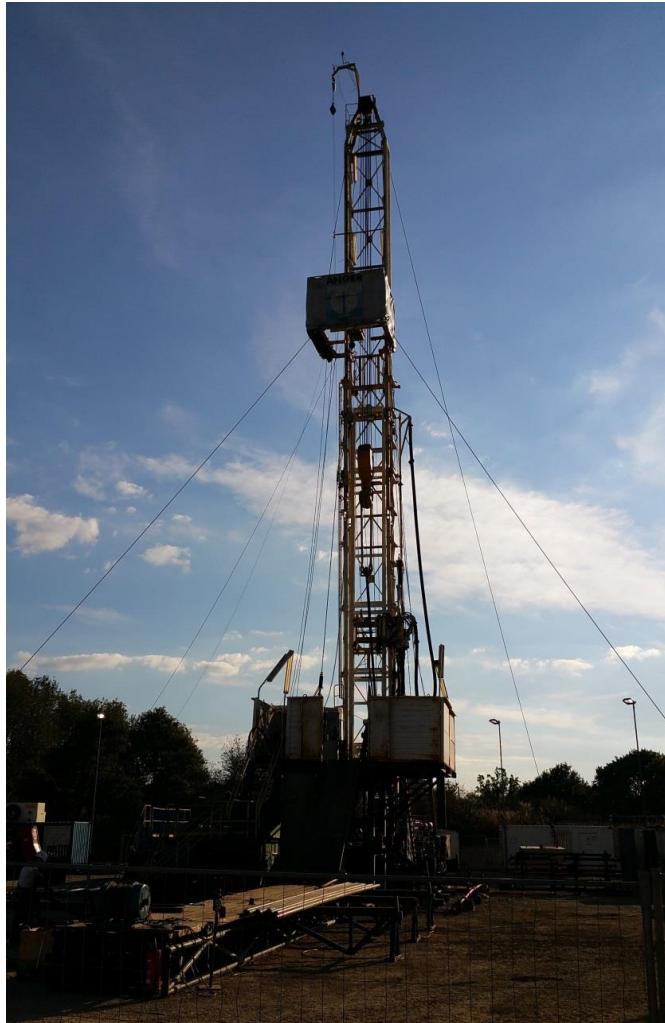


Note de synthèse sur les observations réalisées sur le puits VA PB2

SOMMAIRE

Données générales sur la phase de forage du puits	2
1) Niveau de fluide mesuré	5
2) Essai hydraulique du 18/11/2015 - caractéristiques hydrauliques du foudroyage	6
3) Origine du fluide	8
4) Pourcentage de vides résiduels – 2 approches	10
4.1) Approche utilisant la hauteur d'eau :	10
4.2) Approche par imagerie de paroi :	12
Conclusions.....	13

