

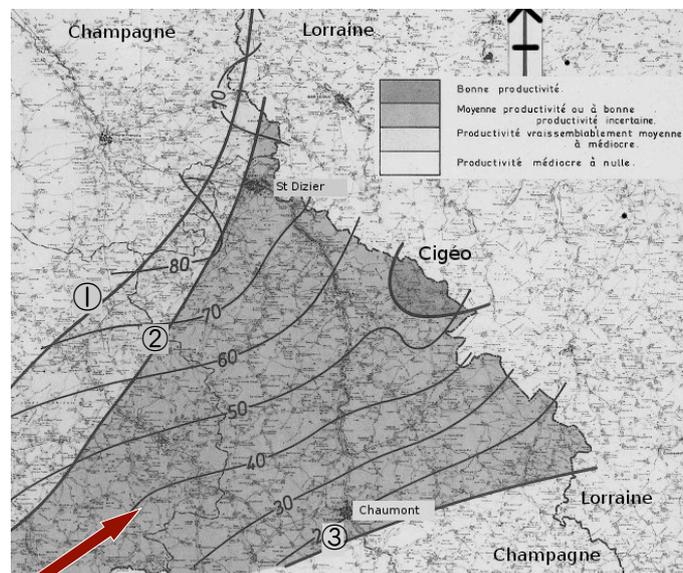
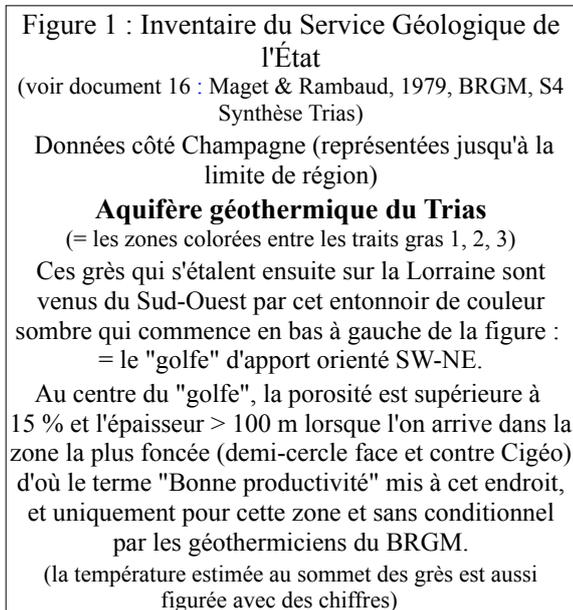
## Synthèse générale Dossier technique

L'Andra, Agence nationale pour la gestion des déchets radioactifs, est chargée de rechercher un lieu pour l'implantation d'un Centre industriel de stockage géologique (dit "CIGEO") pour les déchets radioactifs de haute activité et de moyenne activité à vie longue. Parmi les critères à prendre en compte pour le choix du site, figure celui de l'absence de ressources géothermiques potentiellement exploitables.

En effet, le rapport du groupe de travail présidé par le professeur Goguel relatif au stockage des déchets radioactifs en formation géologique jugeait préférable d'éviter les zones potentielles de gîtes minéraux risquant fort d'attirer de futurs habitants (voir document 1 : *Groupe Goguel 1987, p. 42*). Cela est devenu par la suite un objectif législatif général de sûreté avec le paragraphe 4.4.2 de la Règle Fondamentale de Sûreté (RFS) III.2.f : « Au plan de la gestion du sous-sol, le site devra être choisi de façon à éviter des zones dont l'intérêt connu ou soupçonné présente un caractère exceptionnel » (voir document 2 : *RFS III.2.f de 1991, § 4.4.2, p. 474*). Les RFS définissent des objectifs à retenir dans les phases d'études et de travaux pour le stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde afin d'assurer la sûreté après la période d'exploitation du stockage. La RFS III.2.f a été abrogée et remplacée par le guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde du 12 février 2008 (voir document 3 : *ASN 2008 Annexe II, p. 31*). Dans l'annexe 2 de ce guide, intitulée « Sélection de situation à étudier dans le cadre de l'analyse de sûreté », point A2-2.2.1, il est indiqué, concernant la géothermie et le stockage de chaleur, que « cette situation n'est pas à étudier car les sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue ».

### L'Andra a caché les atouts géothermiques du site de Bure

C'est un géophysicien haut-marnais retraité, André Mourot (aujourd'hui décédé), qui en décembre 2002 révèle pour la première fois que le site choisi fin 1993 à la limite Meuse-Haute-Marne, connu depuis sous le nom du village de Bure, est situé juste au dessus d'une ressource géothermique estimée importante (voir document 4 : *Mourot 2002*). Elle a été décrite par le Service Géologique de l'État, le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM), lors des grands inventaires de cette ressource qui ont suivi les chocs pétroliers fin 1973 et fin 1979 (voir figure 1), puis localement confirmée par un forage pétrolier en 1989.



Suite à la révélation d'A. Mourot, dès les premiers jours de 2003, de nombreuses demandes ont été faites au sein du Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) du Laboratoire de Bure, organisme de liaison entre l'Andra et différents représentants locaux, afin que soit vérifiée rapidement la présence de géothermie par un ou plusieurs forages dans le Trias. Cinq ans plus tard, début juin 2008, l'Andra fait finalement prolonger un forage (EST433) jusqu'à l'aquifère géothermique (voir pièce annexe 1).

L'Andra est le donneur d'ordre. Elle a choisi un groupement d'opérateurs pour réaliser des tests : Saunier & Associés - Solexperts – Intera (SIS). Le rapport définitif des opérateurs SIS est rendu en janvier 2009.

Six mois plus tard, en juillet 2009, l'Andra émet une Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 comportant deux paragraphes sur l'évaluation du potentiel géothermique du Trias qui reste à ce jour la dernière référence sur ce sujet (voir document 5 : §4.3.3, p. 104-110 et 5.3, p. 114).

Tout ce que dit cette synthèse des tests au Trias tient dans les phrases suivantes (les parties mises en gras le sont par nous) :

*"(...) une transmissivité de  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Un test de pompage réalisé sur l'intervalle du test (25 m) a produit  $35 \text{ m}^3$  d'eau de formation... (...) ( $4 \text{ à } 5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sous un rabattement de 30 m." (p. 105)*

*"Une formation montrant des bonnes transmissivités ( $8,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et **produisant environ  $5 \text{ m}^3/\text{h}$** ..."  
 "(...) **La production mesurée en test dans EST433 ( $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) est nettement inférieure à la gamme de débits des exploitations géothermiques ( $150 \text{ à } 400 \text{ m}^3/\text{h}$ ).**" (conclusion de §4.3.3, p. 109)*

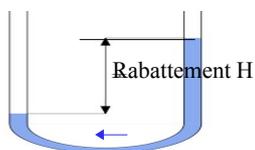
*"... montrent des transmissivités moyennes à bonnes ( $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ) et des productivités en test de  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  (sur 25 m)"*

*"... L'ensemble de ces résultats indique, **en référence à des installations géothermiques existant dans le bassin de Paris dans les mêmes gammes de température, que la ressource géothermique à l'échelle de la zone de transposition est faible.**" (conclusion de §5.3, p. 114)*

