

# Mines de Potasses d'Alsace – Secteur Ouest

---

**Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux de  
surface et des niveaux d'envoyage**

**ANNEE 2020**

**(en réponse à l'article 10-2-2 de l'AP du 23 Mars 2017)**

## SOMMAIRE

|                                                                                                                                                            |           |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. CONTEXTE.....</b>                                                                                                                                    | <b>4</b>  |
| <b>2. ANALYSE DES NOUVELLES DONNÉES.....</b>                                                                                                               | <b>7</b>  |
| 2.1. DOCUMENTS CONCERNANT LES FORAGES VAPB2 ET VLPB2 .....                                                                                                 | 7         |
| 2.1.1. LE FORAGE VAPB2.....                                                                                                                                | 8         |
| 2.1.2. LE FORAGE VLPB2.....                                                                                                                                | 15        |
| 2.1.3. GAZ MINIER.....                                                                                                                                     | 20        |
| 2.1.4. CONCLUSION.....                                                                                                                                     | 23        |
| 2.2. DONNÉES SUR LES NIVEAUX DU SOL.....                                                                                                                   | 24        |
| 2.2.1. ALTITUDE DES POINTS EN SURFACE (MESURES TOPOGRAPHIQUES CABINET JUNG GÉOMÈTRE EXPERT).....                                                           | 24        |
| NB : POUR TOUTES LES COURBES : ÉCHELLE VERTICALE EXPRIMÉE EN M. VALEUR 100 = RÉFÉRENCE INITIALE (PREMIÈRE MESURE). .....                                   | 28        |
| 2.2.2. SYNTHÈSE COURTE DES TRAVAUX DE THÈSE DE G. MODESTE (EOST).....                                                                                      | 35        |
| 2.2.3. CONCLUSIONS CONCERNANT LES MOUVEMENTS DE SURFACE ET LES MOUVEMENTS RESIDUELS AU FOND.....                                                           | 45        |
| <b>3. CROISEMENT AVEC LES HYPOTHÈSES PRÉSENTÉES DANS LE DOSSIER 2015.....</b>                                                                              | <b>47</b> |
| 3.1. RAPPEL DES HYPOTHÈSES.....                                                                                                                            | 47        |
| 3.1.1. LES VIDES MINIERES ET LEUR ÉVOLUTION DANS LE TEMPS .....                                                                                            | 49        |
| 3.1.2. LES VOLUMES D'EAU PÉNÉTRANT DANS LA MINE.....                                                                                                       | 50        |
| 3.1.3. LES DURÉES D'ENNOYAGE DES VIDES MINIERES.....                                                                                                       | 51        |
| 3.2. ANALYSE DES HYPOTHÈSES AU REGARD DES MESURES DISPONIBLES.....                                                                                         | 53        |
| 3.2.1. LES VIDES MINIERES ET LEUR ÉVOLUTION DANS LE TEMPS .....                                                                                            | 53        |
| 3.2.2. LES VOLUMES D'EAU PÉNÉTRANT DANS LA MINE.....                                                                                                       | 55        |
| 3.2.3. LES DURÉES D'ENNOYAGE DES VIDES MINIERES.....                                                                                                       | 57        |
| 3.2.4. CONCLUSIONS PAR RAPPORT AU TEMPS DE REMPLISSAGE RETENU DANS L'ÉTUDE INERIS DE 2011 ET REPRIS DANS LE DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION DE 2015..... | 64        |
| <b>4. CONCLUSION.....</b>                                                                                                                                  | <b>69</b> |

## Liste des illustrations

|                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Illustration 1 : Carte de situation des concessions minières MDPA.....                                                                                                                                                          | 5  |
| Illustration 2 : Morphologie du gisement de potasse exploité et position des puits de mine (issu du dossier d'arrêt des travaux miniers de 2018).....                                                                           | 6  |
| Illustration 3 : Situation géographique des forages VAPB2 et VLPB2.....                                                                                                                                                         | 8  |
| Illustration 4 : Forage VAPB2 : Coordonnées et équipement.....                                                                                                                                                                  | 9  |
| Illustration 5 : Suivi du niveau de remplissage dans VAPB2.....                                                                                                                                                                 | 10 |
| Illustration 6 : Evolution de P et T après injection de 20 m3 de saumure à température ambiante dans VAPB2.....                                                                                                                 | 11 |
| Illustration 7 : Résultats d'analyse du fluide présent dans VAPB2 en novembre 2018.....                                                                                                                                         | 12 |
| Illustration 8 : Imagerie de paroi entre 919 et 921 m de profondeur dans VAPB2.....                                                                                                                                             | 14 |
| Illustration 9 : Suivi du niveau de remplissage dans VLPB2.....                                                                                                                                                                 | 16 |
| Illustration 10 : Suivi du niveau de remplissage dans VLPB2.....                                                                                                                                                                | 16 |
| Illustration 11 : Forage VLPB2 : Log et équipement.....                                                                                                                                                                         | 17 |
| Illustration 12 : Essai d'injection VLPB2 : évolution de la pression dans le forage.....                                                                                                                                        | 18 |
| Illustration 13 : Pression (kPa) mesurées dans l'atmosphère (échelle de droite) et dans la tête de puits de VAPB2 (échelle de gauche) entre le 10 et le 20 décembre 2018.....                                                   | 20 |
| Illustration 14 : Pression (kPa) mesurée dans l'atmosphère (en rouge) et dans la tête de puits de VAPB2 (en bleu) entre le 22 décembre 2014 et le 6 Janvier 2015.....                                                           | 21 |
| Illustration 15 : Pression (kPa) et température (°C) dans l'atmosphère et dans la tête de puits VLPB2 fermée hermétiquement (mai-juin 2019).....                                                                                | 21 |
| Illustration 16 : Carte des points de mesures topographiques du Cabinet de géomètres experts Jung entre 2014 et 2019.....                                                                                                       | 27 |
| Illustration 17 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Raedersheim.....                                                                                                                                   | 28 |
| Illustration 18 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Bollwiller.....                                                                                                                                    | 29 |
| Illustration 19 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Feldkirch.....                                                                                                                                     | 30 |
| Illustration 20 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Staffelfelden.....                                                                                                                                 | 31 |
| Illustration 21 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Wittelsheim.....                                                                                                                                   | 32 |
| Illustration 22 : Points de nivellement 2014_2019 (Géomètre Jung) commune de Reiningue.....                                                                                                                                     | 33 |
| Illustration 23 : Nivellements réalisés entre 2014 et 2019 par le cabinet Jung.....                                                                                                                                             | 34 |
| Illustration 24 : Evolution temporelle schématique d'un affaissement minier (issu de G. Modeste-IPGS 2019).....                                                                                                                 | 35 |
| Illustration 25 : Combinaison des séries temporelles des données de nivellement (points verts) et des mesures satellitaires (points rouges) projetées verticalement (G. Modeste - 2019).....                                    | 36 |
| Illustration 26 : Extrapolation des déplacements verticaux en surface pour les points de calage LOS, à l'aide des fonctions somme de deux exponentielles (d'après le travail de M. Modeste EOST 2019).....                      | 39 |
| Illustration 27 : Vitesses de convergence mesurées durant la période 2004-2010 (Satellite ENVISAT) comparée à l'âge de l'exploitations.....                                                                                     | 40 |
| Illustration 28 : Vitesse LOS entre 2004 et 2010 comparées aux cotes NGF de l'exploitation minière.....                                                                                                                         | 41 |
| Illustration 29 : Ages des exploitations de potasse en couches supérieure (en haut) et inférieure (en bas) dans les secteurs Bollwiller et Pulversheim.....                                                                     | 42 |
| Illustration 30 : Evolution simulée des vides miniers dans les panneaux exploités entre 1993 et 1994 à Bollwiller et Pulversheim.....                                                                                           | 43 |
| Illustration 31 : Schéma de principe de l'ennoyage des travaux miniers.....                                                                                                                                                     | 48 |
| Illustration 32 : Zones potentiellement noyées au niveau des forages VAPB2 et VLPB2.....                                                                                                                                        | 59 |
| Illustration 33 : Schéma : Volume ennoyé à VLPB2 en 2019-2020.....                                                                                                                                                              | 61 |
| Illustration 34 : Points bas de la mine et surfaces potentiellement concernées par le remplissage en 2020 (pour une porosité résiduelle de 10%).....                                                                            | 65 |
| Illustration 35 : Déplacement verticaux de surface à proximité du puits Staffelfelden et corrélation avec le jeu de galeries proches du puits. Les points de déplacement élevé se corrélient avec la position des galeries..... | 67 |

## Liste des tableaux

|                                                                                                                                                                                                   |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau 1 : Amplitude de l'affaissement aux cinq points de nivellement retenus dans le calage des mesures satellitaires .....                                                                     | 38 |
| Tableau 2 : Volume de vides dans le sous sol suite à exploitation et fermeture des vides profonds (Mm3).....                                                                                      | 51 |
| Tableau 3 : Synthèse des volumes de vides résiduels estimés en 2010.....                                                                                                                          | 51 |
| Tableau 4 : Temps d'ennoyage calculé à partir de 2010 pour la totalité de la mine de potasse ouest (années).....                                                                                  | 53 |
| Tableau 5 : Temps d'ennoyage calculé à partir de 2010 pour atteindre Stocamine (années).....                                                                                                      | 53 |
| Tableau 6 : Comparaison des convergences calculées dans les travaux miniers et des mouvements de terrain mesurés en surface (topographie de terrain et mesures satellites).....                   | 55 |
| Tableau 7: Gamme de débits d'ennoyage des puits du secteur Ouest (selon INERIS, étude hydrogéologique de l'ennoyage 2011).....                                                                    | 57 |
| Tableau 8 : Estimation des temps de remplissage en VAPB2 et VLPB2 pour une porosité de 10%.....                                                                                                   | 60 |
| Tableau 9 : Estimation des vides résiduels en VAPB2 et VLPB2 au regard des dates d'arrêt de l'exhaure.....                                                                                        | 62 |
| Tableau 10 : Points bas de la mine, puits susceptibles de les alimenter et surfaces potentiellement concernées par le remplissage (les couleurs se rapportent à celles de l'illustration 34)..... | 66 |
| Tableau 11 : Hypothèse la plus probable en 2020 concernant le remplissage de la mine au regard du dossier de 2015 complété par les nouvelles mesures .....                                        | 68 |

## Liste des annexes

Annexe 1 : Analyses des fluides présents dans les forages

Annexe 2 : Rapport Solexpert (05/19) MDPA : mesures du débit de gaz en tête des forages VAPB2 et VLPB2. Prélèvement et analyse de gaz en VAPB2 et VLPB2

Annexe 3 : Rapport : « Suivi des Niveaux de surface » G. Modeste - IPGS Strasbourg - 2019

Annexe 4 : Rapport MDPA Suivi des infiltrations d'eau à la base des puits Amélie 1 et 2

# 1. CONTEXTE

StocaMine est un ancien site de stockage de déchets créé en souterrain à partir de puits mine originellement dédiés à l'exploitation de la potasse (Illustration 1, illustration 2).

Le 23 mars 2017, par arrêté, le préfet du Haut Rhin a autorisé la prolongation pour une durée illimitée du stockage souterrain de déchets non dangereux, situé sous le territoire de la commune de Wittelsheim (Haut Rhin - 68). Il a assorti cette autorisation de plusieurs obligations faites aux Mines de Potasse d'Alsace (MDPA), dont :

- la prolongation de la surveillance du forage profond VAPB2 (article 10.2.1) ;
- une étude pour la réalisation d'un second forage profond (article 10.2.1) ; le forage VLPB2 a ensuite été réalisé fin 2018 et fait depuis, l'objet d'une surveillance par les MDPA ;
- la réalisation d'un suivi régulier du niveau du sol en surface (article 10.2.2).

Les MDPA ont de plus financé une thèse de l'EOST (Ecole et Observatoire des Sciences de la Terre de l'Université de Strasbourg et du CNRS) traitant du suivi des niveaux de surface, à partir de données satellitaires.

L'acquisition de ces différentes données a pour objectif de répondre à la prescription fixée dans l'article 10.2.2 de l'arrêté préfectoral de 2017, à savoir la rédaction d'un « rapport d'analyse des données de suivi des niveaux en surface en les corrélant avec les volumes de vides miniers résiduels et les niveaux d'ennoyage ».

**Le présent document constitue le rapport de synthèse, croisant les informations apportées par les nouveaux documents disponibles et les hypothèses présentées dans le dossier de demande d'autorisation de 2015 traitant de l'ennoyage et de l'évolution des vides miniers résiduels.**

L'étude a été réalisée par A. Blachère (Docteur en hydrogéologie et directrice du pôle hydrogéologie du bureau d'études CESAME) et D. Lefort (géologue, chargée d'études en hydrogéologie-hydrologie), qui ont suivi à CESAME l'historique des dossiers des MDPA depuis plusieurs années.

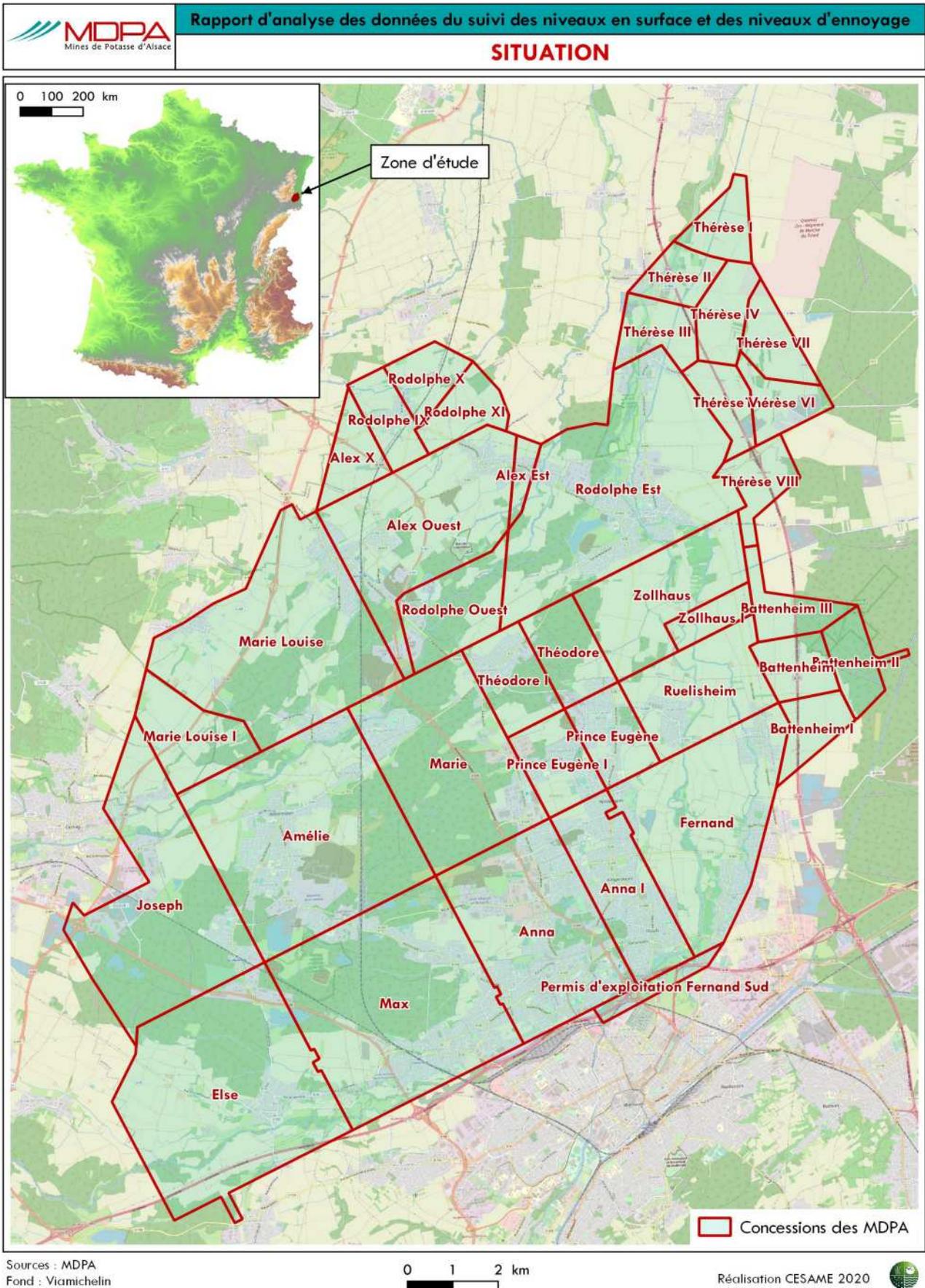
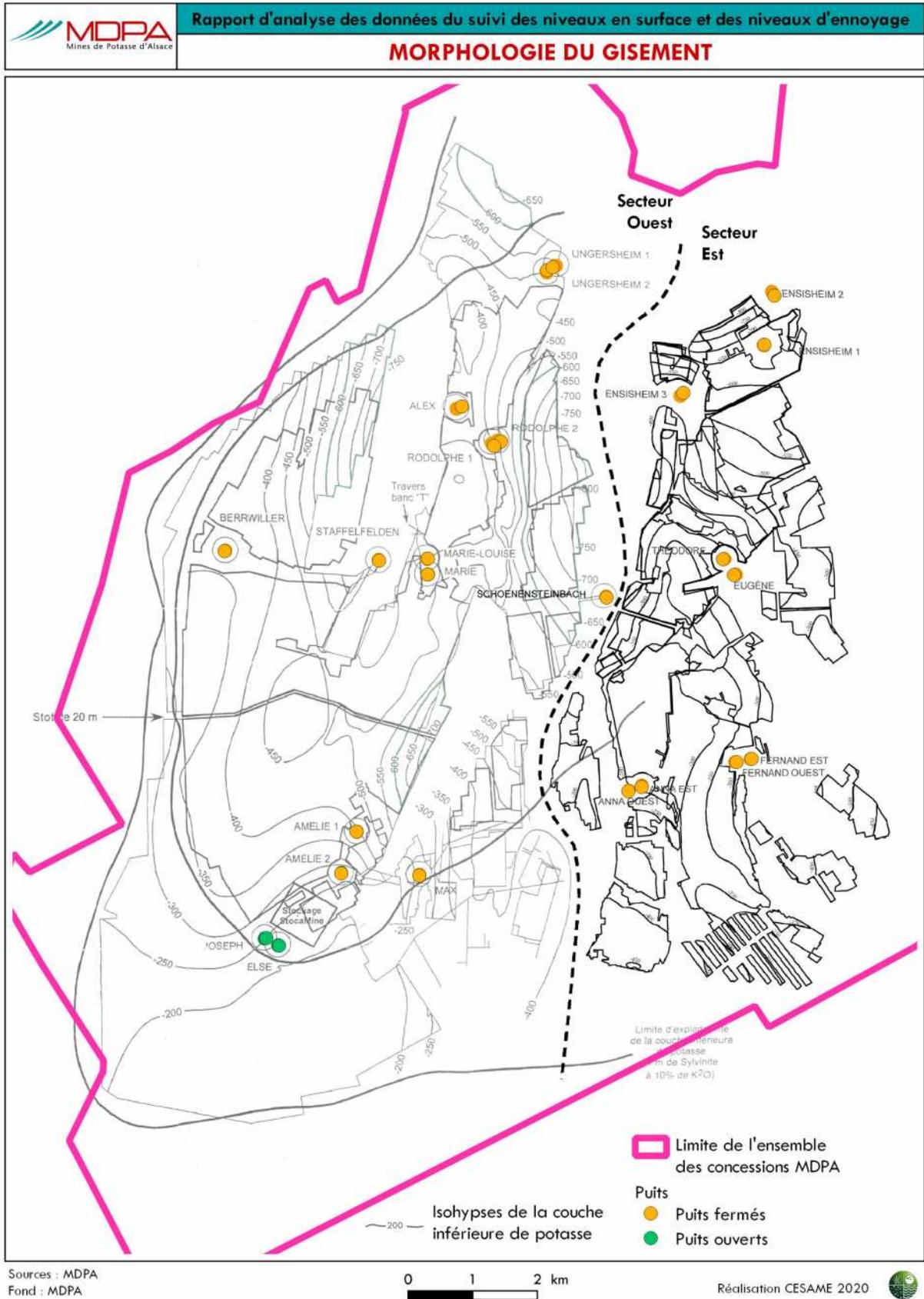


Illustration 1 : Carte de situation des concessions minières MDPA



## 2. ANALYSE DES NOUVELLES DONNÉES

Une réunion a été organisée le 16 janvier 2020 avec les MDPA pour présenter au bureau d'études CESAME les données acquises par les MDPA depuis le dépôt du dossier d'autorisation en 2015.

### 2.1. DOCUMENTS CONCERNANT LES FORAGES VAPB2 ET VLPB2

Les forages VAPB2 et VLPB2 sont des forages de surveillance destinés à suivre l'évolution de l'ennoyage des travaux miniers souterrains, la qualité des fluides présents dans la mine et la présence éventuelle de gaz.

Ils ont été forés dans deux points bas des travaux miniers souterrains respectivement au Sud du secteur Ouest dans la mine Amélie, et au Nord du secteur Ouest dans la mine Marie-Louise.

Données fournies par MDPA :

- Note de synthèse de 2016 sur les observations réalisées sur le puits VAPB2 ; le rapport de fin de forage de VLPB2 ;
- Log de forage de VAPB2 et VLPB2 ;
- Composition de la saumure dans le forage VAPB2 le 14/09/2016 et dans le forage VLPB2 le 20/12/2018 ;
- Test hydrogéologique sur le forage VAPB2 de décembre 2015 et sur le forage VLPB2 de décembre 2018 ;
- Mesures ponctuelles du débit de gaz sur les 2 forages en mai 2019 ;
- Suivis : évolution de la pression de VAPB2 du 10 au 20 décembre 2018, suivi du niveau hydrostatique de VAPB2 d'octobre 2015 à décembre 2019, suivi du niveau hydrostatique de VLPB2 de novembre 2018 à décembre 2019.



Illustration 3 : Situation géographique des forages VAPB2 et VLPB2

### 2.1.1. LE FORAGE VAPB2

#### Foration et équipement

Le forage VAPB2 est implanté à Wittelsheim à une altitude de 250 m NGF. Sa profondeur totale est de 931,5 m.

Il a pour vocation de suivre l'évolution du remplissage dans les travaux miniers souterrains de la mine « Amélie ».

Sa foration a débuté en septembre 2013 et son équipement **s'est terminé en octobre 2015** après 10 mois d'interruption entre novembre 2013 et septembre 2015 suite à des incidents de forage qui se sont produits à environ 800 m de profondeur, près de 100 m au dessus de la couche supérieure de potasse.

À partir de 803m de profondeur, une cimentation complète du fond de l'ouvrage a été pratiquée suite au coincement du train de tige. La fin de l'ouvrage a été reprise à partir de cette cote en déviation..

Les terrains rencontrés ont été successivement :

- l'Holocène : jusqu'à 40 m de profondeur : formations alluviales
- le Wurm : jusqu'à 82 m de profondeur : formations glaciaires (argiles, sables, grès)
- le Stampien : jusqu'à 393 m de profondeur : formations sédimentaires fines (argiles schisteuses, marnes schisteuses)
- le Priabonien : jusqu'à 931 m de profondeur : formations sédimentaires

fines salifères (alternances d'argiles, halites, anhydrites, marnes...).

C'est au sein de ces dernières formations qu'ont été exploitées les deux couches de potasse. Le forage a rencontré les traces des terrains foudroyés par l'exploitation minière respectivement :

- entre 897,0 et 900,5 m de profondeur pour la couche supérieure soit une épaisseur déconsolidée de 3,5 m (épaisseur exploitée 1,85 m en 1967) ;
- entre 912,8 et 920,4 m de profondeur pour la couche inférieure soit une épaisseur déconsolidée de 7,6 m ( épaisseur exploitée 3,4 m en 1980).

Pour les 2 couches, la hauteur de terrains déconsolidés correspond donc à peu près au double de la hauteur exploitée.

Les coordonnées et l'équipement du forage VAPB2 sont présentés ci-après :

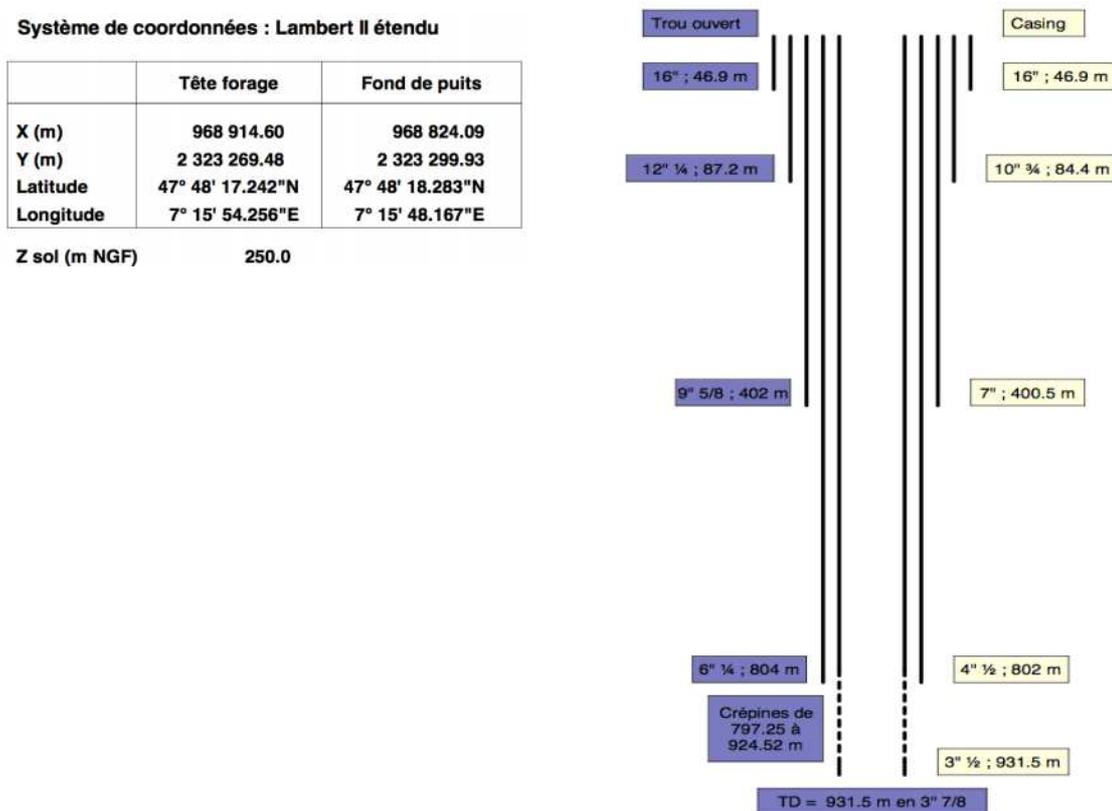


Illustration 4 : Forage VAPB2 : Coordonnées et équipement

### ❑ *Etat de remplissage de la mine au niveau du forage VAPB2*

Le forage a été réalisé en rotation avec injection de boues denses destinées à maintenir les parois en place durant la foration. Les boues étaient constituées de viscosifiants et de particules minérales fines mises en suspension dans une saumure saturée au chlorure de sodium et de potassium (saumure fabriquée en s'appuyant sur les données de qualité de la saumure minière).

Comme indiqué précédemment, le forage est entièrement revêtu d'un tubage

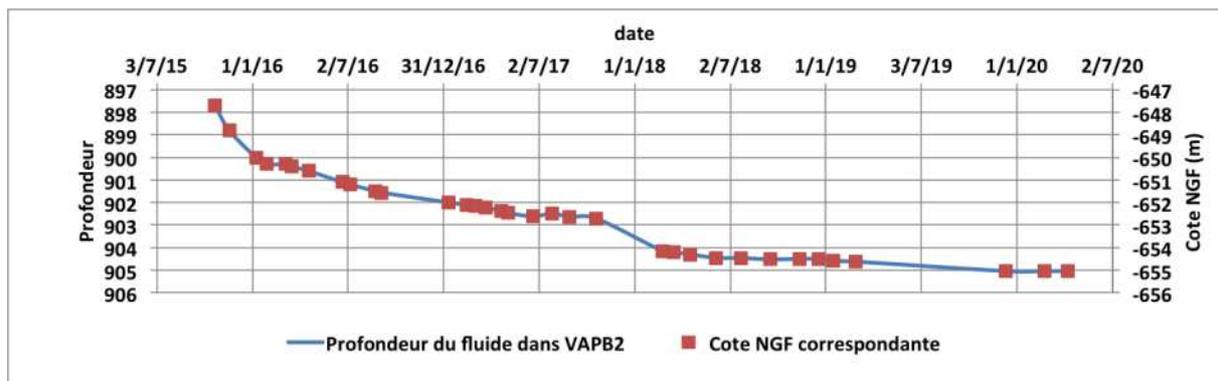
cimenté jusqu'à 800 m de profondeur.

Les terrains recoupés en dessous de cette cote ne sont pas aquifères. Le liquide présent dans le forage en fin d'équipement peut donc être soit de la boue injectée en cours de foration, soit une saumure déjà présente dans les vides résiduels des travaux miniers (point bas de la mine visé pour la réalisation de ce piézomètre).

**L'étude du compte-rendu de chantier montre que la quantité de boues perdue durant la foration a été de 900 m<sup>3</sup>. Les pertes se sont produites exclusivement au niveau des couches exploitées.**

À la fin de la foration, le forage présentait un niveau de liquide jusqu'à la profondeur 897,7 m, soit une hauteur en eau de 33,8 m dans le tubage crépiné (pour une foration en 6", le volume du forage en eau était donc de 0,62 m<sup>3</sup> dans le tube). Ce volume bien inférieur au volume de boues perdu (900 m<sup>3</sup>) témoigne de l'existence d'une porosité résiduelle dans l'environnement de l'ouvrage.

Depuis la fin de l'équipement du forage, le niveau de liquide est régulièrement mesuré dans l'ouvrage à l'aide d'une sonde attachée au bout d'un câble monté sur un treuil électrique (illustration 5). Entre deux mesures, la sonde est remontée au jour compte tenu du caractère corrosif de la saumure présente dans l'ouvrage.



La première mesure a eu lieu le 22/10/15 et la plus récente le 09/04/20. Entre ces deux dates, le niveau d'eau dans le forage n'a cessé de baisser (baisse de 7,6 m) mais semble quasiment stabilisé en 2019 à 905 m de profondeur environ (-655 NGF).

### ☐ *Autres paramètres mesurés au niveau du forage VAPB2*

#### ➤ Essai d'injection

Le 18 Novembre 2015 (pendant la phase d'équipement du forage), un test hydrogéologique a été entrepris : 20 m<sup>3</sup> de saumure saturée ont été injectés dans le forage en 1h40 mn.

L'injection a provoqué une montée du niveau d'eau de 40 m dans le forage et une baisse de température de 21 °C (passage de >48 °C à ≈ 27 °C).

En moins d'une heure après fin de l'injection, les deux phénomènes étaient presque totalement résorbés (niveau d'eau revenu à  $\approx 4$  cm de sa cote initiale et température à  $\approx 3^\circ\text{C}$  de sa valeur initiale).

À partir de cet essai, la société Solexperts a calculé, pour la couche inférieure de potasse une perméabilité résiduelle de  $0,7$  à  $1,5 \cdot 10^{-6}$  m/s.

Il est difficile de tirer une information exploitable à partir de cet essai, quant à l'évolution ultérieure du remplissage des travaux miniers.

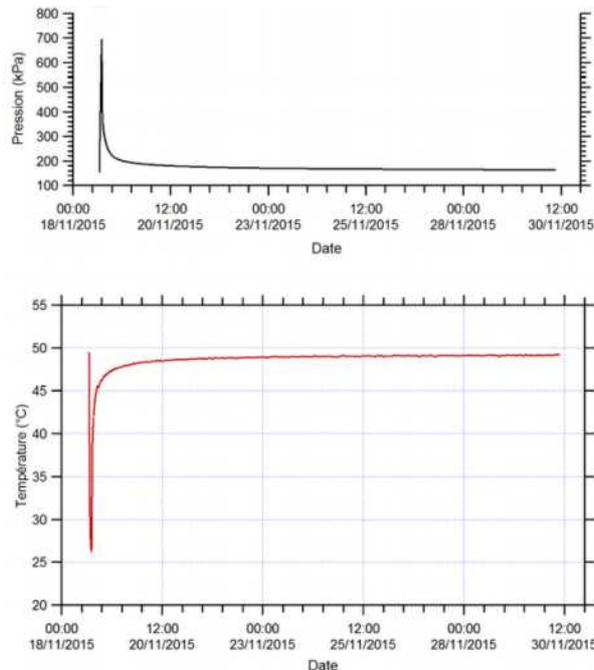


Illustration 6 : Evolution de P et T après injection de  $20 \text{ m}^3$  de saumure à température ambiante dans VAPB2

On peut toutefois retenir que cet essai démontre la persistance d'une certaine perméabilité dans la couche exploitée, donc par déduction d'une certaine porosité également démontrée par la résorption de la « bulle » froide dans la saumure chaude présente en fond de forage.

**L'essai d'injection dans le forage VAPB2 de même que l'évolution du niveau d'eau dans ce forage depuis sa création (le niveau d'eau a évolué de façon cohérente à la baisse depuis la création du forage) démontrent qu'il persiste au niveau des travaux miniers des capacités de circulation de l'eau témoins d'une porosité résiduelle des terrains exploités. La mesure de perméabilité réalisée indique toutefois que la perméabilité résiduelle dans ces anciennes couches exploitées est faible (pour fixer un ordre de grandeur, la valeur mesurée serait équivalente à celle d'une argile).**

➤ Analyse du fluide présent dans le forage

Un prélèvement de saumure a été réalisé dans le forage VAPB2 avant l'essai d'injection décrit précédemment.

La question était de savoir si le fluide présent dans l'ouvrage pouvait être le fluide injecté pendant le chantier de foration ou s'il s'agissait d'une saumure provenant de la mine.

L'analyse réalisée par SOLEXPERT le 18 Novembre 2015 sur un fluide prélevé à 920 m de profondeur (présentée sur la figure suivante) a été comparée par MDPA avec l'analyse de la boue de forage injectée et celle d'une saumure produite en laboratoire à partir de la dissolution, à température ambiante, d'une carotte de potasse prélevée dans le foudroyage de la couche inférieure.

#### Fraction liquide :

Tableau 1 - Saumure - Fraction liquide - Analyses chimiques par ICP OES

| B    | Cl  | F      | Hg   | Si   | Al     | Fe     | Mn     | Mg    | Ca   | Na    | K     | Ti     | P      |
|------|-----|--------|------|------|--------|--------|--------|-------|------|-------|-------|--------|--------|
| mg/L | g/L | µg/L   | µg/L | mg/L | mg/L   | mg/L   | mg/L   | mg/L  | mg/L | mg/L  | mg/L  | mg/L   | mg/L   |
| 9.65 | 206 | 119.64 | 0.6  | 0.04 | < L.D. | < L.D. | < L.D. | 878,6 | 5713 | 81120 | 62120 | < L.D. | < L.D. |

Tableau 2 - Saumure - Fraction liquide - Analyses chimiques par absorption atomique et gravimétrie

| Na g/L | K g/L | Ca g/L | Mg g/L | SO <sub>4</sub> g/L |
|--------|-------|--------|--------|---------------------|
| 86,2   | 66,2  | 6,8    | 0,96   | 1,21                |

#### Fraction solide :

Tableau 3 - Saumure - Fraction solide - Analyses chimiques par ICP OES

| B   | Cl    | F   | Hg  | Si   | Al     | Fe     | Mn     | Mg     | Ca   | Na   | K    | Ti     | P      |
|-----|-------|-----|-----|------|--------|--------|--------|--------|------|------|------|--------|--------|
| ppm | %     | ppm | ppm | mg/g | mg/g   | mg/g   | mg/g   | mg/g   | mg/g | mg/g | mg/g | mg/g   | mg/g   |
| 2   | 46,64 | 20  | 1.2 | 0.04 | < L.D. | < L.D. | < L.D. | < L.D. | 0.26 | 4.71 | 542  | < L.D. | < L.D. |

Tableau 4 - Saumure - Fraction solide - Analyses chimiques par absorption atomique et gravimétrie

| Na % | K %   |
|------|-------|
| 0,53 | 47,36 |

Illustration 7 : Résultats d'analyse du fluide présent dans VAPB2 en novembre 2018

La comparaison a porté sur les ions majeurs :

|                                            | Na  | K   | Ca  | Cl  | Mg   | SO <sub>4</sub> |
|--------------------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|-----------------|
|                                            | g/l | g/l | g/l | g/l | g/l  | g/l             |
| Boue de forage VAPB2                       | 130 | 6   | -   | 206 | -    | -               |
| Saumure de laboratoire                     | 110 | 5   | 3   | 184 | 0,6. | 0,7             |
| Fluide présent dans VAPB2 (novembre 2015)  | 85  | 65  | 6   | 206 | 0,9  | 1,2             |
| Fluide présent dans VAPB2 (septembre 2016) | 15  | 10  | 5,2 | 200 | 3,8  | 0,3             |

La principale différence mise en évidence en novembre 2015 a porté sur la teneur en potassium du fluide présent dans VAPB2 qui correspond à une saumure saturée produite à température élevée (la solubilité du potassium augmente avec la température alors que celle du sodium évolue très peu ; donc quand la température augmente, la saumure s'enrichit en potassium).

Le liquide présent dans VAPB2 en novembre 2015 semblait donc bien être une

saumure minière saturée. L'hypothèse d'un enrichissement de la boue de forage in-situ par le potassium étant écartée du fait du résultat de l'essai d'injection qui a démontré une diffusion rapide du liquide injecté.

En septembre 2016 un nouveau prélèvement pour analyse a été pratiqué par MDPA. En dehors de la teneur en Cl, proche de l'analyse précédente, le liquide semble étonnement pauvre en Na et K (les concentrations indiquées ne sont pas compatibles avec la teneur en chlorure (équilibre ionique non atteint-une erreur de report de résultat semble envisageable).

Pour le reste, bon nombre de paramètres indiquent qu'il s'agit bien d'un fluide présent dans le milieu et en particulier des éléments quasi absents dans les eaux superficielles :

- Concentration en Bore : 15,4 mg/l
- Concentration en Lithium : 310 mg/l
- Concentration en Rubidium : 79 mg/l.

**À la base du forage VAPB2, un fluide de température élevée ( $\approx 50^{\circ}\text{C}$ ) est présent. Il semble correspondre à une saumure qui s'est chargée au contact des terrains en différents minéraux présents dans le milieu.**

#### ➤ Imagerie de paroi

De nombreux paramètres ont été mesurés durant la réalisation du forage (vitesse d'avancement, pression sur l'outil, etc...). En fin de foration, et avant équipement du dernier tronçon de forage, une imagerie de paroi optique et acoustique a été réalisée en particulier au niveau du secteur identifié comme correspondant aux anciens travaux miniers.

Les résultats obtenus mettent bien en évidence la présence de vides sur les parois du forage. MDPA a fait pratiquer par un dessinateur industriel un détournage des zones de vide sur l'imagerie et un calcul du ratio relativement à la surface de l'image.

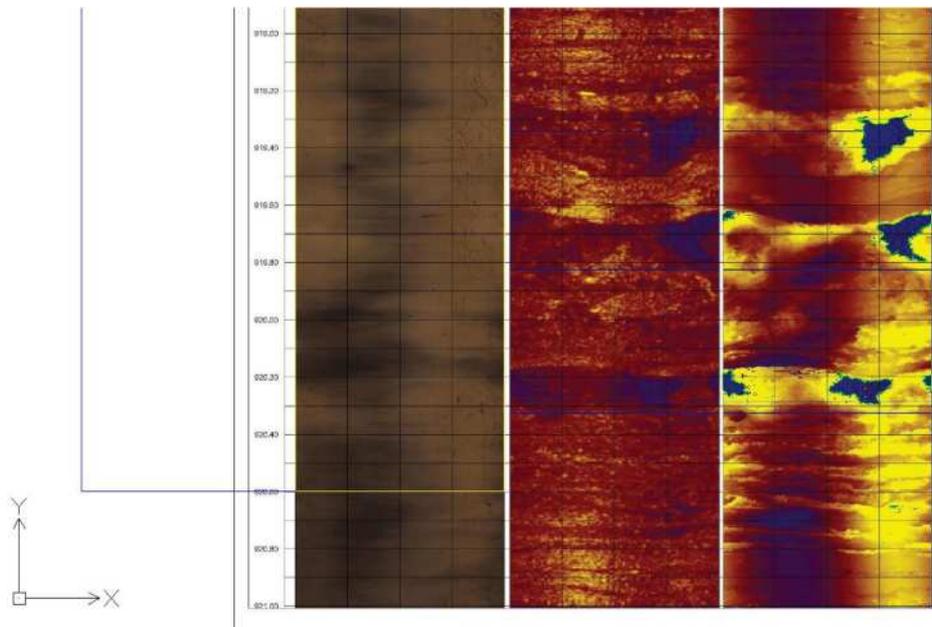


Illustration 8 : Imagerie de paroi entre 919 et 921 m de profondeur dans VAPB2

Le résultat obtenu indique la présence de :

- **10% de vides résiduels en couche inférieure** (dans CI subsiste 1,7% de vides entre -900,5 et -920,6 m de profondeur (zone déconsolidée liée au foudroyage des travaux miniers de cette zone), soit, ramené à la hauteur : 34 cm sur 3,4 m de hauteur de vide initiale, soit 10% résiduels),
- **8,7 % de vides résiduels en couche supérieure** (dans CS subsiste 4,6% de vides entre -897 et -900,5 m. de profondeur soit, ramené à la hauteur : 161 cm représentant 8,7% de la hauteur de vides initiale : 1,85 m)

**Les vides résiduels au niveau du forage VAPB2 s'établissent entre 8,7 et 10 % des vides créés par l'exploitation minière et ce à des profondeurs de l'ordre de 900 m et pour des âges d'exploitation de l'ordre de 40 ans (exploitation datant des années 1980).**

## 2.1.2. LE FORAGE VLPB2

### ❑ *Foration et équipement*

Le forage VLPB2 (longitude : 007° 17' 47,64"E – latitude : 047° 50' 15,89"N) est implanté à Pulversheim à une altitude de 231 m NGF. La profondeur totale de VLPB2 est de 1009 m (soit – 778 m NGF).

Il a pour vocation de suivre l'évolution du remplissage dans les travaux miniers souterrains de la mine « Marie-Louise ».

Sa foration a débuté en novembre 2018 et son équipement s'est terminé en décembre 2018.

Le forage est entièrement cimenté jusqu'à 921 m de profondeur.

À partir de 980 m de profondeur, des pertes partielles de boues de forage suggèrent la présence de vides.

Les terrains rencontrés ont été successivement :

- l'Holocène jusqu'à 37 m de profondeur : formations alluviales
- le Chattien jusqu'à 89 m de profondeur : formations glaciaires (marnes et argiles calcaires, grès)
- le Stampien jusqu'à 469 m de profondeur : formations sédimentaires fines (argiles schisteuses, marnes schisteuses)
- le Sannoisien jusqu'à 1009 m de profondeur : formations sédimentaires fines salifères (alternances d'argiles calcaires, halites, anhydrites, marnes...).

C'est au sein de ces dernières formations qu'ont été exploitées les deux couches de potasse. Le forage a eu des pertes d'injection à partir de 980 m de profondeur (-749 NGF) au niveau de la couche inférieure de potasse.

Le mur (base) des couches exploitées était attendus :

- entre les profondeurs 989,5 et 995 m pour la **Couche inférieure** (-743 et -755 NGF). La couche a été recoupée entre les profondeurs 982,4 m et 995 m (-751 et -764 NGF). L'épaisseur exploitée a été de 4 m en 1992 et a produit une zone déconsolidée de 12,6 m.
- entre les profondeurs 968,5 et 970 m pour la **Couche supérieure** (soit -733,5 et -737,5 NGF). La couche n'a pas été reconnue en forage (pas de pertes de boues) mais (au vu des cotes de la couche inférieure) la base de cette couche devrait se situer à environ 968,5 m de profondeur (-733,5 NGF) L'épaisseur exploitée était de 1,75 m en 1983.

Le log et l'équipement du forage VAPB2 sont présentés sur l'illustration 11.

## □ Etat de remplissage de la mine au niveau du forage VLPB2

Comme indiqué précédemment, le forage est entièrement cimenté jusqu'à 921 m de profondeur.

Les terrains recoupés en dessous de cette cote ne sont pas aquifères.

Le forage a été réalisé en rotation avec injection de boues denses destinées à maintenir les parois en place durant la foration.

Les boues sont constituées de viscosifiants et de particules minérales fines mises en suspension dans un liquide.

À partir de 918 m de profondeur le liquide d'injection a été une saumure saturée de chlorure de sodium et de potassium (saumure fabriquée à partir de 150 kg/m<sup>3</sup> de KCL et 190 kg/m<sup>3</sup> de NaCL ).

À partir de 982 m de profondeur des pertes de boues ont été constatées (6 à 33 m<sup>3</sup>/h). **La quantité de boues injectées durant cette phase peut être estimée à 500 m<sup>3</sup>.** À la fin de la foration, le forage présentait un niveau de liquide jusqu'à la profondeur 961,8 m (cote -730,8 NGF), soit une hauteur en eau de 47,2 m (pour une foration en 6", le volume d'eau (ou de saumure) dans le tubage était donc de 0,86 m<sup>3</sup> dans le tube), donc bien inférieur aux 500 m<sup>3</sup> de boues perdus durant la foration (ce qui signifie qu'il existe des vides résiduels au moins partiellement perméables dans les anciennes couches exploitées).

Depuis la fin de l'équipement du forage, le niveau de liquide est régulièrement mesuré dans l'ouvrage (illustration 10) à l'aide d'une sonde attachée au bout d'un câble monté sur un treuil électrique. Entre deux mesures, la sonde est remontée au jour compte tenu du caractère corrosif de la saumure présente dans l'ouvrage.

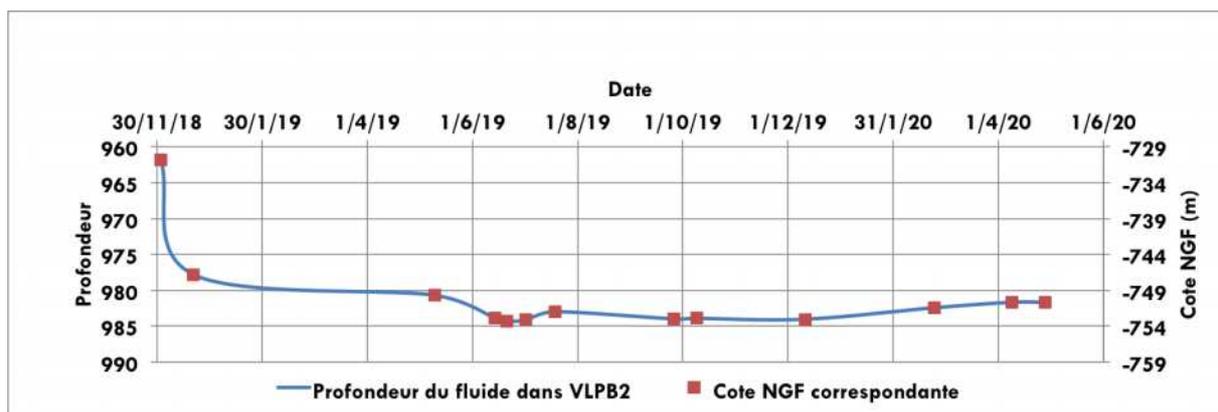


Illustration 10 : Suivi du niveau de remplissage dans VLPB2

La première mesure a eu lieu le 02/12/18 et la plus récente le 28/04/20. Entre ces deux dates, le niveau d'eau dans le forage a commencé par baisser

significativement (baisse de 16 m dans le courant du mois de décembre 2018<sup>1</sup>) puis s'est quasiment stabilisé en 2019 à 985 m de profondeur environ (- 754NGF) soit une centaine de mètres plus bas que le forage VAPB2. Depuis le début de l'année 2020 une petite hausse (2,65 m) semble s'initier.

