



(ID Modèle = 454988)

Ineris - 223696 - 2768605 - v2.0

05/05/2023

Avis sur la localisation et la pertinence des forages de reconnaissance de l'ennoyage de StocaMine

MINES DE POTASSE D'ALSACE SA

PRÉAMBULE

Le présent document a été établi sur la base des informations transmises à l'Ineris. La responsabilité de l'Ineris ne peut pas être engagée, directement ou indirectement, du fait d'inexactitudes, d'omissions ou d'erreurs ou tous faits équivalents relatifs aux informations fournies.

L'exactitude de ce document doit être appréciée en fonction des connaissances disponibles et objectives et, le cas échéant, de la réglementation en vigueur à la date d'établissement du présent document. Par conséquent, l'Ineris ne peut pas être tenu responsable en raison de l'évolution de ces éléments postérieurement à cette date. La prestation ne comporte aucune obligation pour l'Ineris d'actualiser le document après cette date.

L'établissement du présent document et la prestation associée sont réalisés dans le cadre d'une obligation de moyens.

Au vu de la mission qui incombe à l'Ineris au titre de l'article R131-36 du Code de l'environnement, celui-ci n'est pas décideur. Ainsi, les avis, recommandations, préconisations ou équivalent qui seraient proposés par l'Ineris dans le cadre de cette prestation ont uniquement pour objectif de conseiller le décideur. Par conséquent la responsabilité de l'Ineris ne peut pas se substituer à celle du décideur qui est donc notamment seul responsable des interprétations qu'il pourrait réaliser sur la base de ce document. Tout destinataire du document utilisera les résultats qui y sont inclus intégralement ou sinon de manière objective. L'utilisation du présent document sous forme d'extraits ou de notes de synthèse s'effectuera également sous la seule et entière responsabilité de ce destinataire. Il en est de même pour toute autre modification qui y serait apportée. L'Ineris dégage également toute responsabilité pour toute utilisation du document en dehors de son objet.

En cas de contradiction entre les conditions générales de vente et les stipulations du présent préambule, les stipulations du présent préambule prévalent sur les stipulations des conditions générales de vente.

Nom de la Direction en charge du rapport : DIRECTION SITES ET TERRITOIRES

Rédaction : GOMBERT Philippe

Vérification : POULARD FREDERIC; QUIOT FABRICE

Approbation : Document approuvé le 05/05/2023 par BAROUDI HAFID

Table des matières

1	Objectif	5
2	Synthèse des données concernant les deux ouvrages	5
2.1	Nécessité d'ouvrages de surveillance du niveau d'envoyage	5
2.2	Implantations proposées.....	6
2.3	Implantations sélectionnées	8
2.3.1	Forage VA-PB2.....	8
2.3.2	Forage VL-PB2	11
3	Analyse des mesures réalisées et de leur représentativité	14
3.1	Protocole de réalisation des mesures	14
3.1.1	Forage VA-PB2.....	14
3.1.2	Forage VL-PB2	16
3.2	Interprétation des mesures disponibles	16
4	Avis sur le dispositif de surveillance de l'envoyage.....	19
4.1	Avis sur la représentativité des cibles visées et l'état des forages	19
4.2	Avis sur la précision des mesures de niveau de fluide d'envoyage	20
4.2.1	Prise en compte de l'allongement élastique du câble.....	20
4.2.2	Prise en compte de la dilatation thermique.....	21
4.2.3	Prise en compte de la pression de gaz.....	21
4.2.4	Prise en compte de la déviation et de l'inclinaison des ouvrages.....	21
4.3	Avis sur le protocole de mesures du niveau de fluide d'envoyage.....	22
4.4	Avis sur la représentativité globale des mesures obtenues	23
4.5	Propositions d'amélioration du dispositif de surveillance de l'envoyage	24
4.5.1	Contrôle de l'état des crépines du forage VA-PB2	24
4.5.2	Protection du câble vis-à-vis du risque de corrosion	25
4.5.3	Implantation d'un forage de reconnaissance supplémentaire	25
5	Conclusion.....	26
6	Références	28

Table des figures

Figure 1.	Bassins de remplissage et communications du secteur Ouest (MDPA, 2011)	7
Figure 2.	Plan (a) et coupe (b) du forage VA-PB2 (MDPA, 2016).....	9
Figure 3.	Évolution du niveau de fluide au VA-PB2 de 2015 à 2023 (données MDPa).....	9
Figure 4.	Schéma explicatif du comportement hydraulique du VA-PB2 (CESAME, 2020)	10
Figure 5.	Comparaison de la profondeur des couches exploitées et du niveau de fluide à VA-PB2 (CESAME, 2022).....	11
Figure 6.	Coupe géologique et technique du forage VL-PB2 (document MDPa)	12
Figure 7.	Évolution du niveau de fluide au VL-PB2 de 2018 à 2023 (données MDPa)	13
Figure 8.	Évolution comparée de la cote absolue du niveau du fluide d'envoyage aux deux forages de surveillance VA-PB2 et VL-PB2	17
Figure 9.	Évolution comparée du niveau de fluide au VA-PB2 depuis la fin de foration (en bleu) et depuis la fin du nettoyage (en rouge).....	18
Figure 10.	Évolution simulée de la baisse du niveau de fluide au VA-PB2 depuis la fin du nettoyage (tiretés épais) comparée à la tendance linéaire à la hausse amorcée avant ce test (tiretés fins).....	18

Figure 11. Évolution au cours du temps de la profondeur du niveau de fluide d'envoyage selon plusieurs méthodes de mesure (voir texte).....	22
Figure 12. Points bas de la mine et surfaces potentiellement concernées par le remplissage en 2020 pour une porosité résiduelle de 10 % et implantation des forages profonds de reconnaissance du niveau d'envoyage (d'après CESAME, 2020).....	28

1 Objectif

Le site de stockage souterrain de déchets ultimes de StocaMine (Wittelsheim, Haut-Rhin) a fait l'objet en 1997 d'une autorisation de stockage souterrain réversible de déchets dangereux pour une durée de trente ans. Ce site a été exploité de 1999 à 2002, période pendant laquelle il a reçu 44 000 tonnes de déchets dangereux dont 44 % de déchets de classe 1 (résidus d'incinération et déchets amiantés) et 56 % de déchets de classe 0 (terres polluées, déchets mercuriels, chromés, arséniés et produits phytosanitaires).

Depuis l'arrêt de l'activité de stockage de déchets en 2002, la société des Mines de Potasse d'Alsace (MDPA) assure l'entretien et la surveillance des installations de ce site. En parallèle, de nombreuses études ont été entreprises pour proposer une solution de fermeture définitive du site de stockage de StocaMine. Les vides miniers créés par l'ancienne exploitation de potasse, situés plus en profondeur par rapport au stockage, sont en voie d'envoyage par de l'eau douce, majoritairement issue de la nappe d'Alsace par le biais des anciens puits et sondages miniers. La durée de l'envoyage des vides miniers est toutefois variable selon les hypothèses choisies : de quelques siècles pour le secteur Ouest dans son ensemble à quelques millénaires pour la mine Amélie isolée. Cette variabilité est notamment fonction du volume de vides miniers résiduels, après foudroyage des tailles et compaction de terrains, ainsi que du débit d'envoyage pris en compte et de l'étanchéité des stots de séparation des mines.

Dans son rapport d'expertise rendu en juillet 2011, le Comité de pilotage StocaMine, constatant que l'équilibre hydraulique final ne sera atteint qu'après des évolutions post-fermeture étalées sur des décennies, voire des siècles, a souhaité la mise en place de plusieurs forages de surveillance qui permettraient de suivre l'évolution de l'envoyage par la mesure de la progression de l'interface air/saumure. En novembre 2011, les MDPA ont proposé l'implantation de deux forages de suivi de cette montée des eaux (MDPA, 2011) : il s'agit des ouvrages VA-PB2 dans la mine Amélie et VL-PB2 dans la mine Marie-Louise.

Le forage VA-PB2 a été réalisé en 2015 et fait l'objet depuis lors d'une surveillance régulière par la société des MDPA.

L'arrêté préfectoral du 23 mars 2017 a autorisé la prolongation pour une durée illimitée du stockage souterrain de StocaMine, assortie de plusieurs obligations dont la surveillance du niveau d'eau du forage profond VA-PB2 et une étude pour la réalisation d'un second forage profond. Le forage VL-PB2 a donc été réalisé fin 2018 et il fait également l'objet d'une surveillance régulière par les MDPA.

Depuis lors, l'arrêté préfectoral du 23 mars 2017 a été abrogé et un nouvel arrêté préfectoral, en date du 28 janvier 2022, a renforcé cette surveillance. Il est demandé une mise à jour annuelle des mesures des niveaux d'envoyage issus des forages de surveillance, ainsi que l'interprétation des résultats obtenus au regard des connaissances issues des différentes études.

Les MDPA ont sollicité l'Ineris pour émettre un avis sur la pertinence de la localisation de ces deux forages (VA-PB2 et VL-PB2) et sur la représentativité des données obtenues à ce jour dans le contexte du suivi de l'envoyage attendu.

2 Synthèse des données concernant les deux ouvrages

2.1 Nécessité d'ouvrages de surveillance du niveau d'envoyage

Dans son rapport d'expertise de juillet 2011, le Comité de pilotage StocaMine a demandé le maintien d'une surveillance à long terme du niveau atteint par la saumure dans les vides miniers et de la qualité chimique de la saumure (COPIL, 2011). Il est précisé que « *Le dispositif de surveillance pourrait comporter trois forages tubés et cimentés au terrain, l'un sera implanté dans une zone déjà envoyée qui apportera de l'information immédiatement utilisable, l'autre près du stockage et un troisième en position intermédiaire* ». Cela permettrait à la fois de connaître la vitesse d'envoyage, de vérifier les données issues des modèles de calcul et de détecter une anomalie telle qu'une accélération de l'évolution de l'envoyage et ce, quel que soit le devenir de StocaMine, c'est-à-dire « *même en cas de retrait des colis* ». En outre, il est précisé que « *lorsque le niveau de la saumure s'approchera de celui du stockage, ou du toit du sel, les sondages permettraient par pompage d'empêcher ce niveau de continuer à monter* ».

Il est rappelé que le scénario de référence de l'ennoyage du site prend en compte la probabilité d'une communication hydraulique, à travers un stot¹ localement endommagé, situé entre la mine Amélie dans laquelle se trouve le site de StocaMine, et la mine Marie-Louise plus en aval, ainsi que les autres mines du secteur Ouest (Ineris, 2011) (Figure 1). Or, si la base des trois puits déjà remblayés de la mine Amélie (Amélie 1, Amélie 2 et Max) était encore accessible jusqu'en 2014 pour y réaliser des mesures de percolation, cela n'est plus possible actuellement. Cela était déjà le cas des onze autres puits déjà remblayés du secteur Ouest, ce qui ne permet plus de suivre l'ennoyage de la mine. Pour ce faire, il est donc devenu nécessaire de réaliser un forage de reconnaissance profond recoupant les vides miniers résiduels en cours d'ennoyage. C'est pourquoi, dès le mois de novembre 2011, les MDPa ont lancé une réflexion sur le choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux dans le secteur Ouest (MDPA, 2011).

Les études réalisées par CESAME, CIG, Ineris, etc. avaient déjà montré que le secteur Ouest disposait de plusieurs « points bas » qui devraient se remplir progressivement. Leurs niveaux de saumure devraient se rejoindre selon une dynamique difficile à prévoir, dans la mesure où les débits qui les alimentent ne sont pas connus, qu'ils sont probablement différents de l'un à l'autre, et que la morphologie et le volume des vides à ennoyer sont mal appréhendés. Cependant, dans tous les cas de figure, l'aboutissement prévisible de cet ennoyage à l'horizon de quelques centaines d'années est l'arrivée de la saumure au niveau du site de stockage de StocaMine, puis sa sortie à la base de la nappe d'Alsace.

Un premier forage de surveillance du niveau d'ennoyage a donc été réalisé de 2013 à 2015 dans la mine Amélie sous la référence VA-PB2. En 2017, un nouvel arrêté préfectoral (aujourd'hui abrogé) a demandé, dans son article 10.2.1, à ce que « *l'exploitant continue à affiner l'estimation de la vitesse d'ennoyage, en suivant les données et informations délivrées par le forage de surveillance VA-PB2 réalisé en 2015. En complément du premier forage de surveillance VA-PB2, l'exploitant réalise d'ici fin 2018 un second forage profond dans le secteur Ouest de façon à mieux maîtriser les paramètres de convergence et l'évolution de l'ennoyage, vérifiant également la connexion ou non du secteur Amélie et du secteur Ouest sur le plan hydraulique* » (Préfecture, 2017).

Suite à cela, les MDPa ont donc lancé une consultation pour réaliser un nouveau forage profond (MDPA, 2018a). Cet ouvrage, VL-PB2, a été réalisé fin 2018 dans la mine Marie-Louise, située immédiatement à l'aval de la mine Amélie, de l'autre côté du stot susmentionné.

2.2 Implantations proposées

L'étude MDPa (2011) distingue cinq bassins de remplissage du secteur Ouest de la mine, possédant chacun un ou plusieurs points bas. Dans le Tableau 1, leurs noms correspondent aux sigles historiques des différentes mines suivis du terme « PB1 » ou « PB2 » pour « Point Bas 1 » et « Point Bas 2 ».

Tableau 1. Points bas étudiés par MDPa (2011)

Bassin de remplissage (sigle)	Référence du point bas	Puits de mine concernés	Cote approximative (m NGF)
Ungersheim (VU)	VU-PB1	Ungersheim 1 et 2	-600
Bollwiller (VB)	VB-PB1	Alex, Rodolphe 1 et 2	-840
Marie Louise (VL)	VL-PB1	Marie, Louise et Schoenensteinbach	-800
	VL-PB2		
Berrwiller (VR)	VR-PB1	Berrwiller et Staffelfelden	-720
Amélie (VA)	VA-PB1	Max	-590
	VA-PB2	Amélie 1 et 2	-670

Ces différents points bas sont présentés en plan (Figure 1a) et en coupe (Figure 1b) avec, dans les deux cas, la mention des types de communication et de leur probabilité d'ouverture, en référence aux données de MDPa (2011) (voir Tableau 2).

¹ Zone de minerai laissée en place afin de maintenir, stabiliser ou isoler certains secteurs miniers.

