Pièce annexe 3
Éléments techniques

Résumé :

Les développements qui vont suivre sont purement techniques. Les modèles d'usage sont présentés, puis sont appliqués aux données de la séquence nommée RWS, seule séquence exploitable des tests. Ce sont des outils mathématiques très spécifiques aux forages.

Ces modélisations montrent que :

- A partir des données de l'Andra et de ses opérateurs, nous déduisons un débit théorique de tout l'aquifère Trias situé entre 190 et 380 m^3/h contre 5 m^3/h selon l'Andra.
- Exprimée dans une autre unité, la perméabilité est de l'ordre de 3 darcies ; le calcul le plus conforme donne 3,6 darcies et une transmissivité pour le seul intervalle du test de 91 darcy-mètre, ce qui est déjà supérieur aux exploitations géothermiques parisiennes.
- Le rabattement effectif dans les grès pour le débit appliqué de 5 m^3/h n'a été qu'une toute petite fraction du rabattement annoncé d'une trentaine de mètres : de l'ordre de quelques décimètres (modèle de Horner).

Le rabattement de 30 mètres est la conséquence de l'obstruction à l'extérieur et à l'intérieur de la crépine par un épais manteau imperméable de boue (facteur de pellicule). Ce rabattement important est l'équivalent mathématique de la figure 5 de la synthèse générale (qui montre la crépine engluée de boue).

- Non seulement les tests ont été réalisés dans un forage rempli de boue, mais l'Andra a en plus fait injecter des mètres cubes de cette boue à l'intérieur même du train de test. Les valeurs erratiques de la mesure du rabattement, qui oscille entre 22 et 47 mètres, sont dés lors explicables.
- Les simulations numériques employées ne peuvent traiter une telle instabilité de données. Le calculateur numérique utilisé lie en permanence la variable pression/rabattement à la variable débit, mais comme la première est chaotique et physiquement incohérente à cause de l'obstruction par la boue,

les données rentrées en logiciel sont "choisies", arbitrairement en toute subjectivité. C'est le cas de la solution "*nominale*", seule reprise par la Synthèse Andra 2009. A contrario le modèle de Horner, qui ne présente pas cet arbitraire, reste le plus adapté pour ce type de données.

I. La partie profonde du forage EST433....1
II. Calcul de débit....2
a) Équation de l'écoulement radial....2
b) Application pour le Trias du EST433....3
III. Les perméabilité/transmissivité en darcies (D) et darcy-mètres (D·m)....4
IV. Le modèle de Horner....6
a) Présentation....6
b) Test au Trias n°2, premier calcul approximatif de la perméabilité....7
c) Dans les règles de l'art : en tenant compte du débit variable....8
d) Le facteur de pellicule : quantifier l'effet majeur du manteau de boue....10
V. Un "rabattement de 30 m" ? après... injection de boue !....13
VI. Simulations numériques vs modèle de Horner....16

I. La partie profonde du forage EST433

Le forage EST 433 a commencé en mars 2008, mais a été arrêté à 770 m pour des tests dans le Callovo-oxfordien. Il a repris en mai 2008 jusqu'à une profondeur de 1740 m et a été tubé sur tout cet intervalle. Il a ensuite repris le 30 mai 2008 pour être définitivement arrêté le 5 juin 2008, à la profondeur verticale de 1980 m. Toute cette dernière partie a été laissée "trou nu", avec un diamètre 15,2 cm (6" = 6 inches ; 1 inch = 2,54 cm). Le forage a été arrêté dans le Trias inférieur (Buntsandstein), dans un faciès dit "conglomérat de base" de cette formation dont la base n'a pas été atteinte (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 36*).

A partir d'une profondeur de 900m, le forage a dévié de la verticale jusqu'à atteindre un angle ~ 19°/verticale à la "profondeur forage" de 1750m. Les profondeurs verticales/sol (True Vertical Depth : TVD) sont donc inférieures aux "profondeurs forages" (voir documents 6 et 66 : *SIS table 1.1, p. 11* ; *Andra et al. non daté*) :

Tableau 1. Forage EST433. Surface du sol : 358,28 m au dessus niveau mer			
	"Profondeur - forage"/sol (m)	**Profondeur verticale/sol** (m) (TVD)	Profondeur /niveau mer (m) (= côte NGF)
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

II. Calcul de débit

Ce paragraphe calcule le débit théorique de tout l'aquifère Trias inférieur à partir des valeurs de conductivité et de rabattement donnés en 2009 par l'Andra ou ses opérateurs.

a) Équation de l'écoulement radial

L'écoulement permanent radial le plus simple au niveau d'un puits est donné par la formule de Dupuit (établie en 1863), qui est la forme radiale de la loi de Darcy (par exemple, voir document 67 : *Cassan 1980, p. 165*, et tous les manuels d'hydrogéologie) :

$$q = 2\pi \mathrm{K} e \frac{(h_i - h_f)}{\ln(\frac{R}{r_f})}$$ (équation 1) où q est le débit en m^3/s

Et,

- $(h_i - h_f)$ n'est autre que le rabattement H de notre synthèse, c'est à dire la différence de hauteur de l'eau dans deux petits tubes imaginaires (qui équivaut à une différence de pression) l'un, loin du forage, l'autre, dans le forage;

- Ke est la transmissivité T de notre synthèse. K est la perméabilité (nommée aussi conductivité), et *e* l'épaisseur de la roche perméable. La Transmissivité n'est autre que : perméabilité × épaisseur (T=Ke).

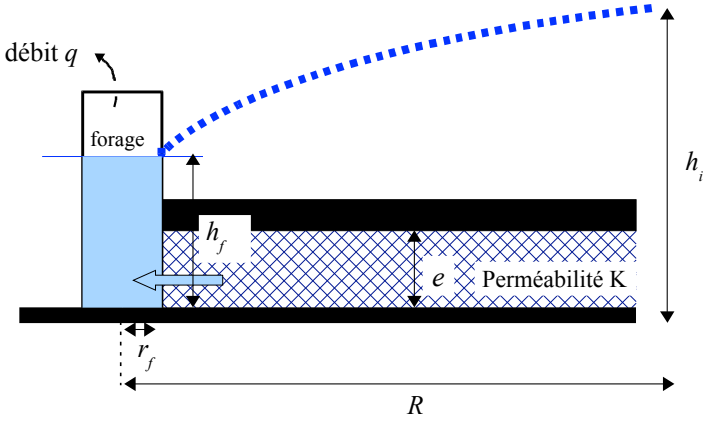


Figure P3-1

On retrouve l'équation de la Synthèse :

$$\text{débit} = \text{transmissivité} \times \text{rabattement} \times \frac{2\pi}{\ln(\frac{R}{r_f})}$$

avec le dernier terme qui est le facteur géométrique ($\pi = 3{,}14...$).

Deux choses interviennent dans ce facteur : r_f est le rayon du forage et R est le "rayon d'action" qui est la distance à laquelle la pression dans l'aquifère (l'un de nos petits tubes imaginaires) n'est pas affectée par le pompage au forage, déterminée expérimentalement.
Cependant, pour une exploitation en doublet (un forage pour tirer et un forage pour ré-injecter), la distance entre les deux forages, D, se substitue à R dans l'équation 1 (voir document 68 : *Gringarten 1978, éq. 13* ; voir document 69 : *Menjoz et al. 1996, p. 129*). Comme c'est le logarithme du rapport (D/r_f) qui intervient, l'effet des variations de ce facteur géométrique est comparativement petit.
Le terme régime permanent signifie que l'aquifère est ré-alimenté au fur et à mesure du prélèvement de l'eau. C'est bien le cas des exploitations géothermiques en doublet, puisque l'eau/saumure est intégralement réinjectée à la distance D.

b) Application pour le Trias du EST433

Ci-dessous, on applique à l'équation 1 les chiffres de l'Andra et de ses opérateurs :

- Les opérateurs SIS (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*) ont calculé une perméabilité/transmissivité avec le modèle classique de Horner :

"*Pour le test n°2... ...La conductivité correspondante de formation est donc* $K_{form} = 6{,}26\ 10^{-5}$ *m/s.*"

et on utilise le "*rabattement de 30 m*" de l'Andra (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*).

- Pour le facteur géométrique, on prend un diamètre de forage intermédiaire de 7 pouces (15,94 cm de diamètre intérieur pour un casing API standard ; le diamètre de forages géothermiques au niveau de l'aquifère comme Villeneuve-St-Georges est de 8"1/2 soit 21,6 cm) et une distance entre les deux forages D = 1400 m.