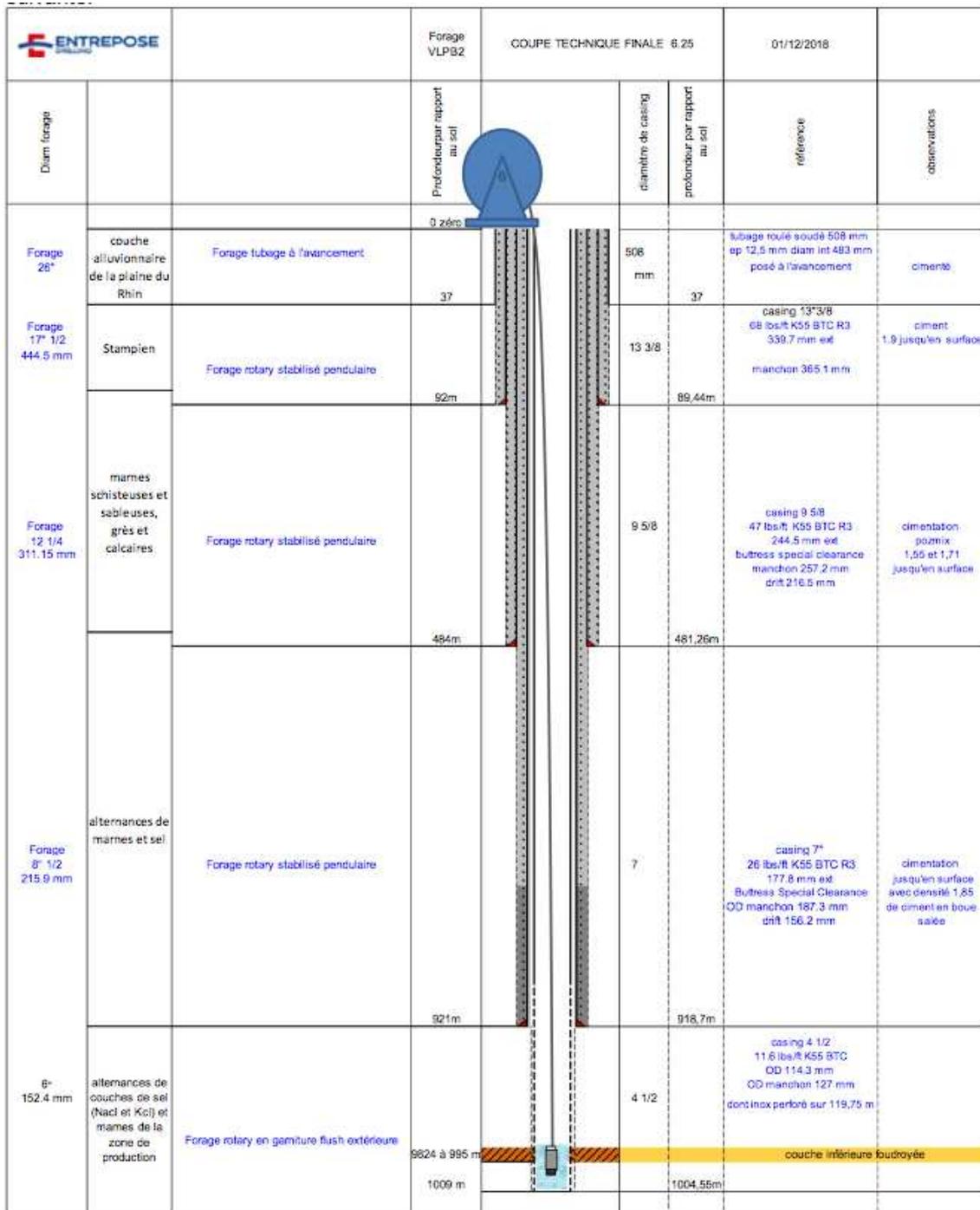


Illustration 11 : Forage VLPB2 : Log et équipement

1 Baisse potentiellement attribuable à la résorption de l'effet induit par l'essai d'injection du 1/12/18 (voir plus loin).

## Autres paramètres mesurés au niveau du forage VLPB2

### ➤ Essai d'injection

Le test hydrogéologique s'est déroulé entre le 30 novembre et le 1er décembre 2018, il s'agit d'un test en injection de saumure de densité 1,22 à partir des bacs de stockage des foreurs.

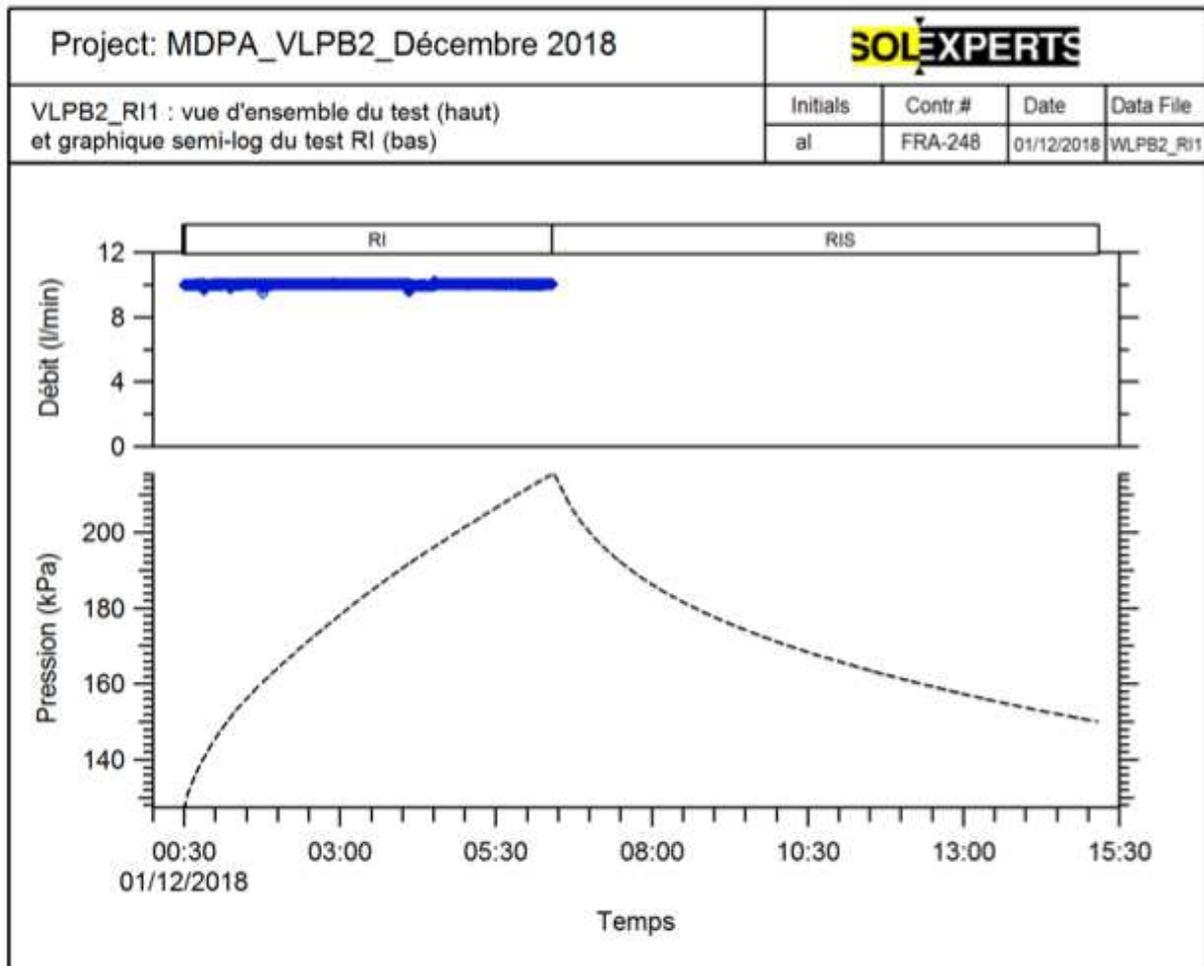


Illustration 12 : Essai d'injection VLPB2 : évolution de la pression dans le forage

La phase d'injection, à un débit de 10 l/min (0,6 m<sup>3</sup>/h) s'est déroulée pendant 6 heures (Volume injecté : 3564 l), elle a été suivie d'une phase de mesure de la récupération de pression d'environ 9 heures. L'élévation du niveau dans le forage a été de 25 m.

La transmissivité calculée s'est établie à 2,6 x 10<sup>-6</sup> m<sup>2</sup>/s, elle est du même ordre de grandeur que la transmissivité calculée sur le forage VAPB2 lors des tests de 2013.

➤ Analyse du fluide présent dans le forage

|                           | 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/m<sup>3</sup> de KCL et 190 kg/m<sup>3</sup> de NaCl

Le liquide présent dans VLPB2 (voir bulletin d'analyse en annexe 1) est peu différent de la boue de forage pour ce qui concerne les teneurs en Na, K et Cl ; toutefois la présence en grande quantité (plusieurs grammes par litre) de Ca et Mg non signalés dans la constitution de la boue, ainsi que ses teneurs élevées en lithium (429 mg/l), Bore (22 mg/l) Manganèse et Zinc (>45 mg/l) indiquent qu'il s'agit bien d'un liquide présent dans le milieu au moment de la foration.

➤ Imagerie de paroi

En fin de foration, et avant équipement du dernier tronçon de forage, une imagerie de paroi optique et acoustique a été réalisée en particulier au niveau des travaux miniers supposés.

Les résultats obtenus mettent bien en évidence la présence de vides sur les parois du forage. MDPA a fait pratiquer par un dessinateur industriel un détournage des zones de vide sur l'imagerie et un calcul du ratio relativement à la surface de l'image.

Le résultat obtenu indique la présence de :

- 13,8 % de vides résiduels en couche inférieure (dans Cl subsiste, entre 977 et 989,5 m de profondeur, l'équivalent de 55,4 cm ouverts rapportés à ouverture initiale de 4 m).
- la couche supérieure n'a pas été détectée en forage. Cela signifie qu'il n'y a pratiquement plus de vides résiduels dans cette couche.
- N.B. : Si l'on rapporte les 55,4 cm d'ouverture mesurés par imagerie à la hauteur exploitée des deux couches (5,5 m) le taux de vides résiduels s'établit à 10 %.

**Les vides résiduels au niveau du forage VLPB2 s'établissent à environ 13,8% des vides créés par l'exploitation minière en couche inférieure .et ce à des profondeurs comprises entre 900 et 1000 m et pour des âges d'exploitation de l'ordre de 30 ans (exploitation datant des années 1990).**

**➤ Rapportés à la hauteur des deux couches exploitées, les vides résiduels sont de l'ordre de 10 %.**

### 2.1.3. GAZ MINIER

#### ▣ Pression de gaz

Les têtes des deux forages sont équipées de vannes avec manomètre permettant la fermeture de l'ouvrage et la mesure de l'évolution de la pression.

Les essais réalisés sur les pressions de gaz à différentes périodes : suivis de pression (voir par exemple illustrations 13 et 14) et mesures de débit de gaz (voir rapports SOLEXPERTS en annexe 2) ont montré des résultats contrastés.

De façon générale, les mesures montrent une pression dans les forages quand les vannes sont fermées, assez proche de la pression atmosphérique, mais globalement plutôt supérieure, ce qui indique que la mine expulse lentement des fluides en lien avec la convergence des vides miniers et les éventuelles arrivées de liquides remplissant progressivement ces vides.

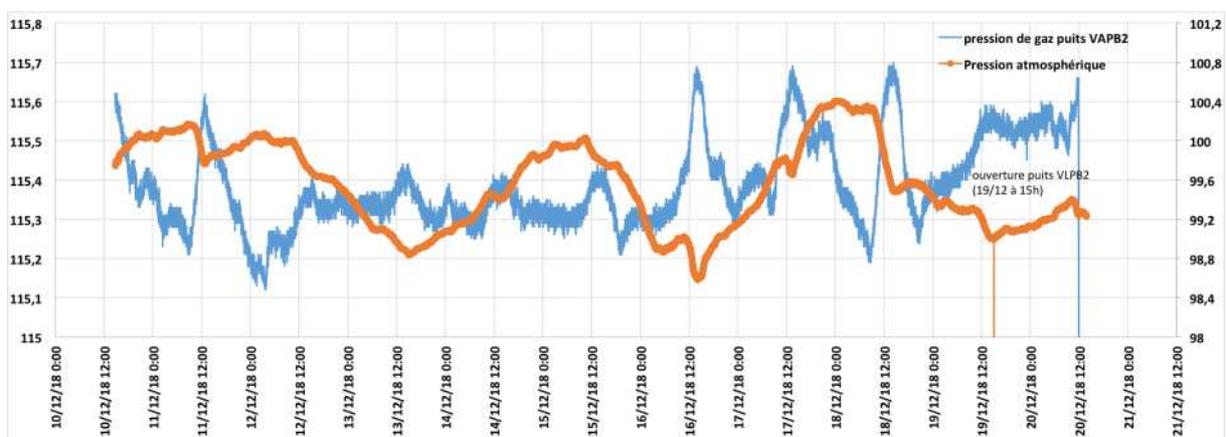


Illustration 13 : Pression (kPa) mesurées dans l'atmosphère (échelle de droite) et dans la tête de puits de VAPB2 (échelle de gauche) entre le 10 et le 20 décembre 2018

- Sur 10 jours de suivi en décembre 2018 (voir graphique ci-dessus), la **différence de pression entre VAPB2** (hermétiquement clos) et l'atmosphère s'est établie en moyenne à **15,7 kPa** (0,16 bars), ce qui est une valeur faible. Lors de cette expérimentation, la pression dans l'ouvrage était totalement indépendante des variations de pression atmosphérique.
- Lors d'une expérimentation similaire en décembre 2014, la différence de pression s'était établie à **<2 kPa** et la pression dans VAPB2 semblait dépendante de la pression atmosphérique (voir graphique suivant, illustration 14).

Ces résultats différents pourraient sembler contradictoires. Il faut toutefois noter qu'entre ces deux campagnes d'importants travaux d'isolement de la mine par rapport au secteur StocaMine ont été entrepris dans le but d'isoler StocaMine (en vue du confinement des déchets présents et afin d'améliorer l'efficacité de l'aéragé de StocaMine). On peut alors envisager qu'en 2014, la mine dans le secteur de VAPB2 était en relation franche avec l'atmosphère via StocaMine (ce qui expliquerait le comportement similaire des deux courbes et la faible

différence de pression entre le forage et l'atmosphère) ; alors qu'en 2018 les travaux d'isolation entrepris produisaient une isolation suffisante pour rendre la pression dans VAPB2 indépendante des variations de pression atmosphérique.<sup>2</sup>

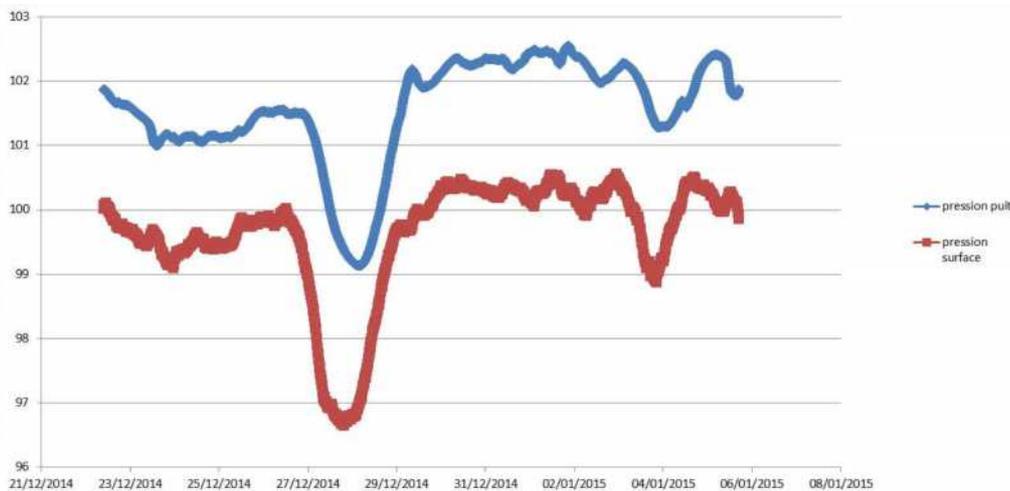


Illustration 14 : Pression (kPa) mesurée dans l'atmosphère (en rouge) et dans la tête de puits de VAPB2 (en bleu) entre le 22 décembre 2014 et le 6 Janvier 2015

- En mai et juin 2019, un essai de mise en pression a été réalisé sur **VLPB2** (voir illustration 15), la **différence de pression entre VLPB2** (hermétiquement clos) et l'atmosphère s'est très progressivement élevée (en 24 jours) pour atteindre et pratiquement se stabiliser à **67 kPa** (0,67 bars). Lors de cette expérimentation, la pression dans l'ouvrage était totalement indépendante des variations de pression atmosphérique.

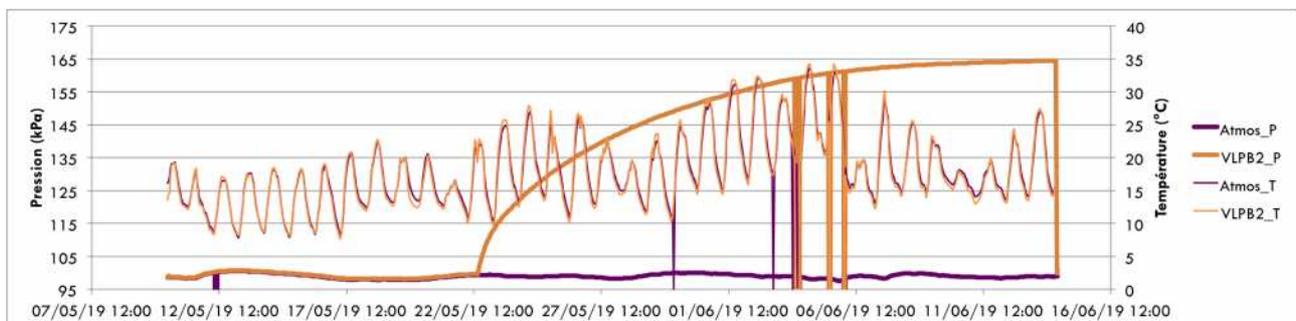


Illustration 15 : Pression (kPa) et température (°C) dans l'atmosphère et dans la tête de puits VLPB2 fermée hermétiquement (mai-juin 2019)

Plusieurs éléments peuvent être tirés de cette expérimentation :

- la pression en VLPB2 est beaucoup plus forte que celle mesurée en VAPB2 ;
- le forage VLPB2 est bien étanche ;
- le réservoir dans lequel est implanté ce forage doit être relativement vaste et étanche, puisque la montée en pression prend près d'un mois pour se faire.

<sup>2</sup> Des essais de variation des débits d'aéragage avec mesure simultanée de pression en VAPB2 n'ont pas pu démontrer d'impact de l'aéragage sur la pression en VAPB2.

## ☐ Débit de gaz

Les 29 et 30 avril 2019, Solexpert avait été mandaté pour mesurer les débit de gaz sortant des 2 forages VAPB2 et VLPB2 :

- le **débit de gaz** mesuré en **VAPB2** par SOLEXPERT s'élevait à environ **0,1 l/mn** (soit  $52 \text{ m}^3/\text{an}$ ), ce qui est très faible.
- Le débit de gaz mesuré en **VLPB2**, était beaucoup plus élevé (**>1,27 l/mn** soit  $670 \text{ m}^3/\text{an}$ ) en lien avec la différence de pression de 67 kPa par rapport à l'atmosphère<sup>3</sup> extérieure.

## ☐ Commentaires

Il n'est pas possible pour l'instant de tirer des informations quantitatives concernant ces phénomènes au regard des données disponibles, car il s'agit de phénomènes locaux d'ampleur différente ne traduisant pas toute l'évolution de la mine d'autant que les puits Joseph et Else sont encore ouverts avec un dispositif d'aéragé conséquent.

Ces mesures apportent toutefois un élément intéressant qui est que l'écart de pression de gaz par rapport à l'atmosphère dans les deux réservoirs est très différente (elle est 4 fois plus élevée en VLPB2 qu'en VAPB2), ce qui indique que les relations entre les deux réservoirs ne sont probablement pas franches, et ce qui pourrait militer en faveur d'une relative imperméabilité du stot séparant les mines Amélie et Marie-Louise<sup>4</sup>.

De même, les **analyses de gaz** présentées en annexe2 montrent essentiellement la présence de CH<sub>4</sub> dans VAPB2, alors que ce gaz est beaucoup moins présent dans VLPB2 qui révèle en revanche un taux d'hydrogène significatif (6,6,% vol) ; les deux réservoirs semblent donc bien distincts l'un de l'autre.

3 À l'ouverture des vannes, VAPB2 expulse en quelques minutes les gaz stockés dans le tube puis le phénomène s'arrête rapidement. En VLPB2, l'expulsion se poursuit pendant plusieurs heures avant de ne plus être perceptible.

4 Il aurait été intéressant de pouvoir disposer de la chronique de pression en VAPB2 au même moment en mai-juin 2019 pour voir si la fermeture et la mise en pression de VAPB2 avait eu un impact sur la pression en VLPB2. Ce type de suivi pourrait être fait à l'avenir pour l'existence ou l'absence de relations entre les deux réservoirs.

## 2.1.4. CONCLUSION

Les forages VAPB2 et VLPB2 ont atteint les travaux miniers souterrains dans les points bas des mines « Amélie » au Sud (secteur Wittelsheim) et « Marie-Louise » au Nord (secteur Pulversheim).

Depuis leur foration, ces ouvrages sont surveillés par MDPA car leur vocation est de suivre l'évolution du remplissage de la mine de potasse au fil du temps.

Les éléments recueillis nous ont permis de :

- décrire les deux forages ;
- vérifier leur représentativité du fait de leur implantation, de leur profondeur, des vides effectivement recoupés ;
- présenter l'évolution constatée au niveau du remplissage depuis la création des ouvrages et constater l'absence de montée du niveau d'eau (de saumure) depuis septembre 2015 pour VAPB2 et décembre 2018 pour VLPB2.

Les vides recoupés dans le fond des deux forages sont de l'ordre de 10 % des vides créés par l'exploitation minière et ceci malgré des profondeurs importantes ( $\geq 900$  m par rapport à la surface) et des âges d'exploitation assez importants (30 à 40 ans). Les terrains déstructurés par l'exploitation minière peuvent représenter une épaisseur 2 à 4 fois supérieure à celle des couches exploitées.

Dans les deux forages, un liquide est présent au niveau de la couche inférieure de potasse exploitée. Ce liquide imprègne les terrains déstructurés par l'exploitation minière qui présentent une perméabilité faible mais non nulle.

**La différence de niveau de liquide entre VAPB2 (- 655 NGF) et VLPB2 (- 754 NGF) signifie que, pour l'instant les réservoirs recoupés par les deux forages sont indépendants hydrauliquement l'un de l'autre** (il pourrait existe un seuil entre les deux réservoirs et tant que les niveaux d'envoyage n'auront pas atteint ce seuil, l'évolution dans les deux réservoirs sera indépendante).

La différence de pression de gaz pourrait cependant indiquer qu'ils sont totalement séparés l'un de l'autre, ce qui pourrait signifier que le stot séparant les mines Marie-Louise (au nord) et Amélie (au sud) serait étanche car il empêcherait les deux pressions atmosphériques de se mettre en équilibre<sup>5</sup>.

MDPA pourrait mener des investigations complémentaires pour tenter de valider cette hypothèse. L'idée serait d'enregistrer simultanément sur les deux forage des variations de pression, afin de mesurer sur VAPB2 l'effet d'une mise en pression longue durée (1 à plusieurs mois) sur VLPB2 par exemple ; et inversement. Si une variation de pression importante sur un réservoir se traduit sur l'autre alors la relation entre les deux sera établie.

5 Il est peu probable qu'une zone totalement étanche puisse exister ailleurs qu'au niveau du stot.

## 2.2. DONNÉES SUR LES NIVEAUX DU SOL

Sont disponibles :

- Synthèse courte des travaux de thèse de G. Modeste (EOST) intitulée « Suivi des niveaux de surface »<sup>6</sup>
- Données d'altitude des points suivis en surface, mesurées par un bureau de Géomètres Experts (Jung).

Ces mesures concernant les mouvements résiduels de surface, visent à obtenir une information indirecte de la réduction des vides en profondeur dans l'objectif de vérifier le scénario d'ennoyage.

### 2.2.1. ALTITUDE DES POINTS EN SURFACE (mesures topographiques cabinet Jung géomètre expert)

Depuis 2014, le cabinet de géomètres Jung est mandaté par MDPA pour suivre, en surface, un certain nombre de points situés à l'aplomb ou hors d'influence des travaux miniers souterrains, dans différentes communes du bassin potassique.

Les points de suivi sont reportés sur la carte suivante (illustration 16).

Les tableaux suivants présentent (du nord au sud) l'évolution topographique 2014-2019 au niveau de ces points de suivi. Ces éléments seront repris dans l'analyse secteur par secteur au regard du contexte minier qui les caractérise.

Commune de Raedersheim :

| évolution en cm | janv-14 | avr-14 | août-14 | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16 | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------------------------------|
| RAED1           | 0       | -0,400 | -0,700  | -0,900  | -1,300 | -1,800 | -1,700 | -2,100  | -2,800 | -5,252                             |
| RAED2           | 0       |        | -1,000  | -1,100  | -1,300 | -1,700 | -1,500 | -1,700  | -2,100 | -3,939                             |
| RAED3           | 0       | -0,800 | -1,000  | -1,100  | -1,400 | -1,800 | -1,500 | -1,700  | -2,100 | -3,939                             |

Commune de Bollwiller :

| évolution en cm | janv-14 | avr-14 | août-14 | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16 | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------------------------------|
| BOLL3           | 0       | -0,700 | -1,000  | -0,500  | -1,600 | -2,400 | -3,200 | -3,100  | -4,600 | -8,628                             |
| BOLL4           | 0       | -0,100 | -0,500  | 0,300   | -1,100 | -2,000 | -2,800 | -2,500  | -4,500 | -8,440                             |
| BOLL5           | 0       | -0,200 | 0,200   | 0,200   | 0,100  | -0,100 | -0,300 | -0,300  | -2,000 | -3,751                             |
| BOLL6           | 0       | -0,200 | 0,300   | 0,200   | 0,100  | -0,100 | -0,300 | -0,200  | -2,000 | -3,751                             |
| BOLL7           | 0       | 0,000  | 0,400   | 0,500   | 0,300  | 0,200  | -0,100 | -0,100  | -1,100 | -2,063                             |
| BOLL8           | 0       | 0,000  | 0,300   | 0,400   | 0,300  | 0,200  | -0,100 | 0,000   | -1,200 | -2,251                             |

<sup>6</sup> Le manuscrit de thèse a été produit après rédaction du présent document.

## Commune de Feldkirch :

| évolution en cm | avr-14 | août-14 | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16 | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------------------------------|
| FELD4           | 0      | 0,500   | 0,400   | 0,400  | 0,800  | -0,400 | 0       | -1,400 | -2,753                             |
| FELD5           | 0      | 0,500   | 0,400   | 0,400  | 0,800  | -0,500 | 0       | -1,400 | -2,753                             |
| FELD6           | 0      | 0,400   | 0,400   | 0,400  | 0,800  | -0,300 | 0       | -1,400 | -2,753                             |

## Commune de Staffelfelden :

| évolution en cm | janv-14 | avr-14 | août-14 | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16 | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------------------------------|
| STAF1           | 0       | 0,000  | 0,600   | -0,300  | 0,100  | 0,400  | 0,500  | -1,300  | -1,300 | -2,438                             |
| STAF2           | 0       | 0,000  | 0,300   | -0,400  | -0,200 | 0,300  | 0,300  | -1,700  | -1,500 | -2,813                             |
| STAF5           | 0       | 0,000  | -0,800  | -0,700  |        | -1,300 | -0,400 | -1,900  | -3,000 | -5,627                             |
| STAF6           | 0       | 0,000  | -0,700  | -0,700  | -0,900 | -1,300 | -0,400 | -1,900  | -2,900 | -5,439                             |

## Commune de Wittelsheim :

| évolution en cm | janv-14 | avr-14 | août-14 | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16 | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------|--------|---------|--------|------------------------------------|
| WITT1           | 0       | -0,700 | -1,200  | -1,400  | -1,600 | -2,300 | -2,500 | -3,600  | -4,200 | -7,878                             |
| WITT2           | 0       | -0,800 | -1,300  | -1,500  | -1,800 | -2,400 | -2,600 | -3,600  | -4,300 | -8,065                             |
| WITT3           | 0       | -0,200 | -0,800  | -1,000  | -1,300 | -1,600 | -2,000 | -2,600  | -2,700 | -5,064                             |
| WITT4           | 0       | -0,300 | -0,800  | -1,100  | -1,400 | -1,500 | -1,700 | -2,600  | -2,700 | -5,064                             |
| WITT5           | 0       | -0,300 | -0,800  | -1,100  | -1,400 | -1,500 | -1,900 | -2,600  | -2,600 | -4,877                             |
| WITT6           | 0       | 0,200  | 0,400   | -0,400  | -0,500 | -0,600 | -1,200 | -1,400  | -1,500 | -2,813                             |
| WITT7           | 0       | 0,400  | 0,400   | -0,100  | -0,400 | -0,400 | -1,200 | -1,300  | -1,400 | -2,626                             |

## Commune de Reiningue :

| évolution en cm | janv-14          | avr-14 | août-14                                  | févr-15 | oct-15 | mai-16 | déc-16        | juil-17 | mai-19 | Evolution moyenne annuelle (mm/an) |
|-----------------|------------------|--------|------------------------------------------|---------|--------|--------|---------------|---------|--------|------------------------------------|
| REIN1           | 0                |        |                                          |         |        | 0,100  | 0,400         | -0,500  |        | -1,429                             |
| REIN2           | 0                | 1,300  | 0,700                                    | 0,100   | 0,200  | 0,300  | 0,600         | -0,200  |        | -0,572                             |
| REIN3           | 0                | 0,700  | 0,400                                    |         | 0,100  | -0,100 | 0,400         | -0,500  | -0,600 | -1,125                             |
| REIN4           | 0                | 0,300  | 0,300                                    |         | 0,100  |        | 0,400         | -0,400  | -0,500 | -0,938                             |
| REIN5           | 0                |        | 0,200                                    | 0,100   | 0,200  | 0,200  | 0,200         | -0,200  | -0,300 | -0,563                             |
| REIN6           | 0                |        | 0,200                                    | 0,100   | 0,200  | 0,200  | 0,200         | -0,200  | -0,800 | -1,501                             |
|                 | <b>Légende :</b> |        | Pas de mouvement par rapport à janv/2014 |         |        |        | Pas de mesure |         |        |                                    |

Les figures suivantes (illustrations 21 à 23 ) présentent les courbes d'évolution pour ces différents points de suivi.

L'ensemble des mesures présentées ont été réalisées à proximité ou à l'aplomb de la zone d'exploitation minière et l'ensemble des mesures réalisées montre une tendance à la baisse topographique.

L'ordre de grandeur des déplacements verticaux en 5 ans est le centimètre (entre 4,6 cm à Bollwiller 3 à Wittelsheim et 0,3 cm à Reiningue), soit un déplacement annuel de 0,5 à 8,6 mm/an.

Sur les points suivis, on constate que le déplacement est inversement proportionnel à l'âge et proportionnel à l'épaisseur exploitée (qui augmente vers le centre du bassin) :

- exemple pour l'âge : Wittelsheim et Bollwiller avec des épaisseurs exploitées uniforme (5-

6 m à Wittelsheim et 4,5 m à Bollwiller) mais un déplacement d'autant plus important que l'exploitation est récente ;

- exemple pour les épaisseurs à Raedersheim et Reiningue (épaisseur exploitée de l'ordre de 3 m) qui présentent des mouvements faibles malgré des exploitations plus récentes que les précédentes.

À noter qu'au cœur du bassin (Wittelsheim, Bollwiller, Staffelfelden) se superposent les influences de tous les panneaux exploités à proximité, ce qui n'est pas le cas en bordure extérieure de l'exploitation (Raedersheim, Reiningue).

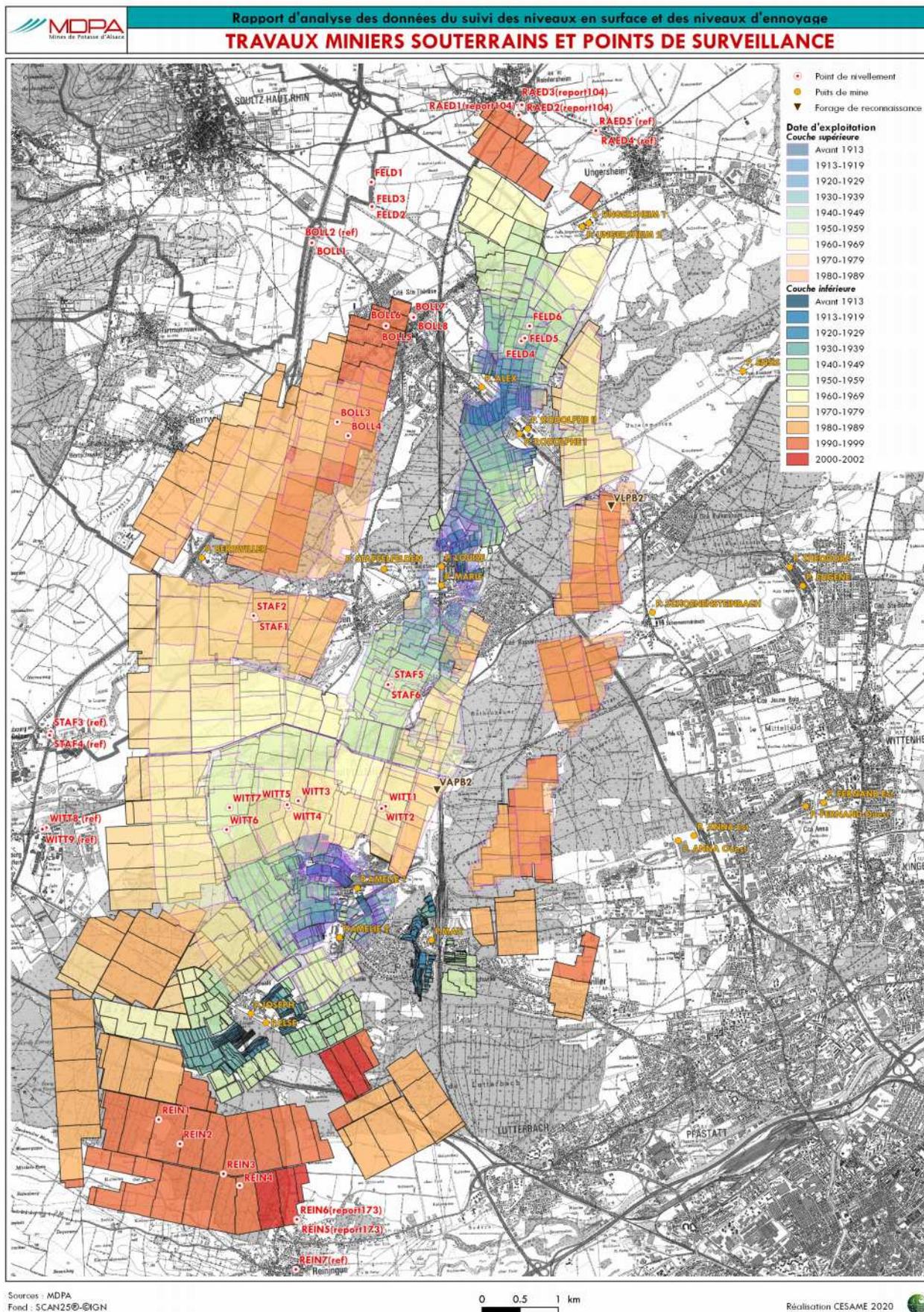
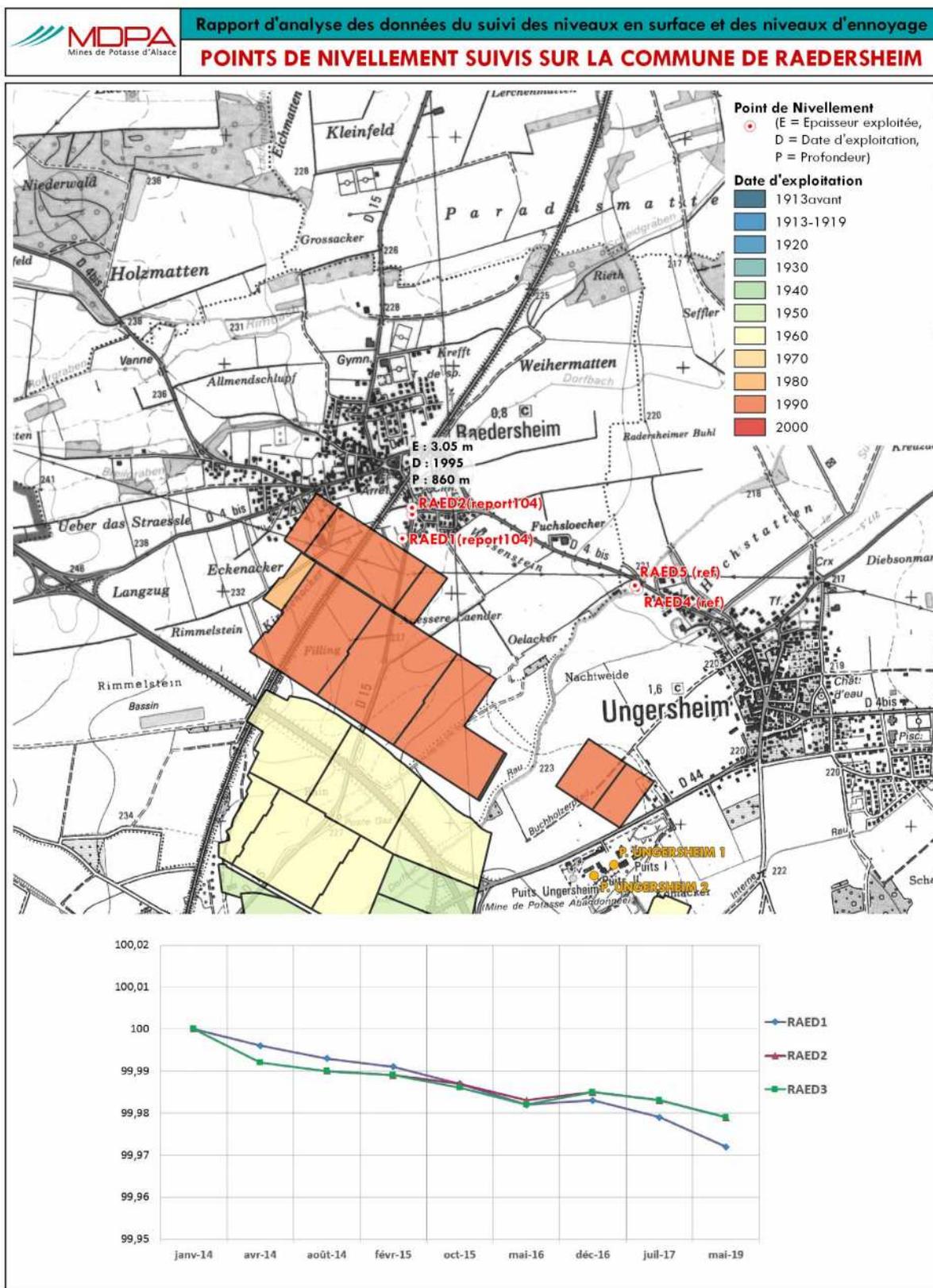
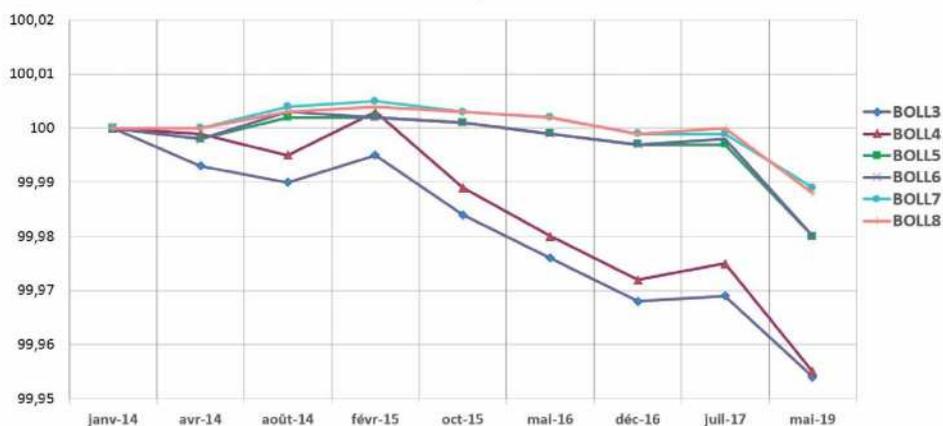
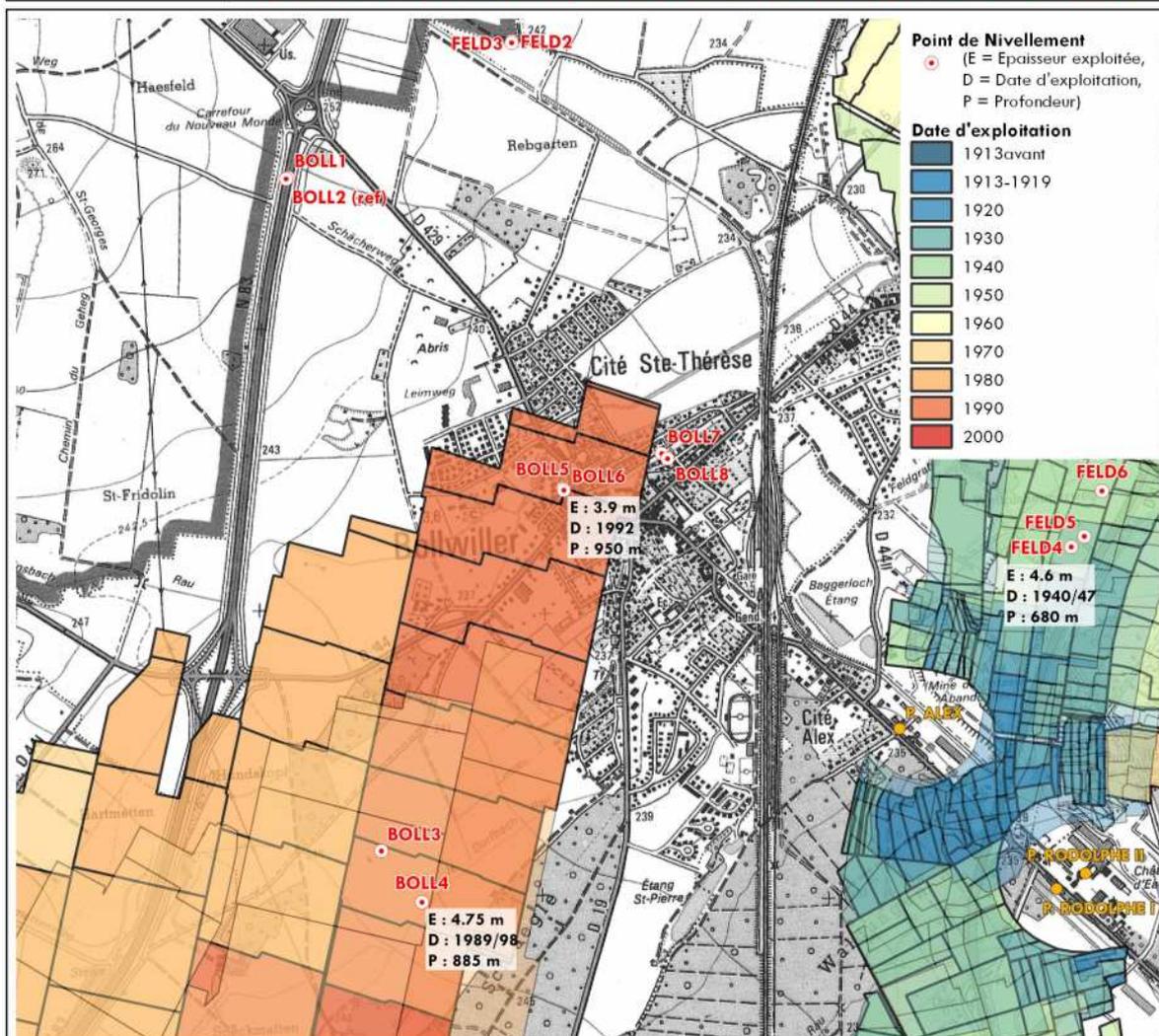


Illustration 16 : Carte des points de mesures topographiques du Cabinet de géomètres experts Jung entre 2014 et 2019



NB : pour toutes les courbes : échelle verticale exprimée en m. Valeur 100 = référence initiale (première mesure).

