides seront recompressés au cours du premier siècle d'ennoyage, ce qui donne un volume de vides résiduels de 5%.

Ainsi, au cours des quelques milliers d'années que la mine devrait mettre à se remplir, selon ces auteurs, « la compaction ne variera que de 15% ce qui ne modifie pas l'ordre de grandeur de la durée de remplissage avancée ». Sur cette base, « le volume des vides influe uniquement sur les délais de remplissage et n'a, par contre, pas d'influence sur le fonctionnement hydraulique final du système et en particulier sur le débit susceptible d'y transiter » [4, 35].

Pour ces auteurs, le phénomène de compaction ne joue donc pas un rôle majeur dans l'estimation du temps de remplissage ni de l'éventuel débit d'épanchement en fin d'ennoyage. Il semblerait toutefois que l'ampleur du phénomène ait été quelque peu sous-évaluée et que son rôle dans l'estimation des débits d'épanchement potentiel de saumure en surface soit plus significatif.

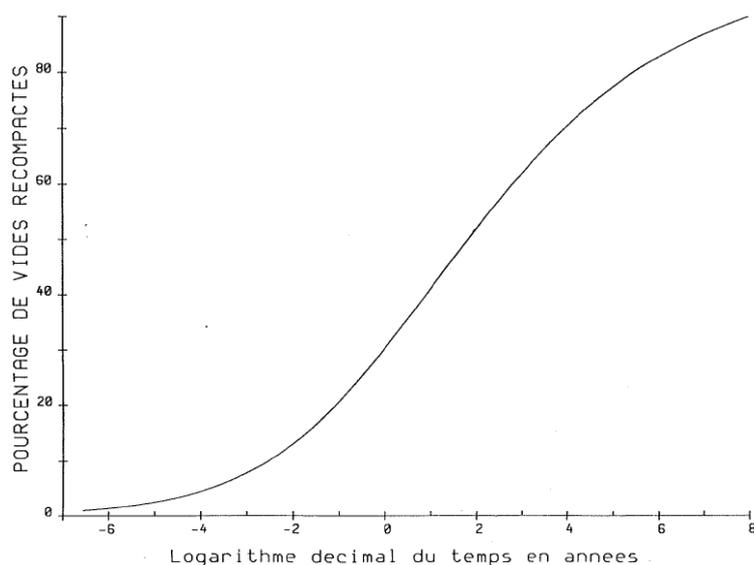


Figure 27. Evolution des vides résiduels après foudroyage d'après Combes et Ledoux [4]

MICA (2004) établit une distinction dans le comportement des vides miniers selon leur profondeur [28, 157] :

- pour les travaux situés à moins de 650 m de profondeur, « à échéance de 500 ans, la convergence verticale est d'environ 0,55 mètre, l'horizontale de 0,5 mètre »;
- au-delà de 650 m de profondeur, le fluage referme totalement les galeries en 500 ans.

Les MDPA (2008) appliquent « un taux de fermeture moyen de l'ordre de 1%/an [...] aux travaux foudroyés peu profonds ($\approx 60\%$ du volume total de vides initiaux), alors que les travaux anciens, situés à grande profondeur ou à proximité d'une instabilité géologique ($\approx 30\%$ ²³ du volume total de vides initiaux) peuvent être affectés d'un taux de fermeture allant jusqu'à 5%/an » [MDPA, 1026].

Pour Cesame (2006), « dans 300 à 400 ans, les vides miniers seront globalement fermés » selon la double hypothèse suivante [37, 12] (cf. Figure 28) :

- du fait de l'affaissement des terrains liés à la méthode d'exploitation et à la compaction plus rapide dans les secteurs profonds (>700 m), les vides miniers actuels ne représentent plus que 5% du volume exploité ;
- ce volume de vides résiduels se réduit au fil du temps par fluage du sel avec un taux de fermeture d'environ 0,6 à 0,8% par an.

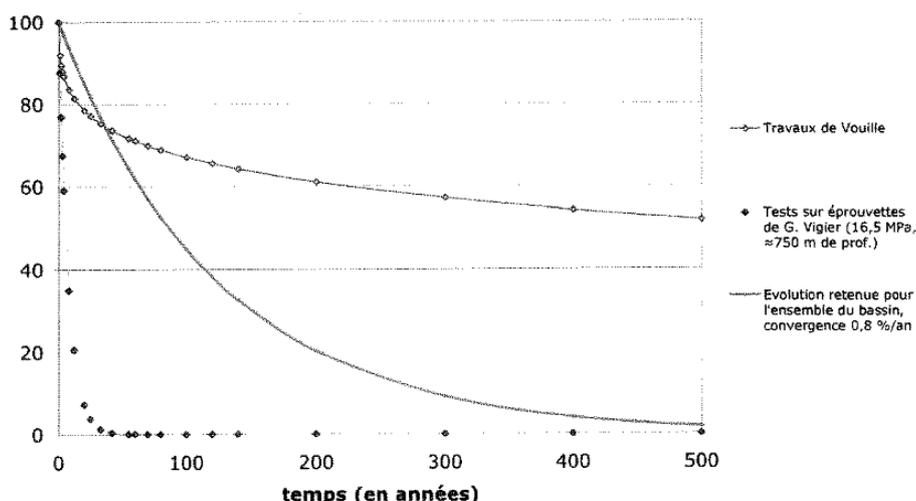


Figure 28. Courbe d'évolution des vides retenue par Cesame pour le bassin [37]

Dans une étude plus récente, Cesame (2008) considère que la fermeture des vides par fluage devra conduire « à une cicatrisation totale au bout de 500 ans environ » [39, 33]. Ces auteurs font remarquer que les travaux miniers ont, en 2008, un âge moyen de 40 ans et que, pour estimer leur taux de fermeture, on ne peut pas utiliser la courbe de la Figure 28 basée sur un fluage de 0,8% par an

²³ Cependant, dans le tableau présenté dans la même page, les MDPA donnent la répartition des travaux miniers en fonction de la profondeur où il apparaît que les vides miniers situés au-delà de 650 m de profondeur ne représentent que 5,36% du volume total des travaux du secteur Ouest [MDPA, 1026].

« car, dans cette tranche d'âge, elle n'est pas du tout représentative des observations faites par Vigier ou Vouille qui ont tous les deux observé des vitesses de déformation beaucoup plus élevées que ne le laisserait supposer cette courbe » [39, 29].

Il est donc proposé une nouvelle courbe correspondant à « une fermeture des vides de l'ordre de 50% conduisant à un vide résiduel actuel, après affaissement et début de fluage, de 5% du vide initial créé par l'exploitation ». Sur ces nouvelles bases, similaires à celles employées par Combes et Ledoux (1990), le volume des vides miniers résiduels a été estimé à 10 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim. Les auteurs tempèrent cependant leurs calculs par le fait que « aucune loi rhéologique n'est directement applicable pour la mine dans sa complexité » [39, 30].

Plus récemment, Hadj-Hassen (2009) confirme que l'évolution par fluage des vides du site de stockage ne peut pas suivre, sur le long terme, la vitesse de fluage mesurée par les MDPA sur le court terme et matérialisée par la courbe verte de la Figure 29. En effet, le sel du site de stockage possède un indice de fluage²⁴ de 2%, ce qui correspond à un sel moyennement fluant : « les sels peu fluants ont des indices inférieurs à 1% et ceux très fluants peuvent avoir des indices dépassant les 10% » [HH, 2].

Cet auteur utilise un modèle axisymétrique qui conduit à une autre évaluation de la fermeture par compaction des vides résiduels après ennoyage : il s'agit de la courbe rouge de la Figure 29. Ces calculs corroborent ceux précédemment obtenus par Cesame (2008) par une méthode simplifiée et représentés par la courbe bleue de la même figure.

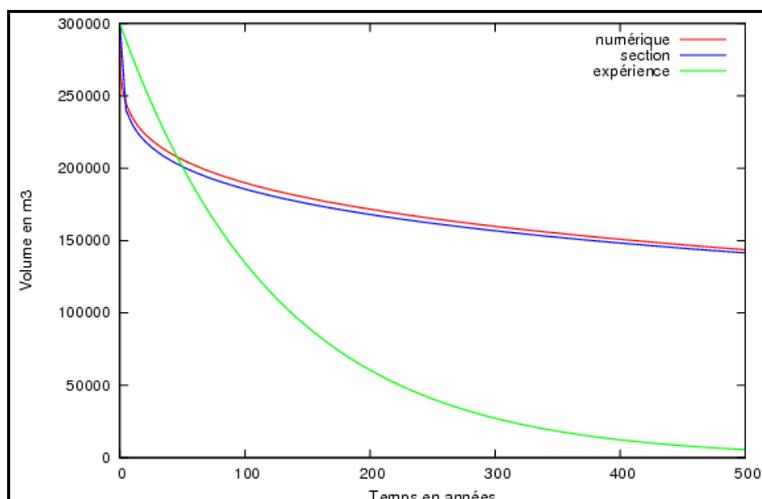


Figure 29. Comparaison de la variation volumique des galeries du site de stockage dans trois situations (Hadj-Hassen, 2009)

Légende : numérique = modèle axisymétrique, section = calcul simplifié de Cesame, expérience = modèle établi à partir des observations in situ.

²⁴ qui correspond à la déformation viscoplastique obtenue au bout d'une année sous un déviateur de 10 MPa

Pour la phase allant du creusement du site de stockage jusqu'à la fin de l'ennoyage, Hadj-Hassen (2009) a donc dû adapter le modèle de Vouille en lui apportant « une seconde composante linéaire » appelée Bt dans la formule de calcul de la convergence C en fonction du temps t [HH, 6] :

$$C = A \left[t^\alpha - \left(\frac{10}{365} \right)^\alpha \right] + Bt$$

Selon cette formule, « l'ennoyage des vides avec la saumure se traduit par une forte réduction de la convergence et par voie de conséquence par une diminution beaucoup moins rapide des volumes des vides résiduels » [HH, 7].

En conséquence (cf. Figure 30), « au début de l'ennoyage, le fluage du sel conduit à une perte de volume de l'ordre de 25%. Cette perte se poursuit lorsque les volumes sont abandonnés vides pour atteindre 41% au bout de 170 ans. Avec l'ennoyage des vides pendant cette période, la perte de volume est réduite à environ 31,3%, soit une différence de l'ordre de 10%. Après l'ennoyage, la réduction du volume devient encore plus faible et atteint seulement 31,4% au bout de 500 ans (sans ennoyage, cette réduction est de 52%) » [HH, 8].

Ainsi, pour cet auteur, la réduction du volume des vides du site de stockage (et par extension du reste de la mine) entre le début et la fin de l'ennoyage est seulement d'environ 7% et ce, quelle que soit la durée de l'ennoyage. Cette nouvelle modélisation ne conduit donc plus à la fermeture progressive des vides miniers en 500 ans comme précédemment mentionné mais à une réduction du volume des vides « de l'ordre de 0,43% » entre la fin de l'ennoyage (estimée à 150 ans) et la fin de la période simulée (soit 1 600 ans) [HH, 8].

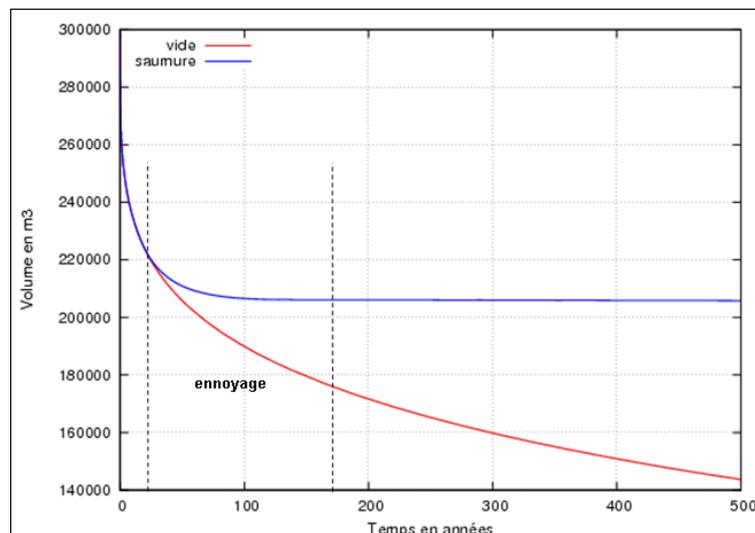


Figure 30. Evolution du volume des vides résiduels du site de stockage avec et sans ennoyage par de la saumure (Hadj-Hassen, 2009)

Force est de constater que la vitesse de compaction des vides miniers est fortement dépendante des opinions des divers auteurs et de la méthode de calcul ou de mesure employée. Par ailleurs, aucun auteur n'a effectué de calcul sur la

base des observations rapportées par MICA dans d'autres mines de sel où la vitesse de fluage du sel accélère au cours de l'ennoyage : ce point sera étudié par l'INERIS dans le cadre de la partie « géomécanique ». Il n'est pas non plus possible d'accéder aux anciens vides miniers actuellement ennoyés afin de vérifier in situ la validité de ces différentes hypothèses.