- Épaisseur :
On utilise "*une passée de grès de -1500 à -1544 m NGF... montrant de 10 à 15 % d'eau libre d'après le CMR*" de l'Andra (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*), qui est celle dans laquelle a été réalisé le test n° 2, soit e = 44 m. La CMR (Combinable Magnetic Resonance) est la résonance magnétique qui est la technique connue comme IRM en médecine. Elle est basée sur la réponse des atomes d'hydrogène qui dépend de la taille des pores de la roche. On trouve l'hydrogène dans la molécule d'eau et celle des hydrocarbures et des minéraux hydratés comme le gypse. L'intervalle de réponses physiques qui correspondent aux pores assez larges est sélectionné et est appelé "eau libre", si on pense qu'il s'agit surtout d'eau.

Avec ces valeurs, on calcule dans l'équation 1 :

$$q = 2\pi \times 6{,}26\ 10^{-5} \times 44\ \frac{30}{\ln\left(\frac{1400}{0{,}0797}\right)} \approx 0{,}053\, m^3/s \approx \mathbf{190\, m^3/h}$$

Une première remarque est qu'à géométrie et rabattement équivalents, le forage "*moyen*" du Dogger exploité depuis une trentaine d'années en région parisienne (Ke = T = 10^{-3} m^2/s ; voir document 12 : *CNE 2010, annexes, p. 14*) ne produirait que 69 m^3/h (pour les valeurs maximales qui sont celles mentionnées pour le Dogger, le rabattement est bien plus élevé, supérieur à 100 m pour beaucoup).

Mais ces 44 m ne représentent qu'une partie du Trias inférieur. Selon la diagraphie CMR, elle devrait être la plus perméable, mais ce n'est pas garanti :

"*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.*" (voir document 12 : *CNE 2010, annexes, p. 14*)

Toujours selon cette diagraphie CMR, l'eau dite "libre" est présente presque sans discontinuer sur une hauteur de 137 m de 1842 m à 1979 m TVD (tout le Trias inférieur recoupé + base Trias moyen ; voir document 5 : *Andra 2009, fig. 4-54, p. 106* ; voir document 66 : *Andra et al. non daté*). Cela inclut une zone épaisse de 35 m (1913 m à 1950 m TVD) qui a une quantité d'eau "libre"-diagraphie assez importante (~ les 2/3 de la précédente). De plus, la base du Trias n'a pas été atteinte. Il n'est pas exclu, et même assez probable, que la transmissivité du tout soit le double de celle de ces 44 m. Il faut alors doubler le chiffre ci-dessus pour une exploitation géothermique de l'ensemble, avec un débit calculé qui approche les **380 m^3/h** pour un rabattement de 30 m).

III. Les perméabilité/transmissivité en darcies (D) et darcy-mètres (D·m)

La perméabilité est une mesure de la facilité de l'eau à voyager dans la roche. Cette notion a été crée en 1853 par le chevalier Henri Darcy qui mesurait l'écoulement de l'eau dans des sables de fontaines à Dijon. Comme ce qui permet de la mesurer est un débit (m^3/s), et qu'on le rapporte à (i.e. on le divise par) la surface (m^2) traversée par cette eau (exemple : diamètre d'un tuyau, épaisseur de la couche...), l'unité communément employée pour mesurer ce paramètre est le mètre par seconde (m/s). On l'appelle "perméabilité" (des hydrogéologues) ou bien "conductivité hydraulique". C'est l'unité employée par l'Andra dans sa synthèse de 2009. Avec ses opérateurs, l'Agence semble-t-il, ignore que la perméabilité en m/s s'applique implicitement à de l'eau pure dans des conditions de température ambiante à la surface de la Terre. Dans le cas du forage EST433, la viscosité et la densité de l'eau saumâtre à température élevée nécessite une définition mathématique plus élaborée de ce paramètre.

Mais il faut noter qu'il est implicite, dans cette définition initiale de Darcy, qu'il s'agit d'eau à la température proche de la surface donc avec une certaine viscosité et densité (que dans la pratique on considère comme constante).

En effet dans "facilité d'un fluide à voyager dans la roche", il y a bien deux paramètres :

- la roche : cela va dépendre de la taille des pores (les vides, les "passages"), leur forme, leur connectivité, etc.;

- le fluide dont la viscosité et la densité dépendent de sa nature (eau pure, eau saumâtre, pétrole...) et des conditions de température du milieu.

Il a donc fallu définir une perméabilité qui ne dépend que des caractéristiques de la roche (forme des pores etc.). Et les propriétés du fluide sont définies séparément. Cette perméabilité s'appelle la *perméabilité*

intrinsèque et on la note *k*.

La correspondance entre la perméabilité des hydrogéologues (notée *K*) et la perméabilité intrinsèque *k*, est :

$$k = \frac{K\,\mu}{\rho\,g} \qquad \text{et donc} \qquad K = \frac{k\,\rho\,g}{\mu} \qquad \text{(équation 2)}$$

où μ est la viscosité du fluide (unité : Pa·s), ρ la masse volumique du fluide (unité : kg/m^3) et g est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s^2).

Si l'on fait le bilan des unités dans l'équation 2, on voit que celle de *k* est en mètres carrés (m^2), qui est l'unité légale actuelle. Avec le système d'unité que l'on employait dans les années 1950, avait été définie une autre unité pour la perméabilité intrinsèque : le darcy (= la perméabilité qui conduit à une décharge de 1cm/s à travers une section de 1 cm^2 pour un fluide avec une viscosité de 1centipoise sous un gradient hydraulique qui fait le terme *ρgdh/dl* égal à 1 atm/cm). Dans la pratique, le darcy ou le millidarcy (mD) est toujours utilisé de nos jours. La correspondance entre l'ancienne et la nouvelle unité est :

$$1 \text{ darcy} = 0{,}987\ 10^{-12}\ \text{m}^2\text{, souvent pris comme 1D} \sim 1\ 10^{-12}\ \text{m}^2$$

La transmissivité reste définie comme la perméabilité × l'épaisseur *e*. On a donc une transmissivité intrinsèque obtenue avec la perméabilité intrinsèque :

$$t_{int} = k\,e \qquad \text{(équation 3)}$$

qui est d'unité légale en m^2·m, mais qui dans la pratique est encore exprimée en Darcy-mètres (D·m).

La Synthèse Andra 2009 et ses opérateurs SIS donnent la perméabilité dans l'unité des hydrogéologues, c'est à dire en m/s, comme s'il s'agissait d'eau douce de température ordinaire. Et de fait, les opérateurs ont utilisé dans les calculs pour la saumure chaude une densité et une viscosité d'eau douce à température ordinaire (respectivement de 1000 kg/m^3 et 1 10^{-3} Pa·s ; voir document 6 : *SIS 2009, p. 25 et p. 64*), ce qui est surprenant.

L'Andra (voir document 62 : *Andra 2008, diapositive 22*) avait d'abord indiqué que la salinité était de 120 g/l. Puis, en 2009 (voir document 5 : *Andra 2009, p. 108*), l'Andra a présenté une valeur de "*de 179 g/l*", soit 59 g/l de plus (nous ne connaissons toujours pas l'origine et la justification exacte de ces chiffres).
D'après Earlougher (voir document 70 : *Earlougher 1977, fig. D.35 p. 241*), la viscosité pour une saumure à 16% (ce qui correspond à 179g/l à 25°C) vers 69-67°C et à une pression de 17 MPa (celle au niveau des tests du forage EST433) est d'environ 0,6 10^{-3} Pa·s. Et selon les tables, une saumure à 16% (= 3,3 molal [molalité : mole de soluté par kg d'eau; certaines tables utilisent cette unité]) vers 17 MPa et 67°C a une densité de 1100,5 kg/m^3 :

$$\mu = 0{,}6\ 10^{-3}\ \text{Pa·s}$$
$$\rho = 1100{,}5\ \text{kg/m}^3$$

Ce sont ces valeurs que nous utilisons pour notre part.
Pour un fluide à une telle profondeur, le paramètre correct à utiliser est la perméabilité intrinsèque.
En attendant une détermination directe de la perméabilité intrinsèque conforme aux règles de l'Art que l'on va voir ci-dessous avec le modèle de Horner, une traduction en l'état peut être faite des perméabilités données par l'Andra en 2009 et les opérateurs SIS en perméabilités intrinsèques pour la seule séquence de test interprétable :

- Perméabilité "nominale" donnée dans le résumé : 4,43 10^{-5} m/s (voir document 6 : *SIS 2009, tableau 1 p. 8*) :

$$k = \frac{4{,}43\ 10^{-5} \times 0{,}6\ 10^{-3}}{1100{,}5 \times 9{,}81} \approx 2{,}46\ 10^{-12}\,\text{m}^2 \approx 2{,}49\ \text{D (darcies)}$$

- Perméabilité avec le modèle de Horner par les opérateurs : 6,26 10^{-5} m/s (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*) donne :

$$k \approx 3{,}48\ 10^{-12}\ \text{m}^2 \approx 3{,}5\ \text{D}$$

Et la transmissivité intrinsèque correspondante, pour les 25 m de ce test, dans le même ordre :