Données générales sur la phase de forage du puits

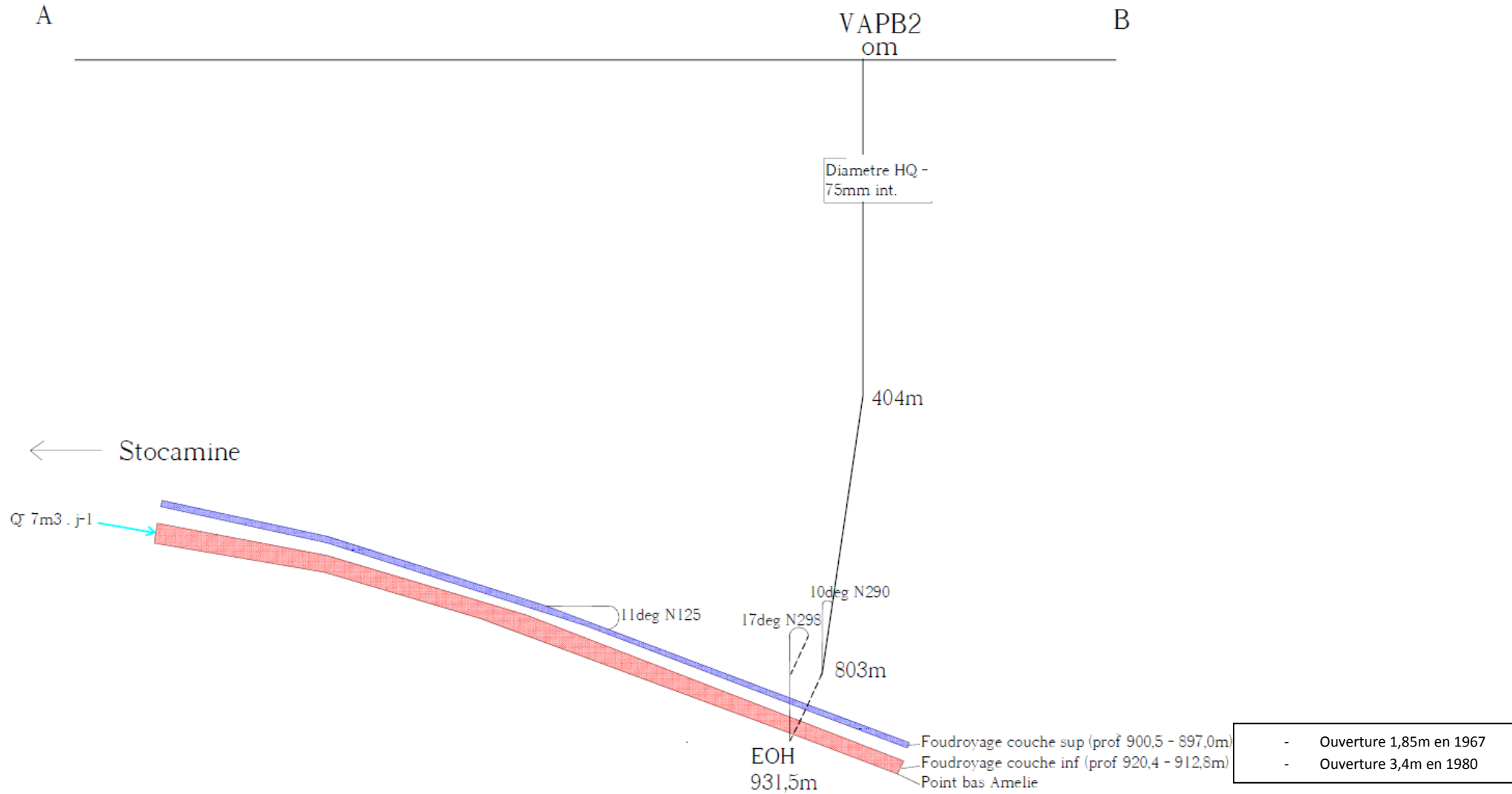


La foreuse WW185 utilisée pour la phase 3 du chantier VAPB2

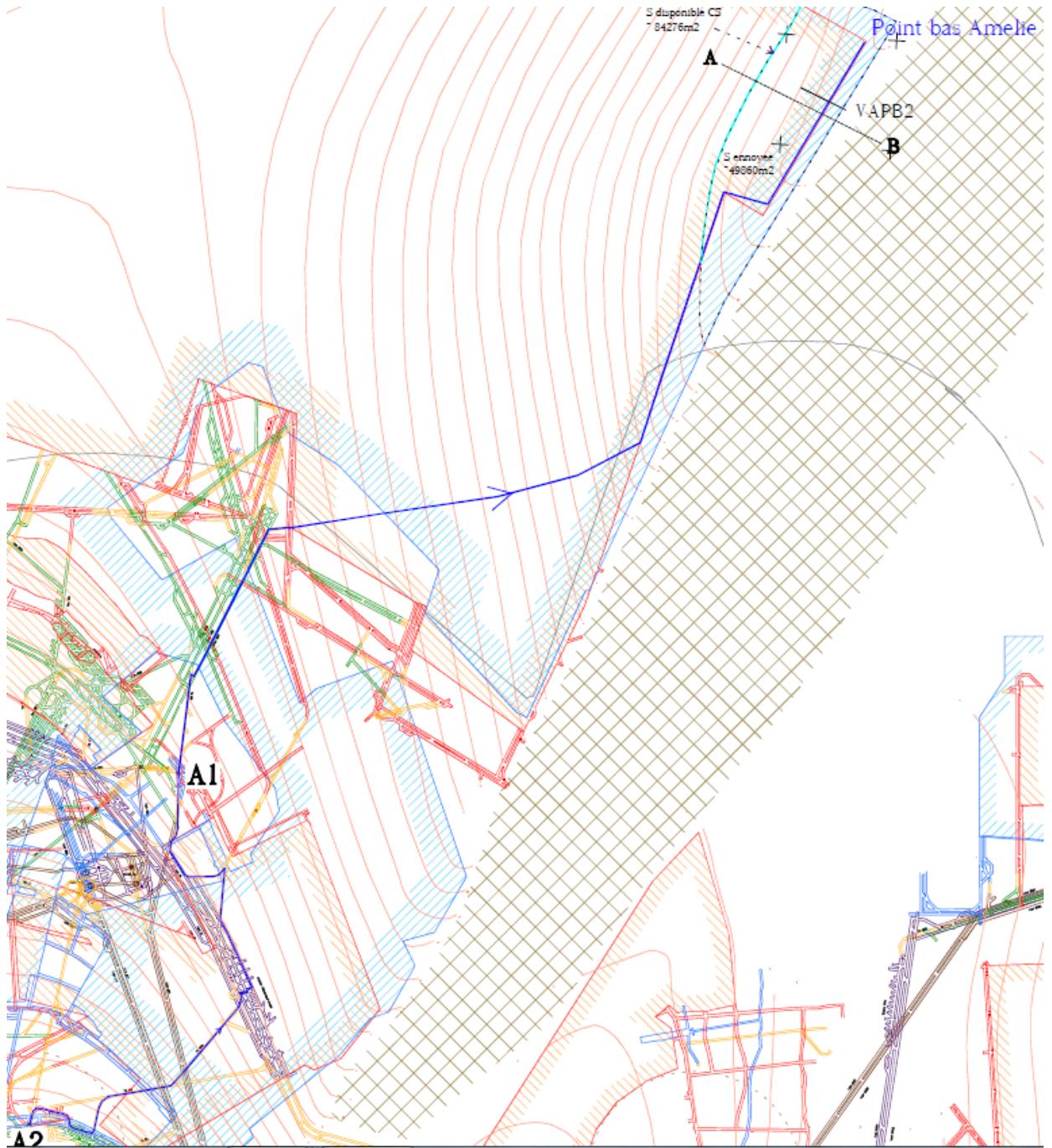
La date de début des opérations de forage s'établit au 28/09/2015, la date de fin de forage au 24/10/2015, jour du tubage du sondage – soit **27 jours d'opérations**. On admet en général que la durée de retour à l'équilibre hydraulique correspond peu ou prou à la durée des opérations de forage.