**MDPA** Mines de Potasse d'Alsace  
**Rapport d'analyse des données du suivi des niveaux en surface et des niveaux d'ennoyage**  
**POINTS DE NIVELLEMENT SUIVIS SUR LA COMMUNE DE BOLLWILLER**

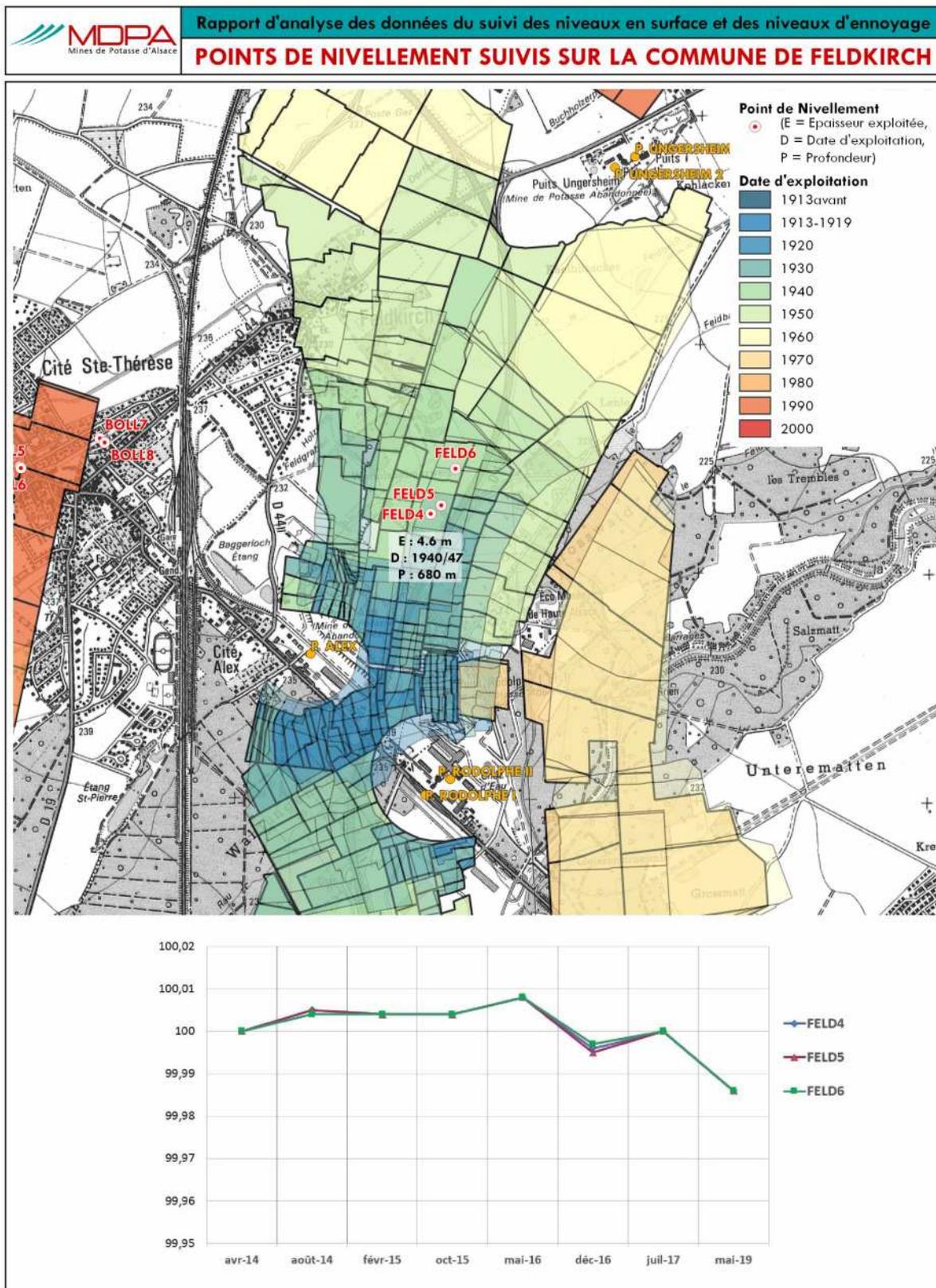


Sources : MDPA  
 Fond : SCAN25©-IGN

0 0.5 1 km

Réalisation CESAME 2020



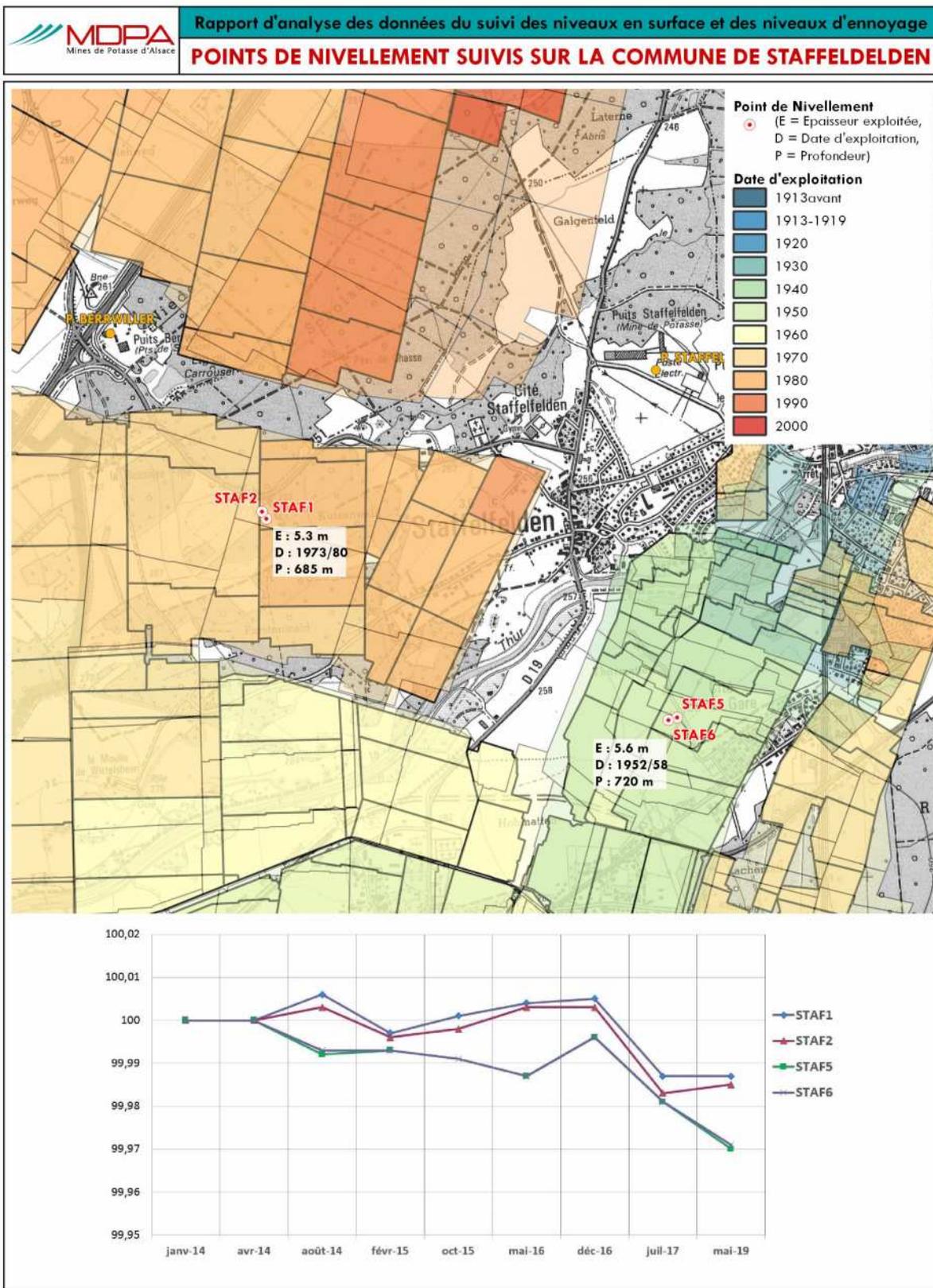


Sources : MDPA  
 Fond : SCAN25©-IGN

0 0.5 1 km

Réalisation CESAME 2020





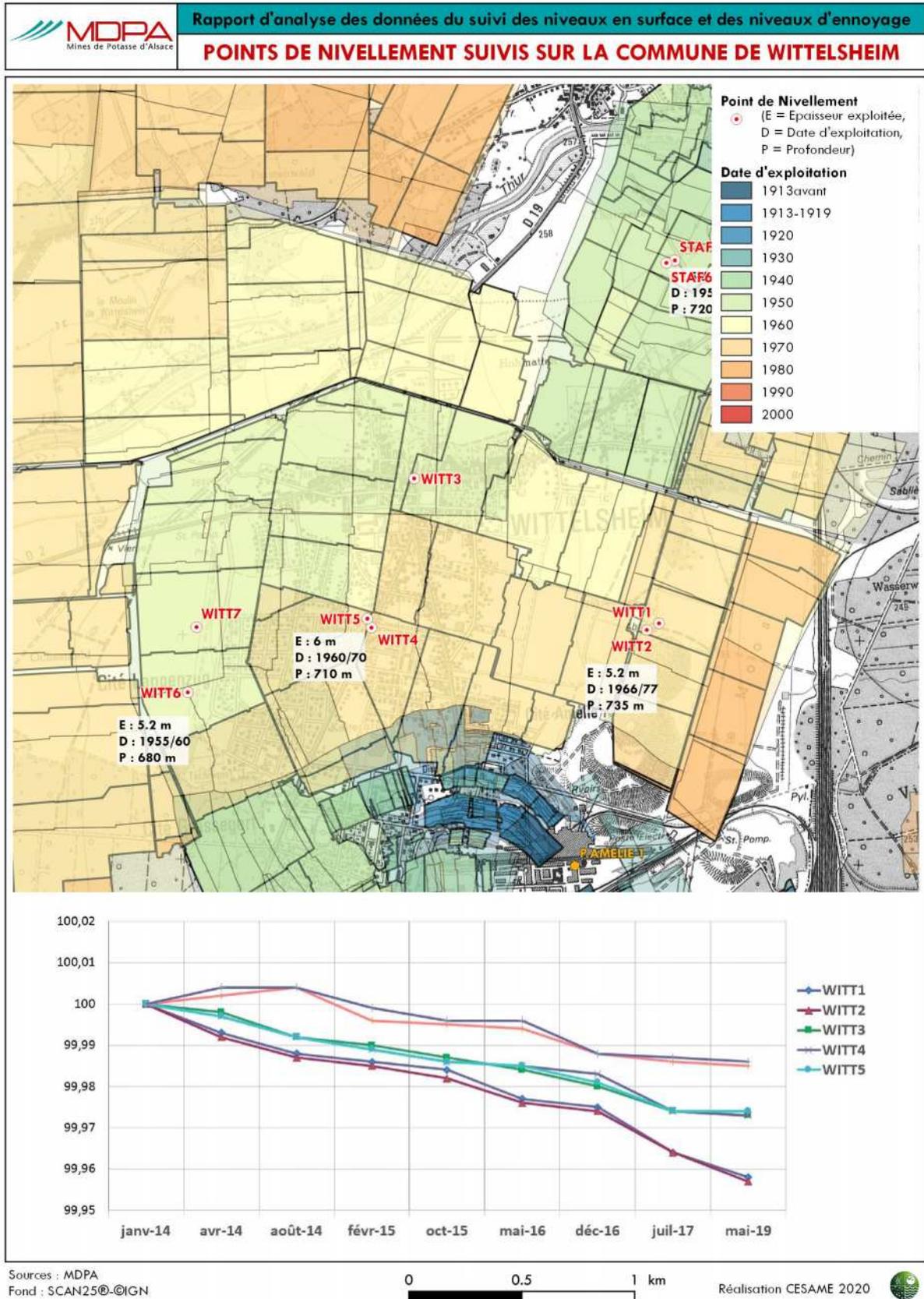
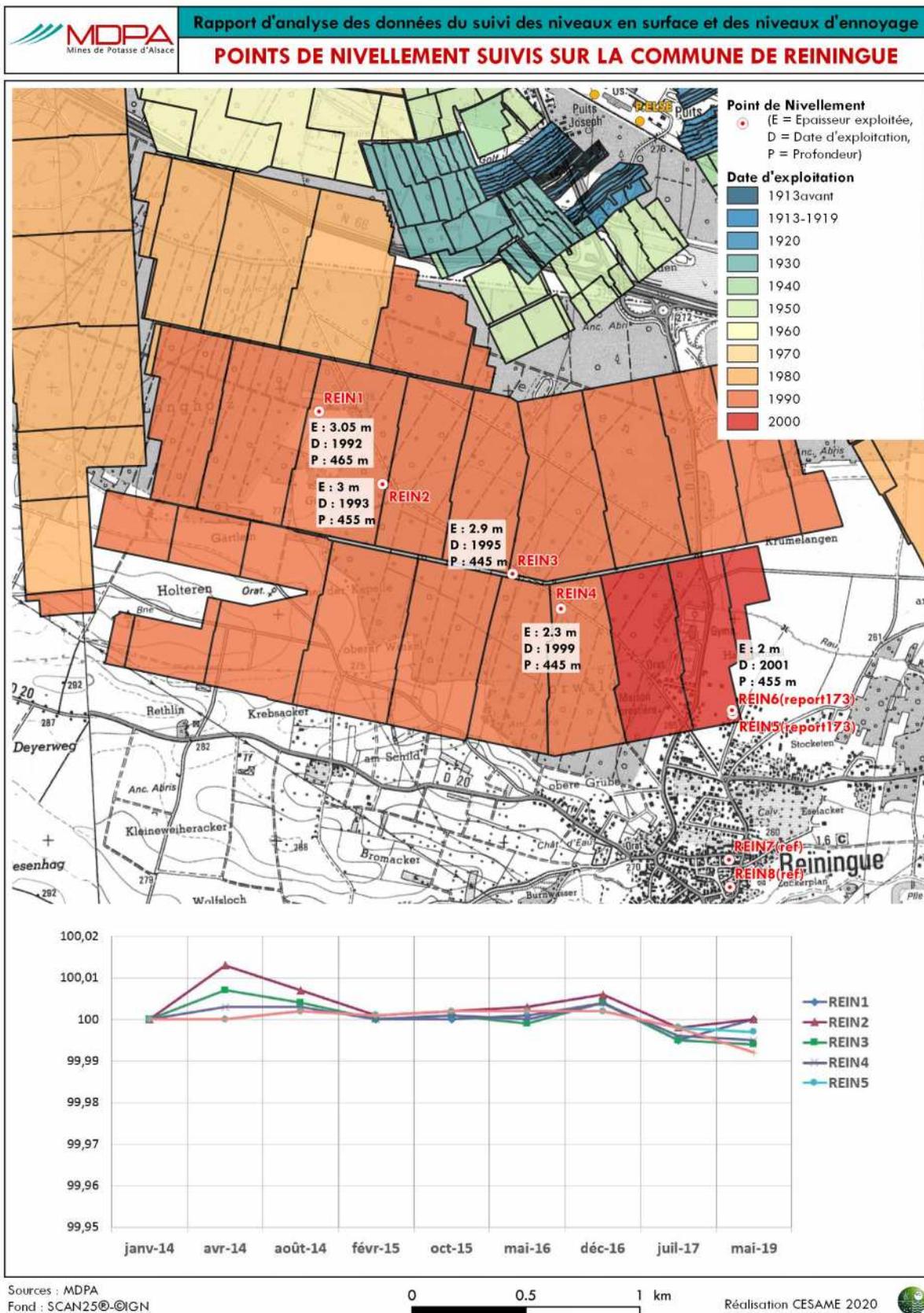


Illustration 21 : Points de nivellement 2014\_2019 (Géomètre Jung) commune de Wittelsheim.



Nivellements réalisés entre 2014 et 2019 par le cabinet de géomètres Jung

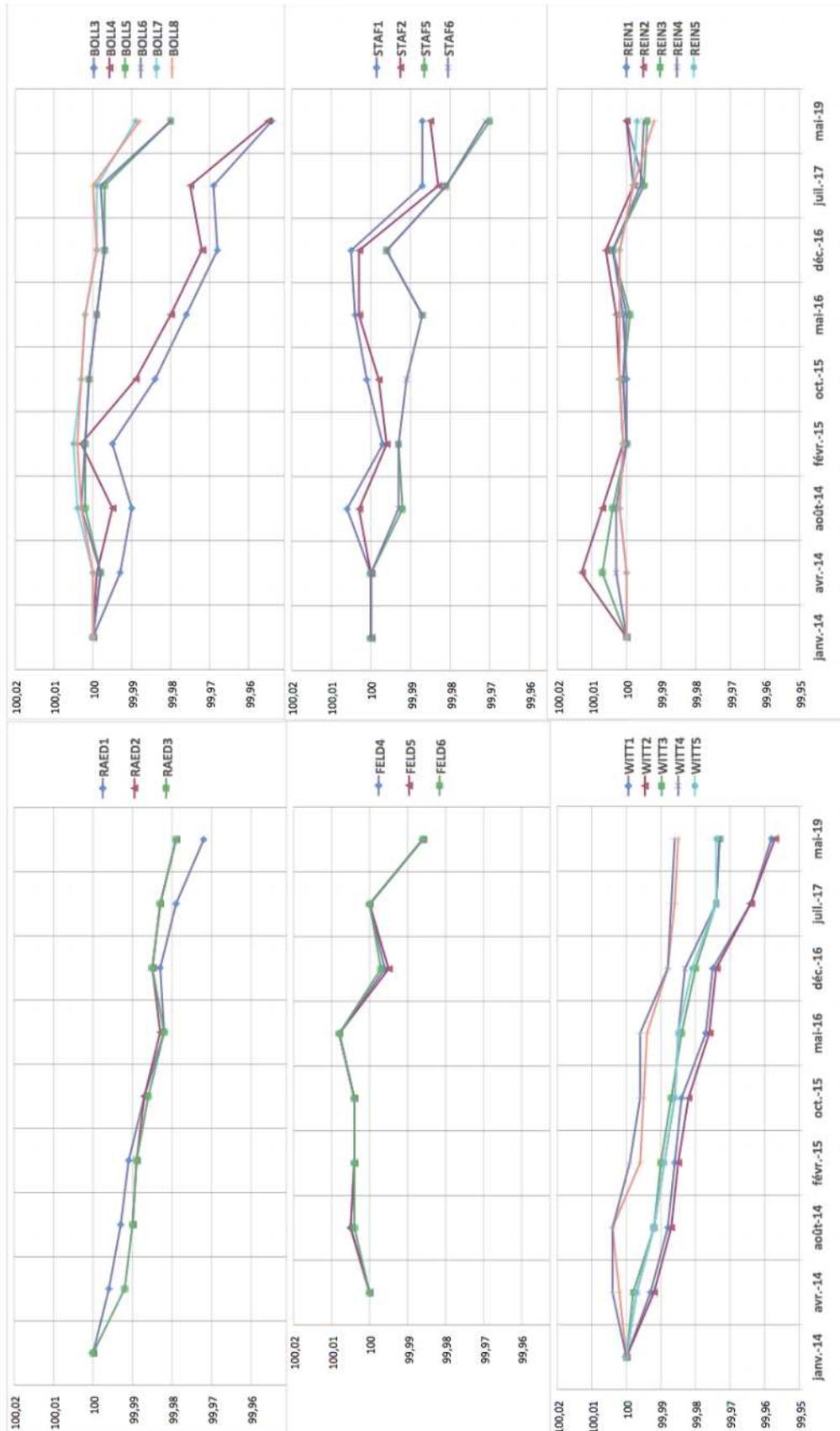


Illustration 23 : Nivellements réalisés entre 2014 et 2019 par le cabinet Jung  
(Géomètres experts 68500 Guebwiller)

## 2.2.2. SYNTHÈSE COURTE DES TRAVAUX DE THÈSE DE G. MODESTE (EOST)

### ▣ Les mouvements de surface

Dans son travail de thèse, G. Modeste a recherché des données satellitaires disponibles pour apprécier les phénomènes d'affaissement en lien avec les travaux miniers souterrains des MDPA entre 1995 et 2018 (sachant que la fin de l'exploitation minière date de 2002).

Ce travail s'intéresse essentiellement à la phase résiduelle de l'affaissement<sup>7</sup> (soit la phase de 16 ans suivant la fin de l'activité). Les mesures satellitaires ne sont interprétables que si elles correspondent à un point « dur » cela signifie qu'il n'y a pas de données interprétables en milieu rural hors bâti ou réseau routier/ferré.

Ce travail de recherche se poursuit actuellement avec un rendu prévu mi 2020.

A la suite de l'étude des données satellitaires, G. Modeste a travaillé à une modélisation mécanique du sous-sol dans le bassin minier pour tenter de relier les mouvements de surface avec les évolutions du sous-sol (mine et hors mine).

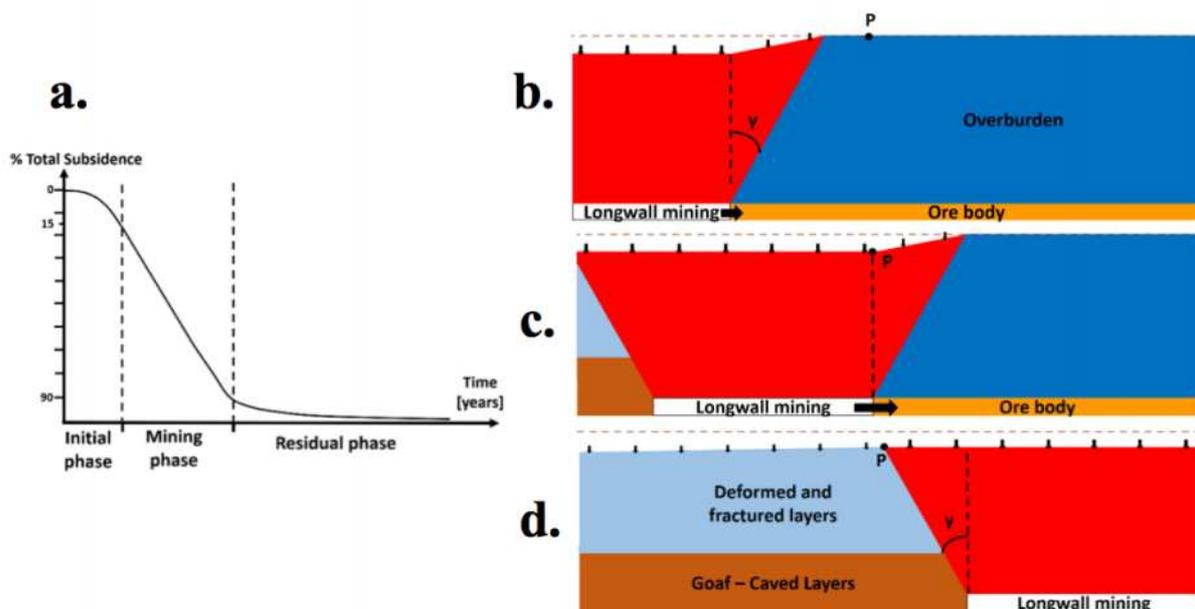


Illustration 24 : Evolution temporelle schématique d'un affaissement minier (issu de G. Modeste-IPGS 2019)

Seules ont été publiées (voir rapport en annexe 3) les données concernant les mouvements de surface. Les données interprétées (3 séries de mesures indépendantes réalisées par 3 satellites différents de l'ESA chacune couvrant une période distincte) ont été recalées entre elles (phase d'affaissement résiduel) en utilisant les suivis topographiques anciens réalisés par MDPA à l'aplomb ou à

<sup>7</sup> Pour rappel (illustration 24), le foudroyage des travaux miniers en souterrain entraîne un mouvement de terrain marqué et rapide appelé affaissement actif. En suite un mouvement résiduel lent perdure plusieurs années, avec une amplitude beaucoup plus faible.

proximité des travaux miniers souterrains.

Sur 5 points de référence, l'auteur a pu recalibrer les mesures satellitaires par rapport à des mesures d'affaissement réalisées par MDPA entre 1995 et 2000 ; il a ensuite recalibré les données satellitaires en extrapolant les suivis topographiques à l'aide d'une fonction correspondant à une somme de deux exponentielles (voir illustrations 25 et 26).

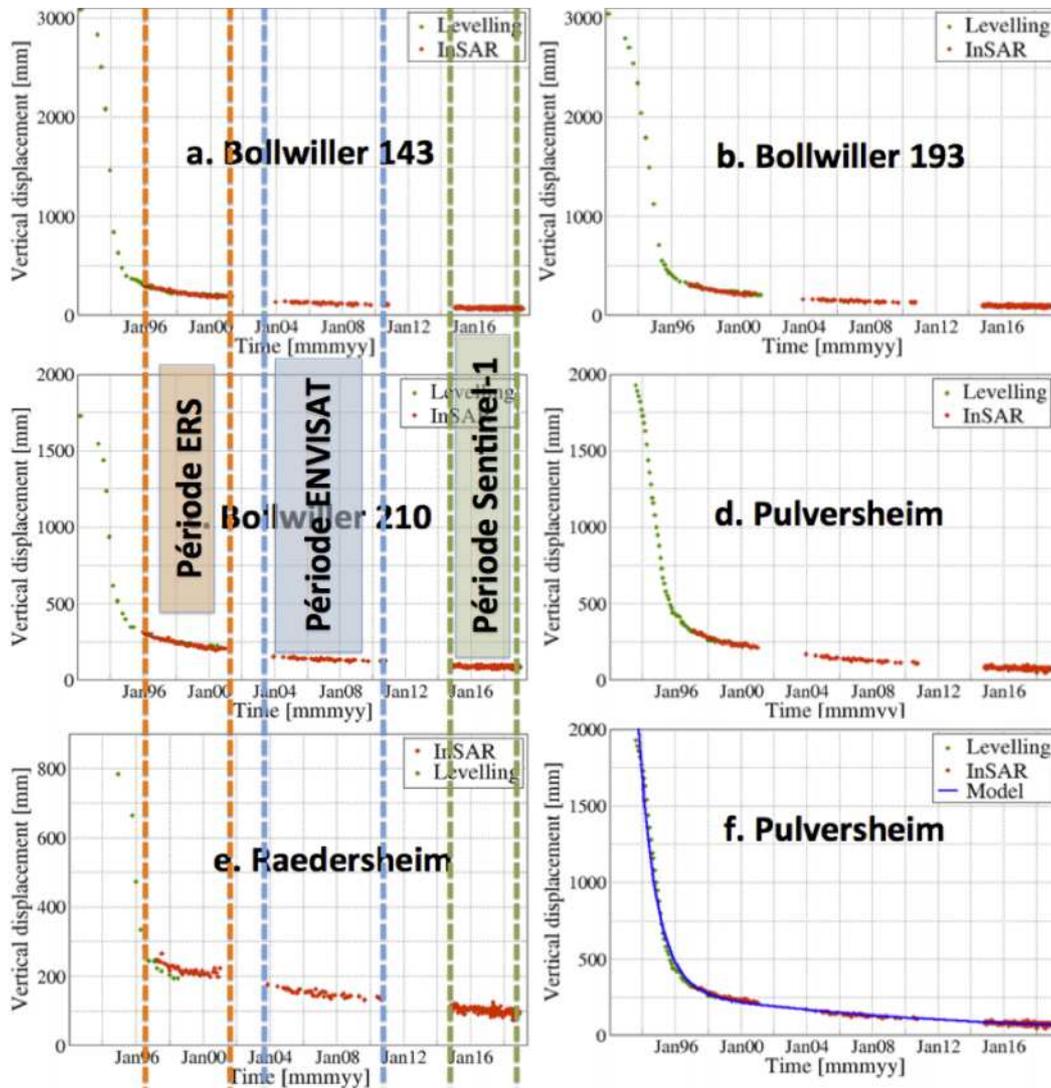


Illustration 25 : Combinaison des séries temporelles des données de nivellement (points verts) et des mesures satellitaires (points rouges) projetées verticalement (G. Modeste - 2019)

*N.B. : Un point de référence initialement envisagé a été écarté par G. Modeste, du fait d'un affaissement résiduel « atypique » attribué selon l'auteur à d'autres facteurs que la mine. Il s'agit d'un point de mesure situé à Staffelfelden dans une zone où se superposent l'exploitation minière de la potasse, une exploitation pétrolière qui a eu lieu entre 1954 et 1963 et une faille de grande envergure et fort rejet.*

*La superposition de ces discontinuités peut, selon lui, être à l'origine de déplacements observés en surface mais une étude complémentaire serait nécessaire pour juger de l'importance de ces différentes influences.*

Sur les 5 points de référence retenus, l'auteur met en évidence une bonne

corrélation entre « affaissement résiduel » (Ar) et « hauteur extraite » (H) ( $Ar/H = 3,6$  à  $4,5$  %).

Le tableau suivant présente les éléments pris en compte dans cette analyse. Nous y avons ajouté une colonne sur le **ratio « affaissement total » (At) / « hauteur extraite » (H)** ( $At/H = 21,3$  à  $73,6$  %). En première lecture, sur ces points, ce paramètre semble indiquer une valeur plutôt inférieure aux  $85^8$  % généralement avancés dans les publications pour le bassin potassique pour l'affaissement en phase active. Ce résultat n'est pas en contradiction avec la théorie MDPA des affaissements car les points de référence sont situés à l'aplomb soit de zones d'exploitation dites sous-critiques (profondeur d'exploitation supérieure à largeur des panneaux exploités), soit en bordure des zones d'exploitation. Le peu de points disponibles et les particularités de chacun d'entre eux incite donc à la prudence mais permet d'envisager un volume de vides résiduels souterrains supérieur à 10% à l'issue de la phase d'affaissement actif et même encore supérieur à 10% plusieurs années après la fin des travaux.

|                | HAUTEUR EXTRAITE | PROFONDEUR | AFFAISSEMENT PHASE ACTIVE | AFFAISSEMENT PHASE RESIDUELLE | PHASE RESIDUELLE / AFF. TOTAL | PHASE RESIDUELLE / HAUTEUR EXTRAITE | TOTAL AFFAISSEMENT / HAUTEUR EXTRAITE | Remarque                                                                                                               |
|----------------|------------------|------------|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| unité          | m                | m          | cm                        | cm                            | %                             | %                                   | %                                     |                                                                                                                        |
| BOLLWILLER 143 | 3,9              | 900        | 273                       | 14                            | 4,88                          | 3,59                                | 73,59                                 | situé hors panneau exploité mais très proche (50m) - Rapport largeur exploitée/profondeur = 1                          |
| BOLLWILLER 193 | 3,9              | 900        | 278                       | 16                            | 5,44                          | 4,1                                 | 75,38                                 |                                                                                                                        |
| BOLLWILLER 210 | 3,9              | 900        | 141                       | 15                            | 9,62                          | 3,85                                | 40                                    | situé hors panneau exploité (250m)                                                                                     |
| PULVERSHEIM    | 4                | 1000       | 234                       | 18                            | 7,14                          | 4,5                                 | 63                                    | Hauteur extraite =<br>4 m en couche inférieure (1991-1993)<br>1,75 m en couche supérieure (1982-1984)                  |
| RAEDERSHEIM    | 3,05             | 850        | 54                        | 11                            | 16,92                         | 3,61                                | 21,31                                 | situé hors panneau exploité (50m) & 1 seule couche exploitée (couche inf) - Rapport largeur exploitée/profondeur = 0,5 |

Tableau 1 : Amplitude de l'affaissement aux cinq points de nivellement retenus dans le calage des mesures satellitaires

Pour illustrer les résultats du travail de G. Modeste, nous présentons ci-après (illustration 27) la carte des mouvements de sol enregistrés durant la période ENVISAT (entre 2004 et 2010). Nous avons choisi cette période (plutôt que la période Sentinel-1 plus récente) car le traitement des données pour le satellite ENVISAT est plus fiable que dans la période suivante.

La période ENVISAT correspond à une période où les mouvements sur les mesures satellitaires sont clairement descendants au niveau des points de référence retenus.

Les points colorés présentent des vitesses de déplacement résiduel supérieures à  $-2,5$  mm/an.

8 Il est généralement admis dans le bassin potassique que l'affaissement total peut atteindre 95 % de la hauteur totale exploitée et que 90% de cet affaissement se produit dans les 3 premières années.

Tous les points présentant des mouvements compris entre -2,5 et + 4 mm/an sont représentés en coloris gris (on perçoit bien ainsi que c'est essentiellement dans les zones urbaines que sont les points de mesure). Les zones blanches sont des zones rurales ne présentant pas de points de mesure interprétables.

Cette carte met en évidence la corrélation entre des mouvements de terrain descendants (entre 2004 et 2010) et la présence de travaux miniers souterrains.

Sur les travaux miniers MDPA de la zone Est (à l'est du méridien Pulversheim), le nombre de points de mesures disponibles est important (plumetis gris), mais les zones présentant un mouvement résiduel perceptible sont essentiellement situées à l'aplomb des dernières zones exploitées à proximité des puits Eugène au Nord (exploité entre 1982-1985) et Anna au Sud (exploité entre 1972-1973, il y a près de 50 ans).

Sur les travaux miniers MDPA de la zone Ouest (à l'ouest du méridien Pulversheim), le nombre de points de mesure disponibles est moins important (on note surtout l'absence de points de mesure sur toute la bordure ouest des travaux miniers).

Là encore, les zones présentant un mouvement résiduel perceptible semblent essentiellement situées à l'aplomb des dernières zones exploitées ou à proximité de puits de mine (Ungersheim (exploité entre 1994-1997) ; Staffelfelden (exploité entre 1989-1990)). Ailleurs, il n'y a pas de mouvement détectable.

On peut également noter (illustration 28) une certaine corrélation entre mouvements descendants et zones profondes de l'exploitation qui pourrait trouver une explication dans le fait :

- que ces zones basses soient au cœur du bassin exploité et subissent donc les influence superposées de toutes les zones d'exploitation périphérique, ou bien
- que ces zones basses puissent être en train de se remplir :
  - secteur Raedersheim (exploité entre 1994-1996),
  - Bollwiller (exploité entre 1992-1994),
  - Staffelfelden coté Puits Staffelfelden et coté ville de Staffelfelden (exploité entre 1977-1978),
  - Pulversheim (exploité entre 1993-1995),
  - Reiningue (exploité entre 2000-2002).

Le phénomène de remplissage des travaux miniers profonds pourrait entretenir (ou raviver) les phases d'affaissement résiduelles.

Toutefois le très faible nombre de points de référence disponibles à l'aplomb des zones d'exploitation les moins profondes incite à la prudence vis-à-vis de cette

interprétation, d'autant que les derniers panneaux exploités sont en majorité situés dans les zones profondes (à l'exception du secteur Reiningue).

L'extrapolation des courbes telles que caractérisées par G. Modeste mèneraient à un déplacement résiduel **en surface** qui ne serait pratiquement plus perceptible en une centaine d'années (voir figure suivante).

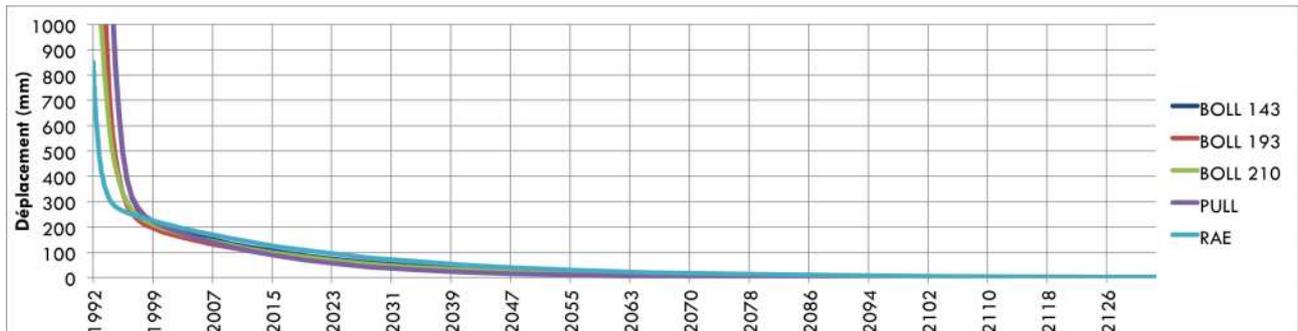


Illustration 26 : Extrapolation des déplacements verticaux en surface pour les points de calage LOS, à l'aide des fonctions somme de deux exponentielles (d'après le travail de M. Modeste EOST 2019)

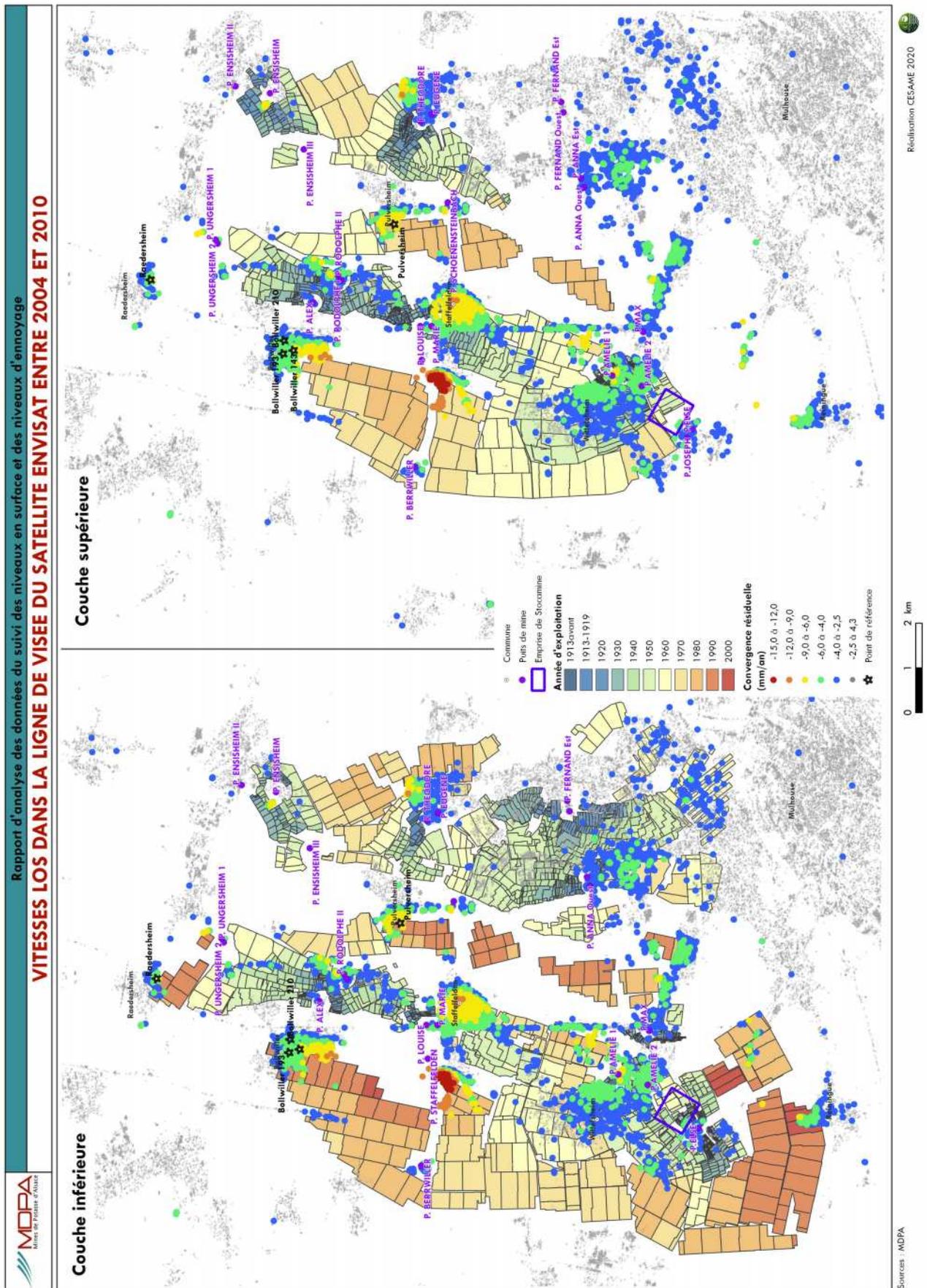


Illustration 27 : Vitesses de convergence mesurées durant la période 2004-2010 (Satellite ENVISAT) comparée à l'âge de l'exploitations

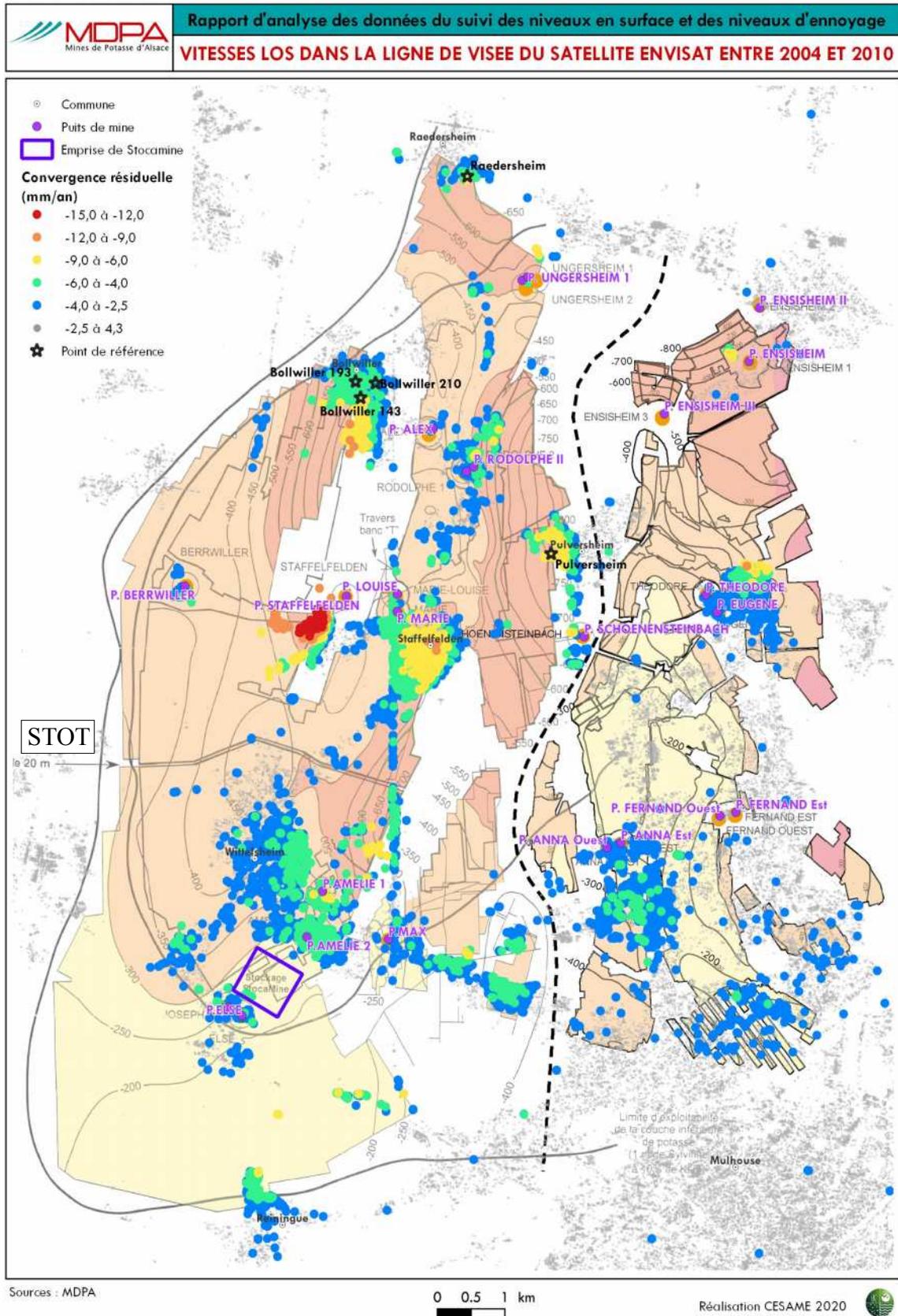


Illustration 28 : Vitesse LOS (déplacements verticaux mesurés par Land Observing System) entre 2004 et 2010 comparées aux cotes NGF de l'exploitation minière

## □ La fermeture des vides miniers

Le travail de G. Modeste a également porté sur les phénomènes de convergence affectant les anciennes exploitations minières.

Un **modèle physique tridimensionnel maillé** (mailles de 100 m par 100 m par 100 m) représentant l'ensemble de la série sédimentaire sur le bassin minier a été constitué, en affectant des caractéristiques rhéologiques à chaque couche sédimentaire.

Au sein du bloc modélisé, les derniers panneaux exploités de Bollwiller et de Pulversheim ont été simulés sous forme d'une zone « vide » et le modèle a permis de calculer la vitesse de fermeture des vides.

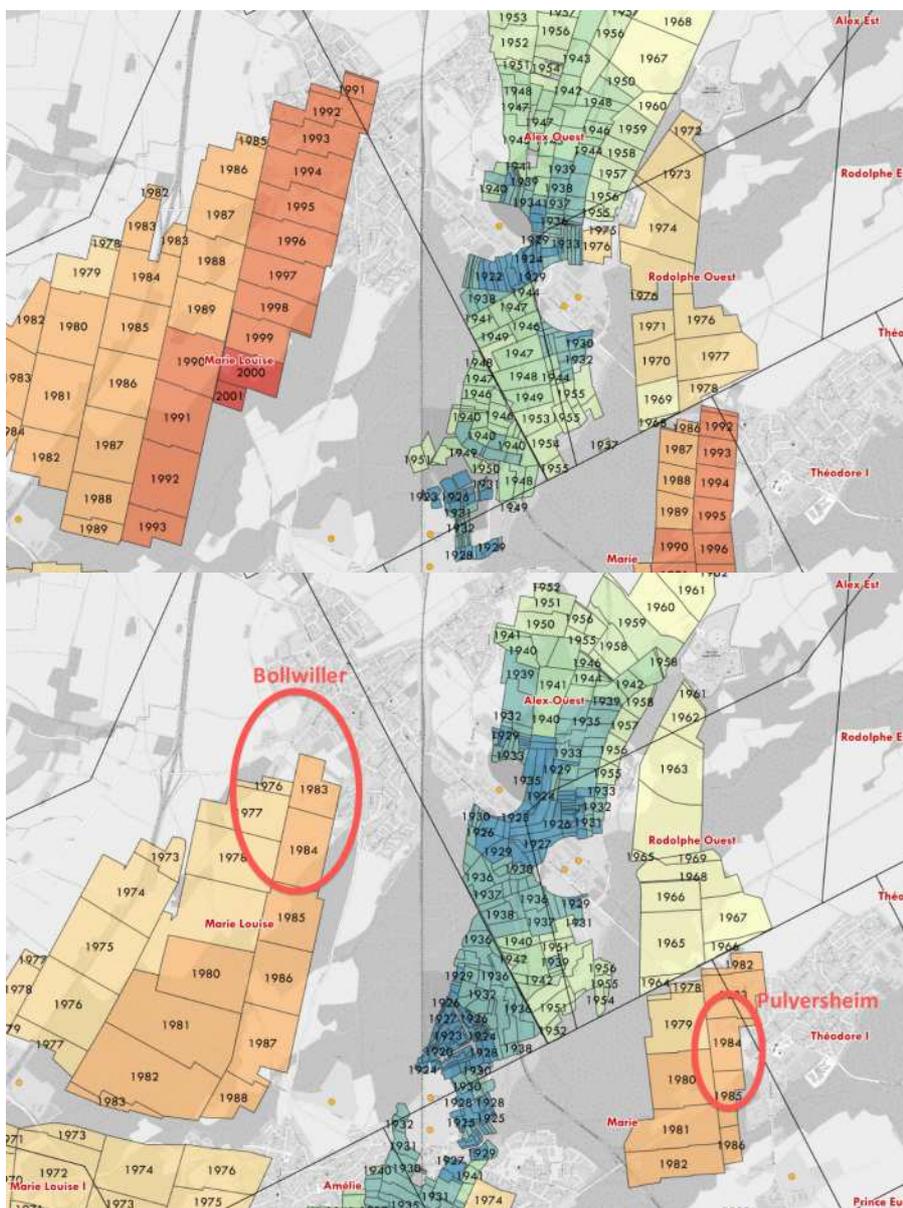


Illustration 29 : Ages des exploitations de potasse en couches supérieure (en haut) et inférieure (en bas) dans les secteurs Bollwiller et Pulversheim

Les graphiques suivants montrent l'évolution calculée des vides miniers (en % du vide initial) au droit des panneaux Bollwiller 1993 et 1994 et Pulversheim 1994 (voir illustration 29) correspondant à des points de nivellement existants.

Le premier graphique montre la période « actuelle », période suivie en surface par les données satellites et des mesures de nivellement par un géomètre (échelle horizontale 27 ans) ; le deuxième graphique présente l'extrapolation de la courbe jusqu'en 2101 (échelle horizontale 100 ans).

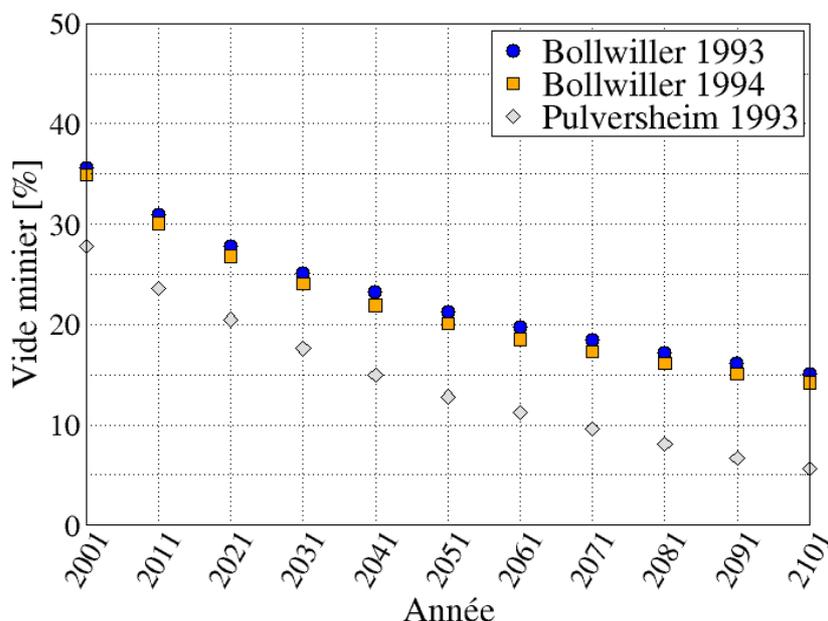
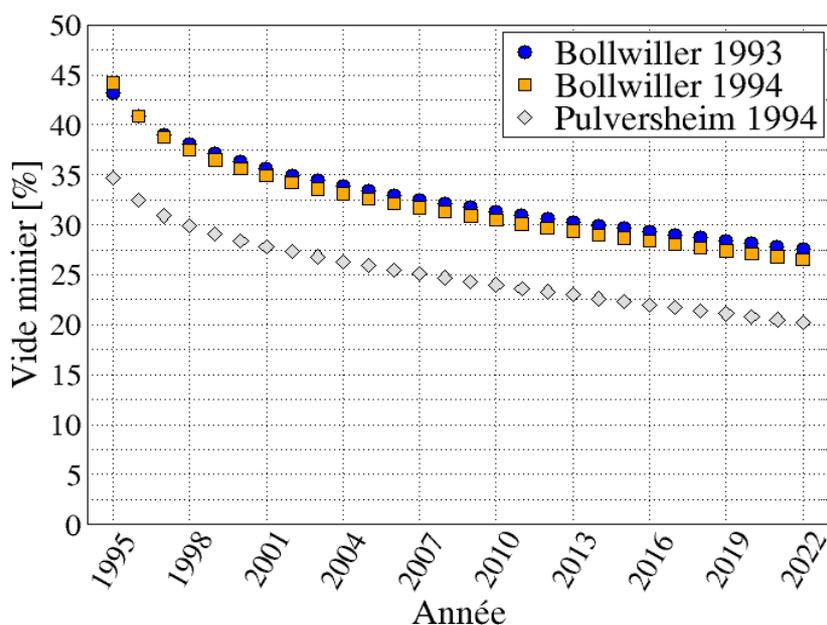


Illustration 30 : Evolution simulée des vides miniers dans les panneaux exploités entre 1993 et 1994 à Bollwiller et Pulversheim.

Les courbes tracées par G Modeste à l'aide de ces simulations montrent

l'évolution d'un vide résiduel (soit un volume en 3 dimensions - X, Y, Z).

Si l'on admet que les panneaux exploités ne perdent du volume que par un tassement vertical<sup>9</sup> (suivant l'axe Z), on peut comparer les évolutions de volume calculées avec les évolutions topographiques en surface.

Ainsi :

- **à Bollwiller :**

- épaisseur initiale de la couche inférieure exploitée en 1993-1994 : 3,9 m,
- évolution du vide simulé : 2% entre 2004 et 2010 soit une baisse de **7,8 cm en 6 ans** ;
- évolution totale simulée en 2020 : environ 72,5%. soit **≈2,83 m.**

Ces valeurs sont très comparables à ce que l'on peut retrouver sur le tableau 1 et sur l'illustration 28 :

- affaissement résiduel entre 2004 et 2010 de l'ordre de 9 à 12 mm/an soit **5,4 à 7,2 cm en 6 ans.**
- affaissement total à Bollwiller en 2019 de l'ordre de **2,87 à 2,94 m ;**
- **À Pulversheim**, les 2 couches ont été exploitées. Dans les années 1982-1984 pour la couche supérieure et 10 ans plus tard pour la couche inférieure.

La hauteur totale extraite a été de 4 m en couche inférieure et 1,5 m en couche supérieure l'affaissement résiduel lié à la couche supérieure peut être considéré comme nul au bout de 10 ans. On ne tiendra donc compte que de l'exploitation en couche inférieure.

- évolution du vide calculée  $\approx 2$  à 3% entre 2004 et 2010 soit une baisse de **8 à 12 cm en 6 ans ;**
- évolution totale simulée en 2020 : environ 80 % de la puissance exploitée (**≈3,2 m.**)

Les valeurs calculées sont supérieures à ce que l'on peut retrouver sur le tableau 1 sur l'illustration 28 :

- affaissement total à Pulversheim de l'ordre de **2,52 m.**
- affaissement résiduel entre 2004 et 2010, (pour un panneau exploité en 1994) à Pulversheim : 6 à 9 mm/an soit **4,2 à 5,6 cm en 6 ans**

Pour ce secteur, si l'on admet que les panneaux exploités ne perdent du volume que par un tassement vertical, le modèle d'évolution du vide minier supposerait des mouvements plus importants que les affaissements mesurés en surface.

<sup>9</sup> En effet, les panneaux exploités ne changent pas de dimension en X et Y car leur taille reste équivalente malgré la convergence.

- En conséquence il semble difficile de relier les résultats du modèle physique tridimensionnel maillé avec les affaissements mesurés en surface : les données acquises par les suivis topographiques et satellitaires sont partielles et de nombreux paramètres peuvent influencer les réponses du sous-sol et de la surface : nombre de couches exploitées, épaisseurs exploitées, âges des travaux, conditions de pressions et températures variables avec la profondeur, ... Il est donc compliqué d'intégrer ces paramètres dans un modèle. Toutefois les deux modèles laissent supposer que l'affaissement initial est  $\leq 80\%$  de la hauteur totale exploitée et que l'affaissement résiduel en 2020 pour les derniers panneaux exploités est encore de l'ordre 0,5 à 1 cm/an.

**L'évolution modélisée des vides miniers donne des ordres de grandeur qui sont de dimension équivalente aux mesures réalisées en surface et qui plaident pour un affaissement total des vides miniers, même à grande profondeur (>900 m dans les 2 cas de figure) qui reste  $\leq 80\%$  du vide initial en 2020 pour les derniers panneaux de potasse exploités.**

**La poursuite d'une dynamique d'affaissement telle qu'observée en surface (satellites) conduirait à un affaissement résiduel nul en une centaine d'années, en revanche l'évolution du vide minier simulée par un modèle physique tridimensionnel maillé mènerait à un vide résiduel de 5 à 15 % en 2100 dans les derniers panneaux exploités et ceci malgré leur profondeur<sup>10</sup>. Autrement dit, les mouvements de surface vont devenir non mesurables mais il restera encore en souterrain des vides (porosité).**

### **2.2.3. CONCLUSIONS CONCERNANT LES MOUVEMENTS DE SURFACE ET LES MOUVEMENTS RESIDUELS AU FOND**

Les éléments concernant l'évolution de la topographie à l'aplomb des travaux miniers visaient à :

- comparer qualitativement les résultats des mesures réalisées par rapport aux hypothèses d'évolution des vides miniers retenues dans le dossier initial de demande de stockage illimité produit par StocaMine en 2015 ;
- traduire les affaissements mesurés en volumes perdus par rapport au volume initial de vide (approche quantitative).