- Transmissivité "nominale" donnée dans le résumé : 1,1 10^{-3} m^2/s (voir document 6 : *SIS 2009, tableau 1, p. 8* ; voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*) donne :

$$t_{\text{int}} = 2{,}49 \times 25 = 62{,}2\ \text{D·m (darcy-mètres)}$$

- Transmissivité avec le modèle de Horner par les opérateurs, 1,56 10^{-3} m^2/s (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*) donne :

$$t_{\text{int}} = 3{,}5 \times 25 = 87{,}5\ \text{D·m}$$

IV. Le modèle de Horner

a) Présentation

Le modèle/diagramme de Horner, grand classique dans l'industrie pétrolière mais aussi en géothermie, en dépit de sa simplicité, reste une méthode de référence. Il va ici être question de pression. Comme exprimé dans la synthèse générale, la pression et le rabattement sont équivalents à un facteur près (le facteur ρg, densité fois accélération de la gravité). [nota : dans le Système International, l'unité de pression est le pascal, Pa, qui correspond à une force de 1 newton par mètre carré ; et comme 1N = 1 kg·m/s^2, le Pa = kg/(m·s^2)]

Le modèle de Horner traite de la phase de récupération, c'est-à-dire qu'il s'occupe de l'évolution de la pression dans un aquifère dans lequel du fluide est pompé et, soudainement, la pompe est arrêtée et la valve d'obturation fermée en même temps. On peut comprendre que, lorsqu'on pompe dans un aquifère, sa pression interne diminue. Par conséquent, lorsque la pompe est arrêtée, sa pression va commencer à remonter. C'est ce qu'on appelle "la récupération". L'aquifère va récupérer petit à petit sa pression d'origine.
Comme la pression dans l'aquifère au moment où la pompe est stoppée dépend du temps de pompage et du débit, le modèle de Horner tient compte de cette durée et de ce débit passé. Mais, il modélise l'évolution de la pression à partir du moment où la pompe a été arrêtée (= temps zéro, $\Delta t = 0$).

Si ce modèle est simple d'usage, c'est aussi parce qu'il a été obtenu au moyen d'une simplification. Il résulte de cette simplification que ce modèle n'est jamais valable sur les données de début des tests hydrauliques. Certains phénomènes physiques, négligés avec justification dans le modèle de Horner, ne peuvent pas l'être en début de tests. Ces phénomènes de début de test seront discutés plus bas avec le facteur de pellicule (d).

Pour savoir à partir de quel moment, dans un test hydraulique, le modèle de Horner peut être appliqué, on emploie un autre diagramme (dit diagramme de diagnostique log-log). Une suite de formes doit être reconnue sur ce diagramme "de diagnostique", dont un aplatissement de la courbe de données (que l'on peut voir plus loin : voir figure P3-7). Dans le cas présent, le contrôleur Egis-géotechnique (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 8*) indique que ce critère est vérifié, et que l'on peut donc employer valablement le modèle de Horner. Ajoutons que c'est l'unique fois, dans ces tests au Trias, que le critère est apparemment bon.

La mesure du temps est faite par le *temps de Horner*, t_H :

$$t_H = \frac{t_p + \Delta t}{\Delta t} \qquad \text{avec réciproque} \qquad \Delta t = \frac{t_p}{t_H - 1} \quad \text{(équation 4)}$$

où l'on trouve la durée du pompage avant l'arrêt t_p et le temps de récupération qui commence à l'arrêt de la pompe Δt.
On remarquera que plus le temps passe, plus ce temps va tendre vers 1 (t_p devient négligeable par rapport à Δt qui devient très grand). Réciproquement, comme Δt qui, au dénominateur, est très petit au départ, la valeur de t_H est élevée : le temps de Horner marche à l'envers : plus le temps passe, plus le temps de Horner diminue pour finalement tendre vers 1.
Voici le modèle mathématique (voir document 70 : *Earlouger 1977, p. 46 et 185*) :

$$p = p_i - \frac{2{,}3\, q\, \mu}{4\pi\, t_{\text{int}}} \log\left(\frac{t_p + \Delta t}{\Delta t}\right) \quad \text{(équation 5)}$$

p est la pression, p_i est la pression initiale (non dérangée) de l'aquifère, la parenthèse du logarithme est le temps de Horner, q est le débit du pompage (qui précédait l'arrêt de la pompe), μ est la viscosité du fluide (déjà vu dans l'équation 2), t_{int} est la transmissivité intrinsèque (déjà vue dans l'équation 3).
L'équation 5 n'est autre qu'une ligne droite : y = b - m x, à condition que x soit le logarithme du temps de Horner. C'est donc pour avoir cette droite qu'on prend un diagramme semi-logarithmique (un seul des deux axes est à échelle logarithmique, celui de la mesure du temps). b est la pression non dérangée p_i et la pente de la droite est donc :

$$m = \frac{2{,}3}{4\pi}\,\frac{q\,\mu}{t_{\text{int}}} \quad \text{(équation 6)}$$

On voit tout de suite que, dés qu'on connait cette pente m, on connait la transmissivité intrinsèque puisqu'on peut les inverser dans l'équation 6. C'est ce que l'on cherche d'abord à déterminer dans un test hydraulique.

Cette droite passe par le point : $\{[(t_p+\Delta t)/\Delta t] = 1;\ p=p_i\}$ (puisque log 1 = 0). En prolongeant la ligne droite jusqu'à la valeur temps de Horner = 1, ce diagramme de Horner va nous permettre d'estimer aussi la valeur de la pression non dérangée de formation.

b) Test au Trias n°2, premier calcul approximatif de la perméabilité

La phase de récupération du test n° 2 à produit le diagramme de Horner suivant :

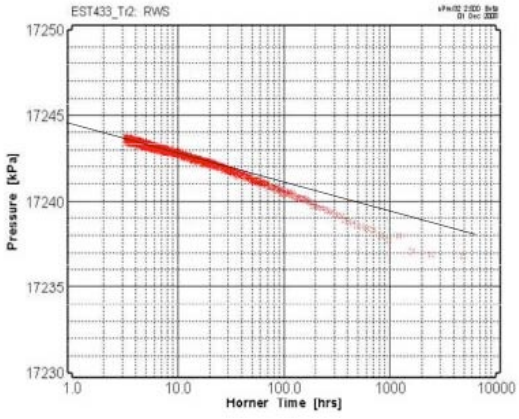


Figure P.3-2. Diagramme de Horner du test n°2
(voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.16, p. 82*)
«*Plus le temps passe, plus le temps de Horner diminue pour finalement tendre vers 1*»
(on notera que le *[hrs]* mis par les opérateurs en abscisse n'a pas lieu d'être, d'une part le temps de Horner est sans dimension, il marche à l'envers, etc.)

Les points de données sont des croix rouges, vraiment fines et très proches, qui forment une sorte d'étoile filante (rouge avec la couleur) qui part vers la gauche. La pente m doit être tracée sur les dernières données (qui sont à gauche sur un tel diagramme). Elle a été tracée par les opérateurs (la fine ligne noire).
Le débit appliqué pour ce test n'est autre que le fameux 5 m^3/h : "*83,6 l/mn (5 018 l/h)*" (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*), soit 1,3933 10^{-3} m^3/sec.

Les opérateurs écrivent (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*) :

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

Mais si l'on utilise la formule mentionnée "m = 0,183 q/T", nous ne parviendrons pas à ce résultat. Il s'agit de l'équation 6, dans laquelle a été substituée la transmissivité des hydrogéologues à la transmissivité intrinsèque (des équations 3 et 2). Notant que 2,3/4π ≈ 0,183, elle peut en effet s'écrire : m = 0,183 q ρ g/T. On constate alors (m, q et g sont connus, les opérateurs donnent une valeur de T) que la masse volumique utilisée dans le calcul est de 1000 kg/m^3. Le tableau des valeurs de paramètres entrées en logiciel (voir document 6 : *SIS 2009, p. 25 et 64*) confirme que, pour toutes les modélisations, qu'elles soient numériques ou analytiques, sept mois après la fin des tests, les opérateurs ont modélisé la saumure chaude comme de l'eau douce à température ordinaire. Si une eau pas très salée chaude peut avoir une masse volumique de 1000, la viscosité de 1 10 Pa·s utilisée en même temps par les opérateurs ne peut être celle d'un fluide chaud. Ce rapport a été visé par l'Andra.

Avec les propriétés de la saumure chaude (viscosité de 0,6 10^{-3} Pa·s) on calcule la transmissivité intrinsèque (équation 6) :

$$t_{\text{int}} = \frac{2,3}{4\pi}\,\frac{1,3933\,10^{-3}\times 0,6\,10^{-3}}{1,6\ 10^{3}} \approx 9,56\,10^{-11}\,\text{m}^2\cdot\text{m} \approx 97\ \text{D}\cdot\text{m}$$

soit une perméabilité K (=T/*e*) ≈ 3,82 10^{-12} m^2 ≈ 3,9 darcies.