270m³ de boue de forage ont été injectés durant toute la durée des opérations. Celle-ci était composée de saumure saturée au chlorure de sodium et de potassium avec des viscosifiants et des colmatants de pertes, type micas fins. La densité était de 1,2.

Des diagraphies d'imagerie de paroi optique et acoustique ont été réalisées en fin de forage, elles permettent d'avoir une vision assez nette des parois du forage.



Coupe schématique du puits VA PB2 avec la position des couches foudroyées exploitées

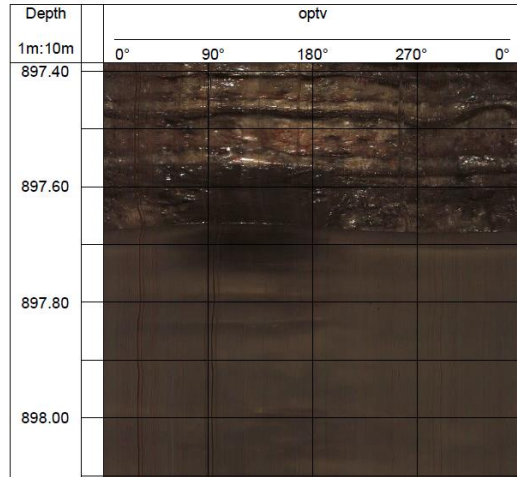


Plan du cheminement des eaux d'ennoyage des puits A1 et A2 vers VA PB2

1) Niveau de fluide mesuré

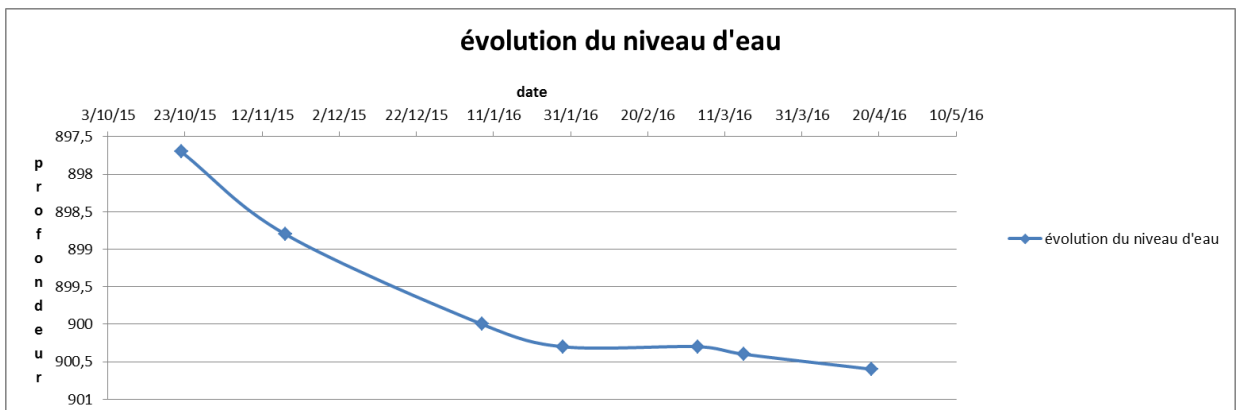
Le niveau de fluide mesuré à l'issue du forage (22/10/2015) était de : 897,7m de profondeur*.

*NB : profondeur en longueur forée.



Extrait imagerie de paroi montrant la surface de fluide.

L'évolution du niveau de fluide mesuré dans l'ouvrage VAPB2 est présentée dans le graphique et le tableau ci-dessous :



Date	Niveau statique (profondeur forée en m)
22/10/2015	897,7
18/11/2015	898,8
08/01/2016	900
29/01/2016	900,3
04/03/2016	900,3
16/03/2016	900,4
18/04/2016	900,6

NB : la cote 900,5m correspond au mur de la couche supérieure.