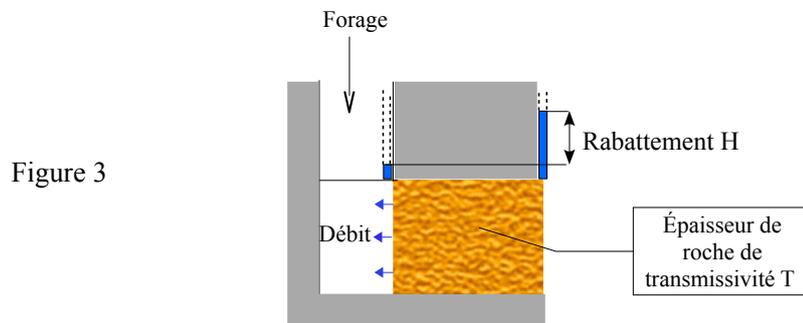
La transmissivité, parfois indiquée comme bonne, correspond à un débit qui n'est jamais omis :  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  (pour un rabattement de 30 m). Ce débit assimilé à la ressource géothermique est qualifié de "faible" et de "nettement inférieur" aux productions d'exploitations géothermiques. Les termes de "transmissivité" et de "rabattement" ne sont pas définis dans la synthèse.

Ces affirmations posent problème. En effet, la transmissivité,  $T$ , est la perméabilité (la facilité de l'eau à voyager dans la roche) multipliée par l'épaisseur (la perméabilité étant par définition la transmissivité pour une épaisseur de 1 m). Le rabattement  $H$  est une hauteur. C'est une manière visuelle traditionnelle de représenter une différence de pression (qui est cette hauteur  $\times$  la densité  $\times$  l'accélération de la pesanteur). Imaginons un tube en U (voir figure 2). Si l'on parvient à baisser le niveau d'un côté, le rabattement est la différence entre les deux niveaux d'eau (50 cm, 1 m, etc.). On comprend que dès qu'il y a rabattement, et plus il sera important, plus l'eau voudra aller du côté le plus haut vers le plus bas et dans ce cas, va couler dans la partie horizontale de la droite vers la gauche. L'hydrogéologie est l'application de cette règle.

Figure 2



Voici un schéma symbolique de forage (voir figure 3). En gris, sont dessinées des parties imperméables. Hormis la cavité du forage, la seule partie où l'eau peut passer est l'épaisseur de roche représentée. Si nous superposons par dessus le tube en U (représentation du rabattement/pression), la partie haute est à droite, la partie basse est au niveau du trou de forage à gauche. L'eau va donc vouloir aller de la droite vers la gauche, mais ici elle ne passe plus dans un tube mais dans la roche, puisque celle-ci est perméable. Elle coule donc dans le forage.



Les ouvrages d'hydrogéologie indiquent que, pour une configuration donnée (diamètre du forage par exemple), en régime permanent, le débit est calculé mathématiquement par :

$$\text{Transmissivité} \times \text{Rabattement} = \text{Débit}$$

(voir pièce annexe 3-II)

Dans la synthèse 2009 de l'Andra, la transmissivité est dite "bonne" et le rabattement de 30 m est important. Pourtant, le débit apparaît très faible. Or, il n'est pas possible d'avoir :

$$\text{Transmissivité bonne} \times \text{Rabattement important} = \text{Débit faible.}$$

L'information qu'apporte cette synthèse est donc une impossibilité physique. La conclusion annoncée ne peut pas être la bonne. Alors pourquoi un faible débit ?

### Une boue qui n'aurait jamais dû être là

Un forage consiste à creuser un trou de petit diamètre avec un trépan que l'on descend petit à petit en ajoutant à partir de la surface des tubes solides creux. Le tout tourne (système dit rotary). Un fluide est injecté au centre via cette colonne creuse. Il sort au niveau du trépan et remonte jusqu'à la surface sur les côtés. Afin de lubrifier la roche au niveau du trépan, de remonter plus facilement tous les débris et éviter des pertes d'eau dans les roches perméables traversées, on rend cette eau boueuse.

A la surface, on réalise un mélange, soit à partir de poudre, soit à partir de concentrat, avec l'eau afin d'avoir une boue ayant les propriétés désirées. Pour ces usages, la boue de type polymère (avec de longues molécules) a des propriétés gélatineuses. En pratique, un forage est donc presque toujours rempli d'eau boueuse. Précisons bien qu'il s'agit d'une boue artificielle, non issue du milieu. Si c'est la partie profonde qui intéresse, on tube la partie haute du forage (tubes étanches cimentés aux parois). La partie haute n'est plus alors qu'une voie de passage pour accéder à la zone d'intérêt en "roche nue" au fond.

C'est alors que l'on procède aux tests hydrauliques pour mesurer la perméabilité/transmissivité. On descend dans le forage rempli de boue un "train de test" (voir figure 4) composé d'un tuyau central creux qui se termine à la base, puis 25 m plus haut, par des obturateurs. Ces obturateurs sont des sortes de "chambres à air" qui entourent le tuyau central, que l'on gonfle via de petits tuyaux à partir de la surface, pour isoler cet intervalle des parties au dessous et au dessus.

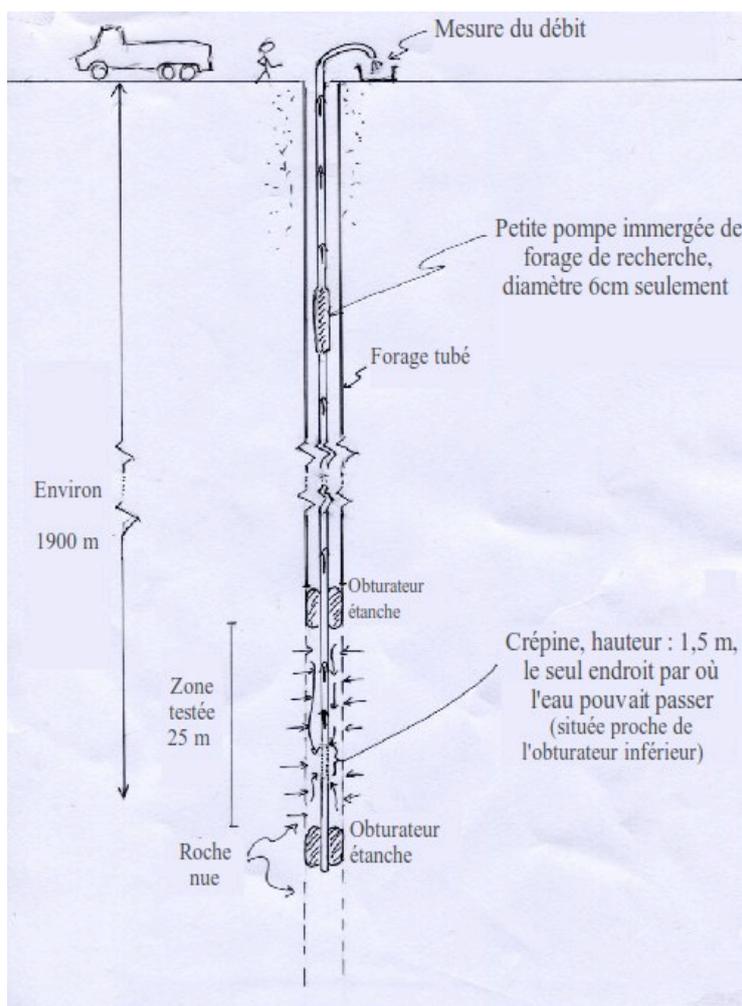


Figure 4 : Train de tests hydrauliques

Cet intervalle isolé est toujours traversé par le tube central étanche creux, colonne vertébrale qui tient le tout, mais qui comporte cette fois une longueur avec des trous, la crépine, sorte de passoire et le seul endroit par lequel on pourra échanger de l'eau (pompage ou injection) avec l'intervalle de test.