- viser les deux zones foudroyées d'une taille (CS = couche supérieure et CI = couche inférieure) en s'éloignant suffisamment du massif vierge, sachant que la déviation d'un forage est de l'ordre de 15 m à 1000 m de profondeur ; en effet, la CS est moins profonde mais plus ancienne (1967) et exploitée sur seulement 1,85 m d'épaisseur, alors que la CI – bien que plus profonde de 20 m – est plus récente (1980) et a été exploitée sur 3,40 m d'épaisseur ; ainsi, ont été éliminés les points bas VU-PB1 et VR-PB1 qui ne traverseraient que la CI, et VL-PB1 qui ne traverserait que la CS ;
- être représentatif de l'ennoyage du secteur Ouest ; le point VA-PB1 situé au fond de la mine Max semble donc contre-indiqué car celle-ci est relativement isolée du reste du secteur ouest ;
- déboucher si possible sur de l'eau déjà présente, c'est-à-dire choisir des points bas alimentés par des puits ayant un débit de fuite important et/ou suffisamment ancien pour qu'une quantité d'eau significative se soit accumulée ; par ordre d'importance décroissante, cela concernerait les points bas VB-PB1, VU-PB1 ou VL-PB1/2, VR-PB1, VA-PB2 et VA-PB1 ;
- rencontrer des vides résiduels effectifs de foudroyage non refermés, c'est-à-dire éliminer les points bas trop profonds et potentiellement « cicatrisés », comme le sont probablement VB-PB1, VL-PB1 et VL-PB2 ;
- tenir compte des contraintes de surface en disposant d'un emplacement libre pour y installer un chantier de forage ; VR-PB1 et VL-PB2, qui se trouvent en zone urbanisée, sont à éviter.

Finalement, les points bas à éliminer étant préférentiellement VL-PB1, VL-PB2, VU-PB1, VR-PB1, VA-PB1 et VB-PB1, il ne restait en première approche que VA-PB2 qui permettait de traverser à la fois la CS et la CI.

2.3 Implantations sélectionnées

2.3.1 Forage VA-PB2

Le premier point bas visé a été le VA-PB2, situé au fond de la mine Amélie qui héberge le site de StocaMine, car il permet de surveiller la montée des eaux vers le stockage. Toutefois, il ne pourra prendre en compte que tardivement l'arrivée de la saumure d'ennoyage en provenance des deux vastes bassins de remplissage aval de Marie-Louise (VL) et de Bollwiller (VB) avec lesquels il est en communication (très probable) par le biais de la zone fracturée COM-2.

Cet ouvrage était prévu pour descendre à 931,5 m de profondeur et recouper les deux couches de potasse exploitées et foudroyées (CS et CI). En 2013, lors de sa foration, le tubage s'est coincé à la traversée de la CS entre 897 et 900,5 m de profondeur (MDPA, 2016). Cet incident n'a pas permis de poursuivre la foration à la verticale, ni de retirer le tubage coincé, ce qui a provoqué 10 mois d'interruption de travaux et la reconfiguration du forage en 2015 par side-track² vers 800 m de profondeur (Solexperts, 2015). Cela explique que la base de ce forage ait dévié de 35 m vers le nord et de 83 m vers l'ouest avec un angle de déviation de 10° de 404 à 803 m puis de 17° de 803 m jusqu'à 931,5 m (Figure 2). Pour réaliser cette déviation, le foudroyage de la couche supérieure a été cimenté à deux reprises, avant d'être reforé. Lors de la nouvelle traversée de la CS, une perte de boue de foration a été notée au débit de 2,5 m³/h. En outre, il persisterait des circulations non mesurables à l'extrados du tubage (MDPA, 2016). En octobre 2015, le forage a finalement recoupé la CI de 912,8 à 920,4 m de profondeur, soit sur une hauteur foudroyée de 7,6 m.

On notera que le tubage crépiné est prévu pour résister à une pression d'écrasement de 170 bar (Technidrill, 2015). Il présente des éléments acier inox de 1,50 m de longueur percés chacun de 288 trous de 6 mm. Cette configuration est certainement favorable à une bonne résistance à l'écrasement mais les ouvertures des crépines semblent petites dans un contexte de saumure saturée où existe un risque de précipitation chimique et donc de colmatage³.

² Réalisation d'un nouveau trou à partir d'un forage existant en abandonnant sa section inférieure au-delà d'une certaine profondeur. Pour cela, un bouchon de ciment est coulé en face de la zone défectueuse et le forage est repris au-dessus du bouchon avec une certaine déviation (Ineris, 2015).

³ Cette crépine ne pouvant plus être remplacée, si un nouveau forage profond devait être réalisé, il conviendrait de trouver un meilleur compromis entre diamètre des ouvertures et résistance mécanique.

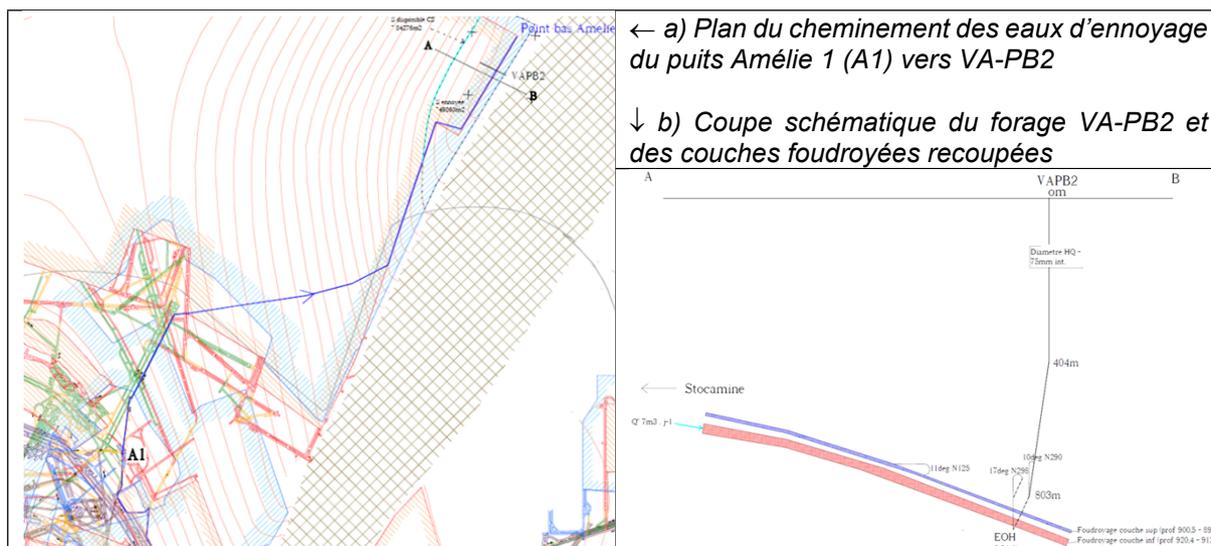


Figure 2. Plan (a) et coupe (b) du forage VA-PB2 (MDPA, 2016)

Les pertes de boue durant la foration ont été ici de 900 m³, exclusivement à la traversée des anciennes couches exploitées. Sachant que le volume en eau du tubage est de l'ordre de 6 m³, ce volume de boues perdues témoigne donc de l'existence de vides résiduels et perméables dans l'environnement de l'ouvrage (CESAME, 2020).

Un niveau d'engoyage a pu être mesuré à 897,70 m de profondeur en fin de foration le 22/10/2015 mais il avait déjà baissé de 1,10 m lors de la mesure suivante réalisée le 18/11/2015. Cette baisse pourrait correspondre à l'infiltration de la boue de forage dans les vides résiduels car il est généralement admis que la durée de retour à l'équilibre hydraulique correspond approximativement à la durée des opérations de forage, soit ici 27 jours pour la seconde phase de foration. Toutefois, le niveau de saumure a continué de baisser jusqu'en février 2020 où il s'est finalement stabilisé vers 905 m (Figure 3). Un tel comportement n'est pas compatible avec l'hypothèse d'une infiltration rapide de fluide au sein des terrains : il se pourrait que des recristallisations y aient induites des colmatages. Pourtant, lors d'un essai hydraulique réalisé le 18/11/2015, l'injection de 20 m³ de saumure saturée au débit de 245 l/min a fait remonter le niveau d'environ 40 m puis il est ensuite redescendu à sa valeur initiale en quelques heures (SOLEXPERTS, 2015). Cela a permis de confirmer que l'ouvrage était bien connecté à des vides interconnectés dont la perméabilité a pu être estimée à 1,5 10⁻⁶ m/s dans l'environnement proche du forage, et à 7,3 10⁻⁷ m/s dans son environnement plus éloigné.

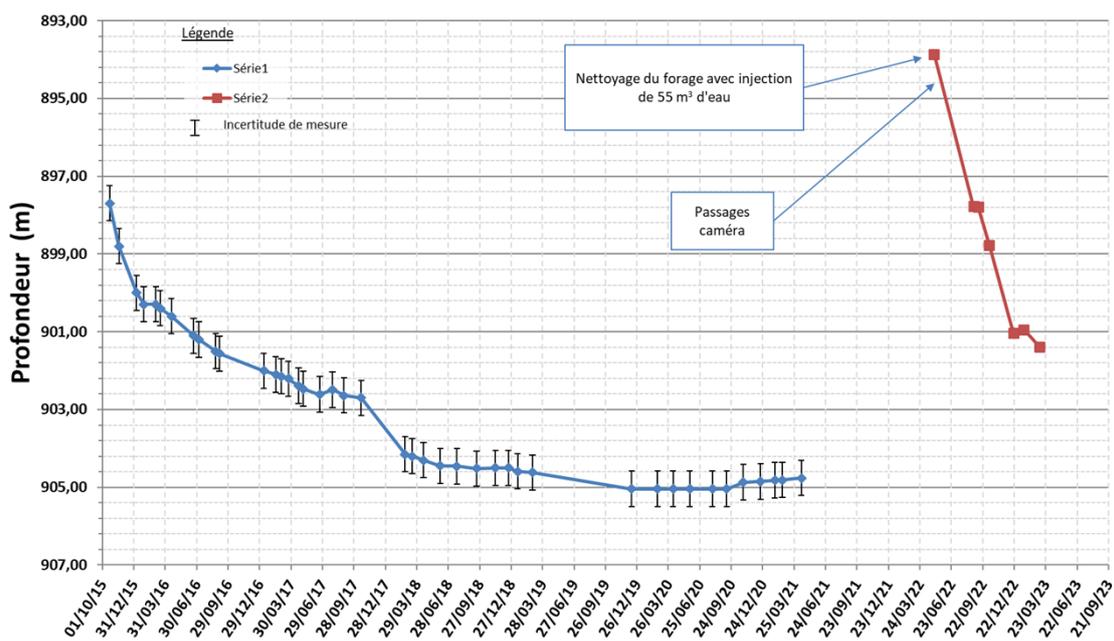


Figure 3. Évolution du niveau de fluide au VA-PB2 de 2015 à 2023 (données MDPa)

En outre, l'analyse chimique du fluide présent montre que l'on n'a pas affaire à de la boue de forage résiduelle ni à de la saumure artificielle utilisée pour le test d'injection, toutes deux saturées en NaCl, mais à une saumure d'ennoyage riche en potassium (Tableau 3). Cette observation est en accord avec le fait que la température de près de 50°C qui règne à la profondeur d'environ 900 m favorise la dissolution préférentielle du potassium par rapport au sodium.

Tableau 3. Analyses chimiques comparées du fluide d'ennoyage du VA-PB2, de la boue de forage et de la saumure artificielle utilisée pour le test d'injection (MDPA, 2016)

	Na (g/L)	K (g/L)	Ca (g/L)	Cl (g/L)	Mg (g/L)	SO4 (g/L)
boue forage	130	6	6	206		
fluide VAPB2	85	65	6	206	0,9	1,2
saumure artificielle d'ennoyage*	110	5	3	184	0,6	0,7

Le comportement de ce forage, à savoir un niveau de fluide qui baisse régulièrement de 2015 à début 2020, ne correspond pas en première approximation à celui attendu dans le cadre d'un ennoyage de vides miniers. L'hypothèse émise pour l'expliquer est que la CI serait totalement remplie de saumure en charge et que le forage aurait servi de trop plein lui permettant de se déverser vers la CS non encore ennoyée, via la petite perte observée à la traversée de cette couche (MDPA, 2016). Cette hypothèse, illustrée par la Figure 4, serait corroborée par le fait que le niveau d'ennoyage s'est quasiment stabilisé vers 901 m de profondeur à partir de fin 2022 (voir Figure 3), après une nouvelle injection de 55 m³ d'eau réalisée pour nettoyer les crépines : cette profondeur, qui correspond à la cote du mur de la CS, laisse penser à l'atteinte d'un équilibre hydrostatique au niveau de cette couche.

Dans ce contexte, les prochaines mesures seront décisives pour savoir si le forage VA-PB2 peut, dans un délai raisonnable, réellement jouer son rôle de surveillance du niveau d'ennoyage de la mine Amélie.