3.3.4 Durée d'ennoyage

3.3.4.1 Prise en compte de la géométrie du bloc-hôte

3.3.4.1.1 Mine Amélie isolée

Compte tenu du volume des cavités situées à une cote inférieure à celle du site de stockage et d'un débit d'ennoyage de 200 m³/mois, Combes & Ledoux (1990) ont calculé qu'il faudrait 1500 ans pour que les déchets commencent à être atteints par l'eau (Figure 31).

D'autre part, la « contamination éventuelle » des aquifères superficiels nécessiterait le remplissage total de la mine, soit 800 ans de plus.

La durée d'ennoyage totale est donc, selon ces auteurs, de 2300 ans pour une porosité retenue après ennoyage de 5%. La fourchette des estimations varie de 1200 à 3400 ans pour une porosité résiduelle choisie entre 2 et 8%.

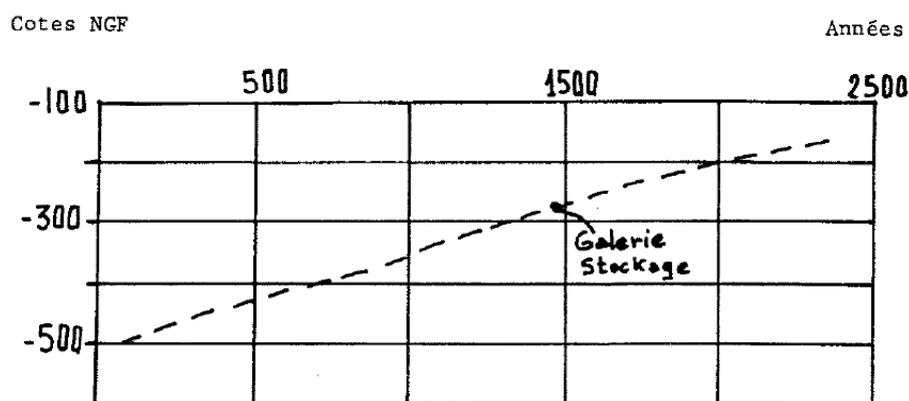


Figure 31. Evolution du niveau de l'eau dans les travaux miniers [4]

MICA (2004) prend en compte le même raisonnement et propose une durée d'ennoyage qui varie de 1200 à 3200 ans, c'est-à-dire dans la même gamme que précédemment et sur la base des mêmes valeurs de porosité retenues pour les vides foudroyés, soit entre 2% et 8% [28, 171]. En prenant l'hypothèse d'une porosité moyenne de 5%, valeur moyenne retenue par Combes et Ledoux (1990), le site de stockage serait atteint par l'eau en 1200 ans selon MICA (2004) et il faudrait encore 1100 ans pour que la mine soit totalement remplie [28, 172] : on retrouve donc la même durée d'ennoyage de 2300 ans (Tableau 9).

IDS (2004) se cale sur les valeurs précédemment citées pour dire que « ce n'est donc qu'au bout d'environ 2300 ans au minimum que l'eau sera susceptible de ramener en surface une éventuelle contamination issue du stockage » [31, 23].

Note : le bureau Cesame n'a pas calculé de durée d'envoyage pour la mine Amélie isolée.

Dans la bibliographie consultée, il apparaît donc des divergences majeures sur l'estimation de la durée d'envoyage de la mine Amélie isolée avec des valeurs qui s'échelonnent de 1200 à 3400 ans selon la porosité résiduelle retenue et une durée moyenne de 900 ± 400 ans.

Tableau 9. Estimation de la durée d'envoyage de la mine Amélie isolée [28]

Mine Amélie (dont StocaMine)	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 2%	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 5%	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 8%
Volume de vides résiduels estimés	2 900 000 m ³	5 490 000 m ³	8 000 000 m ³
Temps de remplissage en années avec un débit d'alimentation de 200 m ³ /mois	1 200	2 300	3 400

3.3.4.1.2 Bassin de Wittelsheim

Combes et Ledoux (1990) estiment que, du fait de l'érosion régressive par de l'eau non saturée, « on ne peut donc exclure un percement du stot à très long terme qui ne pourrait en tout état de cause intervenir, qu'après l'envoyage de la mine Marie-Louise » [4, 33], lequel durerait environ 1000 ans. Ensuite, il faudra que l'eau dissolve le stot : « on peut conclure de ces réflexions qu'une mise en communication des deux mines avant un minimum de 10 000 ans est peu réaliste » [4, 34].

Pour MICA (2004), en appliquant le même débit résiduel de percolation de 200 m³/mois par puits, on obtient un débit total d'envoyage de 1800 m³/mois pour l'ensemble du bassin de Wittelsheim [28, 174]. Avec ce débit, il faudra entre 200 et 800 ans pour envoyer totalement toutes les mines en communication, selon la valeur de porosité retenue [28, 176]. Sur la base d'une porosité moyenne de 5%, il faudra par exemple 400 ans à l'eau pour atteindre les déchets et 130 ans de plus pour envoyer la mine soit un total de 530 ans (*Tableau 10*). Pour ces auteurs, la mine serait ainsi envoyée 4 fois plus vite si le stot n'est pas étanche.

Tableau 10. Estimation de la durée d'envoyage du bassin de Wittelsheim[28]

Bassin de Wittelsheim	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 2%	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 5%	Volume à envoyer pour une porosité initiale de 8%
Volume de vides résiduels estimés	5 800 000 m ³	11 500 000 m ³	17 300 000 m ³
Temps de remplissage en années avec un débit d'alimentation de 1800 m ³ /mois	270	530	800

IDS (2004) reprend ces valeurs et estime qu'il faudra entre 270 et 800 ans pour que la mine soit ennoyée. Sur la base d'une porosité moyenne de 5%, il faudrait « environ 400 ans pour que le site de stockage commence à être ennoyé » puis une vingtaine d'années pour achever son ennoyage entre les cotes -300 et -240 m NGF [31, 23]. Pour ces auteurs, « l'ennoyage total de la mine serait effectif au bout d'environ 500 ans. Ce n'est qu'à partir de ce moment là qu'une circulation hydraulique serait susceptible de ramener à la surface une éventuelle contamination issue des déchets du stockage ».

Pour Cesame (2008) et pour les MDPA (2008), la *Figure 32* montre qu'en superposant le volume de saumure entrant dans la mine (courbe bleue) avec l'évolution des vides par fluage (courbe verte) et en tenant compte des vides supplémentaires créés par dissolution de l'eau douce entrant dans la mine (courbe rose), « la durée de l'ennoyage s'établirait à un peu plus de 150 ans » [MDPA, 1029].

Les MDPA reprennent donc ces calculs à leur compte mais signalent que si le débit d'ennoyage s'avérait plus faible, « l'ennoyage du système serait évidemment plus long mais devrait dans tous les cas s'achever dans une limite d'environ 500 ans correspondant raisonnablement à la cicatrisation complète du massif influencé par l'exploitation minière » [MDPA, 1030].

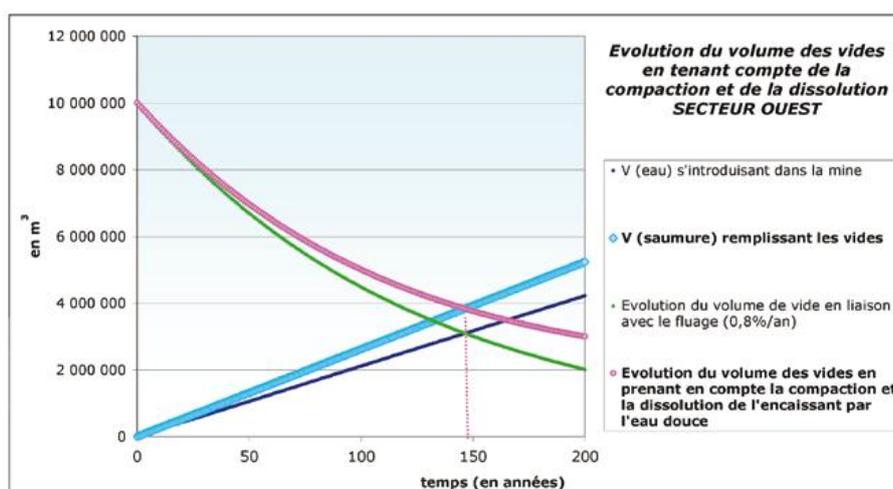


Figure 32. Estimation de la durée d'ennoyage du secteur ouest [4]

La durée d'ennoyage du bassin de Wittelsheim est extrêmement variable selon les auteurs (Tableau 11) : pour Combes et Ledoux (1990), l'ennoyage des deux mines ne peut raisonnablement pas se produire avant 10 000 ans alors que pour MICA (2004) il durerait en moyenne 530 ans et que pour Cesame (2008), il s'établirait à environ 150 ans. Les MDPA penchent également pour un ennoyage rapide, en 150 ans, mais avec une fourchette haute pouvant aller jusqu'à un maximum de 500 ans.

Cette forte incertitude résulte des écarts constatés à la fois sur le débit d'ennoyage, sur la résistance du stot et sur le volume de vides résiduels.

Enfin, si l'on tient compte du fait que le débit d'envoyage peut être supérieur d'un facteur 2 à 3 au débit théorique attendu, cela devrait conduire à une réduction de la durée d'envoyage du même ordre de grandeur.

Tableau 11. Différentes durées d'envoyage du bassin de Wittelsheim (ans)

Auteurs	Hypothèse basse	Hypothèse haute	Valeur retenue
Combes & Ledoux (1990)	10 000	60 000	> 10 000
MICA (2004)	270	800	530
Cesame (2008)	-	-	150
MDPA (2008)	150	500	> 150

Outre la durée d'envoyage proprement dite, MICA (2004) signale que, du fait de l'existence d'une distance de 11,5 km entre les puits extrêmes en communication au sein du bassin de Wittelsheim, il faudra ajouter 600 à 1400 ans pour qu'un polluant mis en solution au niveau du stockage puisse atteindre la surface (Tableau 12). Cela correspond au cas où la saumure contaminée²⁵ ne serait entraînée par le flux qu'une fois la mine complètement remplie [28, 199]. Pour ces auteurs, en tenant compte d'une durée d'envoyage de la nappe d'environ 500 ans et d'un temps de transfert supplémentaire de 600 à 1400 ans, il ne devrait donc pas y avoir de sortie d'effluent contaminé en surface avant 1100 à 2000 ans.

Tableau 12. Estimation du temps de transit des eaux entre le site de stockage et les exutoires aval du bassin de Wittelsheim [28]

Puits pouvant assurer un rôle d'exutoire	Temps de transit minimal nécessaire pour qu'une eau contaminée puisse atteindre la biosphère
Puits Marie et Marie-Louise (incertain)	600 ans
Puits Schoenensteinbach	1 400 ans
Puits Rodolphe 1 & 2	800 ans
Puits Alex	1 100 ans
Puits Ungersheim 1 & 2	1 000 ans

²⁵ Mise en mouvement suite à un déséquilibre hydrostatique générant un flux de l'ordre de 200 m³/an (voir chapitre suivant).