Au forage EST433, cette crépine n'était haute que de 1,5 m (voir document 6 : *SIS 2009, p. 109 "screen"*) et tout le débit devait passer par là. A cette étape, le puits est encore rempli de la boue de forage indésirable pour des tests hydrauliques de précision. Rappelons qu'un des buts de la boue est précisément de limiter les échanges d'eau avec les aquifères traversés dans les couches géologiques supérieures (sinon on a des pertes d'eau importantes, ce qu'on veut éviter pendant le forage). Il est cependant facile d'évacuer cette boue. Pour cela, une fois le train de test mis en place, seul l'obturateur inférieur est gonflé, pas l'obturateur supérieur. On envoie alors de l'eau propre par le conduit central. Cette eau sort par la crépine située à dessein en bas de l'intervalle de test et l'eau remonte à la surface sur les côtés. Après injection d'un certain volume, on sait que toute la boue polymère a été évacuée de l'intervalle de test. On gonfle alors l'obturateur supérieur et les tests peuvent commencer dans de bonnes conditions.

**Or, la lecture du rapport final des opérateurs SIS (en anglais et très technique) révèle qu'ils ont dû réaliser les tests dans le forage alors que l'intervalle étudié était toujours rempli de la boue polymère, ce que la synthèse Andra 2009 se garde bien de dire.**

La boue a notamment entouré et empli la crépine (voir figure 5). Il apparaît ainsi que l'appareillage était affecté de multiples obstructions.

Figure 5 : Photo du rapport des opérateurs et sa légende

**Crépine ressortie du forage**

Cylindrique, elle est suspendue verticale au centre couleur sombre métallique (elle a un sillon central) et est enveloppée de boue. Les ouvertures pour le passage de l'eau, des fentes horizontales très très fines et rapprochées, forme comme une sorte de décoration dont on voit aussi l'empreinte sur le pan de boue ouvert à droite (encore plus à droite il y a un câble et des choses en arrière plan).

Le manteau de boue dense et épais (ou "cake") couvre encore la crépine à gauche, il est ouvert en haut à droite et cassé en bas à droite (voir document 6 : SIS 2009, p. 130)

**Il est très difficile à l'eau de passer dans de telles conditions.**



**Photo 3 :**

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

Le rapport final des opérateurs (voir document 6 : SIS 2009, p. 13) indique que :

*"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 [figure 5 ci-dessus]). De plus, la crépine était remplie de boue solide jusqu'à proximité de son sommet."*

Lorsque les forages étaient réalisés pour la géothermie dans le bassin de Paris il y a 30 ans, on les finissait presque toujours uniquement à l'eau salée avec moins de 10 % (/poids de sel) de polymères biodégradables. Puis les contacts étaient traités à l'acide et dégorgés. Les nombreux rapports de ces forages, accessibles sur internet, montrent qu'il n'y avait aucune boue résiduelle au moment de commencer les tests (ex. Garges-les-Gonesse ; voir document 7 : BRGM 1983, p. 16).

De plus, l'équivalent suisse de l'Andra (voir document 8 : Nagra; Moe et al. 1990, p. A8, A10, A12...) met à disposition sur le net une étude sur des tests anciens (1983-85) de son forage de Schafisheim près de Zurich qui montre que tous les tests qui avaient été réalisés en boue, et uniquement ceux-là, présentaient des traces d'obstruction de l'outil avec un résultat accompagné de la phrase suivante :

*".. ne devraient pas être considérés comme représentatifs."*

Il allait donc de soi que deux hydrogéologues de l'Andra en 1994, dont celui qui deviendra directeur scientifique du laboratoire de Bure au moment du forage EST433, donnent la marche à suivre pour les reconnaissances des sites de stockage.

Après avoir expliqué pourquoi on utilisait de la boue en forage, ils écrivent (voir document 9 : Delay et Aranyossy 1994, p. 55 ; mis en gras par nous) :

**"la destruction du cake avant les tests est donc impérative"**

*"... avant chaque série de tests, on réalise un nettoyage de l'ouvrage. L'opération consiste à **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. Cette opération **doit systématiquement être réalisée** sous la surveillance de l'hydrogéologue et doit être considérée comme **première étape** d'un programme de test."*

De même, 6 mois avant le forage, l'expert privé du CLIS du Laboratoire de Bure, après un long échange avec le directeur du Laboratoire de Bure et un troisième hydrogéologue de l'Andra, ce dernier présent sur place

lors des tests hydrauliques du forage EST433 (voir document 10, *CLIS de Bure plénière du 27/11/2007*) indique que :

*"(...) nous pourrions imaginer que la boue puisse colmater partiellement autour du forage la roche, ce qui évidemment nous empêcherait d'avoir une idée très claire du débit possible" (p. 17)*

*"(...) 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. D'autres techniques permettent éventuellement de s'assurer que toute la boue a bien été nettoyée pour avoir fait des prélèvements fiables et caractéristiques de la base du Trias." (p. 18)*

C'est donc l'inverse des bonnes pratiques et des règles de l'Art et l'inverse de ce qui avait été annoncé que l'Andra a fait réaliser à ses opérateurs.

C'est ainsi que le contrôleur, Egis-géotechnique, écrit que le test n° 1 n'est pas interprétable (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 6*) ainsi qu'une bonne partie du test n° 2. Seule une séquence de ce dernier est utilisable (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 8-9*).

### **En quoi la présentation de l'Andra est fausse**

Les opérateurs SIS, malgré la présence de boue, déterminent la perméabilité de la roche. La synthèse 2009 de l'Andra lie les 5 m<sup>3</sup>/h à un rabattement de 30 m, en cachant la réalité physique. Elle met en lien des chiffres qui n'ont rien à voir les uns avec les autres.

Les opérateurs SIS ne donnent que la perméabilité/transmissivité (voir document 6 : *2009 tableau 1 p. 8* ; avec deux autres paramètres mais qui sont hors propos ici). Cela peut paraître paradoxal mais ça ne l'est pas. En effet, en présence d'un écran de boue sur les parois d'un forage, la perméabilité peut néanmoins être estimée notamment par un modèle pétrolier de référence, celui de Horner (voir pièce annexe 3-IV).