Convertie en perméabilité/transmissivité des hydrogéologues avec l'équation 2 :

$$\text{perméabilité}\ \ K = \frac{3,825\ 10^{-12}\times 1100,5\times 9,81}{0,6\ 10^{-3}} \approx 6,9\ 10^{-5}\,m/s$$

et donc une transmissivité T (= K*e*) = 1,7 10^{-3} m^2/s.

On voit, sur la figure P3-2, que la ligne de pente tracée par les opérateurs et les données ne coïncident pas avant, au moins, un temps de Horner de 30, c'est-à-dire (équation 4, sachant que les opérateurs ont utilisé t_p = 6,79 h ; voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*) ~ 0,23h, soit 14 min. Et les dernières données sont les meilleures et s'arrêtent ici à un temps de Horner de ~ 3, soit ~ 3,4 h (durée de cette séquence de récupération appelée RWS ; voir figure P3-4). Cette pente de 1,6 kPa par cycle logarithmique des opérateurs indique que le calcul de la perméabilité/transmissivité se fait pour le débit de 5 m^3/h avec un rabattement équivalent eau fraîche de (h = p/ρg = 1600/(1000×9,81)≈) 16 cm par cycle logarithmique. On est à une échelle de type décimétrique.
On comprend l'ampleur de la tromperie de l'Andra (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*) :

"*... a produit 35 m^3 d'eau de formation... ...(4 à 5 m^3/h) sous un rabattement de 30 m."*

L'amplitude de l'échelle des ordonnées de la fig. P3-2 est de 20 kPa, soit ~ 2 mètres en termes de rabattement. Si on voulait mettre sur ce diagramme les données de pression/rabattement depuis le début de la séquence (les "30 m"), il faudrait que l'axe des ordonnées soit 15 fois plus long.

c) Dans les règles de l'art : en tenant compte du débit variable

Cependant, le modèle de Horner (équation 5) est valable pour un débit constant, ce qui n'a pas été le cas lors du test avec une variation de 30 à 40% (voir document 6 : *SIS 2009, fig. 3.2.2b, p. 60* ; voir figure P3-3 ci-dessous).

Les bonnes pratiques et les règles de l'Art veulent que l'on utilise alors une arithmétique plus compliquée. Le principe reste le même. Se tenir ainsi au plus près des données va abaisser seulement légèrement les valeurs calculées, en imposant un débit constant.
La réponse en pression de récupération suivant un historique à débit variable s'écrit (voir document 70 :

Earlougher 1977, p. 55) :

$$p = p_i - m \sum_{j=1}^{N} \frac{q_j}{q_N} \log\left(\frac{t_N - t_{j-1} + \Delta t}{t_N - t_j + \Delta t}\right) \qquad \text{(équation 7)}$$

où *m* est l'équation 6 dans laquelle *q* est le dernier débit q_N.

Ainsi, si l'on considère globalement tout le terme somme (Σ) de la partie droite de l'équation 7 (∑ qui est sans unité), un graphique cartésien (i.e. sans aucun axe à échelle logarithmique) de la pression *p* vs (Σ) dessine une ligne droite ($p = p_i - m\,\Sigma$) de pente *m* et d'interception p_i (quand Σ = 0 et quand Δt est grand).

C'est avec un exemple concret que l'on comprend le mieux le fonctionnement de l'équation 7 (par exemple, voir document 70 : *Earlougher 1977, p. 55-56*) et cet exemple sera donc notre test n° 2.
Le débit a augmenté régulièrement de 60 à 84 l/mn. On a découpé le déroulement en 3 domaines auxquels on a affecté un débit moyen (voir document 6 : *SIS 2009, fig. 3.2.2b, p. 60*) :

j	*t* heures	*q* moyen m^3/h (m^3/s)
0	0	0
1	1,75	3,96 ($1,1\ 10^{-3}$)
2	5	4,59 ($1,275\ 10^{-3}$)
N = 3	8	4,95 ($1,375\ 10^{-3}$)

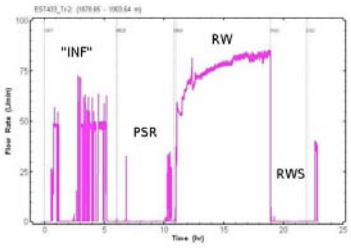


Figure P3-3. La phase de pompage est celle nommée RW. Elle se déroule entre "11h" et "19h". L'axe des Y est le débit en l/mn.
(voir document 6 : *SIS 2009, fig. 3.2.2b, p. 60*)

Pour ces données, on écrit le terme somme de l'équation 7 :

$$\sum_{j=1}^{N} \frac{q_j}{q_N} \log\left(\frac{t_N - t_{j-1} + \Delta t}{t_N - t_j + \Delta t}\right)$$

pour j=1 $$= \frac{3,96}{4,95} \log\left(\frac{8-0+\Delta t}{8-1,75+\Delta t}\right) = 0,8 \log\left(\frac{8+\Delta t}{6,25+\Delta t}\right)$$

pour j=2 $$= \frac{4,59}{4,95} \log\left(\frac{8-1,75+\Delta t}{8-5+\Delta T}\right) = 0,93 \log\left(\frac{6,25+\Delta t}{3+\Delta t}\right)$$

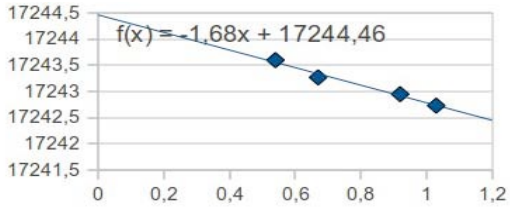
pour j=N $$= \frac{4,95}{4,95} \log\left(\frac{8-5+\Delta t}{8-8+\Delta t}\right) = \log\left(\frac{3+\Delta t}{\Delta t}\right)$$

Calculs de Σ pour différentes valeurs de Δ*t* :

Δt (heure)	$0,8 \log\left(\frac{8+\Delta t}{6,25+\Delta t}\right)$	$0,93 \log\left(\frac{6,25+\Delta t}{3+\Delta t}\right)$	$\log\left(\frac{3+\Delta t}{\Delta t}\right)$	**Σ**	*p* kPa
0,75	0,07753	0,25209	0,69897	1,03	17242,73
1	0,07512	0,24020	0,60206	0,92	17242,95
2	0,06684	0,20226	0,39794	0,67	17243,27
3	0,06020	0,17483	0,30103	0,54	17243,60

Comme le rapport des opérateurs SIS ne donne aucun tableau de données, on n'a pu estimer les valeurs de *p* pour ces différents Δ*t* que de façon très approximative à partir de leur diagramme de Horner (voir document 6 : *SIS fig. 3.2.16, p. 82* ; on retrouve le temps sachant que la valeur de t_p qu'ils ont utilisée pour le temps de Horner est 6,796 h ; voir document 6 : *SIS, p. 81*). Conformément à la validité du modèle de Horner, les premières données ne sont pas utilisées.

On obtient la droite de l'équation 7 sur un diagramme cartésien p vs (Σ) :



La régression linéaire du traceur donne une pente de ~ 1,7 kPa/unité Σ et p_i ~ 17 244,5. La transmissivité est de nouveau obtenue à partir de l'équation 6 avec le dernier débit moyen de 4,95 m^3/h (1,375 10^{-3} m^3/s) pour les 25 m :

$$t_{int} = \frac{2,3}{4\pi} \frac{1,375\,10^{-3} \times 0,6\,10^{-3}}{1,68\ 10^{3}} \approx 8,99\,10^{-11}\,\mathrm{m}^2\cdot\mathrm{m} \approx \mathbf{91\ D\cdot m}$$

soit une perméabilité intrinsèque k (t_{int}/e) ≈ 3,6 10^{-12} m^2 ≈ **3,6 darcies**, certainement la valeur mathématiquement la plus conforme aux données que l'on puisse obtenir.

Ces valeurs retranscrites en unités des hydrogéologues avec l'équation 2 donnent :

$$K = \frac{3,595\ 10^{-12} \times 1100,5 \times 9,81}{0,6\ 10^{-3}} \approx \mathbf{6,5\,10^{-5}\,m/s}$$

et une transmissivité (Ke) ≈ **1,62 10^{-3} m^2/s** pour ce test sur 25 m.

On note que cette valeur est supérieure à la valeur moyenne donnée par la CNE (voir document 12 : *CNE 2010, annexes, p. 14*) pour la transmissivité moyenne des exploitations géothermiques mondialement connues du bassin de Paris (1 10^3 m^2/s).

d) Le facteur de pellicule : quantifier l'effet majeur du manteau de boue

Le facteur de pellicule est une autre manière d'évaluer l'effet d'un manteau de boue, en même temps qu'il permet de mieux comprendre, par contraste, le modèle de Horner (les deux approches étant complémentaires).