3.3.5 Conclusion des scénarios d'ennoyage

L'ennoyage de la mine est actuellement en cours dans le bassin de Wittelsheim sauf au droit des puits Joseph et Else qui sont encore en activité. Cet ennoyage se produit par une percolation d'eau d'origine superficielle (aquifères du Tertiaire et du Quaternaire) à travers l'intrados et l'extrados des puits remblayés.

Outre le débit d'eau pénétrant dans la mine, l'estimation de la durée d'ennoyage fait intervenir d'autres facteurs comme le volume de vides actuels et son évolution future (fermeture par fluage mais aussi création par dissolution de sel).

D'après des calculs théoriques basés sur la loi de Darcy ainsi que d'après quelques mesures in situ, le débit d'ennoyage de la mine serait compris entre 160 et 300 m³/mois pour la mine Amélie seule et entre 1810 et 3330 m³/mois pour l'ensemble du bassin de Wittelsheim.

En ce qui concerne le volume des vides miniers résiduels, ceux-ci évoluent dans une fourchette également large allant de 3 à 8 Mm³ pour la mine Amélie et de 6 à 17 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim.

Ainsi, les durées d'ennoyage s'étalent-elles de 150 ans à 2300 ans, avec une hypothèse maximale à plus de 10 000 ans qui intègre la dissolution du stot dans l'hypothèse où il serait encore intact. Compte tenu des récentes mesures de débit de percolation à la base des puits remblayés de la mine Amélie et de l'hypothèse selon laquelle le fluage s'accélérerait au cours de l'ennoyage, il se pourrait que la durée d'ennoyage soit encore significativement réduite.

3.4 DEVENIR DE LA MINE EN FIN D'ENNOYAGE

3.4.1 Evolution des vides miniers

Il a été vu précédemment que l'évolution des vides miniers en l'absence d'ennoyage conduit à la fermeture des vides en une durée de l'ordre de 500 ans d'après les études réalisées jusqu'à présent.

La question de l'évolution des vides miniers après l'ennoyage a tout d'abord été abordée par Vouille qui estime que le déviateur de contrainte induit par le remplissage des vides par la saumure fait diminuer la vitesse de fluage d'un facteur 10 à 50 mais qu'il ne supprime pas le fluage.

Ainsi, les MDPAs (2008) rappellent que « dans toutes les lois rhéologiques proposées pour le sel, la vitesse de fluage est dépendante de la partie déviatorique (σ_d) du tenseur de contrainte et y est reliée par une loi de puissance » [MDPA, 1051]. L'exposant de cette loi varie de 3 à 5, ce qui fait que la vitesse de convergence peut-être diminuée d'un facteur 8 à 32 si le déviateur est divisé par 2. Or, après remplissage par de la saumure, la diminution de contrainte sera d'environ 2,2 ce qui entraînera « une diminution de la vitesse de fluage de 2,2³ (\approx 10) à 2,2⁵ (\approx 50) : une fois la mine pleine de saumure, la vitesse de fluage ne représenterait plus que 2 à 10% de la vitesse initiale » [MDPA, 1052].

Cesame (2008) reprend cette hypothèse en écrivant que « une fois l'ennoyage effectif, les observations et l'interprétation mathématique de la loi de fluage, conduisent à envisager un net ralentissement de la compaction, sans toutefois arrêter le phénomène qui conduirait à terme à la fermeture complète du massif » [39, 55]. Cependant, ces auteurs prennent la précaution de préciser un peu plus

loin que « il est tout à fait possible que la compaction s'arrête une fois que les vides résiduels seront pleins de saumure » [39, 56] !

La question de l'évolution des vides miniers après l'ennoyage a également été traitée par Hadj-Hassen (2009) qui a simulé un net ralentissement du fluage au cours de l'ennoyage et qui a calculé que la réduction du volume des vides ne serait que de 7% quelle que soit la durée de l'ennoyage.

Il est ici rappelé la remarque de MICA (2004) qui a observé dans d'autres mines une augmentation de la vitesse de fluage jusqu'à un facteur 2 ou 3 et que « aucun essai géomécanique n'a été réalisé sur le sel de StocaMine en présence de saumure » [28, 128]. Cependant, cette affirmation n'est pas exacte et l'étude géomécanique en cours à l'INERIS se référera aux résultats des essais de laboratoire réalisés sur le sel de la mine Amélie en contact avec la saumure.

Ainsi, pour MICA (2004), « une fois que le stockage sera ennoyé par la saumure, il est donc fort probable qu'il y ait une accélération de la convergence » [28, 83].

La question du devenir des vides miniers après ennoyage reste donc ouverte : le fluage va-t-il ralentir ou risque-t-il d'accélérer ? De quelle ampleur sera le phénomène et quelle durée aura-t-il ? L'INERIS devra s'attacher à apporter une réponse à cette question dans la suite de l'étude.

3.4.2 Comportement de la saumure après ennoyage

Le remplissage de la mine par de l'eau douce issue des aquifères superficiels par le biais des puits remblayés va conduire à la saturation de cette eau qui se transformera ainsi en saumure dans les galeries profondes.

A la fin de l'ennoyage des galeries, l'eau douce arrivant toujours dans les puits ne pourra plus se saturer en sel dès lors que le niveau atteint sera supérieur à celui du toit des couches de sel. Il se formera alors une interface entre l'eau douce superficielle descendante et la saumure profonde remontante. De la nature (abrupte ou diffuse) et de la profondeur de cette interface dépendra le risque d'un écoulement ou pas de saumure vers les compartiments superficiels.

Avant d'aborder ce chapitre, il semble nécessaire d'évoquer pour mémoire l'hypothèse, présentée par l'Ecole de Chimie de Mulhouse, d'une imperméabilisation totale des vides miniers ennoyés par recristallisation de sel. Cette hypothèse pourrait conduire, selon ses auteurs, à l'imperméabilisation totale du site de stockage par précipitation du sel en excès. Cela est a été discuté par l'INERIS (1996) qui conclut « qu'étant donné la complexité des nombreux phénomènes en jeu, il ne nous paraît pas justifié que le scénario de l'évolution à long terme du stockage STOCAMINE repose sur une recristallisation massive du sel isolant les déchets » [13, 72].

3.4.2.1 Hypothèse d'un équilibre hydrostatique

a) Mine Amélie isolée :

Pour Combes et Ledoux (1990), tant que la mine Amélie restera isolée, l'interface eau douce/saumure devrait être abrupte et sa position sera « toujours très en dessous de la base des niveaux aquifères. Ceci signifie qu'un équilibre

hydrostatique est théoriquement possible avec comme conséquence une absence de circulation de l'eau dans les vides résiduels et donc de transport d'une pollution vers l'environnement » [4, 31].

Par ailleurs, bien qu'ayant été établie pour une saumure saturée de densité 1,2, la présence d'une interface abrupte « reste encore valable même si l'on considère que l'eau ne se sature pas totalement (densité 1,1 pour une salinité de 150 g/l) ».

IDS (2004) signale que « tant que les cuvelages feront leur office, et sous réserve que les aquifères recoupés aient une circulation effective, l'interface saumure / eau douce restera tranché et aucune circulation ne pourra s'établir [31, 34]. Cela sera d'autant plus marqué que l'interface en question se produira au sein du remblayage des puits et que, toujours d'après IDS (2004), « la très faible perméabilité des cendres volantes limitera beaucoup ce phénomène ». Il est cependant permis de douter de cette « très faible perméabilité » en l'absence de mesures concernant uniquement le remblayage de cendres volantes : d'autre part, la conclusion de l'étude IDS mentionne que ce phénomène peut également se produire à l'extérieur des cuvelages des puits. Cependant, dans cette hypothèse, aucun calcul ou estimation de débit n'a été proposé.

Pour conclure, IDS (2004) écrit que « l'établissement d'une circulation d'eau entre les puits amont et les puits aval n'est donc pas certain et, s'il se produit, le phénomène d'amorçage du système peut s'avérer très long, et être bloqué par les phénomènes de fermeture de la mine avant d'avoir pu s'établir » [31, 35].

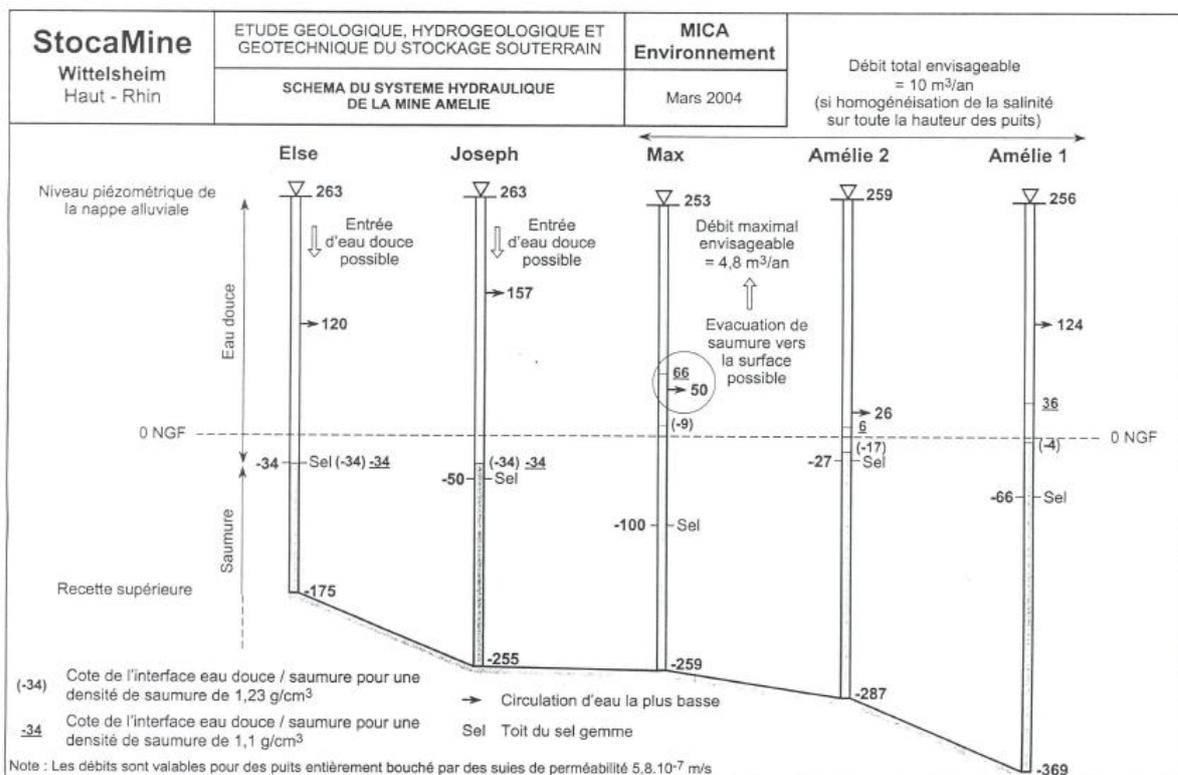


Figure 33. Schéma d'écoulement de l'eau après ennoyage de la mine Amélie [28]

Pour MICA (2004), si l'interface eau douce/eau salée est abrupte et que la saumure est saturée en KCl et NaCl (densité = 1,23), le système sera stable car les puits seront remplis de saumure saturée en sel de leur base jusqu'au toit du sel [28, 186].

Dans le cas du puits Else, qui est situé en amont hydrogéologique et qui gouverne donc le reste des écoulements, cela se produira à -34 m NGF : un équilibre s'établira ensuite avec les autres puits par ajustement hydrostatique par rapport à la piézométrie de la nappe alluviale (*Figure 33*).

Si la mine Amélie restait isolée, il est donc fort probable qu'un équilibre hydrostatique s'établirait du fait du positionnement de l'interface eau douce/saumure. Ce raisonnement est moins simple dans le cas où la mine Amélie communiquerait avec l'ensemble du bassin de Wittelsheim.

b) Bassin de Wittelsheim :

Ainsi, pour les MDPa (2008), à la fin de l'envoyage et dans l'hypothèse d'une mise en communication de la mine Amélie avec le reste du bassin de Wittelsheim, « le système hydrogéologique sera constitué d'une couche d'eau profonde saturée en sel (densité 1,2) et de colonnes d'eau douce (densité 1) flottant sur cette saumure au droit de chaque puits » [MDPa, 1047]. La cote initiale de cette saumure correspondra à la cote des couches salifères selon le schéma présenté en Figure 34.