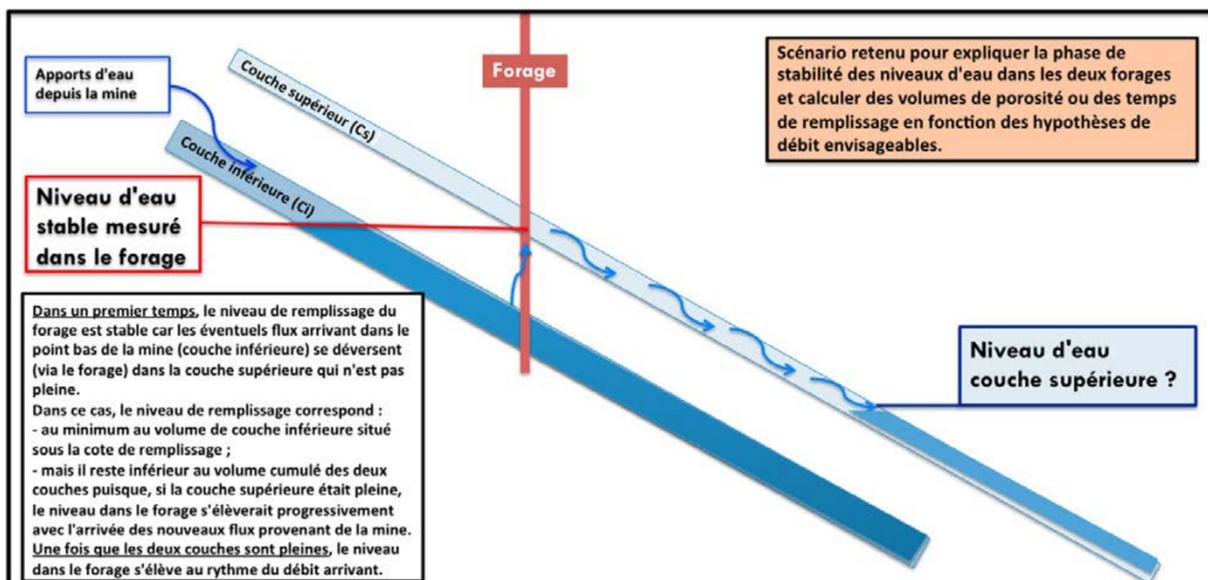
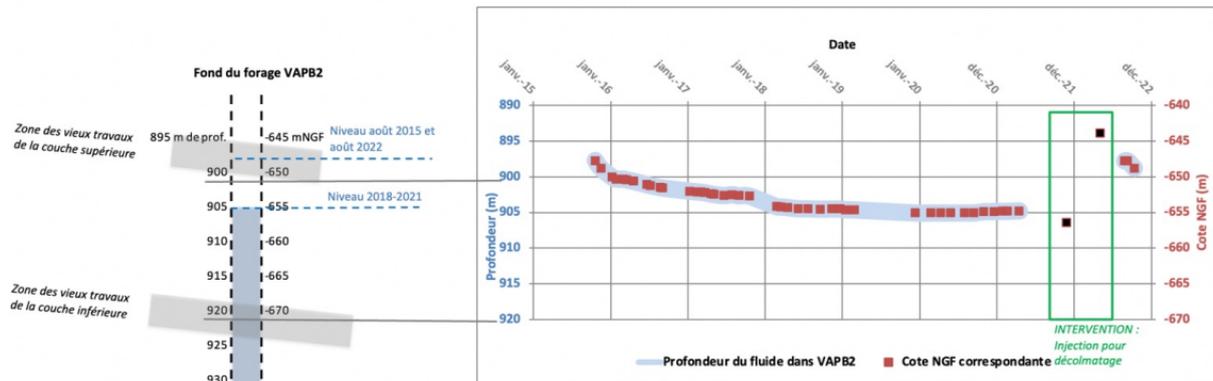


Figure 4. Schéma explicatif du comportement hydraulique du VA-PB2 (CESAME, 2020)

Une inspection caméra de l'ouvrage réalisée en novembre 2021 a montré des encrustements dans la zone crépinée, ce qui a même bloqué l'avancement de la caméra à deux reprises, à 819 m puis à 910 m de profondeur (CESAME, 2022). En mai 2022, les crépines ont donc été décolmatées par injection d'eau douce sous haute pression. Au total 56,4 m³ d'eau ont été injectés à 150 bar dans le forage. Dès le lendemain, une nouvelle inspection caméra a été réalisée pour vérifier l'état des crépines qui sont ainsi apparues propres et décolmatées. Cette intervention a cependant fait remonter le niveau de saumure de 12,57 m et cet excédent a mis plus d'un an à se résorber (voir courbe rouge sur la Figure 3). Cela n'est pas en accord avec le comportement de cet ouvrage observé lors de la précédente phase d'injection de 20 m³, qui s'était résorbée rapidement, ce qui laisse penser à un colmatage. En effet, l'eau douce massivement injectée avait un pouvoir de dissolution de 11 m³ d'évaporite et on ne sait pas

exactement ce qu'il est advenu de cet excédent de roche potentiellement dissoute : on ne peut donc pas exclure l'hypothèse qu'il aurait pu, dans les jours qui ont suivi la seconde inspection du forage par caméra, reprécipiter dans les crépines ou à l'extrados du tubage, ou encore venir colmater la perte observée à la traversée de la CS. Une autre possibilité est que l'eau douce injectée devait être oxygénée, donc oxydante, et qu'il est possible qu'elle ait induit la précipitation d'oxydes ou d'hydroxydes de fer et de manganèse en arrivant dans un milieu réducteur renfermant une saumure désoxygénée (son potentiel rédox a été mesuré à -108 mV).

Ce recolmatage expliquerait alors la lenteur du retour à l'équilibre du niveau de fluide après cette seconde intervention. La Figure 5 montre que le niveau d'eau est en effet monté au-dessus du toit de la CS à la suite de l'essai, et qu'il tend actuellement à redescendre se stabiliser près de la cote du mur de la CS qui se trouve à 900,5 m de profondeur depuis le début de l'année 2023.



Il est intéressant de compléter ces informations de nature hydrologique par les données concernant les mesures de pression de gaz car le forage VA-PB2 était émetteur de méthane à sa foration. La différence de pression entre le forage hermétiquement clos et l'atmosphère a été mesurée à moins de 0,02 bar en décembre 2014 avec des fluctuations qui ressemblaient à celles de la pression atmosphérique (CESAME, 2020). En décembre 2018, une nouvelle expérimentation, similaire à celle de 2014, a été réalisée. Elle a cette fois mis en évidence une surpression plus forte que précédemment (0,16 bar) avec une absence de dépendance aux variations de la pression atmosphérique. Comme d'importants travaux d'isolement de la mine avaient été entrepris entre ces deux mesures, dans le but d'isoler StocaMine, CESAME (2020) a supposé que le secteur de VA-PB2 était autrefois en relation avec l'atmosphère via StocaMine, alors qu'il en est maintenant isolé du fait des travaux réalisés. Ces travaux peuvent également expliquer que la surpression soit devenue plus forte entre temps, l'équilibrage des pressions avec l'atmosphère étant devenu impossible.

2.3.2 Forage VL-PB2

Afin de compléter le forage VA-PB2, l'arrêté préfectoral de 2017 a demandé de réaliser « un second forage profond dans le secteur Ouest de façon à mieux maîtriser les paramètres de convergence et l'évolution de l'engorgement, vérifiant également la connexion ou non du secteur Amélie et du secteur Ouest sur le plan hydraulique » (Préfecture, 2017). Les MDPA ont donc décidé de réaliser un nouveau forage pour surveiller la montée des eaux dans l'un des deux bassins de remplissage profonds de Bollwiller (VB) ou de Marie-Louise (VL). C'est ce dernier qui a finalement été choisi du fait du rôle moteur de la mine Marie-Louise dans l'engorgement du secteur Ouest, et de sa communication probable avec la mine Amélie par le biais de la zone fracturée COM-2 (correspondant au stot mentionné au § 2.1). Parmi les deux points bas disponibles dans ce bassin, VL-PB2 a été préféré à VL-PB1 car il devait traverser les deux tailles exploitées et foudroyées (CS et CI).

Réalisé de novembre à décembre 2018, le forage du point bas VL-PB2 a atteint une profondeur totale de 1009 m, correspondant à la cote -778 m NGF. Sa foration et son équipement se sont déroulés sans problème majeur et l'ouvrage, entièrement cimenté jusqu'à 921 m de profondeur, possède une verticalité correcte avec une inclinaison maximale de 3° au fond (ENTREPOSE, 2018). Cependant, la couche supérieure qui aurait dû être recoupée entre 968,8 et 970 m de profondeur n'a pas été reconnue, ce qui signifie que les vides miniers foudroyés et peu épais y sont totalement refermés (Figure 6). Plus bas, la couche inférieure, plus épaisse, a bien été traversée de 982,4 à 995 m de profondeur. Cela a

d'ailleurs donné lieu à des pertes de boues de forage estimées à 500 m³ à partir de 982 m de profondeur. Comme le volume total renfermé dans le tubage est là encore de l'ordre de 6 m³, cela signifie qu'il existe bien des vides résiduels perméables au niveau de cette couche (CESAME, 2020).

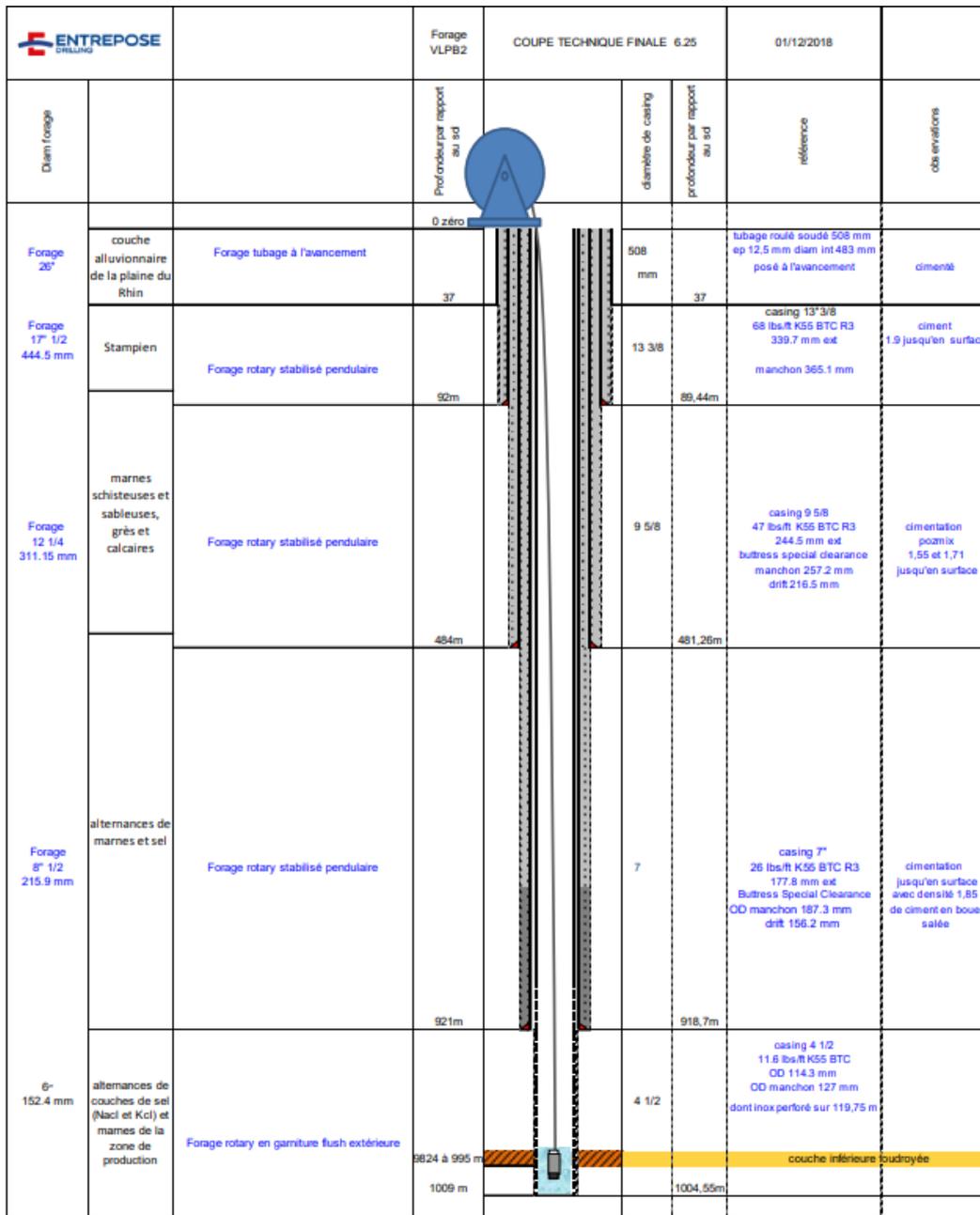


Figure 6. Coupe géologique et technique du forage VL-PB2 (document MDPA)

En fin de foration, un niveau de fluide a été mesuré à 961,78 m de profondeur. Il a commencé par baisser de plus de 22 m jusqu'au 21/06/2019 pour atteindre 984,33 m avant de remonter d'environ 5,4 m pour atteindre 978,93 m au 18/04/2023 (Figure 7). Depuis fin 2019, la courbe de remontée est assez régulière avec une vitesse moyenne de 1,4 m/an, entrecoupée de quelques fluctuations qui peuvent correspondre, à la précision des mesures, au remplissage de « poches » vides au sein des zones foudroyées. Ce comportement est donc bien celui attendu dans le cas d'un ennoyage de vides miniers.

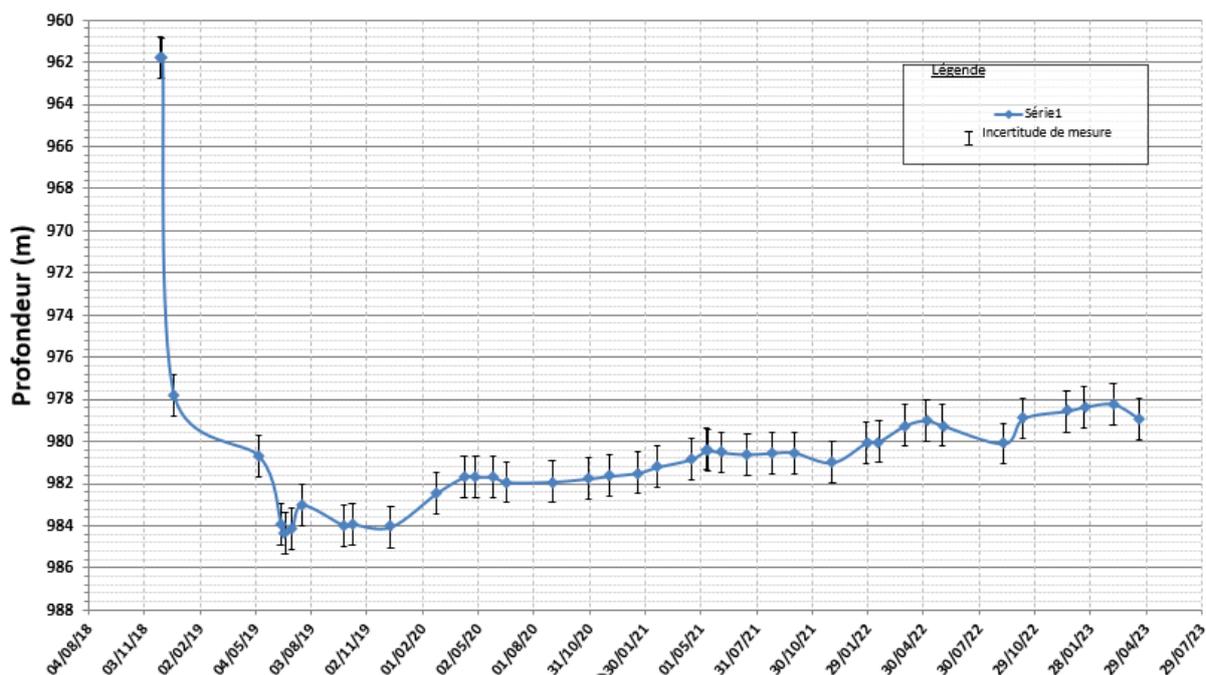


Figure 7. Évolution du niveau de fluide au VL-PB2 de 2018 à 2023 (données MDPa)

Comme dans l'ouvrage précédent, un test d'injection a été réalisé au VL-PB2 peu après sa foration avec cependant un volume plus faible (3,6 m³) et un débit moindre (10 l/min) qu'au VA-PB2. Il en a résulté une élévation du niveau de 25 m qui a permis de calculer une perméabilité de 2,8 à 2,9 10⁻⁸ m/s dans la CI, soit 20 à 50 fois moins qu'au VA-PB2.

