

Antoine Godinot
27 rue de l'Arquebuse
51 100 Reims
tél. 03 52 45 01 29
antoinegodinot@yahoo.fr

Reims le 18 mai 2011

à l'attention du CLIS de Bure :
Mr le Président et Mr. le Secrétaire

Objet : Courrier du CLIS daté du 16/05/11, Géothermie à Bure

Messieurs,

Merci beaucoup au CLIS d'avoir demandé à l'Andra les documents concernant ce qui a été fait au niveau du Buntsandstein postérieurement aux tests hydrauliques réalisés dans cet aquifère début juin 2008. Monsieur B. Jaquet va m'envoyer une copie du Cd-Rom sur lequel l'agence a réuni des documents à cette occasion et je m'en réjouis. Déjà, il m'a joint copie de la lettre en réponse de l'agence, et comme la lecture du Cd-Rom prendra un certain temps, je vous dois bien de livrer à chaud des remarques préliminaires sur cette lettre, et à ce qui m'amène à faire de telles demandes. Cette histoire de géothermie profonde concerne le CLIS depuis qu'en décembre 2002 l'un de ses membres, Mr Mourot, a fait part de l'existence de deux rapports du BRGM (le service géologique de l'État) 1980 et 1981 sur le potentiel géothermique du Buntsandstein qui mettait un cercle précisément sur la zone où se trouve le laboratoire aujourd'hui avec la légende "*bonne productivité*". L'Andra n'a jamais mentionné l'existence de ces rapports. Le 17 décembre 2003, par lettre, le Président du CLIS saisit l'Andra sur cet aspect à laquelle par lettre du 20/01/2004 le Président de l'Andra répondait au Président du CLIS :

- *la capacité de production de ces horizons sur le secteur apparaît très faible, du fait d'un mélange d'argile aux grès des formations aquifères (...)*
- *l'accroissement de la température avec la profondeur (gradient géothermique) est faible au regard des valeurs moyennes constatées sur le territoire français; en conséquence, l'eau contenue dans les couches du Trias, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, a une relativement faible température.*

Pourtant, aucun forage ne va alors au Buntsandstein alors que l'Andra fait des forages sur la zone depuis 10 ans. Les données sont donc les mêmes pour tout le monde : d'anciens forages pétroliers. Le BRGM a dit : oui, c'est bon, l'Andra dit : ça doit pas être bon parce que ceci parce que celà, une fois que... on l'oblige à aborder le sujet.

Le 11 mars 2008, au bout de 14 ans de présence et des demandes répétées d'au moins une partie du CLIS, l'agence démarre finalement un forage qui ira jusqu'au Trias. Le 08/06/2008 commence une série de 3 tests au Trias qui seront complètement terminés 4 jours plus tard, le 12/06/08. Le forage était libéré.

Dans ce qui suit le rapport sur ces 3 tests est appelé "SIS" (voir bibliographie).

Pour comprendre de quoi on va parler, il faut savoir à quelle profondeur se trouve le Buntsandstein. Le forage étant incliné en partie profonde, il faut distinguer une "profondeur forage" d'une vraie profondeur verticale (et profondeur au dessus du niveau de la mer en soustrayant l'altitude de forage) : ci-joint tableau de ces valeurs en annexe 1.

La lettre de l'Andra du 12 mai 2011 :

- On apprend qu'une crépine a été mise dans le forage en juin 2008. Cela a donc été réalisé après le 12/06/08, fin des 3 tests. Ses cotes sont 1698 à 1925 m, on suppose qu'il s'agit de "profondeurs forage". Le Buntsandstein commençant à 1874,5 m, 78% de cette crépine, 176,5 m, sont au dessus du Buntsandstein dans une série de dolomies et d'argiles rouges (Muschelkalk) et 50,5 m sur le haut du Buntsandstein. Ces derniers correspondent à 6-7 m près au faciès fin des "grès à Voltzia", le faciès sommital du Buntsandstein.

Il reste 72 mètres de grès du Buntsandstein en dessous de cette crépine juin 2008 pour lesquels on ne connaît pas le statut.

- "*Le comblement du forage a été constaté lors des deux opérations de diagraphe thermique réalisées en août 2008 et février 2009 lors desquelles les outils de mesure ont posés respectivement à 1856 m et 1841m montrant le comblement progressif du forage par des fines au travers de la crépine.*" [sic]. "Des outils ont posés" ça veut dire ? 1856 et 1841 m si c'est des profondeurs-forage, ça ne concerne pas le Buntsandstein qui commence respectivement 185 m et 33,5 m plus bas ("profondeurs forage"). Elles concernent le Muschelkalk :

- A 1841 m profondeur forage, on est au beau milieu d'une couche d'argile rouge (Andra et al., non daté);
- à 1856 m profondeur forage, on est dans une alternance toujours à dominante argile rouge avec des niveaux silteux (ces derniers pouvant être un peu perméables), (Andra et al., non daté).

Si on prend ce courrier "à la lettre" il n'y a eu aucun retour au Buntsandstein. Donc, officiellement, aucune nouveauté depuis les tests terminés le 12/06/08, il y a 3 ans ? Cela est-il satisfaisant ?