La séquence que l'on étudie est la remontée de pression suite à l'arrêt de la pompe. Les opérateurs écrivent que (voir document 6 : *SIS, p. 59*) :

"*la pression de l'intervalle de test s'est accrue en 5 secondes à une valeur de 17 237 kPa pour une récupération de 291 kPa (fig. 3.2.1* [voir sur les figures P3-4 et P3-6]. *Cela était approximativement 96% de la baisse RW observée de 302 kPa.*"

"*302 kPa*" correspond à peu près au "*rabattement de 30 m*" et 96 % de ces "*30 m*" a été récupérés en quelques secondes.

Il faut distinguer le modèle de Horner en soi qui est la droite théorique calquée sur la partie tardive des données et les données complètes du test. Le modèle de Horner n'a aucune composante pour tenir compte d'un manteau de boue parce qu'en récupération, il n'y a pas d'écoulement (seule la pression varie). Cependant, la gène de la boue était bien présente pendant le pompage et cette gène peut être estimée à partir des premières données de la récupération et de la pression pendant l'écoulement, juste avant l'arrêt de la pompe.

Depuis très longtemps, les pétroliers ont inclus, dans leurs équations, un facteur de proportionnalité

permanent entre débit et pression pour simuler une baisse (ou autre variation) de perméabilité autour du puits de forage à cause de la boue. Il s'agit du facteur de pellicule (skin factor) noté s_{pel}. Ce modèle s'applique pour un manteau de boue sur la paroi du forage.

Le facteur de pellicule, s_{pel}, a été défini comme l'application d'un supplément de pression ponctuel absorbé, Δp_{pel}, pour arriver à traverser la pellicule de boue dans le cadre d'un écoulement radial répondant à la loi de Darcy (par exemple, voir document 70 : *Earlougher, p. 5, 8 et 185*) :

$$\Delta p_{pel} = \frac{q\,\mu}{2\pi\,k\,e}\,s_{pel} = \frac{m}{1{,}15}\,s_{pel} \qquad \text{(équation 8)}$$

où q, le débit, μ, la viscosité, k la perméabilité intrinsèque, e, l'épaisseur et m sont des paramètres que l'on a déjà vus (équations 6, 2 et 3).

Ce supplément s'ajoute donc à la variation de pression naturelle dans l'aquifère qui est due à la séquence de test elle-même (baisse de pression si l'on pompe, remontée de la pression si on vient juste d'arrêter la pompe). L'unique cause de ce supplément de pression est la boue (si le puits est bien nettoyé conformément à l'état de l'Art pour l'étude précise d'une couche aquifère : $s_{pel} \rightarrow 0$ et donc $\Delta p_{pel} \rightarrow 0$).

La solution mathématique pour le facteur de pellicule, s_{pel}, en lui-même, a été établie au temps de 1h qui convient à l'échelle pétrolière (l'idée est que la perte de pression additionnelle due à la pellicule s'établit en début de séquence puisque c'est le premier anneau de matière rencontré) (voir document 70 : *Earlougher 1977, p. 23, p. 46, p. 185*) :

$$s_{pel} = 1{,}15129\left[\frac{p_{1hr} - p(\Delta t = 0)}{m} - \log\left(\frac{k}{n\,\mu\,c_t\,r^2}\right) - 0{,}351378\right] \qquad \text{(équation 9)}$$

Le premier terme du crochet de équation 9 est celui qui a le plus d'influence sur le résultat final. p (Δt=0) est la pression au début de la séquence de récupération, qui est en réalité celle pendant le pompage (prise quand on arrête celui-ci) donc de la séquence précédente ; p_{1hr} est la pression une heure plus tard dans la séquence de récupération ; m est la pente du modèle de Horner (équation 6). Cette pression à 1h doit être lue, non pas sur les données elles-mêmes, mais sur la pente m du modèle de Horner prolongée jusqu'à 1h (en effet, dans certains tests, les données peuvent être encore affectées par la capacité de puits ; voir document 70 : *Earlougher 1977, p. 46, p. 23*).

Pour mémoire, la capacité de puits vient de la variation de la densité du volume de fluide qui emplit la cavité du forage (du puits) due au changement de pression important qui l'affecte au départ. A cause du "gonflement" ou de la contraction de ce volume de fluide dans le puits, le volume sortant mesuré à la surface ne correspond pas exactement au volume de fluide qui est sorti de la formation en profondeur. Cet effet est accentué par un manteau de boue (puisque la pression à exercer dans le puits doit être bien plus grande pour arriver à un débit donné (équation 8)) et de nouveau par son relâchement lorsque l'on arrête le pompage.

Pour cette séquence de récupération du test n° 2, puisque 96% de la pression a été récupérée en quelques secondes (à l'intérieur de cet intervalle entre Δt = 0 et 1 heure), c'est dans cette détermination du facteur de pellicule (et uniquement pour lui) qu'intervient l'essentiel du "rabattement de 30 m" indiqué par l'Andra dans sa synthèse de 2009, et non pas dans le calcul de la perméabilité.

Dans le deuxième terme du crochet, en logarithme, k est la perméabilité intrinsèque (équation 2) et μ est la viscosité du fluide. La détermination de s_{pel} implique donc que la perméabilité ait déjà été déterminée. Les autres paramètres sont là parce qu'il s'agit d'un régime transitoire (par opposition à régime permanent) : n est la porosité de la roche et c_t est la compressibilité totale (compressibilité de pore, c_{pf} + compressibilité du fluide, β) de la formation, qui sont des valeurs estimées.

En effet, en début de test, certains effets physiques ne sont pas négligeables (en plus de l'effet d'une pellicule de boue) et doivent donc être évalués :

i) une variation des contraintes effectives, c'est-à-dire une compression ou détente du squelette de l'aquifère fonction de la variation de la pression de l'eau (qui "porte" plus ou moins la roche, principe d'Archimède) ;

ii) une faible compression ou détente de l'eau dans l'aquifère elle même avec cette variation de pression (dépendante de l'élasticité du squelette de l'aquifère).

Lorsque l'on utilise la perméabilité intrinsèque, cet effet combiné est pris en compte par le couple $n\ c_t$ (en hydrogéologie, on l'appelle "emmagasinement spécifique", S_s, avec : $S_s = \rho\ g\ n\ c_t$).

Ce sont tous ces effets qui agissent en début de test (emmagasinement, pellicule lorsqu'elle existe) qui ne sont pas "ressentis" dans le modèle simplifié de Horner, valable sur les données plus tardives, quand l'impact de ces phénomènes est devenu négligeable.

Application

Valeurs des paramètres déjà déterminées : m = 1,68 10^3 Pa/1(débit variable); k = 3,6 10^{-12} m^2 (débit variable) ; μ = 0,6 10^{-3} Pa·s.
Rayon du forage : r = 0,076 m (opérateurs) ; n = 0,22 (Géo-RS 2008 donnent $20 \leq n \leq 25$ %) ; $c_t = c_{pf} + \beta$ avec c_{pf}=3 10^{-10} Pa^{-1} (voir document 6 : *SIS, p. 64*) et $\beta \approx 3{,}38\ 10^{-10}$ Pa^{-1} (saumure 10-20% vers 15-20 MPa et vers 60-70°C ; voir document 70 : *Earlougher 1977, p. 231* et autres tables de la littérature), d'où $c_t \approx 6{,}38\ 10^{-10}$ Pa^{-1}.
Pression à une heure : le temps de Horner $(t_p + \Delta t)/\Delta t$ à 1 heure = 7,796 (puisque t_p = 6,796 de SIS p. 81) et on lit la pression sur la figure P3-2 : $p_{(1heure)}$ = 17 243 kPa.

La détermination de p(Δt=0) est aléatoire au regard des données (voir figures P3-4 et P3-6). On fait le calcul pour deux valeurs : 16 946,3 kPa des opérateurs (voir document 6 : *SIS, tab. B.2.2-1, p. 117*) et 16912,5 kPa qui est plus proche des mesures pour les deux dernières heures du pompage (voir figure P3-6).

$$s_{pel} = 1{,}15129 \left[\frac{17243\ 10^3 - 16946{,}3\ 10^3}{1{,}68\ 10^3} - \log\left(\frac{3{,}6\ 10^{-12}}{0{,}22 \times 0{,}6\ 10^{-3} \times 6{,}38\ 10^{-10} \times (0{,}076)^2} \right) - 0{,}351378 \right] \approx \mathbf{198{,}5}$$

Le même calcul avec la valeur p(Δt=0) de 16 912,5 kPa donne $\boldsymbol{s_{pel} \approx 221{,}6.}$

Pour être complet, on donne le calcul fait selon les règles de l'Art pour un débit variable. Si le temps du dernier intervalle de pompage n'est pas beaucoup plus grand qu'une heure ($t_N - t_{N-1} >> 1$h), Earlougher (voir document 70 : *Earlougher 1977, p. 55*) recommande d'ajouter un terme supplémentaire dans l'équation 9, qui devient alors :

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

équation qui est valable généralement pour les tests courts (de l'ordre de 1h). On remplace t_p par $(t_N - t_{N-1})$. Dans notre cas, $(t_N - t_{N-1})$ = 8 - 5 = 3 heures et on ajoute 1,15129 [log (4/3)] ≈ 0,14 aux valeurs précédentes qui restent donc valables.