Là encore, l'analyse chimique du fluide prélevé au fond diffère de celle de la boue de forage par la présence de 0,9 g/l de magnésium, de 6 g/l de calcium, ainsi que par des concentrations élevées en lithium (429 mg/l), bore (22 mg/l), manganèse et zinc (>45 mg/l). Il s'agit donc bien d'un fluide distinct de ceux injectés en cours de foration ou de test, c'est-à-dire naturellement présent dans les vides miniers (Tableau 4). On notera que ce fluide est légèrement moins minéralisé ici qu'au VA-PB2 avec notamment 333 g/l de chlorures de sodium et de potassium contre 356 g/l, ce qui est une cause possible de la différence de colmatage des deux forages.

Tableau 4. Analyses chimiques comparées du fluide d'envoyage du VL-PB2, de la boue de forage et de la saumure artificielle utilisée pour le test d'injection (CESAME, 2020)

	Na	K	Ca	Cl	Mg	SO4
	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l	g/l
Boue de forage VLPB2*	76	79	-	186	-	-
Fluide présent dans VAPB2	85	65	6	206	0,9	1,2
Fluide présent dans VLPB2	70	53	21	210	3,4	0,4

*Boue de forage constituée avec 150 kg/m³ de KCL et 190 kg/m³ de NaCl

Comme précédemment, il est intéressant de compléter ces informations de nature hydrologique par les données issues des mesures de pression de gaz, le forage VL-PB2 étant également émetteur de méthane. Lors d'un essai de mise en pression réalisé en mai-juin 2019, une surpression de 0,67 bar s'est développée en 24 jours, indépendamment des fluctuations de la pression atmosphérique (CESAME, 2020). Il en a été conclu que le réservoir minier dans lequel est implanté ce forage devait être relativement vaste et étanche, puisque la montée en pression avait mis près d'un mois à se mettre en place. En outre, la surpression est quatre fois plus forte ici qu'au VA-PB2 et l'analyse du gaz montre une forte présence de CH₄ dans VA-PB2, et une moindre présence dans VL-PB2 où apparaît en outre un taux d'hydrogène significatif (6,6 % vol). Toutes ces données tendraient donc à corroborer l'indépendance de ces deux bassins de remplissage alors qu'ils sont séparés par le stot COM-2 précédemment mentionné, considéré comme perméable par l'Ineris (2010) et par les MDPa (2011).

3 Analyse des mesures réalisées et de leur représentativité

3.1 Protocole de réalisation des mesures

Une visite de terrain a été organisée le 18/04/2023 afin que l'Ineris visualise le protocole de mesure du niveau de saumure dans les deux forages de reconnaissance profonds VA-PB2 et VL-PB2.

Chaque forage se trouve à l'intérieur d'un container sécurisé, protégé par une clôture et un portail anti-intrusion (Photo 1). À cause des émissions possibles de méthane, les forages sont munis chacun d'un évent de décompression et les containers sont ventilés. Chaque container abrite un treuil disposant d'environ 1000 m de câble d'acier coaxial permettant d'assurer à la fois la portance de la sonde de mesure de niveau et le transfert des données mesurées en temps réel jusqu'à la surface.



Photo 1. Vue des containers abritant les forages VA-PB2 (à gauche) et VL-PB2 (à droite)

3.1.1 Forage VA-PB2

Au forage VA-PB2, le container est scindé en deux par une paroi de plexiglass antistatique avec d'un côté une zone ATEX où se trouve le forage et son évent de décompression et, de l'autre côté, le treuil et le câble situés en zone non ATEX (Photo 2). Le câble traverse la paroi de plexiglass via une encoche pour aller s'enrouler sur une poulie située à la verticale du forage. La sonde de mesure est montée sur un support cylindrique d'environ 1 m de longueur qui pèse une dizaine de kg : cela permet de s'assurer qu'elle descend bien au fond du forage, malgré le coude du tubage lié à sa reprise par side-track. La tête du forage est coiffée par un tubage permettant une fermeture étanche pour éviter toute émanation de gaz. Les teneurs en gaz mesurées en tête du forage lors de la visite de l'Ineris étaient les suivantes (l'évent étant déjà ouvert) : 0 % CO, 0 % CH₄ et 20,9 % O₂.



Photo 2. Vue des compartiments ATEX (à gauche) et non-ATEX (à droite) du container du VA-PB2
(Note : le gros tuyau blanc sur la photo de gauche est raccordé à l'évent de décompression)

Le container est posé sur des plots cimentés et le tubage est coiffé par une tête dont la cote se trouve à 69,5 cm du sol, valeur qu'il faut donc déduire de l'extrémité de la sonde de mesure afin que le point zéro de la descente se trouve bien à la surface du sol (Photo 3 à droite).



Photo 3. Vue du dessus de la tête du forage VA-PB2 (à gauche) et du positionnement de la sonde de mesure dans le but de caler le zéro de la descente (à droite)

La sonde de mesure est descendue à la vitesse d'environ 20 m à la minute en vérifiant régulièrement l'intégrité du câble et l'absence de brins rompus. Dans ce cas, qui se produit assez fréquemment dans les cent premiers mètres, la descente de la sonde est alors stoppée et les brins sont sectionnés proprement, puis scotchés au câble pour éviter qu'ils ne forment des aspérités.

Bien que le câble soit en acier inox, il semble ici très corrodé et de couleur brun rouille sur ces cent premiers mètres alors qu'il apparaît intègre sur le reste de sa longueur, soit plus de 800 m. Cela résulte probablement à la fois de l'immersion de la dernière quinzaine de mètres de câble dans la saumure saturée et chaude (~50 °C), et de la présence d'une atmosphère très humide et corrosive jusqu'à une certaine hauteur au-dessus du niveau d'eau du forage. Cependant, force est de constater que l'ampleur de la corrosion observée sur le câble de l'autre forage VL-PB2, où le tubage est pratiquement vertical, est bien moins intense qu'ici et qu'il doit donc exister une cause supplémentaire spécifique au forage VA-PB2 : il est possible qu'elle provienne d'une corrosion électrochimique induite par le contact du câble avec la paroi métallique du tubage dans le secteur où celui-ci est coudé.

Lors de la visite du site, la descente du câble a dû être arrêtée pour des raisons de sécurité lorsque la sonde est arrivée à 106 m de profondeur, du fait de l'existence de deux nouvelles zones de détérioration importante du câble, non observées précédemment (Photo 4). De ce fait, la sonde a été immédiatement remontée et la mesure de niveau d'eau n'a pas pu être réalisée dans ce forage. Sans cet imprévu, le protocole de mesure prévoit que la sonde aurait dû être ensuite descendue à 915 m de profondeur puis laissée à cette profondeur pendant un mois avant d'être remontée, nettoyée et stockée en surface pendant un mois pour éviter une corrosion trop intense, puis de nouveau redescendue.

Note : le 25/04/2023, le câble a finalement pu être réparé et la sonde a été redescendue dans le forage ; elle a permis de mesurer un niveau de fluide à 901,80 m de profondeur et une pression de gaz mesurée au fond de 108,25 kPa pour une pression atmosphérique de 100 kPa ; cette surpression correspond à l'ordre de grandeur de celle attendue du fait de la différence d'altitude entre la surface et le fond, avec peut-être une légère influence du dégazage des vides miniers et/ou du fluide d'envoyage.



Photo 4. Vue d'une zone fortement corrodée sur le câble du VA-PB2

3.1.2 Forage VL-PB2

Au forage VL-PB2, le forage et le treuil se trouvent dans le même local (Photo 5, gauche et centre) qui est très bien ventilé. La sonde de mesure est plus petite car elle n'est pas montée ici sur un lourd support, le forage étant vertical. Le plancher du local est bétonné et se trouve au ras du sol. La tête du forage est munie d'un long tube avec fermeture étanche pour éviter toute émanation de gaz. Le zéro de la descente est donc calé en positionnant la sonde au niveau du grillage de protection situé au sol (Photo 5, à droite). Les teneurs en gaz mesurées en tête du forage lors de la visite de l'Ineris étaient les suivantes (l'évent étant déjà ouvert) : 0 % CO, 0,05 % CH₄ et 19,2 % O₂.

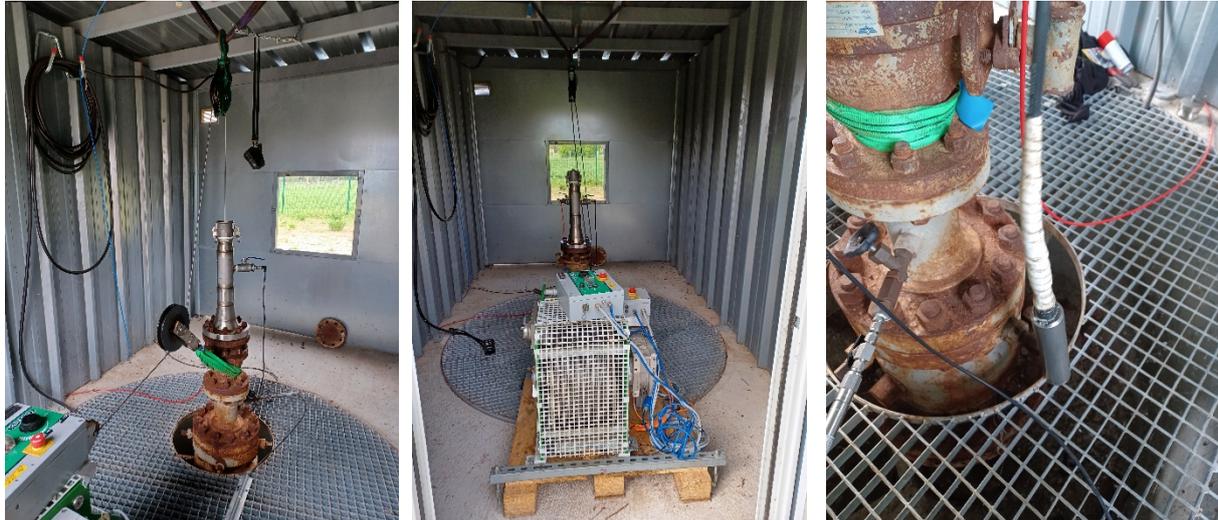


Photo 5. Vue du forage VL-PB2 (à gauche), du treuil (au centre) en cours de mesure et du positionnement de la sonde pour caler le zéro de la descente (à droite)

(Note : le petit tuyau noir visible sur les photos est raccordé à l'évent de décompression)

La sonde a été descendue à la même vitesse et avec les mêmes vérifications régulières de l'intégrité du câble qu'au VA-PB2. Le câble apparaît ici moins corrodé et la présence de brins rompus est moindre. Le niveau d'eau a été atteint à 978,93 m de profondeur, sous une température de 44,0 °C (pour 10,3 °C en surface). La pression de gaz mesurée à cette profondeur est de 119,47 kPa pour une pression atmosphérique de 99,40 kPa. Là encore, cette surpression correspond essentiellement à la différence d'altitude entre la surface et le fond, qui est plus forte ici qu'au VA-PB2 du fait de sa profondeur, ainsi éventuellement qu'au dégazage des vides miniers et/ou du fluide d'ennoyage.

Selon le même protocole que VA-PB2, la sonde du VL-PB2 a été descendue à 995 m de profondeur, soit environ 15 m sous le niveau de fluide, puis elle devrait être laissée un mois à cette profondeur. Elle sera ensuite remontée, nettoyée et stockée en surface pendant environ un mois, pour éviter une corrosion trop intense, avant d'être de nouveau redescendue.

3.2 Interprétation des mesures disponibles

L'Ineris a analysé les données obtenues par les MDPA sur VA-PB2 depuis 2015 et sur VL-PB2 depuis 2018 afin de s'assurer de l'intérêt de ces ouvrages dans la surveillance de l'ennoyage des vides miniers résiduels, principalement du forage VA-PB2 qui est la pièce « maîtresse » du suivi de ce site du fait de son implantation au sein même de la mine Amélie dans laquelle se trouve le site de stockage de déchets de StocaMine.

L'une des questions qui se pose au sujet de ces ouvrages est la représentativité des mesures qu'ils permettent de réaliser. En effet, on s'attend à observer une remontée plus ou moins régulière du niveau de fluide témoignant de l'arrivée d'eaux de percolations à travers les puits remblayés et conduisant à l'ennoyage des vides résiduels situés au sein des zones minières exploitées (tailles foudroyées).

Dans ce contexte d'ennoyage, le comportement du forage VL-PB2 apparaît cohérent si l'on excepte le premier semestre de mesures qui témoigne du retour à l'équilibre d'un système fortement perturbé par la foration et notamment par les 500 m³ de boues de forage perdues lors de la traversée de la CI. À partir de mi-2019, la trentaine de mesures disponibles à ce jour s'intègre correctement sur une droite qui matérialise une remontée plus ou moins régulière du niveau de fluide à la vitesse moyenne d'environ 4 mm/jour, soit de l'ordre de 1,4 m/an (courbe en tirets bleus foncés sur la Figure 8).