Vous trouverez en annexes à propos de ces tests et sur ce sujet du potentiel géothermique de Bure :

- Annexe 2 : la température au beau milieu du Buntsandstein, "grès à vosgiens", est de l'ordre de 69°C pour un gradient géothermique parfaitement normal de 3,07 °C/100m;

- Annexe 3 : il est impossible de chiffrer la perméabilité des "grès vosgiens" lors du test n°1, parce que l'outil était obstrué par de la boue polymère de forage (crépine et valve d'obturation). Les "tentatives" de quantifications, irrecevables sur le plan scientifique, s'étalent sur 6 ordres de grandeur ce qui en dit long sur leur "fiabilité". Tout cela est écrit des dizaines de fois dans le cœur du rapport SIS, même si "le résumé à l'attention des décideurs" ("Executive summary" puisque ce rapport n'est même pas disponible en français) se permet de donner une valeur avec un intervalle de confiance à 95% extrêmement étroit, qui au vu des "tentatives", est simplement grotesque. Par contre, qualitativement, c'est un bon aquifère parce qu'il revenait très vite autour de sa pression de formation et cela est écrit aussi plusieurs fois au cœur du rapport en anglais technique. Rien ne permet de dire que sa perméabilité est inférieure à celle seule considérée du test n°2 par l'Andra et le rapport Thoillies, qui écartent d'un revers de manche tout le reste du Buntsandstein comme "marginal". A juger du qualitatif des test n°1 et n°2 on a la surprise d'être visiblement dans un très bon aquifère partout.

- Annexe 4 : A la remontée de l'outil, après les 3 tests : photo de la crépine bouchée de l'extérieur et le texte complétant que même l'intérieur était plein de boue. Mr Drouot (2010) dans la synthèse Thoillies mentionne ce rapport donc il aurait pu y mettre cette photo. Peut-être son scanner était-il en panne ?

- Annexe 5 : Résultats de la Nagra ("Andra suisse") témoignant que quand on fait des tests en boue, ça bouche l'outil, et une page du rapport Geoservices sur le forage MSE101 de Bure qui dit qu'il ne fait pas les test en boue car ça pourrait boucher l'outil. Dans les deux cas, rapport Nagra et Géoservices, tous les test réalisés à l'eau ont été réussis, tous ceux en boue ratés.

- Annexe 6 : Dans le seul encadré qui y figure, la synthèse Thoillies (Drouot 2010, p.) écrit : "... a permis d'obtenir un débit stable égal à 5 m³/h sous un rabattement de 30 m...", recopiant en cela la p. 105 de Andra (2009) : "Un test de pompage réalisé sur l'intervalle du test (25m) a produit 35 m³ d'eau de formation avec un débit moyen de l'ordre de 70l/mn (4 à 5 m³/h), sous un rabattement de 30 m.". Ces chiffres apparaissent peu flatteurs pour un aquifère.

Il n'y a pas eu de "rabattement physique", Δh , de 30m. Dans ces tests là, à 1875 m de profondeur, on ne peut pas mesurer un niveaux d'eau. Un capteur de pression à quartz qui est au fond mesure des changements de pression, Δp . On peut ensuite traduire ça en *rabattement* avec la formule $\Delta p = \rho g \Delta h$ ou donc $\Delta h = \Delta p / \rho g$. g est l'accélération de la gravité (9,81 m/s², parfois on utilise 10), ρ est la densité du fluide. Et quand on dit classiquement, "équivalent eau fraîche", cela veut dire qu'on prend la valeur de 1000 kg/m³ pour ρ . celle approximative de l'eau à la surface. Ça n'est pas une réalité physique, c'est un moyen de comparaison.

Revenons au rabattement peu flatteur. L'un des modèles mathématiques utilisé par les opérateurs pour le calcul de perméabilité du test n°2 permet aussi de calculer un "facteur de pellicule" qui lui même va donner l'origine d'une partie de la baisse de pression (= du rabattement) lors d'un pompage/récupération de pression. La pellicule est par exemple un écran de boue qui peut s'être mis sur les parois du forage et qui gêne l'écoulement. Ce phénomène est courant et est pris en compte dans les modèles (l'obstruction est plus compliquée que ça au EST433, mais on suit les auteurs de SIS qui pour la séquence RWS du test n°2 ont fait "comme ci" c'était comme ça).

Dans cette annexe 6, on calcule ce facteur de pellicule, S_{pel} , avec les chiffres présentés dans le rapport SIS et avec un modèle qu'ils utilisent, celui de Horner, sauf qu'ils n'ont pas mené le calcul jusqu'au bout. Ce facteur calculé est de 200. C'est beaucoup. Au vue de sa définition on montre alors simplement que presque tout des 30 m de rabattement est due à la pellicule de boue. Sans boue, le rabattement serait apparemment du genre de quelques dizaines de centimètres.

Rappelons aussi que la petite pompe, dont on descend un étroit rotor à l'intérieur d'un tube d'un diamètre de 6,2 cm à une profondeur de 350m, était à fond ("La pompe Moyno était utilisée au nombre de révolution maximal pour lequel elle est conçue..."; SIS p. 59). Les pompes utilisées en exploitation géothermiques dans une "chambre de pompage" d'un diamètre de 35 cm peuvent tirer > 300 m³/h sans problème (Lemale & Jaudin 1998 p. 20). Écrire (Andra juillet 2009 p. 109) : "La production mesurée en test dans EST 433 (5 m³/h) est nettement inférieure à la gamme de débits des exploitations géothermiques (150 à 400 m³/h)." est de la pure escroquerie, ce qu'écrit diplomatiquement la CNE (2010, p. 14) : "La comparaison... n'est pas totalement objective...".

- Bibliographie.

Avec mes remerciements et la garantie de mon honnêteté

A. Godinot

Annexe I

La partie profonde du forage Est 433

Le forage Est 433 avait commencé le 11/03/08 et s'était d'abord arrêté le 23/04/08 (Andra et al., non daté). Il y a eu une série de tests entre double obturateurs sur le Callovo-Oxfordien.

Outre l'étude du Callovo-Oxfordien, ce forage avait pour but annoncé : "*Évaluer le potentiel géothermique du Trias*".