A titre de référence, lorsque l'on consulte les illustrations de calculs avec des données de tests réelles (voir document 70 : *Earlougher 1977*) à une époque où les techniques/matériels de forages/tests étaient rudimentaires et réalisés à la boue à la bentonite (beaucoup plus difficile à nettoyer que la boue polymère), les valeurs de s_{pel} vont de - 1,5 à ~ + 20. Une valeur de s_{pel} atteint 81. Sa conclusion est alors la suivante (voir document 70 : *Earlougher, p. 96*) :

"*le puits était sévèrement endommagé.*"
(dans le sens pétrolier : sa capacité de production était sévèrement affaiblie)

Le facteur de pellicule calculé de la seule séquence rescapée de l'ensemble des tests au Trias réalisés à Bure donne l'information que le puits était massivement obstrué. Cette information, par des moyens complètement différents et indépendants, ne fait que confirmer celle donnée par la photo de la crépine (voir figure 5 de la synthèse générale).
Un écran massif de boue obstruant la crépine, l'eau de l'aquifère peine à pénétrer l'intérieur du forage. La pompe doit créer une dépression forte dans le tubage. Le rabattement annoncé de 30 m n'est pas représentatif de la réponse de l'aquifère mais de l'obstruction de la crépine.
Il est étonnant que, pour un test caractérisé par des obstructions massives de boue, le rapport SIS, revu pendant plus d'un mois "*après prise en compte des remarques ANDRA*" (voir document 6 : *SIS, verso de page de garde*), soit totalement muet sur ce facteur de pellicule aussi exceptionnel. Il n'existe pas de rapport BRGM d'étude de faisabilité d'une exploitation géothermique Dogger qui ne donne pas le calcul du facteur de pellicule. Ils sont d'ailleurs la plupart du temps légèrement négatifs (ce qui signifie que, non seulement, il n'y avait pas du tout de boue, mais que le mur du forage avait été rendu légèrement plus perméable que la roche vierge par le traitement à l'acide, avant les tests hydrauliques).
La part du rabattement due au manteau de boue peut maintenant être évaluée avec l'équation 8, dont tous les paramètres ont déjà été déterminés :

$$\Delta p_{pel} = \frac{1{,}68\ 10^{3}}{1{,}15} \times 198{,}5 \approx 290 \text{ kPa}$$

ou, pour s_{pel} de 221,6 : $\Delta p_{pel} \approx 323{,}8$ kPa.

Converti {÷ ρ g, soit ÷ (1000 × 9,81)}, cela donne de **29,6 à 33 mètres en rabattement** équivalent eau fraîche **provoqué par**, et dû exclusivement à, **un écran massif de boue**. Ce traitement des données de début de test complète ce qu'avait indiqué le modèle de Horner sur les données de fin de test.

V. Un "*rabattement de 30 m*" ? après... injection de boue !

Le rabattement est simplement une manière visuelle de représenter une différence de pression. Or, les pressions enregistrées pendant le pompage (séquence nommée RW, la phase suivante de récupération étant nommée RWS) ont eu un comportement chaotique :

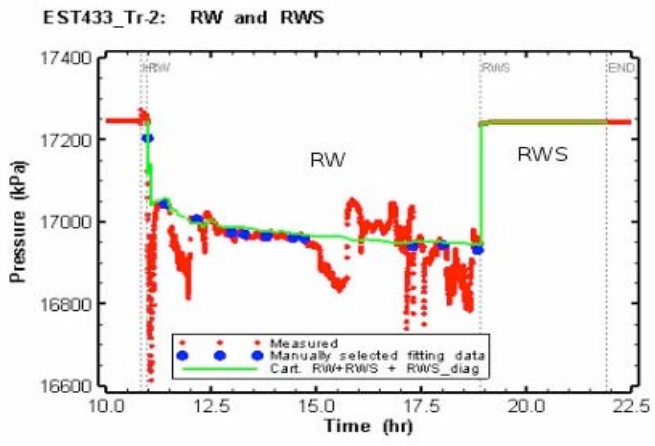


Figure P3-4. Diagramme pression vs temps, test n°2.
Les données sont le tracé gras en zig-zag pour le pompage RW (rouge).
La fine ligne verte est tout autre chose (simulation).
Pour la simulation, devant l'impossibilité d'utiliser les données, les opérateurs ont choisis arbitrairement 11 points (en couleur bleu)
(voir document 6 : *SIS fig. 3.2.10, haut, p. 72*)

"*Pendant la phase RW, **la réponse erratique de pression** comparée aux changements plus graduels dans les débits envoyés par la pompe....*" (voir document 6 : *SIS, p. 69* ; mis en gras par nous).

La figure P3-5 montre l'allure qu'aurait dû avoir la courbe de pression et ce qu'elle a été :

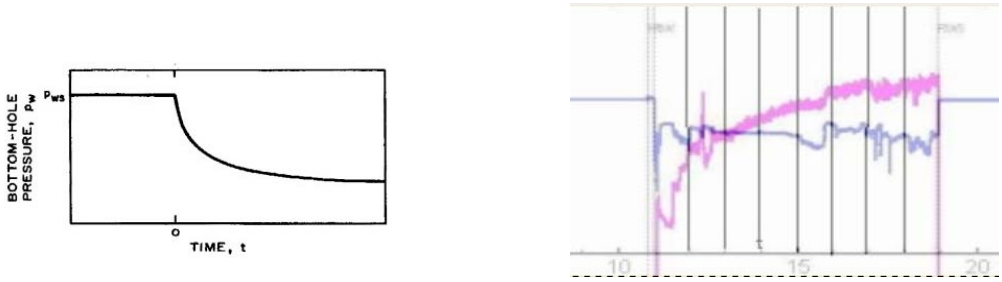


Figure P3-5. A gauche : allure théorique d'une courbe de pression vs temps au cours d'un pompage à débit constant;
A droite, courbe pression vs temps lors du pompage du test n°2 avec superposition de la courbe de débit (la courbe qui monte est celle du débit).

Il ne peut s'agir de la réponse en pression de la formation puisque le débit continuait, lui, à monter de manière relativement régulière. La situation ressemble à celle du forage de Schafisheim près de Zurich, 23 ans plus tôt (voir document 8 : *Moe et al. 1990, p. 8* ; le capteur "P2" est celui qui mesure la pression dans l'intervalle de test à Schafisheim comme à Bure) :

"*... 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."

[- Drillstems test : fait avec un "train de test" utilisé par les pétroliers qui se fixe au bout des tubes de forage.

- La pression est mesurée par des capteurs à cristaux de quartz. Ceux-ci sont en lien avec l'intervalle de test via des petits tuyaux ou ouvertures : les ports de pression.]

"*Ces problèmes d'outils sont principalement liés à l'obstruction des ports de pression.*" (voir document 8 : *Moe et al. 1990, p. 35*)

A Bure, les opérateurs indiquent (voir document 6 : *SIS 2009, p. 13*) :

"*De plus, la crépine était remplie de boue solide jusqu'à proximité de son sommet.*"

Par quel mécanisme la crépine aux ouvertures si fines (voir figure 5 de la synthèse générale) a-t-elle pu être emplie de boue gélatineuse ?

Le "train de test" était tellement bouché à la fin du test n° 1 et lorsque les opérateurs ont voulu commencer le test n° 2 que (voir document 6 : *SIS, p. 68*) :

"A cause d'une obstruction potentielle de la valve d'obturation et/ou de la crépine, on a conduit une série d'injections dans le tubage du test."

Le contrôleur a également indiqué, pour ce test n° 2, que (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 7*) :

"*... le dérangement de la température provoqué par l'injection de fluide qui a été faite dans le but de déboucher l'outil...*"

Ces injections (séquence "INF" sur figure P3-3) ont été réalisées avec l'obturateur inférieur fermé et l'obturateur supérieur ouvert (voir document 6 : *SIS, p. 140-141*). Elles ont été faites à la boue polymère de forage sous la conduite de l'Andra (voir document 6 : *SIS, p. 141*, "15h55").