En revanche, au forage VA-PB2, du fait d'une durée de retour à l'équilibre de plus de 4 ans suite à la reprise des travaux de foration, et du fait de la forte perturbation induite par le nettoyage à haute pression de 2022, on ne dispose que de 7 mesures ponctuelles de niveau susceptibles de correspondre à l'avancée de l'ennoyage entre septembre 2020 et avril 2021. Ces mesures ont tendance à se grouper sur une droite qui pourrait alors matérialiser une remontée du niveau de fluide à la vitesse moyenne d'environ 1 mm/jour, soit de l'ordre de 0,4 m/an (courbe en tiretés bleus clairs sur la Figure 8).

Il existe une autre interprétation possible, bien que peu probable à ce jour, de la décroissance de niveau observée au VA-PB2 et de la croissance concomitante du niveau du VL-PB2. La Figure 8 montre en effet qu'il existe une différence d'une centaine de mètres entre les niveaux de fluide d'ennoyage du VA-PB2 (-653 m NGF en moyenne) et du VL-PB2 (-749 m NGF en moyenne), forages qui appartiennent à deux mines séparées par le stot endommagé COM-2. Cette différence de charge pourrait donc servir de moteur à un transfert de saumure depuis VA-PB2 vers VL-PB2 à travers ce stot endommagé, ce qui permettrait d'expliquer à la fois la baisse du niveau de fluide au premier point bas et sa hausse régulière au second. Cependant, deux observations viennent réfuter cette hypothèse :

- d'après la Figure 1 et le Tableau 2, les zones fracturées susceptibles d'altérer l'intégrité de ce stot se situent principalement à -525 et -445 m NGF, c'est-à-dire entre 128 et 208 m au-dessus du niveau actuel du fluide d'ennoyage ;
- d'après les mesures de pression de gaz réalisées par SOLEXPERTS et analysées par CESAME (2020) dans les forages VA-PB2 et VL-PB2, il n'y aurait actuellement pas d'échange de gaz à travers ce stot qui serait donc étanche à l'air et donc, *a fortiori*, à l'eau, du moins à une pression proche de la pression atmosphérique.

Il apparaît plutôt que les points bas VA-PB2 et VL-PB2 appartiennent à deux bassins de remplissage actuellement déconnectés et qui s'ennoient à des vitesses différentes du fait des caractéristiques des puits remblayés avec lesquels ils sont en relation et des vides miniers résiduels qu'ils renferment. Si nécessaire, il serait possible de vérifier cette hypothèse en injectant un traceur coloré (fluorescéine) au VA-PB2 et en analysant régulièrement la fluorescence d'échantillons de fluide prélevés au VL-PB2. Cependant, il faut être conscient que la mise en évidence d'une telle connexion, pour autant qu'elle existe, pourrait prendre des mois voire des années compte tenu des incertitudes sur l'état du stot.

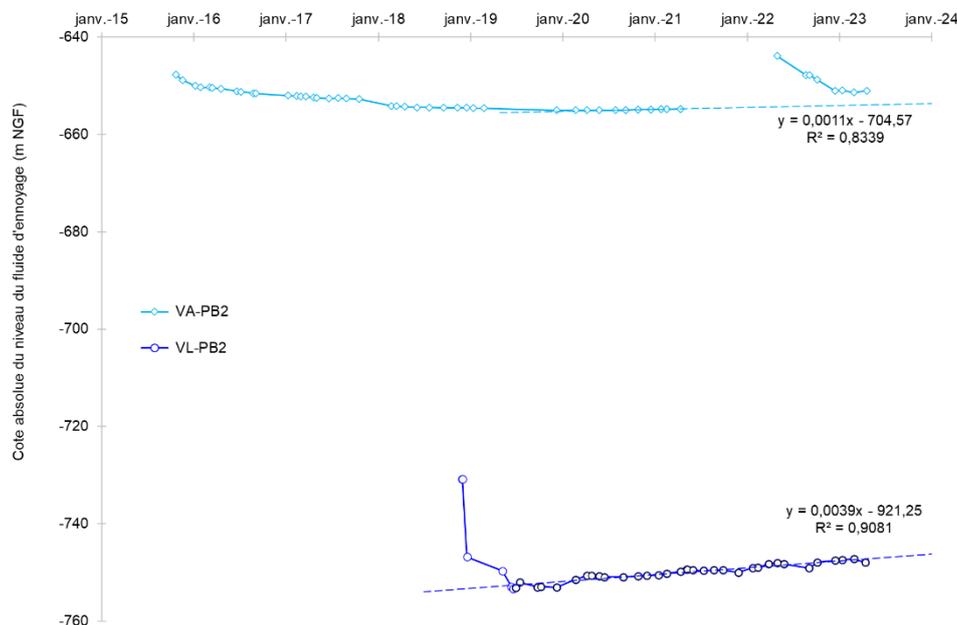


Figure 8. Évolution comparée de la cote absolue du niveau du fluide d'ennoyage aux deux forages de surveillance VA-PB2 et VL-PB2

On peut affiner la prédiction de comportement du VA-PB2 en portant sur un même graphique son niveau de fluide mesuré en fonction du temps passé depuis la fin de la foration et de celui passé depuis la fin du nettoyage à haute pression, évènements tous deux à l'origine d'une augmentation rapide du niveau de fluide. La Figure 9 confirme que l'impact du nettoyage a été nettement plus fort que celui de la foration mais que le rattrapage de niveau a également été plus rapide. Au final, les deux courbes se sont rejointes à partir de 230 j (soit 7,5 mois) et semblent évoluer conjointement depuis lors. Si cette tendance se poursuit, ce qui correspond à la courbe en tiretés rouges sur cette figure, le forage VA-PB2

devrait retrouver son niveau d'avant nettoyage au bout d'environ 1640 j, soit au début de 2025, et recommencer à partir de là à jouer son rôle effectif de surveillance du véritable niveau d'ennoyage.

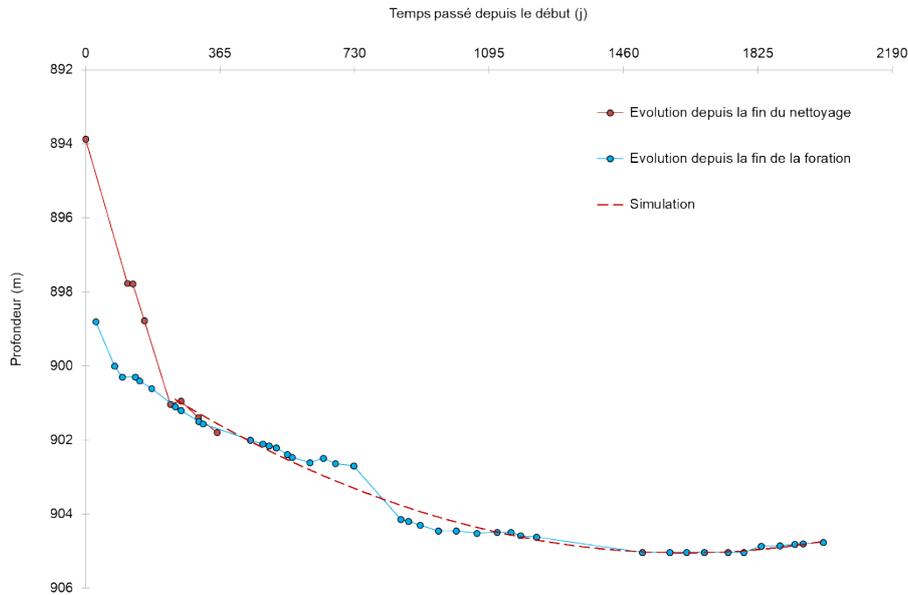


Figure 9. Évolution comparée du niveau de fluide au VA-PB2 depuis la fin de foration (en bleu) et depuis la fin du nettoyage (en rouge)

En se basant sur cette hypothèse, on peut proposer une représentation de l'évolution du niveau de fluide au VA-PB2 au cours des deux années à venir (Figure 10). Pour cela, la remontée de niveau amorcée en 2020-2021 a été prolongée de manière linéaire (tiretés fins) jusqu'à recouper la simulation actuelle de baisse du niveau de fluide (tiretés épais). Le retour à un niveau d'ennoyage non perturbé par le nettoyage à haute pression se produirait au moment de l'intersection de ces deux courbes, c'est-à-dire vers la fin de 2024.

La poursuite de la baisse du niveau de fluide jusqu'à fin 2024 et jusqu'à environ 904 m de profondeur est donc le corollaire de cette hypothèse. Un tel comportement ne remettrait pas en cause l'intérêt du forage VA-PB2 dans la surveillance du niveau d'ennoyage de la mine Amélie, du moins jusqu'en 2025. En revanche, cela traduirait le fait que ce réservoir minier se révèle être un milieu extrêmement sensible à toute perturbation forte et ce, plus particulièrement au droit du VA-PB2. Cela implique d'éviter à l'avenir toute perturbation de cette importance que ce soit à l'un ou à l'autre des forages de surveillance.

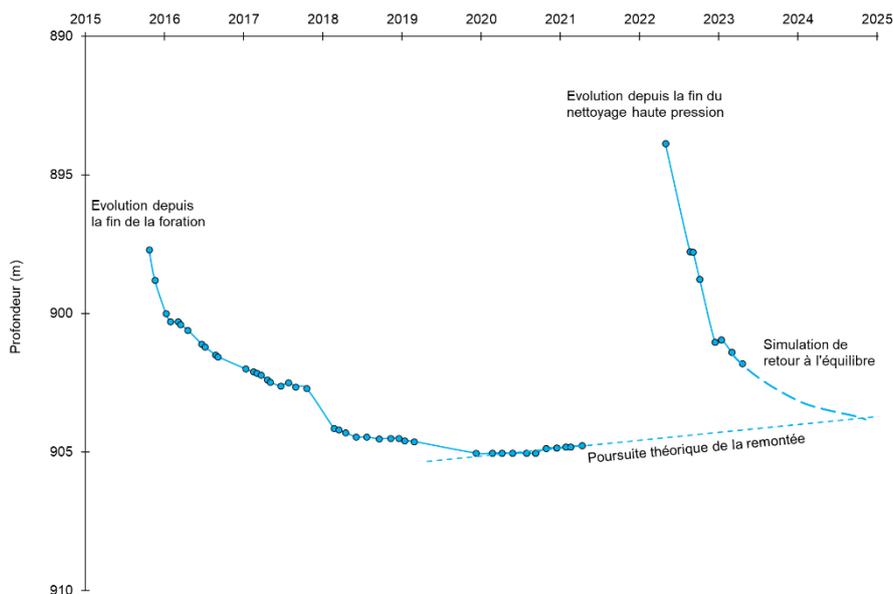


Figure 10. Évolution simulée de la baisse du niveau de fluide au VA-PB2 depuis la fin du nettoyage (tiretés épais) comparée à la tendance linéaire à la hausse amorcée avant ce test (tiretés fins)

Note sur la vitesse et la durée d'ennoyage des vides miniers :

Le scénario de référence choisi par l'Ineris (2011) pour représenter l'ennoyage à long terme de la mine considère une durée d'ennoyage prévisionnelle de 300 ans pour remplir la totalité des vides miniers résiduels. Cette étude visait à estimer l'impact maximal susceptible d'être induit par une émission de saumure contaminée par le lessivage des déchets stockés à StocaMine, en tenant compte de nombreuses hypothèses majorantes : débit de fuite maximal des puits remblayés, porosité importante des vides miniers résiduels, fermeture rapide des travaux les plus profonds, vitesse de convergence faible des travaux miniers, dissolution immédiate et totale de l'ensemble des déchets dans la saumure, etc.

Cette approche majorante a permis de montrer que, même dans un cadre fortement sécuritaire, l'impact à long terme de la contamination attendue de la nappe d'Alsace serait globalement négligeable, et localement faible à modéré (notamment à la base de la nappe d'Alsace, à proximité immédiate des puits Joseph et Else). En outre, cet impact serait diminué par les barrages qu'il est prévu de construire pour confiner le site de stockage et l'isoler de la saumure d'ennoyage pendant une durée suffisante à la « cicatrisation » des vides miniers.

Il est donc normal que la remontée du niveau d'ennoyage actuellement mesurée aux forages profonds VA-PB2 et VL-PB2 soit plus lente que ce qui a été prévu dans ce scénario majorant, qui tient compte du comportement à long terme des vides miniers et des puits remblayés.

Ainsi, les calculs effectués par CESAME (2020) sur la base des niveaux de fluide d'ennoyage mesurés aux forages VA-PB2 et VL-PB2, et qui conduisent à retenir un temps de remplissage supérieur à 600 ans, ne remettent en cause ni le raisonnement en approche majorante de l'Ineris, ni les mesures actuellement réalisées sur les forages profonds de suivi de l'ennoyage.

Il s'agit en effet de deux approches complémentaires, l'une valable à court terme (CESAME, 2020) pour expliquer l'état actuel du site, et l'autre à long terme (Ineris, 2011) pour prévoir son comportement à l'échelle de plusieurs siècles.

4 Avis sur le dispositif de surveillance de l'ennoyage

4.1 Avis sur la représentativité des cibles visées et l'état des forages

Le site de StocaMine se trouve dans la mine Amélie qui est séparée de la mine Marie-Louise, et par là même de tout le reste du compartiment Ouest, par le stot formant la communication COM-2. Comme son épaisseur théorique (30 m) a été rognée par endroits jusqu'à 4-5 m, l'Ineris (2011) avait supposé qu'il ne serait pas étanche à long terme et avait de ce fait considéré que le site de StocaMine serait finalement ennoyé par de la saumure provenant de l'ensemble du compartiment Ouest. Toutefois, CESAME (2022) a montré qu'il n'y avait pas à ce jour d'échange de gaz à travers ce stot et qu'il était donc étanche à l'air – donc *a fortiori* à l'eau – à une pression proche de la pression atmosphérique. En revanche, il n'est pas possible de prévoir comment se comportera ce stot fracturé sous la charge hydraulique de plus de 80 bar (soit près de 700 m de saumure saturée de densité 1,2) qui agira en fin d'ennoyage. Si ce stot reste malgré tout étanche, seule la saumure de la mine Amélie finira par atteindre StocaMine, d'où l'intérêt du forage profond de reconnaissance VA-PB2, via les puits Joseph, Else, Max, Amélie 1 et 2. Toutefois, on ne disposera formellement de cette information que lorsque le niveau d'ennoyage atteindra environ 700 m de profondeur dans l'une de ces deux mines, soit d'ici quelques centaines d'années au taux actuel de remontée du niveau de fluide. Il est donc nécessaire, par mesure de précaution, de surveiller dès à présent le niveau d'ennoyage des quartiers miniers situés à l'aval immédiat de la mine Amélie : c'est notamment le rôle du VL-PB2 du côté oriental du compartiment Ouest.