On note que le niveau de fluide tend à diminuer avec une phase actuelle d'amortissement. L'hypothèse la plus probable est que le sondage serve de « trop plein » au réservoir de couche inférieure vers le réservoir de la couche supérieure, comme le montre le schéma de la partie 4.

En effet, le niveau statique actuel présent dans l'ouvrage VA PB2 coïncide avec le mur du foudroyage de la couche supérieure. Il est donc probable qu'un déversement, une infiltration, s'effectue depuis le foudroyage ennoyé de la couche inférieure vers celui de la couche supérieure par l'intermédiaire du puits.

NB : le foudroyage de la couche supérieure a été cimenté au cours des opérations de forage, sans apporter toutefois une étanchéité totale puisqu'une perte partielle mineure de 2,5m³/h a persisté à l'issue de la seconde cimentation.

Il n'est malheureusement pas possible de mesurer un débit dans l'ouvrage tubé à cause des flux qui peuvent avoir lieu à l'extrados du tubage et qui ne sont pas mesurables.

Pour information : dans ces conditions, la précision de la sonde de mesure de pression (0,005 bar) est de 4 cm, pour de la saumure de densité 1,2.

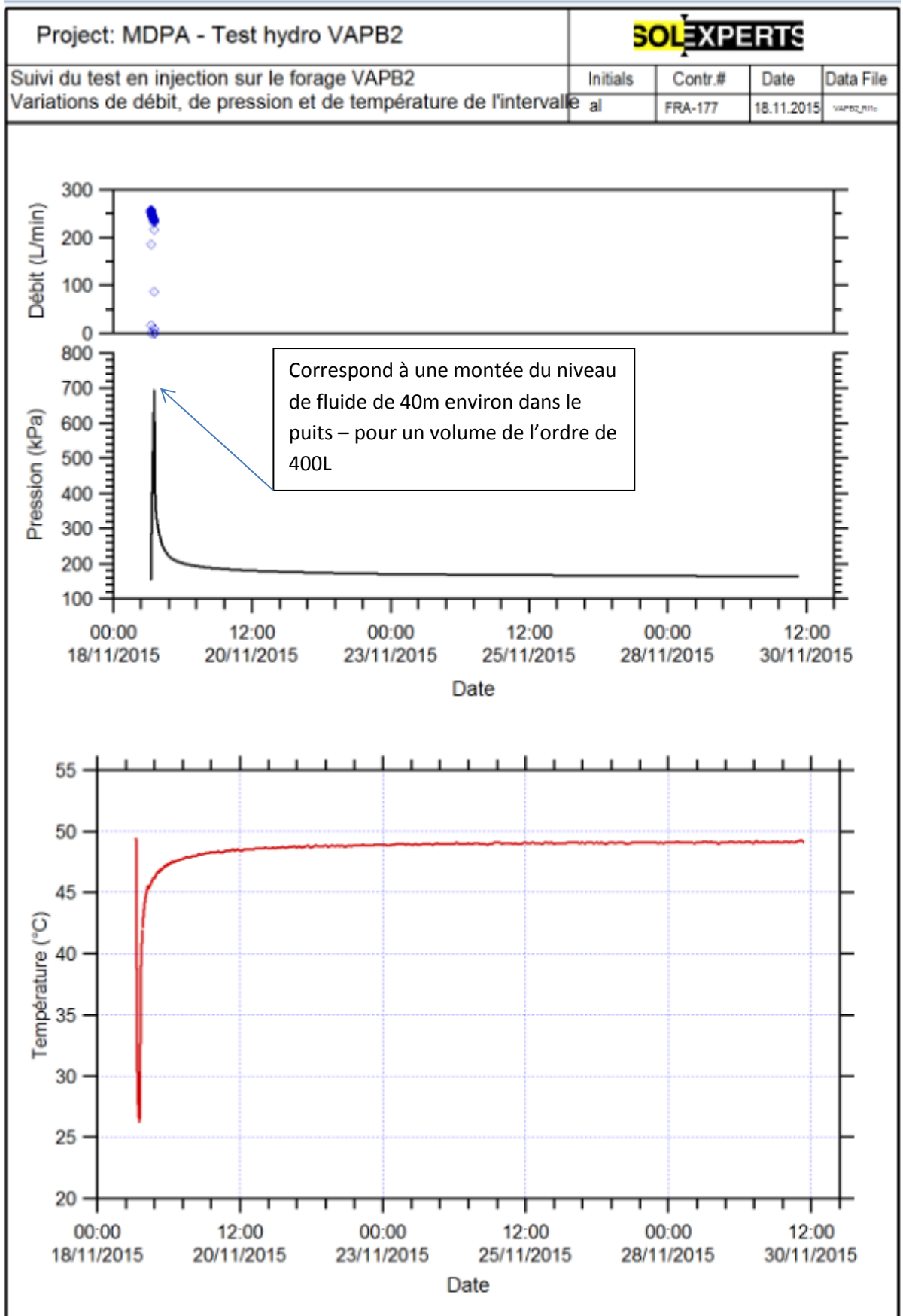
2) Essai hydraulique du 18/11/2015 - caractéristiques hydrauliques du foudroyage