La dernière partie du forage Est 433, après la pose d'un tubage jusqu'à 1740 m profondeur-forage (environ 1730m vrais, on est dans les dolomies et argiles dolomitiques du Muschelkalk supérieur), a été réalisée, forage et carottage, du 30 mai au 05 juin 2008 (SIS p. 16).

Cette dernière partie est laissée en "trou nu" pour les tests hydrauliques, diamètre 15,2 cm (6" = 6 inches; 1 inch = 2,54 cm).

Inclinaison :

Le forage était resté proche de la verticale jusqu'à une profondeur de 900m après quoi il a commencé à dévier atteignant un angle > 19°/verticale à la "profondeur forage" de 1750m suivi de légères variations (SIS p. 12) jusqu'à son arrêt à 2001m "profondeur forage".

Les profondeurs véritables (True vertical depth : TVD) sont donc inférieures, sachant que la surface du sol à l'endroit est à 358,28 m (coefficients de correction dans SIS table 1.1 p. 11, lecture directe dans Andra et al. non daté) :

Tab. 1. Forage EST433. Surface du sol : 358,28 m au dessus niveau mer			
	"Profondeur-forage"/sol (m)	Profondeur réelle/sol (m)	Profondeur /niveau mer (m)
base du tubage	1740	~ 1730	~ 1371,7
sommet test n°3	1785,60	1772,1	1413,8
base test n°3	1810,49	1796,99	1438,7
sommet "grès à voltzia" (= sommet Buntsandstein)	~ 1874,5	~ 1859	~ 1500,7
sommet test n°2	1878,65	1861,65	1503,37
médiane test n°2		1874,15	1515,87
base test n°2	1903,64	1886,64	1528,36
base "grès à voltzia"	~ 1920	~ 1902	~ 1543,7
sommet test n°1	1927,6	1908,7	1550,42
médiane test n°1		1921,19	1562,91
base test n°1	1952,59	1933,69	1575,41
Fond de forage	2001	1979,98	1621,17

Le fond de forage est toujours dans le Buntsandstein dont la base n'a pas été atteinte (GEO-RS 2008, p. 36). Avec deux tests de 25 m entre obturateurs, on ne collecte pas d'information hydrauliques sur 58% du Buntsandstein ([1980+] -1859 ≈ 121m - 50, reste 71m+). "*On peut regretter qu'un test hydraulique global de la formation du Trias inférieur n'ait pas été réalisé. Dans les conditions actuelles des essais, on peut objecter que l'on a pas nécessairement testé les horizons les plus perméables. Un tel test global, ne nécessitant qu'un seul obturateur, aurait par ailleurs sans doute été plus facile à réaliser que les tests sous double obturateurs dont la manœuvre des vannes a semble-t-il posé beaucoup de difficultés.*" (CNE 2010 p. 14, c'est moi qui met en gras).

Annexe 2

Température et gradient de température au milieu du Buntsandstein (= test n°1) 69°C et 3,07 °C/100 m

Le test n° 1 a été coupé en une série de séquences différentes qu'on verra mentionnées ci-dessous (SW, SI, mise en route de la pompe, RW1, RW2, RI..).

Pour la température, on dispose de deux suites de mesures : le dépouillement des données d'une sonde STS DL/N70 à mémoire situé dans l'intervalle de test sous la crépine, et celle d'une sonde TSSP sur le tubage au dessus de l'intervalle de test (les cristaux de quartz permettent la mesure de la température comme de la pression, et y sont même plus sensibles). La mesure de température de TSSP permet de voir les mouvements de fluide (baisse de température lorsqu'il y a injection, augmentation lorsque le fluide vient de la formation) et permet de comprendre les fluctuations plus faibles enregistrées dans l'intervalle de test. La température, à 66°C au temps zéro, augmente à 66,4 avec la séquence SW la formation produisant du fluide. La chute de température liée à la séquence SI (injection), visible sur la mesure TSSP n'est pas visible dans l'intervalle de test où on a une augmentation lente, régulière, de la température pendant les 22 heures qui séparent la séquence SW de celle de la mise en route de la pompe. On est alors à 66,9 °C. Les températures des deux systèmes de mesure de la température fluctuent ensuite sans cesse dans un sens ou dans l'autre en fonction des mouvements de fluide : chute au début de la "séquence RW1" ("retours" de pompe, + une injection) puis nette augmentation lorsque la pompe marche (RW2 surtout), baisse nette avec l'injection RI... Avant l'injection RI la température dans l'intervalle de test était montée à 67,3°C (SIS, fig. 3.1.3 p. 23).

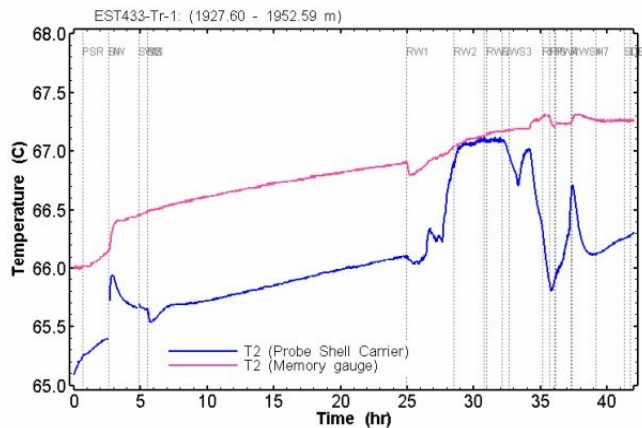


Fig. 3. Températures pendant le test n°1 : sonde à mémoire STS DL/N70 situé dans l'intervalle de test (ligne du haut) et sonde du segment TSSP au dessus de la valve d'obturation (ligne du bas).