Compte tenu des difficultés inhérentes à la réalisation et à l'équipement de forages profonds, les ouvrages VA-PB2 et VL-PB2 sont pertinents et ont bien été positionnés dans des points bas où l'eau d'ennoyage est sensée s'accumuler dès à présent. Dans les deux cas, il a bien été recoupé une ou deux tailles foudroyées disposant de vides résiduels perméables et donnant accès à un niveau de fluide mesurable. Les tests d'injection réalisés ont confirmé la perméabilité de ces vides résiduels. Les analyses des fluides échantillonnés ont montré qu'ils étaient distincts des fluides utilisés pour les forations ou pour les tests, et qu'il devait donc bien s'agir du fluide d'ennoyage du site.

Le déroulement des opérations de forage a cependant montré des différences entre les deux ouvrages. Le premier a été foré en deux phases, séparée de plusieurs mois, du fait d'un coincement du tubage à la traversée de la couche supérieure. De ce fait, la base de l'ouvrage initial a été cimentée puis la foration a repris en side-track avec une déviation significative qui fait que le tubage n'est actuellement plus vertical mais coudé une première fois à partir de 404 m puis une seconde fois à partir 803 m de profondeur. En outre, une perte existe au niveau de la CS, qui la met en communication probable avec la CI. Dans l'état actuel des données, le forage VA-PB2, s'il permet bien une mesure de niveau du fluide profond présent dans la mine Amélie, ne se trouve pas dans une configuration optimale du fait d'un tubage incliné lié aux difficultés rencontrées lors de sa réalisation.

En revanche, le second forage VL-PB2 a été foré et équipé sans problème majeur en 2018 et sa verticalité est correcte (3°). Le forage VL-PB2 peut donc, du point de vue de sa configuration, être considéré comme un bon forage de surveillance du niveau d'envoyage profond de la mine Marie-Louise.

4.2 Avis sur la précision des mesures de niveau de fluide d'envoyage

La mesure d'un niveau de fluide à grande profondeur résulte d'un compromis entre précision et sécurité. A des profondeurs allant jusqu'à la centaine de mètres, les mesures piézométriques sont généralement réalisées avec une précision de l'ordre du centimètre, mais à des profondeurs où jouent à la fois l'allongement élastique de l'acier du câble de sustentation et la dilatation thermique due au gradient géothermique, une telle précision est illusoire, même si elle est fournie par le compteur métrique du treuil (Photo 6).



Photo 6. Mesures de profondeur affichées sur le compteur métrique du treuil lorsque la sonde touche le niveau fluide du forage VL-PB2 (à gauche) et lorsqu'elle arrive à la profondeur voulue (à droite)

4.2.1 Prise en compte de l'allongement élastique du câble

Le câble utilisé, fourni par Rochester Cable, mesure environ 5 mm de diamètre et pèse 89 kg/km dans l'air et 74 kg/km dans l'eau du fait de la poussée d'Archimède⁴. Son allongement est donné à 1,15 m/km/kN, ce qui représente environ 0,90 m à la profondeur du fluide du VA-PB2 et 0,98 m à celle du VL-PB2.

L'allongement élastique du câble d'acier soumis à son propre poids ne peut donc pas être négligé dans le calcul du niveau d'envoyage des vides miniers. Il est recommandé de calculer l'allongement induit dans l'air à la profondeur du niveau de fluide atteint, dans la saumure à la profondeur finale à laquelle la sonde est descendue, et de le soustraire aux valeurs brutes mesurées afin de disposer, en parallèle, de valeurs corrigées de cet effet.

⁴ Son poids dans une saumure saturée n'est pas mentionné et doit de ce fait être calculé.

4.2.2 Prise en compte de la dilatation thermique

Le coefficient de dilatation thermique d'une tige d'acier inox est de l'ordre de $16 \cdot 10^{-6} \text{ m/m/}^\circ\text{C}^{(5)}$, ce qui correspond à une dilatation de $16 \text{ } \mu\text{m/}^\circ\text{C}$ par mètre linéaire de câble. Le câble, stocké à 10°C le jour de la mesure, a été descendu jusqu'à une zone où la température était de 44 à 48°C selon le forage, ce qui correspond à une augmentation de température de 34 à 38°C . En première approximation, et pour fixer l'ordre de grandeur de la dilatation attendue, on considèrera que ce coefficient de dilatation thermique est également valable pour un câble coaxial, ce qui représenterait un allongement de l'ordre de $0,30 \text{ m}$ sur la longueur du câble.

La dilatation thermique attendue des câbles de mesure en acier est susceptible d'induire un écart de quelques décimètres sur les mesures de niveau d'eau. Il est donc recommandé de procéder à la compensation de cet effet en réalisant tout d'abord un log thermique de référence de chacun des deux forages puis en estimant, lors de chaque mesure, la dilatation thermique attendue du câble par rapport à sa température de stockage. Ce calcul devra être fait par intégration sur toute la longueur du câble utilisé pour la mesure, en fonction de la température de la tranche de profondeur considérée. Il conviendra ensuite de soustraire cette dilatation théorique aux mesures de niveau précédemment corrigées de l'allongement élastique afin de disposer de valeurs également corrigées de cet effet.

4.2.3 Prise en compte de la pression de gaz

La pression de gaz mesurée au fond des forages lors des dernières mesures a mis en évidence une suppression de $8,25 \text{ kPa}$ au VA-PB2 vers 901 m de profondeur et de $20,07 \text{ kPa}$ au VL-PB2 vers 978 m de profondeur. Cette surpression peut avoir deux origines :

- d'une part, elle correspond à l'augmentation naturelle de la pression atmosphérique avec la profondeur des mesures, qui est de l'ordre de 10 kPa à 1000 m ;
- d'autre part, notamment au VL-PB2, semble s'ajouter une surpression due au dégazage des vides miniers résiduels et/ou du fluide d'envoyage.

Dans les deux cas, les colonnes de saumure mesurées sont en équilibre avec les pressions de gaz aux profondeurs des mesures mais il convient, à l'instar de toute mesure piézométrique, de compenser ces valeurs en fonction des variations de la pression atmosphérique en surface. Pour ce faire, on pourra par exemple ramener toutes les mesures à des conditions barométriques standard de 1 bar soit $101,3 \text{ kPa}$. Cela permettra de pouvoir comparer entre elles des mesures prises à différentes périodes.

Ainsi, la mesure réalisée le $18/04/2023$ au VL-PB2 avec une pression atmosphérique de $99,4 \text{ kPa}$ doit-elle être corrigée de $99,4 - 101,3 = -1,9 \text{ kPa}$, soit l'équivalent de $-0,15 \text{ m}$ de saumure saturée, et celle réalisée le $25/04/2023$ au VA-PB2, avec une pression atmosphérique de 100 kPa , également corrigée de $-1,3 \text{ kPa}$, soit l'équivalent de $-0,10 \text{ m}$ de saumure saturée.

4.2.4 Prise en compte de la déviation et de l'inclinaison des ouvrages

Le forage VA-PB2 a fait l'objet d'une première déviation de 10° de 404 à 803 m puis d'une seconde déviation de 17° de 803 m à $931,5 \text{ m}$. En supposant le forage parfaitement vertical jusqu'à 404 m , la profondeur verticale équivalente est donc réduite d'environ $6,1 \text{ m}$ du fait de la première déviation et d'environ $4,3 \text{ m}$ du fait de la seconde, soit un écart total de $10,4 \text{ m}$ à la profondeur de la mesure de niveau de fluide.

En revanche, avec seulement 3° d'inclinaison, le forage VL-PB2 ne possède qu'un décalage vertical d'environ $1,1 \text{ m}$ à la profondeur de sa mesure de niveau de fluide.

Il convient donc de prendre en compte les déviations observées dans les deux ouvrages afin de corriger les mesures brutes de profondeur de manière à obtenir la profondeur verticale du niveau de fluide, et de pouvoir ainsi calculer la cote absolue de l'envoyage dans chacun des ouvrages.

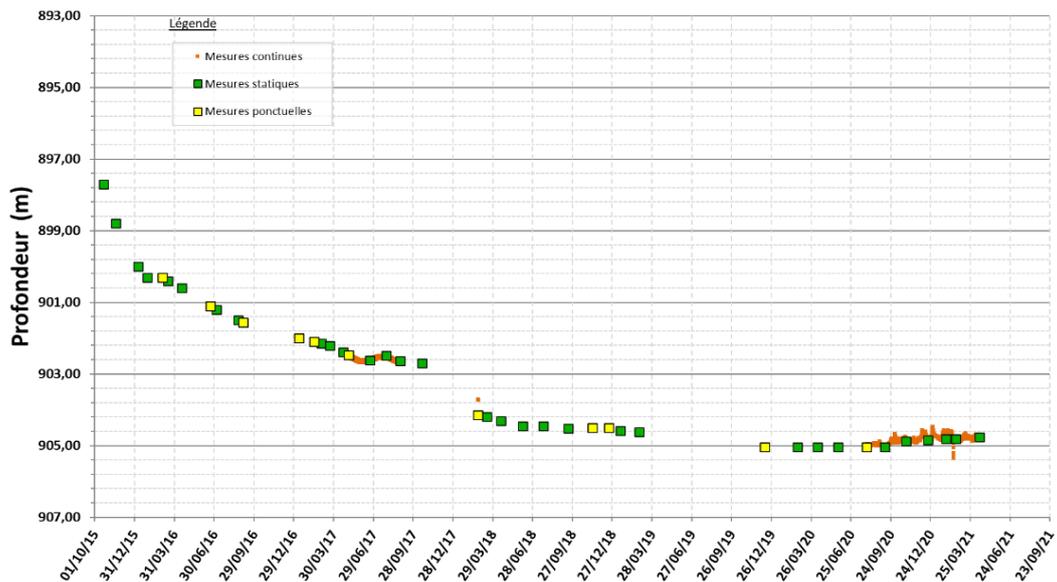
⁵ <http://www.surfatec.org/coefficients-de-dilatation/> ; <https://www.muepro.fr/dilatation-lineaire/>

4.3 Avis sur le protocole de mesures du niveau de fluide d'ennoyage

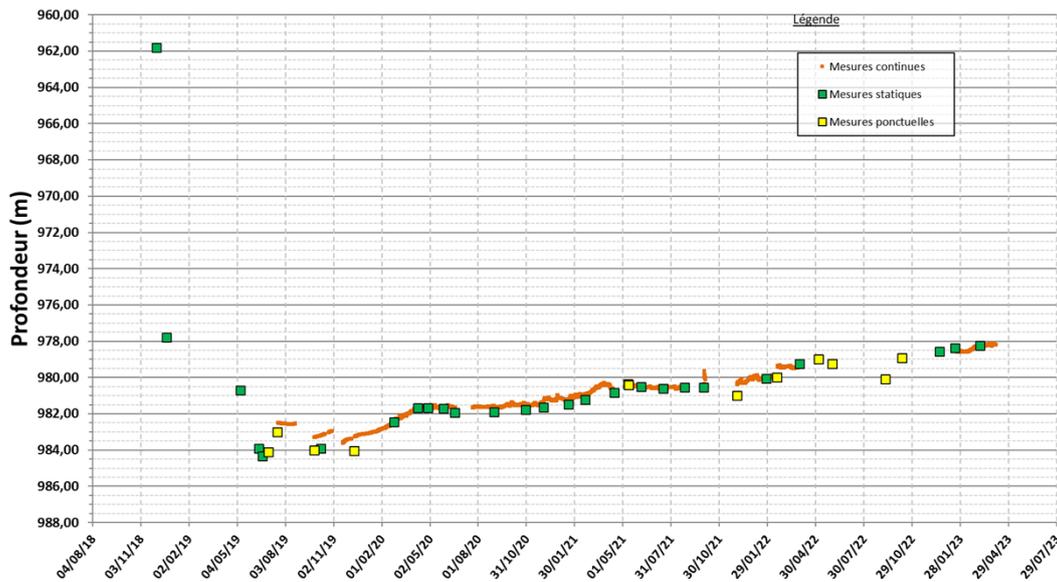
Pour rappel, le protocole actuel de mesure consiste à descendre les sondes à une fréquence mensuelle, à les laisser en place environ un mois dans chaque forage (sauf au VA-PB2 du fait des problèmes de corrosion du câble), puis à les ressortir afin de les nettoyer et de les stocker en surface.

Les MDPA nous ont fourni la chronique des mesures brutes de niveau de fluide qui sont prises régulièrement selon trois méthodes (Figure 11) :

- des mesures ponctuelles effectuées en descendant la sonde, en notant le niveau auquel elle touche la saumure et en la remontant immédiatement ;
- des mesures continues enregistrées au pas de mesure horaire par les sondes de niveau lorsqu'elles sont laissées environ un mois en place ;
- des mesures statiques qui correspondent à des contrôles visuels réalisés à l'occasion des mesures en continu.



a) Mesures brutes réalisées au VA-PB2 de 2015 à 2021 (document MDPA)



b) Mesures brutes réalisées au VL-PB2 de 2019 à 2023 (document MDPA)

Figure 11. Évolution au cours du temps de la profondeur du niveau de fluide d'ennoyage selon plusieurs méthodes de mesure (voir texte)

L'analyse des données montre une bonne concordance entre les mesures brutes ponctuelles, statiques et continues dans les deux forages :

- au VA-PB2, on dispose de 7 mesures ponctuelles ou statiques et de 6192 mesures en continu pendant la période comprise entre le retour à l'équilibre après la fin de la foration et le test de nettoyage à haute pression, c'est-à-dire entre le 31/07/2020 et le 15/04/2021 ;
- au VL-PB2, on dispose de 35 mesures ponctuelles ou statiques et de 20 552 mesures en continu depuis le retour à l'équilibre après la fin de la foration, c'est-à-dire entre le 20/07/2019 et le 05/04/2023.