Un essai hydraulique a été mené par SOLEXPERTS le 18/11/15. 20m³ de saumure saturée ont été injectés à 245L/min, pour analyser la montée du niveau de fluide, puis le retour en pression, et en déduire la transmissivité de la formation. La formation étudiée est constituée principalement par le foudroyage de la couche inférieure (étendu sur 8 mètres d'épaisseur environ suivant imagerie et paramètres de forage). Le foudroyage de la couche supérieure a été, lui, cimenté par deux fois avec un volume total de 3,5m³ de coulis de ciment, sans pouvoir être toutefois totalement étanché (perte partielle de boue de 2,5m³/h). Les terrains encaissants : marnes et sel sont quant à eux réputés avoir une perméabilité très faible.

Les résultats de l'essai hydraulique sont les suivants :

- Perméabilité $K = 4,3 * 10^{-7}$ m/s
- Transmissivité $T = 3,2 * 10^{-6}$ m²/s

K(m/s)		10 ⁻¹ 10 ⁻² 10 ⁻³ 10 ⁻⁴ 10 ⁻⁵ 10 ⁻⁶ 10 ⁻⁷ 10 ⁻⁸ 10 ⁻⁹ 10 ⁻¹⁰ 10 ⁻¹¹									
		Gravier pur		Sable pur		Sable très fin		Silt		Argile	
Granulométrie	homogène	Gravier pur		Sable pur		Sable très fin		Silt		Argile	
	variée	Gravier gros et moyen		Gravier et sable		Sable et argile-limons					
Degrés de perméabilité		Très bonne				Mauvaise				Nulle	
Types de formations		Perméables				Semi-perméables				Imperméables	



Extrait de courbes illustrant l'essai hydraulique d'injection dans VA PB2.

3) Origine du fluide

Un prélèvement de fluide a été effectué par l'entreprise SOLEXPERTS le 18/11/15 à 920 mètres de profondeur pour déterminer si le fluide provenait de la formation ou était du fluide de forage résiduel.

Les paramètres physico-chimiques étaient les suivants :

- Conductivité électrique 300 mS/cm à 25°C – soit un fluide très minéralisé, avec des précipités de sels dans le flacon de prélèvement ;
- pH : 7,12 ;
- Eh : -108mV – soit un fluide peu oxygéné.

L'analyse de l'échantillon a donné les résultats suivants :

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 ₄ 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

Ces résultats d'analyse ont été mis en comparaison avec ceux de la boue utilisée pour le forage d'une part, et avec ceux d'une saumure d'envoyage reconstituée en laboratoire. Cette saumure d'envoyage reconstituée avait servi à déterminer la composition de la boue de forage. Elle avait été fabriquée par dissolution d'un échantillon de carotte du foudroyage de la couche inférieure de potasse.

Les différents résultats d'analyse concernant : la boue de forage, le fluide contenu dans l'ouvrage VAPB2 et une saumure d'ennoyage reconstituée sont présentés dans le tableau ci-dessous.

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

Nous faisons les observations suivantes concernant le fluide prélevé dans VAPB2 :

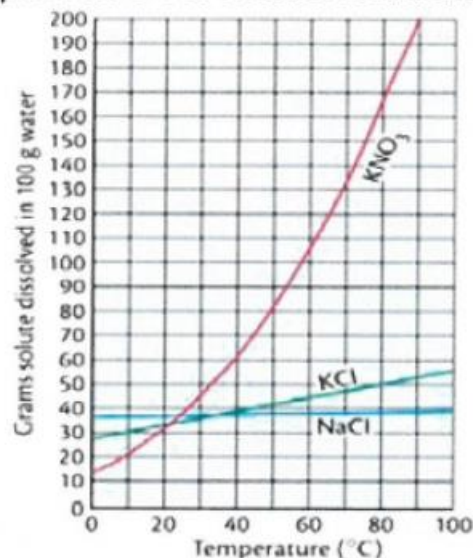
- il est saturé en chlorures (ce dernier comportait d'ailleurs une fraction solide),
- il est très concentré en potassium, dix fois plus que la boue de forage.

Nous pouvons en conclure que l'origine du fluide prélevé dans VAPB2 est bien une saumure d'ennoyage du foudroyage des couches de potasse exploitées dans la mine Amélie. La température ambiante de 50°C qui règne à cette profondeur favorise la dissolution du potassium non extrait par rapport au chlorure de sodium.

NB : une dissolution de potassium par du fluide de forage « stagnant » serait aussi une explication possible, néanmoins, cette éventualité est écartée par les résultats de perméabilité de l'essai hydraulique.