La nature du fluide injecté n'est évidemment indiquée nul part mais les évidences sont accablantes :

- Immédiatement à la suite de ces injections, la première séquence du test n° 2 (dite PSR ; voir figure P3-3) est in-interprétable à cause de l'obstruction :

"*Cela suggère que la réponse PSR ne représente pas une vraie réponse de formation mais l'établissement d'un gâteau de boue a limité le mouvement du fluide du puits de forage dans la formation.*" (voir document 6 : *SIS 2009, p. 69*)

"La réponse PSR a indiqué des réponses non typiques qui peuvent être associées avec l'obstruction de l'outil et/ou la crépine." (voir document 6 : *SIS, p. 66*)

Et toujours pour ce test n° 2, pour expliquer pourquoi ils modélisent une pellicule pour la séquence plus tardive de récupération (voir document 6 : *SIS 2009, p. 74*) :

"*... au vu de l'utilisation de la boue polymère pendant le forage..., la quantité d'accumulation de gâteau de boue sur l'outil de test des observations postérieures aux tests ...*"

De même, du coté du contrôleur, à propos de ce test n° 2 en général (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 8*) :

"*Un grand facteur de pellicule a été identifié dans l'analyse. Cela semble être consistant avec l'hypothèse que l'outil était partiellement obstrué.*"

Sachant que les surpressions maximales sont ces injections "pour déboucher" l'outil et qu'elles sont les toutes dernières à avoir eu lieu, les opérateurs indiquent, toujours pour ce test n° 2 (voir document 6 : *SIS, p. 70*) :

"*... le débit avec lequel la boue polymère s'est propagé dans la formation pendant les périodes de surpression.*"

D'ailleurs, le tableau des valeurs rentrées en logiciel par les opérateurs pour le fluide de forage ne traite que de boue polymère (densité 1,05 g/cm^3; viscosité 12-16 cP ; voir document 6 : *SIS, p. 25, p. 64* ; seule le fluide de formation est traité comme de l'eau, mais cela est bien distinct dans les tableaux). Dès les premières étapes du test n° 1 (séquence appelée SI), le train de test a été rempli de boue polymère et l'a probablement toujours été :

"*La séquence SI a été réalisée en remplissant le tubage jusqu'au sommet (-5,95 m sous le niveau du sol) avec la boue polymère ...*" (voir document 6 : *SIS, p. 20*).

Des hydrogéologues de l'Andra (l'un des deux co-auteur est le directeur scientifique du Laboratoire de Bure au moment où se déroule ces tests au Trias) avaient expliqué que le nettoyage à l'eau est facile (voir document 9 : *Delay et Aranyossy 1994, p. 55* ; mis en gras par nous) :

"... remplacer le fluide chargé de boue et de cuttings [= débris] *par de l'eau. Lorsque la boue est à base de polymères, le "cake" est* ***facilement*** *dégradé et le test peut se dérouler dans des conditions idéales.*"

L'expert privé du CLIS (déjà cité dans la synthèse générale), quant à lui, a indiqué :

"*... en règle générale pour nettoyer un puits après forage, nous pompons rapidement un certain nombre de volumes d'eau, huit à dix fois le volume d'eau.*"

Le volume exact des injections n'est pas donné mais doit approcher les 5 m^3 (on est déjà à 4 m^3 alors que l'injection la plus longue est en cours ; voir document 6 : *SIS, p. 141*). Le volume total de la chambre de test est de ($\pi \times (0{,}0762)^2 \times 25$ =) 0,456 m^3. Si l'on retire le volume du tubage central qui, en théorie, n'aurait en aucun cas dû être boueux ($\pi \times (0{,}0365)^2 \times 25 = 0{,}105$ m^3), le volume à nettoyer est ~ 0,355 m^3. Le volume qui a été injecté fait environ 14 fois ce volume. Si cela avait été de l'eau claire, le puits aurait été effectivement nettoyé et, selon l'expert privé du CLIS de Bure et selon l'expression des hydrogéologues de l'Andra en 1994, on serait parvenu à "*des conditions idéales*".

La découverte de la nature de ces importantes injections comme préliminaire au test n° 2 (et uniquement celui-là) apporte des éclaircissements sur l'énigmatique présence de boue à l'intérieure de la crépine. En effet, puisque lorsque l'eau boueuse va de l'extérieur vers l'intérieur (pompage), cette boue polymère forme une dense pellicule à l'extérieur autour de la crépine (voir figure 5 de la synthèse générale). Il en est certainement de même lorsque cette eau boueuse va de l'intérieur vers l'extérieur. C'est donc, très logiquement, suite à ces mètres cubes injectés qu'il a été constaté ensuite que la crépine "*était remplie de* ***boue solide jusqu'à proximité de son sommet***" (voir document 6 : *SIS, p. 13* ; mis en gras par nous).

Les opérateurs ont donc été contraints d'utiliser la boue polymère de forage pour désobstruer un outil au trois quart bouché par la boue polymère de forage.

Sachant cela, les mesures, d'apparence chaotiques, du capteur de pression pendant le pompage (voir figures P3-4 et P3-6) peuvent correspondre à des grumeaux de cette boue intérieure maintenant déplacée par l'inversion du mouvement du fluide (la saumure de formation qui rentre dans la crépine pendant le pompage), grumeaux qui peuvent venir se plaquer sur le port d'ouverture du capteur P2, exactement comme à Schafisheim (la boue à Schafisheim était à la bentonite ; ici, c'est une boue polymère gélatineuse). Ces variations erratiques ne peuvent correspondre à des obstructions irrégulières de la crépine et/ou à la valve d'obturation parce que cela se répercuterait sur le débit.

On peut comparer le "*sous un rabattement de 30 m*" de l'Andra (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105* ; voir document 62 : *Andra 2008, diap. 22*) aux données réelles des enregistrements de pression de la fig. P3-4 ou P3-6. La pression de départ est de ~ 17 250 kPa (avant le démarrage de la séquence marquée RW). Pour la pression sur la fin du pompage, entre les temps "17" heures et "19" heures de ces figures, la mesure évolue de manière erratique entre 17 030 kPa (vers "17h15") et 16 785 kPa (vers "18h45"). On a donc le choix entre une différence de 12 250 - (17 030 ou 16 785), c'est-àdire entre 220 ou 465 kPa, ce qui en terme de rabattement équivalent eau fraîche (÷{1000×9,81=} est entre 22,4 et 47,4 mètres. L'Andra, en 2009, a choisi arbitrairement "*30 m*".

VI. Simulations numériques vs modèle de Horner

Pour interpréter une récupération de pression suite à l'arrêt de la pompe, il faut tenir compte du pompage qui vient d'avoir lieu. Dans la simulation numérique que les opérateurs ont largement employée, le débit du pompage est rentré dans le logiciel. De part sa conception et fabrication même de calculateur numérique, le logiciel lie en permanence la variable pression à la variable débit, qui sont deux variables dites "conjuguées" (par la loi de Darcy). Évidemment la "pression-logiciel" de la simulation doit correspondre à celle observée pendant le test. Le paramètre de la loi de Darcy (perméabilité) sera notamment choisi (automatiquement) pour qu'il y ait cette correspondance. C'est là que survient le problème puisque les mesures de pression sont erratiques et n'ont pas de sens physique, sinon pour indiquer qu'on a affaire à des obstructions mouvantes (voir figures P3-4 et P3-6).

Les opérateurs ont tout simplement choisi quelques valeurs aux sein de ces enregistrements erratiques. Ce sont les points reportés sur la figure P3-4. C'est un choix parfaitement arbitraire. On pourrait tout aussi bien

interpréter ces enregistrements de pression de la façon suivante (voir figure P3-6) :

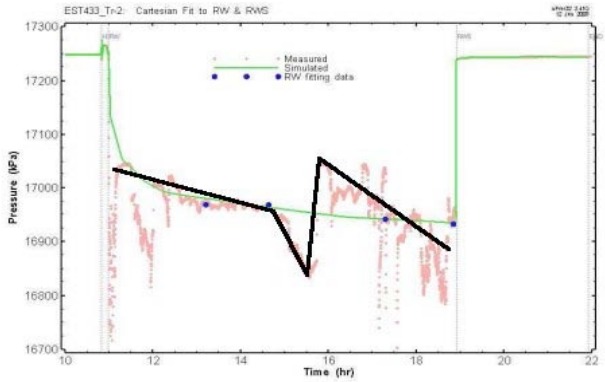


Figure P3-6. Comme les données de pression pour la séquence de pompage du test n° 2 ressemblent à un séismogramme, de nombreux choix de représentations arbitraires sont possibles. On en a tracé un ici avec une ligne brisée en gras.
On a aussi sur cette figure quelques points arbitraires choisis par les opérateurs pour leur modélisation numérique (qui donne la fine courbe verte) (voir document 6 : *SIS 2009, fig. 3.2.8, p. 68*)

Autrement dit, les opérateurs ont introduit dans un modèle mathématique, non pas des données, mais des interprétations humaines (voir document 6 : *SIS, p. 70*) **:**

"*A cause des variations des données de pression pendant la phase RW..., une sélection manuelle des points de donnée de calibrage a été entreprise pour la séquence RW. Les points de données sélectionnés manuellement ont été utilisés comme entrées pour la routine de concordance.*"

Le résultat ne sera que celui de ce choix arbitraire.