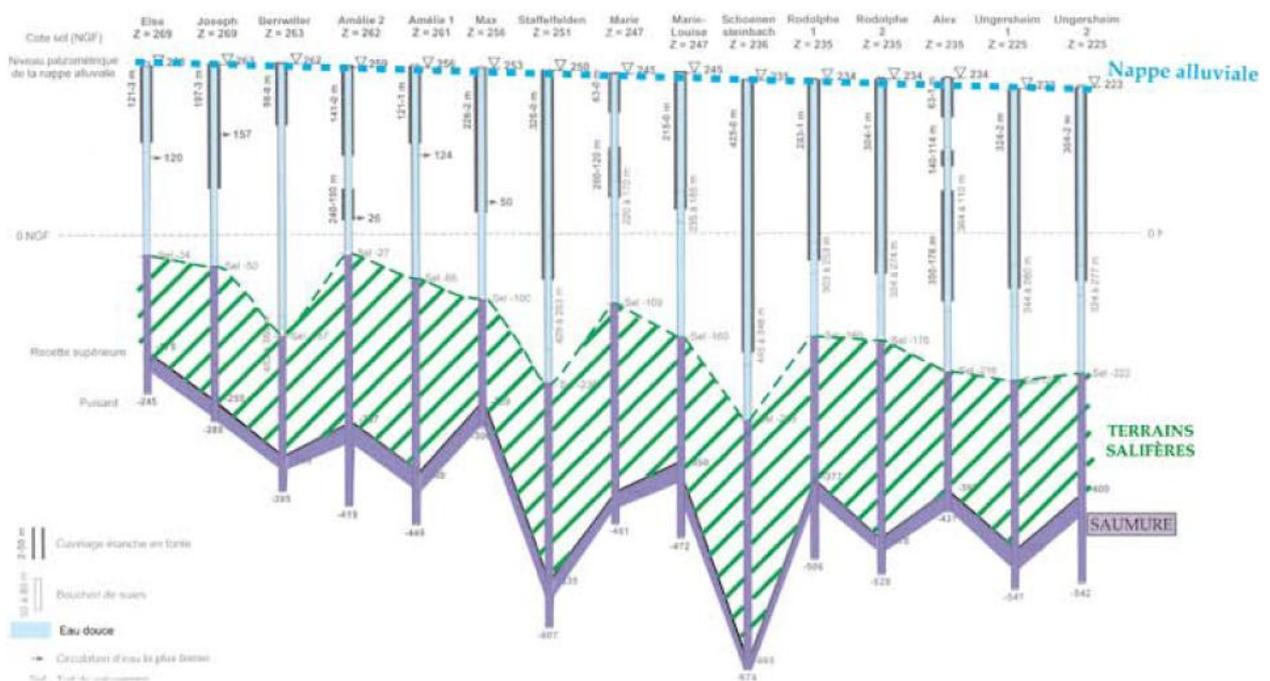


Figure 34. Schéma de mise en pace d'un équilibre hydrostatique dans le secteur Ouest (MDPa, 2008)

Par rapport à un niveau piézométrique médian situé entre 245 et 250 m NGF, l'équilibre de la colonne d'eau des puits avec la nappe alluviale va délimiter des puits amont et des puits aval :

- les puits amont où la nappe se trouve au dessus de ce niveau médian seront Joseph, Else, Berrwiller, Amélie I et II, Max, Staffelfelden ;
- les puits aval où la nappe se trouve au dessous de ce niveau médian seront Marie, Marie-Louise, Schoenensteinbach, Rodolphe I et II, Alex, Ungersheim I et II.

Les puits étant tous en liaison par le biais des vides miniers résiduels, leur charge hydraulique va finir par s'équilibrer en fonction du poids de la colonne de saumure et de la colonne d'eau douce et ce, par rapport à la cote de la nappe alluviale.

Pour compenser la charge piézométrique plus basse de la nappe alluviale à son aval hydrogéologique, « le niveau de saumure dans les puits aval va s'élever » avec le risque que la colonne de saumure « atteigne des cotes correspondant à celles des nappes aquifères supérieures qui pourraient alors subir des intrusions de saumure » [MDPA 1047].

Cependant, les calculs réalisés par MDPa (2008) indiquent que « la hauteur des colonnes des puits aval est suffisante pour permettre la mise en place d'un équilibre sans que le niveau de saumure dans les puits aval n'atteigne les terrains du Quaternaire » [MDPA, 1049].

De ce fait, « au terme du remplissage de la mine, l'hypothèse la plus réaliste est la mise en place d'un équilibre hydrostatique s'imposant du fait de la densité plus élevée de la saumure qui permet son maintien au fond et l'instauration d'un équilibre entre les différents puits de la mine » [MDPA, 1051]. L'apparition de cet équilibre « supprime les possibilités d'écoulement dans la mine donc entre la mine et l'extérieur. Dans le secteur Ouest, aucun échange ne se produirait entre la mine et la nappe alluviale » et seul quelques échanges très limités auraient lieu dans le secteur Est lorsque la saumure atteindrait le niveau de la nappe (notamment aux puits Ensisheim 1 et 2).

Néanmoins, nous considérons que cette hypothèse devra être vérifiée car il est nécessaire de prendre en compte l'effet de la température : l'écart entre la concentration à saturation au fond de la mine (vers 50°C) et dans la nappe phréatique (à environ 10°C) est de nature à créer une convection lente susceptibles d'entraîner une dissolution à la base et une précipitation au sommet de la colonne de saumure.

3.4.2.2 Hypothèse d'un déséquilibre hydrostatique

Pour Combes et Ledoux (1990), si la mine Amélie reste isolée, deux hypothèses distinctes peuvent conduire à un écoulement de saumure.

- 1) Lorsque l'eau atteindra la cote -150 m NGF, il faudra encore une dizaine d'années pour que s'établisse un équilibre entre les différents puits de mine : c'est lors de cet état stationnaire que pourrait se produire « une éventuelle circulation d'eaux contaminées vers la biosphère » [4, 30].
- 2) En lieu et place d'une interface abrupte, il pourrait s'établir une « zone de transition d'épaisseur plus ou moins importante dont l'estimation est

impossible. Dans la mesure où une concentration en sel même minime atteindrait les horizons aquifères, il s'établirait un écoulement visant à amener des eaux salées de la profondeur vers la surface, qui pourraient véhiculer des polluants ».

En se plaçant dans l'hypothèse pessimiste d'une disparition complète de cette interface par homogénéisation de la salinité dans tout le système, le flux de saumure (potentiellement contaminée) susceptible de transiter à travers les puits aval²⁶ de la mine Amélie et de s'épancher en surface serait de 10 m³/an [4, 32].

Pour MICA (2004), si la saumure n'est pas totalement saturée (par exemple à une densité < 1,1), « il peut y avoir un entraînement d'eau profonde salée par la circulation d'eau la plus basse du puits Max » ainsi que par les autres puits situés en aval hydrogéologique [28, 187]. Dans ce cas, l'interface eau douce/ saumure ne sera pas tranchée et un débit d'écoulement pourra se mettre en place, même au sein de la mine Amélie isolée. Ce débit sera entrant aux puits Joseph et Else et sortant aux autres puits avec un débit total de 10,5 m³/an réparti en [28, 188] :

- 3,8 m³/an au puits Amélie I
- 1,9 m³/an au puits Amélie II
- 4,8 m³/an au puits Max

IDS (2004) reprend cette hypothèse et confirme que, dans le cas le plus défavorable, le flux maximal serait d'environ 10 m³/an.

Par contre, pour Combes et Ledoux (1990), une fois la communication établie entre les deux mines, « les deux systèmes hydrauliques jusque là indépendants n'en formeront plus qu'un et l'état final sera commandé par les niveaux piézométriques des aquifères en relation avec les 15 puits rebouchés ». Dans cette hypothèse, l'équilibre hydrostatique lié aux contrastes de densité eau douce/eau salée, précédemment observé dans le cas de la mine Amélie isolée, ne sera plus possible compte tenu de « l'approfondissement vers le nord des niveaux perméables de la couverture de la série salifère ». Il y aura donc un débit transitant à travers le système hydraulique général et susceptible de rejoindre les aquifères après avoir lixivié les déchets. Dans ce cas, « les 5 puits de la mine Amélie seront introducteurs. Le débit total transitant s'élève à 90 m³/an dont 38 m³/an proviennent des puits Joseph et Else. Les exutoires majeurs sont les puits d'Ungersheim qui évacuent 40 m³/an » [4, 34].

MICA (2004) a appliqué son raisonnement précédent sur l'interface eau douce / saumure au cas des 15 puits du bassin de Wittelsheim. Il obtient une interface eau douce/eau salée qui remonte au maximum à 140 m NGF dans les puits d'Ungersheim : dans ce cas, il considère que la saumure saturée ne pourrait pas ressortir directement dans la nappe alluviale située 85 m au-dessus [28, 189].

Cependant, cet équilibre hydrostatique pourra être rompu dans deux conditions :

- s'il existe une autre possibilité de circulation aquifère que par le biais de la nappe alluviale (Chattien, Stampien ou sommet de la zone salifère supérieure) ;
- si la densité de la saumure devient inférieure à 1,15 (Figure 35).

²⁶ Amélie I, Amélie II et Max

Pour IDS (2004), comme les 6 puits aval de ce bassin ont recoupé des horizons aquifères au sein du Stampien et dans la zone à gypse jusqu'à environ -100 m NGF, un écoulement significatif pourrait alors se produire du fait de la dilution de la saumure à ce niveau. Dans ce cas, les 5 puits de la mine Amélie plus le puits Berrwiller seront entrants et « les autres puits constitueront les exutoires du système avec cependant une incertitude concernant les puits Staffelfelden, Marie et Louise dont les flux pourraient s'avérer négligeables » [28, 191].

Dans l'hypothèse précédente, le débit d'épanchement dans la nappe alluviale serait alors compris entre 195 et 238 m³/an avec (Tableau 13) :

- un débit cumulé de 54 m³/an pour les puits Joseph et Else qui se trouveront en amont hydraulique du stockage et dont les percolations pourront seules lixivier les déchets
- un débit d'épanchement de 92 m³/an aux puits Ungersheim 1 et 2 qui constitueront les principaux exutoires du système.

Note : pour que l'écoulement se produise à travers tout le bassin de Wittelsheim, il faut qu'il y ait un débit de transit de saumure à travers le stot de 146 m³/an [28, 199].