Le transport de la chaleur dans les roches est un phénomène lent. La pratique la plus simple et commune en géothermie pour déterminer la température non dérangée de formation, T_i , est le diagramme de Horner. Il se trouve que cette technique ("récupération" de la température initiale) est commune à l'interprétation des tests hydrauliques pour déterminer la pression initiale de formation, p_i , les équations de diffusion pour la théorie d'écoulement de la chaleur et celle de l'écoulement des fluides en milieu poreux étant les mêmes à la nature physique des paramètres près. On reverra donc ce diagramme dans l'annexe 6.

Parce que la formation est refroidie par la boue pendant la phase de forage, le modèle de Horner est basé sur la durée de ce refroidissement, t_p et se sert du "temps de Horner" défini par : $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ [qui tend vers 1 pour un temps infini puisque t_p est constant et seul Δt varie \rightarrow le temps s'écoule donc de la droite vers la gauche dans ce diagramme]. Au bout d'un temps assez long, la solution semi-logarithmique de Horner (semi car seul le temps est mis en logarithme), produit une ligne droite :

$$T = m \log \left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \right) + T_i$$

ce qui donne la valeur voulue de T_i lorsque $(t_p + \Delta t)/\Delta t = 1$ [$\log 1 = 0$].

Calcul du temps pour le modèle de Horner				
Tab. 2. SIS tab. 3.1.1 p. 24 et fig. 3.1.3 p. 23 (heures)		modèle Horner (heures)	$\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right)$	T (°C)
foreuse au milieu de l'intervalle	- 132,3	$t_p = 74,3$		
fin de forage	- 58			
		$\Delta t :$		
fin des logs	- 35,3	22,7	4,27	
début insertion train de test	- 27,8	30,2	3,46	
démarrage test	0	58	2,28	66,00
SWS	5	63	2,18	66,47
intervalle isolé	15	73	2,02	66,73
intervalle isolé (avant RW1)	25	83	1,90	66,90

Les données postérieures à la mise en marche de la pompe ne sont pas utilisables (non compatibles avec ce modèle de conduction par contact, et trop complexes).

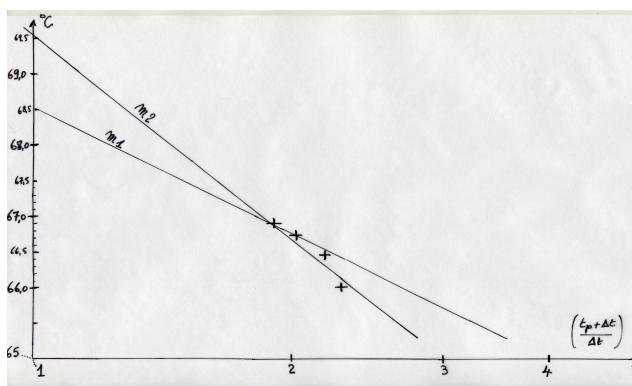


Fig. 4. Le diagramme de Horner de température; Buntsandstein, test n°1.

La ligne droite $m1$ (pente $5,83^\circ\text{C}/\text{cycle}$ logarithmique) tracée sur les dernières données, intervalle de test isolé, donne une température, T_i , de Horner de $68,5^\circ\text{C}$. On a tracé une autre ligne possible ($m2 = 9,47^\circ/\text{cycle}$; $T_i = 69,5^\circ\text{C}$). Le modèle de Horner ne donne la valeur correcte de T_i que lorsque le temps de récupération est assez long (en général pour fixer les idées, 120h soit 5 jours). Sinon, pour une raison théorique parce que c'est une formule d'approximation, elle donne une valeur inférieure à la valeur réelle de T_i . Roux et al. (1980) ont établi un procédé de correction. **La valeur corrigée** pour les dernières données, les deux points de la ligne $m1$ ci-dessus (avec, en utilisant la notation et unités de Roux et al 1980 non détaillés ici : $T^*_{ws} = 155,3^\circ\text{F}$; $m = 10,32^\circ\text{F}/\text{cycle}$; $k/c_p \rho r^2 = 0,4/\text{h}$; $t_{pD} = 29,72$ et $T_{DB} = 0,11$) **est 69°C** . Une telle estimation n'est que semi-quantitative mais ne devrait pas être sur-évaluée d'autant que la boue de forage "froide" a du pénétrer la formation ce qui n'est pas considéré dans le modèle thermique de contact. Le centre de l'intervalle du test n°1 étant aussi le centre du Buntsandstein, **cette valeur sera proche de la température moyenne de l'eau d'une exploitation géothermique de l'ensemble du Buntsandstein**. Le gradient géothermique entre la surface et le milieu du test n°1 doit donc être de l'ordre de (température de fond - température de surface) divisé par le nombre de centaines de mètres : $\{69 - 10\} \div 19,21 \approx 3,07^\circ\text{C}/100\text{m}$.

Annexe 3

L'impossibilité de traduire les données du test n°1 en une perméabilité chiffrée est signifiée dans presque chaque paragraphe du corps du rapport SIS

Ce test a été coupé en un certain nombre de séquences (PSR, SW, SI, RW1, etc.). Avec chacune des séquences on peut calculer la perméabilité par comparaison à des modèles mathématiques appropriés. Bien évidemment, toutes devraient aboutir à une même perméabilité puisque c'est du même grès qu'il s'agit.