Cette simulation numérique de la figure P3-4 avec 11 points (dite cartésienne car il n'y a aucune échelle logarithmique) est combinée avec une autre. Cette autre simulation est faite sur le diagramme classique communément appelé "de diagnostique", dit log-log parce que ses deux échelles (axes des *x* et des *y*) sont logarithmiques. Le rapport SIS produit le diagramme qui montre la superposition des données sur le modèle-simulation-numérique fabriqué en logiciel (voir figure P3-7) :

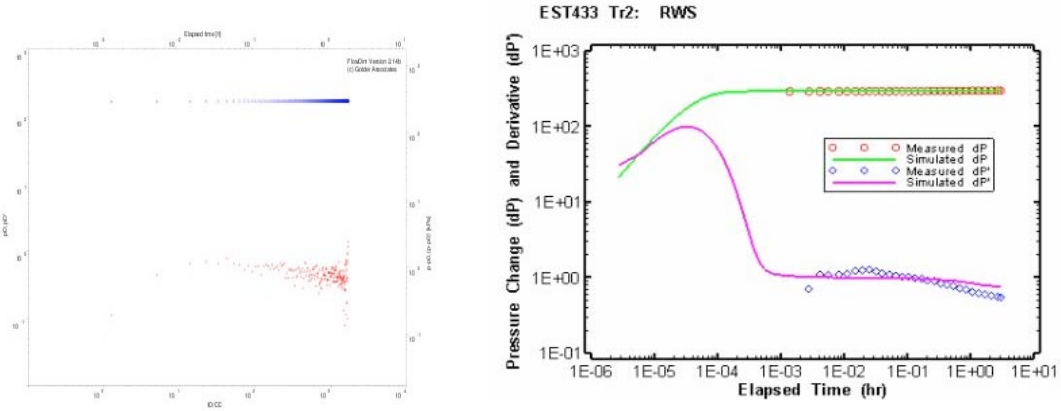


Figure P3-7. Données de la séquence de récupérations RWS mise sur le diagramme de diagnostique log-log. La figure de gauche de Egis-géotechnique (sans rentrer dans le détail ici, à l'échelle sans dimension ; voir document 11 : *Egis-géotechnique, p. 8*) et la figure de droite de SIS (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.10, p. 72*) qui est à échelle réelle (nota : la forme des données est la même sur ces deux versions du diagramme). On voit déjà que les opérateurs SIS ont très fortement lissé les données (c'est une technique). Les parties basses des deux diagrammes sont les dérivées de pression sur lesquelles on travaille prioritairement car elles sont beaucoup plus sensibles en modélisation. D'une part, la correspondance sur les données pour SIS n'est pas de grande qualité, d'autre part, la grande bosse sur cette courbe de simulation est arbitraire et inventée de toute pièce, puisqu'il n'y a pas de données.

Rien n'est dit de la courbe théorique. La simulation est présentée, en tout et pour tout, de la façon suivante :

"*sur la séquence RWS*" (voir document 6 : *SIS 2009, p. 71*)

Or RWS étant une séquence de récupération, il faut bien décrire le pompage précèdent pour avoir la bonne courbe modèle. S'agissant de l'application de ce diagramme log-log pour une séquence de *récupération* Bourdet et al. indiquent que (voir document 71 : *Bourdet et al. 1989, p. 295*) :

"Lorsque l'interprétation est réalisée sur ordinateur, la courbe-types de récupération est générée pour l'historique d'écoulement avant la fermeture de la valve (courbes multi-débit)... et la concordance est réalisée sur la réponse théorique exacte."

Qu'ont fait les opérateurs SIS avec les données de pression erratiques (qui sont nécessaires pour "choisir" notamment la pression au début de la phase de récupération) ? La question reste en suspens... Ils ont peut-être repris les mêmes 11 points.

Par ailleurs, la modélisation sur ce log-log pour le début de la séquence est effectuée sans aucune donnée reportée et est donc imaginée sur des bases purement qualitatives (voir document 6 : *SIS 2009, p. 74*) :
"*...diagramme log-log..(...) on a observé seulement la portion des temps tardifs et on ne peut pas clairement obtenir d'information relative au modèle d'écoulement. Cependant au vu de l'utilisation de la boue polymère pendant le forage..., la quantité d'accumulation de gâteau de boue sur l'outil de test des observations postérieures aux tests et la meilleure qualité de concordance des modèles composés dans les optimisations de simulations, on a sélectionné le modèle d'écoulement composé (zone de pellicule) dans les analyses des tests du EST433.*"

Le résultat sera tout aussi marqué par l'arbitraire que celui présenté sur le diagramme cartésien.
Les opérateurs appellent la combinaison de ces deux méthodes : "*calcul nominal sur concordance individuelle*" (voir document 6 : *SIS 2009, p. 75*). C'est ce résultat qui est indiqué dans le "Résumé à l'attention des décideurs" et son tableau dit "*Résumé*" associé. Celui calculé avec le modèle de Horner a disparu.

C'est ce résultat qualifié de "*nominal*" que l'on retrouve dans la synthèse de l'Andra en 2009 (la transmissivité de 1,1 10^{-3} m^2/s ; qui se traduit ~ 62 D·m). Le rapport des opérateurs a été originellement émis le 16/12/2008, mais il ne sera finalisé que plus d'un mois après, le 22/01/2009, "*après prise en compte des remarques ANDRA*" (voir document 6 : *SIS, verso de page de garde*). L'Andra, qui dans un premier temps a imposé des injections de boue à l'intérieur de l'outil, est donc intervenue de manière notable dans un second temps sur le contenu même du rapport de ses opérateurs. De nombreuses figures sont datées de cette période de modifications en lien avec l'Andra.

Le modèle de Horner convenablement employé sur ces données donne une valeur supérieure (91 D·m; 1,62 10^{-3} m^2/s). Toutes ces valeurs sont sujettes à caution puisqu'aucun modèle mathématique, qu'il soit analytique comme celui de Horner ou numérique comme celui des opérateurs, ne peut simuler des obstructions multiples à l'intérieur et à l'extérieur de l'outil. La seule séquence apparemment exploitable de l'ensemble de ces tests, la séquence de *récupération* du test n° 2 (RWS), est au mieux de piètre qualité. De plus, du coté des opérateurs, la saumure chaude a été modélisée comme de l'eau à température ordinaire.

Le modèle de Horner n'est pas très précis à cause du tracé de la droite sur les données, mais il est réputé fiable. C'est un grand classique de l'industrie pétrolière, mais aussi de la géothermie. Il tient compte de la phase de pompage uniquement via le débit (q) et la duré (t_p) et ne nécessite donc pas d'introduire des valeurs de pression déterminées arbitrairement (des erreurs en puissance), comme on est contraint de le faire en numérique avec de telles données. Son utilisation est recommandée, voire nécessaire. Des spécialistes du test hydraulique comme Gringarten et al. (voir document 72 : *Gringarten et al. 1979, p. 9*) donnent un exemple de complémentarité et même d'apport correctif du modèle de Horner sur une modélisation originelle faite sur le diagramme log-log. Pour les tests hydrauliques précédant la mise en route des doublets du Dogger, le BRGM calculait la perméabilité par trois méthodes différentes dont la courbe log-log et le modèle de Horner. Dans tous les rapports consultés, c'est le résultat du modèle de Horner, et seulement lui, qui est retenu en référence (avec débit variable lorsqu'il y a lieu) et le facteur de pellicule est toujours donné (*réf. BRGM et pages, tous disponibles sur internet* : *Champigny-sur-Marne, 85 SGN 222 GTH, p. 93 et 112 ; Clichy-sous-*

bois, 82 SGN 002 GTH, p. 81 et 98 ; La courneuve-Nord, 82 SGN 612 GTH puits n°1, p. 10 (débit variable), puits n°2, p. 9 ; La Courneuve Sud, 81 SGN 024 GTH, p. 23 ; et 81 SGN 386 GTH, p. 71 ; Evry, 82 SGN 718 GTH, p. 55 ; Fontainebleau, 82 SGN 507 GTH, p. 39 et 69 ; Garges-les-Gonesse, 83 SGN 409 GTH, p. 61; Meaux collinet, 81 SGN 817 GTH, p. 15 et 83 ; SGN 057 GTH, p. 13).

Un autre avantage est que, ne travaillant que sur une portion bien sélectionnée des données, le modèle de Horner est indifférent au fait que les données de début de test soient inconnues ou inexploitables. L'analyse par concordance sur des courbes complètes, telle celle log-log, par régression non-linéaire automatique en logiciel se fait sur l'ensemble des données (figure P3-7) incluant celles qu'il a fallu imaginer. La régression va forcer la concordance aussi bien sur ces données là que sur les vraies.

Pour toutes ces raisons, les résultats obtenus par le modèle de Horner sont certainement les moins aléatoires. On rappelle ces résultats : perméabilité : 3,6 darcies ; transmissivité pour 25 m : 91 D·m ; facteur de pellicule : ~ 210 témoignant d'une gène exceptionnelle.