Ci-dessous, nous présentons le graphique de pouvoir de dissolution d'un fluide en fonction de la température :

Temperature vs. Solute Solubility in Water



4) Pourcentage de vides résiduels – 2 approches

(exercice en date de décembre 2015)

4.1) Approche utilisant la hauteur d'eau :

Données considérées :

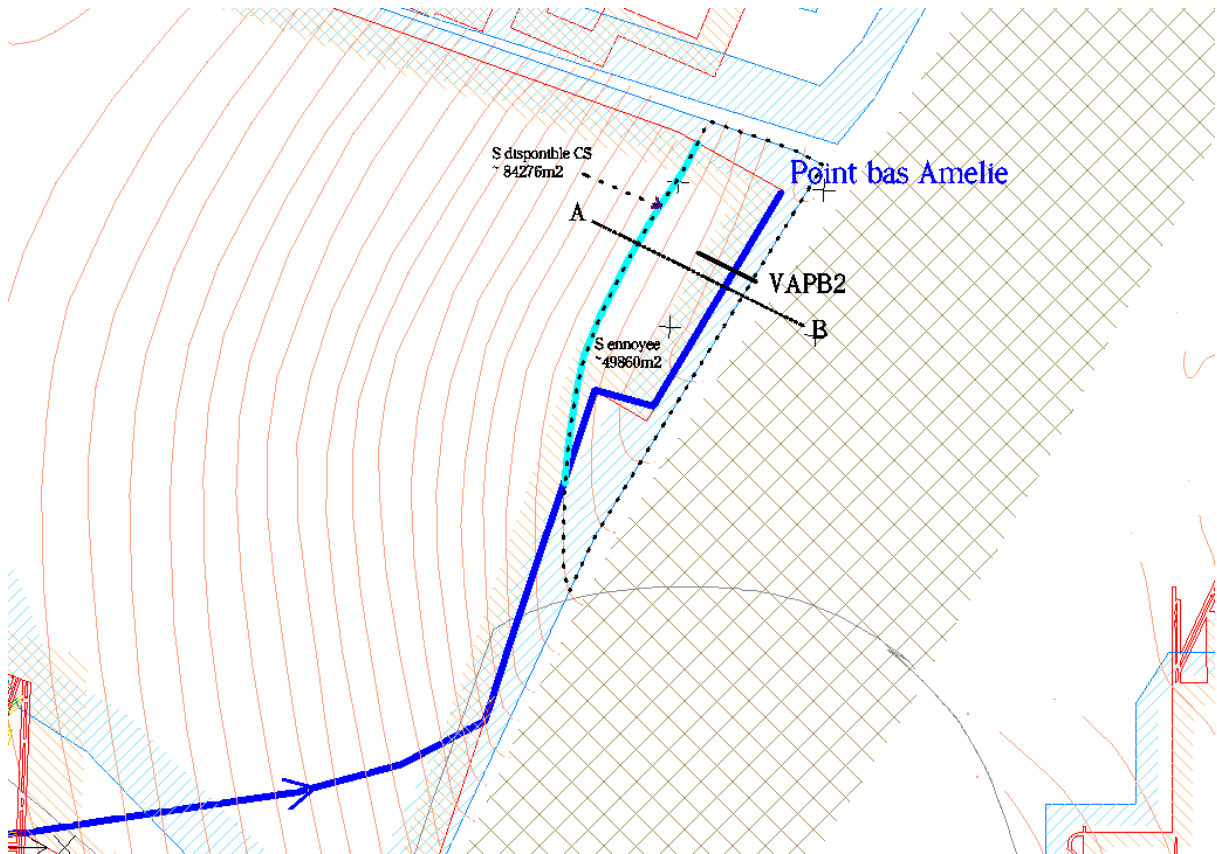
- Puissance Couche Supérieure (CS) : 2,05m – Ouverture : 1,85m – Date exploitation : 1967
- Puissance Couche Inférieure (CI) : 5,2m – Ouverture : 3,4m – Date exploitation : 1980
- Sources d'eau : puits Amélie 1 (A1) et puits Amélie 2 (A2) tous deux étanchés, remblayés
- Débit moyen post-fermeture puits A1 : 4,5m³/jour - début remblayage août 2006
- Débit moyen post-fermeture puits A2 : 3,5m³/jour, puis stabilisé à 2,5 à compter de sept. 2009 – début remblayage juin 2008
- Dates de début d'envoyage d'Amélie Nord (surveillance MDPA) :
 - A1 : avril 2007 (pas d'envoyage du 17/04/2009 au 13/04/2010)
 - A1+A2 : décembre 2011

NB : il faut ajouter à ces apports 900m³ de boues (saumure) injectées au cours du forage de VA PB2. De plus, des apports non négligeables de fluides utilisés pour la haute pression ont pu être effectués à l'époque de l'exploitation des tailles lorsque ceux-ci n'étaient pas exhaurés. Ceux-ci sont difficilement quantifiables.