"Les réponses en pressions du test n°1 Est 433 ont indiqué un comportement inconsistant, qui est très vraisemblablement associé avec le bouchage de l'outil ou de la crépine." (SIS p. 32). "... Test 1 qui a indiqué des changements de réponse entre les différentes séquences et durant les séquences individuelles. De tels phénomènes sont le plus probablement associés avec un changement graduel dans les propriétés de la pellicule due à l'obstruction continue de l'outil et de la crépine." (SIS p. 49). Le corps du rapport est truffé de ces constats.

Parallèlement on trouve successivement dans le rapport sur le test n°1 des valeurs de calculs de perméabilités :

4,8 10⁻¹⁰ m/s et 1,3 10⁻⁸ m/s pour la séquence PSR, valeurs dites pouvant aussi être appliquées à la séquence "RI seule", **1 10⁻⁴ m/s, 6,04 10⁻⁵ m/s et 1,04 10⁻⁵ m/s** pour la très courte séquence SW, puis **7,9 10⁻⁴** pour l'ensemble RW2 et RW3, **6,30 10⁻⁶ m/s** pour RW2 seul, **1 10⁻³ m/s** pour RW3 seul puis **5,3 10⁻⁸ m/s et 1,01 10⁻⁵ m/s** pour la micro-RWS3, **un intervalle de 6 à 7 ordres de grandeur.**

"... **l'inconsistance des différentes séquences de test...**" (SIS p. 34; c'est moi qui met en gras).

Encore les auteurs ont-ils soustrait au regard un certain nombre d'autres résultats (des séquences "disparues" ou des diagrammes dont les paramètres ne sont pas donnés).

Qualitativement, l'intervalle des grès vosgiens testé est bon aquifère, sa perméabilité doit être plutôt haute

La réactivité des réponses en pression indiquent sans le moindre doute possible qu'on a à faire à un bon aquifère (toutes les citations concernent le test 1, c'est moi qui met les passages en gras) :

□ "La réponse en pression qui s'équilibrait rapidement à une pression constante de 17,76 MPa (qui représente la pression de formation) en réponse à des des événements de retrait individuels est aussi une indication d'**une haute perméabilité de formation** qui permet aux événement transitoire de se dissiper rapidement." (SIS p. 32).

□ Remontée SW : "La pression de la sonde a indiqué un accroissement raide suivi de manière assez soudaine par un aplatissement relatif à une pression de 17,76 MPa." (SIS p. 26).

□ Descente "SI-SIS" : "La réponse en pression de la SIS a montré un **déclin abrupt** suivi d'un aplatissement rapide de la courbe à une pression minimale de 17,757 MPa." (SIS p. 20).

□ RW : "... la baisse de pression résultante du pompage limité a été moins de 0,3 MPa, ce qui **suggère une conductivité de formation relativement haute.**" (SIS p. 29). Là aussi il faut préciser qu'une part inconnue de la baisse de pression est due aux obstructions et n'est pas du tout le fait de la seule formation.

□ RIS : "**phase de rétablissement (RIS)**, avec la valve d'obturation fermée, a montré une chute **très rapide** à approximativement la pression de formation, 17,75 MPa." (SIS p. 21).

Or ces réponses ne sont pas celle de la formation mais celle d'un système qui est composé de la formation et d'un appareillage au trois quart bouché, obstrué du début jusqu'à la fin du test n°1 (début : PSR, même après 1,9h la pression refuse de revenir à la "pression de formation"; la fin : RW4 la pompe travaille presque dans le vide). La réponse de ce système obstrué est rapide, il est évident qu'elle sera bien plus prompte si le système est dégagé.

Annexe 4

Pas vraiment de surprise à l'arrivée du train de test en surface après les tests n°1, n°2 et n°3

Précisons que le test n°3, interrompu, n'a rien à voir avec le Buntsandstein. Il a été réalisé 100 m plus haut que le test n°2, donc à peu près 100m plus haut que le Buntsandstein, et seulement 40 m sous la partie tubée du forage de ce moment là. Entre 1785,6 à 1810 m-profondeur forage il était essentiellement sur des argiles rouges brique dans la moitié supérieure d'un ensemble indifférencié Muschelkalk inférieur et moyen. C'est probablement à cette argile rouge que réfère le commentaire de la photo en plus de la boue polymère de forage.



Photo 3 :

Enveloppe de boue polymère
et de sédiments autour de la
crépine dans l'intervalle de
test

(SIS appendix B p. 130)

Et le rapport précise (SIS p. 13) :

"l'outil de test a alors été retiré du forage et montrait une épaisse peau de boue autour de la crépine (Appendice B.3.2). De plus, la crépine était remplie de boue solide jusqu'à proximité de son sommet." (c'est moi qui met en gras)

Annexe 5

Test en boue de forage = tests ratés; tests à l'eau = tests réussis ?

En Suisse,

Trente six test hydrauliques ont été faits dans le forage de Schafisheim, profond de 2000m, par la Nagra ("Andra suisse") et interprétés par Colenco et Intera Inc. Vingt-cinq ont été réalisés à l'eau (eau déminéralisée ou eau claire ou eau de formation) et 11 avec la boue de forage. Tous les tests en boue, 100%, et que ceux-là, ont montré des traces d'obstruction de l'outil (Moe et al. 1990 p. 8; la configuration des capteurs de pression P1, P2 et P3 à Schafisheim est la même qu'au EST433; la plus importante, celle sur laquelle sont déterminées les perméabilités est P2) :

"... réalisés dans un puits de forage rempli de boue... Ce facteur a créé des problèmes additionnels pour accomplir les tests avec succès... :

1. La "pellicule" de faible perméabilité sur les murs du forage due à une agrégation de boue;

2. L'obstruction de l'outil. Dans la configuration de l'outil, le petit diamètre du tubage des ports de mesure... était facilement obstrué de boue. Pour tous les drillstems tests*, le port de P1 a été obstrué et des réponses anormales de pression P2 suggèrent que le port d'entrée P2 était partiellement obstrué."