Si l'on applique l'égalité  $\text{Transmissivité} \times \text{Rabattement} = \text{Débit}$ , avec la transmissivité ainsi calculée par les opérateurs SIS, on obtient un débit de l'ordre de 190 à 380 m<sup>3</sup>/h pour l'ensemble de ces grès (voir pièce annexe 3-II).

La transmissivité/perméabilité (seule grandeur recherchée) est "*bonne*". Ainsi, le Trias est un bon aquifère géothermique. Cela confirme donc les rapports du Service géologique de l'État établis 30 ans auparavant et le terme "*bonne productivité*" indiqué depuis longtemps sous l'emplacement proposé pour CIGEO (voir figure 1).

La Commission Nationale d'Évaluation (CNE) indique, dans son rapport 2010 (voir document 12 : *annexes, p. 14*), que la transmissivité moyenne des exploitations géothermiques du bassin de Paris (référence utilisée par l'Andra) est de  $1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . Cela n'est autre que la valeur mesurée à Bure, mais pour une épaisseur de 25 m. Comme les grès Trias font au moins 120 m d'épaisseur (voir document 5 : *Andra 2009, p. 106*), la transmissivité, et donc la productivité d'exploitation géothermique sous la zone de Bure, sera forcément supérieure à celles des exploitations parisiennes.

La conclusion de la synthèse, indiquant que "*la ressource géothermique à l'échelle de la zone de transposition est faible*", est écrite en déni des données. Si le débit a été faible pour une valeur importante de rabattement et une bonne perméabilité, c'est à cause de l'impressionnant filtre de boue. Cela n'a rien à voir avec la roche puisque la simple égalité  $\text{transmissivité} \times \text{rabattement} = \text{débit}$  ne fonctionne plus.

Comme l'écrit la CNE (voir document 12 : *CNE 2010, p.14*) :

*" la productivité observée lors des tests ne peut être considérée comme représentative de celle d'une installation industrielle"*

Ces 5 m<sup>3</sup>/h sont inhérents au protocole expérimental destiné à évaluer la perméabilité/transmissivité. Ces petites pompes à faible débit sont utilisées dans la plupart des tests de pompage. Ces 5 m<sup>3</sup>/h correspondent à la puissance maximale de la petite pompe de recherche utilisée dans les conditions extrêmement mauvaises de ce test. Aucun test de productivité à grande échelle pour évaluer un débit d'exploitation commercial réel n'a été réalisé. Cette valeur de 5 m<sup>3</sup>/h n'a absolument rien à voir avec le potentiel géothermique de l'aquifère.

Finalement, l'Andra a rebouché ce forage au Trias neuf mois après l'avoir fait (voir document 13 : *Andra 2010 t.1, p. 38*), alors même que plusieurs autres, plus anciens ou du même âge, sont maintenus ouverts (voir document 13 : *Andra 2010 t1 p. 16, p. 91*).

Cette fermeture, plutôt discrète, a été réalisée en dépit des recommandations de la CNE dans son rapport 2008 (voir document 14 : *CNE 2008, p. 28*) :

*« La Commission recommande que le forage au Trias qui constituera un ouvrage exceptionnel d'accès à un aquifère profond du Bassin parisien soit conservé pour être inclus dans le dispositif de surveillance à long terme de l'Andra et pour permettre des recherches futures sur le comportement hydrodynamique et hydrochimique du Trias. »*

Cette présentation erronée du débit attendu en exploitation n'est pas un acte isolé.

Bien avant ce forage, l'Andra avait déjà menti sur la valeur du "gradient géothermique" pour minimiser l'intérêt d'une exploitation géothermique (voir pièce annexe 2).

La ressource géothermique a ainsi été présentée pendant des années comme inintéressante alors qu'il n'en est rien (voir pièce annexe 4).

### Pièces jointes

Pièce annexe 1 : Géothermie : le facteur temps

Pièce annexe 2 : Géothermie sous la zone de Bure : températures

Pièce annexe 3 : Éléments techniques

Pièce annexe 4 : Bure, un site géothermique unique : puissance et durabilité

# Pièce annexe 1

## Géothermie : le facteur temps

### Résumé :

Pendant 9 ans, l'Andra n'a rien dit du bon potentiel géothermique, pourtant connu, du Trias, situé sous la zone qu'elle a choisie pour l'implantation de CIGEO. Après la révélation de A. Mourot en 2002, les demandes de forage seront repoussées pendant 3 ans et demi par l'Andra. Mais, une fois le site de Bure définitivement assuré suite à l'adoption d'une loi sur le stockage géologique en profondeur, l'Andra prendra elle-même l'initiative d'un forage. A cause du facteur temps, les géothermiciens ADEME/BRGM n'ont pas pu obtenir de données sous le Laboratoire de Bure. Ils avaient pourtant exprimé leur intérêt pour le Trias de Bure pour la première grande étude géothermique française depuis celles des années 80 (dite "CLASTIQ"). L'Andra, quant à elle, s'est dépêchée de faire procéder à des analyses sur les couches profondes. En effet, lorsque la loi du 28 juin 2006 a été adoptée, l'Andra n'avait aucune donnée valable à fournir pour les simulations concernant la partie profonde du "schéma hydrogéologique régional" alors qu'il s'agit d'un critère "essentiel".

|   |    |
|---|----|
| I. A l'aube du projet : 1993.....   | 1  |
| II. De janvier 1994 à décembre 2002, le silence.....  | 2  |
| III. De décembre 2002 à l'été 2006 : demandes de forage écartées avec une argumentation qui, quand elle existe par écrit, se contredit, est dérisoire, fautive ou contestable :.....                                | 3  |
| a) "La vie du Labo".....  | 4  |
| b) La lettre du Président.....  | 4  |
| c) "L'inventaire" 2004.....   | 5  |
| d) Le Dossier 2005 Argile.....  | 8  |
| IV. 28 juin 2006 : sur la base du "Dossier 2005 Argile", le parlement vote une loi qui est un choix géologique : celui exclusif de la zone du Laboratoire de Bure, pour l'étude d'un stockage géologique Cigéo..... | 9  |
| V. 2006-2008 : Étude nationale sur la géothermie ("CLASTIQ") : aucun accès au Trias sous le laboratoire pour les géothermiciens du BRGM.....  | 9  |
| VI. Le choix géologique de Cigéo n'a pu se faire qu'à l'aveuglette.....   | 11 |

### I. A l'aube du projet : 1993

Histoire d'un instant, la présence de l'aquifère du Trias inférieur (Buntsandstein) en tant que cible géothermique a été évoquée par le médiateur lors du choix du site (voir document 15 : *Bataille 1993, successivement Annexes Haute-Marne puis Meuse*) :

*"Par ailleurs, la partie Nord du département se situe hors des zones favorables à une exploitation géothermique, même en ce qui concerne les formations gréseuses aquifères du Trias de la base de la série car leur salinité et leur faible température les rendent peu intéressantes."*

*"Dans le département de la Meuse, les grès vosgiens (240 Millions d'années) qui constituent le niveau aquifère susceptible d'être exploité comme ressource géothermique, se situent à grande profondeur (1000 mètres à Courcelles). Ce réservoir est protégé par les argiles du Trias supérieur."*

Mais c'était pour nier son intérêt avec des avis qualitatifs partiels vagues et dérisoires.