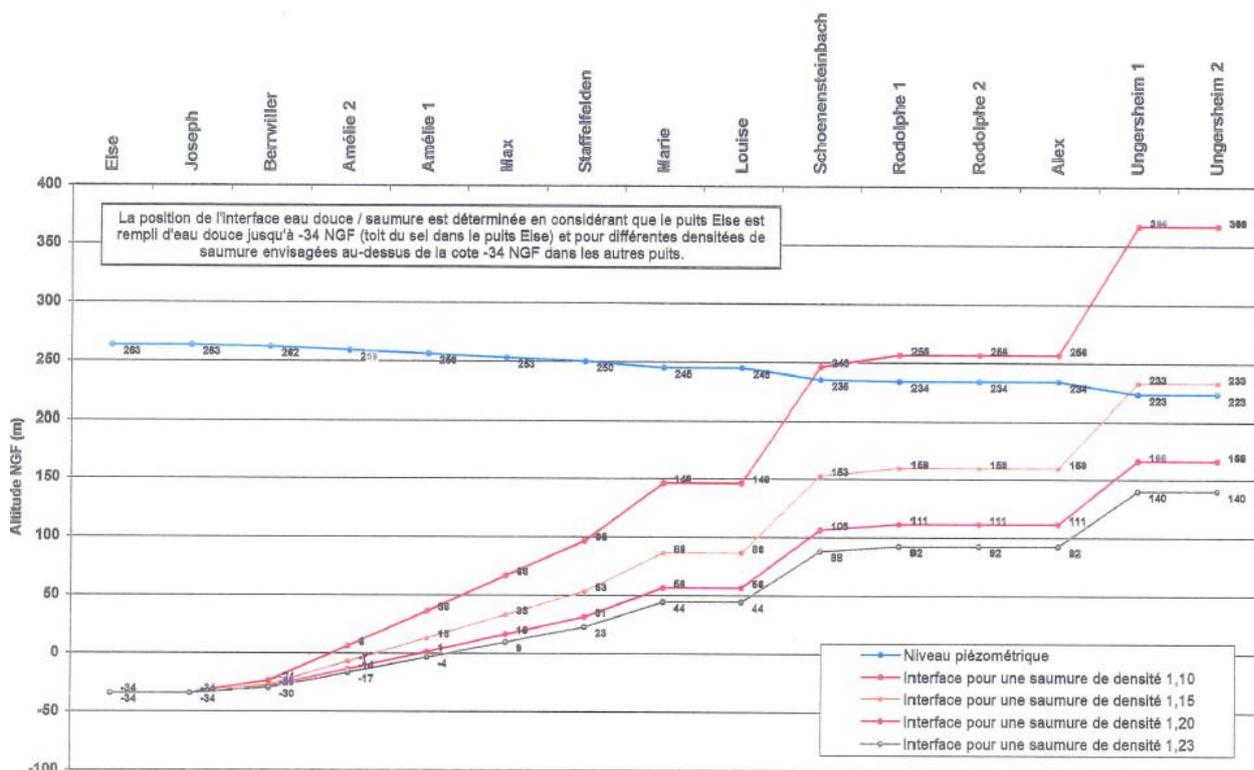


Figure 35. Position théorique de l'interface eau douce/saumure à l'équilibre hydrostatique dans le bassin de Wittelsheim pour différentes densités de saumure (MICA, 2004)

Il faut noter quelques modifications à prendre en compte depuis l'étude MICA de 2004 et qui concernent :

- l'épaisseur des bouchons des puits Amélie I et d'Amélie II qui est de 150 m au lieu des 313 et 493 m initialement prévus ;
- les flux mesurés à l'extrados qui sont plus importants pour les puits Amélie I et Amélie II, et correspondent approximativement aux flux provenant d'un bouchon de seulement 50 m d'épaisseur.

Si l'on considère que les flux transitant à travers le bassin sont conditionnés par l'épaisseur cumulée des bouchons, celle-ci atteint 1411m²⁷ dans la zone amont et 612 à 888 m dans la zone aval²⁸. Cependant, l'« épaisseur équivalente » cumulée des bouchons de la zone amont est en réalité plus faible car les flux mis en évidence à l'extrados des puits Amélie 1 et 2 correspondent à ceux provenant de bouchons de seulement 50 m d'épaisseur. Ainsi, les flux de la zone amont seront probablement imposés par les puits Berrwiller, Amélie 1 et Amélie 2, qui totalisent une « épaisseur équivalente » de bouchons amont de l'ordre de 200 m. Du fait de l'épaisseur réduite des bouchons de la zone aval, c'est donc la résistance de la zone amont qui devient limitante dans le calcul des flux : or, cette valeur de 200 m de cumul des « épaisseurs équivalentes » de bouchons amont représente environ la moitié de la résistance évaluée par MICA (2004).

Compte tenu de ces nouveaux éléments, il est donc possible que l'épanchement lié à la mise en place d'un déséquilibre hydrostatique – si les conditions sont favorables pour qu'il se produise – puisse atteindre un débit cumulé de l'ordre de 400 m³/an et non de 200 m³/an comme initialement prévu par MICA (2004). Pour pouvoir se prononcer sur ce phénomène, l'INERIS sollicitera l'avis d'un expert hydrogéologue.

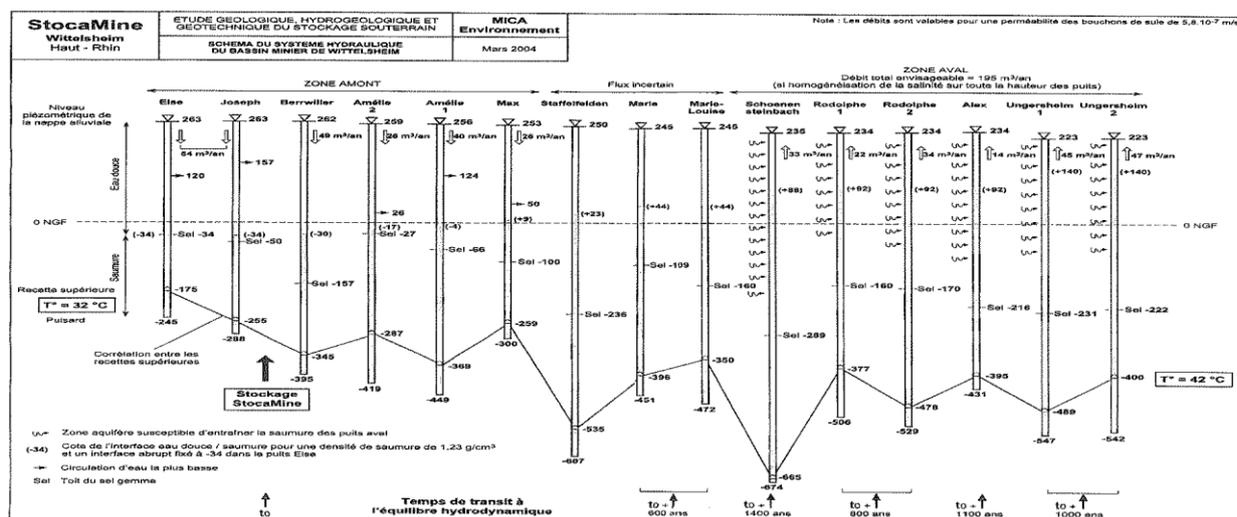


Figure 36. Schématisation des flux et des temps de transfert après l'envoyage [28]

²⁷ L'épaisseur mentionnée dans le tableau est de 1917 m mais les puits Amélie 1 et 2 ont été remblayés avec une épaisseur de bouchon moindre que ce qui avait été initialement prévu.

²⁸ selon la prise en compte ou pas des puits dont le flux est incertain.

Tableau 13. Evaluation du débit d'épanchement à travers les puits du bassin de Wittelsheim (MICA, 2004)

	Zone amont (infiltration)						Flux incertain			Zone aval (exutoires)					
	Eise	Joseph	Bernwiller	Amélie 2	Amélie 1	Max	Stauffelden	Marie	Louise	Schoenensteinbach	Rodolphe 1	Rodolphe 2	Alex	Ungersheim 1	Ungersheim 2
Niveau piézométrique (NGF)	263	263	262	259	256	253	250	245	245	235	234	234	234	223	223
Charge hydraulique (m) entre la zone amont et le puits aval considéré après retour à l'état initial	0	0	1	4	7	10	13	18	18	28	29	29	29	40	40
Epaisseur du bouchon du puits (m)	295	412	95	313	493	309	176	50	50	97	50	50	254	64	47
Cumuls des bouchons (m) en considérant un bouchon moyen de 320 m pour les puits de la zone amont	-	-	-	-	-	-	496	370	370	417	370	370	574	384	367
Section des puits (m ²)	16	16	28,7	16	23,7	16	31,2	15,9	15,9	27,3	15,9	23,8	15,9	23,8	23,8
Débit total évacué par les puits en m ³ /an	-	-	-	-	-	-	15	14	14	33	22	34	14	45	47
	Total =						43 m ³ /an			195 m ³ /an					

La Figure 37 issue du rapport MICA schématise les flux d'eau vers la surface dans l'état final ainsi décrit. Les auteurs mentionnent qu'il est impossible de savoir quelle serait la proportion de saumure entraînée par les horizons aquifères du Stampien mais « il a été estimé que 50% du flux de saumure saturée serait susceptible de rejoindre la nappe alluviale après une dilution d'au moins un facteur 20 par les eaux peu chargées du Stampien. Le reste de la saumure issue des puits (50%) serait entraîné en profondeur dans l'aquifère Stampien, où il est probable quelle continuera de se diluer progressivement sur une très longue période » [28, 192].

En outre, il faut tenir compte du gradient géothermique plus élevé que la moyenne dans le bassin potassique avec une moyenne de 37°C/km [28, 205]. Dans le bassin de Wittelsheim, plus de la moitié des travaux miniers est située à moins de 625 m de profondeur mais environ 2% se trouve au-delà de 1000 m (jusqu'à environ 1110 m) [MDPA, 1026]. Du fait de cette profondeur, la température au fond ne dépasse pas 50°C alors qu'en surface, la température annuelle moyenne de la nappe d'Alsace est d'environ 10°C. MICA (2004) note que « le contraste de température entre l'eau superficielle froide et l'eau profonde plus chaude est un phénomène qui peut participer à l'homogénéisation de la salinité dans les puits » [28, 205]. Cependant, un tel phénomène semble difficile à instaurer, essentiellement du fait que la saumure profonde chaude sera également saturée et qu'il est nécessaire qu'elle passe par un premier stade de dilution pour atteindre une densité d'au moins 1,1, ce qui implique également une forte diminution de la température. Par contre, il pourrait se produire un amorçage de ce phénomène s'il

existe « une circulation non négligeable initiée par la différence de charge entre les puits ».

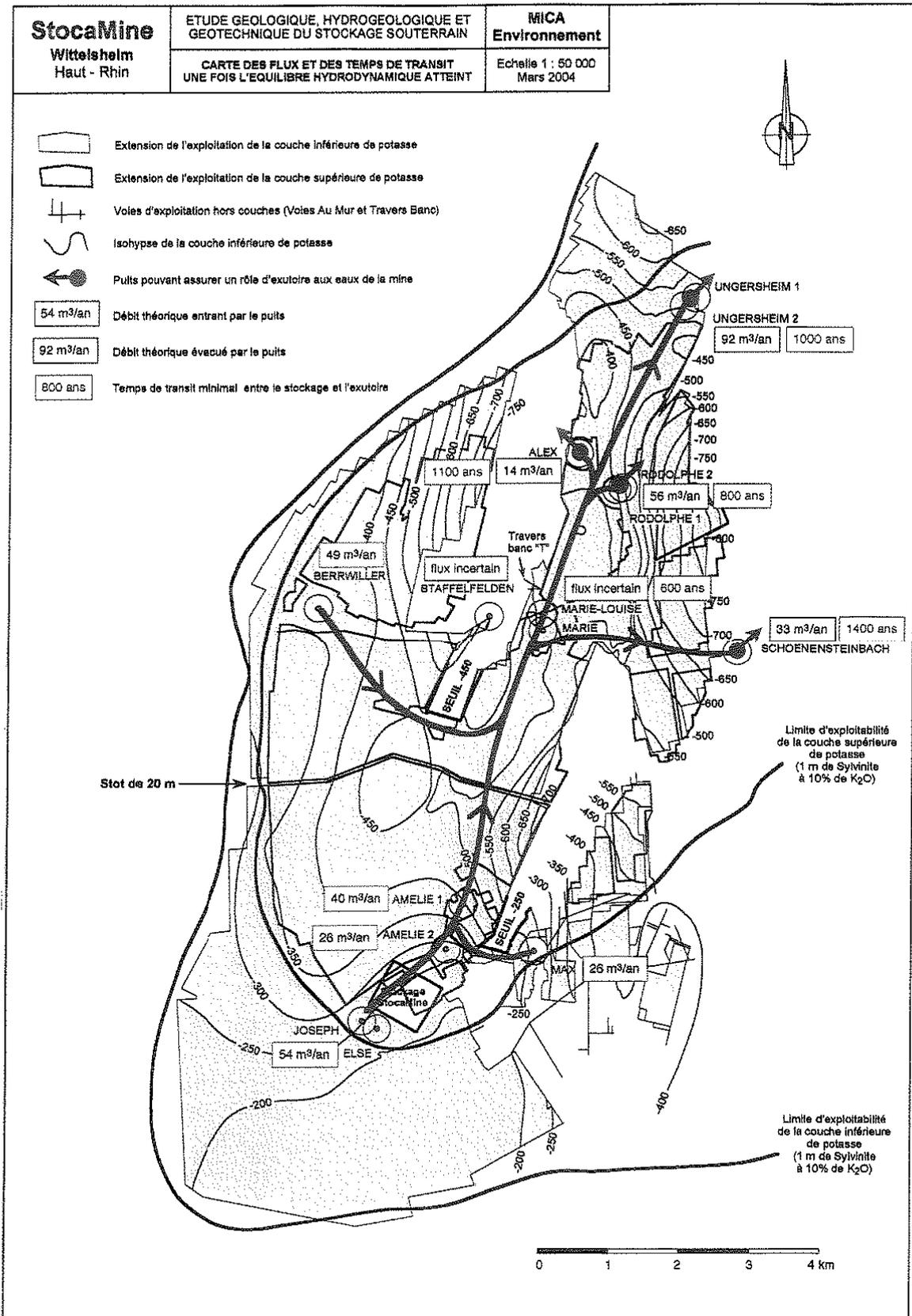


Figure 37. Cartographie des flux et des temps de transfert après l'ennoyage [28]