"Ces problèmes d'outils sont principalement liés à l'obstruction des ports de pression." (Moe et al. 1990, p. 35).

De plus, en modélisation "... la présence et les caractéristiques (i.e. l'épaisseur et la conductivité hydraulique) d'une pellicule autour d'un puits de forage est très difficile à établir." (Moe et al. 1990, p. 31).

Dans les analyses de ces tests à obstruction, même dans les meilleurs des cas, les séquences ne donnent pas les mêmes paramètres de formation suivant leur type (Moe et al. 1990, p. A5-A6) alors qu'il s'agit du même intervalle de roche. Ailleurs on a "une réponse curieuse" comme une meilleure concordance de modélisation avec une pellicule plus perméable que la formation alors qu'autant qu'on peut en juger, la réalité physique doit être l'inverse (Moe et al. 1990, p. 36).

"Alternativement cela peut-être interprété comme un problème d'outil. Pour les autres tests dans le forage en boue, l'obstruction du port d'entrée du capteur de pression est apparent (e.g. 1042.8D). Dans cette séquence de test, il est possible que la récupération de pression plus graduelle dans le drillstem 1* **n'est qu'une mesure de la conductivité hydraulique de l'outil de test.**" (Moe et al 1990, p. A17, c'est moi qui met en gras).

Les auteurs, qui analysent ces tests faits par une autre équipe auparavant donnent en général pour chaque test deux valeurs de paramètres possibles qui encadrent, mal, les données et ajoutent presque invariablement : "... **ne devraient pas être considérés comme représentatifs.**" (Moe et al 1990, appendices, tests réalisés en boue, c'est moi qui met en gras).

et en France....

□ Les tests 1994-95 dans les deux premiers forages HTM102 et MSE101 de Bure n'ont pas rencontré les problèmes des tests au Trias du EST433. Les forages et carottages avaient aussi été réalisés "en boue". Cependant une fois le forage terminé et avant le début des tests :

"le puits est alors mis en eau pour la réalisation des tests hydrogéologiques si la stabilité des terrains l'autorise"
(Géoservices 1995, p. 5, c'est moi qui met en gras)

Ainsi, les tests dans les niveaux perméables (Kimmeridgien-oxfordien au dessus du callovo-oxfordien et Bathonien du Dogger en dessous) ont été fait d'abord en "trou ouvert" et à l'eau.

La formation callovo-oxfordienne présentant des risques de déformation dus à une mauvaise tenue mécanique dans sa partie centrale est gardée "en boue". Mais, même dans le Callovo-oxfordien argileux :

"Les tests 6, 7, 8, et 9 ont été réalisés puits en boue, mais l'intervalle de test et le tubage 2"7/8 ont été mis en eau avant le lancement du test. (... afin,) d'éviter des problèmes d'équipement qui auraient pu avoir lieu avec un intervalle en boue (mauvaise fermeture de la vanne d'obturation par exemple).

(Géoservices, Cie de Schlumberger, 1995, p. 71, c'est moi qui ait mis en gras le passage).

Il n'y a pas eu l'ombre d'une obstruction dans ces tests et la plupart des interprétations mathématiques ont été compatibles avec l'absence d'une pellicule ou une petite de rien du tout.

*drillstem tests : un peu l'équivalent de ce qui a été fait au forage EST433 au Trias, mais avec l'appareillage habituel des forages de reconnaissance pétrolier. Le conduit est celui qui a servi au forage et on met un système d'obturateur(s) au bout.

Annexe 6

C'est uniquement parce que quelqu'un a eu l'idée de faire les tests en boue qu'on a eu "...un rabattement de 30 m" pour 5 m³/h...

Dans l'annexe 2, on a utilisé un diagramme dit de Horner. Comme les solutions mathématiques pour l'écoulement de la chaleur et pour l'écoulement d'un fluide en milieu poreux sont les mêmes à la nature physique des paramètres près, on retrouve le diagramme de Horner pour le calcul de perméabilité et celui de la pression initiale de formation.

Les auteurs du rapport SIS ont utilisé, entre autres, ce modèle pour calculer la perméabilité des grès à Voltzia du test n°2. C'est celui que la CNE (2010 p. 14) décrit par la phrase : "Au final, il fournit un résultat basé sur une méthode très classique de la remontée du niveau de l'eau en fin d'essai, qui a le mérite de la simplicité....".

"remontée du niveau d'eau" = remontée du rabattement une fois la pompe arrêtée. Comme dans l'application pour la température, ce modèle étudie le retour (de rabattement ou de température) en se basant sur la longueur du refroidissement ou du pompage qui a précédé donc, pompage-rabattement et "remontée du niveau de l'eau" sont liés

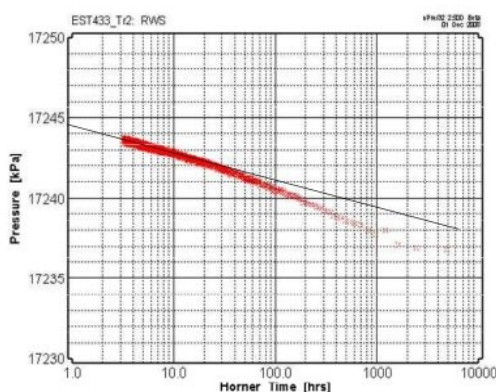


Diagramme de Horner pour la séquence RWS du test n°2 ; SIS fig. 3.2.16 p. 82 (on notera que le [hrs] en abscisse qu'ont inscrit les rédacteurs n'a pas lieu d'être, le temps de Horner étant sans dimension)

Évidemment, les calculs paraissent compliqués quand on n'est pas habitué, mais ils ne le sont pas tant que ça, SIS (p. 81) :

"Pour le test n°2, le cumul d'écoulement de l'intervalle pendant RW a été de 34 090 litres. Le dernier débit mesuré avant le début de RWS était de 83,6 l/mn (5 018 l/h), ce qui donne une valeur pour $t_p = 6,79$ h."