Les données disponibles mettent en évidence un affaissement à l'aplomb des travaux miniers souterrains pouvant se décomposer en 2 phases successives d'ampleur différente répondant au total à une somme de deux fonctions exponentielles de temporalités différentes :

---

<sup>10</sup>La modélisation faite par G. MODESTE concerne le Nord/Est de la mine Marie-Louise, au droit de la commune de Pulversheim. La géométrie de l'exploitation dans cette zone est sous-critique (au sens de la théorie des MDPA, c'est à dire que la largeur des panneaux est inférieure à leur profondeur). Il n'est donc pas anormal que le taux de vides miniers  $\gamma$  soit encore important.

- un affaissement initial dynamique important se produisant dès la période d'exploitation souterraine et durant quelques années (3 à 5 au maximum) ;
- un affaissement résiduel se poursuivant pendant plusieurs dizaines d'années après la fin de l'exploitation (mouvement très faible mais encore actif en 2020 à l'aplomb de travaux plus que cinquantenaires).

Les mesures entreprises semblent indiquer que l'affaissement dynamique initial est plus faible que celui historiquement retenu ( $\approx 85$  % de la hauteur exploitée) par les MDPA (affaissement dynamique initial correspondant à 95 % de l'affaissement total qui représente 90% de la hauteur exploitée).

En effet, les mesures réalisées sur les derniers panneaux exploités (à Raedersheim, Bollwiller, Staffelfelden et Reiningue) ont plutôt mis en évidence des hauteurs d'affaissement dynamique de l'ordre de 75 % de la hauteur exploitée.

Actuellement, des mouvements résiduels persistent à l'aplomb des travaux miniers souterrains. Les vitesses de déplacement mesurables représentent 0,1 cm/an à 1,5 cm/an.

Les mouvements mesurés en surface sont clairement reliés à l'ancienne exploitation minière et à la création de vides souterrains dans l'exploitation minière et à la fermeture progressive de ces vides. Les mouvements résiduels les plus marqués mesurés par satellite sont d'ailleurs clairement concentrés sur les zones d'exploitation les plus récentes (qui sont également souvent en position profonde et à proximité des anciens puits de mine).

La modélisation mécanique du milieu a permis de simuler la fermeture de vides miniers situés à 900 m de profondeur dans les secteurs de Bollwiller ou Pulversheim. Elle conforte les mesures réalisées au jour en montrant une convergence cumulée correspondant en 2020 à moins de 80% de la hauteur exploitée, pour des panneaux exploités entre 1993 et 1994.

## 3. CROISEMENT AVEC LES HYPOTHÈSES PRÉSENTÉES DANS LE DOSSIER 2015

### 3.1. RAPPEL DES HYPOTHÈSES

Le dossier de demande d'autorisation de transformation du stockage de déchets StocaMine en stockage souterrain de durée illimitée s'est appuyé dans son chapitre concernant le remplissage de la mine sur diverses études réalisées entre 1997 et 2011 concernant l'hydrogéologie minière et la géomécanique de matériaux constituant le stockage ou la mine. L'étude de référence pour le dossier est l'étude INERIS DRS-10-108130-12810B de 2011 intitulée « Stockage souterrain de Stocamine (68) Etude hydrogéologique de l'ennoyage du site ».

Le phénomène d'ennoyage est décrit en tenant compte de plusieurs phénomènes avec :

- des suintements passant par les anciens puits de mine bouchés (eau douce, en bleu sur l'illustration 31: Schéma de principe de l'ennoyage des travaux miniers),
- l'accumulation progressive de cette eau, transformée en saumure sur son parcours au travers des terrains salifères, d'abord dans les points bas de l'ancienne exploitation minière (saumure représentée en violet sur illustration 31),
- les vides de l'ancienne exploitation minière, sur deux niveaux, qui ne sont que des vides résiduels du fait du mode d'exploitation en foudroyage,
- la montée progressive du niveau de saumure poussant l'air (flèche noire sur illustration 31) vers les points hauts.

La vitesse d'ennoyage des anciens travaux miniers de potasse dépend de deux paramètres (tous deux évolutifs) :

- le volume des vides miniers résiduels et son évolution dans le temps,
- le débit susceptible d'atteindre ces vides miniers.

➤ **Existence d'un stot séparant les parties Nord et Sud des travaux du secteur ouest** L'étude concerne le secteur ouest de la mine de potasse qui est totalement indépendant du secteur est. Historiquement ce secteur ouest a été exploité en deux parties initialement indépendantes car séparées par un « stot » non exploité (voir illustration 28 : Mine Amélie au Sud et Marie-Louise au Nord).

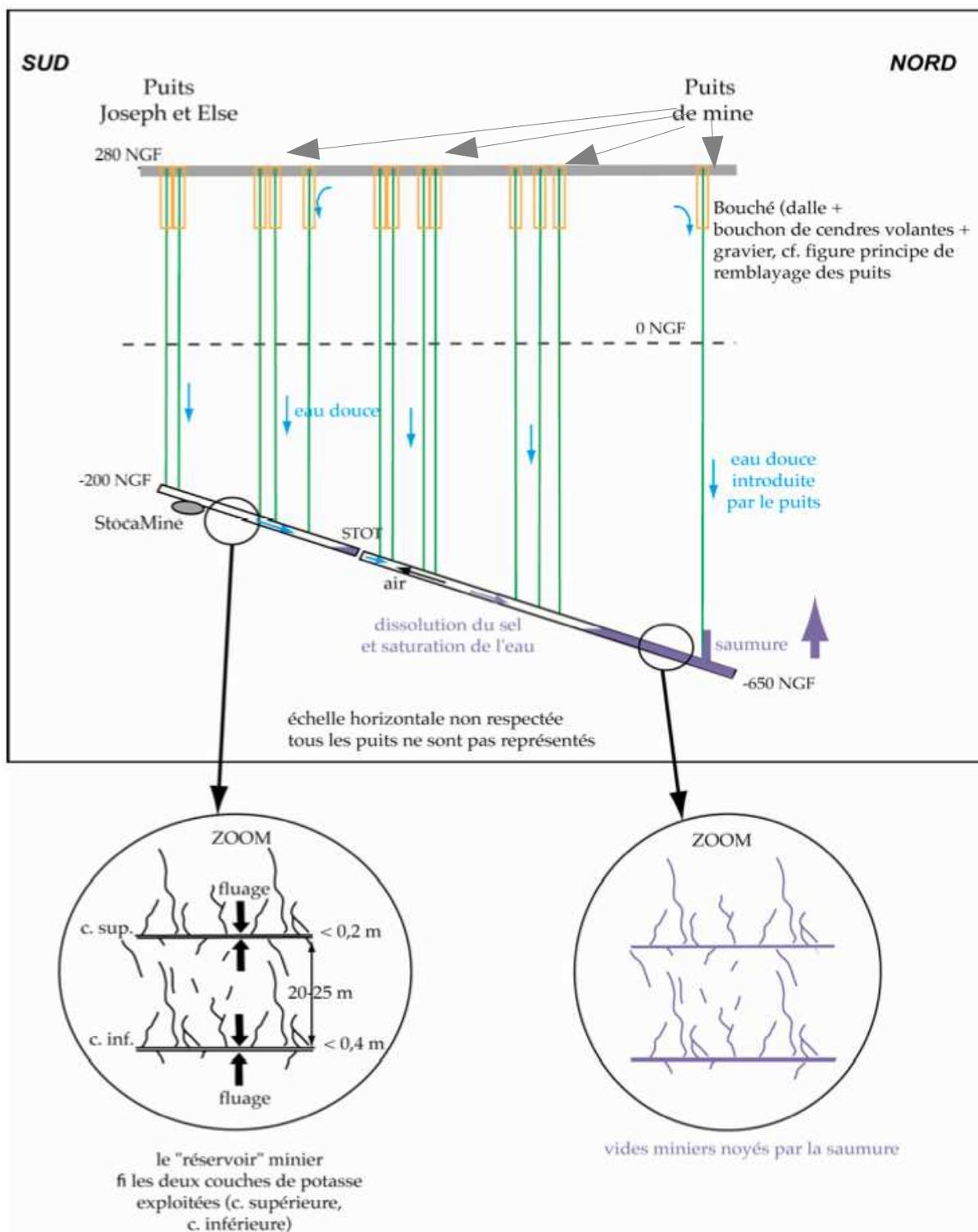


Illustration 31 : Schéma de principe de l'ennoyage des travaux miniers

En ce qui concerne le rôle de ce stot, des extraits de plans des travaux miniers montrent qu'il a localement été rogné jusqu'à ne mesurer parfois que 4 à 5 m de largeur. Compte tenu des perturbations engendrées par le foudroyage des tailles, il semble très peu probable qu'un stot de seulement quelques mètres de largeur ait pu rester intact ou qu'il le reste à long terme. Cette hypothèse, confirmée par les résultats d'une modélisation géomécanique, et conduisent donc à considérer les

parties nord et sud comme constituant un compartiment unique (scénario de référence pour l'ennoyage). La partie sud appelée Mine Amélie a présenté 5 puits d'exploitation minière dont les puits Joseph et Else à partir desquels ont été creusées les galeries de Stocamine.

### 3.1.1. LES VIDES MINIERS ET LEUR EVOLUTION DANS LE TEMPS

Les vides laissés par l'extraction de la potasse se ferment progressivement. L'évolution des vides miniers peut être décomposée comme suit :

- Le volume qualifié d'« initial » des vides miniers est calculé par l'intermédiaire des tonnages de potasse exploités. Il se répartit entre le volume des tailles avant leur foudroyage (ce qui représente environ 95% du volume total des vides miniers) et celui des voies ou galeries (environ 5% du total).
- Après foudroyage, le volume de vides restant au niveau des tailles diminue car une partie du vide se reporte en surface (affaissements actif en surface pendant la phase d'exploitation). La diminution de volume joue essentiellement au niveau des tailles et non des galeries.
- Le fluage du sel conduit ensuite à une fermeture très lente des galeries et, au niveau des tailles foudroyées, la compaction des terrains entraîne également une réduction du volume des vides.

Toutefois, un autre phénomène vient au contraire augmenter le volume à prendre en compte en souterrain : la dissolution. L'eau douce pénétrant dans la mine dissout sur son parcours le sel sur lequel elle s'écoule (jusqu'à atteindre le taux de saturation de la saumure), augmentant ainsi le volume des vides.

Après synthèse des études antérieures et nouvelles modélisations menées dans le cadre de l'expertise 2009-2011, **l'INERIS retient les hypothèses suivantes (en bleu le scénario de référence) :**

- le stot est perméable et les compartiments nord et sud sont en communication ;
- le volume initial de vides créé par les travaux miniers d'exploitation de la potasse est de 200 Millions de m<sup>3</sup>. L'âge moyen des travaux a été évalué à 48 ans (en 2010), conduisant à retenir l'hypothèse d'une fermeture des vides déjà bien engagée. L'état de contrainte et de température étant des facteurs accentuant la fermeture des vides, l'hypothèse de vides fermés en-dessous d'une profondeur de 750 m a de plus été retenue..

Le **volume initial avant affaissement a alors été estimé à 171 Mm<sup>3</sup>** (tableau 2).

| Puits           | Volume total | Volume de voies | Volume de tailles |
|-----------------|--------------|-----------------|-------------------|
| Amélie 1        | 76,5         | 3,4             | 73,1              |
| Amélie 2        | 2,3          | 0,1             | 2,2               |
| Max             | 1,3          | 0,1             | 1,2               |
| Joseph, Else    | 10,6         | 0,5             | 10,1              |
| Marie, Louise   | 41,2         | 1,9             | 39,3              |
| S, B, S**       | 23,9         | 1,1             | 22,8              |
| Ungersheim 1, 2 | 1,4          | 0,1             | 1,3               |
| Alex            | 4,2          | 0,2             | 4                 |
| Rodolphe 1, 2   | 10,2         | 0,5             | 9,7               |
| Total           | 171,6        | 7,9             | 163,7             |

\* Schoenensteinbach, Berrwiller et Staffelfelden

Tableau 2 : Volume de vides dans le sous sol suite à exploitation et fermeture des vides profonds (Mm<sup>3</sup>)

- **après une phase d'affaissement dynamique** variant entre 3 et 5 ans, le volume des vides résiduels en souterrain varie de 5 à **20 %** (20% pour les panneaux les moins profonds) : l'affaissement initial supprimerait donc 80 à 95 % du vide initial.
- à la suite de l'affaissement initial, les vides souterrains continuent à se refermer sous le poids des terrains sus-jacents avec des vitesses de convergence de :
  - 0,1% par an pour les tailles foudroyées ;
  - **2% par an pour les galeries au niveau de STOCAMINE (soit à une profondeur de l'ordre de 550 m).**
  - à la fin de l'envoyage, les vitesses de fluage seront divisées par 10 à cause de la pression de fluide qui s'opposera à la fermeture des vides.
- En fonction de l'âge des exploitations et des taux de fluage, le volume de vide résiduel en 2010 avait été estimé à 32 Mm<sup>3</sup> (pour un stot non étanche c'est-à-dire mine Amélie + mine Marie-Louise) :

| Secteur étudié       | Volume résiduel de voies (Mm <sup>3</sup> ) | Volume résiduel de tailles selon l'hypothèse de vides résiduels après foudroyage (Mm <sup>3</sup> ) |      |             |
|----------------------|---------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------|-------------|
|                      |                                             | 5%                                                                                                  | 10%  | 20%         |
| <b>Secteur Ouest</b> | 0,6                                         | 8,2                                                                                                 | 16,3 | <b>32,7</b> |
| Mine Amélie          | 0,0                                         | 4,3                                                                                                 | 8,7  | 17,3        |

Tableau 3 : Synthèse des volumes de vides résiduels estimés en 2010

### 3.1.2. LES VOLUMES D'EAU PÉNÉTRANT DANS LA MINE

- **L'introduction d'eau dans la mine se fait par l'intermédiaire des puits** de mine différentes hypothèses ont été envisagées concernant les débits pouvant pénétrer dans l'ancienne exploitation de potasse :
  - l'hypothèse maximale prend en compte les débits qui ont été observés dans les puits au moment de leur foration, en admettant que les équipements des puits vont se dégrader au fil du temps et permettre à l'eau de pénétrer dans les vides souterrains comme elle pénétrait dans la fouille au moment du creusement des puits. Cette hypothèse conduit à un débit entrant dans la mine Amélie (partie sud) de 9800 m<sup>3</sup>/an et un **débit total pour tout le secteur ouest de 105 000 m<sup>3</sup>/an ;**
  - l'hypothèse intermédiaire prend en compte les débits d'exhaure qui ont été observés dans la mine en exploitation (puits de mine ouvert et étanchéité imparfaite). Cette hypothèse conduit à un débit entrant dans la mine Amélie (partie sud) de 5100 m<sup>3</sup>/an et un débit total pour tout le secteur ouest de 58 000 m<sup>3</sup>/an ;
  - l'hypothèse basse tient compte des débits résiduels à la base des puits de mine après fermeture et remblayage. Cette hypothèse conduit à un débit entrant dans la mine Amélie (partie sud) de 1800 m<sup>3</sup>/an et un débit total pour tout le secteur ouest de 22 000 m<sup>3</sup>/an.
- **En 2010**, il avait été considéré que (compte tenu des dates de remblayage des puits de mine – donc d'arrêt de l'exhaure dans les différents quartiers) l'ennoyage avait commencé en moyenne depuis 19 ans et que en conséquence, le **volume de liquide dans les travaux miniers** souterrains était de **2,06 Mm<sup>3</sup>**.
- Le dernier phénomène pris en compte est que l'introduction d'eau douce dans la mine entraîne des **phénomènes de dissolution** qui vont augmenter le volume des vides.

En se basant sur l'hypothèse d'une création de vides correspondant à **24% du volume d'eau introduit**, l'INERIS envisage une création supplémentaire de vide de 1 à 6 Mm<sup>3</sup> pour tout le secteur ouest et 0,3 à 1 Mm<sup>3</sup> pour sa partie sud (Mine Amélie).



### 3.1.3. LES DURÉES D'ENNOYAGE DES VIDES MINIERS

- En se basant sur l'ensemble des hypothèses précitées, l'INERIS avait calculé une durée d'ennoyage prévisionnelle jusqu'en tête des puits de mine remblayés, de **300 ans pour remplir la totalité de l'exploitation minière souterraine dont 240 ans avant d'atteindre le niveau de Stocamine.**

| Hypothèse d'affaissement→ |                                 | Haute      | Moyenne | Basse |
|---------------------------|---------------------------------|------------|---------|-------|
| Hypothèse de débit ↓      |                                 | 20%        | 10%     | 5%    |
| <b>Haute</b>              | <b>105 000 m<sup>3</sup>/an</b> | <b>304</b> | 195     | 123   |
| Moyenne                   | 58 000 m <sup>3</sup> /an       | 425        | 286     | 182   |
| Basse                     | 22 000 m <sup>3</sup> /an       | 644        | 490     | 341   |

Tableau 4 : Temps d'ennoyage calculé à partir de 2010 pour la totalité de la mine de potasse ouest (années)

| Hypothèse d'affaissement→ |                                 | Haute      | Moyenne | Basse |
|---------------------------|---------------------------------|------------|---------|-------|
| Hypothèse de débit ↓      |                                 | 20%        | 10%     | 5%    |
| <b>Haute</b>              | <b>105 000 m<sup>3</sup>/an</b> | <b>240</b> | 150     | 100   |
| Moyenne                   | 58 000 m <sup>3</sup> /an       | 340        | 220     | 140   |
| Basse                     | 22 000 m <sup>3</sup> /an       | 560        | 400     | 270   |

Tableau 5 : Temps d'ennoyage calculé à partir de 2010 pour atteindre Stocamine (années)

NB : dans les tableaux précédents, l'hypothèse d'affaissement est représentée par la valeur du vide résiduel dans la mine après affaissement initial.

N.B. : La mine Amélie représente près de 53% des vides et seulement 10% des débits entrant dans la mine. Ainsi, si elle se trouve isolée de l'ensemble minier ouest, son temps de remplissage sera significativement plus élevé (>1500 ans).

## 3.2. ANALYSE DES HYPOTHESES AU REGARD DES MESURES DISPONIBLES

### 3.2.1. LES VIDES MINIERES ET LEUR ÉVOLUTION DANS LE TEMPS

- **L'hypothèse du vide résiduel après affaissement dynamique** varie de 5 à **20 % dans l'étude INERIS** (20% pour les panneaux les moins profonds) : l'affaissement dynamique supprimerait donc 80 à 95 % du vide initial. De plus **l'hypothèse d'une fermeture totale des vides créés en dessous d'une profondeur de 750 m a été retenue.**

Au regard des observations faites au niveau des forages de surveillance VAPB2 et VLPB2, il apparaît que la deuxième hypothèse (fermeture totale des vides créés en dessous d'une profondeur de 750 m) est une hypothèse très pénalisante. En effet, les forages de reconnaissance sont allés traverser des panneaux qui sont parmi les plus profonds de l'exploitation minière (900 à 1000 m) et ces panneaux présentent un vide résiduel non négligeable (9 à 13%).

La mesure des vides résiduels dans les panneaux profonds (9 à 13 %) après affaissement et début de convergence (age de l'exploitation = 40 ans en VAPB2 et 30 ans en VLPB2), alors qu'on se situe dans les zones de plus fortes contraintes, laisse supposer que dans les panneaux exploités moins profonds (tout le reste de la mine), les volumes résiduels sont probablement très supérieurs à cet ordre de grandeur de 10%.

L'analyse des points de nivellement situés à l'aplomb des derniers panneaux exploités (Raedersheim, Bollwiller, Reinningue, Pulversheim) va également dans ce sens : l'affaissement dynamique à l'aplomb de ces panneaux a été inférieur à 75 % de la hauteur exploitée.

**L'hypothèse d'un vide résiduel de 20 % après affaissement dynamique retenue par INERIS comme scénario de référence, est la valeur la plus probable par rapport aux trois hypothèses envisagées. Les hypothèses de 5 et 10 % semblent vraiment sous-estimées au regard des données actuellement disponibles. Il reste donc au niveau des anciens panneaux exploités une porosité qui représente, en cumulé, des volumes importants de vides.**

- Le calcul de la durée de remplissage des vides miniers a été fait en tenant compte de **vitesse de fermeture de 0,1 % par an pour les tailles foudroyées en moyenne (pour la mine dans son ensemble et pour toute la durée du phénomène).**

Si l'on admet que la diminution du volume des vides en souterrain se fait

uniquement par mouvement vertical (écrasement et fluage liés à la pression exercée par les terrains sus-jacents) on peut alors tenter un rapprochement entre la diminution du volume des vides en souterrain et les mouvements résiduels verticaux observés en surface (voir tableau 6).

Avec une diminution des vides de 0,1% par an, un affaissement initial de l'ordre de 75 %, nous avons calculé les mouvements résiduels aux points topographiques de référence et avons comparé ces calculs avec les mouvements mesurés :

- entre 2014 et 2019 par le cabinet Jung
- et entre 2004 et 2010 par ENVISAT.

Le tableau suivant présente ces calculs et montre que les valeurs calculées pour une vitesse homogène de convergence de 0,1% par an sont très inférieures aux valeurs des déplacements mesurés en surface dans les 15 dernières années.

| Quartier (points)    | Profondeur | Date d'exploitation | Epaisseur initiale | Mouvement résiduel cumulé (cm) calculé entre 2014 et 2019 avec 0,1% de convergence par an | Mouvement résiduel mesuré entre 2014 et 2019 (cabinet Jung) |
|----------------------|------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
|                      | m/sol      |                     | m                  | cm*                                                                                       | cm*                                                         |
| Raetersheim          | 825        | 1995                | 3,05               | 0,34                                                                                      | 2,2 à 2,8 à coté du panneau                                 |
| Bollwiller (4, 5)    | 885        | 1995                | 4,5                | 0,5                                                                                       | 2 à 4,5 à l'aplomb du panneau                               |
| Feldkirch            | 680        | 1947                | 4,6                | 0,49                                                                                      | 1,4 à l'aplomb du panneau                                   |
| Staffelfelden (1, 2) | 685        | 1980                | 5,3                | 0,58                                                                                      | 1,3 à 1,5 à l'aplomb du panneau                             |
| Staffelfelden (5,6)  | 720        | 1958                | 5,6                | 0,6                                                                                       | 2,9 à 3 à l'aplomb du panneau                               |
| Wittelsheim (4,5)    | 710        | 1970                | 6                  | 0,65                                                                                      | 2,6 à 2,7 à l'aplomb du panneau                             |
| Reiningue (3, 4)     | 445        | 1999                | 2,5                | 0,28                                                                                      | 0,5 à 0,6 à l'aplomb du panneau                             |

\* En admettant un affaissement initial de 75% dans les 5 premières années

| Quartier (points) | Profondeur | Date d'exploitation | Epaisseur initiale | Mouvement résiduel cumulé (cm) calculé entre 2004 et 2010 avec 0,1% de convergence par an | Mouvement résiduel mesuré entre 2004 et 2010 (Satellite ENVISAT) |
|-------------------|------------|---------------------|--------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
|                   | m/sol      |                     | m                  | cm*                                                                                       | cm*                                                              |
| Raetersheim       | 825        | 1995                | 3,05               | 0,41 (0,7 mm/an)                                                                          | 4 à 6 mm/an à l'aplomb du panneau                                |
| Bollwiller (193)  | 885        | 1995                | 4,5                | 0,6 (1 mm/an)                                                                             | 4 à 6 mm/an à l'aplomb du panneau                                |
| Pulversheim       | 1000       | 1994                | 4                  | 0,53 (0,9 mm/an)                                                                          | 6 à 9 mm/an à l'aplomb du panneau                                |

\* En admettant un affaissement initial de 75% dans les 5 premières années

Tableau 6 : Comparaison des convergences calculées dans les travaux miniers et des mouvements de terrain mesurés en surface (topographie de terrain et mesures satellites)

Les mouvements mesurés au sol par des mesures de terrain ou par des mesures satellites sont encore (entre 2004 et 2019<sup>11</sup>) de l'ordre du demi-centimètre par an. Si l'on considère que ces mouvements sont la réplique en surface de la convergence se produisant dans les travaux miniers souterrains, ils révèlent que les convergences actuelles sont beaucoup plus fortes que l'hypothèse (homogène de 0,1%/an) retenue dans l'étude INERIS pour la convergence des travaux miniers.

11 Et en dehors de quelques zones particulières au niveau desquelles les mouvements sont plus importants.

Pour obtenir des vitesses équivalentes aux mouvements résiduels mesurés en surface actuellement, il faut envisager des convergences de 0,5 à 1 % par an dans les travaux miniers foudroyés exploités (y compris anciens (voir tableau : Feldkirch (1947), Staffelfelden 5,6 (1958)).

**Si on considère que les observations de surface se corrélient avec l'évolution des vides souterrains alors le volume de vide se réduit de 70 à 80 % en 5 ans puis la réduction s'atténue au fil du temps. Cette réduction de vide reste mesurable en surface (mais non destructrice (quelques mm par an)) sur une quarantaine d'années voire une cinquantaine d'années, puis le mouvement est de moins en moins significatif. Cette dernière observation va dans le sens d'un taux de fermeture des vides qui devient très faible (cohérent avec 0,1%/an) au bout d'une quarantaine d'années. Les mouvements de surface ne sont ainsi pas mesurables au-dessus des secteurs de travaux anciens.**

**L'analyse des données satellitaires a démontré une possibilité de suivi par ce moyen, avec un traitement de données approprié.**

**Ces observations de surface semblent montrer que l'épaisseur exploitée ne se "reporte" pas en totalité en surface ce qui signifie qu'il reste bien des volumes de vides en souterrain.**

**Dans les secteurs profonds, il reste un peu plus de 10% mais ces secteurs sont encore en fermeture (car assez récents). L'encadrement d'un volume global entre 5 à 20% du volume initial de la mine reste cohérent avec les observations.**

### 3.2.2. LES VOLUMES D'EAU PÉNÉTRANT DANS LA MINE

**L'introduction d'eau dans la mine se fait par l'intermédiaire des puits** de mine différentes hypothèses ont été envisagées concernant les débits pouvant atteindre les travaux miniers : INERIS<sup>12</sup> a retenu l'hypothèse maximale prenant en compte les débits qui ont été observés dans les puits au moment de leur foration. Cette hypothèse conduit à un **débit entrant dans la mine Amélie (partie sud) de 9800 m<sup>3</sup>/an et un débit total pour tout le secteur ouest de 105 000 m<sup>3</sup>/an.**

L'hypothèse basse aurait tenu compte des débits résiduels à la base des puits de mine après fermeture et remblayage. Cette hypothèse conduit à un débit environ 5 fois plus faible que l'hypothèse privilégiée par INERIS (débit entrant mine Amélie 1800 m<sup>3</sup>/an et débit total secteur ouest de 22 000 m<sup>3</sup>/an)

Les observations faites par MDPA (voir rapport en annexe 4) à la base de puits Max, Amélie 1 et 2 montrent qu'après remblayage, le débit résiduel à la base des puits tend à diminuer fortement dès les premières années. Le suivi réalisé à la base des puits Amélie 2 a révélé un débit entrant de l'ordre de 2,3 m<sup>3</sup>/j en 2009 dans les premières semaines suivant le remblayage et qui est devenu un

12 par sécurité l'INERIS a volontairement retenu une hypothèse qui conduit à maximiser les incidences potentielles.

« suintement » en aout 2012.

| Débit (m <sup>3</sup> /an) →<br>Puits ↓ | Calcul<br>Darcy | Calcul<br>INERIS | Débit d'exhaure  |               | Débit<br>maximum |
|-----------------------------------------|-----------------|------------------|------------------|---------------|------------------|
|                                         |                 |                  | Lourdell (2004b) | MDPA (2008)   |                  |
| Alex                                    | 420             | 1142             | 10 000           | 7 300         | 27 000           |
| Rodolphe 1                              | 1799            | 4827             | à<br>37 000*     | 2920 - 3285   | 4827             |
| Rodolphe 2                              | 2873            | 7727             |                  | 365 - 1460    | 7727             |
| Ungersheim 1                            | 2383            | 6411             | 1500 - 5000      | -             | 6411             |
| Ungersheim 2                            | 3038            | 8173             |                  | 2555 - 3650   | 8173             |
| Berrwiller                              | 2677            | 7298             | 3000 - 7000      | 3000 - 7000   | 7298             |
| Staffelfelden                           | 1418            | 3810             | 20 000           | 2190          | 20 000           |
| Marie                                   | 1306            | 3508             | 1400 - 12 000    | 1825 - 2190   | 3508             |
| Louise                                  | 1395            | 3746             |                  | 9 125         | 9125             |
| Schoenenst.                             | 2663            | 6261             | 11 000           | 9125 - 11 000 | 11 000           |
| Amélie 1                                | 547             | 1466             | 2000 - 3000      | 1095          | 1466             |
| Amélie 2                                | 366             | 989              |                  | 2920          | 2920             |
| Max                                     | 330             | 894              | 3500             | 3500 - 3650   | 3650             |
| Joseph                                  | 255             | 871              | 47 - 480         | -             | 871              |
| Else                                    | 255             | 871              |                  | -             | 871              |
| TOTAL                                   | 21 724          | 57 994           | 45 160 - 98 980  |               | 104 847          |

\* dont une venue d'eau d'un débit de 17 000 m<sup>3</sup>/an qui a affecté le puits Alex de 1964 à 1967

Tableau 7: Gamme de débits d'ennoyage des puits du secteur Ouest (selon INERIS, étude hydrogéologique de l'ennoyage 2011)

**On ne peut pas exclure qu'à terme les débits entrant dans la mine augmentent jusqu'à atteindre la valeur observée pendant la foration en lien avec la dégradation des équipements de puits de mine, mais, pour l'instant, c'est plutôt un phénomène inverse qui est observé avec l'assèchement des venues d'eau au pied des puits les plus récemment remblayés<sup>13</sup> suite à leur fermeture.**

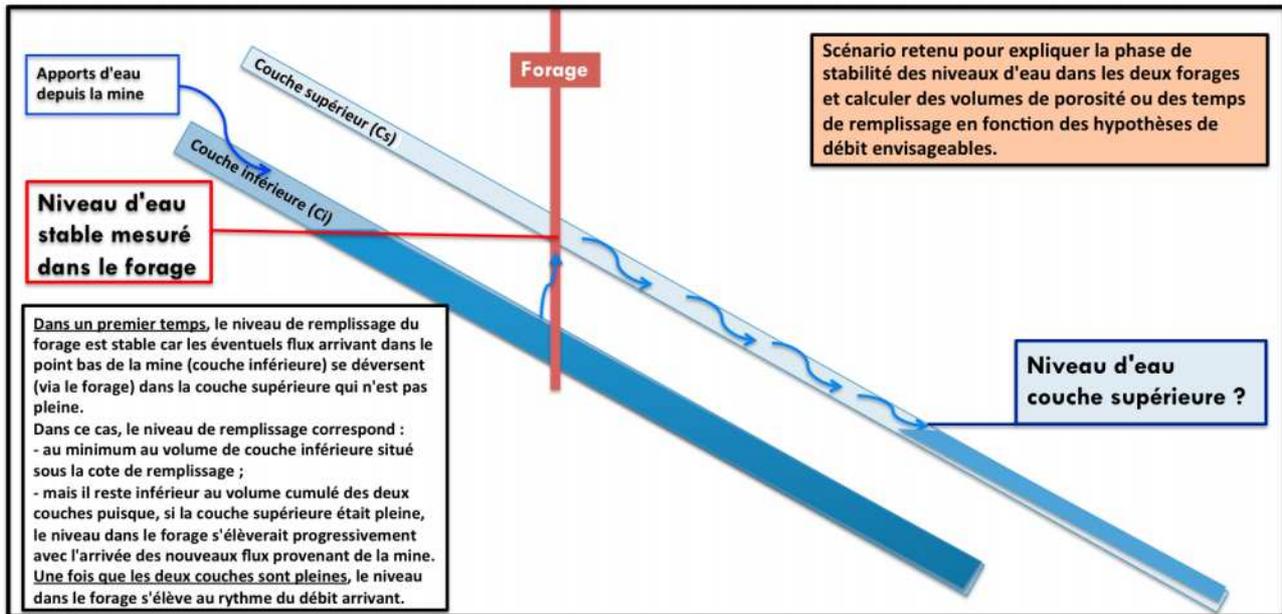
- **L'hypothèse retenue par INERIS est très sécuritaire en ce sens qu'elle retient la valeur de débit la plus élevée envisageable et correspondant à une situation dégradée au niveau des puits.**
- **Avec cette hypothèse, les volumes de fluide présents dans la mine en 2010 auraient été de 2 Mm<sup>3</sup> en 2010 soit environ 3 Mm<sup>3</sup> en 2020.**

<sup>13</sup> Ces observations sont en tous cas représentatives des 3 puits sur lesquels elles ont été faites. Elles ne peuvent pas être étendues aux autres puits du secteur Ouest, en effet, la technique de remblayage des puits mise en œuvre par les MDPA n'a pas cessé d'évoluer au cours du temps, dans le sens de la recherche d'une meilleure étanchéité. Les premiers puits remblayés n'ont de ce fait pas bénéficié de soins aussi poussés.

### 3.2.3. LES DURÉES D'ENNOYAGE DES VIDES MINIER

En se basant sur les hypothèses INERIS, un volume de 3 Mm<sup>3</sup> de fluide devrait être présent dans la mine en 2020 dont environ 1/10<sup>e</sup> dans la mine Amélie.

Le suivi du niveau de remplissage dans les forages de surveillance a montré dans un premier temps sur les deux ouvrages (VAPB2 et VLPB2) une phase de baisse rapide suivie d'une stagnation puis pour VLPB2 d'une lente élévation.



L'hypothèse qui peut être faite au vu de ces éléments est que les forages aient traversé la couche supérieure qui était sèche, puis aient perforé la couche inférieure qui était pleine. La couche inférieure, alimentée par les arrivées de saumure provenant de la mine ayant atteint un niveau de remplissage plus élevé que la cote de recoupe de la couche supérieure, le forage a mis en liaison les 2 couches (ou plus exactement les deux zones déstructurées liées à l'exploitation des couches) et a ainsi provoqué la vidange de la couche inférieure vers la couche supérieure.

Tant que le niveau de remplissage de la couche supérieure n'atteint pas la cote de recoupe du forage, le niveau reste statique dans le forage ; ensuite le niveau s'élèvera de façon coordonnée entre les deux couches au rythme des arrivées d'eau.

Si l'on admet cette hypothèse, on peut calculer :

- soit les temps d'ennoyage minimum (couche inférieure) et maximum (couche inférieure + couche supérieure) nécessaires pour atteindre au droit du forage les niveaux d'eau actuellement observés. Ce temps peut être estimé à partir des volumes de couches exploitées situées en dessous du niveau d'ennoyage en

tenant compte des porosités estimées au niveau de ces couches et des débits introduits dans la mine depuis l'arrêt de l'exhaure (4 hypothèses envisageables).

- soit les porosités équivalentes dans les couches en comparant les volumes initiaux de vide dans les couches en dessous de la cote d'ennoyage et les débits introduits dans la mine depuis l'arrêt de l'exhaure et en admettant que seule la couche inférieure est pleine ou bien que les deux couches sont pleines jusqu'au niveau observé dans le forage<sup>14</sup>.

La figure (illustration 32) et les tableaux suivants (tableau 8 et tableau 9), présentent ces hypothèses de calcul.

Les débits pris en compte sont issus :

- des puits Amélie 1 et 2 pour VAPB2,
- Schoenensteinbach pour VLPB2.

---

14 Ce qui semble être le cas en VLPB2 puisque le niveau semble s'élever lentement depuis quelques mois.

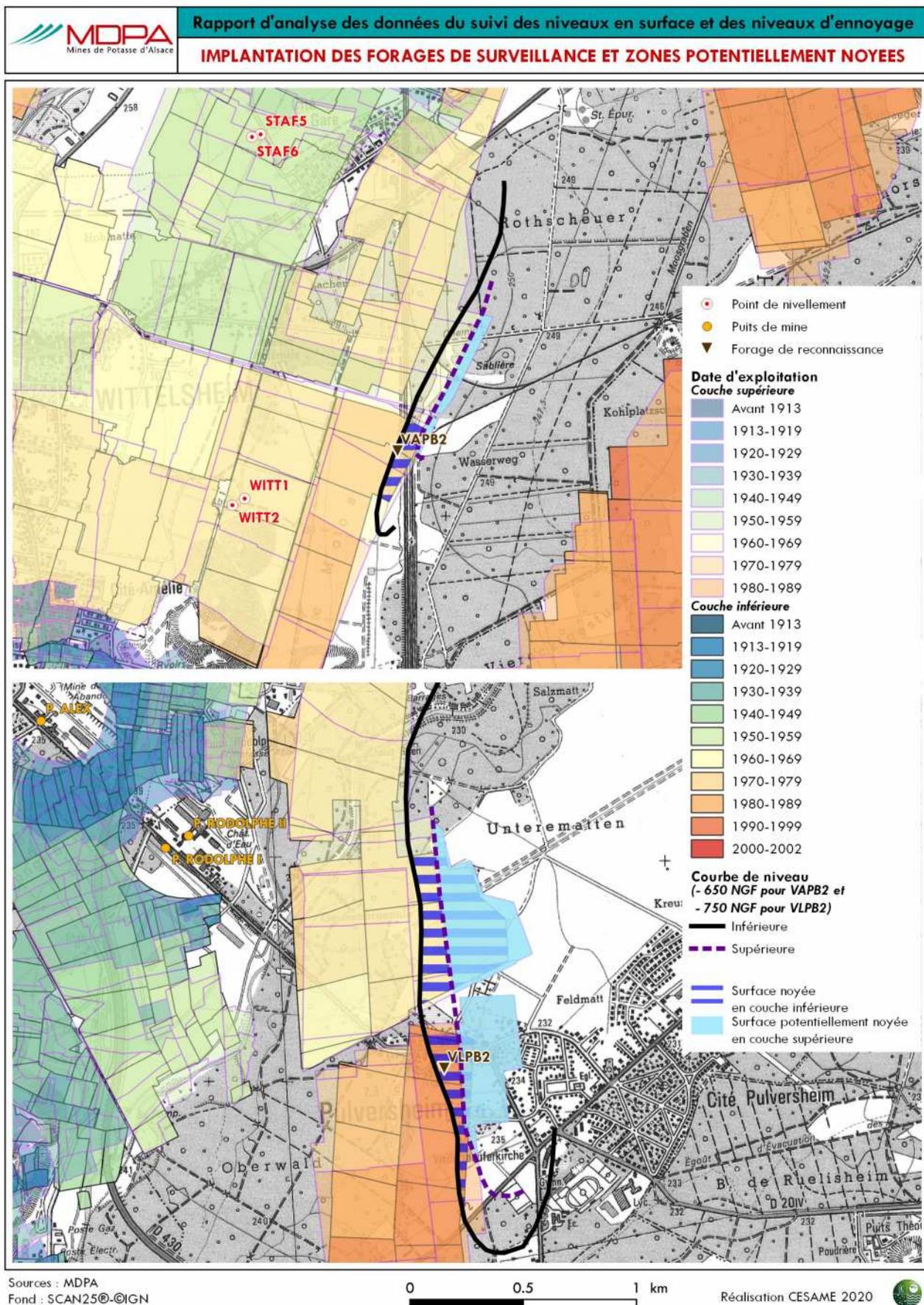


Illustration 32 : Zones potentiellement noyées au niveau des forages VAPB2 et VLPB2

## ➤ Estimation des temps de remplissage en admettant une porosité résiduelle de 10% au niveau des couches exploitées.

| Calcul des volumes de vides initiaux dans le sous sol sous la cote - 655 NGF<br><br>(Niveau d'eau VAPB2 le 9 Avril 2020<br>NE = -655 NGF)                                                                                                                                   |            |                |                                                            | Débit susceptible de pénétrer dans la mine (m <sup>3</sup> /j) |                       |                      |                       |                                                                                                                                                                               |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |                |                                                            | Mesuré avant remblayage                                        | Hypothèse Maxi Ineris | Hypothèse Moy Ineris | Hypothèse Mini Ineris | Ordre de grandeur des volumes d'eau introduits dans la mine selon hypothèses de débit journalier depuis arrêt de l'exhaure (remblayage Amélie 1 : 2007-2008, Amélie 2 : 2011) |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |                |                                                            | 7                                                              | 12                    | 6,72                 | 2,5                   |                                                                                                                                                                               |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |                |                                                            | 28 000                                                         | 48 000                | 26 880               | 10 000                |                                                                                                                                                                               |  |
| surface <NE                                                                                                                                                                                                                                                                 | H exploité | V0 exploité    | Temps de remplissage à ce débit si porosité résiduelle 0,1 |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                                                               |  |
| m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                              | m          | m <sup>3</sup> | années                                                     | années                                                         | années                | années               |                       |                                                                                                                                                                               |  |
| CS                                                                                                                                                                                                                                                                          | 46 362     | 1,85           | 85 770                                                     |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                                                               |  |
| CI                                                                                                                                                                                                                                                                          | 23 944     | 3,4            | 81 410                                                     | 3,19                                                           | 1,86                  | 3,32                 | 8,92                  |                                                                                                                                                                               |  |
| Total                                                                                                                                                                                                                                                                       |            |                | 167 179                                                    | 6,54                                                           | 3,82                  | 6,82                 | 18,32                 |                                                                                                                                                                               |  |
| Conclusion : Si la porosité résiduelle est de 10 % alors le débit de remplissage est compris entre 2,5 et 6,72 m <sup>3</sup> /j, puisque après 9 (à 12 ans) depuis l'arrêt de l'exhaure et le remblayage des puits Amélie, la couche supérieure n'est toujours pas pleine. |            |                |                                                            |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                                                               |  |

| Calcul des volumes de vides initiaux dans le sous sol sous la cote - 750 NGF<br><br>(Niveau d'eau VLPB2 le 28 Avril 2020<br>NE = -750 NGF)                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |            |                |                                                            | Débit susceptible de pénétrer dans la mine (m <sup>3</sup> /j) |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |                |                                                            | Mesuré avant remblayage                                        | Hypothèse Maxi Ineris | Hypothèse Moy Ineris | Hypothèse Mini Ineris | Volumes d'eau introduits dans la mine selon hypothèses de débit journalier depuis arrêt de l'exhaure (remblayage Schoenensteinbach : 07/1999) |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |                |                                                            | 25                                                             | 30,14                 | 17,15                | 7,29                  |                                                                                                                                               |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |            |                |                                                            | 189 500                                                        | 228 500               | 129 990              | 55 250                |                                                                                                                                               |  |
| surface <NE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | H exploité | V0 exploité    | Temps de remplissage à ce débit si porosité résiduelle 0,1 |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |
| m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | m          | m <sup>3</sup> | années                                                     | années                                                         | années                | années               |                       |                                                                                                                                               |  |
| CS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 118 830    | 1,75           | 207 953                                                    |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |
| CI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 44 220     | 4,0            | 176 880                                                    | 1,94                                                           | 1,61                  | 2,83                 | 6,65                  |                                                                                                                                               |  |
| Total                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |            |                | 384 833                                                    | 4,22                                                           | 3,50                  | 6,15                 | 14,46                 |                                                                                                                                               |  |
| Conclusion : Si la porosité résiduelle est de 10 % alors le débit de remplissage est très faible puisque après 20,5 ans depuis le remblayage du puits Schoenensteinbach la couche supérieure finit juste de se remplir, alors qu'elle aurait dû être pleine en 14,46 ans avec le débit minimum envisagé par INERIS.<br><u>Le débit correspondant à une porosité de 10 % et un temps de remplissage de 20,5 ans serait de 5 m<sup>3</sup>/j.</u> |            |                |                                                            |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |

Tableau 8 : Estimation des temps de remplissage en VAPB2 et VLPB2 pour une porosité de 10%

À gauche des tableaux (partie orange) calcul du volume initial de vides miniers en dessous du niveau de remplissage actuel, en couche inférieure (Ci) et en couche supérieure (Cs).

À droite en haut, calcul des volumes d'eau introduits dans la mine, depuis l'arrêt de l'exhaure et le remblayage des puits, selon différentes hypothèses de débit.

À droite en bas, calcul d'un temps de remplissage de la couche inférieure (Ci) ou des deux couches (total) en fonction des volumes d'eau introduits dans la mine, depuis l'arrêt de l'exhaure et le remblayage des puits et en admettant une porosité résiduelle de l'ordre de 10 % dans les couches (comme observé par analyse de l'imagerie de paroi).

Dans les deux cas, avec la gamme de débit proposée comme hypothèses par l'INERIS, soit les deux couches auraient du être envoyées soit le niveau de saumure aurait du être nettement plus haut dans la couche inférieure.

Il ressort de ces calculs que si la porosité résiduelle au niveau des couches exploitées est effectivement de l'ordre de 10%, comme cela a été estimé par interprétation de l'imagerie de paroi, alors les débits de remplissage moyens depuis les dates de remblayage des puits de mine sont :

- très inférieurs aux débits observés pendant le fonçage des puits (hypothèse maximale de l'INERIS)

- inférieurs à très inférieurs aux débits d'exhaure observés pendant l'exploitation (hypothèse moyenne de l'INERIS), car dans les deux forages les deux couches auraient du être pleines en moins de 7 ans après le remblayage des puits de mine susceptibles d'alimenter la zone (6,82 ans pour VAPB2 et 6,15 ans pour VLPB2, alors que les fermetures datent de 9 à 12 ans pour la mine Amélie et 20,5 ans pour Schoensteinbach).

- inférieurs à  $3,8 \text{ m}^3/\text{j}$ <sup>15</sup> en VAPB2 (possiblement de l'ordre de l'hypothèse mini INERIS ( $2,5 \text{ m}^3/\text{j}$ )).

- de l'ordre de  $5 \text{ m}^3/\text{j}$  en VLPB2 (c'est à dire inférieurs à l'hypothèse minimale INERIS ( $7,29 \text{ m}^3/\text{j}$ )).

### ➤ Estimation du débit arrivant en VLPB2 en admettant une montée du niveau d'eau de 2,65 m

Une remontée de 2,65 m en 10 mois dans VLPB2 représenterait environ 2 400 m<sup>3</sup> de liquide.

Illustration 33 : Schéma : Volume envoyé à VLPB2 en 2019-2020

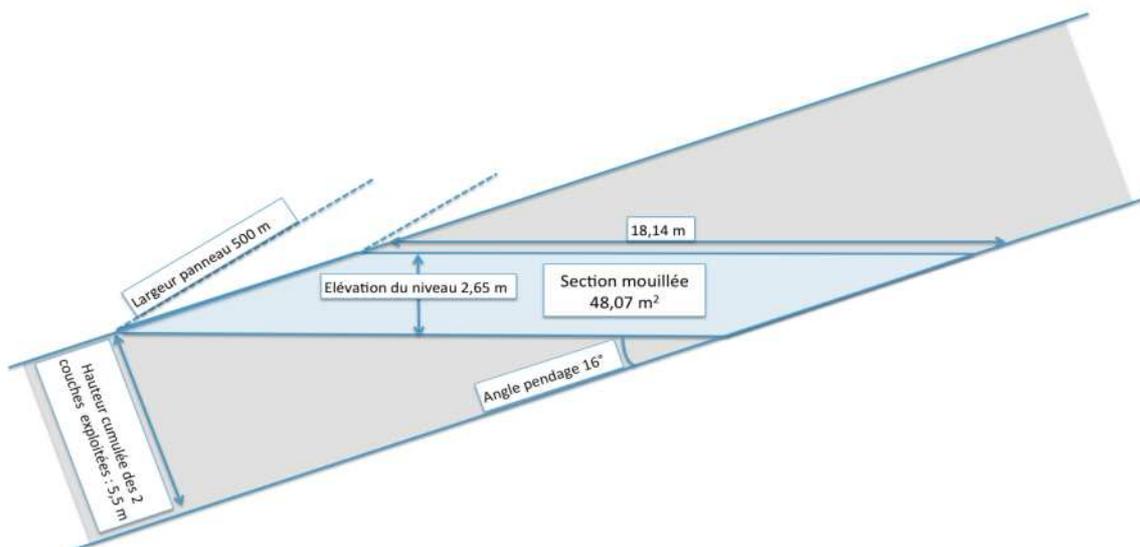


Schéma ci-dessus :

- épaisseur exploitée 5,5 m, pendage 16° ==> largeur du "miroir" 18,14 m,

<sup>15</sup> Débit qui conduirait en VAPB2 à un remplissage des 2 couches (donc à une élévation du niveau) à partir d'avril 2020 pour une porosité de 10 %.

- hauteur d'élévation du niveau de l'eau : 2,65m ==> nouvelle section mouillée par le remplissage en 2019-2020 = 48,07 m<sup>2</sup>,
- largeur du panneau environ 500 m ==> volume noyé 24 035 m<sup>3</sup>,
- avec une porosité de 10 % 2 400 m<sup>3</sup> de liquide,
- ceci représenterait un remplissage de 240 m<sup>3</sup>/mois soit ≈7,8 m<sup>3</sup>/j.

Ce débit correspond en ordre de grandeur au débit minimum envisagé dans les simulations Ineris.