Le Tableau 5 montre que la moyenne et l'écart type des mesures sont comparables aux deux forages selon les différentes méthodes. Le fait de laisser la sonde en continu dans la saumure ne semble donc pas apporter d'amélioration significative de la précision des mesures. Compte tenu de la corrosion induite par le séjour prolongé des sondes et des câbles dans la saumure chaude, et de la faible variation de niveau entre deux mesures, il ne paraît pas nécessaire de continuer à utiliser cette méthode : la réalisation de mesures ponctuelles paraît donc suffisante pour suivre l'évolution du niveau d'envoyage.

Tableau 5. Synthèse des mesures brutes de niveau réalisées dans les deux forages après le retour à l'équilibre des colonnes de fluides

Forage	VA-PB2		VL-PB2	
	Du 31/07/2020 au 15/04/2021		Du 20/07/2019 au 05/04/2023	
Type de mesure	Ponctuel/Statique	Continu	Ponctuel/Statique	Continu
Effectif	7	6 192	35	20 552
Moyenne (m NGF)	904,88	904,82*	981,10	981,08
Écart type (m)	0,11	0,11	1,76	1,31

* la comparaison des valeurs au VA-PB2 a nécessité un recalage lié à un différentiel d'environ 1 m qui reste à expliquer, notamment en tenant compte de l'inclinaison du forage.

En outre, il a été vu précédemment que la nécessaire prise en compte de l'allongement élastique des câbles, de leur dilatation thermique, de la compensation de la pression atmosphérique et de la correction de la déviation des forages induit une incertitude cumulée d'ordre métrique à plurimétrique. Dans ce contexte, il serait illusoire de vouloir procéder à des mesures précises trop rapprochées dans le temps. En effet, à une vitesse moyenne de remontée de l'ordre de 1 à 4 mm/jour, un écart de niveau de fluide supérieur à la somme de ces imprécisions se produit au bout d'environ un an de remontée. Ainsi, même en considérant qu'il s'agit pour la plupart d'erreurs systématiques, la réalisation de mesures ponctuelles à un pas de temps bimestriel à trimestriel semble ici suffisante.

Compte tenu de la faible variation de niveau entre deux mesures mensuelles et du cumul des incertitudes liées aux mesures, et du fait de l'ambiance corrosive dans laquelle séjournent les sondes de mesure lorsqu'elles sont immergées pendant un mois dans la saumure chaude, il est suggéré de remplacer le suivi actuel au moyen de mesures continues par la réalisation de mesures ponctuelles à une fréquence bimestrielle ou trimestrielle.

4.4 Avis sur la représentativité globale des mesures obtenues

Les mesures brutes obtenues au VA-PB2 sont, à ce jour, sujettes à controverses. Le niveau de fluide mesuré a baissé de plus de 7 m entre octobre 2015 et décembre 2019 avant de se stabiliser et d'entamer une lente remontée de 0,28 m en 7 mois. Ce suivi a ensuite été fortement perturbé par une opération de nettoyage à l'eau douce à haute pression qui a fait brutalement remonter le niveau de 22 m. Celui-ci n'est toujours pas revenu à son état initial près d'un an plus tard et il est prévisible que cela soit encore le cas jusqu'à fin 2024. En outre, l'inclinaison de ce forage et le fait que ses crépines aient tendance à se colmater à cause de précipitations de sel laissent planer un doute sur la validité des mesures brutes effectuées.

L'explication la plus plausible à ce comportement est que la couche inférieure ait été remplie de saumure en charge et que celle-ci se soit déversée dans la couche supérieure par le biais du forage lui-même, jusqu'à parvenir à saturer les vides miniers résiduels de la couche supérieure. Si c'est bien le cas, on

s'attend donc à ce que l'évolution du niveau de fluide reprenne un comportement conforme à celui d'un ennoyage de vides miniers résiduels dès 2025, à savoir une augmentation à un rythme plus ou moins régulier. Si le retour du forage VA-PB2 à ce comportement prévisible n'est pas observé au plus tard en 2025, en valeurs corrigées des incertitudes susmentionnées, alors cet ouvrage ne pourra plus prétendre mesurer le niveau d'ennoyage de la mine Amélie. Dans ce cas, il faudra envisager soit un traitement de récupération de l'ouvrage, soit la réalisation d'un nouveau forage profond de suivi de l'ennoyage de cette mine.

Il est d'ores et déjà possible de vérifier la représentativité des mesures du VA-PB2 en injectant de l'eau dans la mine Amélie et en surveillant la réponse piézométrique du forage. À cet effet, les MDPAs ont demandé en 2022 l'autorisation d'envoyer dans les vieux travaux de la mine Amélie les eaux d'exhaure du « puisard Joseph », actuellement envoyées en surface et rejetées – après contrôle – dans le réseau communal d'eau pluviale (MDPA, 2022). Ces eaux représentent un débit d'environ 400 m³/an. Leur caractérisation qualitative est en cours et, si la demande est acceptée, elle fera l'objet d'un contrôle semestriel (MDPA, 2023). Cette opération, réversible à tout moment en cas de nécessité, pourrait ainsi confirmer que le forage VA-PB2 est bien fonctionnel, sous réserve que l'eau envoyée emprunte le bon chemin et atteigne bien les vides miniers résiduels.

En revanche, ce type de problème ne se pose pas au forage VL-PB2 où, après un semestre de baisse lié aux perturbations induites par la phase de foration et le test d'injection qui a suivi, le niveau a commencé à remonter à la vitesse moyenne de 1,4 m/an.

Enfin, il est possible de vérifier si les points bas VA-PB2 et VL-PB2 appartiennent à deux bassins de remplissage actuellement déconnectés, s'ennoyant à des vitesses différentes, en injectant un traceur coloré (fluorescéine) au VA-PB2 et en analysant régulièrement la fluorescence d'échantillons du fluide prélevé au VL-PB2. Cependant, il faut être conscient que la mise en évidence d'une telle connexion, pour autant qu'elle existe, pourrait prendre des mois voire des années compte tenu des incertitudes sur le degré de fissuration du stot.

Dans l'état actuel des deux ouvrages et au regard des données acquises, seul le VL-PB2 peut donc prétendre représenter le niveau d'ennoyage des vides miniers résiduels, la décision concernant le VA-PB2 étant conditionnée à l'évolution de son comportement à partir de 2025 et/ou de sa réponse à une éventuelle injection d'eau au pied du puits Joseph, dans les vieux travaux de la mine Amélie.

4.5 Propositions d'amélioration du dispositif de surveillance de l'ennoyage

Outre les nécessaires corrections des mesures brutes de niveau de fluide, des propositions d'optimisation du dispositif de surveillance peuvent être formulées. Certaines d'entre elles visent à améliorer l'état du forage VA-PB2, d'autres concernent plus généralement le protocole de mesures applicable aux deux ouvrages. Dans les deux cas, il s'agit d'améliorer la représentativité des mesures et donc leur fiabilité.

4.5.1 Contrôle de l'état des crépines du forage VA-PB2

Le forage situé au point bas VA-PB2 est fondamental pour surveiller l'ennoyage de la mine au sein de laquelle se trouve StocaMine : il convient donc que les mesures qu'il permet d'effectuer soient fiables.

Lors du nettoyage du forage VA-PB2 réalisé en 2022, l'eau douce injectée en grande quantité (56 m³, soit près de dix fois le volume intérieur du tubage) et sous forte pression (150 bar) s'est révélée très efficace pour décolmater les crépines de leurs encroutements de sel, comme cela a été observé lors de la diagraphie réalisée juste après l'opération. En revanche, la lenteur du retour à l'équilibre du niveau de fluide laisse penser qu'un re-colmatage a pu se produire à l'extrados du tubage ou au niveau des crépines. Ce re-colmatage pourrait avoir été induit par deux phénomènes :

- soit le retour vers le forage d'une partie de l'eau injectée, après saturation par dissolution de sel dans le massif, suivi d'une recristallisation ;
- soit une précipitation chimique induite par la perturbation du potentiel rédox de la saumure ; en effet, le réservoir minier doit renfermer une saumure désoxygénée et réductrice (son potentiel rédox a d'ailleurs été mesuré à -108 mV) alors que l'eau douce injectée devait être oxygénée et donc oxydante ; il est donc possible que cela ait induit la précipitation d'oxydes ou d'hydroxydes de fer et de manganèse ; pour éviter ce problème si de prochaines injections sont envisagées, il est recommandé de procéder au dégazage de la saumure qui sera utilisée au moyen, par exemple, d'un barbotage préalable d'azote pendant quelques heures.

Afin de s'assurer, à partir de 2025, que le forage VA-PB2 continue bien de jouer son rôle de surveillance du niveau de fluide d'envoyage, il est préconisé d'y effectuer périodiquement un contrôle de l'état des crépines par inspection caméra, sans attendre leur colmatage éventuel. La fréquence de ce contrôle pourrait être annuelle ou bisannuelle. Du fait des fortes perturbations induites par le nettoyage réalisé à haute pression et avec une grande quantité d'eau douce, il peut être envisagé d'injecter dans ce forage un faible volume de saumure saturée et de surveiller sa réponse hydrodynamique. En première approximation, ce volume pourrait être de 1 m³, valeur qui sera à optimiser à la suite de plusieurs essais avec l'objectif de créer une perturbation mesurable assortie d'une durée de retour à l'équilibre inférieure au pas de mesure (bimestriel à trimestriel) afin que la mesure suivante n'apparaisse plus perturbée.

Par analogie avec l'impact produit par le nettoyage du forage à l'eau douce, on peut estimer qu'une telle injection devrait créer une remontée de niveau d'un à quelques mètres, avec une durée de résorption d'un à quelques mois. On veillera, lors de ce type d'opération, à descendre préalablement la sonde afin de disposer d'une mesure de niveau de fluide au repos et de suivre en continu le niveau dynamique tout au long de l'essai. La comparaison, d'une année sur l'autre, de la hauteur maximale de remontée de la saumure dans l'ouvrage et de sa vitesse de descente, devrait permettre de déceler préventivement des indices de colmatage qui pourraient alors nécessiter un nettoyage éventuellement plus poussé. Celui-ci pourrait être réalisé à l'eau douce mais en quantité et à une pression modérée afin de ne pas perturber trop durablement les mesures de niveau d'envoyage.

Note : ces recommandations s'appliquent également au forage VL-PB2, afin d'éviter que des problèmes similaires n'y surviennent.

4.5.2 Protection du câble vis-à-vis du risque de corrosion

Il a été constaté que le câble du forage VA-PB2 était nettement plus corrodé et fragilisé que celui du VL-PB2. Une telle différence de corrosion dans un même contexte hydrogéologique peut s'expliquer par le fait que le câble du VA-PB2 vient frotter contre le tubage métallique qui est incliné en dessous du side-track, créant ainsi un phénomène de corrosion électrochimique qui viendrait s'ajouter à la corrosion chimique due à la saumure chaude. Pour éviter cela, il peut être procédé au gainage du câble du VA-PB2 sur la longueur incriminée, soit de l'ordre d'une centaine de mètres. En effet, l'opération de nettoyage des câbles à l'eau douce, actuellement pratiquée à la suite de chaque mesure de niveau, ne permet apparemment pas de se prémunir contre le risque de corrosion de la partie du câble au contact de la saumure chaude et de la zone humide susjacente.

4.5.3 Implantation d'un forage de reconnaissance supplémentaire

Selon le schéma d'envoyage établi par les MDPa (2011), une fois la mine Amélie envoyée jusqu'à la communication COM-2 (stot fracturé), la saumure devrait se déverser vers le bassin Marie-Louise. Le niveau de ces deux bassins de remplissage évoluera ensuite de concert jusqu'à atteindre la communication par galerie COM-4 qui donne accès au bassin de Berrwiller. La saumure s'y déversera alors jusqu'à atteindre la communication (probable) par zone fracturée COM-3. Ensuite, le niveau d'envoyage continuera à remonter dans l'ensemble de ces bassins, et donc dans la mine Amélie en direction de StocaMine.

Dans la mesure où serait décidé le stockage illimité des déchets du site de StocaMine, il pourrait apparaître plus sûr de disposer à long terme d'un forage profond de surveillance de l'envoyage dans chacun des trois bassins de remplissage susmentionnés, à savoir Amélie, Marie-Louise et Berrwiller. Les points de surveillance les plus intéressants sont sans conteste ceux qui sont déjà actuellement suivis, à savoir VA-PB2 au point bas de la mine Amélie où se trouve StocaMine, et VL-PB2 à l'un des points bas de la mine Marie-Louise. Néanmoins, chaque mine s'envoie à une vitesse qui lui est propre et qui dépend des paramètres suivants :

- le volume de vides créés par l'exploitation ;
- le volume de vides résiduels après foudroyage et début de compaction (fluage), lié notamment à l'âge et à la profondeur des travaux ;
- le nombre de puits d'accès pendant l'exploitation et l'étanchéité de leur remplissage après abandon.

De ce fait, on constate une disparité dans le comportement hydraulique des deux forages de reconnaissance existants, l'un suggérant – après cinq années de baisse de niveau – une tendance à la remontée de l'ordre de 0,4 m/an, l'autre montrant – après seulement une année de baisse – une nette remontée au rythme d'environ 1,4 m/an. Il est donc difficile, à partir de données aussi disparates, d'en

déduire un comportement moyen de l'ensemble du compartiment ouest et notamment de sa partie la plus occidentale. En s'appuyant sur le schéma des surfaces potentiellement ennoyées dessiné par CESAME (2020), on dispose d'éléments intéressants pour implanter – si nécessaire – un troisième forage profond de reconnaissance de la remontée du niveau d'ennoyage (Figure 12).

En ce qui concerne la partie orientale du compartiment ouest, le quartier où se trouve VL-PB1-2 est relié à celui de VB-PB1, plus profond d'environ 50 m, via les communications COM-3 et COM-6. Cette dernière est considérée comme une communication peu probable et, comme elle se trouve vers 750 m de profondeur, elle devrait être noyée à court terme. Dans un futur proche, il sera donc possible de savoir si cette communication est effective, ce qui devrait se traduire par une variation de la vitesse d'ennoyage au VL-PB2 : soit une stabilisation si le niveau d'ennoyage du VL-PB2 est supérieur à celui du VB-PB1 (déversement de saumure du VL-PB2 vers VB-PB1), soit au contraire une augmentation si c'est le niveau d'ennoyage du VB-PB1 qui est supérieur à celui du VL-PB2 (déversement de saumure du VB-PB1 vers VL-PB2).