[on calcule : $83,6 \text{ l/mn} = 1,3933 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$; $34,09 \div 1,3933 \cdot 10^{-3} = 24466,5 \text{ sec} = 6,796 \text{ h}$ en accord avec eux]

"La pente [m] sur un cycle logarithmique est 1,6 kPa... ...La transmissivité de formation selon l'équation ci-dessus [$m = 0,183 \text{ q/T}$] est donc calculée comme $T = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$. La conductivité correspondante de formation est donc $K_{form} = 6,26 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$."

Et, de manière identique à ce qu'on a fait en annexe 2 pour la température : "L'extrapolation de la portion de ligne droite sur l'axe de gauche au temps d'Horner de 1 indique la pression de formation..." (SIS p. 81).

[La formule pour calculer la transmissivité en séparant les propriétés du fluide est : $T_{int} = \frac{2,3}{4\pi} \frac{q\mu}{m}$ On peut donc refaire le calcul :

En prenant la même pente que les auteurs $m = 1,6 \cdot 10^3 \text{ Pa/1}$, débit $q = 1,3933 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$, et pour une eau très salée à 67°C une viscosité $\mu \approx 0,65 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ (Earlougher 1977 p. 241) et une masse volumique $\rho \sim 1067 \text{ kg/m}^3$, on obtient : $T_{intrinsèque} \approx 1,036 \cdot 10^{-10} \text{ m}^2\cdot\text{m}$; $k_{intrinsèque} \approx 4,144 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$ ($\approx 4,14$ darcy) et, comme $K = k\rho g/\mu$, on calcule aussi $K \approx 6,67 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$; à peu de chose près le résultat du rapport SIS]

On notera que cette perméabilité, ~ 4 darcies, est comparable à celle du Dogger de la région parisienne exploitée depuis 30-40 ans pour la géothermie : "Peut-être la caractéristique la plus importante pour l'analyse d'écoulements est que la perméabilité intrinsèque moyenne des couches (2-3 Darcies) obtenues des tests...", couches perméables du Dogger dont l'épaisseur cumulée n'est que de 15 à 25m (Menjoz et al. 1993, p. 161; jurassique de cet article : il s'agit du Dogger). Comme c'est la transmissivité qui compte pour le débit, et qu'elle est égale à la perméabilité multipliée par la hauteur perméable : 120m pour le Buntsandstein de Bure, à comparer à < 25 m pour le Dogger exploité, chacun peut réfléchir sur ces chiffres absolument étonnants...

Pellicule :

Le rapport SIS a omis la fin du calcul. Via la ligne droite (sa pente m), le diagramme de Horner donne une perméabilité non affectée par le facteur de pellicule, s_{oel} , mais le modèle de Horner permet bien de calculer ce dernier avec la formule suivante (Earlougher 1977, p. 23, p. 46, p. 185) :

$$s_{pel} = 1,15129 \left[\frac{p_{1hr} - p(\Delta t=0)}{m} - \log \left(\frac{k}{n\mu c_t r^2} \right) - 0,351378 \right]$$

$p(\Delta t=0)$ est la pression de début de la phase RWS, p_{1hr} est la pression au bout d'une heure devant être lue sur la droite de pente m au temps 1heure. m est la pente de la droite (en Pa/1), k la perméabilité intrinsèque (en m²), n la porosité de formation (sans unité), μ la viscosité du fluide (en Pa·s), c_t la compressibilité totale de la formation (en Pa⁻¹) et r le rayon du forage (en m).

ou encore sous la forme des hydrogéologues (par ex. Géoservices 1995, p. 155) :

$$s_{pel} = \frac{2\pi T}{q\rho g} (p_{1h} - p_{(\Delta t=0)}) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{2,25 T}{S r_{for}^2} \right)$$

où q est le débit constant (m^3/s), T la transmissivité (non pas intrinsèque) en m^2/s , ρ la densité du fluide (en kg/m^3), g l'accélération de la pesanteur ($\sim 9,807 m/s^2$), S le coefficient d'emmagasinement (m/m). On peut substituer ($K e$) à T et (S_e) à S .

On fait ce calcul en utilisant les valeurs du rapport SIS :

$m = 1,6 \cdot 10^3 Pa/1$; $p(\Delta t=0) = 16,9463 \cdot 10^6$ de SIS p. 117; $K = 6,26 \cdot 10^{-5} m/s$ ou $T = 1,56 \cdot 10^{-3} m^2/s$; $q = 83,6 l/mn = 1,39 m^3/sec$; $n = 0,15$ de SIS p. 25; rayon de forage : 0,076 m, épaisseur $e = 25m$

Le temps de Horner $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ à 1h est = 7,796; et la $p(1heure)$ est lue sur la fig = 17,243 MPa

Calcul avec la première équation ci-dessus :

eau très salée à 67°C : μ viscosité = $0,65 \cdot 10^{-3} Pa \cdot sec$ et ρ densité = $1067 kg/m^3$ d'où, en prenant la perméabilité des auteurs de $6,26 \cdot 10^{-5} m/s$ $k = K\mu/\rho g = 3,89 \cdot 10^{-12} m^2$; par définition : $c_i = c_{pr} + \beta$ et on connaît $c_{pr} = 3 \cdot 10^{-10} Pa^{-1}$ de SIS p. 25 et $\beta = 4 \cdot 10^{-10} Pa^{-1}$ (eau salée vers 15-20 MPa et vers 60-70°C; Earlougher 1977 fig. D.18 p. 231);

→ le calcul donne : $s_{pel} \approx 208$.