3.4.3 Débit de fuite lié au fluage du sel

Les MDPAs (2008) ont précisé précédemment que « au terme du remplissage, un autre facteur peut intervenir dans le cas spécifique des mines de potasse, c'est la possibilité d'une expulsion progressive de la saumure du fait de la poursuite de la compaction des terrains par fluage ». Il faut donc envisager un débit de fuite lié à l'expulsion progressive de la saumure du fait de la poursuite de la compaction des terrains par fluage. L'ordre de grandeur de ce débit a été calculé par les MDPAs selon deux hypothèses (Figure 38) :

- si la compaction résiduelle ne représente que 2% de la compaction en l'absence de saumure, ce débit sera de 500 m³/an ;
- si la compaction résiduelle représente 10% de la compaction en l'absence de saumure, ce débit atteindra 3000 m³/an.

Pour les MDPAs (2008), l'expulsion de saumure serait préférentiellement concentrée en début de phénomène, ce qui revient à admettre l'hypothèse d'une augmentation de la vitesse de fluage en début de phase d'ennoyage.

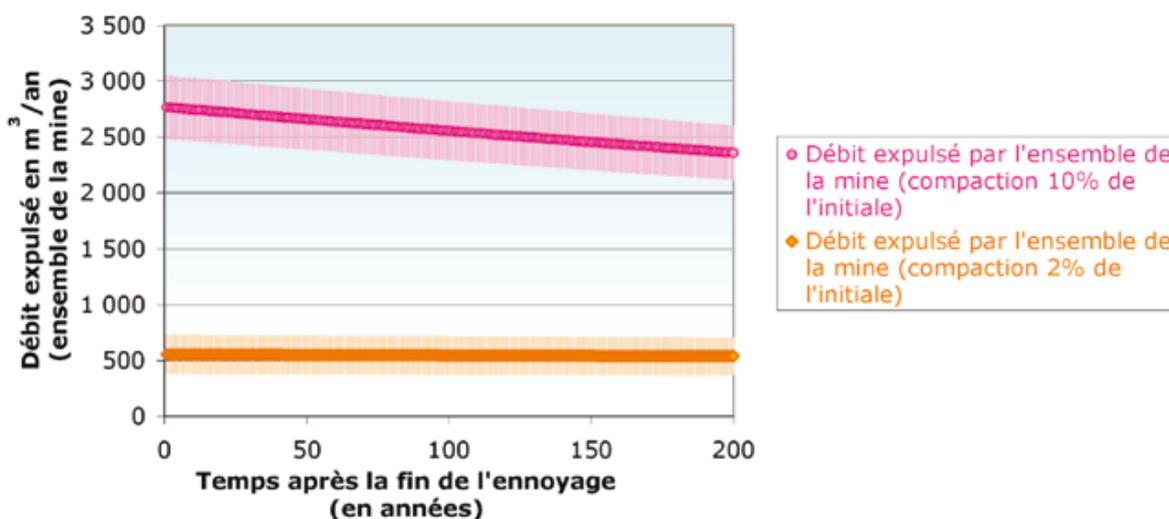


Figure 38. Estimation de l'expulsion de saumure dans le secteur Ouest en cas de poursuite de la compaction [28]

Cesame (2008) mentionne la possibilité de telles sorties de saumure au niveau des puits de mine avec un débit cumulé de 4700 m³/an au maximum pour l'ensemble du bassin potassiques (soit 24 puits) [39, 58]. Cependant, les calculs effectués demandant à être confirmés, une étude de l'influence de la compaction sur les débits de fuite potentiels a été récemment confiée à Mines ParisTech (Hadj-Hassen, 2009). Pour cet auteur, « les vides souterrains seront amenés à se fermer lentement sous l'effet du fluage du sel, la question se pose donc du devenir de la saumure contenue dans la mine sur le long terme : pourra-t-elle sortir par les puits de mine sous l'impulsion de la fermeture progressive des vides souterrains? » [HH, 1].

L'étude montre que l'ennoyage réduit considérablement l'amplitude de la compaction des vides (Figure 39). L'auteur admet qu'il est très difficile d'effectuer un ajustement satisfaisant qui couvre la totalité du scénario en cas d'ennoyage et qu'il a dû scinder cette phase en deux :

- la 1^e phase, depuis le creusement jusqu'à la fin de l'ennoyage, a été présentée précédemment ;
- la 2^e phase, qui simule le comportement à long terme après la fin de l'ennoyage, est considérée comme linéaire en fonction du temps.

Dans cette seconde phase, la convergence C évolue linéairement en fonction du temps t par le biais d'une constante A :

$$C = A . t$$

avec $A = 0,007$ (sens horizontal) ou $0,008$ (sens vertical)

Cela signifie qu'une fois l'ennoyage de la mine terminée, la convergence pourra être considérée comme constante et se poursuivra une vitesse de l'ordre de 7 à 8 $\mu\text{m}/\text{an}$.

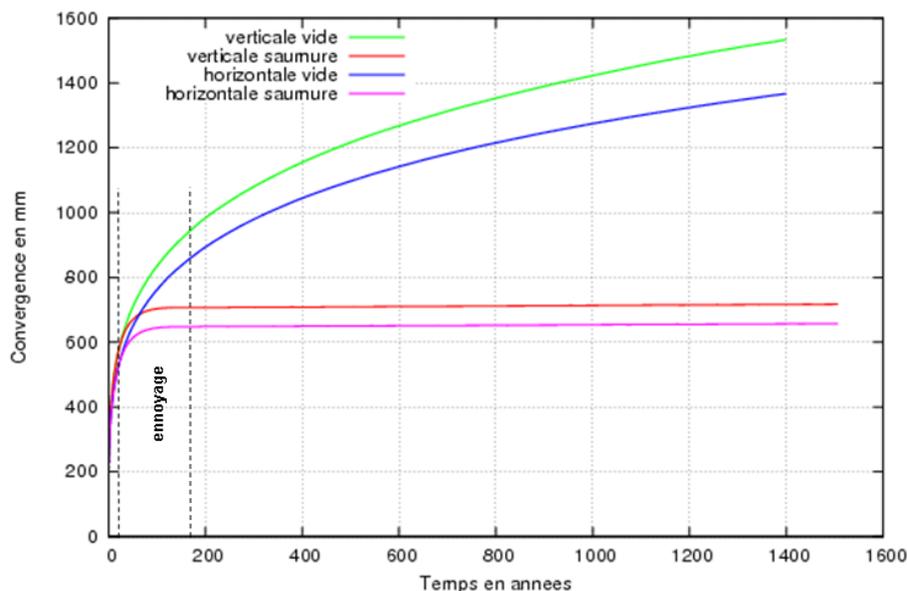


Figure 39. Comparaison des convergences verticales et horizontales avec saumure (ennoyage) et sans saumure [HH]

L'ennoyage des vides par de la saumure se traduit « par une forte réduction de la convergence et par voie de conséquence par une diminution beaucoup moins rapide des volumes des vides résiduels » [HH,7]. Cette variation de volume des vides, appelée V_v , est également une fonction linéaire du temps dans la phase post-ennoyage. Hadj-Hassen (2009) propose une équation de la forme

$$V_v = A t + B \quad \text{avec} \quad A = 0,00033\% \quad \text{et} \quad B = 31,3\%$$

Si l'on applique cette vitesse de réduction des vides au volume de vides intéressés par l'ennoyage, on obtient un volume de saumure potentiellement expulsée de :

- 10 à 26 m³/an pour la mine Amélie isolée dont le volume de vides résiduels est estimé entre 3 et 8 Mm³ ;
- 20 à 56 m³/an pour le bassin de Wittelsheim dont le volume de vides résiduels est estimé entre 6 et 17 Mm³.

Sans préjuger des hypothèses de calcul de l'Ecole des Mines de Paris, on constate que l'ordre de grandeur du débit d'expulsion de saumure ne serait pas modifié par le phénomène tel qu'il est ici présenté.

De ce fait, après l'ennoyage, la réduction du volume n'atteint plus que 31,4 % au bout de 500 ans alors que, sans ennoyage, elle serait de 52% (Figure 40). On notera que ces calculs ne conduisent plus à la fermeture totale des vides miniers en 500 ans comme cela avait été précédemment signalé (par d'autres auteurs).

Ainsi, « sur la totalité de la période simulée (~1600 ans), la perte de volume lorsque les vides souterrains sont noyés avec la saumure est de l'ordre de 31,7% ». Cela signifie que « la réduction du volume des vides entre la fin de l'ennoyage et la période simulée est seulement de l'ordre de 0,43% » [HH,8].

L'INERIS reviendra sur ces calculs dans l'étude géomécanique en cours.

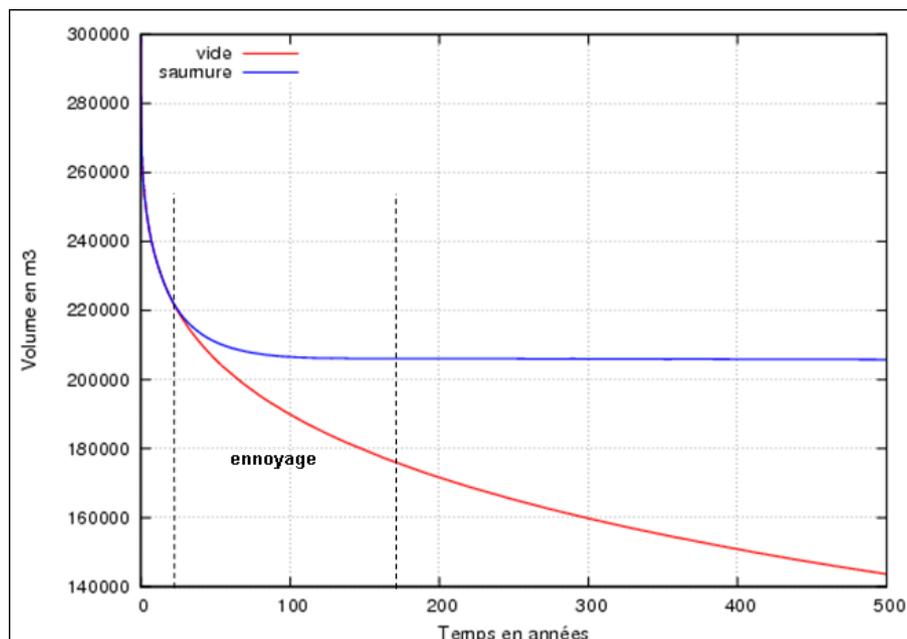


Figure 40. Evolution du volume des vides résiduels lors de l'ennoyage avec la saumure et lorsque les volumes restent vides [HH]

Pendant la phase d'ennoyage, l'eau douce infiltrée se transformera en saumure au contact des formations salifères et remplira progressivement les vides souterrains résiduels. A la fin de cette phase, une pression, correspondant à la colonne de saumure, s'établira sur les parois des galeries du stockage et évoluera selon les conditions de fermeture du site, à savoir [HH,10] :

- si un ou plusieurs ouvrages (puits, forages) sont maintenus ouverts, le fluage du sel induira une variation du volume qui s'accompagnera par l'expulsion d'un certain volume de saumure à travers ces ouvrages et la pression restera ainsi constante ;
- si la fermeture est totale, une surpression sera créée par compression de la saumure ; en prenant en compte la compressibilité de la saumure à la fin de la phase d'ennoyage, Hadj-Hassen (2009) signale que « la variation volumique induite entre la fin de l'ennoyage et la période simulée est extrêmement faible et vaut seulement 0.072 %. [...] La surpression induite sur la totalité de la période simulée est égale à environ 2 MPa » [HH, 11].