**Ce calcul estimatif confirme donc que les débits d'eau parvenant à pénétrer dans la mine sont actuellement dans l'ordre de grandeur des hypothèses minimales envisagées par Ineris.**

➤ **Estimation des porosités résiduelles en admettant qu'en mars 2020 seule la couche inférieure est remplie ou bien que les 2 couches sont remplies au niveau observé dans le forage.**

| Calcul des volumes de vides initiaux dans le sous sol sous la cote - 655 NGF<br><br>(Niveau d'eau VAPB2 le 9 Avril 2020 NE = -655 NGF)                                                                                                                           |            |                |                                                        | Débit susceptible de pénétrer dans la mine (m <sup>3</sup> /j) |                             |                            |                            |                                                                                                                                                                               |  |  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |                |                                                        | Débit mesuré avant remblayage                                  | Débit hypothèse Maxi Ineris | Débit hypothèse Moy Ineris | Débit hypothèse Min Ineris |                                                                                                                                                                               |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |                |                                                        | 7                                                              | 12                          | 6,72                       | 2,5                        | Ordre de grandeur des volumes d'eau introduits dans la mine selon hypothèses de débit journalier depuis arrêt de l'exhaure (remblayage Amélie 1 : 2007-2008, Amélie 2 : 2011) |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                  |            |                |                                                        | 28 000                                                         | 48 000                      | 26 880                     | 10 000                     |                                                                                                                                                                               |  |  |
| surface <NE                                                                                                                                                                                                                                                      | H exploité | VO exploité    | % de vides correspondant si CI pleine ou CI+CS pleines |                                                                |                             |                            |                            |                                                                                                                                                                               |  |  |
| m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                   | m          | m <sup>3</sup> | %                                                      | %                                                              | %                           | %                          |                            |                                                                                                                                                                               |  |  |
| CS                                                                                                                                                                                                                                                               | 46 362     | 1,85           | 85 770                                                 |                                                                |                             |                            |                            |                                                                                                                                                                               |  |  |
| CI                                                                                                                                                                                                                                                               | 23 944     | 3,4            | 81 410                                                 | 34,39                                                          | 58,96                       | 33,02                      | 12,28                      |                                                                                                                                                                               |  |  |
| <b>Total</b>                                                                                                                                                                                                                                                     |            |                | <b>167 179</b>                                         | <b>16,75</b>                                                   | <b>28,71</b>                | <b>16,08</b>               | <b>5,98</b>                |                                                                                                                                                                               |  |  |
| Conclusion : si le débit résiduel entrant dans la mine par les puits Amélie était compris entre 6 et 12 m <sup>3</sup> /j alors il faudrait des porosités résiduelles très fortes pour expliquer que la couche supérieure ne soit pas pleine au niveau de VAPB2. |            |                |                                                        |                                                                |                             |                            |                            |                                                                                                                                                                               |  |  |

| Calcul des volumes de vides initiaux dans le sous sol sous la cote - 750 NGF<br><br>(Niveau d'eau VLPB2 le 28 Avril 2020 NE = -750 NGF)                                                                                                                                                                                                                                  |            |                |                                                        | Débit susceptible de pénétrer dans la mine (m <sup>3</sup> /j) |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |  |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|----------------|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--|--|
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                |                                                        | Mesuré avant remblayage                                        | Hypothèse Maxi Ineris | Hypothèse Moy Ineris | Hypothèse Mini Ineris |                                                                                                                                               |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                |                                                        | 25                                                             | 30,14                 | 17,15                | 7,29                  | Volumes d'eau introduits dans la mine selon hypothèses de débit journalier depuis arrêt de l'exhaure (remblayage Schoenensteinbach : 07/1999) |  |  |
|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |            |                |                                                        | 189 500                                                        | 228 500               | 129 990              | 55 250                |                                                                                                                                               |  |  |
| surface <NE                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | H exploité | VO exploité    | % de vides correspondant si CI pleine ou CI+CS pleines |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |  |
| m <sup>2</sup>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           | m          | m <sup>3</sup> | %                                                      | %                                                              | %                     | %                    |                       |                                                                                                                                               |  |  |
| CS                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 118 830    | 1,75           | 207 953                                                |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |  |
| CI                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 44 220     | 4,0            | 176 880                                                | 107,13                                                         | 129,18                | 73,49                | 31,24                 |                                                                                                                                               |  |  |
| <b>Total</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |            |                | <b>384 833</b>                                         | <b>49,24</b>                                                   | <b>59,38</b>          | <b>33,78</b>         | <b>14,36</b>          |                                                                                                                                               |  |  |
| Conclusion : si le débit résiduel au puits Schoenensteinbach est effectivement dans la fourchette retenue par INERIS : 7 à 30 m <sup>3</sup> /j, alors les porosités résiduelles sont très fortes. La porosité correspondant au débit minimum envisagé par INERIS et à un temps de remplissage de 20 ans (potentiellement effectif sur VLPB2) serait de l'ordre de 15 %. |            |                |                                                        |                                                                |                       |                      |                       |                                                                                                                                               |  |  |

Tableau 9 : Estimation des vides résiduels en VAPB2 et VLPB2 au regard des dates d'arrêt de l'exhaure

Pour VAPB2, si l'on admet que seule la couche inférieure est pleine en mars 2020, seule l'hypothèse de débit minimale de l'INERIS (2,5 m<sup>3</sup>/j) semble envisageable, car elle conduit à une porosité résiduelle de 12,28 % dans cette couche.

Si l'on retient que la couche supérieure est également pratiquement pleine, on pourrait envisager un débit de remplissage de l'ordre de 6 à 7 m<sup>3</sup>/j qui conduirait toutefois à une porosité résiduelle de l'ordre de 16 à 17 % en moyenne sur les 2 couches exploitées. Hypothèse peu envisageable.

Pour VLPB2 les hypothèses de débit Maxi et moyennes envisagées par INERIS ne sont pas à retenir car elles conduiraient à des porosités résiduelles beaucoup trop fortes (>72 % en Ci).

La seule hypothèse envisageable pourrait être celle du débit minimum mais elle conduit à une porosité résiduelle qui reste très forte (et peu probable) au niveau de la couche inférieure (30,98 %). Le débit moyen ayant alimenté ce secteur est donc inférieur à 7,29 m<sup>3</sup>/j, hypothèse minimale de l'INERIS.

**Il ressort de ces calculs que les débits de remplissage moyens depuis les dates de remblayage des puits de mine sont :**

- très inférieurs aux débits observés pendant le fonçage des puits (hypothèse maximale de l'INERIS) et aux débits d'exhaure observés pendant l'exploitation (hypothèse moyenne de l'INERIS), pour VLPB2.
- **potentiellement de l'ordre de l'hypothèse mini INERIS en VAPB2 – Mine Amélie**
- **inférieurs à l'hypothèse minimale INERIS en VLPB2 – Mine Marie Louise.**

### 3.2.4. CONCLUSIONS PAR RAPPORT AU TEMPS DE REMPLISSAGE RETENU DANS L'ÉTUDE INERIS DE 2011 ET REPRIS DANS LE DOSSIER DE DEMANDE D'AUTORISATION DE 2015

Le paragraphe suivant reprend et commente les éléments du paragraphe 3.1.

➤ « **En 2010**, il avait été considéré que (compte tenu des dates de remblayage des puits de mine – donc d'arrêt de l'exhaure dans les différents quartiers) l'ennoyage avait commencé en moyenne depuis 19 ans et que en conséquence, le **volume de liquide dans les travaux miniers** souterrains était de **2,06 Mm<sup>3</sup>**. ».

En tenant compte de porosités comprises entre 10 et 20 %, la somme des volumes occupant les zones ennoyées en 2020 au niveau de VAPB2 et VLPB2 (points les plus bas des mines Amélie et Marie-Louise) ne s'élèverait actuellement qu'entre 55 200 et 110 400 m<sup>3</sup>. Soit 2,5 à 5 % du volume envisagé par INERIS en 2010.

Cette valeur est très faible, il est toutefois possible qu'elle ne reflète pas la totalité de l'ennoyage de la mine. On peut en effet envisager que chacun des points bas de la mine soit en train de se remplir indépendamment des autres en recevant les eaux s'infiltrant au niveau des puits de mine.

Au regard de la morphologie de l'exploitation minière, on pourrait individualiser 8 points bas et leur attribuer un (ou plusieurs) puits source d'alimentation ; la figure suivante (illustration 34) reflète cette analyse.

À chaque zone basse on peut attribuer pour chaque puits susceptible de l'alimenter, un débit d'alimentation correspondant soit à l'hypothèse moyenne soit à l'hypothèse mini de l'INERIS<sup>16</sup>. En connaissant la date de remblayage des puits, donc d'arrêt de l'exhaure, on peut calculer le volume qui a pénétré dans la mine jusqu'en 2020, puis le traduire en surface en posant comme hypothèse que l'épaisseur cumulée d'exploitation est de 5,5 m au cœur du bassin minier<sup>17</sup> et que la porosité résiduelle est de 10%.

L'illustration 34 et le tableau 10 présentent ces éléments avec une couleur pour chaque zone basse et chaque puits qui l'alimente.

**Au total en 2020 l'hypothèse la plus probable est que le volume total d'ennoyage de l'exploitation ouest de la mine de potasse d'Alsace soit <500 000 m<sup>3</sup>.**

**L'emprise des zones ennoyées serait <100 ha et représenterait environ 2% de la surface de la zone exploitée.**

16 L'hypothèse haute est abandonnée au vu du présent document et l'hypothèse basse est très nettement privilégiée (en rouge dans le tableau).

17 En bordure extérieur du bassin les épaisseurs de potasse sont plus faibles.

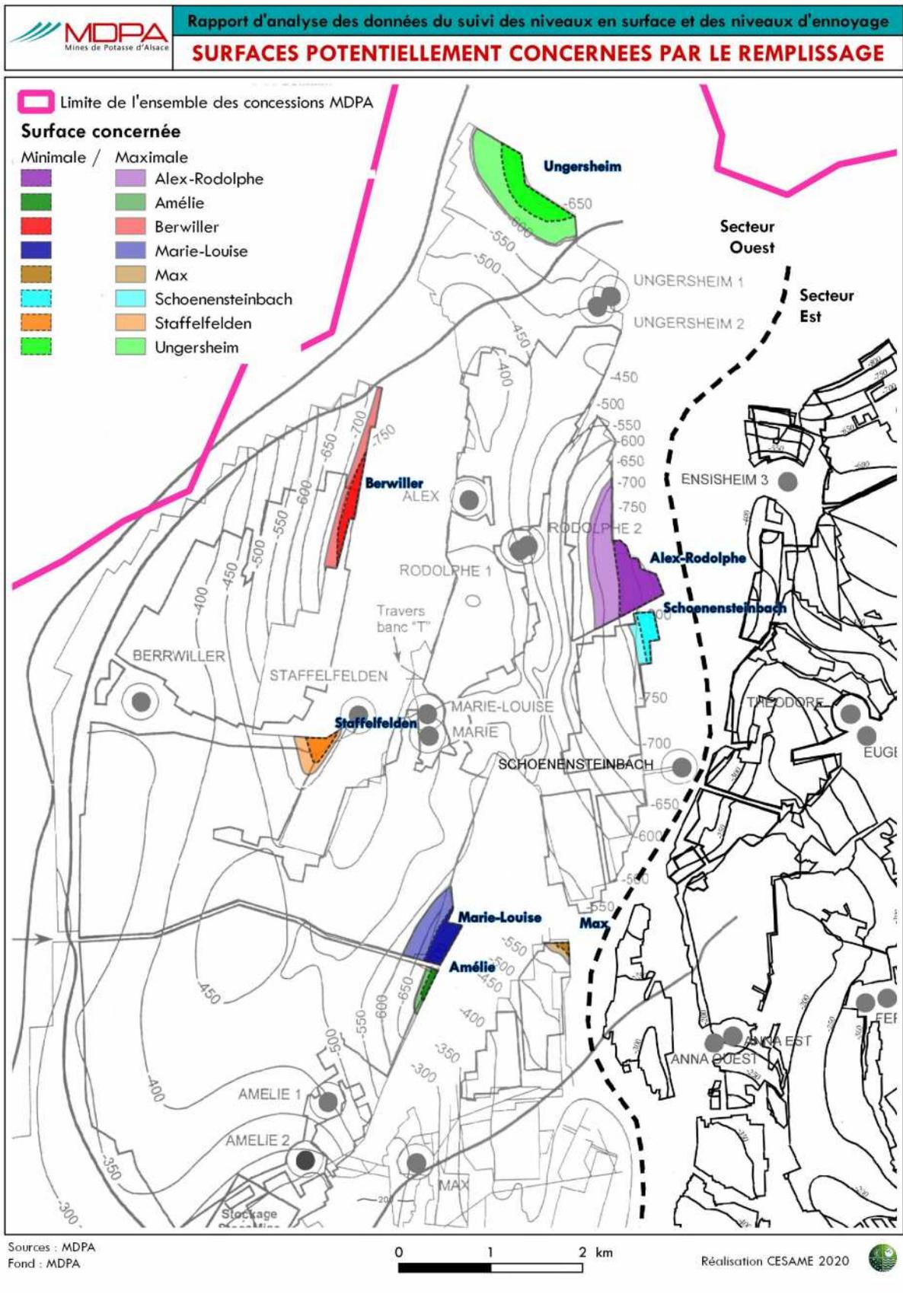


Illustration 34 : Points bas de la mine et surfaces potentiellement concernées par le remplissage en 2020 (pour une porosité résiduelle de 10%)

| Situation 2020   | Nb d'années depuis remblayage | Débit mini retenu INERIS | Débit moyen retenu INERIS | Volume introduit dans la mine en 2020 |                           | Surface noyée équivalente pour une épaisseur cumulée des couches de 5,5 m et une porosité de 10% |                              | En % de la surface totale de la mine (≈4000 ha) |
|------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|
|                  |                               |                          |                           | Volume mini selon INERIS              | Volume moyen selon INERIS | Si Volume mini selon INERIS                                                                      | Si Volume moyen selon INERIS |                                                 |
|                  |                               | m <sup>3</sup> /an       |                           | m <sup>3</sup>                        | m <sup>3</sup>            | ha                                                                                               | ha                           | %                                               |
| Ungersheim1      | 22                            | 2 383                    | 6 411                     | 52 426                                | 141 042                   | 9,5                                                                                              | 25,6                         | 0,54                                            |
| Ungersheim2      | 22                            | 3 038                    | 8 173                     | 66 836                                | 179 806                   | 12,2                                                                                             | 32,7                         |                                                 |
| Alex             | 26                            | 420                      | 1 142                     | 10 920                                | 29 692                    | 2,0                                                                                              | 5,4                          | 0,58                                            |
| Rodolphe2        | 25                            | 2 873                    | 7 727                     | 71 825                                | 193 175                   | 13,1                                                                                             | 35,1                         |                                                 |
| Rodolphe1        | 25                            | 1 799                    | 4 827                     | 44 973                                | 120 675                   | 8,2                                                                                              | 21,9                         | 0,26                                            |
| Marie-Louise     | 21                            | 1 395                    | 3 746                     | 29 293                                | 78 666                    | 5,3                                                                                              | 14,3                         |                                                 |
| Marie            | 21                            | 1 306                    | 3 508                     | 27 426                                | 73 668                    | 3,0                                                                                              | 13,4                         | 0,27                                            |
| Shoenensteinbach | 22                            | 2 663                    | 6 261                     | 58 586                                | 137 742                   | 10,7                                                                                             | 25,0                         |                                                 |
| Staffelfelden    | 18                            | 1 418                    | 3 810                     | 25 524                                | 68 580                    | 4,6                                                                                              | 12,5                         | 0,12                                            |
| Berwiller        | 18                            | 2 677                    | 7 298                     | 48 186                                | 131 364                   | 8,8                                                                                              | 23,9                         | 0,22                                            |
| Max              | 16                            | 330                      | 894                       | 5 280                                 | 14 304                    | 1,0                                                                                              | 2,6                          | 0,02                                            |
| Amélie1          | 13                            | 547                      | 1 466                     | 7 111                                 | 19 058                    | 1,3                                                                                              | 3,5                          | 0,05                                            |
| Amélie2          | 9                             | 366                      | 989                       | 3 294                                 | 8 901                     | 0,6                                                                                              | 1,6                          |                                                 |
| <b>Totaux</b>    |                               | <b>21 215</b>            | <b>56 252</b>             | <b>451 684</b>                        | <b>1 196 673</b>          | <b>82,1</b>                                                                                      | <b>217,6</b>                 | <b>2,05</b>                                     |

En caractères rouges : hypothèse la plus probable au regard des données actuellement disponibles

Tableau 10 : Points bas de la mine, puits susceptibles de les alimenter et surfaces potentiellement concernées par le remplissage (les couleurs se rapportent à celle de l'illustration 34)

➤ « **En 2010**, il avait été considéré que l'introduction d'eau douce dans la mine entraîne des **phénomènes de dissolution** qui vont augmenter le volume des vides.

En se basant sur l'hypothèse d'une création de vides correspondant à **24% du volume d'eau introduit**. »

Cette hypothèse reste évidemment valable. Elle ne concerne pas les zones basses observées par VAPB2 et VLPB2 au niveau desquelles les fluides arrivent sous forme de saumure saturée, mais les zones proches des puits de mine au niveau desquels l'eau arrive non saturée en sels puis se sature rapidement et se transforme en saumure en circulant dans les premières centaines de mètres autour du puits.

On pourrait d'ailleurs envisager que ce soit ce phénomène qui entretienne une convergence résiduelle un peu plus élevée à proximité de tous les puits de mine (illustration 28) et en particulier du puits Staffelfelden et des galeries les plus proches (voir illustration 35).

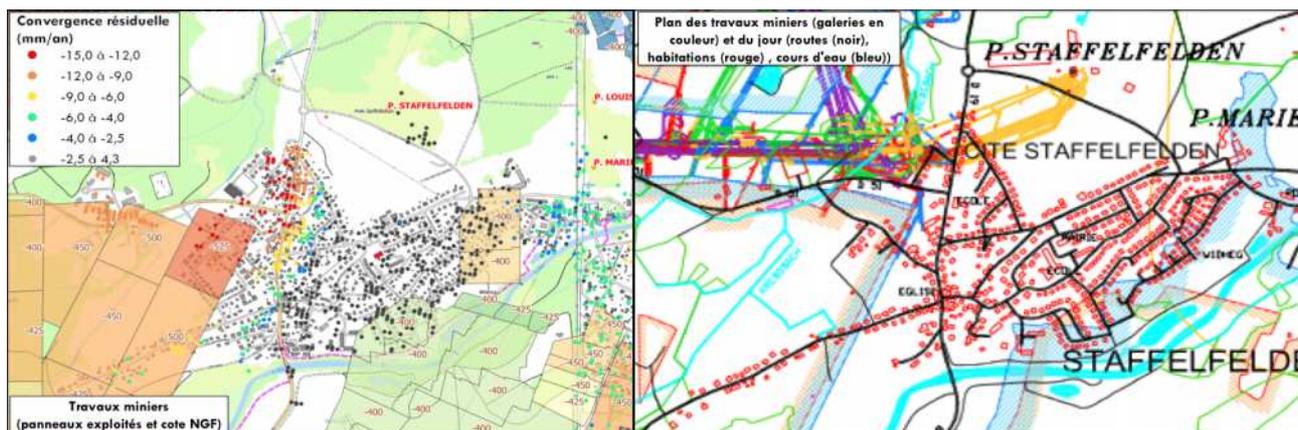


Illustration 35 : Déplacement verticaux de surface à proximité du puits Staffelfelden et corrélation avec le jeu de galeries proches du puits. Les points de déplacement élevé se corrént avec la position des galeries.

**L'introduction d'eau douce dans la mine entraîne des phénomènes de dissolution qui vont augmenter le volume des vides de 24% du volume d'eau introduit. Ce phénomène concerne essentiellement les galeries et panneaux exploités proches des puits de mine.**

➤ « **En 2010**, il avait été considéré que « En se basant sur l'ensemble des hypothèses précitées, l'INERIS a calculé une durée d'ennoyage prévisionnelle de **300 ans pour remplir la totalité de l'exploitation minière souterraine dont 240 ans avant d'atteindre le niveau de Stocamine.** » (voir tableaux 4 et 5).

Au regard des éléments développés dans le présent document, il apparaît que :

- Les débits pénétrant dans la mine correspondent très probablement aux hypothèses les plus basses envisagées dans les études antérieures ;
- Les volumes de vides résiduels sont non négligeables dans les zones les plus profondes de la mine alors qu'ils étaient sensés avoir disparu par convergence.
- Les affaissements initiaux sont < 85 % , ils semblent plutôt se situer entre 70 et 80 %.... on serait donc plutôt sur un volume de vides élevé par rapport aux hypothèses INERIS immédiatement après affaissement dynamique. La convergence des vides miniers serait légèrement plus élevée que la valeur de 0,1% par an retenue par INERIS, mais elle mènerait à un vide résiduel s'élevant encore à 5 à 15 % du vide initial 100 ans après l'exploitation.

Au total, si l'on reprend les tableaux 5 et 6 du présent document, les hypothèses à privilégier au regard des éléments actuellement disponibles seraient celles qui sont colorées.

- **L'hypothèse la plus probable est donc celle d'un remplissage complet de l'exploitation en plus de 600 ans dont 550 ans pour arriver au niveau de Stocamine.**

| Hypothèse d'affaissement→ |                                 | Haute      | Moyenne | Basse |
|---------------------------|---------------------------------|------------|---------|-------|
| Hypothèse de débit ↓      |                                 | 20%        | 10%     | 5%    |
| <b>Haute</b>              | <b>105 000 m<sup>3</sup>/an</b> | <b>304</b> | 195     | 123   |
| Moyenne                   | 58 000 m <sup>3</sup> /an       | 425        | 286     | 182   |
| Basse                     | 22 000 m <sup>3</sup> /an       | 644        | 490     | 341   |

| Hypothèse d'affaissement→ |                                 | Haute      | Moyenne | Basse |
|---------------------------|---------------------------------|------------|---------|-------|
| Hypothèse de débit ↓      |                                 | 20%        | 10%     | 5%    |
| <b>Haute</b>              | <b>105 000 m<sup>3</sup>/an</b> | <b>240</b> | 150     | 100   |
| Moyenne                   | 58 000 m <sup>3</sup> /an       | 340        | 220     | 140   |
| Basse                     | 22 000 m <sup>3</sup> /an       | 560        | 400     | 270   |

Tableau 11 : Hypothèse la plus probable en 2020 concernant le remplissage de la mine au regard du dossier de 2015 complété par les nouvelles mesures

NB : dans ces deux tableaux, l'hypothèse d'affaissement est représentée par la valeur du vide résiduel dans la mine après affaissement initial.

N.B. : Dans l'hypothèse où la mine Amélie serait isolée du reste de l'exploitation ouest le temps de remplissage passerait à plus de 3000 ans.

## 4. CONCLUSION

L'ensemble des observations réalisées par MDPA :

- forages de reconnaissance profonds équipés en piézomètres,
- mesures du niveau de saumure, analyses de gaz et mesures de pression en deux points de la mine,
- mesure des vides par imagerie,
- mesures topographiques in situ et par interprétation de données satellites,
- modélisations des affaissements et des vides résiduels.

Conduisent à retenir un temps de remplissage pour le secteur ouest de la mine de potasse d'Alsace supérieur à 600 ans soit au minimum 2 fois plus long que l'hypothèse privilégiée dans l'étude hydrogéologique réalisée par INERIS en 2011 et reprise dans le dossier de demande de transformation de Stocamine en stockage de durée illimitée en 2015.

Ces éléments sont favorables puisque plus la durée d'ennoyage est longue, plus les phénomènes de cicatrisation du massif autour des bouchons de Stocamine seront aboutis et donneront aux barrages toutes leur efficacité.

Les deux forages vont permettre de poursuivre l'observation du niveau de saumure qui, après la phase de stabilisation, commence à s'élever lentement en VLPB2 (ce qui semble confirmer que des débits arrivent à s'infiltrer dans la mine comme prévu par l'Ineris, mais qui indique de faibles valeurs de débits).

Les mouvements de surface devraient également s'atténuer mais être encore mesurables dans les secteurs récents ou dans les secteurs potentiellement soumis à des circulations d'eau à proximité des points de pénétration de l'eau que sont les puits (phénomènes de dissolution localisés). Les mesures topographiques de terrain pourraient être accentuées dans ces secteurs.

Par ailleurs, les mesures de pression de gaz actuellement disponibles semblent plaider pour une indépendance des réservoirs miniers des mines Amélie au sud et Marie-Louise au nord. De nouvelles mesures pourraient être entreprises pour vérifier cette hypothèse (mise en pression de l'un des réservoirs et suivi de la pression dans l'autre pour voir s'il y a une influence). Si l'hypothèse d'un isolement des deux réservoirs se confirme, alors la durée d'ennoyage de la mine Amélie serait encore plus longue<sup>18</sup> donc encore plus favorable à une cicatrisation des massifs autour des bouchons de StocaMine (et dans l'ensemble du système).

<sup>18</sup> Le temps de remplissage potentiel de la mine Amélie (contenant StocaMine) passerait à plus de 3000 ans

## Annexes

Annexe 1 : Analyses des fluides présents dans les forages

Annexe 2 : Rapport Solexpert (05/19) MDPA : mesures du débit de gaz en tête des forages VAPB2 et VLPB2. Prélèvement et analyse de gaz en VAPB2 et VLPB2

Annexe 3 : Rapport : « Suivi des Niveaux de surface » G. Modeste - IPGS Strasbourg - 2019

Annexe 4 : Rapport MDPA Suivi des infiltrations d'eau à la base des puits Amélie 1 et 2

## **Annexe 1 : Analyses des fluides présents dans les forages**

Rapport d'analyse Page 1 / 3  
 Edité le : 05/01/2017

Annule et remplace l'édition du 31/10/2016  
 Veuillez détruire l'exemplaire précédent

## VAPB2

APAVE ALSACIENNE  
 M. LAURENT FUCHS

2 RUE THIERS  
 BP 1347  
 68056 MULHOUSE CEDEX

**Le rapport établi ne concerne que les échantillons soumis à l'essai. Il comporte 3 pages.  
 La reproduction de ce rapport d'analyse n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.  
 Les paramètres sous-traités sont identifiés par (\*).**

|                                     |                                                                                                                                                                             |                            |             |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-------------|
| <b>Identification dossier :</b>     | LSE16-119281                                                                                                                                                                | <b>Référence contrat :</b> | LSEC16-7184 |
| <b>Identification échantillon :</b> | <b>LSE1609-42685-3</b>                                                                                                                                                      |                            |             |
| <b>Doc Adm Client :</b>             | Cde 3002337 - L. FUCHS                                                                                                                                                      |                            |             |
| <b>Référence client :</b>           | VAP B2<br>920m                                                                                                                                                              |                            |             |
| <b>Nature:</b>                      | Eau saline                                                                                                                                                                  |                            |             |
| <b>Dept et commune :</b>            | <b>68 WITTELSHEIM</b>                                                                                                                                                       |                            |             |
| <b>Prélèvement :</b>                | Prélevé le 14/09/2016 de 13h00 à 16h00 Réceptionné le 16/09/2016<br>Prélevé par le client M. CHALAMEL<br>Circonstances atmosphériques : Temps sec<br>Flaconnage CARSO-LSEHL |                            |             |

**Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.**

Date de début d'analyse le 23/09/2016

| Paramètres analytiques                   | Résultats | Unités    | Méthodes                 | Normes            | Limites de qualité | Références de qualité | COFRAC |
|------------------------------------------|-----------|-----------|--------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|--------|
| <b>Analyses physicochimiques</b>         |           |           |                          |                   |                    |                       |        |
| <i>Analyses physicochimiques de base</i> |           |           |                          |                   |                    |                       |        |
| Bromures                                 | 2100      | mg/l Br-  | Chromatographie ionique  | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       |        |
| Fluorures                                | < 50      | mg/l F-   | Chromatographie ionique  | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       |        |
| pH                                       | 5.5       | -         | Electrochimie            | NF EN ISO 10523   |                    |                       |        |
| Température de mesure du pH              | 18.4      | °C        |                          |                   |                    |                       |        |
| Indice hydrocarbures (C10-C40)           | < 0.1     | mg/l      | GC/FID                   | NF EN ISO 9377-2  |                    |                       |        |
| Fluorures                                | < 0.5     | mg/l F-   | Potentiométrie           | NF T90-004        |                    |                       |        |
| <b>Cations</b>                           |           |           |                          |                   |                    |                       |        |
| Calcium dissous                          | 5187      | mg/l Ca++ | ICP/AES après filtration | NF EN ISO 11885   |                    |                       |        |
| Magnésium dissous                        | 3842      | mg/l Mg++ | ICP/AES après filtration | NF EN ISO 11885   |                    |                       |        |
| Sodium dissous                           | 14885     | mg/l Na+  | ICP/AES après filtration | NF EN ISO 11885   |                    |                       |        |
| Potassium dissous                        | 10230     | mg/l K+   | ICP/AES après filtration | NF EN ISO 11885   |                    |                       |        |

Doc Adm Client : Cde 3002337 - L. FUCHS

| Paramètres analytiques                                     | Résultats | Unités     | Méthodes                                          | Normes                                | Limites de qualité | Références de qualité | COFRAC |
|------------------------------------------------------------|-----------|------------|---------------------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|-----------------------|--------|
| <b>Anions</b>                                              |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| Chlorures                                                  | 200700    | mg/l Cl-   | Chromatographie ionique                           | NF EN ISO 10304-1                     |                    |                       |        |
| Sulfates                                                   | 300       | mg/l SO4-- | Chromatographie ionique                           | NF EN ISO 10304-1                     |                    |                       |        |
| <b>Métaux</b>                                              |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| Antimoine dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.001mg/l => 0.005mg/l | < 0.005   | mg/l Sb    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Arsenic dissous<br>8.2 Modif LQ : 0.02mg/l => 1.00mg/l     | < 1.00    | mg/l As    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Baryum dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 0.50mg/l      | 1.759     | mg/l Ba    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Bore dissous                                               | 15.373    | mg/l B     | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Cadmium dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.01mg/l => 0.05mg/l     | < 0.05    | mg/l Cd    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Chrome dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 0.25mg/l      | < 0.25    | mg/l Cr    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Cuivre dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 0.50mg/l      | 1.186     | mg/l Cu    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Fer dissous                                                | 42.7      | mg/l Fe    | ICP/AES après filtration                          | NF EN ISO 11885                       |                    |                       |        |
| Manganèse dissous                                          | 33.634    | mg/l Mn    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Lithium total                                              | 310.93    | mg/l Li    | ICP/MS après acidification et décantation         | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Mercurure dissous                                          | < 10      | µg/l Hg    | Fluorescence après minéralisation bromure-bromate | Méthode interne selon NF EN ISO 17852 |                    |                       |        |
| Nickel dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 0.25mg/l      | < 0.25    | mg/l Ni    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Plomb dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.02mg/l => 0.10mg/l       | 0.101     | mg/l Pb    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Sélénium dissous<br>8.2 Modif LQ : 0.02mg/l => 1.00mg/l    | < 1.00    | mg/l Se    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Vanadium dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 0.25mg/l    | < 0.25    | mg/l V     | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Rubidium total (*)                                         | 79000     | µg/l       | ICP/MS après minéralisation                       | Méthode interne                       |                    |                       |        |
| Zinc dissous<br>8.2 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l        | 35.755    | mg/l Zn    | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2      |                    |                       |        |
| Iode                                                       | 15.3      | mg/l I     | ICP/AES après filtration                          | NF EN ISO 11885                       |                    |                       |        |
| <b>COV : composés organiques volatils</b>                  |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| <b>BTEX</b>                                                |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| Benzène                                                    | 29        | µg/l       | HS/GC/MS                                          | NF EN ISO 11423-1                     |                    |                       |        |
| Toluène                                                    | 43        | µg/l       | HS/GC/MS                                          | NF EN ISO 11423-1                     |                    |                       |        |
| Ethylbenzène                                               | 3.1       | µg/l       | HS/GC/MS                                          | NF EN ISO 11423-1                     |                    |                       |        |
| Xylènes (m + p)                                            | 1.7       | µg/l       | HS/GC/MS                                          | NF EN ISO 11423-1                     |                    |                       |        |
| Xylène ortho                                               | 2.0       | µg/l       | HS/GC/MS                                          | NF EN ISO 11423-1                     |                    |                       |        |
| <b>HAP : Hydrocarbures aromatiques polycycliques</b>       |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| <b>HAP</b>                                                 |           |            |                                                   |                                       |                    |                       |        |
| Fluoranthène                                               | 16HAP     | < 10       | ng/l                                              | HPLC/FLUO                             | NFT90-115          |                       |        |
| Benzo (b) fluoranthène                                     | 16HAP     | < 10       | ng/l                                              | HPLC/FLUO                             | NFT90-115          |                       |        |
| Benzo (k) fluoranthène                                     | 16HAP     | < 10       | ng/l                                              | HPLC/FLUO                             | NFT90-115          |                       |        |
| Benzo (a) pyrène                                           | 16HAP     | < 10.0     | ng/l                                              | HPLC/FLUO                             | NFT90-115          |                       |        |
| Benzo (ghi) pérylène                                       | 16HAP     | < 10.0     | ng/l                                              | HPLC/FLUO                             | NFT90-115          |                       |        |

Doc Adm Client : Cde 3002337 - L. FUCHS

| Paramètres analytiques   |       | Résultats | Unités | Méthodes  | Normes                     | Limites de qualité | Références de qualité | COFRAC |
|--------------------------|-------|-----------|--------|-----------|----------------------------|--------------------|-----------------------|--------|
| Indéno (1,2,3 cd) pyrène | 16HAP | < 10.0    | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Anthracène               | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Acénaphthène             | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Chrysène                 | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Dibenzo (a,h) anthracène | 16HAP | < 10.00   | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Fluorène                 | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Naphtalène               | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Pyrène                   | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Phénanthrène             | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |
| Acénaphthylène           | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/DAD  | Méthode interne<br>M_ET001 |                    |                       |        |
| Benzo (a) anthracène     | 16HAP | < 10      | ng/l   | HPLC/FLUO | NFT90-115                  |                    |                       |        |

16HAP

16 HAP SUR EAU SALINE

ABSENCE DU LOGO COFRAC

1 L'absence du logo Cofrac provient d'un délai de mise en analyse par rapport au prélèvement supérieur aux exigences normatives.

MODIFICATION DE LA LQ

8.1 Dilution 50 car matrice difficile à analyser

8.2 .

Hydrocarbures : extrait hors délai.

Rappel de rapport pour modification résultat ethylbenzène

Les résultats sont rendus en prenant en compte les matières en suspension (MES) sauf quand la filtration est indiquée dans les normes analytiques.

Sébastien GASPARD  
Responsable de laboratoire



Rapport d'analyse Page 1 / 2  
 Edité le : 22/01/2019

## VLPB2

APAVE ALSACIENNE  
 M. Florent FUNFSCHILLING

2 rue Thiers  
 BP-1347  
 68056 MULHOUSE

Le rapport établi ne concerne que les échantillons soumis à l'essai. Il comporte 2 pages.  
 La reproduction de ce rapport d'analyse n'est autorisée que sous la forme de fac-similé photographique intégral.  
 Les paramètres sous-traités sont identifiés par (\*).

|                                                                                      |                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| <b>Identification dossier :</b> LSE18-206598                                         | <b>Référence contrat :</b> LSEC16-7184 |
| <b>Identification échantillon :</b> LSE1812-49026-1                                  |                                        |
| <b>Doc Adm Client :</b> Cde 3009718 - F. FUNFSCHILLING                               |                                        |
| <b>Référence client :</b> WLPB2-MDPA                                                 |                                        |
| <b>Nature:</b> Eau saline                                                            |                                        |
| <b>Dept et commune :</b> 68 WITTELSHEIM                                              |                                        |
| <b>Prélèvement :</b> Prélevé le 20/12/2018 à 10h00 Réceptionné le 22/12/2018 à 08h49 |                                        |

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Date de début d'analyse le 22/12/2018 à 14h26

| Paramètres analytiques                                  | Résultats | Unités     | Méthodes                                           | Normes            | Limites de qualité | Références de qualité |
|---------------------------------------------------------|-----------|------------|----------------------------------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|
| <b>Analyses physicochimiques</b>                        |           |            |                                                    |                   |                    |                       |
| <i>Analyses physicochimiques de base</i>                |           |            |                                                    |                   |                    |                       |
| Bromures                                                | 2100      | mg/l Br-   | Chromatographie ionique                            | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       |
| pH                                                      | 5.7       | -          | Electrochimie                                      | NF EN ISO 10523   |                    |                       |
| Température de mesure du pH                             | 20.1      | °C         |                                                    |                   |                    |                       |
| Demande biochimique en oxygène (DBO) avec ATU (5 jours) | 4         | mg/l O2    | Avec dilutions                                     | NF EN 1899-1      |                    |                       |
| Matières en suspension totales                          | 358       | mg/l       | Gravimétrie après filtration-filtre Whatman 934 AH | NF EN 872         |                    |                       |
| Fluorures                                               | < 0.5     | mg/l F-    | Potentiométrie                                     | NF T90-004        |                    |                       |
| <b>Cations</b>                                          |           |            |                                                    |                   |                    |                       |
| Calcium dissous                                         | 20975     | mg/l Ca++  | ICP/AES après filtration                           | NF EN ISO 11885   |                    |                       |
| Magnésium dissous                                       | 3392      | mg/l Mg++  | ICP/AES après filtration                           | NF EN ISO 11885   |                    |                       |
| Sodium dissous                                          | 70640     | mg/l Na+   | ICP/AES après filtration                           | NF EN ISO 11885   |                    |                       |
| Potassium dissous                                       | 52640     | mg/l K+    | ICP/AES après filtration                           | NF EN ISO 11885   |                    |                       |
| <b>Anions</b>                                           |           |            |                                                    |                   |                    |                       |
| Chlorures                                               | 209900    | mg/l Cl-   | Chromatographie ionique                            | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       |
| Sulfates                                                | 400       | mg/l SO4-- | Chromatographie ionique                            | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       |
| <b>Métaux</b>                                           |           |            |                                                    |                   |                    |                       |

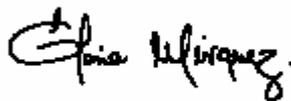
.../...

| Paramètres analytiques                                     | Résultats | Unités  | Méthodes                                          | Normes                           | Limites de qualité | Références de qualité |
|------------------------------------------------------------|-----------|---------|---------------------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-----------------------|
| Antimoine dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.001mg/l => 0.050mg/l | < 0.050   | mg/l Sb | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Arsenic dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.02mg/l => 1.00mg/l     | < 1.00    | mg/l As | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Baryum dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l      | < 5.00    | mg/l Ba | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Bore dissous                                               | 22.594    | mg/l B  | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Cadmium dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.01mg/l => 0.50mg/l     | < 0.50    | mg/l Cd | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Chrome dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 2.50mg/l      | < 2.50    | mg/l Cr | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Cuivre dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l      | < 5.00    | mg/l Cu | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Fer dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l         | < 5.00    | mg/l Fe | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Manganèse dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l   | 45.438    | mg/l Mn | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Lithium total<br>8.1 Modif LQ : 0.010mg/l => 0.500mg/l     | 429.44    | mg/l Li | ICP/MS après acidification et décantation         | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Mercure dissous                                            | < 10      | µg/l Hg | Fluorescence après minéralisation bromure-bromate | Méthode interne M_EM156          |                    |                       |
| Nickel dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 2.50mg/l      | < 2.50    | mg/l Ni | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Plomb dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.02mg/l => 1.00mg/l       | 2.032     | mg/l Pb | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Sélénium dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.02mg/l => 1.00mg/l    | < 1.00    | mg/l Se | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Vanadium dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.05mg/l => 2.50mg/l    | < 2.50    | mg/l V  | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Rubidium total (*)                                         | 0.054     | µg/l    | ICP/MS après minéralisation                       | Méthode interne                  |                    |                       |
| Zinc dissous<br>8.1 Modif LQ : 0.10mg/l => 5.00mg/l        | 49.084    | mg/l Zn | ICP/MS après filtration                           | ISO 17294-1 et NF EN ISO 17294-2 |                    |                       |
| Iode                                                       | 3.8       | mg/l I  | ICP/AES après filtration                          | NF EN ISO 11885                  |                    |                       |

Pour certains paramètres des durées de conservation avant analyse ont été validées par notre laboratoire avec des délais supérieurs aux exigences normatives (données consultables au laboratoire).

DBO5 : stabilisation de l'échantillon par congélation avant analyse.

Gloria MIRQUEZ  
Chargée de Suivi Sous-traitance



**Annexe 2 : Rapport Solexpert (05/19) MDPA : mesures du débit de gaz en tête des forages VAPB2 et VLPB2. Prélèvement et analyse de gaz en VAPB2 et VLPB2**

# MDPA : mesures du débit de gaz en tête des forages VAPB2 et VLPB2

## Prélèvement et analyse de gaz sur VLPB2

Rapport de Mesures

Rédacteur : A. Laurent

Approbateur : M. Piedevache

RM

FRA-248

14/05/2019

### Révisions

Référence Document : FRA-248\_RM\_01

| Date       | Version | Commentaires      |
|------------|---------|-------------------|
| 14/05/2019 | A       | Emission initiale |

#### Solexperts France

Technopôle Nancy - Brabois

10, allée de la Forêt de la Reine

54500 Vandoeuvre les Nancy

Tél +33 (0)3 83 94 04 55

Fax +33 (0)3 83 94 03 58

info@solexperts.fr

www.solexperts.com

---

## SOMMAIRE

|                                                              |   |
|--------------------------------------------------------------|---|
| <i>Introduction</i> .....                                    | 2 |
| <b>1</b> <i>Mesure du débit de gaz sur les forages</i> ..... | 3 |
| 1.1 <i>Mesure du débit de gaz sur VAPB2</i> .....            | 3 |
| 1.2 <i>Mesure du débit de gaz sur VLPB2</i> .....            | 3 |
| <b>2</b> <i>Analyse de gaz sur le forage VLPB2</i> .....     | 4 |

## Introduction

Les Mines De Potasse d'Alsace (MDPA) ont mandaté Solexperts France pour la réalisation de mesures de débit de gaz sur les forages VAPB2 et VLPB2, ainsi que pour la mise en œuvre d'un prélèvement de gaz sur VLPB2 et analyse en laboratoire.

L'intervention sur site s'est déroulée les 29 et 30 mai 2019.

Le présent rapport expose les résultats de cette prestation.

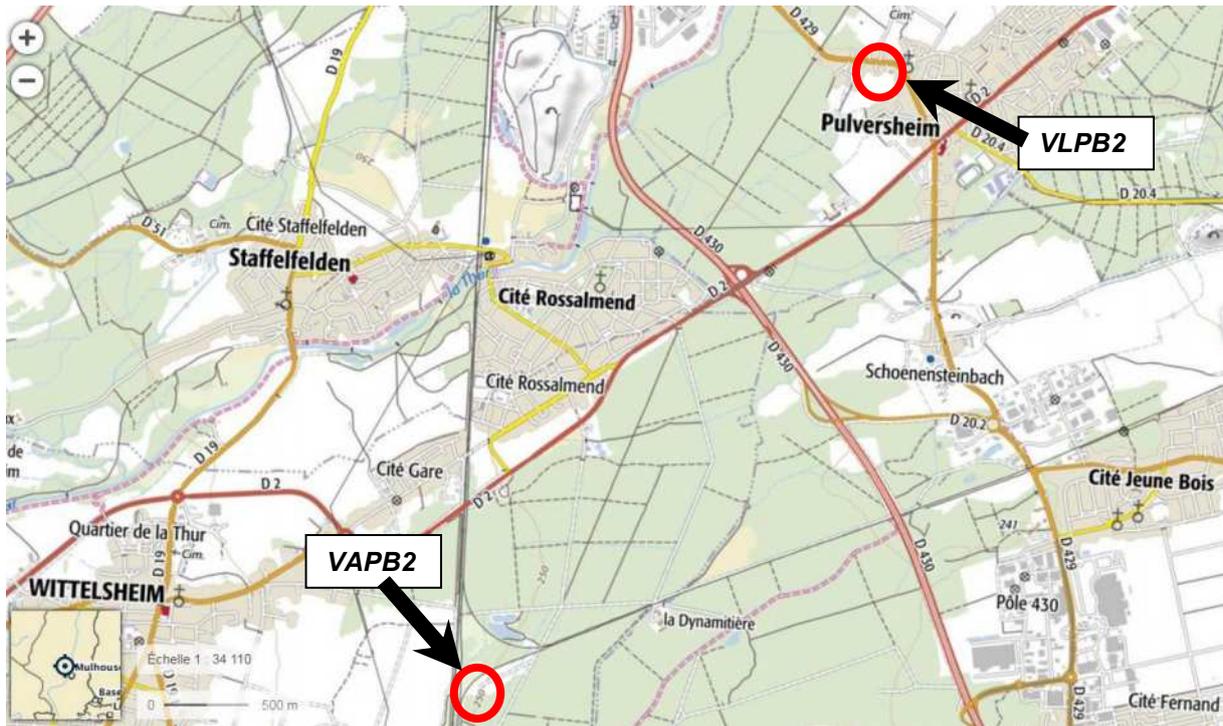


Figure 1 : plan de localisation des forages VAPB2 et VLPB2 (source Géoportail)

# 1 Mesure du débit de gaz sur les forages

En l'absence d'informations relatives à la gamme de débit susceptible d'être mesurée sur les deux forages, trois débitmètres gaz ont été approvisionnés pour cette prestation couvrant les gammes suivantes :

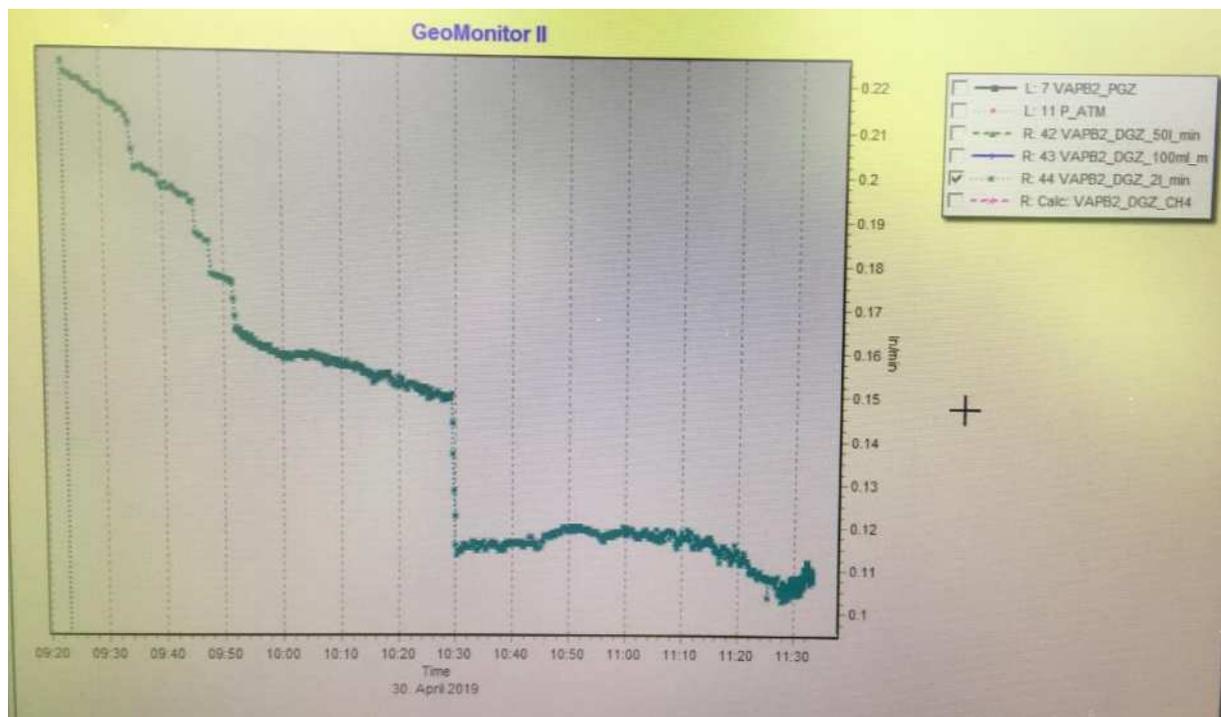
- 0.1 – 100 ml/min
- 0.02 – 2 l/min
- 1 – 50 l/min

Les débitmètres ont été étalonnés pour la mesure du CH<sub>4</sub> préalablement à l'intervention sur site, ce gaz représentant le composant majeur mesuré en 2014 sur le forage VAPB2.

## 1.1 Mesure du débit de gaz sur VAPB2

La mesure du débit de gaz en tête de VAPB2 s'est déroulée le 30 mai 2019 à l'aide du débitmètre 0.02 – 2 l/min.

Le débit de gaz au moment de la mesure se situait entre 0.10 et 0.12 l/min (cf. *Figure 2*).



*Figure 2 : suivi du débit de gaz en tête du forage VAPB2*

## 1.2 Mesure du débit de gaz sur VLPB2

La mesure du débit de gaz en tête de VLPB2 s'est déroulée les 29 et 30 mai 2019 à l'aide du débitmètre 0.02 – 2 l/min.

Il n'a pas été possible d'obtenir un débit stabilisé dans le temps imparti sur ce forage. Le débit de gaz en fin de mesure se situait vers 1.27 l/min, valeur qui doit être considérée comme un débit minimum (cf. *Figure 3*).



Figure 3 : suivi du débit de gaz et de la pression en tête du forage VLPB2

## 2 Analyse de gaz sur le forage VLPB2

Le prélèvement de gaz en tête de VAPB2 s'est déroulé le 29 mai 2019 à l'aide d'ampoules de prélèvement en inox préalablement rincées à l'azote puis mises au vide.