Comparons cet "avis" avec le rapport de référence, Maget et Rambaud (voir document 16 : *Maget et Rambaud 1979, p. 34*) :

*"Le réservoir du Trias présente les caractéristiques les plus intéressantes au Sud de la région, autour d'un axe passant par Joinville - Bar s/ Seine, les conditions optimales étant du côté oriental."*

Ce coté oriental correspond à l'emplacement précis où a été installé le Laboratoire (voir figure 1 de la synthèse générale). Le forage pétrolier réalisé en 1989, à 7 km de là, avait confirmé ces conclusions (voir document 17 : *Coparex 1989, p. 14-15, p. 31* ; les passages soulignés le sont aussi dans le rapport) :

*"Buntsandstein (1396 - 1447m) : - la partie supérieure (1396 - 1427m) présente une série de bancs gréseux, épais de 2 à 6m, séparés par des niveaux métriques d'argile et d'anhydrite. L'épaisseur brute cumulée des grès est de l'ordre de 25m, soit 80% du total. Il s'agit de grès moyens à grossiers, dans l'ensemble assez "propres", peu cimentés, manifestement poreux et perméables.(...) - Le Buntsandstein est aquifère, sans indices [d'hydrocarbures]. L'eau de formation est vraisemblablement très peu saline, identique à celle de LGe 1 (5g/l NaCl selon le TEST n°10)." (...) "conclusions... Les grès du Buntsandstein terminal... constituent un excellent réservoir."*

Il n'y avait pas de raison d'affirmer que la température était faible (voir pièce annexe 2). Quant à la salinité, d'une part, on ne la connaissait pas d'avance ; d'autre part, elle n'est pas un obstacle important, les fluides profonds, souvent des saumures, étant exploités pour la géothermie depuis 10 ans. A Thisted, au Danemark, on exploitait, depuis 1984, une saumure à 180g/l de sels totaux à partir de grès Trias. L'option a été prise simplement de mettre un tubage en acier avec une certaine épaisseur pour prévenir la corrosion (3 mm pour corrosion observée de 0,06 mm/an) et aucun problème n'est mentionné depuis (voir documents 18 et 19 : *Mahler 1995 ; Mahler et Magtengaard 2010*). Les allemands optent souvent pour des tubes en fibre de verre renforcée, ce que la France a fait aussi à Melun l'Almont en 1995 (tube interne en verre-résine thermodurcissable qui peut être relevé ; voir document 20 : *Lemale et Jaudin, p. 110*). Plusieurs autres exploitations géothermiques de saumures ont été mises en route après Thisted. Voici plusieurs exemples, chez nos voisins, de pompage et de réinjection de la saumure dans des grès profonds : Warren 1985 : 158g/l ; Neubrandenburg 1989 : 130g/l ; Neustadt-Glewe 1995 : 219g/l ; Pyrzyce 1997 : 125g/l ; Neuruppin 2007 : 199g/l ; Bruchsal 2009 : 125g/l ; Copenhague 2010 : 215g/l ; Groß Schönebeck : démonstration en cours au Permien à - 4200 m : 255g/l. En comparaison, la mer Morte contient 330g/l.

## II. De janvier 1994 à décembre 2002, le silence

Jamais, de 1994 jusqu'à la révélation de A. Mourot en 2002, l'Andra ne parlera des grandes études du service géologique de l'État (BRGM) relatives au potentiel géothermique de la France et, plus précisément, du potentiel du Trias inférieur à la limite Meuse/Hte-Marne. Dans le Dossier 2001 Argile (voir document 21 : *Andra 2001 b, A, p. 66*), s'agissant des "ressources naturelles sur le secteur d'étude", elle ne parle que de niveaux charbonneux profonds décrits comme peu attractifs et conclut :

*"l'analyse de sûreté n'a pas mis en évidence d'éléments rédhitoires, ce qui invite à poursuivre sur la voie tracée..."* (voir document 21 : *Andra 2001 b, A, p. 159*).

Aucune étude n'est donc annoncée sur le sujet des ressources. Loin dans le texte, dans des paragraphes très théoriques d'analyse de sûreté (voir document 21 : *Andra 2001 b B, p. 238, aussi A, p. 115*) et à la fin d'une liste d' "éléments perturbateurs" possibles incluant d'abord une glaciation et un réchauffement climatique, on trouve :

*"l'exploitation de ressources géothermiques (assimilé au forage profond d'exploration d'eau)", avec "Les forages profonds ont été considérés comme les événements externes les plus pénalisants."*

Dans le Référentiel Géologique 2001, il existe un chapitre intitulé "Existence de ressources naturelles exceptionnelles" (voir document 22 : *Andra 2001 a, t.2, chap. II.5, p. 15-17*). Cet adjectif n'a aucune définition scientifique et a été importé d'un autre contexte. Dans ce chapitre, sont présentés charbon et hydrocarbures et il est conclu, en lien avec le titre, que ce ne sont pas des ressources "exceptionnelles". Il faut au moins se pencher sur la question pour pouvoir le dire. Là non plus, aucune référence n'est faite aux grands rapports phares BRGM sur la ressource géothermique, y compris sous la zone étudiée...

Comme l'a fait remarquer A. Mourot en 2002, cette absence de toute considération pour la géothermie est d'autant plus incompréhensible qu'il est écrit dans le même document que, dans les forages régionaux, les perméabilités dans le Trias sont "*fortes*" (voir document 22 : *Andra 2001 a, t.2, IV.1.1.8, p. 6*) et, à titre d'hypothèse dans la modélisation pour la zone considérée, il est indiqué qu'elles pourraient être de  $10^{-4}$  m/s (voir document 23 : *Andra 2001 a, t.5 II, p. 4*), ce qui serait une perméabilité particulièrement élevée en profondeur.

A. Mourot (voir document 4 : *Mourot 2002, p. 4*) a souligné aussi que les données du potentiel géothermique ont été cachées lors des enquêtes publiques interdépartementales (Meuse/Haute-Marne) sur la demande d'autorisation d'implantation et d'exploitation (DAIE), le permis de construire ainsi que sur le dossier de 1997 relatif à la loi sur l'eau.

### **III. De décembre 2002 à l'été 2006 : toutes les demandes de forage sont écartées**

En décembre 2002, A. Mourot révèle au public et au CLIS l'existence des grands rapports que l'État avait commandité au BRGM suite aux chocs pétroliers. En 2003, les collectifs opposés à l'enfouissement font un courrier à tous les élus à ce sujet (300 envois). Les espoirs, notamment économiques, que ces synthèses du BRGM avaient fait naître à l'époque ont ainsi de nouveau émergé (voir document 24 : *Fleury 2003*).

Il est alors devenu impossible pour l'Andra d'ignorer la question. Ont ainsi commencé 3 ans et demi de déni de la ressource géothermique, notamment par des affirmations orales qualitatives n'employant pas la forme conditionnelle : "*faible chaleur*", quantité d'eau "*limitée*", salinité "*inadéquate*" (voir document 25 : *Directeur de Bure, Bureau 28 janvier 2003, p. 3*) ; "*pas exceptionnelle*", "*le débit est faible*" (voir document 26 : *Directeur Général de l'Andra, Plénière du 26 mai 2003, p. 18*).