En ce qui concerne la partie occidentale du compartiment ouest, la mine Marie-Louise est directement connectée au bassin de Berrwiller par le biais de la galerie COM-4. Ainsi, par mesure de précaution et dans le contexte d'un stockage illimité, il serait intéressant de disposer d'un forage de surveillance du niveau d'ennoyage du point bas VR-PB1 afin de pouvoir anticiper un éventuel déversement de saumure du bassin de Berrwiller vers la mine Marie-Louise, puis vers la mine Amélie qui renferme le site de stockage de StocaMine (Figure 12).

Quant aux autres points bas de quartiers de mine situés à une profondeur moindre, ils ne présentent pas d'intérêt du fait qu'ils seront tardivement ennoyés (cas de VA-PB1 car le puits Max, remblayé parmi les derniers, débite peu), et/ou qu'ils devraient représenter l'ennoyage de quartiers isolés et de faible superficie (VA-PB1, VU-PB1).

5 Conclusion

L'ennoyage du complexe minier au sein duquel est implanté le site de stockage de déchets de StocaMine est actuellement surveillé par les deux forages profonds VA-PB2 et VL-PB2, respectivement implantés aux points bas des mines Amélie et Marie-Louise. Ces implantations sont pertinentes et permettent d'accéder au niveau de fluide présent dans les points bas de ces deux bassins de remplissage (Figure 12).

Au forage VA-PB2, le retour du niveau de fluide d'ennoyage à des conditions non perturbées par la foration a duré de 2015 à 2019, et le nettoyage du forage à l'eau douce à haute pression réalisé en mai 2022 a induit une forte perturbation dont l'impact se fait encore sentir de nos jours. De ce fait, les mesures de niveau susceptibles de correspondre à l'avancée de l'ennoyage ne sont disponibles qu'entre septembre 2020 et avril 2021. Ces mesures ont tendance à se grouper sur une droite qui matérialise une remontée du niveau de fluide à une vitesse de l'ordre de 0,4 m/an. Cette évolution linéaire suppose un prochain retour à un état d'équilibre à la fin 2024, ce qui devrait permettre de mesurer à nouveau la remontée du niveau d'ennoyage dans ce forage dès 2025.

Au forage VL-PB2, le retour du niveau de fluide d'ennoyage à des conditions non perturbées par la foration s'est déroulé de novembre 2018 à juin 2019. Depuis lors, les mesures sont globalement croissantes, en accord avec un processus d'ennoyage des vides miniers résiduels.

À ce jour, les résultats obtenus dans les deux forages correspondent à des mesures brutes qui nécessitent quelques corrections avant de pouvoir représenter plus précisément les niveaux de fluide d'ennoyage, sans toutefois remettre en cause la représentativité des mesures actuellement réalisées : en effet, elles causent pour la plupart des erreurs systématiques dont l'amplitude joue sur quelques mètres quand la profondeur des niveaux de fluide mesurés est de l'ordre de 900 m. Les corrections à apporter pour améliorer la précision des mesures concernent :

- l'allongement élastique des câbles qui crée une incertitude de l'ordre du mètre ;
- la dilatation thermique des câbles qui crée une incertitude d'un à quelques décimètres ;
- l'inclinaison des forages qui crée, surtout au VA-PB2, une incertitude d'un à plusieurs mètres ;
- la correction des mesures par rapport à une pression atmosphérique standard qui crée une incertitude d'un à quelques décimètres.

Les données actuellement disponibles sont des mesures ponctuelles du niveau de fluide et des mesures en continu réalisées pendant des durées d'immersion des sondes de l'ordre du mois. Compte tenu de l'ambiance corrosive dans laquelle séjournent les sondes lorsqu'elles sont immergées, du faible écart

observé entre ces deux types de mesures, de la faible vitesse de remontée du fluide d'ennoyage et des imprécisions inhérentes à des mesures aussi profondes, il n'apparaît pas nécessaire de poursuivre les mesures en continu : des mesures ponctuelles réalisées à une fréquence bimestrielle ou trimestrielle devraient être suffisantes pour suivre correctement l'évolution du niveau de fluide dans chaque forage.

Ce réservoir minier se révèle être un milieu extrêmement sensible à toute perturbation forte. Ainsi, dans le contexte d'un stockage illimité des déchets du site de StocaMine, il est recommandé de disposer d'au moins deux forages fonctionnels de suivi de l'ennoyage des bassins de remplissage, l'un au point bas de la mine Amélie, l'autre au point bas d'une des mines situées en aval (Marie-Louise ou Berrwiller). Un troisième forage pourrait éventuellement être implanté au droit du point bas VR-PB1 afin de surveiller l'ennoyage du bassin de remplissage de Berrwiller, essentiellement dans le contexte d'un stockage illimité des déchets.

Le forage VA-PB2 est la « pièce maîtresse » du suivi de l'ennoyage du réservoir minier du fait de son implantation au sein de la mine Amélie qui héberge le site de stockage de déchets de StocaMine. Dans son état actuel, et compte tenu des données disponibles, il ne constitue pas encore un ouvrage optimal de surveillance du niveau d'ennoyage profond de ce bassin de remplissage. Comme indiqué, cela résulte principalement des incidents survenus lors de sa foration et de son équipement (de 2013 à 2015), ainsi que des conséquences de son nettoyage à haute pression en 2022. Il faut toutefois tenir également compte d'une configuration différente avec le recoupement des vides miniers résiduels des deux couches exploitées et qui ont probablement été mis en communication hydraulique par le forage. Dans ce contexte, l'attente prochaine d'un retour à l'équilibre hydrodynamique devrait participer, ainsi que la prise en compte des corrections demandées, à l'amélioration de la représentativité des données acquises via cet ouvrage. Quant au forage VL-PB2, implanté en 2018 dans la mine Marie-Louise, il permet d'assurer la surveillance du niveau d'ennoyage profond de ce bassin de remplissage depuis mi-2019, date de son retour à des conditions non perturbées par la foration.

Cette analyse a montré que les mesures obtenues dans le forage VA-PB2 sont, à ce jour, sujettes à caution et que cela devrait perdurer jusqu'en 2025. Passé cette date, si une remontée plus ou moins régulière du niveau de fluide n'est pas observée, cet ouvrage ne pourra plus être considéré comme représentatif de la mesure du niveau d'ennoyage de la mine Amélie et il faudra alors envisager un traitement de récupération et/ou la réalisation d'un nouveau forage profond dans le même bassin de remplissage. En revanche, le forage VL-PB2 joue bien son rôle de surveillance du comportement du fluide d'ennoyage des vides miniers résiduels, à la condition toutefois de corriger ses valeurs brutes des incertitudes susmentionnées.

Quelques voies d'amélioration du dispositif de surveillance de l'ennoyage ont par ailleurs été proposées : tests réguliers d'injection de saumure, inspection caméra, gainage du câble, traçages, ...

Enfin, on veillera à poursuivre une maintenance régulière de ces ouvrages profonds dans la durée, afin d'assurer une bonne accessibilité au niveau du fluide d'ennoyage dans un contexte de fluage du sel.

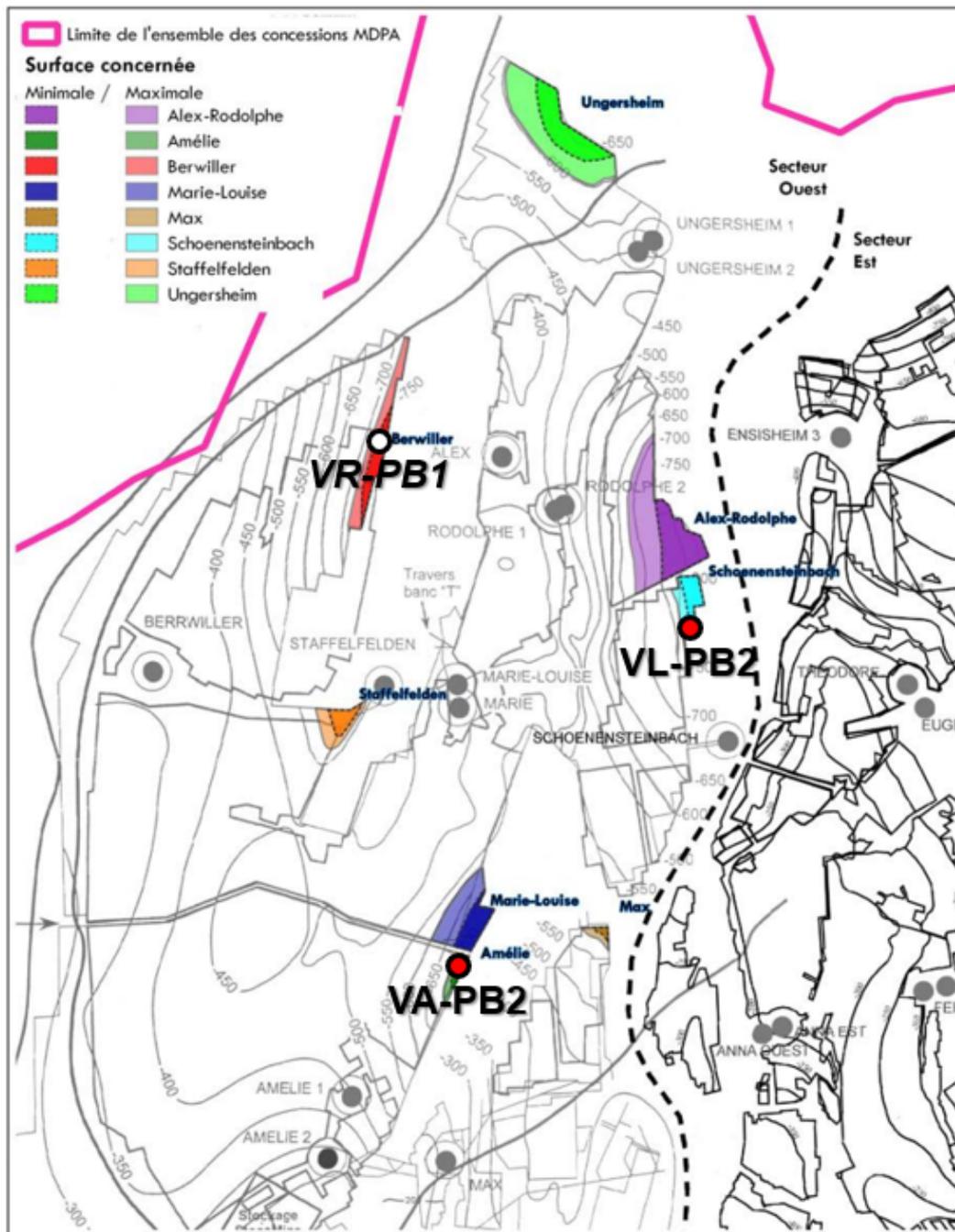


Figure 12. Points bas de la mine et surfaces potentiellement concernées par le remplissage en 2020 pour une porosité résiduelle de 10 % et implantation des forages profonds de reconnaissance du niveau d'envoyage (d'après CESAME, 2020)

Légende : les cercles gris représentent les puits d'accès à la mine, les cercles rouges matérialisent les forages profonds actuels de reconnaissance du niveau d'envoyage et le cercle blanc est l'emplacement suggéré d'un forage profond complémentaire (référence en italiques).

6 Références

COPIL, 2011. Comité de pilotage Stocamine. Rapport d'expertise. Juillet 2011, 147 p.

MDPA, 2011. Choix d'un site de forage de reconnaissance de la montée des eaux. Rapport 074-12, Novembre 2011, 39 p.

MDPA, 2013. Sondage de surveillance de l'ennoyage. Document 161-13/DT, 7 mai 2013, 3 p.

CESAME, 2020. Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux de surface et des niveaux d'ennoyage. ANNEE 2020. Rapport ABLA_DoL/MIN_2143 (V3), Juin 2020, 141 p.

CESAME, 2021. Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux de surface et des niveaux d'ennoyage. ANNEE 2021. Rapport DL_Abla/MIN 2249, Septembre 2021, 15 p.

CESAME, 2022. Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux de surface et des niveaux d'ennoyage. ANNEE 2022. Rapport DL_SM / MIN 2329, Octobre 2022, 18 p.

Entrepose Drillong (2018). Réalisation d'un forage de surveillance du gisement des potasses d'Alsace. Pulversheim (68). Puits : VLPB2. Rapport DOE-18-FGS-022, 01/12/2018, 110 p.

Ineris, 2011. Stockage souterrain de STOCAMINE (68). Étude hydrogéologique de l'ennoyage du site. Rapport d'étude DRS-10-108130-12810B, 09/03/2011, 190 p.

Ineris, 2015. Contexte et aspects fondamentaux du forage et de l'exploitation des puits d'hydrocarbure. Rapport d'étude DRS-15-149641-01420A, 06/05/2015, 154 p.

MDPA, 2018. Réalisation d'un forage de surveillance. Cahier des clauses techniques particulières (CCTP). Marché de Travaux N° 2018-MAPA001, 37 pages.

MDPA (2022). Projet de réutilisation des eaux d'exhaure. Courrier à la DREAL n° 160-22/DT RC/NR du 14/12/2022, 2 p.

MDPA (2023). Projet de réutilisation des eaux d'exhaure – Complément d'information suite à votre courrier L-0123-55-VB en réponse à notre demande initiale 160-22/DT. Courrier à la DREAL n° 021-23/DT RC/Abi du 20/02/2023, 2 p.

Préfecture du Haut-Rhin, 2017. Arrêté du 23 mars 2017 pris en application du titre Ier livre V du code de l'environnement autorisant la prolongation, pour une durée illimitée, de l'autorisation à la société des Mines de Potasse d'Alsace (anciennement Stocamine) de stockage souterrain en couches géologiques profondes, de produits dangereux, non radioactifs, sur le territoire de la commune de Wittelsheim. 38 p.

Solexperts, 2015. Test hydrogéologique sur le forage VAPB2 à Wittelsheim pour évaluation des caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère. Rapport FRA177-RDM_01, 17/12/2015, 14 p.

Solexperts, 2019. Equipement du forage VLPB2 à Pulversheim pour surveillance de la nappe et prélèvement d'eau Rapport d'Installation. Rapport FRA-248_RI_01, 08/02/2019, 15 p.

Documents fournis par les MDPAs :

- Fichiers de données « suivi ennoyage VAPB2.xlsx » et « suivi ennoyage VLPB2.xlsx » à la date des dernières mesures effectuées (avril 2023) ;
- Coupes géologiques et techniques des deux ouvrages.