L'analyse de gaz a été réalisée par le laboratoire Hydroisotop de Schweitenkirchen en Allemagne. Les résultats sont reportés en annexe 1.

Deux points principaux ressortent de cette analyse :

- Les résultats de l'analyse de gaz en tête de VLPB2 sont très différents de ceux de VAPB2 réalisés en 2014, en particulier pour le CH<sub>4</sub> qui représentait le constituant majeur sur VAPB2, alors qu'il ne représente que 1.7% du volume total de gaz sur VLPB2.
- La teneur en hydrogène est très élevée sur VLPB2 (6.6% du volume total de gaz). Cette concentration se situe dans le domaine d'explosivité de ce gaz (4 – 75% vol.).

# ANNEXES

# **Annexe 1 : Analyse de gaz du forage VLPB2**

Hydroisotop GmbH · Woelkestraße 9 · D-85301 Schweitenkirchen

Solexperts France, Technopole Nancy-Brabois  
10, all,e de la foret de la Reine

54500 Vandoeuvre les Nancy

Durch die DAkkS nach DIN EN ISO/IEC 17025  
akkreditiertes Prüflaboratorium



Nach § 15 Abs. 4 TrinkwV 2001 zugelassene  
Trinkwasseruntersuchungsstelle

Schweitenkirchen, 13.05.2019  
Dr.Lo

**No. du rapport 326426**

**page 1 de 2**

|                            |                                                    |                       |                    |
|----------------------------|----------------------------------------------------|-----------------------|--------------------|
| Appellation d'échantillon: |                                                    | <b>MDPA VLPB2 Gaz</b> |                    |
| Client:                    | <b>Solexperts France, Technopole Nancy-Brabois</b> |                       |                    |
| Offre:                     | <b>059-2019 / GL</b>                               |                       |                    |
| No. de lab.:               | <b>326426</b>                                      | Echantillon:          | Echantillon de gaz |
| Date d'échantillonnage:    | 29.04.2019, 17:00                                  | Echantillonnage:      | Client             |
| Arrivée à labo.            | 29.04.2019                                         | Début d'analyse:      | 29.04.2019         |
|                            |                                                    | Fin d'analyse:        | 13.05.2019         |

| Paramètre           | Résultat | Unité |
|---------------------|----------|-------|
| Hydrogène           | 6,6      | Vol-% |
| Hélium              | < 0,05   | Vol-% |
| Argon               | 0,73     | Vol-% |
| Oxygène             | 0,12     | Vol-% |
| Azote               | 57,5     | Vol-% |
| Dioxyde de carbone  | 32,1     | Vol-% |
| Méthane             | 1,7      | Vol-% |
| Ethane              | 1008     | vpm   |
| Propane             | 1910     | vpm   |
| i-Butane            | 2090     | vpm   |
| n-Butane            | 1840     | vpm   |
| i-Pentane           | 2600     | vpm   |
| n-Pentane           | 530      | vpm   |
| Monoxyde de carbone | < 500    | vpm   |

**Hydroisotop GmbH**  
Woelkestraße 9  
D-85301 Schweitenkirchen  
Tel. +49 (0)8444 9289 0  
Fax +49 (0)8444 9289 29  
info@Hydroisotop.de  
www.Hydroisotop.de

Geschäftsführer  
Dr. Lorenz Eichinger, Dr. Florian Eichinger  
Amtsgericht Ingolstadt  
HRB Nr. 190 354  
VAT Nr. DE 128 953 441  
St.-Nr. 124/128/90025  
Zoll-Nr. DE 3063 496

Sparkasse Pfaffenhofen / Ilm  
IBAN: DE20 7215 1650 0008 1123 28  
BIC: BYLADEMIPAF  
  
Raiffeisenbank Schweitenkirchen  
IBAN: DE55 7216 0818 0001 3693 00  
BIC: GENODEF1NP

---

**Client:** Solexperts France, Technopole Nancy-Brabois

---

| <b>Paramètre</b>   | <b>Méthode</b>                                        |
|--------------------|-------------------------------------------------------|
| Hélium             | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Hydrogène          | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Oxygène            | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Azote              | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Argon              | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Dioxyde de carbone | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Gaz                | QMA 504-2/15: 2007-14; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Méthane            | QMA 504-2/15: 2007-04; Chromatographie des gaz GC-TCD |
| Ethane             | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |
| Propane            | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |
| i-Pentane          | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |
| n-Pentane          | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |
| i-Butane           | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |
| n-Butane           | QMA 504-2/15: 2007-04; Gaschromatography GC-FID       |

---

**Légende**

---

|      |                                                                   |
|------|-------------------------------------------------------------------|
| *    | Analyse en coopération avec laboratoires accrédité resp. qualifié |
| p.m. | pas mesuré, concentration trop petit                              |
| <    | pas détectable                                                    |
| -    | pas commandé                                                      |
| x    | méthode qualifiée avec accréditation imminente                    |

---

**Remarques**

---

Les résultats se reportent seulement aux échantillon mesurés.  
Chaque publication aussi par extraits nécessite un permis écrit de Hydroisotop GmbH.  
Les conditions générales d'affaires ont cours.  
Hydroisotop n'assume pas des responsabilités pour la régularité d'échantillonnage à force du tiers.

---

Dr. Eichinger  
(Gérant d'affaires)  
13.05.2019

**Gaz VAPB2**

| Echantillon<br>ampoule inox | Remarques                                   | Type              | Mesures infrarouge (BRUKER )<br>IFS 55 - Mini cellule 0,05m<br>circulation du gaz ampoule-cellule de mesure par pompage |                       | Mesures PICARRO G2101 i |              |                          | Remarques générales                                                                                                                                                                                                     |
|-----------------------------|---------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|-------------------------|--------------|--------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                             |                                             |                   | Aire CH4 (3086cm-1)                                                                                                     | Concentration CH4 (%) | CH4<br>(ppm)            | CO2<br>(ppm) | $\delta^{13}CO_2$<br>(‰) |                                                                                                                                                                                                                         |
| MDPA TF1                    | Tête de puits<br>évolution avec<br>le temps | N°1<br>SOLEXP31.1 | 1,42                                                                                                                    | 42,7                  | hors gamme              | /            | /                        | Atmosphère<br>essentiellement riche<br>en CH4 en mélange<br>décroissant avec l'air<br>ambiant au fur et à<br>mesure que le débit en<br>tête de puits diminue.<br>Zoom sur la partie gaz<br>alphanétique:<br>spectre TDP |
|                             |                                             | N°2<br>SOLEXP29.1 | 1,28                                                                                                                    | 35,2                  | hors gamme              | /            | /                        |                                                                                                                                                                                                                         |
|                             |                                             | N°3<br>SOLEXP26.1 | 0,67                                                                                                                    | 9,8                   | hors gamme              | /            | /                        |                                                                                                                                                                                                                         |
|                             |                                             | N°4<br>SOLEXP23.1 | 0,92                                                                                                                    | 18,6                  | hors gamme              | /            | /                        |                                                                                                                                                                                                                         |
|                             |                                             |                   |                                                                                                                         |                       |                         |              |                          |                                                                                                                                                                                                                         |
| RAT 1                       | Air ventilé,<br>Pression<br>atmosphérique   | Fond1             | limite sensibilité                                                                                                      | /                     | 3,4                     | 580          | -8,5                     | Ventilation efficace -<br>teneur en CH4<br>équivalente à<br>l'atmosphère<br>Signature isotopique du<br>CO2 résulte d'une<br>dilution:<br>CO2 mine (4,4) en dilution<br>avec CO2 atm (-12,9)                             |
|                             |                                             | Fond2             | limite sensibilité                                                                                                      | /                     | 3,5                     | 560          | -5,5                     |                                                                                                                                                                                                                         |

|               |                      |                    |   |           |         |                      |                                          |
|---------------|----------------------|--------------------|---|-----------|---------|----------------------|------------------------------------------|
| Référence air | air<br>atmosphérique | Limite sensibilité | / | 2,4 à 2,5 | 652-654 | de -13,1 à -<br>12,7 | Valeurs moyennes<br>mesurées sur 5 jours |
|---------------|----------------------|--------------------|---|-----------|---------|----------------------|------------------------------------------|

**Annexe 3 : Rapport : « Suivi des Niveaux de surface » G. Modeste -  
IPGS Strasbourg - 2019**



 École et observatoire  
des **sciences de la Terre**  
de l'Université de Strasbourg

et du 

## Suivi des niveaux de surface

Travaux réalisés et rédigés par : Guillaume Modeste

Travaux encadrés et relus par : Cécile Doubre, Frédéric  
Masson et François Cornet



## Sommaire

|                                                     |     |
|-----------------------------------------------------|-----|
| Liste des Figures .....                             | ii  |
| Liste des Tableaux .....                            | iii |
| 1. Contexte .....                                   | 1   |
| 2. Présentation de la méthode .....                 | 4   |
| a. Interférométrie d'images SAR.....                | 4   |
| b. Traitement avec le logiciel StaMPS .....         | 6   |
| 3. Données.....                                     | 8   |
| 4. Résultats .....                                  | 10  |
| a. Les cartes de vitesses moyennes.....             | 10  |
| b. Le suivi temporel d'un affaissement minier ..... | 14  |
| i. Pendant la période d'exploitation (ERS) .....    | 14  |
| ii. Sur l'ensemble des périodes d'observation.....  | 16  |
| c. Caractérisation de la phase résiduelle.....      | 18  |
| i. Amplitude de la phase résiduelle .....           | 18  |
| ii. Comparaison à l'affaissement total .....        | 20  |
| d. Les autres signaux .....                         | 21  |
| e. Le site de stockage .....                        | 23  |
| 5. Discussion .....                                 | 24  |
| a. Les sources potentielles de déplacements.....    | 24  |
| b. La phase résiduelle.....                         | 25  |
| 6. Conclusion .....                                 | 28  |
| Références .....                                    | 29  |

## Liste des Figures

|                                                                                                                                                                                                                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure 1:</b> Localisation des concessions des MDPA (violet) et des secteurs exploités Est (vert) et Ouest (bleu) avec les principales villes du bassin et des orthophotographie de l'IGN (2002) .....                                                    | 1  |
| <b>Figure 2:</b> Evolution temporelle d'un affaissement minier observé par nivellement dans le bassin potassique .....                                                                                                                                       | 2  |
| <b>Figure 3:</b> Illustration de la géométrie d'une acquisition SAR .....                                                                                                                                                                                    | 5  |
| <b>Figure 4:</b> Illustration des « Permanent/Persistent Scatterers » .....                                                                                                                                                                                  | 6  |
| <b>Figure 5:</b> Couverture temporelle des données SAR traitées .....                                                                                                                                                                                        | 8  |
| <b>Figure 6:</b> Localisation des pixels d'étude retenus à travers le bassin potassique alsacien sur la période ENVISAT .....                                                                                                                                | 10 |
| <b>Figure 7:</b> Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période ERS (b,d) .....                                                                                                          | 11 |
| <b>Figure 8:</b> Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période ENVISAT (b,d). .....                                                                                                     | 12 |
| <b>Figure 9:</b> Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période Sentinel-1 (b,d) .....                                                                                                   | 13 |
| <b>Figure 10:</b> Comparaison des séries temporelles entre les données de nivellement (vertical) et ERS (LOS) en cinq points suivis par les deux méthodes .....                                                                                              | 15 |
| <b>Figure 11:</b> Combinaison des séries temporelles des données de nivellement et InSAR en cinq points suivis par les deux méthodes .....                                                                                                                   | 17 |
| <b>Figure 12:</b> Série temporelle du nivellement accompagné des résultats ERS à Bollwiller 193 (a) et position des points de nivellement relativement secteurs exploités les plus proches.....                                                              | 19 |
| <b>Figure 13:</b> Série temporelle à Ungersheim (a) et à Reiningue (b) sur la période ERS en relation avec l'exploitation minière (c) .....                                                                                                                  | 22 |
| <b>Figure 14:</b> Série temporelle réalisée à la verticale du site de stockage. Le trait point rouge indique le début de creusement supposé du premier bloc de stockage .....                                                                                | 23 |
| <b>Figure 15:</b> a. Carte de vitesse moyenne LOS pendant la période la période ENVISAT avec les sites de pompages (points bleus) et les failles majeures (lignes noires) ; b. Coupe géologique à Staffelfelden au niveau de la zone à fortes vitesses ..... | 25 |

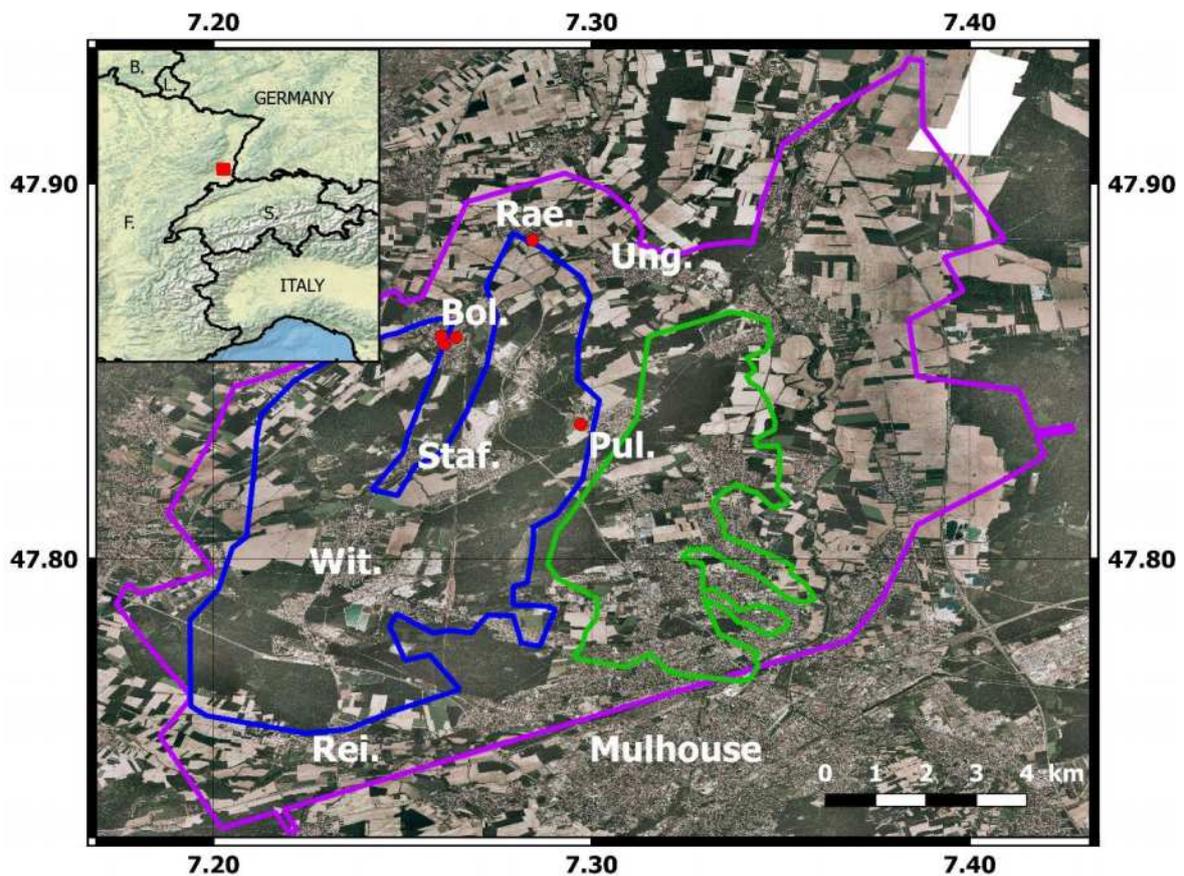
## Liste des Tableaux

|                                                                                                               |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau 1:</b> Présentation des données satellitaires traitées .....                                       | 9  |
| <b>Tableau 2:</b> Paramètres temporels de la somme de deux exponentielles aux cinq points de nivellement..... | 18 |
| <b>Tableau 3:</b> Amplitude de l'affaissement résiduel aux cinq points de nivellement .....                   | 20 |



## 1. Contexte

Le bassin potassique alsacien est un ancien bassin minier au Nord-Ouest de Mulhouse, d'une superficie supérieure à 200km<sup>2</sup> ayant été exploité par les Mines Domaniales de Potasse d'Alsace (MDPA) (Figure 1). L'exploitation a perduré pendant près d'un siècle, de 1910 à 2002, et a concerné deux couches de potasse distinctes. La première, d'une épaisseur variant de 1m à 2m, est située à 635m de profondeur en moyenne. La seconde, située 20m en dessous de la première, a une épaisseur variant de 1,5m à 5m. En 1998, en parallèle de l'activité minière, une activité de stockage de déchets ultimes fut lancée. L'idée était de maintenir et convertir le bassin d'emploi à cause de l'arrêt programmé de l'exploitation minière entre 2005 et 2007 suite à l'épuisement de la ressource accessible.



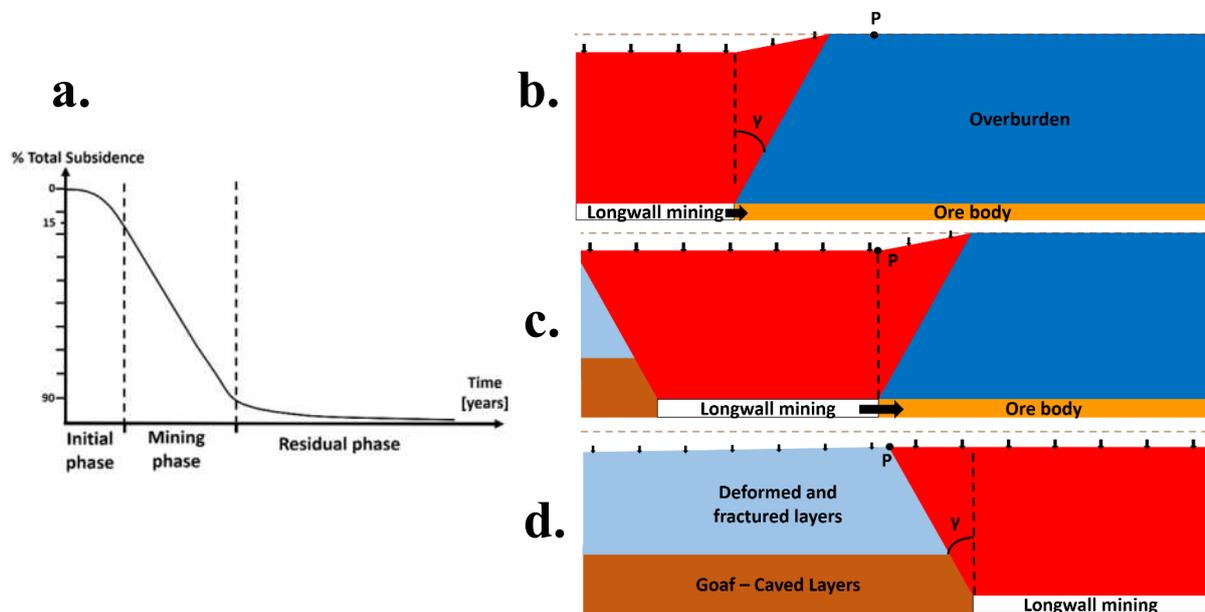
**Figure 1:** Localisation des concessions des MDPAs (violet) et des secteurs exploités Est (vert) et Ouest (bleu) avec les principales villes du bassin et des orthophotographies de l'IGN (2002). La zone blanche correspond à une base militaire française. Les cercles rouges correspondent à des points de nivellement. Bol.: Bollwiller, Pul.: Pulversheim, Rae.: Raedersheim, Rei.: Reiningue, Staf.: Staffelfelden, Wit.: Wittelsheim. Encart : Localisation des MDPAs à l'échelle régionale. Le rectangle rouge indique la position de la région étudiée. B : Belgique, L.: Luxembourg, F.: France, S.: Suisse (pays).

L'extraction de matériaux en profondeur provoquent des déplacements de surface, appelé affaissement minier. Un large éventail de modèles a été développé pour anticiper l'amplitude de l'affaissement, la superficie impactée et son évolution temporelle afin notamment de limiter les dommages en surface [1,2]. De l'observation de plusieurs sites miniers, plusieurs phases furent identifiées lors d'un affaissement minier (Figure 2) [3]. Dans

## 1. Introduction

un premier temps, la phase initiale commence quand le point d'intérêt entre dans la zone d'influence de l'exploitation souterraine. Cette phase représente en général 5 à 20% de l'affaissement total [4]. Quant à elle, la zone d'influence dépend de plusieurs paramètres dont notamment la profondeur et le pendage de la couche exploitée. Un angle d'influence est également déduit pour estimer la zone d'influence et ce dernier dépend de la rhéologie des couches supérieures et de la vitesse d'exploitation. Dans un second temps, l'affaissement minier entre en phase active à partir du moment où le point d'intérêt se retrouve à la verticale de l'exploitation, ou lorsque le point est dans sa position la plus proche de l'exploitation. Cette phase est la plus importante en termes de déplacement, représentant 60 à 90% de l'affaissement total, et les déplacements peuvent atteindre l'échelle métrique au cours d'une année. Des déplacements horizontaux se produisent au cours de cette phase. Dans un dernier temps, la phase résiduelle commence lorsque le point n'est plus sous l'influence directe de l'exploitation en cours et représente 5 à 30% de l'affaissement total [5]. Les deux premières phases sont considérées comme les phases actives, à distinguer de la troisième connue comme étant la phase différée. L'amplitude des déplacements se produisant lors de chacune des périodes dépend de plusieurs paramètres tels que la profondeur, les méthodes d'extraction et de remblaiement, la géométrie de la ressource extraite, etc [6].

Le modèle présenté en Figure 2 ainsi que la part relative de chacune des phases sont basés sur les observations des MDPA. Ce modèle est issu de l'analyse des mesures de nivellement, campagnes réalisées lors de la période d'exploitation de la mine. De ces campagnes de nivellement ressort une stabilisation affaissements miniers 3 à 5 ans après la fin des travaux miniers au fond. Par ailleurs, un angle d'influence moyen de  $35^\circ$  fut estimé pour le bassin potassique et la phase résiduelle représenterait 10% de l'affaissement total.



**Figure 2:** (a) Evolution temporelle d'un affaissement minier observé par nivellement dans le bassin potassique. La phase initiale (b) début quand le point entre la zone d'influence, qui dépend de  $\gamma$ , l'angle d'influence. Ensuite, la phase active (c) commence quand le point est au-dessus de l'exploitation sous-jacente. La durée de ces deux premières étapes dépend de la zone d'influence et de la vitesse d'avancement de l'exploitation. Enfin, la phase résiduelle commence lorsque le point sort de la zone d'influence. Le foudroyage est appliqué pour remblayer les couches exploitées. Cette méthode déforme et induit des fracturations dans les couches supérieures.

Depuis 2002, aussi bien l'activité de stockage que l'exploitation minière s'est arrêtée et la mission principale des MDPA est de gérer le devenir de ces sites. Le développement de nouvelles techniques, notamment de télédétection satellitaire, a révolutionné le suivi de déplacement de surface d'origine aussi bien anthropique que naturelle [7,8]. L'interférométrie radar (InSAR) permet le suivi d'un champ de déplacement dans la ligne de visée du satellite sur une large surface avec une résolution horizontale de 10 à 25m. La précision sur le déplacement atteint l'échelle millimétrique, en fonction à la fois des caractéristiques et du nombre d'images utilisées, et de la stabilité de la surface observée [9]. La ligne de visée étant proche de la verticale pour la plupart des satellites, les techniques InSAR sont adaptées au suivi de déplacements verticaux. De telles mesures furent ainsi réalisées à large échelle pour des bassins houillers dans le Nord/Pas-de-Calais et au Luxembourg [10,11], et à plus petite échelle pour Gardanne et pour le bassin salifère de Vauvert [12,13]. Une mine de potasse au Nouveau Mexique fut également étudiée par InSAR sur de courtes et longues périodes de temps [14,15]. Le bassin potassique alsacien fut brièvement étudiée avec les toutes premières images ERS pour montrer les avantages et inconvénients de l'InSAR à la détection d'affaissement minier [16].

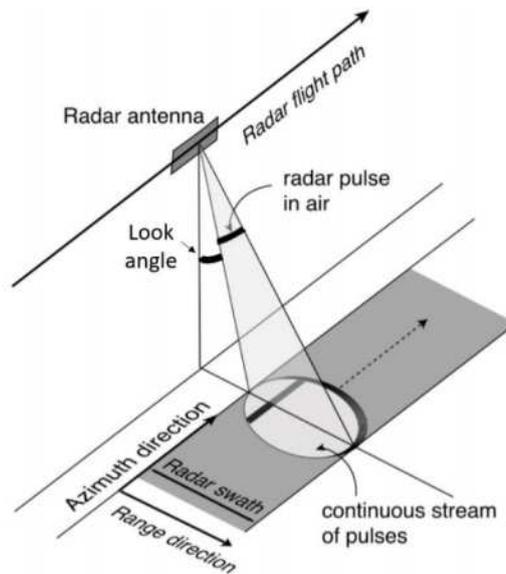
Dans cette étude, nous nous concentrons sur le suivi de l'affaissement minier dans le bassin potassique alsacien et son évolution sur la période 1995-2018. Nous utilisons la large archive d'images SAR acquise sur une période de 24 ans par l'« European Space Agency » (ESA). La combinaison du nivellement et de l'InSAR nous aide à contraindre l'évolution temporelle des déplacements en lien avec l'activité minière sous-jacente. Nous nous intéressons particulièrement à la phase résiduelle, soit la période de 16 ans suivant la fin de l'activité. Combiné avec d'autres travaux sur la modélisation d'affaissement minier, la mécanique résiduelle et ses paramètres physiques sont discutés. Cela nous aide à cartographier les zones où les affaissements miniers sont toujours en cours et de distinguer d'autres zones où des déplacements anormaux se produisent. Pour ces zones, les sources potentielles sont discutées.

### 2. Présentation de la méthode

#### a. Interférométrie d'images SAR

Les développements technologiques, associé au lancement de satellites, ont ouvert la voie à de nouvelles approches pour observer la surface terrestre en collectant une large variété de données, notamment des images optique et radar à synthèse d'ouverture (« Synthetic Aperture Radar » en anglais, SAR). Plusieurs impulsions d'onde électromagnétique sont émises à travers une large surface simultanément à l'avancée du satellite, menant à plusieurs observations d'un même point (Figure 3). Une image SAR est créée en concentrant les multiples observations du même point. Une amplitude et une phase, comprise entre  $-\pi$  et  $\pi$ , spécifique sont associées à chacun des pixels. L'interférométrie radar (InSAR) permet de mesurer le déplacement du sol en utilisant la différence de phase entre deux images couvrant la même région acquise à deux dates différentes et d'un point de vue similaire. Grâce à la rotation de la Terre et de son déplacement autour du soleil, le satellite réalise deux types d'observations le long de trajet ascendant (du Sud vers le Nord) et descendant (du Nord vers le Sud). Deux paramètres doivent être pris en compte lors du traitement, les lignes de bases perpendiculaire et temporelle. La perpendiculaire représente la distance entre les deux positions du satellite lors des acquisitions alors que la temporelle représente le temps séparant les deux acquisitions. De nos jours, cette méthode est utilisée dans les sciences de la Terre pour quantifier les champs de déplacements de surface pour une meilleure compréhension des processus à l'origine des phénomènes tectoniques et volcaniques [17], mais aussi surveiller les déplacements induits par l'activité humaine dans le cas d'exploitation pétrolière, géothermique ou minière [18]. Avec des archives croissantes d'images SAR et de faibles périodes d'acquisition des nouveaux satellites, il est maintenant possible de suivre des déplacements de surface sur de longues périodes et des surfaces plus ou moins larges [19,20]. Cette technique est par moment incorporée dans des protocole de surveillance [21].

Plusieurs ouvrages décrivent en détails le principe de la méthode [22,23]. Nous reprenons ici quelques étapes clés. Dans un premier temps, deux images ne sont jamais exactement acquises depuis le même point de vue, leur référentiel est donc différent. L'idée est d'associer proprement chaque pixel de l'image esclave à son équivalent dans le référentiel de l'image de référence ou maître, en ré-échantillonnant spatialement l'image esclave. Dans un second temps, une fois le co-enregistrement réalisé, un interférogramme est créé en calculant le produit conjugué du signal radar à chaque pixel. Cela revient à calculer la différence de phase entre les deux images et la phase ainsi obtenue est appelée phase interférométrique. La phase interférométrique est la somme de cinq contributions spécifiques à chaque pixel :



**Figure 3:** Illustration de la géométrie d'une acquisition SAR. Le dessin n'est pas à l'échelle (« Principles and theory of radar interferometry », présentation de Rosen). Le satellite observe la surface terrestre en regardant vers la droite. La « radar swath » représente la bande scannée lors de l'acquisition et est large d'une centaine de kilomètres. La surface couverte par l'impulsion d'onde est dite illuminée. Ces zones illuminées se superposent au cours d'une acquisition.

- Orbitale : liée à la différence de position du satellite entre les deux acquisitions et à la précision sur leur emplacement ;
- Atmosphérique : liée à la différence de composition de l'atmosphère lors des deux acquisitions, notamment la vapeur d'eau dans la troposphère jouant le trajet des ondes ;
- Topographique : liée au relief de la surface terrestre ;
- Déformation : le déplacement se produisant entre les deux dates ;
- Bruit : liée à la différente source (instrumentale, traitement, surface terrestre, etc).

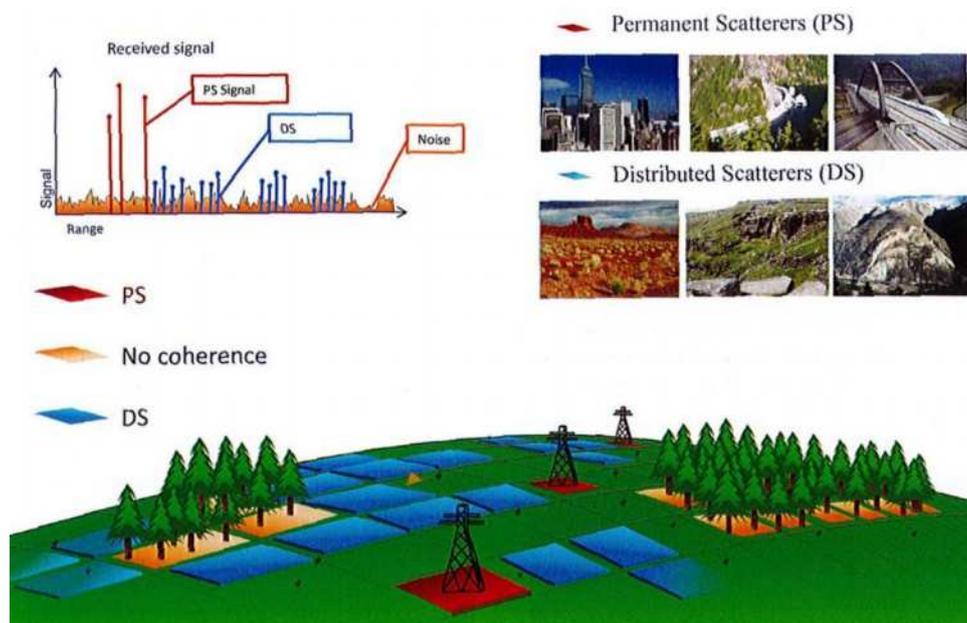
Dans notre cas, nous nous intéressons à la contribution de la déformation et les autres contributions doivent être précisément estimées afin d'être retirées du signal. Pour y parvenir, les contributions orbitales et topographiques sont respectivement modélisées à partir de données orbitales fournies par l'ESA et d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). La part atmosphérique peut être modélisée dans certains cas. Par exemple, la distribution de la vapeur d'eau dans la troposphère peut être estimée soit à partir de modèles mathématiques ou météorologique [24,25]. Ensuite, la phase étant contrainte dans un intervalle de  $2\pi$ , le déplacement n'est pas mesuré de manière absolue mais relative et l'étape la plus complexe reste à accomplir. Cette étape est appelée déroulement et est nécessaire pour estimer un déplacement supérieur à  $\lambda/2$ , avec  $\lambda$  la longueur d'onde du signal électromagnétique. Après le déroulement, la phase obtenue est proportionnelle à la variation de distance satellite-pixel entre les deux acquisitions, le facteur de proportionnalité étant  $4\pi/\lambda$ . Le déplacement ainsi obtenu est orienté selon la ligne de visée du satellite. Pour des angles d'incidence inférieurs à  $45^\circ$ , les mesures sont plus sensibles aux déplacements verticaux qu'horizontaux. Cette

## 2. Présentation de la méthode

sensibilité aux déplacements verticaux est similaire aussi bien en sens ascendant que descendant. La projection dans la ligne de visée du satellite des déplacements horizontaux dépendra de la géométrie d'acquisition. Par exemple, un déplacement vers l'Est sera positif pour une géométrie ascendante alors qu'il sera négatif pour une géométrie descendante. La résolution complète d'un déplacement 3D avec l'InSAR est exceptionnelle. Cependant, la technique est suffisamment précise pour étudier certaines composantes [26].

### b. Traitement avec le logiciel StaMPS

Plusieurs méthodes [27] et chaînes de traitement [28] ont été développées depuis le lancement du premier satellite SAR. De nos jours, les défis proviennent du suivi du déplacement de surface au cours du temps sur une large surface. L'une des principales limites de l'InSAR est la décorrélation entre deux images empêchant le bon déroulement de la phase. Dans le cas de l'exploitation minière, la surface est essentiellement végétale, avec une large majorité de champs et forêts. Des décorrélations temporelles et volumétriques affectent les données et l'utilisation de méthodes traditionnelles n'aboutit pas à des résultats valables. Ainsi, nous avons employé la méthode des « Persistent Scatterers », dérivée des « Permanent Scatterers » [29], implémentée dans le logiciel « Stanford Method for Persistent Scatterers » (StaMPS) [30]. Cette méthode profite de la présence de réflecteurs dominants tels que les toits, les murs ou toute autre infrastructure humaine, dont la position et l'orientation sont stables au cours du temps (Figure 4).



**Figure 4:** Illustration des « Permanent/Persistent Scatterers » [23]. Les infrastructures humaines renvoient un signal fort, leurs surfaces étant plus aptes à réfléchir un signal. À l'opposé, les forêts renverront un signal faible et diffus, l'onde se réfléchissant sur les multiples branches. Entre ces deux catégories, les champs peuvent être retenus comme un PS si une surface renvoie de manière forte et stable le signal. Sinon ils seront considérés comme une forêt, en raison des ressources cultivées jouant sur la stabilité de la réflexion au cours du temps.

Les interférogrammes sont générés à partir d'une image commune de référence (ou maître) avec le logiciel Doris [31]. Concernant le satellite le plus récent (Sentinel-1), une chaîne de traitement a été développée sur la « Sentinel Application Platform » (SNAP) pour traiter spécifiquement les données de Sentinel-1 [32]. Une fois tous les interférogrammes constitués, pour chaque base de données, une première sélection est opérée sur la dispersion en amplitude des pixels. Ce paramètre évalue la stabilité de l'amplitude du signal renvoyé par chaque pixel. Ceux ayant une surface de réflexion variant au cours du temps auront une forte dispersion et seront écartés. Une deuxième sélection s'effectue sur le niveau de bruit estimé à chacun des pixels [33]. Une fois la sélection terminée, l'étape de déroulement commence avec les pixels restants. Le déroulement est fait en trois dimensions, deux spatiales et une temporelle, pour reconstituer l'évolution du pixel au cours du temps [34]. Pour améliorer la qualité des résultats, en augmentant la densité des pixels ou sélectionnant plus soigneusement les interférogrammes, la méthode « Small Baseline » a été implémentée dans StaMPS pour être appliquée avec la méthode des « Persistent Scatterers » [35]. L'intérêt de travailler avec des interférogrammes avec de faibles lignes de base est de diminuer les décorrélatons temporelles et spatiales.

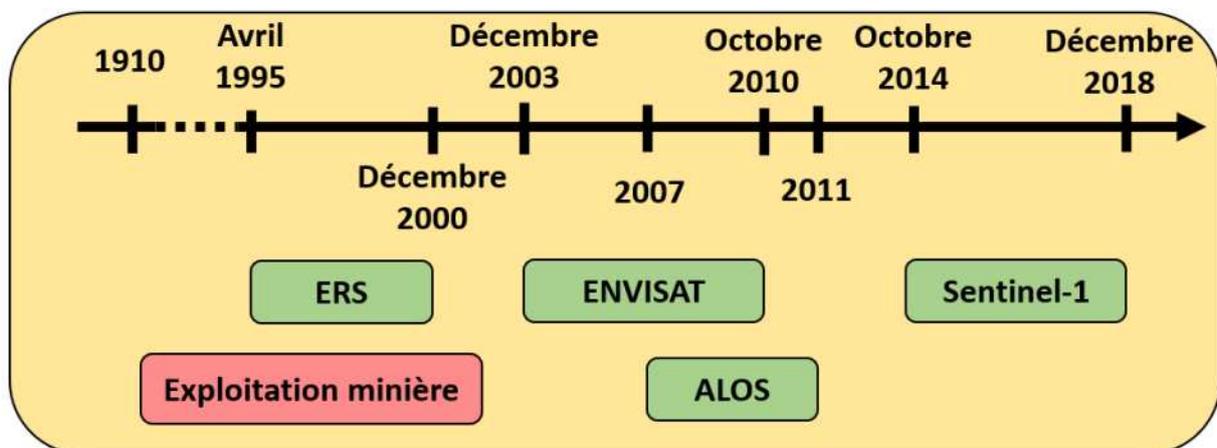
Plusieurs étapes de filtrage interviennent pour diminuer le bruit dans les données. Les composantes orbitale et topographique sont modélisées. La zone d'intérêt étant plate, ne mesurant pas plus de 15km par 15km, et les satellites étudiés utilisant la bande C (longueur d'onde comprise entre 4 et 8cm), la composante atmosphérique est considérée négligeable [36]. Malgré tout, une incertitude est présente à la fin. Sa valeur exacte n'est pas quantifiable à cause de la multiplicité et de la complexité des étapes. Cependant, plusieurs auteurs se sont penchés sur la question. Dans ces travaux de thèse, Ketelaar s'était intéressée à la précision des résultats InSAR, notamment après traitement avec des « Persistent Scatterers ». La méthode reposait sur la comparaison entre les résultats InSAR et le déplacement suivi en certains points par nivellement. Ses travaux montrent que la précision des résultats dépendra du nombre d'image par archive et de la densité finale de pixels sur la zone d'intérêt. Celle-ci varie entre quelques millimètres dans les zones bien résolues à plusieurs millimètres quand la densité de pixels diminue [9]. Les résultats montrent également qu'une archive d'une vingtaine d'images est nécessaire pour atteindre la même précision que les méthodes traditionnelles. Dans notre étude, les séries temporelles seront réalisées avec les moyennes des pixels présents dans un rayon de 100 à 150m autour du point considéré. L'incertitude est représentée par l'écart-type du déplacement observé par les différents pixels [37].

### 3. Données

Nous analysons indépendamment les archives des images en bande C provenant de trois satellites de l'ESA, chacune couvrant une période distincte. Les données des satellites « European Remote-Sensing » (ERS), « ENVironment SATellite » (ENVISAT) et Sentinel-1 couvrent les périodes de 1992 à 2001, de 2003 à 2010 et 2014 à 2018, respectivement. La période d'acquisition était de 35 jours pour ERS et ENVISAT, et de 12 jours de Novembre 2014 à Septembre 2016, puis de 6 jours d'Octobre 2016 à Décembre 2018 pour les satellites Sentinel-1. La période d'acquisition est divisée par deux sur la période Sentinel-1 grâce à la mise en orbite d'un deuxième satellite identique au premier. Nous avons également eu accès aux images en bande L du satellite « Advanced Land Observing Satellite » (ALOS), ayant une période d'acquisition de 46 jours. Parmi les quatre satellites, un seul couvre la période d'exploitation (ERS), les trois autres suivent la période de l'après-mine (Figure 5).

Sur l'ensemble des douze archives traitées, le traitement a pu aboutir pour neuf d'entre elles (Tableau 1). Pour ALOS, le nombre de données était nettement insuffisant pour étudier la zone. Pour ERS, l'archive 258 présentait un nombre limité de données mais la mauvaise répartition temporelle des données combinée aux forts déplacements attendus ne permirent pas d'obtenir des résultats convenables. Pour les satellites ERS, ENVISAT et Sentinel-1, le traitement a abouti aussi bien pour des archives ascendantes que descendantes, nous permettant de discuter des déplacements horizontaux par la suite. Cependant, à chaque fois, les archives ascendantes et descendantes n'ont pas la même résolution temporelle.

Le traitement des archives a été réalisé avec la méthode des « Small Baseline » pour les satellites ERS et ENVISAT. Pour les données Sentinel-1, seule la méthode des « Persistent Scatterers » était disponible au moment des travaux. Afin d'estimer la contribution topographique lors du traitement, nous utilisons le modèle numérique de terrain provenant de la mission « Shuttle Radar Topography Mission » (SRTM) [38] avec une résolution de 30m.



**Figure 5:** Couverture temporelle des données SAR traitées. Une période de 3 ans sépare les données ERS et ENVISAT, et une de 4 ans entre ENVISAT et Sentinel-1.

## Suivi des niveaux de surface

Les paramètres de traitement sont adaptés à la période d'étude. Pour ERS, nous avons choisi un seuil de cohérence de 0.18 entre les images SAR, une ligne de base temporelle de 210 jours maximum et une ligne de base perpendiculaire de 700m. Dans StaMPS, la cohérence est une valeur quantitative représentant la viabilité d'un interférogramme basée sur les lignes de bases entre les deux images. Les choix de cohérence et de ligne de base temporelle sont en lien aux forts déplacements de surface sur la période d'étude, induisant erreur et décorrélation temporelle et spatiale. La topographie relativement plane du bassin potassique alsacien justifie de prendre une large ligne de base perpendiculaire. Pour ENVISAT, nous avons retenu une cohérence seuil de 0.35, une ligne de base temporelle de 3 ans et une perpendiculaire de 700m, due à des déplacements de surface plus faibles. Pour Sentinel-1, la ligne de base temporelle est environ de 2 ans et la spatiale, inférieure à 200m. Pour ces données, tous les interférogrammes sont créés à partir d'une même date de référence.

***Tableau 1:** Présentation des données satellitaires traitées. « Asc. » signifie ascendant, et « Des. » signifie descendant. Un numéro d'archive en vert signifie que le traitement a pu aboutir alors qu'en rouge, le traitement a échoué.*

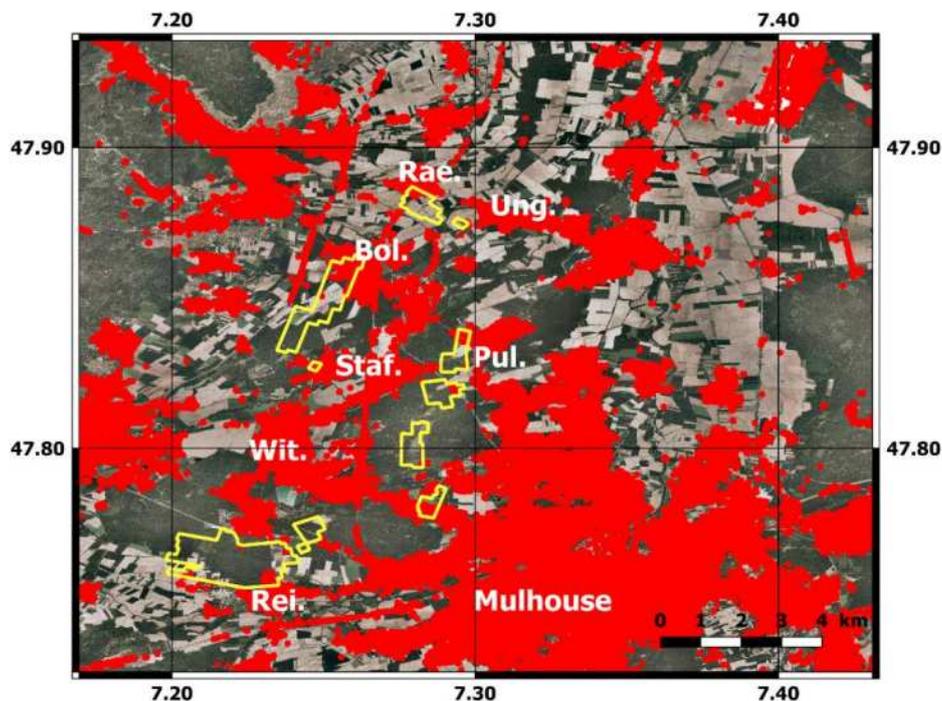
| Satellite  | Archives | Direction | Angle de visée [°] | Angle d'incidence [°] | Nombre d'image | Période   |
|------------|----------|-----------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------|
| ERS        | 29       | Asc.      | 21.5               | 24.3                  | 32             | 1995-2001 |
|            | 65       | Des.      | 17.8               | 20.1                  | 65             | 1992-2001 |
|            | 258      | Asc.      | 18.2               | 20.5                  | 22             | 1993-2000 |
|            | 294      | Des.      | 21.2               | 24                    | 73             | 1992-2001 |
| ENVISAT    | 29       | Asc.      | 21.4               | 24.2                  | 27             | 2004-2010 |
|            | 65       | Des.      | 18.5               | 20.9                  | 35             | 2003-2010 |
|            | 258      | Asc.      | 18.9               | 21.4                  | 27             | 2004-2010 |
|            | 294      | Des.      | 21.4               | 24.3                  | 42             | 2003-2010 |
| ALOS       | 647      | Asc.      | 34                 | 38.4                  | 11             | 2007-2010 |
|            | 648      | Asc.      | 35.6               | 40.2                  | 14             | 2007-2010 |
| Sentinel-1 | 66       | Des.      | 39.9               | 43.7                  | 145            | 2015-2018 |
|            | 88       | Asc.      | 36.1               | 38.9                  | 186            | 2014-2018 |

### 4. Résultats

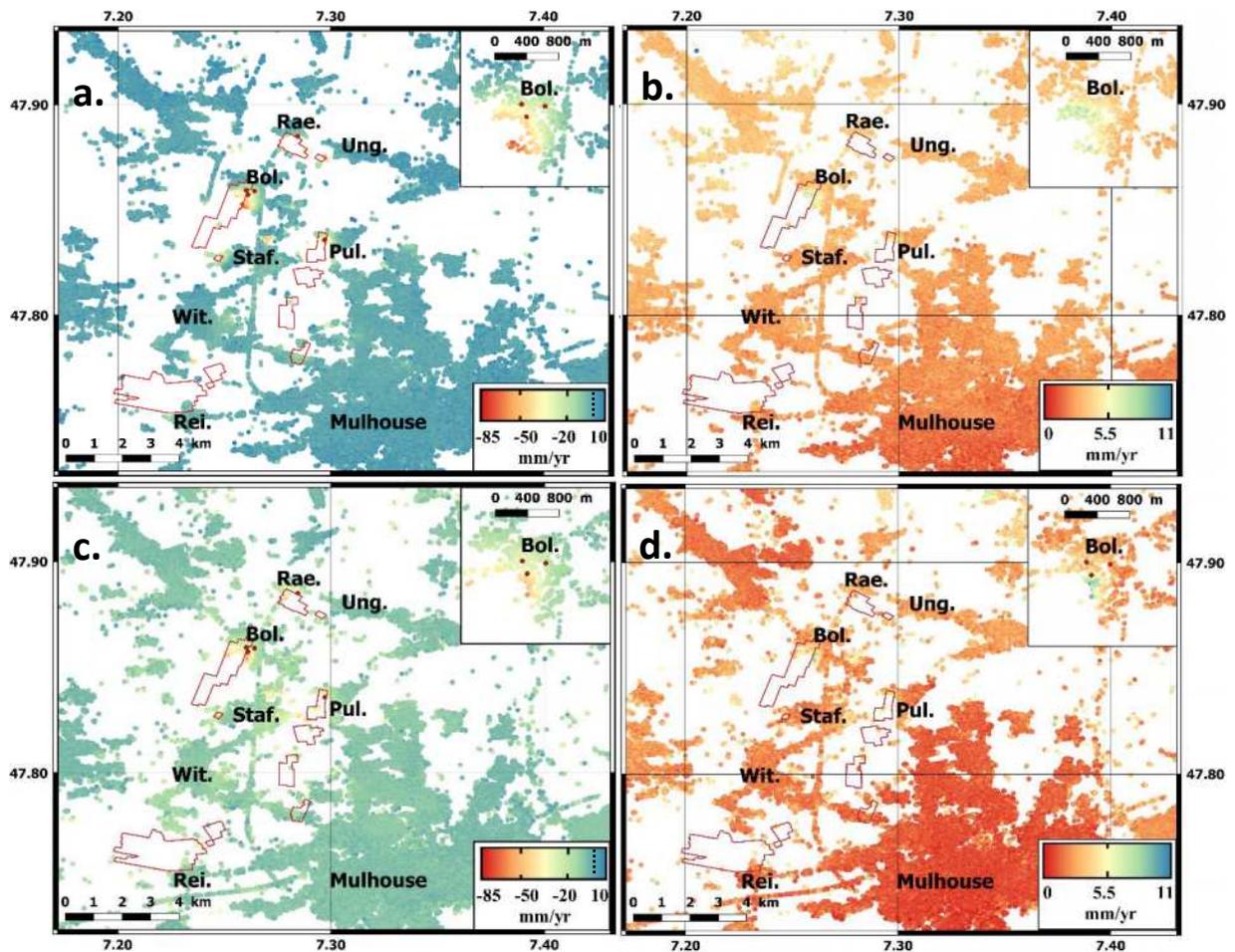
Nous présentons dans cette partie les résultats provenant des archives descendantes et ascendantes les mieux résolues pour chacun des satellites. Les résultats sont présentés sous forme de carte de vitesse moyenne dans la ligne de visée du satellite. Des séries temporelles sont ensuite réalisées à des points clés et comparées à d'autres mesures comme celles de nivellement. Des signaux miniers caractéristiques sont observés et suivis. D'autres signaux présentent un comportement différent de ce qui est attendu, aussi bien pendant l'exploitation qu'après. Les potentielles sources de ces signaux ainsi que les mécanismes à l'origine des affaissements miniers sont discutés dans la partie suivante.