Plusieurs membres d'opinions diverses du bureau du CLIS de Bure ont demandé la prolongation ou la réalisation d'un ou de plusieurs forages profonds pour voir ce qu'il en était (voir document 26 : *CLIS Plénière du 26 mai 2003, p. 6, 15 et 18* ; voir document 27 : *Bureau 17 novembre 2003, p. 3 et 4* ; voir document 28 : *Plénière du 15 janvier 2004, p. 26 et 28*).

L'Andra a répondu qu'elle ne le ferait pas si cela gênait ses "*objectifs hydrogéologiques initiaux*", mais qu'elle ferait des mesures dans ses forages réalisés en 2003 (voir document 26 : *citation du Directeur de Bure par la Vice Présidente, CLIS Plénière du 26 mai 2003, p. 6*). Un membre du bureau du CLIS a expliqué que réaliser des mesures dans les forages de 2003 n'apporteraient pas la réponse puisque tous s'arrêtaient vers 800 m (voir document 28 : *Plénière du 15 janvier 2004, p. 28*). Mais, le directeur du Laboratoire de Bure a indiqué, sans employer le conditionnel, que :

*"... il n'existe pas... de ressources géothermiques exceptionnelles... c'est effectivement la conclusion à laquelle nous sommes arrivés aujourd'hui."* (voir document 28 : *Plénière 15 janvier 2004, p. 25*).

Lors de la réunion suivante du bureau du CLIS (voir document 29 : *Bureau 11 février 2004, p. 2-3*), le directeur du Laboratoire de Bure indiquait que le CLIS pouvait lui-même prendre en charge la prolongation d'un forage jusqu'à la ressource géothermique. La DRIRE ajoutait aussitôt que cela pourrait nécessiter la réalisation d'une enquête publique. Le préfet confirmait alors qu'un tel forage "*complémentaire*" serait à la charge financière du CLIS (voir document 30 : *Bureau 5 avril 2004, p. 3*). Le directeur du Laboratoire de Bure indiquait une nouvelle fois, sans employer le conditionnel, que :

*"... les recherches menées par l'Andra... sont suffisantes pour montrer que les conditions ne sont pas favorables à une exploitation de ressources géothermiques"* (voir document 30 : *Bureau du 5 avril 2004, p. 3*).

Pourtant, la géothermie était absente des documents de référence de l'Andra ("*Référentiel géologique 2001*" et "*Dossier 2001 Argile*"). Toutes ces affirmations ne reposaient alors sur aucun fondement.

### a) "La vie du Labo"

Dans le journal de l'Andra, "La vie du Labo" n° 22 (voir document 31 : *La vie du Labo n° 22, mai-juin 2003, p. 10*), a été publié un article intitulé "Le sous-sol de Bure recèle-t-il des ressources géothermiques ?". Cet article commence par présenter de façon erronée la température (voir pièce annexe 2). Puis, c'est au tour de la productivité :

*"des essais de pompage réalisés dans le forage profond de Germisay à une dizaine de kilomètres au Sud du laboratoire n'ont permis de retirer qu'un très faible débit d'eau boueuse. Ce résultat s'explique car le laboratoire se trouve sur la bordure Ouest de l'aquifère du Trias dont les caractéristiques vont en se dégradant d'est en ouest."*

Il ne s'agissait en aucun cas d'essais "de pompage". Dans ces tests, fort brefs, pendant les forages, les pétroliers n'utilisent pas de pompe. Il s'agit simplement de petits essais "de production" appelés "slug tests". Pour les essais de Germisay (réalisés en 1955-1956), la méthodologie était encore primitive. Ils étaient à cheval sur les contacts supérieur et inférieur du Trias inférieur qui n'était donc que partiellement concerné (pour 1/3 seulement pour l'essai sur le contact supérieur avec le Trias moyen : le n° 9 ; pour les 3/4 pour celui au contact inférieur avec le Permien : le n° 10)<sup>1</sup>. Toutes les eaux des essais de production pendant ce forage de Germisay, à partir du test n°1 et jusqu'au test n° 12, portaient de la boue artificielle utilisée pour le forage car on procédait sans nettoyage (boue bentonite de l'ordre de 50 kg/m<sup>3</sup> d'eau + matières organiques, dite "rouge à l'amidon" au niveau du Trias ; voir document 32 : *SNPA, rapport mensuel déc. 1955*). Cela n'a rien à voir avec la roche du Trias et le contenu NaCl de "la boue témoin" artificielle est donné en référence avec chaque test (voir document 33 : *SNPA 1956, tableau des tests situé sous le Log de forage ;*). Il n'y a pas de données de débit ni de variation de pression/rabattement digne de ce nom, aucun moyen de quantifier l'effet de la pellicule de boue sur les parois du forage ou la crépine, etc. Aucun calcul n'est possible. On a seulement la quantité d'eau récupérée, le temps du test et la pression (sauf pour l'essai sur le contact supérieur). Dans ces tests de production, la différence de pression/rabattement diminue au fur et à mesure que l'eau est produite puisqu'elle ne peut s'échapper qu'en s'élevant dans le tube central du forage. On ne connaît pas, pour ces essais, la pression dans le tubage avant le démarrage de chaque production et donc le rabattement, sans lequel on ne peut strictement rien dire (voir synthèse : débit = transmissivité × rabattement). La pellicule de boue est une donnée essentielle qui bouleverse les données de la première heure d'un test (pièce annexe n°3-IV-d). Or ces tests n'ont duré qu'une heure ou à peine plus.

Ces tests à une seule séquence donnaient seulement un grossier aperçu d'un terrain inconnu. Ils indiquaient au passage que l'horizon testé pouvait produire de l'eau, mais la seule information qui intéressait était, ici pour le test n° 9 (contact supérieur du Buntsandstein) :

*"...dans l'ensemble gréseux, localement poreux et perméables, peuvent constituer un réservoir, sous la couverture argilo-dolomitique..."* (voir document 33 bis : *SNPA, 1956, Dossier de fin de sondage, p. 19 ;* la partie soulignée l'est dans le rapport), réservoir de gaz/hydrocarbure s'entend pour de tels opérateurs.

Dans l'article de La Vie du Labo, rien n'est dit sur les rapports phares du BRGM (qui intégraient les données du forage de Germisay de 1956), ni sur le forage de Lezéville de 1989 situé entre le Laboratoire et le forage de Germisay (tous visibles sur la figure P4-2 de la pièce annexe 4).