En conclusion, deux scénarios d'ennoyage ont été envisagés : un ennoyage en système ouvert dans lequel la pression de la saumure reste constante après le remplissage des vides et un ennoyage en système fermé générant une surpression de saumure de 2 MPa sous l'effet de la réduction des volumes de vides par le fluage du sel [HH,14].

Il est toutefois important de rappeler que cette étude n'a pas pris en compte la possibilité d'accélération du fluage au cours de l'ennoyage, ni la modification des propriétés mécaniques du sel au contact de la saumure ni les problèmes liés à l'évacuation de l'air et du gaz, ni l'effet de la température. Dans la partie géomécanique en cours de réalisation, l'INERIS estimera le rôle de ces paramètres dans la mise en mouvement éventuelle de saumure contaminée.

3.4.4 Localisation des épanchements en surface

Dans le cas d'une expulsion de saumure liée au fluage du sel, « la saumure aura tendance à sortir par le puits le plus proche » ou « par les puits offrant le moins de résistance » selon que des barrières se seront créées ou l'auront été [MDPA, 1052].

Pour Cesame (2008), toujours dans le cas d'un épanchement de saumure lié au fluage du sel après ennoyage, le débit estimé de 4700 m³/an se répartirait « sur les 24 puits du bassin potassique, représentant en moyen environ 200 m³/an/puits [39, 58]. Pour les 15 puits du secteur Ouest, les estimations cumulées sont donc bien dans une fourchette de 500 à 3000 m³/an [39, 60].

Enfin, dans le cas d'un épanchement de saumure lié à un déséquilibre hydrostatique, c'est la résistance à l'écoulement des puits qui sera le paramètre décisif : cette résistance provient principalement de l'épaisseur du bouchon de cendres et de la charge hydraulique imposée au-dessus. Elle sera théoriquement la plus faible au niveau des bouchons les moins épais et les plus hauts. Pour le bassin de Wittelsheim, il s'agira probablement²⁹ (cf. Figure 37) :

- des puits Marie et Marie-Louise dont le bouchon ne mesure que 50 m mais qui sont dans une zone de flux incertain ;
- du puits de Berrwiller dont le bouchon mesure 95 m mais qui se trouve dans la zone amont (secteur de flux entrant).

²⁹ car les puits Joseph et Else ne sont pas encore remblayés bien que, à l'instar du puits Max, ils soient probablement remblayés avec une hauteur conséquente de cendres (>300 m).

3.4.5 Conclusion sur le devenir de la mine en fin d'ennoyage

L'évolution des vides miniers en l'absence d'ennoyage devrait conduire à la fermeture des vides en une durée de l'ordre de 500 ans d'après les études réalisées jusqu'à présent. Une fois que la mine sera ennoyée par la saumure, il est probable qu'il y ait une accélération de la convergence mais cette hypothèse n'est pas partagée par tous les auteurs étudiés. Ainsi, la question du devenir des vides miniers après ennoyage reste ouverte : le fluage va-t-il ralentir ou risque-t-il d'accélérer ? De quelle ampleur sera le phénomène et quelle durée aura-t-il ?

Si la mine Amélie restait isolée, il est probable qu'un équilibre hydrostatique s'établirait du fait du positionnement de l'interface eau douce/saumure. Ce raisonnement est plus complexe si la mine Amélie communique avec l'ensemble du bassin de Wittelsheim car l'équilibre hydrostatique lié aux contrastes de densité eau douce/eau salée, précédemment observé, ne sera plus possible. Il risque donc d'y voir un débit transitant à travers les vides ennoyés et susceptible de rejoindre les compartiments superficiels. Si les conditions sont favorables ce débit d'épanchement pourrait atteindre 200 à 400 m³/an, réparti sur les puits aval du bassin de Wittelsheim.

Il est admis – voire démontré – dans la majorité des documents étudiés que l'ennoyage devrait ralentir le fluage du sel. Cependant, les études réalisées n'ont pas pris en compte modification des propriétés mécaniques du sel au contact de la saumure ni les problèmes liés à l'évacuation de l'air et du gaz, ni l'effet de la température.

Dans le cas d'une expulsion de saumure liée au fluage du sel, la saumure aura tendance à sortir par les puits les plus proches ou par ceux offrant le moins de résistance. Pour les 15 puits intéressés dans le bassin de Wittelsheim, les estimations cumulées sont dans une fourchette de 500 à 3000 m³/an.

4. CONCLUSION GENERALE

4.1 GEOLOGIE

Le substratum des terrains salifères du bassin de Mulhouse est représenté par environ 1300 m de formations du trias et du jurassique, essentiellement marneuses mais qui renferment quatre niveaux lithologiques plus perméables.

La série salifère du Sannoisien qui héberge le site de stockage, appelée « bloc-hôte », est épaisse d'environ 1500 m. Elle est essentiellement formée de terrains marneux et évaporitiques structurés en trois zones superposées. Le site de stockage se trouve vers 500 m de profondeur, à la base du « complexe salin » qui appartient lui-même à la base de la série salifère supérieure. Au sommet, sur environ 100 m d'épaisseur, l'anhydrite y est transformée en gypse.

Le recouvrement de la série salifère est formé par le Stampien et le Chattien qui renferment des niveaux gréseux (perméables). Ces terrains n'existent pas au niveau du site de stockage mais ils se retrouvent dans le reste du bassin de Wittelsheim.

La série se termine par des alluvions plio-quadernaires relativement épaisses (20 à 50 m). Essentiellement formées de dépôts sableux, elles montrent localement l'existence de paléo-chenaux à remplissage plus grossier à leur base.

Le remplissage du fossé rhénan est enfin affecté par quelques failles qui le découpent en panneaux monoclinaux. Aucune faille de ce type n'a été mentionnée aux environs immédiats du site de stockage mais on note l'existence d'une zone broyée à 135 m de profondeur dans le Stampien du puits Amélie I (soit au-dessus de la série salifère renfermant le site de stockage) et d'une faille de 170 m de rejet située à 1,5 km de distance en direction du puits Max.

Pour la poursuite de l'étude, deux points s'avèrent importants en ce qui concerne le contexte géologique : il s'agit de localiser la totalité des failles susceptibles d'atteindre la série salifère ainsi que les paléochenaux de la couche alluviale de base pouvant servir de drains aux circulations aquifères. Un avis quant à la possibilité d'apparition de diapir ou de dôme de sel dans le secteur étudié sera également nécessaire. L'INERIS s'attachera à résoudre ces trois points, en faisant éventuellement appel à un spécialiste de la géologie régionale.

4.2 HYDROGEOLOGIE

Bien qu'en charge sous la série salifère sannoisienne, les aquifères du Secondaire en sont isolés par plus d'un millier de mètres de terrains réputés imperméables, rendant impossible toute communication hydraulique naturelle avec le site de stockage.

La formation salifère du Sannoisien, bien qu'essentiellement formée de terrains imperméables, est susceptible de renfermer des venues d'eau significatives jusqu'à 300 m de profondeur.

Situés au toit de cette série, les terrains du Stampien et du Chattien peuvent également être faiblement aquifères.

Au-dessus, la nappe d'Alsace circule dans des sédiments plus ou moins perméables, à dominante sableuse mais localement entrecoupés de zones argileuses moins perméables ou de chenaux grossiers plus perméables. Ces paléostructures sont importantes car elles vont guider les écoulements profonds, notamment aux alentours des puits Joseph et Else où elles sont bien développées. Cette nappe s'écoule tout d'abord d'ouest en est dans le piémont vosgien puis elle se dirige vers le nord-nord-est jusqu'à la région de Colmar. Au-dessus du site de stockage, l'écoulement est globalement dirigé d'ouest en est.

Dans la poursuite de l'étude, en droite ligne des points précédemment cités sur la géologie, il conviendra de vérifier le rôle des failles et des paléochenaux vis-à-vis des circulations aquifères.

4.3 RELATIONS DU BLOC-HÔTE AVEC L'EXTERIEUR

Le bloc-hôte renfermant le site de stockage correspond à la série salifère du Sannoisien qui, à l'exception de sa partie sommitale, s'étend de 1500 m de profondeur jusqu'à 300 m. Au sein de ce bloc-hôte, aucune venue d'eau n'a été mise en évidence à l'exception d'une petite venue d'eau signalée au puits Else à 411 m de profondeur : l'INERIS se rapprochera des MDPA afin de vérifier l'exactitude de cette profondeur qui, si elle s'avérait fondée, serait de nature à remettre en cause l'imperméabilité du bloc-hôte tel qu'il a été précédemment défini.

Les relations entre le site de stockage et les différentes mines au sein de ce bloc-hôte sont gouvernées par la présence d'un stot de 20 à 50 m d'épaisseur dont l'intégrité est mise en doute par plusieurs études. Dans la suite de l'étude, l'INERIS devra réunir des éléments permettant de trancher quant au rôle exact de ce stot au cours de la phase d'envoyage du site.

Enfin, il existe des relations de nature anthropique entre les mines concernées et les compartiments superficiels par le biais des puits et des sondages.

Concernant les sondages anciens, des coulées de boues ont été mentionnées : elles résultent d'un ancien mode de confection par boules d'argiles compactées in situ dans la boue salée et qui pose un problème de conception. Ainsi, la coulée de boue de 20 m³ observée correspond à la vidange d'un linéaire de sondage plus de 500 m de longueur. L'INERIS se rapprochera des MDPA afin de localiser le plus précisément possible les sondages dont le rebouchage est antérieur à la date de mise en place de ciment (soit 1913).

Concernant les puits, ceux-ci ont fait l'objet d'un rebouchage par un bouchon de cendres volantes sur une hauteur variant de 47 m à plus de 300 m. Du fait du comportement de ces cendres, la perméabilité à l'eau de ces bouchons doit être comprise entre 10⁻⁶ et 10⁻⁹ m/s. Des mesures effectuées in situ en prenant en compte des circulations d'eau à l'extrados des puits de la mine Amélie ont permis d'évaluer (probablement par excès) la perméabilité des bouchons de 50 m d'épaisseur à une valeur de 6 10⁻⁷ m/s.

Ces circulations à l'extrados des puits seront fonction :

- de l'épaisseur de la zone endommagée lors de l'excavation, fonction elle-même du type d'excavation (forage, utilisation explosifs), de la raideur des couches ;
- du type de cuvelage utilisé (étanche, maçonné) et de son vieillissement,
- des bouchons utilisés (longueurs).

Les quelques mesures récentes de débit de percolation effectuées à la base des puits remblayés de la mine Amélie semblent indiquer que ce débit est supérieur d'un facteur 2 ou 3 à celui modélisé avec la valeur précédente de perméabilité. Ce point devra être éclairci et la réalisation d'autres mesures de débit in situ par les MDPA (éventuellement en présence de l'INERIS) est fortement préconisée.

4.4 ENNOYAGE DE LA MINE APRES FERMETURE

En ce qui concerne le débit d'ennoyage, des différences significatives sont apparues entre les débits de percolation calculés pour chaque puits, paramètre important d'estimation de la durée d'ennoyage de la mine. Le débit total d'ennoyage de la mine Amélie est ainsi compris entre 160 et 300 m³/mois et celui du bassin de Wittelsheim entre 1810 et 3330 m³/mois.