#### a. Les cartes de vitesses moyennes

L'analyse et le suivi des déplacements de surface sont restreints aux pixels sélectionnés lors du traitement. Ces pixels sont situés au niveau des zones urbanisées et des infrastructures humaines telles que les habitations, les routes et les rails (Figure 6). Toutes les surfaces végétalisées ne sont que faiblement, voire absolument pas couvertes. La couverture spatiale des résultats InSAR correspond environ à un tiers des concessions minières et reste la même pour les différentes archives. Cependant, seulement une petite surface des exploitations les plus récentes est couverte par les résultats InSAR. Cela limite fortement l'étude détaillée de l'affaissement minier lors des phases initiales ou du début de la phase résiduelle.



**Figure 6:** Localisation des pixels d'étude retenus à travers le bassin potassique alsacien sur la période ENVISAT. Les polygones jaunes représentent les exploitations minières les plus récentes de 1990 à 2002.



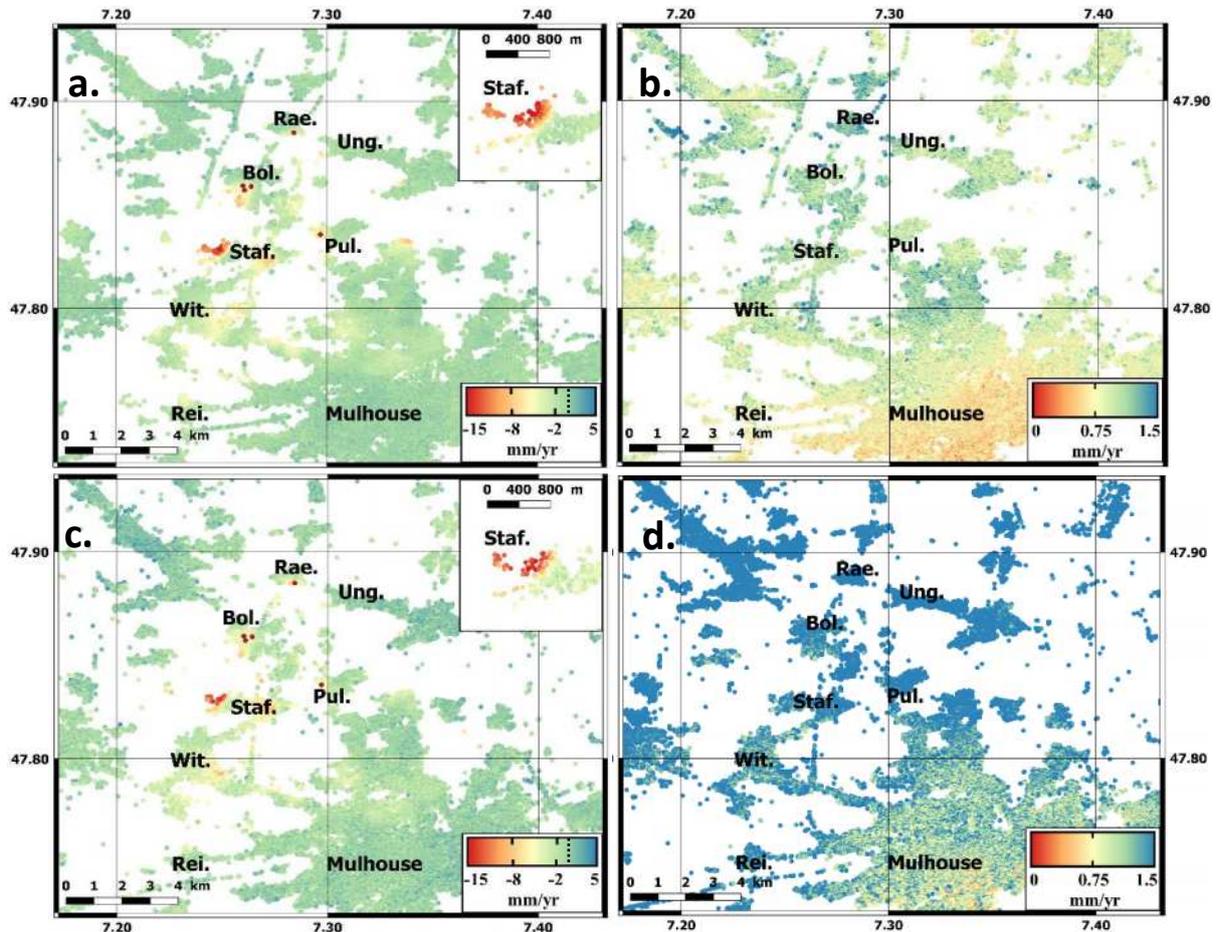
**Figure 7:** Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période ERS (b,d). En haut, les cartes proviennent de l'archive 294 (des.) et en bas, de l'archive 29 (asc.), les mieux résolues.

Afin d'analyser la variation spatiale des vitesses de surface, nous présentons des cartes de vitesse moyenne dans la ligne de visée du satellite (LOS) sur les trois périodes correspondant aux trois archives d'images SAR (Figure 7, Figure 8 et Figure 9). Pour chacun des satellites, les résultats provenant d'une archive ascendante et d'une descendante sont présentés.

Dans un premier temps, nous remarquons que les mouvements du sol correspondent à des déplacements s'éloignant du satellite, soit des affaissements. Ces mouvements se sont produits à toutes les périodes étudiées, incluant la période Sentinel-1 (2014-2018). Ces résultats suggèrent que les affaissements résiduels sont toujours en cours plus de 12 ans après la fin de l'exploitation. De plus, aucune nouvelle zone ne se met en mouvement après la fin de l'exploitation. Dans un deuxième temps, les champs de vitesse révèlent que les taux de déplacements les plus importants sont localisés sur des surfaces couvrant moins de 1km<sup>2</sup>. Ces aires correspondent principalement aux villages situés au-dessus des exploitations récentes tels que Bollwiller, Pulversheim, Reiningue, Staffelfelden et Raedersheim (Figure 7.ac). Ensuite, l'amplitude de la vitesse moyenne décroît significativement au cours du temps. La

## 4. Résultats

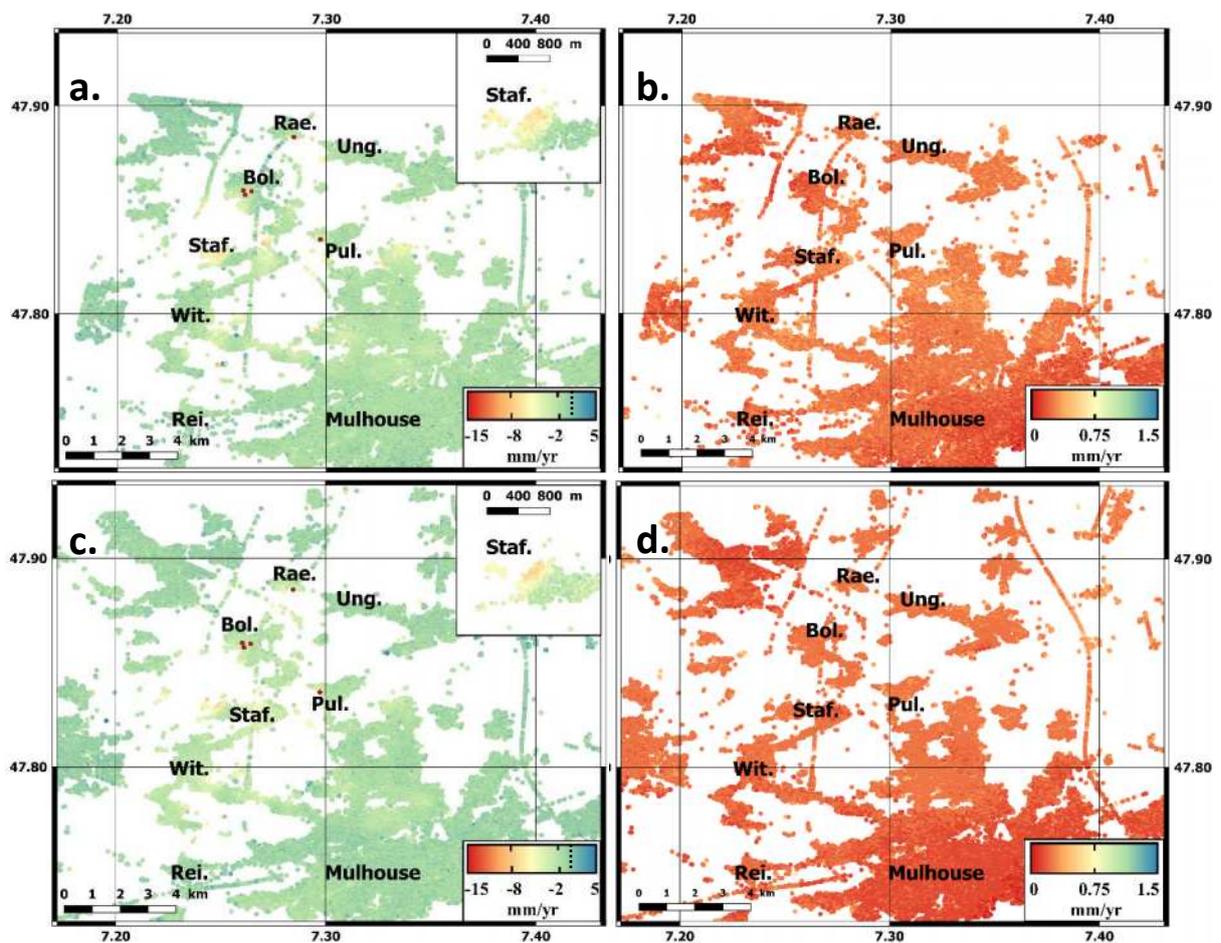
comparaison en termes d'amplitude doit être prise avec précaution dû à la différence de géométrie d'acquisition entre les satellites. La vitesse moyenne LOS pour ERS et ENVISAT peuvent être directement comparées car l'azimut et l'angle de visée sont similaires, ce qui n'est pas le cas pour les satellites Sentinel-1 ([Tableau 1](#)). La vitesse moyenne maximum en LOS atteint  $84 \pm 9.5 \text{ mm.an}^{-1}$  pour la période ERS (1995-2000) en sens descendant contre  $60 \pm 9.5 \text{ mm.an}^{-1}$  en sens ascendant. Ces valeurs chutent à  $15 \pm 1.3 \text{ mm.an}^{-1}$  sur la période ENVISAT (2003-2010) aussi bien en ascendant qu'en descendant. Enfin, les résultats en sens ascendant et descendant tendent à s'homogénéiser avec le temps. Les différences observées, notamment sur la période ERS, peuvent avoir deux origines : la couverture temporelle et les déplacements horizontaux. Les archives ascendantes sont moins bien résolues que les archives descendantes, avec un facteur 2 concernant le nombre d'images. Cette différence diminue avec les satellites plus récents. Les déplacements horizontaux impacteront différemment le déplacement LOS de données ascendantes et descendantes. L'homogénéisation des résultats pourrait se traduire par une diminution de l'amplitude des déplacements horizontaux, tendant à devenir négligeable.



*Figure 8: Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période ENVISAT (b,d). En haut, les cartes proviennent de l'archive 294 (des.) et en bas, de l'archive 29 (asc.), les mieux résolues.*

Les **Figure 7 (bd)**, **Figure 8 (bd)** et **Figure 9 (bd)** montrent la distribution spatiale de l'écart-type de la vitesse moyenne LOS déterminée par régression linéaire. Une première observation est l'amplitude décroissante de l'écart-type, devenant de plus en plus homogène au sein de la zone d'étude au cours des trois périodes. En plus de l'amélioration de la résolution temporelle des archives, cela suggère que l'évolution temporelle du déplacement LOS tend à être linéaire pour l'ensemble de la zone. L'amplitude de l'écart-type est très forte, supérieure à  $9\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$ , sur la période ERS, impliquant des déplacements non-linéaires à des endroits tels que Bollwiller et Pulversheim (**Figure 7.bd**). Comme pour les vitesses, ces forts écart-types sont localisés sur des zones restreintes.

En complément de ces observations, deux autres zones attirent notre attention. Des déplacements sont observés longtemps après l'exploitation en profondeur, parfois plusieurs décennies après. À Staffelfelden, l'amplitude absolue de la vitesse moyenne LOS est supérieure à  $8\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  sur l'ensemble des périodes considérées, y compris Sentinel-1, alors que l'exploitation s'est terminée en 1990. Au Nord de Mulhouse, une vitesse moyenne LOS de  $-2\text{--}3\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  est observée à la fois sur les périodes ENVISAT et Sentinel-1, soit plus de 30 ans après l'exploitation ayant eu lieu de 1960 à 1970. Sur la période ERS, ces deux zones semblent



**Figure 9:** Cartes de vitesses moyennes dans la ligne de visée du satellite (LOS) (a,c) et de leurs écart-types sur la période Sentinel-1 (b,d). En haut, les cartes proviennent de l'archive 66 (des.) et en bas, de l'archive 88 (asc.).

## 4. Résultats

---

masquées par les fortes amplitudes liées à l'exploitation minière. De plus, les vitesses observées au Nord de Mulhouse sont de l'ordre de grandeur de l'écart-type, limitant la lisibilité du signal.

### b. Le suivi temporel d'un affaissement minier

#### i. Pendant la période d'exploitation (ERS)

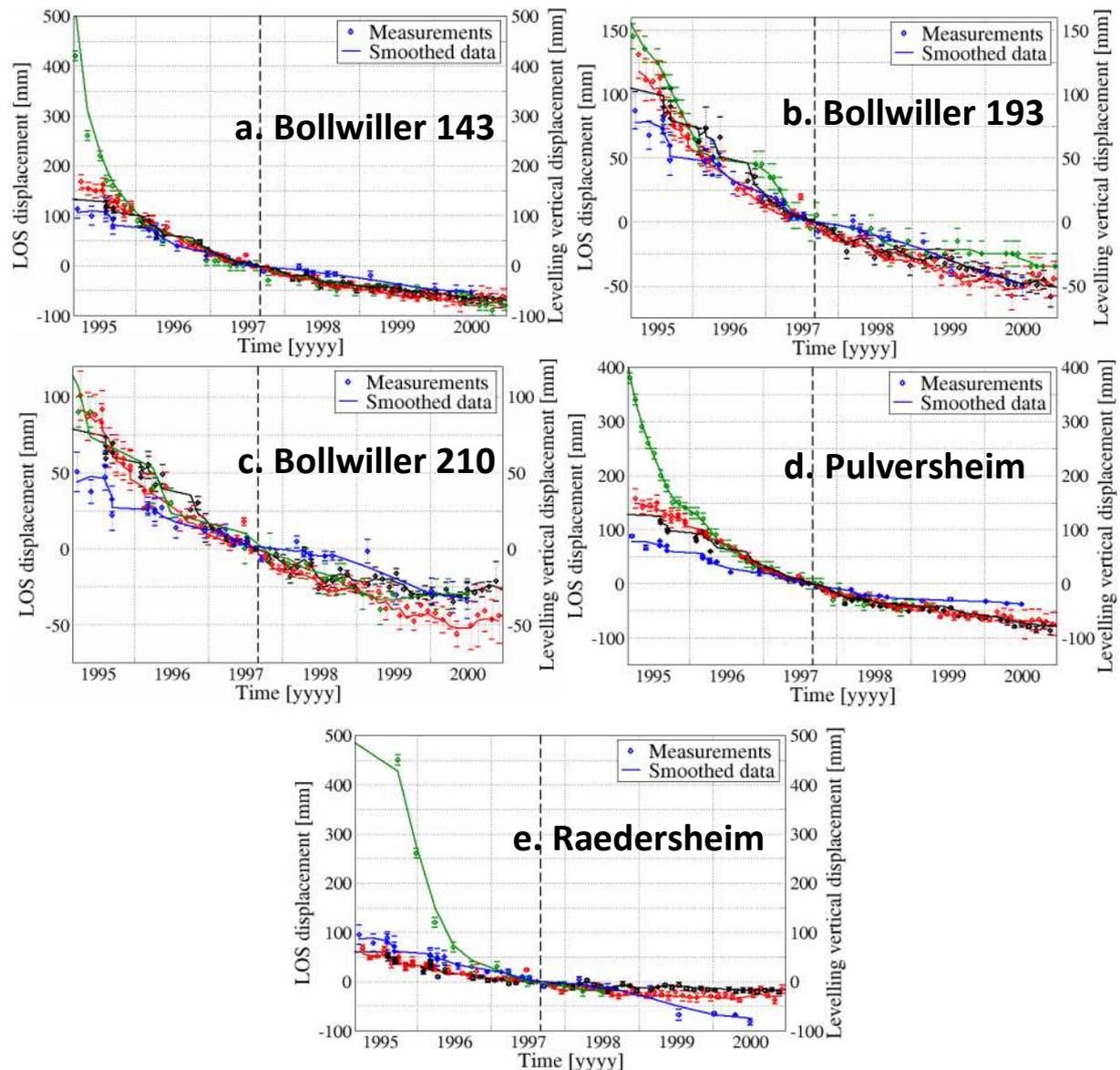
Pour valider nos résultats pendant la phase d'exploitation, nous comparons d'abord les séries temporelles du déplacement dans la ligne de visée du satellite (LOS) obtenue de manière indépendante pour chacune des archives ERS. Ces résultats sont ensuite comparés aux mesures de nivellement réalisées à cinq points différents de 1992 à 2000. La valeur zéro des séries temporelles est initiée au 3 Septembre 1997.

Comme attendu des fortes valeurs d'écart-type des vitesses moyennes LOS, l'évolution temporelle du déplacement LOS n'est pas linéaire sur l'ensemble de la période ERS (**Figure 10**). Toutes les séries temporelles montrent une nette décroissance du déplacement LOS. Les angles de visée et d'incidence étant similaires, la forte ressemblance entre les deux jeux de données descendants valide notre traitement. Les trois séries temporelles InSAR sont cohérentes entre elles. Cette bonne cohérence indique que les déplacements de surface sont principalement orientés selon l'axe vertical. À partir de 1999, de petites différences apparaissent entre les deux types d'archives à Pulversheim et Raedersheim. Toutefois, à partir du même moment, l'archive ascendante est moins bien résolue que les descendantes avec un nombre plus faible d'image à disposition. De 1995 à mi-1996, à l'exception de Pulversheim, les résultats descendants montrent un déplacement plus important que celui obtenu à partir des données ascendantes. Cela pourrait provenir de la faible résolution temporelle de ces dernières, de déplacements horizontaux importants et/ou d'erreurs de déroulement liées aux forts déplacements et la faible couverture spatiale des pixels.

La comparaison entre les résultats InSAR et les mesures de nivellement ne peut pas se faire directement. Pour améliorer la visualisation des informations, les mesures de déplacement vertical du nivellement sont initiées à la date de référence. Les déplacements mesurés par InSAR et nivellement ne sont similaires qu'aux points de nivellement 193 et 210 de Bollwiller (**Figure 10.bc**). Pour tous les autres points, l'InSAR et le nivellement n'ont pas le même déplacement cumulé. Seulement 20%, 50% et 50% du déplacement cumulé mesuré par nivellement est retrouvé par InSAR à Raedersheim, Pulversheim et au point 143 de Bollwiller (**Figure 10.ade**). Les différences observées sont concentrées dans les premiers mois des séries temporelles : jusque fin 1996 pour les trois points. L'écart entre les déplacements cumulés est de l'ordre de 370mm à Bollwiller (143), 320mm à Pulversheim et 470mm à Raedersheim. Il est également à noter que la différence est plus importante pour l'archive ascendante que les

descendantes. À partir de 1997, les résultats InSAR et les mesures de nivellement sont cohérentes jusqu'à la dernière mesure de nivellement à chacun des points.

Les différences significatives entre le nivellement et l'InSAR sur la période 1995-1996 ne peuvent pas seulement s'expliquer par l'orientation des mesures : verticale pour le nivellement et ligne de visée pour l'InSAR. Cela aurait impliqué des déplacements horizontaux importants, dans la direction Nord. Dans la direction Est, cela se serait traduit par de forts écarts entre les sens ascendant et descendant. Un écart de 10cm entre le déplacement LOS et le nivellement correspondrait à un déplacement de 26cm vers le Sud. Ces différences soulignent ainsi les limites de la technique InSAR. Cette méthode n'est pas adaptée pour suivre



**Figure 10:** Comparaison des séries temporelles entre les données de nivellement (vertical) et ERS (LOS) en cinq points suivis par les deux méthodes. Les points indiquent les mesures alors que les courbes, les mesures lissées avec une fenêtre temporelle. Les données en vert correspondent au nivellement, le bleu à l'archive 29, le noir à la 65 et le rouge à la 294.

## 4. Résultats

---

des déplacements importants, surtout s'ils affectent de petites zones avec des gradients latéraux importants et une faible couverture spatiale des pixels. Comme les résultats nous le montrent, cela est vrai pour des données avec une période d'acquisition mensuelle ou supérieure. Avec une période d'acquisition comme celle de Sentinel-1, 12 jours puis 6 jours, ce genre de problème aurait moins tendance à se produire. En revanche, aucun signal d'amplitude similaire n'est détecté sur la période Sentinel-1 pour l'attester.

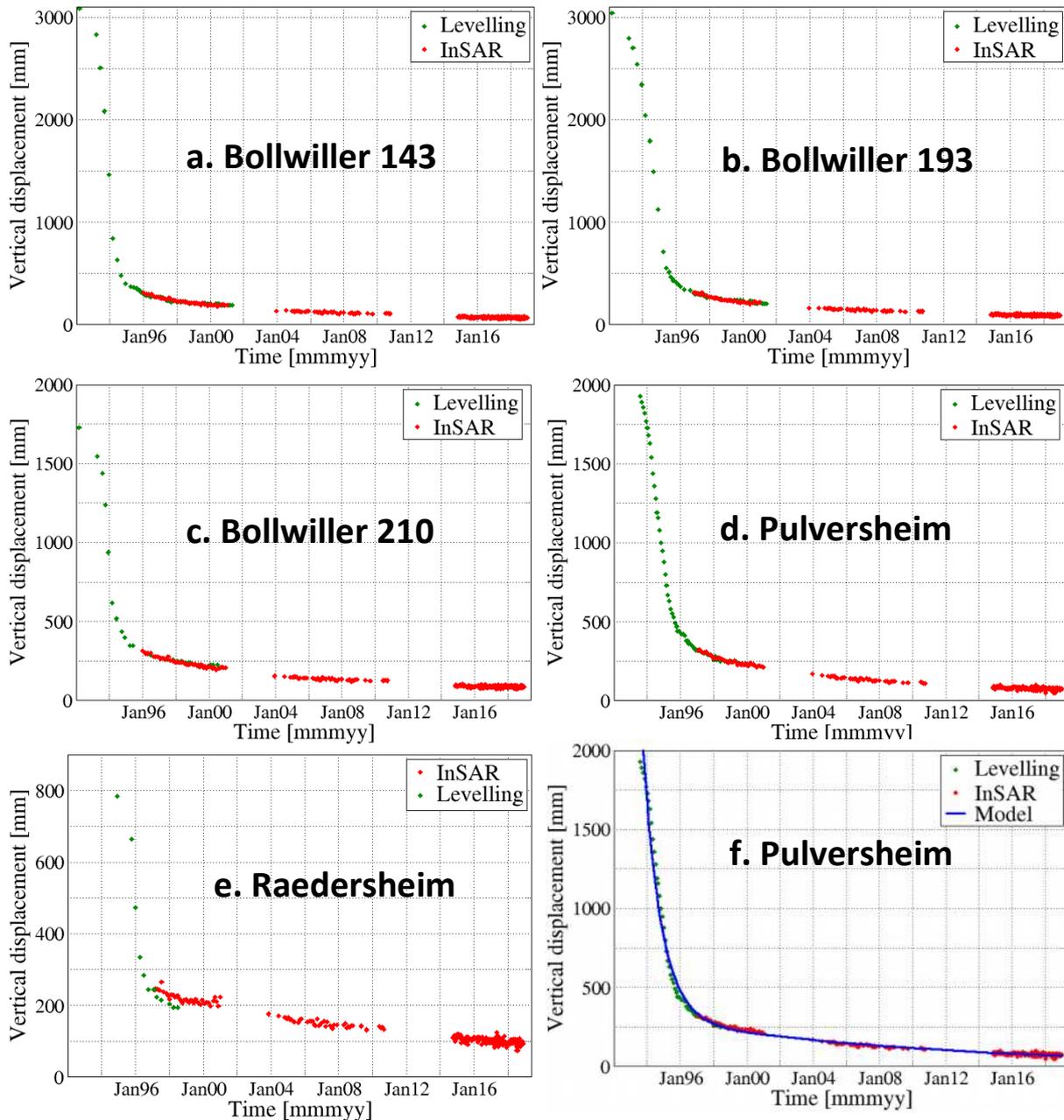
Pour la suite, nous considérons que nos séries temporelles InSAR ne sont pas fiables pour les années 1995 et 1996 pour Bollwiller (143), Pulversheim et Raedersheim et seulement 1995 pour les deux autres points. Les analyses des déplacements de surface sur ces périodes seront conduites avec l'utilisation du nivellement. À la suite de ces périodes, les séries temporelles des données ascendantes et descendantes étant similaires aux mesures de nivellement, nous considérons que les déplacements de surface se produisant en ces lieux sont majoritairement verticaux. Au cours de ces périodes, aux points de nivellement présentés, les déplacements verticaux représenteraient entre 46mm à Raedersheim et 108mm à Pulversheim, soit une vitesse comprise environ entre 11 et 27mm.an<sup>-1</sup>. Grâce à cette hypothèse, nous reconstituons des séries temporelles sur la période 1992-2018 (Figure 11). Cependant, cela n'est pas toujours le cas et nous verrons des cas où les déplacements horizontaux sont loin d'être négligeables.

### ii. Sur l'ensemble des périodes d'observation

Nos résultats ont précédemment montré que l'affaissement était toujours en cours deux décennies après la fin des travaux. Les déplacements détectés ont une faible amplitude et sont localisés près des travaux miniers. Pendant la période ERS, les résultats montrent que les déplacements tendent à devenir verticaux. Ainsi, nous supposons que le déplacement est vertical sur la période ENVISAT et Sentinel-1 aux points suivis à la fois par InSAR et nivellement, soit Bollwiller, Pulversheim et Raedersheim. Avec cette hypothèse, nous pouvons projeter verticalement nos séries temporelles réalisées à ces points. Par conséquent, la vitesse verticale en ces points est comprise entre 4mm.an<sup>-1</sup> à Bollwiller et 8mm.an<sup>-1</sup> à Pulversheim sur la période ENVISAT (2004-2010), et inférieure à 5mm.an<sup>-1</sup> sur la période Sentinel-1 (2014-2018).

À ces points, en projetant verticalement nos résultats, nos quatre jeux de données (Sentinel-1, ENVISAT, nivellement et ERS à partir d'une certaine date) sont tous selon l'axe vertical. Dès lors, il est possible de combiner ces jeux de données et de suivre l'évolution du déplacement sur une large période. Toutefois, à l'exception du nivellement et des résultats ERS qui couvrent la même époque, les résultats ENVISAT et Sentinel-1 sont déconnectés des deux précédents jeux de données. De ce fait, nous avons besoin d'un modèle pour ajuster nos données. L'un des premiers modèles proposés associe l'évolution temporel d'un affaissement

minier à un simple terme exponentiel, en lien avec la décroissance naturelle du phénomène [39]. Depuis, le paramètre temporel de l'exponentiel a été estimé à partir des caractéristiques de l'exploitation [40]. L'encadrement empirique proposé est basé sur l'observation d'affaissement minier se produisant dans des bassins houillers européens et chinois. L'objectif de cette étude était de prédire le temps nécessaire à l'arrêt de l'affaissement minier dans le cas où aucun suivi n'était réalisé. Cependant, en appliquant cette formule dans notre cas, les paramètres temporels obtenus indiquent un arrêt des déplacements 10 ans après le début



**Figure 11:** Combinaison des séries temporelles des données de nivellement et InSAR en cinq points suivis par les deux méthodes. Les résultats InSAR sont projetés verticalement. Les bases de données sont recalées les unes aux autres par une somme de deux exponentielles.

## 4. Résultats

**Tableau 2:** Paramètres temporels de la somme de deux termes exponentiels aux cinq points de nivellement.

| Point de nivellement | Profondeur [m] | $\xi_1$ [yr <sup>-1</sup> ] | $\xi_2$ [yr <sup>-1</sup> ] |
|----------------------|----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Bollwiller 143       | 900            | 0.92 ± 0.02                 | 0.048 ± 0.002               |
| Bollwiller 193       | 900            | 0.90 ± 0.03                 | 0.058 ± 0.003               |
| Bollwiller 210       | 900            | 0.72 ± 0.02                 | 0.049 ± 0.002               |
| Pulversheim          | 1000           | 0.93 ± 0.01                 | 0.060 ± 0.001               |
| Raedersheim          | 850            | 1.32 ± 0.03                 | 0.041 ± 0.001               |

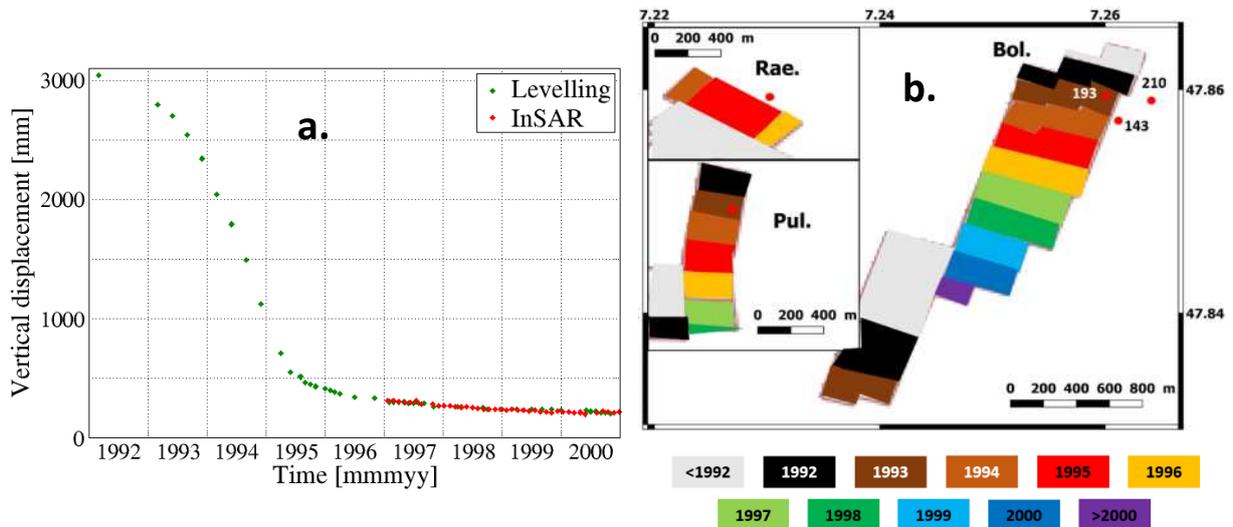
de l'affaissement alors que ceux-ci sont toujours en cours 20 ans après dans le bassin potassique. C'est pourquoi, nous décidons d'ajouter un second terme exponentiel au modèle afin de mieux contraindre les déplacements sur le long terme. Les jeux de données ont donc été ajustés avec une somme de deux exponentielles.

Nous avons utilisé les données de nivellement de 1992 à 1996 (1995 pour Bollwiller 193 et 210), les séries temporelles d'ERS à partir de 1997 (1996 pour Bollwiller 193 et 210), et toutes les données d'ENVISAT et Sentinel-1. La série temporelle d'ERS commence à 8% de la hauteur extraite et les données de nivellement sont ajustées par rapport à ERS. Un premier jeu de paramètres est estimé avec le nivellement et les résultats ERS pour chacun des points suivis. Grâce à ces paramètres, la série temporelle ENVISAT est recalée et de nouveaux paramètres sont estimés avec le nivellement, les résultats ERS et ENVISAT. Enfin, avec ces nouveaux paramètres, la série temporelle Sentinel-1 est ajustée. Ainsi, nous obtenons les séries temporelles présentées dans la [Figure 11 \(abcde\)](#). Les paramètres temporels à chacun des points sont indiqués dans le [Tableau 2](#) et le modèle est comparé à la série temporelle de Pulversheim ([Figure 11.f](#)).

### c. Caractérisation de la phase résiduelle

#### i. Amplitude de la phase résiduelle

À partir d'une carte d'exploitation annuelle et en prenant un angle d'influence de 35°, la phase résiduelle commence en 1996 à Bollwiller (193 et 210), et 1997 à Bollwiller 143, Pulversheim et Raedersheim. Ces dates coïncident au moment où le nivellement et les résultats InSAR se superposent. Les déplacements tendent à être verticaux avec le début de la phase résiduelle. Les séries temporelles combinées révèlent une décroissance importante de la vitesse avant le début de la phase résiduelle, en 1994 à Bollwiller (193 et 210), en 1995 à Bollwiller 143 et Pulversheim, en 1996 à Raedersheim. À Bollwiller 143, la vitesse chute en 1995, après l'extraction sous-jacente proche et lorsque l'exploitation s'éloigne. Une fois la phase résiduelle débutée, la décélération continue mais à un taux plus lent ([Figure 12.a](#)).



**Figure 12:** Série temporelle du nivellement accompagnée des résultats ERS à Bollwiller 193 (a) et position des points de nivellement relativement aux secteurs exploités les plus proches. Les points de nivellement sont représentés par les points rouges. À chaque période d'exploitation est associée une couleur.

À Raedersheim, la hauteur exploitée est de 3.05m contre 3.90m à Bollwiller et 4.00m à Pulversheim. Bollwiller 193 et Pulversheim sont situés au-dessus de l'exploitation sous-jacente alors que Bollwiller 143 et Raedersheim sont situés 50m à côté, 250m pour Bollwiller 210 (Figure 12.b). À l'exception de Raedersheim où seule la couche inférieure de potasse fut extraite, les deux couches furent extraites aux alentours des points de nivellement. À Pulversheim, la couche supérieure d'une épaisseur de 1.75m fut extraite 10 ans avant la couche inférieure, cet écart est de 13 ans pour Bollwiller où la couche supérieure est épaisse de 1.50m. Dans le cas de Bollwiller, le point 210 était en dehors de la zone d'influence pendant toute la période d'extraction de la couche supérieure. Le point 193 était à la frontière de la zone d'influence alors que le point 143 était dans la zone d'influence, mais plus proche de la frontière que de l'exploitation. Dans le cas de Pulversheim, le point est au-dessus des deux couches extraites.

À la fin de la période Sentinel-1, le déplacement vertical total mesuré par InSAR pendant la phase résiduelle aux cinq points de nivellement est indiqué dans le Tableau 3. Nous avons pris en compte seulement les déplacements suivis par les satellites sur les périodes 1996/1997-2000 (ERS), 2004-2010 (ENVISAT) et 2015-2018 (Sentinel-1). Nous n'avons pas pris en compte les déplacements se produisant sur les périodes 2001-2003 et 2011-2014 afin d'éviter tout biais induit par les ajustements. Aussi bien les MDPA que d'autres auteurs [3,5] expriment l'affaissement résiduel relativement à l'affaissement total se produisant en surface et une valeur de 10% fut estimée dans le bassin potassique. En utilisant nos données, cette valeur satisfait quatre de nos cinq observations. Toutefois, à Raedersheim, le taux est deux fois plus important que l'estimation. Par ailleurs, les valeurs de ce taux sont assez hétérogènes. Ces observations suggèrent que l'affaissement total n'est pas une référence fiable pour quantifier l'affaissement résiduel.

## 4. Résultats

Si nous comparons l'affaissement résiduel mesuré par InSAR à la hauteur extraite au fond, le taux est homogène pour les différents points et une valeur moyenne de 3.9% est obtenue. Cela évoque une certaine corrélation entre la phase résiduelle et la hauteur extraite.

*Tableau 3: Amplitude de l'affaissement résiduel aux cinq points de nivellement.*

| Point de nivellement | Début de la phase résiduelle | Affaissement phase active (nivellement) [cm] | Affaissement phase résiduelle (InSAR) [cm] | Phase résiduelle / Affaissement total [%] | Phase résiduelle / Hauteur extraite [%] |
|----------------------|------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------|
| Bollwiller 143       | 1997                         | 273                                          | 14                                         | 4.9                                       | 3.6                                     |
| Bollwiller 193       | 1996                         | 278                                          | 16                                         | 5.4                                       | 4.2                                     |
| Bollwiller 210       | 1996                         | 141                                          | 15                                         | 9.0                                       | 3.6                                     |
| Pulversheim          | 1997                         | 234                                          | 18                                         | 7.1                                       | 4.5                                     |
| Raetersheim          | 1997                         | 54                                           | 11                                         | 16.9                                      | 3.6                                     |

### ii. Comparaison à l'affaissement total

L'amplitude de l'affaissement minier dépend de quatre facteurs principaux : la hauteur extraite, la méthode de remblaiement, la distance au secteur exploité et le rapport entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur [1,2]. Dans notre cas, l'impact du remblaiement ne peut être illustré, le foudroyage était systématique après 1980. Le faible nombre de point d'étude restreint aussi l'analyse de l'effet de la hauteur exploitée. Néanmoins, Bollwiller et Raetersheim sont de bons exemples de l'effet du rapport et de la distance à l'exploitation. Bollwiller 193 est plus proche du secteur exploité que Bollwiller 210 et l'affaissement est près de deux fois plus important à Bollwiller 193. Bollwiller 143 et Raetersheim ont une distance similaire à leur secteur exploité sous-jacent respectif alors que l'affaissement minier est cinq fois plus important à Bollwiller que Raetersheim. La hauteur extraite est similaire dans les deux cas, 3.05m à Raetersheim contre 3.90m à Bollwiller, alors que le rapport entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur est de 0.4 à Raetersheim contre 1.0 à Bollwiller.

Nous considérons maintenant les déplacements verticaux se produisant pendant la phase résiduelle et nous essayons de voir si les mêmes paramètres influencent l'amplitude de l'affaissement résiduel. De toute évidence, l'effet du remblaiement ne pourra pas être vérifié. Ensuite, le ratio entre le déplacement vertical et la hauteur exploitée étant légèrement plus important à Bollwiller 193 et Pulversheim, l'affaissement résiduel dépend de la position par rapport au secteur exploité. Enfin, le taux similaire à Bollwiller 143 et Raetersheim suggère que le rapport entre la largeur de l'exploitation et sa profondeur n'affecte pas l'affaissement résiduel.

À Staffelfelden, nous observons les vitesses les plus importantes sur les périodes ENVISAT et Sentinel-1. En supposant un déplacement principalement vertical pendant les trois périodes, cela aboutit à une vitesse verticale (vers le bas) de  $3\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$ ,  $1.5\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$  et  $1\text{cm}\cdot\text{an}^{-1}$

pendant les périodes ERS, ENVISAT et Sentinel-1, respectivement. La zone est en phase résiduelle pendant toute la période d'observation InSAR. Le déplacement vertical mesuré par InSAR est d'environ 28cm, soit 8% de la hauteur extraite et deux fois les autres valeurs calculées.

Pour résumer, de l'analyse de nos résultats, l'affaissement résiduel dépend de la hauteur extraite et de la distance à l'exploitation, la contribution de la méthode de remblaiement ne pouvant être vérifiée. L'affaissement total et l'affaissement résiduel ne reposent pas sur les mêmes paramètres. Toutefois, nous devons vérifier si nos mesures ne sont pas biaisées par d'autres sources de déplacements.

### d. Les autres signaux

Après la réalisation de séries temporelles proches des exploitations récentes, deux sites retiennent notre attention. Ces deux points présentent un déplacement particulier pendant la période ERS. Dans les deux cas, les séries temporelles obtenues en direction ascendante et descendante sont différentes. Cela montre que des déplacements horizontaux se produisent en simultané de l'exploitation sous-jacente. En prenant en compte les archives d'exploitation, nous regardons de plus près les séries temporelles d'Ungersheim et Reiningue ([Figure 13.ab](#)). Pour Reiningue, plusieurs secteurs étant exploités en simultané, il est pertinent de s'intéresser à la progression de l'exploitation ([Figure 13.c](#)).

À Ungersheim, entre 1996 et 1997, la couche inférieure a été exploitée sur une petite surface à 800m de profondeur. Des réflecteurs proches ont été détectés avant, pendant et après l'exploitation. Le point est stable avant l'arrivée de l'exploitation en profondeur, puis commence à accélérer à partir de mi-1996 et décélère au début de 1998 quand l'exploitation est terminée ([Figure 13.a](#)). Nous retrouvons ici la forme de la courbe présentée en introduction pour le sens descendant. Concernant le sens ascendant, la forme de la courbe est bien différente. Comme pour le nivellement, la différence peut provenir de deux phénomènes : la présence de déplacements horizontaux et des déplacements verticaux très rapides, combinés à la mauvaise résolution temporelle de l'archive et spatiale des résultats. Les fortes barres d'erreurs sont dues à des pixels voisins ne retrouvant par la même amplitude de déplacement. Une observation additionnelle aurait été utile pour l'étude et la caractérisation du signal. Cette série temporelle souligne une limite de l'InSAR, où les zones retenues lors du traitement ne sont pas strictement identiques, limitant les analyses croisées à des points intéressants.

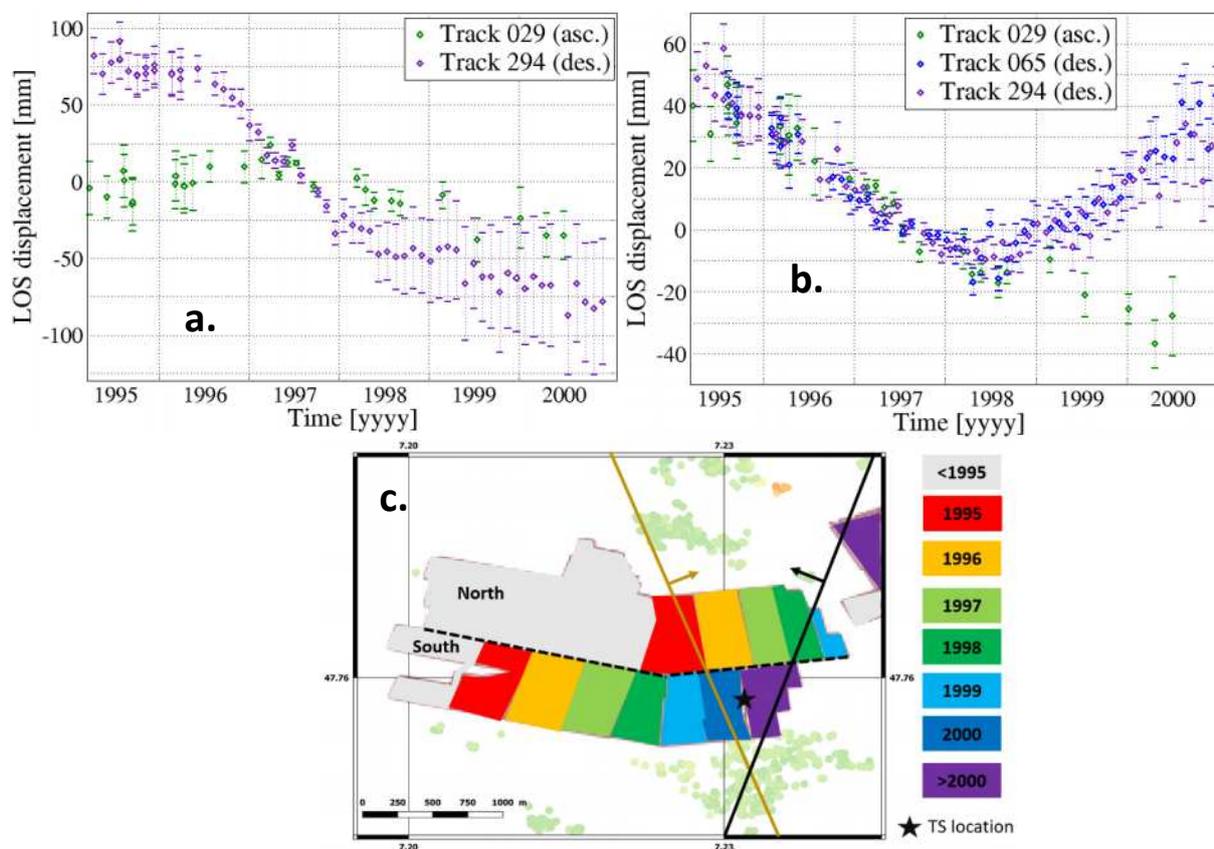
À Reiningue, deux phases sont discernables dans la série temporelle. La première, se déroulant de 1995 à mi-1998, est caractérisée par un mouvement s'éloignant du satellite à une vitesse d'environ  $20\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en LOS ([Figure 13.b](#)). La forte ressemblance entre les données des archives ascendantes et descendantes suggèrent soit un déplacement purement vertical, soit un déplacement vertical avec une composante horizontale orientée vers le Nord.

## 4. Résultats

La seconde phase, de mi-1998 à 2001, est caractérisée par une nette différence entre les séries temporelles LOS. Les données ascendantes indiquent un mouvement s'éloignant du satellite d'environ  $15\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en LOS alors que les données descendantes indiquent l'opposé, un mouvement se rapprochant du satellite d'environ  $20\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en LOS (Figure 13.b). Le point observé est de 1996 à 1997 dans la zone d'influence de l'exploitation Nord, se dirigeant vers l'Est et se situant à 450m de profondeur (Figure 13.c). L'exploitation la plus proche était à environ 350m du point en 1996. À partir de 1999, le point observé est dans la zone d'influence de l'exploitation au Sud, se dirigeant vers l'Est et se situant à 450m de profondeur. L'exploitation est passée sous le point en 2000. De manière plus concise, le point est :

- sous l'influence directe de l'exploitation Nord en 1996 et 1997 ;
- sous l'influence résiduelle de l'exploitation Nord en 1998 ;
- sous l'influence directe de l'exploitation Sud à partir de 1999, en plus de l'influence résiduelle.

L'année 1998 représente donc une année pivot. Toutefois, la différence entre les archives peut avoir de multiples sources, comme expliqué précédemment, et une simple analyse des résultats InSAR ne sera pas suffisante pour retrouver l'évolution temporelle des composantes du déplacement. L'idéal serait d'avoir à disposition des observations complémentaires tel que le nivellement, données qui n'ont pas été retrouvées à ce jour.

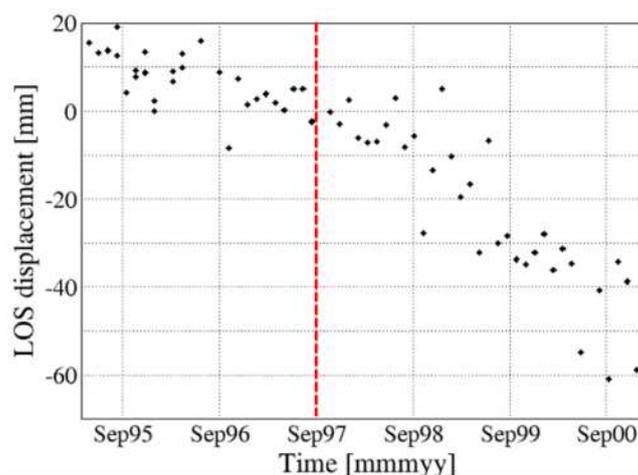


**Figure 13:** Série temporelle à Ungersheim (a) et à Reiningue (b) sur la période ERS en relation avec l'exploitation minière (c).

e. Le site de stockage

Dans un dernier temps, nous nous penchons sur le cas du site de stockage. Cette activité a officiellement démarré en 1998 et le premier déchet fut accueilli en 1999. D'après les archives, il fallait compter 18 mois pour creuser un bloc de stockage. Le début de creusement du site est estimé aux alentours de Septembre 1997. Le lancement de l'activité et la création des galeries sont donc couverts par les données ERS. Quelques infrastructures se situent à sa verticale et des pixels furent retenus à leurs alentours. Des séries temporelles sur les différentes périodes sont alors réalisables. Celle obtenue sur la période ERS est la plus intéressante (Figure 14). Les données commençant en Avril 1995, la zone est ainsi observée pendant 2 ans avant le creusement du site de stockage. Cette dernière est relativement stable avec un léger affaissement. Cet affaissement s'accélère après le début du creusement du site. Cela n'est cependant visible qu'avec les archives descendantes. La couverture temporelle de l'archive ascendante est trop diffuse sur la période d'intérêt. Pendant la période ERS, nous sommes seulement en mesure de détecter un signal, s'accéléralant après 1997.

Pendant les périodes ENVISAT et Sentinel-1, nous n'avons pas ce problème de couverture temporelle. Un déplacement est également détecté aux alentours du site de stockage comme sur la période ERS. Sur ces périodes, nous pouvons nous intéresser aux déplacements horizontaux. En négligeant les déplacements vers le Nord, nous obtenons un déplacement de  $-10\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  en vertical contre  $5\text{mm}\cdot\text{an}^{-1}$  vers l'Est sur la période Sentinel-1. Les déplacements horizontaux ne sont pas négligeables sur les périodes Sentinel-1 et ENVISAT. Des déplacements horizontaux peuvent être également considérés pour la période ERS. Cependant, pour obtenir une décomposition plus précise du signal, une mesure externe sera nécessaire, nivellement ou GPS par exemple, pour aider à résoudre la troisième composante du déplacement.