### b) La lettre du Président

Par un courrier du 17/12/03, le président du CLIS (aussi préfet de la Meuse) a interrogé l'Andra concernant le respect de la RFS III.2.f au regard de la géothermie. Le président de l'Andra lui a répondu par courrier du 15/01/04 (voir document 34 : *réf. Pdt/04-0001*). Selon lui, les investigations BRGM sur la géothermie de

<sup>1</sup> Après avoir descendu un "tester" (un "train de test" conçu pour s'accrocher au bout de gros tubes solides utilisés pendant les forages), sa valve d'obturation est ouverte après isolation de la zone au-dessus du forage par un obturateur. La base du "tester" touche presque le fond du trou car ces tests sont réalisés en cours de forage. L'intervalle fond de trou et obturateur est d'une trentaine de mètres. Une crépine est située à un endroit donné. Avant qu'on ouvre la vanne d'obturation, l'intérieur de la colonne des tubes de forage au-dessus est en partie vidée pour qu'elle puisse recevoir le fluide.

1974 à 1983 ont été "examinées" lors du DAIE :

*"De l'analyse de ces dernières, il ressort que les horizons géologiques, dans cette partie Est du Bassin de Paris, sont peu propices pour une exploitation géothermique :  
- les horizons concernés (Trias inférieur) sont très profonds.  
- 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.  
- la salinité de l'eau est très importante."*

*"Depuis 1983, date de la dernière synthèse, plusieurs forages pétroliers ont été réalisés dans l'Est du Bassin de Paris : l'Andra a fait l'inventaire des données... (...)*

*"Il ressort que les conclusions antérieures sont confirmées pour le Trias inférieur : la faible perméabilité globale de la formation n'est pas favorable à une production d'eau significative, condition indispensable pour une utilisation géothermique. Sa forte salinité laisserait de plus prévoir une corrosion importante d'éventuelles installations." (...)*

Ces affirmations sont, pour les unes, insignifiantes, pour les autres, mensongères (voir, par exemple, les extraits du rapport du forage de Lezéville pour "les" forages récents). Ces données (grands rapports du BRGM de 1976 à 1983 ; forage Lezéville) ne sont toujours pas présentées en dépit de la controverse.

Dans sa lettre, le président de l'Andra indique également :

*"Enfin il convient de noter que la détermination des ressources géothermiques françaises ne relève pas des compétences de l'Andra. Il apparaît que les deux établissements concernés seraient plutôt l'ADEME et le BRGM..."*

Cet argument avait déjà été employé par le directeur général de l'Andra (voir document 26 : *Plénière CLIS 26 mai 2003, p. 19*) :

*"Ce n'est pas à l'Andra d'aller caractériser les ressources géothermiques en France"*

ou encore par le directeur du Laboratoire de Bure (voir document 27 : *Bureau CLIS 17 nov. 2003, p. 3*) :

*"... la mission de l'Andra n'est pas de faire de telles recherches."*

Il ajoutera même (voir document 28 : *Plénière du 15 janvier 2004, p. 26*) :

*"...de toute façon je crois qu'elle n'en aurait pas les compétences..."*

Le directeur du Laboratoire de Bure apportera quelques précisions trois mois plus tard (voir document 29 : *Bureau CLIS du 11 février 2004 p. 2* ; résumé par les soins d'un salarié du CLIS) :

*"... précisions à la lettre de M. Le Bars adressé au CLIS... il appartient bien à l'Andra de vérifier l'absence de ressources géothermiques (ou autres) exceptionnelles, mais pas d'étudier la faisabilité technico-économique de leur exploitation."*

### **c) "L'inventaire" 2004**

Une synthèse actualisée des données existantes est donnée au CLIS deux mois plus tard (voir document 35 : *Andra 2004 b*). Le rapport Maget et Rambaud de 1980 révélé par A. Mourot en 2002 est vaguement cité en début de texte (ce sera la première et dernière fois). Rien est dit sur la caractéristique principale de cette zone : le "golfe" du Buntsandstein décrit en détail par ces auteurs (voir figure 1 de la synthèse générale). La stratégie de l'Andra a été de cacher l'existence de ce "golfe" qui est l'un des traits marquants de la géologie française (voir document 36 : *Mégnyen 1980, vol. I p. 65 et 69, vol. II carte TR4*). Le rapport Maget et Rambaud ne figure d'ailleurs pas dans la bibliographie de cette synthèse actualisée de l'Andra, pas plus que Desplan et al. (1981) sur le département de la Meuse et cité par A. Mourot en 2002.

Ce rapport Andra 2004 b donne bien les données régionales pétrolières gardées par le BRGM. Pourtant, pour la zone étudiée, la présentation du gradient géothermique est fausse (voir pièce annexe 2).

La perméabilité est traitée en un seul paragraphe au cours des deux dernières pages, simplement en présentant des mesures "moyennes" que les pétroliers ont réalisées sur des carottes de forages. L'Andra a calculé des transmissivités à partir de ces mesures, alors que le BRGM ne l'a pas fait pour ces raisons :

*"Les perméabilités mesurées sur des échantillons provenant de carottes n'ont pas été utilisées pour le calcul des transmissivités, étant donné qu'il s'agit d'une mesure qui ne correspond plus aux conditions de fond. Les analyses sur carottes ont toutefois une valeur indicative pour déceler les roches imperméables bien que poreuses."* (voir document 37 : Housse et Maget 1976, p. 42)

*"- de mesures sur carottes, dans quel cas les valeurs sont trop dispersées et n'ont pas de signification"* (voir document 38 : Maget 1983, p. 163 ; voir document 38bis : Maget et Rambaud 1980, p. 21)

*"Dans certains cas la perméabilité peut être mesurée sur carottes. Il convient de considérer avec prudence, les données de ce type qui peuvent ne pas être généralisables à l'ensemble des réservoirs."* (voir document 39 : BRGM 1984, p. 17).

La signification très relative qu'il faut accorder aux mesures sur carottes a été confirmée, notamment sur le Dogger exploité pour la géothermie en région parisienne :

*"Peut-être l'aspect le plus important de l'analyse d'écoulement est que la perméabilité intrinsèque moyenne des couches (2-3 darcies) obtenue dans les tests est 10 fois plus grande que la valeur équivalente déterminée sur des échantillons de forages au laboratoire."* (voir document 40 : Menjoz et al. 1993, p. 161) [l'unité darcy est présentée en Pièce n°3-III ; Pour mémoire, la perméabilité est de l'ordre de 3,6 darcies dans le test n° 2 au Trias sous Bure : Pièce n°3-IV-c]

Dans son rapport de 2004, l'Andra conclut (voir document 35 : Andra 2004 b, p. 26 ; mis en gras par nous) :

*"...grès du trias inférieur... : leur épaisseur diminue fortement d'est en ouest en même temps que les grès se chargent en argiles, **la productivité attendue est faible**... (...) tout ceci conduit à conclure que le secteur étudié par l'Andra ne dispose pas de ressources géothermiques exceptionnelles."*

Les 12 chiffres de "moyennes" de mesures centimétriques sur carottes donnés montrent une variation d'un facteur 580. Chacun de ces 12 chiffres est lui-même la "moyenne" d'une variation qui peut être encore bien plus vaste. Par exemple, pour le forage Ancerville-1 pour lequel le rapport Andra 2004 b donne une "moyenne" assez faible, les chiffres réels varient de 0,005 à 640 mD (milliDarcies), soit une variation d'un facteur 128 000. Bien qu'une valeur de 0,64 darcy ne soit pas particulièrement grande [au EST433 c'est ~ 3,5 darcies, soit 5 fois plus], le rapport des opérateurs commente :