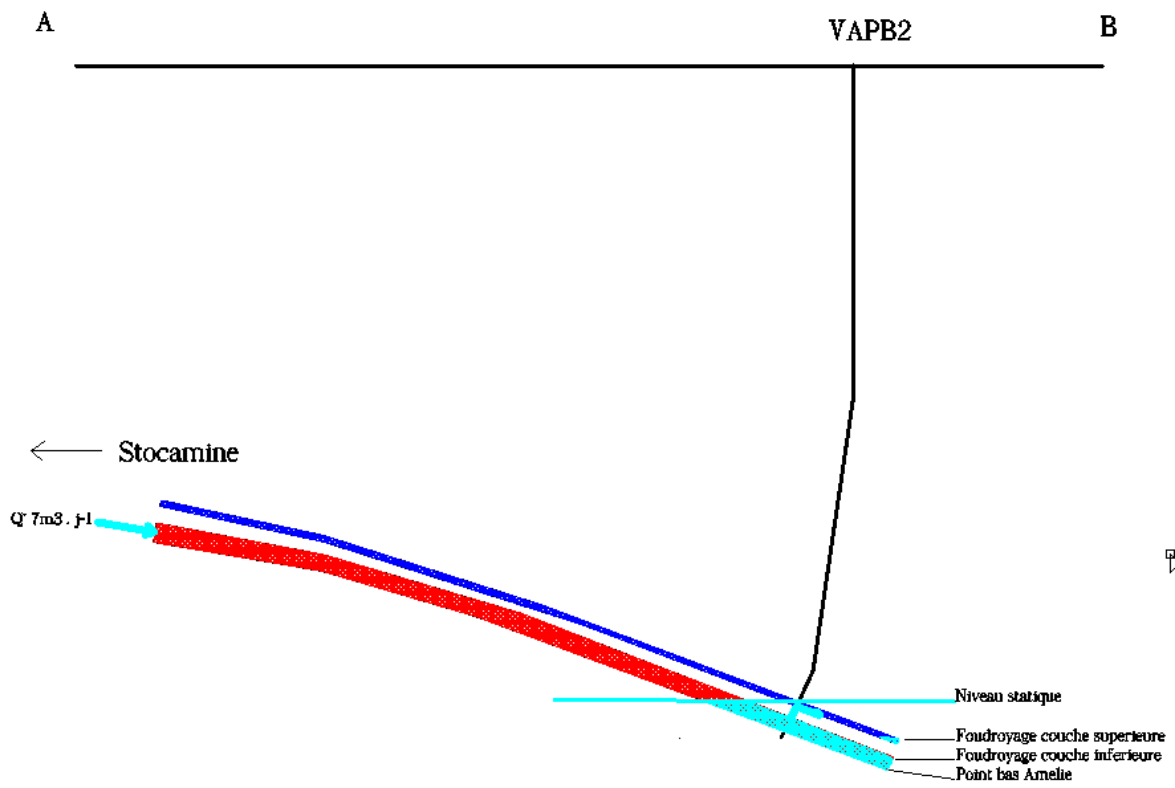
➔ Volume approximatif total d'envoyage 1^{er} décembre 2015 = $4,5 \cdot 2799 + 2,5 \cdot 1461 + 900 = 17.148 \text{ m}^3$

Niveau statique observé dans le sondage VA PB2 : 898 m de profondeur soit 21 m d'altitude (corrigés de l'angle de déviation 17°) au-dessus du mur de la couche inférieure (située à la profondeur de 920,3 m).

La surface envoyée (couche inférieure seule) estimée correspond à la suivante :



Représentation surface envoyée estimée par rapport au niveau statique



Coupe schématique AB

La hauteur d'eau « reconstituée » présente dans la couche inférieure s'établirait ainsi à :
 $H = V/S = 17148/49860 = 0,34 \text{ m}$

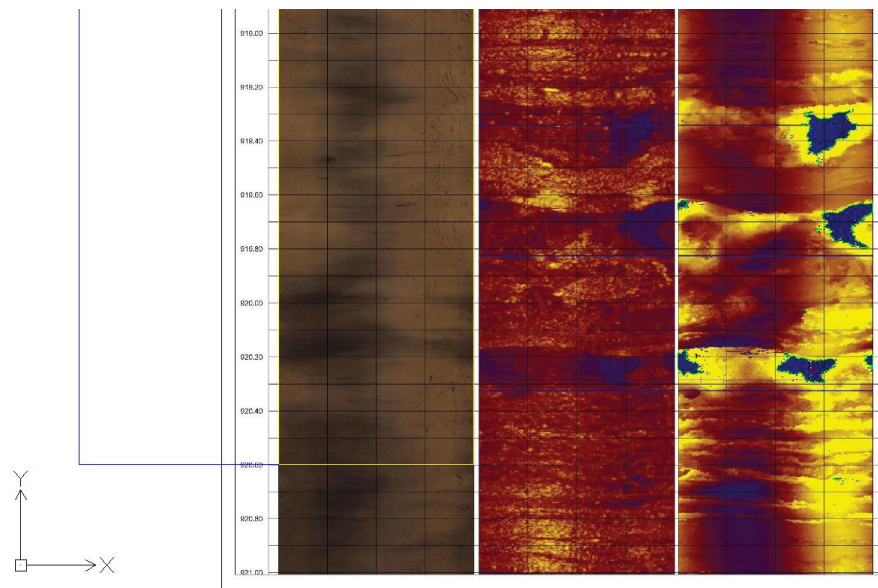
Cette hauteur correspond à un vide résiduel de 10 % par rapport aux 3,4 m exploités.