**Figure 14:** Série temporelle réalisée à la verticale du site de stockage. Le trait pointillé rouge indique le début de creusement supposé du premier bloc de stockage.

### 5. Discussion

#### a. Les sources potentielles de déplacements

Jusqu'à présent, notre analyse met en avant une bonne corrélation entre l'activité minière et les déplacements de surface. Néanmoins, comme les résultats aux alentours de Staffelfelden le suggèrent, d'autres sources peuvent être à l'origine de déplacement se produisant à travers le bassin potassique alsacien. De l'analyse des activités passées et de la littérature, quatre sources sont envisagées : les terrils, le pompage d'eau souterraine, la tectonique et les réservoirs pétroliers.

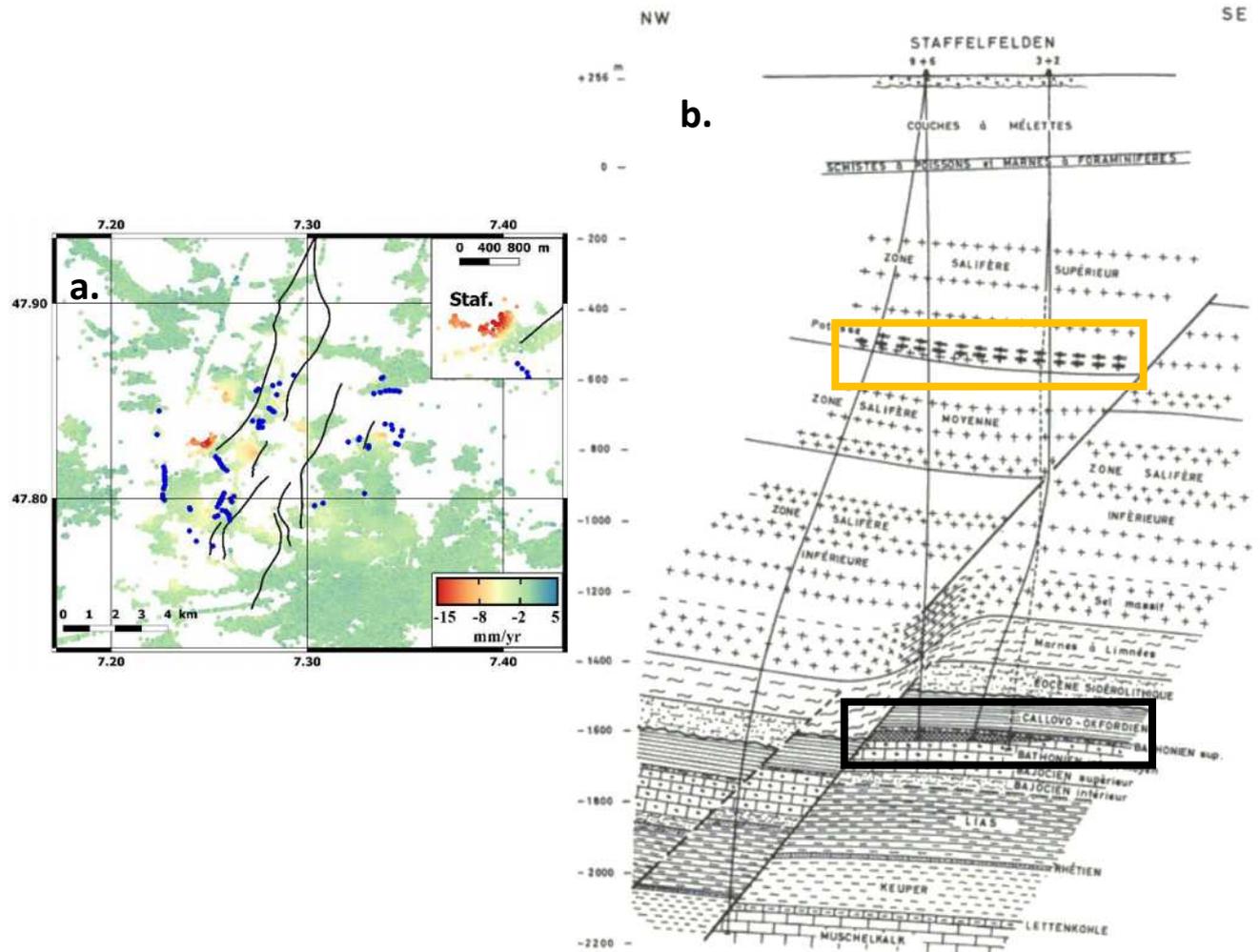
Les insolubles et autres déchets miniers furent stockés en surface sous forme de terrils et une dizaine furent créés. Pendant la période ERS, une partie d'entre eux était encore en cours d'utilisation alors que l'autre partie était en cours de traitement (imperméabilisation, végétalisation, dissolution accélérée, etc). Des vitesses fortes et localisées sont détectées au niveau des terrils Marie-Louise et Amélie seulement pendant la période ERS. Ensuite, à cause de la présence de sel dans les terrils, la nappe phréatique alsacienne a connu un épisode de salinisation [41]. Les MDPA installèrent plusieurs sites de pompages dans les années 70 afin d'évacuer cette eau salée de la nappe. Pendant la période d'activité, les MDPA utilisèrent également l'eau souterraine pour extraire la potasse des matériaux extraits. L'InSAR s'est déjà montrée efficace pour suivre et détecter les déplacements de surface en lien avec des activités de pompage [42]. Comme illustré dans la [Figure 15.a](#), il n'existe pas de corrélation spatiale claire entre les principales zones de déformation et les sites de pompage. Toutefois, même si nous ne pouvons pas complètement exclure l'effet du pompage sur les déplacements de surface, nous considérons sa part comme étant une contribution mineure aux déplacements suivis.

Le fossé Rhénan a été étudié à plusieurs reprises par un large éventail de méthodes géophysiques et une cartographie des failles régionales fut réalisée [43]. En complément, les MDPA réalisèrent leur propre carte à l'échelle du bassin à partir de leurs campagnes de mesure. La réactivation de failles induite par l'activité minière est susceptible de se produire dans les bassins sédimentaires [44]. À l'exception de Staffelfelden, aucune relation ne peut être faite entre les failles et les zones de déformation ([Figure 15.a](#)). Dans le cas de Staffelfelden, l'orientation de la faille et les caractéristiques du déplacement suggèrent un lien entre les deux.

En plus de l'exploitation minière, trois réservoirs pétroliers furent exploités dans le bassin potassique alsacien de 1954 à 1968 [45]. Ces réservoirs sont localisés au Sud-Ouest de Reiningue et sous Bollwiller et Staffelfelden. Au niveau des deux premiers lieux, aucun signal atypique, hormis en lien avec l'exploitation minière, n'est détecté alors qu'à Staffelfelden, les vitesses restent élevées sur une longue période. En s'intéressant de plus près au sous-sol de Staffelfelden, nous retrouvons sur une même verticale : les deux couches de potasse extraites,

une faille avec un rejet de 300m et le réservoir pétrolier (Figure 15.b). La superposition de ces discontinuités peut être à l'origine des déplacements observés en surface. Néanmoins, une étude approfondie et complémentaire est nécessaire pour déterminer l'effet et les interactions de chacune de ces hétérogénéités.

En résumé, à l'exception des terrils et Staffelfelden, les déplacements mesurés par InSAR sont essentiellement en lien avec l'activité minière.



**Figure 15:** a. Carte de vitesse moyenne LOS pendant la période la période ENVISAT avec les sites de pompages (points bleus) et les failles majeures (lignes noires) ; b. Coupe géologique de Staffelfelden au niveau de la zone à fortes vitesses [45]. Les couches de potasses sont indiquées par le rectangle orange à 750m de profondeur et le réservoir pétrolier par le rectangle noir à 1800m de profondeur.

## b. La phase résiduelle

La toute première étude à introduire la notion d'affaissement résiduel l'exprima relativement à l'affaissement maximal [46]. L'affaissement maximal est le produit entre la hauteur extraite et un coefficient dépendant de la méthode de remblaiement (0.9 pour le foudroyage, 0.5 pour le remblaiement pneumatique et 0.2 pour le remblaiement hydraulique)

[47]. Aussi bien dans des publications plus récentes que dans l'industrie minière, l'affaissement résiduel est exprimé relativement à l'affaissement total. Par moment, cela mène à de larges intervalles de valeurs [48]. L'utilisation de l'affaissement total comme référentiel est d'autant plus délicat qu'il implique que l'affaissement ait été correctement suivi et quantifier depuis le début. Par ailleurs, dans le cas d'exploitations rapprochées se réalisant en simultanée, cela suppose aussi de savoir distinguer l'effet de chacune des exploitations sur le signal mesuré. Toutefois, dans les deux cas, le choix du référentiel n'est pas clairement justifié ou expliqué. Cela suggère une sous-compréhension du ou des phénomènes à l'origine de l'affaissement résiduel.

Concernant les exploitations en longue taille avec foudroyage, l'affaissement miniers est induit par trois sources : la fermeture instantanée des vides miniers, la réponse inélastique des couches supérieures et la fermeture des fractures et des vides miniers résiduels sous le poids des terrains [49]. Le remblai du foudroyage est composé d'agrégats de matériaux provenant des couches supérieures, sur une hauteur d'environ deux à trois fois la hauteur extraite [50], et remplit le vide créé par l'extraction. Cependant, la porosité du milieu est relativement importante au début. Des fractures et des décollements de banc de matériaux se produisent également dans les couches supérieures. En revanche, le volume total de ces hétérogénéités est difficile à quantifier dans la mesure où il dépend à la fois de la profondeur et de la géologie des matériaux supérieurs [51]. Un autre effet du foudroyage est la relaxation des contraintes temporaire dans les matériaux supérieurs et l'extension de cette zone de relaxation dépend de la géologie et de la méthode d'extraction [52]. Par la suite, le champ de contrainte évolue vers un nouvel équilibre alors que dans le même temps, la contrainte verticale contrôle la compaction du remblai en profondeur [53].

Les mécanismes précédemment discutés commencent tous en même temps, juste après le foudroyage. L'affaissement suivi par nivellement contient les déplacements liés aux phénomènes élastiques et différés. Par ailleurs, il est compliqué de discerner la part de chacune des sources (Figure 12.a). D'un côté, pour estimer proprement l'amplitude des déplacements dus aux sources différées, la contribution élastique doit être proprement retirée du signal. D'un autre côté, la contribution élastique n'affecte pas le temps caractéristique des sources différées. Avec la somme de deux exponentielles, nous nous concentrons seulement sur la durée de l'affaissement minier. C'est pourquoi nous regardons et discutons essentiellement les paramètres temporels. Dans le cas d'un simple terme exponentiel, le paramètre temporel est estimé à partir de la vitesse d'avancement et de la profondeur de l'exploitation, et est utilisé pour caractériser les propriétés mécaniques des matériaux supérieurs. L'encadrement empirique du facteur temporel  $c$  proposé par Cui est [40] :

$$-\frac{V \times \ln(0.02)}{1.4 \times H_0} \leq c \leq -\frac{V \times \ln(0.02)}{1.2 \times H_0}$$

Avec  $H_0$  la profondeur de l'exploitation en m et  $V$  la vitesse d'avancement de l'exploitation en  $m.an^{-1}$ . Pour une profondeur de 1km et une vitesse d'avancement de  $250m.an^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 0.84 et 0.98 à Pulversheim. Pour une profondeur de 900m et une vitesse d'avancement de  $300m.an^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 0.78 et 0.91 à Bollwiller. Pour une profondeur de 850m et une vitesse d'avancement de  $450m.an^{-1}$ , le facteur temporel est compris entre 1.48 et 1.73 à Raedersheim. À l'exception de Raedersheim, nous avons une bonne concordance entre les estimations et le facteur temporel  $\xi_1$  (Tableau 2). Après 10 ans, ce terme exponentiel devient négligeable. Le second facteur temporel  $\xi_2$  est un ordre de grandeur inférieur que le précédent, avec des valeurs homogènes entre  $0.04$  et  $0.06an^{-1}$ . Après un siècle, ce second terme exponentiel devient négligeable. Ainsi, la somme de deux termes exponentiels proposée n'est pas une nouvelle loi, mais une adaptation d'une loi connue et reconnue basée sur des observations d'affaissements miniers sur une plus longue période de temps.

Enfin, le facteur temporel  $\xi_1$  dépend des propriétés mécaniques des matériaux supérieurs et  $\xi_2$  serait en lien avec la fermeture des vides résiduels incluant la compaction des remblais foudroyés. Le premier facteur temporel pourrait caractériser la réponse viscoplastique des matériaux supérieurs tandis que le second représenterait le temps nécessaire à la fermeture complète des vides et fractures. Dans le cas d'un simple terme exponentiel, cela signifie que les deux processus ont une période caractéristique similaire. L'ajout d'un second terme exponentiel permet de distinguer les deux phénomènes. En outre, certains de ces phénomènes ont été étudiés tel que la compaction du remblai. La compaction dépend de la contrainte verticale et une loi hyperbolique a été proposée pour associée la déformation volumétrique à la contrainte verticale [54]. En supposant une évolution linéaire de la contrainte verticale avec le temps, cela conduirait à une évolution exponentielle décroissante de la déformation volumétrique. Toutefois, le nombre limité d'étude et de suivi des phénomènes résiduels ne permet pas de discuter plus en détail de la relation entre les facteurs temporels et leurs mécanismes associés.

### 6. Conclusion

Sur les quatre satellites à disposition, le traitement a pu aboutir pour trois d'entre eux. Nous avons ainsi suivi les déplacements de surface à travers le bassin potassique alsacien de 1995 à 2018, soit une période de 24 ans. Le début de cette période couvre une partie de l'exploitation. Malheureusement, comme anticipé, la couverture spatiale se limite aux infrastructures humaines, ne couvrant qu'une faible partie des zones exploitées en profondeur.

Les déplacements détectés couvrent de faibles surfaces, inférieures à  $1\text{km}^2$ . Ces déplacements atteignent de fortes amplitudes annuelles, pluri-centimétriques, pendant la période d'exploitation et s'atténuent rapidement, passant sous l'échelle centimétrique sur la période ENVISAT et de l'ordre de quelques millimètres sur la période Sentinel-1. Les déplacements sont essentiellement suivis pendant la phase résiduelle. Cette dernière est bien suivie et caractérisée par les résultats InSAR. L'amplitude de l'affaissement résiduel est traditionnellement exprimée relativement à l'affaissement total. Cependant, nos résultats InSAR montrent qu'il serait plus intéressant de l'exprimer relativement à la hauteur exploitée. Contrairement à la phase résiduelle et comme le montre la comparaison avec le nivellement, la phase active est mal retrouvée à cause de la fréquence d'acquisition trop large des satellites et de la faible couverture spatiale des résultats. La phase initiale n'est observée qu'à un emplacement, Ungersheim. À Reiningue, le suivi pendant la période d'exploitation montre que les déplacements peuvent s'avérer complexes notamment lorsque plusieurs secteurs proches sont exploités en simultanément.

Les résultats InSAR ont également détecté des signaux d'origine non-minièrre. À Staffelfelden, les déplacements observés semblent en partie dus à l'exploitation minièrre mais aussi probablement à des failles et un ancien réservoir pétrolier. Un simple suivi InSAR ne sera pas suffisant pour déterminer l'origine du phénomène et une étude spécifique doit être envisagée. À Wittelsheim, des déplacements sont détectés à la verticale du site de stockage et ce, depuis la création du site. Les déplacements, toujours en cours, semblent être aussi bien verticaux qu'horizontaux et un suivi complémentaire est nécessaire pour estimer proprement les trois composantes du déplacement.

Enfin, une somme de deux exponentielles est proposée pour suivre les affaissements miniers au cours du temps. Le premier terme est associé aux réponses inélastiques des couches sus-jacentes et les valeurs estimées satisfont d'autres observations d'affaissements miniers provoqués par foudroyage. Toutefois, l'estimation de ce paramètre repose en partie sur les données de nivellement disponibles. Le deuxième terme est associé à la fermeture des vides résiduels, beaucoup plus lente. L'apport des données satellitaires permet de mieux contraindre cette phase résiduelle qui était peu ou pas envisagée à l'époque des premiers modèles.

### Références

1. Kratzsch H. *Mining Subsidence Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 1983. doi:10.1007/978-3-642-81923-0
2. Whittaker BN, Reddish DJ. *Subsidence: Occurrence, Prediction, and Control*. Vol 528. Elsevier Amsterdam; 1989.
3. Heib MA, Nicolas M, Noirel JF, Wojtkowiak F. Residual subsidence analysis after the end of coalmine work. Example from Lorraine colliery, France. <ineris-00972515>. *Symposium Post mining 2005*. 2005:10.
4. Great Britain, National Coal Board, Mining Departement. *Subsidence Engineers Handbook*. Rev. ed. London: National Coal Board; 1966.
5. Yao XL, Reddish DJ. Analysis of residual subsidence movements in the UK coalfields. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*. 1994;27(1):15-23. doi:10.1144/GSL.QJEGH.1994.027.P1.04
6. Wojtkowiak F, Piguet J-P. Affaissements et déformations au-dessus des exploitations minières: mécanismes et évolution dans le temps. Journée technique CdF, Jun1998, Hombourg-Haut, France. <ineris-00972151>. 1998:23.
7. Schlögel R, Malet J-P, Doubre C, Lebourg T. Structural control on the kinematics of the deep-seated La Clapière landslide revealed by L-band InSAR observations. *Landslides*. 2016;13(5):1005-1018. doi:10.1007/s10346-015-0623-0
8. Bayer B, Simoni A, Schmidt D, Bertello L. Using advanced InSAR techniques to monitor landslide deformations induced by tunneling in the Northern Apennines, Italy. *Engineering Geology*. 2017;226:20-32. doi:10.1016/j.enggeo.2017.03.026
9. (Gini) Ketelaar VBH. *Satellite Radar Interferometry*. Vol 14. Dordrecht: Springer Netherlands; 2009. doi:10.1007/978-1-4020-9428-6
10. Guéguen Y, Deffontaines B, Fruneau B, et al. Monitoring residual mining subsidence of Nord/Pas-de-Calais coal basin from differential and Persistent Scatterer Interferometry (Northern France). *Journal of Applied Geophysics*. 2009;69(1):24-34. doi:10.1016/j.jappgeo.2009.02.008
11. Samsonov S, d'Oreye N, Smets B. Ground deformation associated with post-mining activity at the French–German border revealed by novel InSAR time series method. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2013;23:142-154. doi:10.1016/j.jag.2012.12.008
12. Carnec C, Delacourt C. Three years of mining subsidence monitored by SAR interferometry, near Gardanne, France. *Journal of Applied Geophysics*. 2000;43(1):43-54. doi:10.1016/S0926-9851(99)00032-4
13. Raucoules D, Maisons C, Carnec C, Le Mouelic S, King C, Hosford S. Monitoring of slow ground deformation by ERS radar interferometry on the Vauvert salt mine (France). *Remote Sensing of Environment*. 2003;88(4):468-478. doi:10.1016/j.rse.2003.09.005

14. Rucker ML, Panda BB, Meyers RA, Lommler JC. Using InSAR to detect subsidence at brine wells, sinkhole sites, and mines. *Carbonates and Evaporites*. 2013;28(1-2):141-147. doi:10.1007/s13146-013-0134-9
15. Zhang A, Lu J, Kim J-W. Detecting mining-induced ground deformation and associated hazards using spaceborne InSAR techniques. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*. 2018;9(1):211-223. doi:10.1080/19475705.2017.1415229
16. Raymond D, Rudant J-P. ERS-SAR interferometry: Potential and limits for mining subsidence detection. *European Space Agency-Publications-ESA SP*. 1997;414:541-544.
17. Doubre C, Peltzer G. Fluid-controlled faulting process in the Asal Rift, Djibouti, from 8 yr of radar interferometry observations. *Geology*. 2007;35(1):69–72.
18. Oppliger G, Coolbaugh M, Shevenell L. Improved visualization of satellite radar InSAR observed structural controls at producing geothermal fields using modeled horizontal surface displacements. *GRC Trans*. 2006;30:927–930.
19. Declercq P-Y, Walstra J, Gérard P, et al. A study of ground movements in brussels (Belgium) monitored by persistent scatterer interferometry over a 25-year period. *Geosciences*. 2017;7(4):115.
20. Bonì R, Herrera G, Meisina C, et al. Twenty-year advanced DInSAR analysis of severe land subsidence: The Alto Guadalentín Basin (Spain) case study. *Engineering geology*. 2015;198:40-52.
21. Spaans K, Hooper A. InSAR processing for volcano monitoring and other near-real time applications. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2016;121(4):2947-2960. doi:10.1002/2015JB012752
22. Massonnet D, Feigl KL. Radar interferometry and its application to changes in the Earth's surface. *Reviews of Geophysics*. 1998;36(4):441-500. doi:10.1029/97RG03139
23. Ferretti A. *Satellite InSAR Data: Reservoir Monitoring from Space*. Houten: EAGE; 2014.
24. Bekaert DPS, Hooper A, Wright TJ. A spatially variable power law tropospheric correction technique for InSAR data. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2015;120(2):1345-1356. doi:10.1002/2014JB011558
25. Doin M-P, Lasserre C, Peltzer G, Cavalié O, Doubre C. Corrections of stratified tropospheric delays in SAR interferometry: Validation with global atmospheric models. *Journal of Applied Geophysics*. 2009;69(1):35-50. doi:10.1016/j.jappgeo.2009.03.010
26. Hu J, Li ZW, Ding XL, Zhu JJ, Zhang L, Sun Q. Resolving three-dimensional surface displacements from InSAR measurements: A review. *Earth-Science Reviews*. 2014;133:1-17. doi:10.1016/j.earscirev.2014.02.005
27. Rosen PA, Hensley S, Peltzer G, Simons M. Updated repeat orbit interferometry package released. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2004;85(5):47-47. doi:10.1029/2004EO050004

## Références

---

28. Doin M-P, Guillaso S, Jolivet R, et al. Presentation of the small baseline NSBAS processing chain on a case example: the Etna deformation monitoring from 2003 to 2010 using Envisat data. In: *Proceedings of the Fringe Symposium*. ES; 2011:3434–3437.
29. Ferretti A, Prati C, Rocca F. Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2001;39(1):8-20. doi:10.1109/36.898661
30. Hooper A, Bekaert D, Spaans K, Arkan M. Recent advances in SAR interferometry time series analysis for measuring crustal deformation. *Tectonophysics*. 2012;514-517:1-13. doi:10.1016/j.tecto.2011.10.013
31. Kampes B, Hanssen, Ramon F., Zbigniew P. Radar interferometry with public domain tools. 2003:10.
32. Fomelis M, Blasco JMD, Yves-Louis Desnos, et al. ESA SNAP – StaMPS Integrated Processing for Sentinel-1 Persistent Scatterer Interferometry. 2018. doi:10.13140/rg.2.2.25803.90405
33. Hooper A, Segall P, Zebker H. Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research*. 2007;112(B7). doi:10.1029/2006JB004763
34. Hooper A, Zebker HA. Phase unwrapping in three dimensions with application to InSAR time series. *Journal of the Optical Society of America A*. 2007;24(9):2737. doi:10.1364/JOSAA.24.002737
35. Shanker P, Casu F, Zebker HA, Lanari R. Comparison of Persistent Scatterers and Small Baseline Time-Series InSAR Results: A Case Study of the San Francisco Bay Area. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*. 2011;8(4):592-596. doi:10.1109/LGRS.2010.2095829
36. Hanssen RF. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers; 2010.
37. Hooper A. Persistent scatter radar interferometry for crustal deformation studies and modeling of volcanic deformation. 2006.
38. Farr TG, Kobrick M. Shuttle radar topography mission produces a wealth of data. *Eos, Transactions American Geophysical Union*. 2000;81(48):583. doi:10.1029/EO081i048p00583
39. Knothe S. Observations of surface movements under influence of mining and their theoretical interpretation. In: ; 1957:210-218.
40. Cui X, Wang J, Liu Y. Prediction of progressive surface subsidence above longwall coal mining using a time function. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2001;38(7):1057-1063. doi:10.1016/S1365-1609(01)00061-2
41. Lucas Y, Haushalter M, Clement A, Fritz B, Chabaux F. Hydrogeochemical Modelling of the Alsace Groundwater Pollution by the Potash Mine Spoil Heaps. In: ; 2008.
42. Motagh M, Walter TR, Sharifi MA, et al. Land subsidence in Iran caused by widespread water reservoir overexploitation. *Geophysical Research Letters*. 2008;35(16). doi:10.1029/2008GL033814

43. Cardozo GL, Edel J, Granet M. Detection of active crustal structures in the Upper Rhine Graben using local earthquake tomography, gravimetry and reflection seismics. *Quaternary Science Reviews*. 2005;24(3-4):337-344.
44. Sainoki A, Mitri HS. Dynamic behaviour of mining-induced fault slip. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*. 2014;66:19-29. doi:10.1016/j.ijrmms.2013.12.003
45. Sittler C. Le pétrole dans le département du Haut-Rhin. Bilan d'un siècle et demi de recherches et d'exploitations. *Sciences Géologiques Bulletin*. 1972;25(2):151-161. doi:10.3406/sgeol.1972.1412
46. Orchard RJ, Allen WS. Time dependence in mining subsidence. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*. 1974;11(11):A227. doi:10.1016/0148-9062(74)90566-X
47. Brauner G. Calculation of ground movements in European coalfields. *AUSTRALASIAN INST MIN METALL, ILLAWARRA BRANCH, PAPER*. 1973;10:10-11.
48. Fercari C. Residual coal mining subsidence-some facts. *Mining Technology*. 1997;79(911):177-182.
49. Pasamehmetoglu AG. An investigation into time-dependent aspects of mining subsidence. 1972.
50. Whittaker B, Potts E. Appraisal of strata control practice: Discussion on by BN Whittaker, and authors reply. 22F, 19R. *TRANS. INSTN. MIN. METALL. V83, JULY, 1974, P. A95–A109*. In: Vol 11. Pergamon; 1974:A225.
51. Palchik V. Localization of mining-induced horizontal fractures along rock layer interfaces in overburden: field measurements and prediction. *Environmental Geology*. 2005;48(1):68-80.
52. Majdi A, Hassani FP, Nasiri MY. Prediction of the height of distressed zone above the mined panel roof in longwall coal mining. *International Journal of Coal Geology*. 2012;98:62-72.
53. Marts J, Gilmore R, Brune J, Bogin G, Grubb J, Saki S. *Dynamic Gob Response and Reservoir Properties for Active Longwall Coal Mines*. Vol 66.; 2014.
54. Salamon M. Mechanism of caving in longwall coal mining. In: Golden, Colorado; 1990:161-168.

## **Annexe 4 : Rapport MDPA Suivi des infiltrations d'eau à la base des puits Amélie 1 et 2**

**Suivi des infiltrations d'eau à la base des puits Amélie 1 et 2**



Deux photos, prises en octobre 2009 et août 2012, du TB 88, intersectant le parcours de l'eau d'infiltration en provenance du puits Amélie 1 et en direction des vieux travaux situés plus au Nord.

# SOMMAIRE

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| 1) Personnes ayant participé aux visites .....             | 3  |
| 2) Objet des visites .....                                 | 3  |
| 3) Données issues des travaux précédents .....             | 3  |
| 4) Plan de la zone d'étude et observations visuelles ..... | 4  |
| 5) Résultats d'analyse de saumure.....                     | 10 |
| 6) Conclusions.....                                        | 12 |

## LISTE DES FIGURES

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Plan représentant le cheminement au travers des galeries de l'écoulement des eaux d'infiltration A1 et A2 en direction des vieux travaux vers le Nord ..... | 4  |
| Figure 2 : Profil d'écoulement des eaux d'infiltration A1 et A2 avec repérage des points remarquables situés sur le plan ci-dessus .....                               | 4  |
| Figure 3 : Photographie de la recette du puits Amélie 2.....                                                                                                           | 5  |
| Figure 4 : Photographies du TB 66 prises en avril 2011, puis en août 2012.....                                                                                         | 5  |
| Figure 5 : Photographies du TB 88 prises à différentes dates.....                                                                                                      | 6  |
| Figure 6 : Photographies de la recette fond Amélie 1 prises à différentes dates .....                                                                                  | 7  |
| Figure 7 : Photographie d'un câble comportant un suintement de saumure.....                                                                                            | 7  |
| Figure 8 : Photographies du TB 82 prises à différentes dates.....                                                                                                      | 8  |
| Figure 9 : Extrait du rapport ASGA sur les analyses d'une saumure MDPA préparée (janvier 2015) .....                                                                   | 8  |
| Figure 10 : Coupe schématique du TB 82.....                                                                                                                            | 9  |
| Figure 11 : Photographie du phénomène de soufflage du mur .....                                                                                                        | 9  |
| Figure 12 : Résultats d'analyse d'eau du 11/03/2013 .....                                                                                                              | 10 |
| Figure 13 : Résultats d'analyse d'eau du 28/11/2014 .....                                                                                                              | 11 |

## 1) Personnes ayant participé aux visites

MM. ROLLET, ROMAN, HAMERLA, LAPP, CHALLAMEL

## 2) Objet des visites

Deux visites (précédées par plusieurs autres), de suivi de l'infiltration d'eau à la base des puits remblayés Amélie 1 et 2 ont été menées en février 2013, puis en novembre 2014, pour profiter de l'accès encore possible dans ces galeries. Au-delà, l'accès sera définitivement fermé. Ces visites ont consisté à :

- observer l'évolution des venues d'eau à la base des puits, visuellement d'une part, en notant l'évolution du niveau, la présence d'une croûte de sel,
- prélever des échantillons de saumure afin d'en doser la concentration en chlorure de sodium et de potassium.

Les conclusions tirées de ces visites sont décrites ci-dessous.

## 3) Données issues des travaux précédents

Ces visites font suite à un suivi du volume de pompage, réalisé par l'ingénieur d'exploitation LIBERDA, après le remblayage des puits, soit entre 2007 et 2011, et qui a abouti aux conclusions suivantes :

« A la date d'aujourd'hui (août 2011), seules **les eaux du puits Amélie 1, de débit mesuré (4,4 m<sup>3</sup>/j)** y sont envoyées depuis une date parfaitement connue, avec cependant comme incertitude la quantité d'eau provenant de *l'exploitation* (fuites de soutènement marchant etc..., ce qui sera le cas de tous les points bas, au demeurant).

En effet, 3 260 m<sup>3</sup> ont été pompés depuis le puisard jusqu'au 17/04/2009. Puis le pompage a été arrêté pendant le remplissage de la galerie inclinée d'accès au puisard. On estime que depuis le 13/04/2010 (date bien sûr approximative) l'eau s'est écoulée sous le mur de cette galerie vers le nord-est, soit de l'ordre de 2 060 m<sup>3</sup>.

Si l'on compte un pourcentage (5 %) de cette eau mouillant d'abord les fonds de gaines de fissuration des galeries traversées, on obtient un maximum de 4 700 m<sup>3</sup> au point bas, auxquels il faut rajouter les fuites d'exploitation. A partir de l'automne 2011, **un débit de 2,3 m<sup>3</sup>/j correspondant aux eaux du puits Amélie 2** s'ajoutera aux 4,4 m<sup>3</sup>/j d'Amélie 1. »

**Le débit estimé s'établit à 4,4m<sup>3</sup>/j au puisard du puits Amélie 1 (A1) et 2,3 m<sup>3</sup>/j au puisard du puits Amélie 2 (A2).**

#### 4) Plan de la zone d'étude et observations visuelles

Les zones observées lors de ces visites et le cheminement des eaux d'infiltration en direction du nord suivant la pente des vieux travaux est illustré ci-dessous (schémas R. LIBERDA), figures 1 et 2.

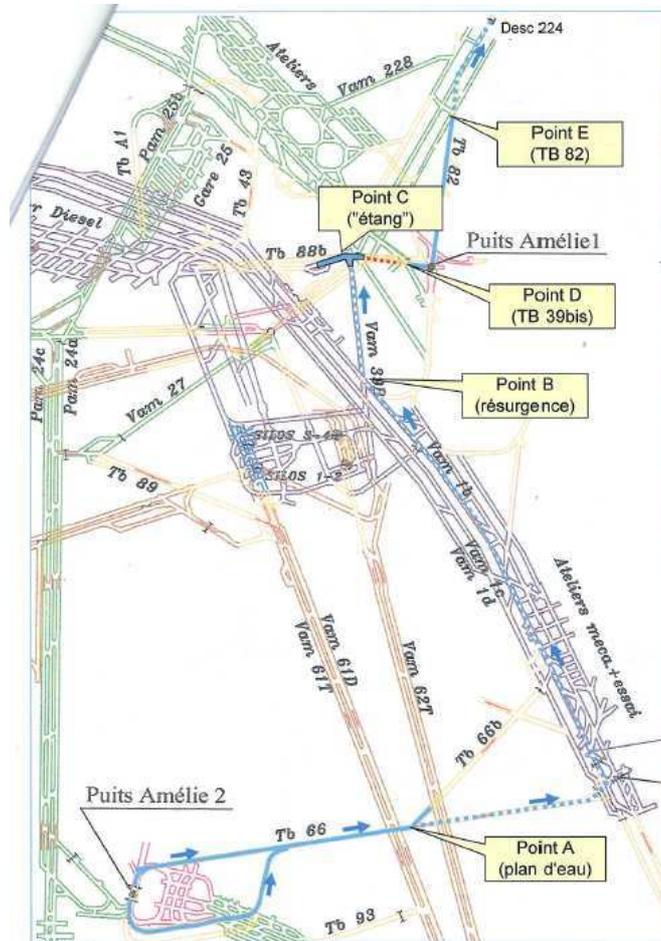


Figure 1 : Plan représentant le cheminement au travers des galeries de l'écoulement des eaux d'infiltration A1 et A2 en direction des vieux travaux vers le Nord

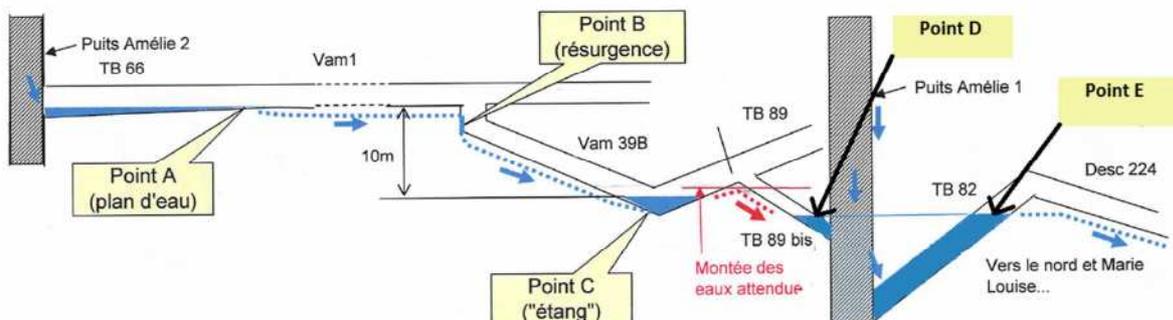


Figure 2 : Profil d'écoulement des eaux d'infiltration A1 et A2 avec repérage des points remarquables situés sur le plan ci-dessus

### Vue de la recette puits A2



**Figure 3 : Photographie de la recette du puits Amélie 2**

Novembre 2014 - La recette du puits A2 (figure 3) comporte des stalactites de sel dus à des infiltrations d'eau. Ces infiltrations sont aujourd'hui des petits suintements avec une tendance à la stagnation, voire à la baisse depuis 2012.

### Vues du point A « Plan d'eau »

**Figure 4 : Photographies du TB 66 prises en avril 2011, puis en août 2012**



Avril 2011 : présence d'eau en provenance d'A2



Août 2012 : le TB 66 s'est complètement asséché au niveau du mur, présence de concrétions de sel. Des sondages forés dans le mur montrent eux aussi une cristallisation et un assèchement. Deux hypothèses sont possibles : soit les apports d'eau ont nettement diminué, soit le chemin parcouru par l'eau évolue, en profondeur ou en direction. Une conjonction des deux phénomènes est également possible.

Vues du point C « Etang »

Figure 5 : Photographies du TB 88 prises à différentes dates



Octobre 2009



Janvier 2011



Août 2012



Novembre 2014

On note clairement (figure 5) la baisse progressive du niveau. Les analyses de saumure réalisées (figures 12 et 13) donnent des concentrations de 206g/L d'ions chlorures en 2013 et légèrement plus faible : 178g/L en 2014. Dans les deux cas, nous sommes dans les ordres de concentration d'une saumure saturée : l'élaboration d'une saumure saturée en laboratoire, dans nos conditions, a en effet donné une valeur de 185g/L d'ions chlorures.

Les commentaires de l'Association Scientifique de Géologie Appliquée (ASGA) sont indiquées en figure 9.

## Vues de la recette du puits A1

**Figure 6 : Photographies de la recette fond Amélie 1 prises à différentes dates**



Janvier 2011



Novembre 2014

La recette fond a été remplie de béton. Des suintements d'eau ont été observés après le remblayage. Le front de suintement au toit de la galerie cintrée a eu tendance à s'éloigner progressivement de la recette. Aujourd'hui, les abords de la recette sont exempts de suintements visibles (figure 6).



**Figure 7 : Photographie d'un câble comportant un suintement de saumure**

On observe depuis le remblayage en 2011, qu'un câble fait « gouttière ». Il semblerait que ce câble traverse le bouchon de béton coulé à la recette. Ce câble produit aujourd'hui toujours un goutte à goutte (figure 7).

## Vues du point E « TB82 »

Figure 8 : Photographies du TB 82 prises à différentes dates



Janvier 2011



Novembre 2014

Ici, comme au point C « l'étang », on a pu noter fin 2011 un arrêt brusque de montée du niveau d'eau jusqu'au « col » qui donne sur le secteur Nord des vieux travaux. On observe depuis (figure 8) une stabilisation et la formation d'une épaisse croûte de sel en surface, ce qui prouve que l'on a affaire à une saumure saturée. Les analyses de saumure réalisées montrent que la concentration en chlorures totaux a augmenté, ainsi on passe de 208g/L à 217g/L. La saumure est saturée.

Ici aussi deux hypothèses sont possibles : le tarissement de la source de l'eau ou peut-être l'écoulement de l'eau sous la surface du mur, par le biais de fissurations dans le massif de sel et d'insolubles.

A noter que le niveau d'eau dans le TB 82 s'établit environ une quinzaine de mètres, en plan incliné à 15 % environ, sous le « col » à franchir avant de s'écouler vers les vieux travaux vers le Nord (figure 2), et à noter que notre expédition de novembre 2014 à l'aval du « col », jusqu'à une vingtaine de mètres en contrebas, ne nous a pas fait apercevoir la présence de résurgence, de suintement ou d'auréole humide.

### Mines de Potasse d'Alsace

#### 5- COMPARAISON AVEC LES PHENOMENES OBSERVES SUR SITE

Dans le rapport (Annexe 1) qui nous a été transmis par MDPa et en particulier les commentaires de la page 6, nous pouvons remarquer que la teneur en NaCl mesurée en 2014 correspond très exactement à celle que nous obtenons sur la saumure saturée en équilibre avec la carotte de sondage de cette étude. Cependant pour valider cette comparaison il faut être en accord sur le mode de calcul de la teneur en NaCl. Pour notre calcul, nous avons raisonné sur la base de la teneur en Na. Par contre sur notre saumure, la teneur en Cl n'est que de 185 g/l contre les 210 g/l mesurés sur site.

Il est difficile d'aller plus loin avec les éléments en notre possession. En particulier nous ne disposons pas d'une analyse complète des eaux du point E « TB82 ». Il faudrait pouvoir mettre en face de cette teneur en Cl les cations compensateurs de charge. Nous avons vu dans nos analyses qu'il pouvait coexister avec le Na, du K, du Ca et du Mg mais souvent en très faible quantité. La composition de ces eaux est en équilibre avec le terrain environnant.

Par contre, pour ce qui est de la cristallisation, elle est vraisemblablement due à l'augmentation de la saturation en sels au niveau superficiel de la couche d'eau qui entraîne la précipitation du sel alors que la masse totale d'eau n'est pas à « saturation » du moins en NaCl. C'est le même phénomène que l'on observe dans les marais salants.

Figure 9 : Extrait du rapport ASGA sur les analyses d'une saumure MDPa préparée (janvier 2015)

Une vue schématique en coupe de la géologie de la zone du TB 82, formant un « col » avec le secteur nord, peut être représentée ainsi (figure 10).

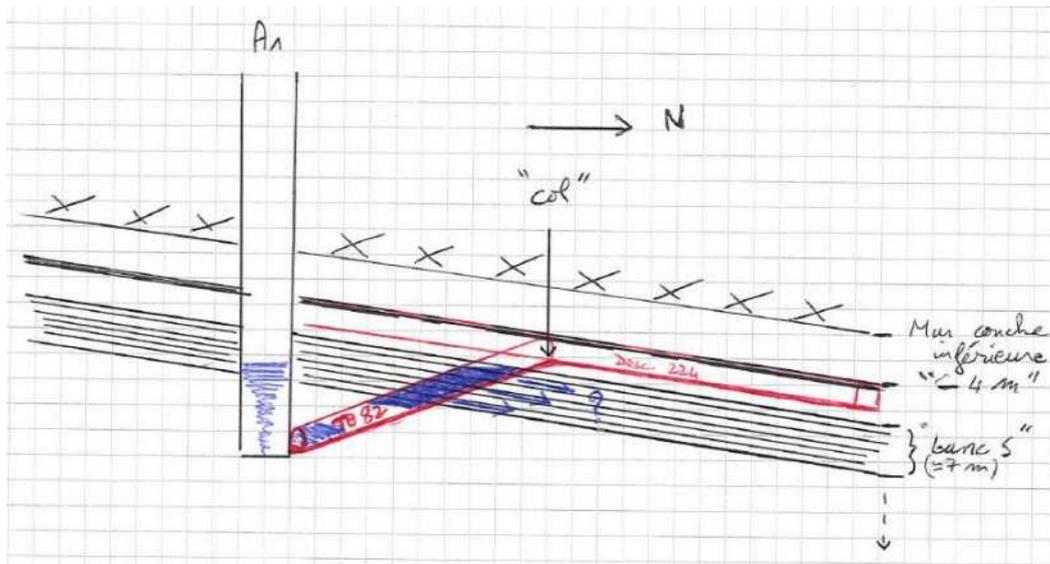


Figure 10 : Coupe schématique du TB 82

On note la présence d'un banc d'insolubles, le « banc S » d'environ 7 m d'épaisseur recoupé par le TB 82 avant sa liaison avec la descenderie 224 (exutoire vers le Nord). On pourrait penser que l'infiltration d'eau puisse se faire dans ce niveau, ce qui serait une explication pour la stagnation du niveau d'eau observée dans le TB 82. Néanmoins, cette hypothèse est peu probable : les mesures de perméabilité réalisées au niveau du stockage dans le gros banc de marne montrent que ce banc a une perméabilité extrêmement faible (de l'ordre de  $10^{-22} \text{ m}^2$ ) lorsqu'il est confiné, sous pression. Ici, il est fort à penser que du fait que les pressions de terrains soient fortes, et que peu de galeries passent à proximité, le banc S conserve une bonne intégrité, et donc de bonnes caractéristiques d'imperméabilité. Il est peu probable qu'il laisse passer de l'eau, sachant par ailleurs que la pression de cette eau est très faible.

#### Phénomène de soufflage du mur



Figure 11 : Photographie du phénomène de soufflage du mur

La figure 11 montre une portion de mur d'une galerie située au niveau d'un croisement, soufflé sous l'effet de la pression des terrains et du grand volume de vide ouvert pour le croisement. Cette

déformation du mur implique de fortes pressions, ce qui implique aussi, dans le TB 82 voisin, en galerie de plus faible section, une potentielle forte recompression des terrains, y compris les bancs d'insolubles, et une baisse de la perméabilité.

Seuls des sondages positionnés judicieusement au niveau du « col » pourraient permettre de trancher sur la présence d'eau ou d'humidité en profondeur pour confirmer ou infirmer l'écoulement d'eau sous la surface du mur vers le secteur nord.

## 5) Résultats d'analyse de saumure

Avril 2013

Etablissement : STOCAMINE

Date de réception des échantillons au laboratoire : 11/03/13

Nature des échantillons : 2 eaux

| Analyses :                     | Méthodes                                       | Unités | TB 82<br>(3 32 03 271)      | TB 88<br>(3 32 03 272)      |
|--------------------------------|------------------------------------------------|--------|-----------------------------|-----------------------------|
| Potassium (*)                  | NF EN ISO 11885                                | g/l    | 5,52                        | 3,53                        |
| Sodium (*)                     | NF EN ISO 11885                                | g/l    | 130,5                       | 119,2                       |
| Fer total (*)                  | NF EN ISO 11885                                | mg/l   | 31,9                        | 40,0                        |
| Chlorures (*)                  | NF EN ISO 10304                                | g/l    | 208                         | 206                         |
| Indice Hydrocarbures (C10-C40) | Sous-traitance CARSO<br>selon rapport ci-joint |        | LSE1303-18686-1<br>(1 page) | LSE1303-18687-1<br>(1 page) |

Figure 12 : Résultats d'analyse d'eau du 11/03/2013

Novembre 2014

| Votre référence échantillon | Notre référence échantillon | Référence Rapport CARSO  |
|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| TB 82                       | 43211362                    | LSE1411-40876-1 (1 page) |
| TB 88                       | 43211361                    | LSE1411-40875-1 (1 page) |

|                                     |                                          |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Identification dossier :</b>     | LSE14-131272                             |
| <b>Identification échantillon :</b> | LSE1411-40876-1                          |
| <b>Doc Adm Client :</b>             | Cde C1402983/F00400106 - C. DE BALTHASAR |
| <b>Référence client :</b>           | 43211362                                 |
| <b>Nature:</b>                      | Eau usée                                 |
| <b>Prélèvement :</b>                | Réceptionné le 28/11/2014                |

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Date de début d'analyse le 30/11/2014

| Paramètres analytiques                   | Résultats | Unités   | Méthodes                | Normes            | Limites de qualité | Références de qualité | CONFORMITÉ |
|------------------------------------------|-----------|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| <b>Analyses physicochimiques</b>         |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| <i>Analyses physicochimiques de base</i> |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| Chlorures                                | 217200    | mg/l Cl- | Chromatographie ionique | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       | #          |
| Indice hydrocarbures (C10-C40)           | < 0.1     | mg/l     | GC/FID                  | NF EN ISO 9377-2  |                    |                       | #          |
| <i>Métaux</i>                            |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| Digestion                                | -         | -        | Digestion acide         | Méthode interne   |                    |                       | #          |
| Fer total                                | 16.0      | mg/l Fe  | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |
| Potassium total                          | 4239      | mg/l K   | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |
| Sodium total                             | 111150    | mg/l Na  | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |

|                                     |                                          |
|-------------------------------------|------------------------------------------|
| <b>Identification dossier :</b>     | LSE14-131272                             |
| <b>Identification échantillon :</b> | LSE1411-40875-1                          |
| <b>Doc Adm Client :</b>             | Cde C1402983/F00400106 - C. DE BALTHASAR |
| <b>Référence client :</b>           | 43211361                                 |
| <b>Nature:</b>                      | Eau usée                                 |
| <b>Prélèvement :</b>                | Réceptionné le 28/11/2014                |

Les données concernant la réception, la conservation, le traitement analytique de l'échantillon et les incertitudes de mesure sont consultables au laboratoire. Pour déclarer, ou non, la conformité à la spécification, il n'a pas été tenu explicitement compte de l'incertitude associée au résultat.

Date de début d'analyse le 30/11/2014

| Paramètres analytiques                   | Résultats | Unités   | Méthodes                | Normes            | Limites de qualité | Références de qualité | CONFORMITÉ |
|------------------------------------------|-----------|----------|-------------------------|-------------------|--------------------|-----------------------|------------|
| <b>Analyses physicochimiques</b>         |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| <i>Analyses physicochimiques de base</i> |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| Chlorures                                | 178100    | mg/l Cl- | Chromatographie ionique | NF EN ISO 10304-1 |                    |                       | #          |
| Indice hydrocarbures (C10-C40)           | < 0.1     | mg/l     | GC/FID                  | NF EN ISO 9377-2  |                    |                       | #          |
| <i>Métaux</i>                            |           |          |                         |                   |                    |                       |            |
| Digestion                                | -         | -        | Digestion acide         | Méthode interne   |                    |                       | #          |
| Fer total                                | 15.9      | mg/l Fe  | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |
| Potassium total                          | 2431      | mg/l K   | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |
| Sodium total                             | 99060     | mg/l Na  | ICP/AES après digestion | NF EN ISO 11885   |                    |                       | #          |

Figure 13 : Résultats d'analyse d'eau du 28/11/2014

## 6) Conclusions

Ces observations menées sur plusieurs années, depuis les remblayages des puits A1 et A2 jusqu'à maintenant, ont permis de voir que :

- les suintements visibles situés aux recettes sont en diminution,
- l'écoulement visible, par un cheminement bien établi, des eaux d'infiltration vers les vieux travaux du Nord s'est asséché par endroits, le niveau de deux points bas (C et E) s'est quant à lui stabilisé, sans que l'on puisse affirmer absolument que cette stabilisation du niveau, avant d'atteindre le « col » d'exutoire, est due à un tarissement de la source et non pas, même si c'est peu probable au vu de la faible perméabilité des matériaux : à l'infiltration et à l'écoulement de l'eau assez profondément en-dessous du mur des galeries drainantes,
- la concentration en chlorures des plans d'eau stagnants aux points bas correspond à la composition d'une saumure saturée.

Tout semble indiquer que les débits d'apport des deux puits A1 et A2 sont en diminution.

La poursuite du sondage VA PB2 dans le point bas de la mine Amélie permettra de confirmer cet état de fait en permettant la mesure du niveau d'eau accumulé au cours des années.