En ce qui concerne le volume de vides résiduels, les différentes estimations au début de la phase d'ennoyage oscillent entre 3 et 8 Mm³ pour la mine Amélie et entre 6 et 17 Mm³ pour le bassin de Wittelsheim. Ces données sont basées sur un transfert en surface de 90% des vides par affaissement lors du foudroyage des galeries puis d'une compaction par fluage dont la vitesse varie selon les auteurs. Cette valeur nécessite une vérification plus approfondie de la part de l'INERIS.

En ce qui concerne la durée d'ennoyage, qui tient compte des deux paramètres précédents, les incertitudes sont encore plus fortes. Pour la mine Amélie isolée, les valeurs s'échelonnent de 1200 à 3400 ans selon la porosité résiduelle retenue et une durée moyenne qui varie de 500 à 1300 ans. Pour le bassin de Wittelsheim, vient s'ajouter l'incertitude sur la résistance du stot séparant les mines Amélie et Marie-Louise. Pour Combes et Ledoux, l'ennoyage des deux mines ne peut raisonnablement pas se produire avant 10 000 ans alors que pour Cesame et MDPA, il s'établirait à environ 150 ans mais avec une fourchette haute pouvant aller jusqu'à un maximum de 500 ans.

Enfin, si l'on tient compte du fait que le débit d'ennoyage peut être supérieur d'un facteur 2 à 3 au débit théorique attendu, cela devrait conduire à une réduction de la durée d'ennoyage du même ordre de grandeur. Ce point très important pour le devenir du stockage devra être vérifié par l'INERIS dans la suite de l'étude.

4.5 DEVENIR DE LA MINE EN FIN D'ENNOYAGE

Plusieurs auteurs ont estimé ou simulé un net ralentissement de la vitesse de fluage au cours de l'ennoyage mais il existe des mines où le phénomène inverse se produit. La question du devenir des vides miniers après ennoyage reste donc ouverte : le fluage va-t-il ralentir ou risque-t-il de s'accélérer ? De quelle ampleur sera le phénomène et quelle durée aura-t-il ?

L'hypothèse d'une expulsion de saumure liée à la poursuite du fluage du sel après ennoyage a été abordée mais n'a pas pris en compte la possibilité d'accélération du fluage au cours de l'ennoyage, ni la modification des propriétés mécaniques du sel en présence de saumure, ni les problèmes liés à l'évacuation de l'air et du gaz, ni l'effet de la température.

Dans la partie géomécanique en cours de réalisation, l'INERIS devra estimer le rôle de ces paramètres dans la mise en mouvement éventuelle de saumure contaminée.

Dans le cas où la mine Amélie reste isolée, il est probable qu'un équilibre hydrostatique s'établisse du fait de la mise en place d'une interface nette entre eau douce et saumure. En se plaçant dans l'hypothèse pessimiste d'une disparition de cette interface par homogénéisation de la salinité (notamment liée à des venues d'eau non saturée en profondeur, au niveau du Stampien ou du toit de la zone salifère), le flux de saumure susceptible de transiter à travers les puits aval de la mine Amélie et de s'épancher en surface ne serait toutefois pas significatif (de l'ordre de 10 m³/an réparti sur 3 puits).

Ce raisonnement est plus complexe dans le cas où la mine Amélie communiquerait avec l'ensemble du bassin de Wittelsheim, c'est-à-dire avec les 15 puits remblayés. Dans cette hypothèse, l'équilibre hydrostatique lié aux contrastes de densité eau douce/eau salée, précédemment observé dans le cas de la mine Amélie isolée, pourrait ne plus être possible compte tenu de l'approfondissement vers le Nord des niveaux perméables de la couverture de la série salifère. Il y aurait alors un débit d'épanchement de 200 à 400 m³/an lié à la mise en place d'un déséquilibre hydrostatique.

Dans le cas d'un épanchement de saumure, c'est la proximité des puits ainsi que leur résistance à l'écoulement qui seront les paramètres décisifs : cette résistance provient principalement de l'épaisseur du bouchon de cendres et de la charge hydraulique imposée au-dessus.

La possibilité de déclenchement d'une circulation de saumure au sein du bassin de Wittelsheim suite à un déséquilibre hydrostatique mérite une attention particulière : ce point devra être discuté et argumenté dans la suite de l'étude par une synthèse bibliographique réalisée par un hydrogéologue expert. Il conviendra de solliciter les MDPA pour faire réaliser une simulation analytique voire une modélisation mathématique de ce phénomène.

4.6 SUITE DE L'ETUDE

Sur le plan hydrogéologique, il existe un risque de contamination de la nappe d'Alsace par des épanchements de saumure contaminée dans l'hypothèse où tout ou partie des déchets stockés subsisteraient dans le site de stockage.

Les questions qui se posent pour la suite de l'étude concernent les points suivants :

- Y a-t-il un risque d'épanchement de saumure dans les compartiments superficiels³⁰ avant, pendant ou après l'ennoyage du site ? Quels sont les mécanismes susceptibles de le provoquer ?
- A quel moment, à quel endroit et à quel débit ces épanchements risquent-ils de se produire ?

La synthèse de l'état des connaissances permet de mettre en évidence les faits suivants :

- En l'état actuel (pompage dans la mine Amélie), le risque d'épanchement de saumure contaminée est nul ; cependant, les mines du bassin de Wittelsheim ont déjà commencé à s'envoyer à un débit de l'ordre de 120 m³/mois/puits ; d'autre part, de récentes mesures de débit de percolation effectuées à la base des puits remblayés de la mine Amélie laissent cependant penser que le débit d'ennoyage pourrait être 2 à 3 fois plus rapide ;
- Dès l'arrêt des pompes actuels et/ou dans le cas où le stot séparant la mine Amélie du reste du bassin de Wittelsheim viendrait à ne plus jouer son rôle de barrière, l'ennoyage de la mine finira par atteindre les déchets ;
- Après l'ennoyage total des vides miniers résiduels (dont le volume exact n'est pas connu avec précision et représente environ 2 à 8% des vides miniers créés par l'exploitation), cette saumure potentiellement contaminée pourrait migrer vers certains puits de mine³¹ et atteindre les compartiments superficiels perméables où elle pourrait s'épancher ; le moteur de ce phénomène peut avoir deux causes :
 - o mise en place d'une circulation profonde suite à l'écart de densité entre la saumure (entre 150 et 350 g/l) et l'eau douce des niveaux superficiels (entre 1 et 70 g/l) ; l'effet de la température, qui contrebalance celui de la densité, est également à prendre en compte (de 10°C en surface à plus de 60°C dans les travaux les plus profonds) ; le débit d'épanchement attendu est actuellement de l'ordre de 200 à 400 m³/an
 - o expulsion de saumure suite à la pression induite par la poursuite du fluage après ennoyage ; selon la plupart des auteurs étudiés, le fluage va significativement ralentir dès l'ennoyage du site mais il existe des exemples où l'ennoyage a accéléré la vitesse de fluage (MGo réalisera une étude sur ce point dans la suite) ; le débit d'épanchement attendu est actuellement de l'ordre de 200 m³/an mais il pourrait s'avérer supérieur au début de la phase d'ennoyage.
- D'après les études réalisées, l'épanchement éventuel de saumure en surface se produira à la fin de l'ennoyage complet de la mine Amélie (soit entre 150 et 3400 ans³²) ou du bassin de Wittelsheim (soit entre 150 et

³⁰ Renfermant des niveaux perméables (grès du Stampien, grès du Chattien et alluvions quaternaires)

³¹ Et éventuellement certains sondages mal rebouchés (notamment ceux qui sont antérieurs à 1913)

³² selon les valeurs retenues de porosité et de résistance du stot

10 000 ans³³) ; en l'état actuel des connaissances, il n'est pas possible de mieux préciser la durée d'ennoyage car de récentes mesures de débit de percolation à la base de puits remblayés jettent un doute sur les estimations antérieures et la quantité de vides résiduels pris en compte reste à vérifier ;

- Les lieux potentiels d'épanchement de cette saumure devraient être les puits situés en aval hydrogéologique du système c'est-à-dire les puits Amélie 1, Amélie 2 et Max dans le cas où la mine Amélie est isolée, et les puits Ungersheim 1 et 2, Rodolphe, Schoenensteinbach, Berrwiller et Alex ; la localisation exacte des lieux potentiels d'épanchement dépend de plusieurs paramètres :
 - la position des puits par rapport à la piézométrie de la nappe d'Alsace qui varie de 260 m NGF en amont (puits Joseph et Else) à 210 m NGF en aval (puits d'Ungersheim) ;
 - la résistance hydraulique des puits remblayés qui est fonction de l'épaisseur de leur bouchon de cendre (de 50 à 300 m) et de la perméabilité de la zone endommagée à l'extrados ;
 - la résistance du stot.

Dans la suite de l'étude, il conviendra de bâtir des scénarios d'épanchement de saumure dans les compartiments superficiels afin de permettre l'intégration de ces données dans le modèle mathématique simulant l'écoulement de la nappe d'Alsace. L'objectif sera d'estimer l'impact attendu de ces épanchements de saumure potentiellement contaminée sur la qualité des eaux souterraines dans le cas où tout ou partie des déchets resterai(en)t en place. Cette modélisation, dont les résultats devront être disponibles pour la phase de conclusion de l'étude, devra préalablement faire l'objet d'une prestation complémentaire.

³³ idem

5. BIBLIOGRAPHIE

- [0] MDPA (2008). Mémoires techniques des mines de potasse d'Alsace : 1904-2008. – Edition MDPA, octobre 2008, 1068 p.
- [1] EMC (1996) – Projet de stockage en min de déchets industriels. Rapport, février 1996, 158 p.
- [3] Institut de Physique du Globe de Strasbourg (1990 ?) - Estimation des mouvements sismiques à la cote 500 m - Rapport IPGS, (date non mentionnée mais probablement 1990 ou postérieure).
- [4] COMBES P., LEDOUX E. (1990). Mines de potasse d'Alsace. Etude de sûreté d'un projet de stockage de déchets toxiques dans la mine Amélie. Approche des problèmes liés à l'hydrogéologie. - Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Centre d'Informatique Géologique, rapport LHM/RD/90/60, 40 p.
- [13] INERIS (1996). Avis d'expert relatif à la demande de création d'un stockage souterrain de déchets ultimes. Rapport du Laboratoire e Référence d'Analyse des Risques, INERIS, Réf. 36MA36, octobre 1996, 85 p. + ann.
- [15a] INERIS (2001). Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, étude bibliographique, INERIS, 21 décembre 2001.
- [15b] INERIS (2002). Etude du comportement hydraulique de l'obturation d'un puits par un bouchon de cendres volantes, synthèse (Projet), INERIS, 15 octobre 2002.
- [28] MICA Environnement (2004). Etude géologique, hydrogéologique et géotechnique du centre de stockage de Stocamine. Wittelsheim (Haut-Rhin). – Rapport n° 04-069, avril 2004, 259 p. + ann.
- [29] Détermination des dangers, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.
- [30] BMG (2004) Stockage souterrain de Wittelsheim : évaluation des risques suite au confinement de déchets dans la mine. Risques dus aux substances chimiques, BMG ENGINEERING AG, Rapport du 21/07/2004, 90 p. + ann.
- [31] Etude d'impact, rapport synthèse, Institut Suisse pour la Promotion de la Sécurité, juillet 2004.
- [37] CESAME (206). Synthèse sur l'ennoyage de la mine de potasse Secteur Ouest, CESAME, Septembre 2006
- [39] Cesame (2008). L'ennoyage des mines de potasse. Dossier commun aux secteurs Est et Ouest. Rapport AB/1143/04/08, avril 2008, 80 p.
- [HH] HADJ-HASSEN F. (2009). STOCAMINE. Evaluation du volume des vides souterrains résiduels après ennoyage du stockage. Rapport Mines ParisTech, octobre 2009, 13 p.
- [MDPA-SA] MDPA (2003). Les sondages depuis le jour à l'intérieur des concessions MDPA. Rapport 58/03-XE, Etudes générales, 19/11/2003, 8 p. + ann.