Estimation de la durée de remplissage des vides de la couche supérieure avec une hypothèse de vides résiduels de 9 % (résultat obtenu à partir de l'imagerie de parois) :
 $T = V/Q = 84276 * 0,17 / 7 = 2004 \text{ jours, soit } 5,5 \text{ ans.}$

Si l'hypothèse d'une infiltration dans le foudroyage dans la couche supérieure est correcte, nous ne devrions donc voir le niveau monter dans l'ouvrage VA PB2 que dans 5,5 ans.

4.2) Approche par imagerie de paroi :

Les résultats des imageries de paroi, optique et acoustique, ont été fournis à un dessinateur industriel pour dessiner le contour des vides, bien visibles, et en mesurer la surface, relativement à la surface de l'image. Cette approche ne donne qu'un accès 2D et en un point de forage donné mais elle a l'avantage d'être une mesure directe, donc a priori fiable. Les résultats donnent **10 %** de vides résiduels pour la couche inférieure, et **9 %** pour la couche supérieure, à noter que celle-ci a été cimentée et que des vides au voisinage immédiat du forage ont pu être masqués.



Page 31

Extrait de l'imagerie de paroi et estimation des vides au voisinage du mur de la couche inférieure.

NB : une troisième approche, utilisant l'affaissement mesuré par rapport à la hauteur de couche exploitée a été utilisée pour estimer le pourcentage de vides résiduels, sans résultat probant. Cette méthode consiste à comparer la hauteur de la colonne des terrains qui recouvrent la couche exploitée dans leur état vierge, et dans leur état foudroyé. La différence représente la hauteur de vides résiduels qui rapportée à la hauteur exploitée, constitue ce qu'on nomme le pourcentage de vides résiduels.

Ainsi on a mesuré à 19,8m (ramenés à la perpendiculaire aux couches) la puissance des terrains qui séparent, après exploitation, les murs de la couche inférieure de celui de la couche supérieure. La même distance mesurée sur les plans d'exploitation, à partir des courbes de niveaux théoriques tracées à partir des levés topographiques donne 17m. La différence entre ces deux valeurs est incohérente puisqu'elle correspondrait à 80% de vides résiduels. Cette incohérence doit être due à un manque de précision des données issues des courbes de niveaux.

Une troisième valeur d'épaisseur a été mesurée à partir des données du sondage d'exploration DP28 situé à quelques dizaines de mètres de VAPB2 avec un résultat de l'ordre de 21m. L'écart provient ici certainement d'une variation latérale de puissance des couches. Ici encore la valeur n'est pas exploitable pour en retirer le pourcentage des vides résiduels.

Conclusions

- A l'issue du forage, après retour à l'équilibre hydraulique, le niveau de fluide dans le sondage VA PB2 était situé à 898 m de profondeur. Cette profondeur se situe 21 m au-dessus du mur de la couche inférieure de potasse. Ce niveau de fluide correspond à un pourcentage de vides résiduels mesurés de 10 %, pour un débit d'alimentation par les puits Amélie 1 et 2 estimé à 7m³/j. Cette valeur de 10 % a été confirmée avec l'analyse des imageries de paroi.
- Au cours de ces cinq mois (à fin avril 2016), le niveau de fluide est descendu légèrement, de 3m environ. Cette vitesse de descente est de plus en plus faible. Le niveau de fluide semble se stabiliser proche de la cote du mur de la couche supérieure. Or, on estime à cet endroit, par rapport à la surface exploitée, que le niveau devrait monter d'un centimètre par jour environ avec un débit journalier de 7m³ (cette vitesse serait moindre si le remplissage du foudroyage de la couche supérieure a lieu en parallèle). Il est à penser que la saumure d'ennoyage de la couche inférieure s'écoule, s'infiltrerait aujourd'hui au sein du foudroyage de la couche supérieure (bien que celui-ci ait été cimenté sans atteindre une étanchéité totale) et que cela continuera jusqu'à remplissage, estimé à 5,5 années si on prend un volume de vide résiduel de 9 % dans la couche supérieure (résultat issu de l'imagerie de paroi). L'observation du niveau de fluide dans VAPB2 doit être poursuivie pour confirmer cette hypothèse.
- L'analyse du fluide présent au sein de VAPB2 montre que l'on a très certainement affaire à de la saumure d'ennoyage. Sa composition, saturée en chlorures et très concentrée en potassium diffère fortement de la boue utilisée pour le forage. Les résultats de l'essai hydraulique qui donnent une perméabilité $K = 4,3 * 10^{-7}$ m/s pour la formation traversée par le puits, indiquent que le puits se serait vidé rapidement après la phase de forage, en absence d'une saumure d'ennoyage dans le réservoir minier.