Calcul avec la deuxième équation ci-dessus : $S = epgnc_i = 2,56 \cdot 10^{-5} m/m$; → le calcul donne $s_{pel} \approx 191$.

Donc les auteurs auraient pu et du préciser avec la perméabilité qu'ils donnent que le facteur de pellicule, s_{pel} , est d'environ 200. Un facteur de pellicule de 200 représente un obstacle très important, comme on va le voir.

Par définition, on a (on pourrait montrer que cela provient d'une simple application de la loi de Darcy) (Earlougher 1977, p. 8) :

$$\Delta p_{pel} = \frac{q\mu}{2\pi k e} s_{pel} \quad \text{ou} \quad \Delta p_{pel} = \frac{q\rho g}{2\pi K e} s_{pel}$$

où Δp_{pel} est un rabattement supplémentaire du à la pellicule de boue.

Avec les paramètres déterminés avec la solution de Horner pour la dernière séquence, RWS, du test 2,

$q=83,6l/mn=1,39 m^3/s$; $\mu = 0,65 Pa \cdot s$; $K=6,26 \cdot 10^{-5} m/s$ ou $k=3,89 \cdot 10^{-12} m^2$; $\rho=1067 kg/m^3$; $s_{pel}=200$

on calcule : $\Delta p_{pel} \sim 0,296 MPa$ ($MPa = 10^6 Pa$).

Cela correspond à un rabattement $(\Delta h = \Delta p/(\rho g)) = 0,296 \cdot 10^6 / (1000 \times 9,81) \approx$ environ 30 m en "équivalent eau fraîche", du à la boue uniquement. 30m total - 30m du à la boue, il ne reste pas grand chose. Tirer $5 m^3/h$ de ce Buntsandstein si non couvert de boue (comme il devrait l'être en exploitation géothermique) provoquerait un rabattement apparemment du genre de quelques décimètres.

Bibliographie

- ◆ ANDRA 2009, "Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 - Centre Meuse/Haute Marne", indice B, 21 juillet, Rapport D.RP.ALS.08.1356, 128p. [obtenu via le CLIS de Bure]
- ◆ ANDRA - GEO-RS - GEOTER, non daté, "Synthèse des logs réalisés sur la plate-forme C, Forage Est 431, Est 432 et Est 433 - Log composite au 1/500^{ème}", document Andra D RP 0GRS08 0007 LOG.pdf [obtenu via le CLIS de Bure]
- ◆ CNE, juin 2010, "Rapport d'évaluation n°4", tome 2 : Annexes scientifiques et techniques, Annexe 3 : "Évaluation du potentiel géothermique au Trias".
- ◆ Drouot, L. 2010, "CLIS de Bure - Programme de reconnaissance ANDRA 2007-08 - Résultats du forage prolongé au Trias et interprétations ANDRA - Analyse et évaluation : note de synthèse", Toillies Châtenay-Malabry, 12/01/10, 5p.
- ◆ Earlougher, R. C. Jr. 1977, "Advances in well test analysis", Monograph vol. 5, Soc. Petrol. Eng. of AIME, 264p. [peut être téléchargé sur internet en ebook]
- ◆ GEO-RS 2008, "Lot G02 - Suivi des forages de la zone de transposition 2007-2008 - Forage EST433, plate-forme C; Rapport d'Opération", 01 septembre, Rapport Andra DRP 0GRS 08 0007, 132p. [obtenu via le CLIS de Bure]
- ◆ Géoservices 1995, "Rapport final : tests hydrogéologiques sur le site de forage d'exploration MSE 101 de la Meuse", 159p, août 1995, rapport Andra B RP 1GSV 95 - 024/A. [obtenu via le CLIS de Bure]
- ◆ Lemale, J. - Jaudin, F. 1998, "La géothermie, une énergie d'avenir, «une réalité en Ile-de-France»", (coord. : F. Brenière; contrib. : Y. Benderitter, P. Laplaige, R. Ferrandes), ARENE édit., Agence Régionale de l'Environnement et des Nouvelles Énergies Ile-de-France, ADEME, BRGM, 117p.
- ◆ Menjoz, A. - Lambert, M. - Matray, J.M. 1993, "Flow of formation water in the Jurassic of the Paris Basin and its effects", Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 344: 159-69.
- ◆ Moe, H. (Colenco) - McNeish, J.A. - McCord, J.P. - Andrews, R.W. (Intera Inc.) 1990, "Interpretation of hydraulic testing at the Schafisheim borehole - Technical Report 89-09", Nagra NTB 89-09, 85p. + Appendices 102p. [téléchargeable sur internet]
- ◆ Roux, B. - Sanyal, S.K. - Brown, S. 1980, "An improved approach to estimating true reservoir temperature from transient temperature data", Society of Petroleum Engineers, California Regional Meeting, 9-11 april, Los Angeles, SPE paper n°8888-MS: 373-84. [disponible sur internet]
- ◆ "SIS" : Saunier & Associés - Solexperts - Intera, 2009, "Lot M23, Tests hydrogéologiques entre obturateurs - Rapport d'opération Est 433 Trias", émission initiale 16/12/08, émission finale après prise en compte des remarques ANDRA : 22/01/09, 150p, texte en anglais, D.RP.OSAU.08.001 [obtenu via le CLIS de Bure]