*"Conclusion, ces grès sont donc très poreux et perméables à très perméables."* (voir document 41 : RAP 1954 "Commentaires... perméabilité", p. 6)

Ce qu'on veut connaître, c'est la perméabilité des bancs de grès, même s'il y a des bancs argileux peu perméables entre. De plus, pour le calcul de transmissivité, le rapport Andra 2004 b utilise une épaisseur relativement aléatoire puisque le forage s'arrête au milieu de grès poreux et que, par conséquent, leur épaisseur totale n'est pas connue. Le rapport Andra 2004 b ne tient pas compte non plus des 40 m presque continus de "grès bigarrés" de la base du Trias moyen, eux aussi décrits par les opérateurs comme "*très poreux et perméables*" (voir document 41 : RAP 1954 "comparaison... perméabilité", p. 5). Or, ils sont à ajouter à la cible géothermique pour un forage d'exploitation (voir document 42 : Géochaleur 1982, p. 53-58).

Les pétroliers ne carottent pas beaucoup. Les carottes existantes ne représentent donc verticalement qu'une toute petite partie de la formation (quelques %). Latéralement, les forages utilisés pour leurs carottes

centimétriques dans le rapport Andra 2004 b, et qui sont censés donner des informations sur le site de Bure, sont étalés sur ~ 80 km sur une ligne Sud-Ouest - Nord-Est entre Der101 (champagne humide) et Bois Ste Catherine1 (au Nord de Commercy en Lorraine, Côtes de Meuse). Et sur une ligne Ouest-Nord-Ouest – Est-Sud-Est ils sont étalés sur ~ 80 km entre Heiltz-le-Hutier1 et Colombey-les-belles1.

Six des forages utilisés pour ces carottes étaient connus du BRGM. Parmi les nouveaux, deux sont en dehors du "golfe" des grès du Trias (à des endroits où il y a très peu de Trias inférieur et qui correspondent à un environnement sédimentaire différent) : TF102 et HLH1 dont un (Heiltz le Hutier1) situé à 50 km à vol d'oiseau au Nord-Est de Bure, dans le Perthois, entre Vitry-le-François et St Dizier. Trois autres viennent des environs proches de Bar-le-duc. On ne comprend alors pas comment l'Andra parvient à cette nouvelle conclusion alors qu'elle écrivait, trois ans auparavant (voir document 4 : *Mourot 2002*, p. 3 ; mis en gras par nous) :

*"Des forages pétroliers profonds, réalisés dans les secteurs de Commercy (1200 m), Bar-le-Duc (1700- 1800 m) et Ancerville (1600 m)... Les perméabilités y sont fortes ( $10^{-6}$  à  $10^{-5}$  m/s) et les débits de production peuvent atteindre 50 à 80 m<sup>3</sup>/h [2]. " [2] : "ANTEA - Rapport Andra n° 6BM RP ANT 94-001 (1994) — Département de la Meuse. Synthèse des données hydrogéologiques. Réalisation de cartes thématiques. (MAIAUX C). " (voir document 22 : *Andra 2001 a*, t.2, chap. IV, p. 6 et 17)*

En dépit de l'utilisation exclusive de cette méthode particulièrement aléatoire, pour le forage Lérouville1 près de Commercy (~ 30 km de Bure), l'Andra parvient à une transmissivité de 26 D·m (darcy-mètre) ce qui est déjà une propriété de ressource économiquement avantageuse. Dans le rapport Maget (voir document 38 : *1983, annexe II*), la transmissivité de 31 forages toujours exploités au Dogger est de ~ 44,5 D·m et elle commence à 8,3 D·m (injecteur d'Evry) avec 9 D·m et 18,5 D·m à Chatenay-Malabry, 22,7 D·m et 20,6 D·m à Ris Orangis, 28 D·m, 19 D·m, 14,6 D·m et 33,3 D·m à La Courneuve Nord et Sud...

[nota : au EST 433 à Bure, rien qu'avec le seul intervalle du test n° 2 de 25 m, l'analyse des données de test dans les règles de l'Art donne une valeur déjà nettement supérieure : 90 D·m (voir pièce annexe 3 IV-c), or le Buntsandstein à Bure est épais de >120m...].

Plus remarquable encore, est le sort réservé au forage pétrolier de Lezéville. Ce forage dans le "golfe" des grès du Trias inférieur à 7 km au sud de Bure (voir figure P4-2 de pièce annexe 4) a été réalisé 3 ans avant que l'Andra ne vienne sur ce site. Il figure bien dans le tableau de nouvelles données du rapport Andra 2004 b (voir document 35 : *Andra 2004 b*, tab. N° 2, p. 18), mais pour parler uniquement du Muschelkalk (Trias moyen). A la lecture de ce rapport de 32 pages sur la "Géothermie du site Meuse - Haute Marne", il est impossible de savoir si ce forage, le plus proche et récent qui soit, a atteint la cible géothermique du Buntsandstein (Trias inférieur).

Dans leur conclusion, les opérateurs de ce forage indiquent (voir document 17 : *Coparex 1989 p. 31 et 14* ; les parties soulignées le sont dans le rapport) :

*"-Les grès du Muschelkalk moyen et inférieur... présentent des caractéristiques médiocres.  
- Les grès du Buntsandstein terminal, par contre, constituent un excellent réservoir."  
"Buntsandstein (1396 - 1447m) : - la partie supérieure (1396 - 1427m) présente une série de bancs gréseux, épais de 2 à 6m, séparés par des niveaux métriques d'argile et d'anhydrite. L'épaisseur brute cumulée des grès est de l'ordre de 25m, soit 80% du total. Il s'agit de grès moyens à grossiers, dans l'ensemble assez "propres", peu cimentés, manifestement poreux et perméables. -*

Cela est omis par l'Andra qui indique, dans son rapport "Géothermie", pour la même couche pour la zone :

*"...grès du trias inférieur... la productivité attendue est faible..." (voir document 35 : *Andra 2004 b*, p. 26 ; mis en gras par nous)*

Pour la salinité, le laboratoire est positionné sur la courbe 10g/l (voir document 35 : *Andra 2004 b*, fig. 4 p. 25) de la carte recopiée du rapport Maget (voir document 38 : *Maget 1983*, carte n° 35), ce qui est 2 à 3 fois moins que dans l'eau du Dogger exploité en géothermie profonde vers Meaux et plus de 10 fois moins que

dans les exploitations géothermiques dano-allemandes-polonaises. Ceci est en contradiction flagrante avec la lettre du président de l'Andra au président du CLIS deux mois auparavant.

#### d) Le Dossier 2005 Argile

Un document montre que, dès fin 2003, l'Andra commençait l'élaboration du "Dossier 2005 Argile". Il ne s'agit pas d'un Dossier comme les autres. La loi du 30 décembre 1991 demandant que soit réalisée l'étude des possibilités de stockage dans les formations géologiques profondes indiquait dans son article 4 :

*"A l'issue d'une période qui ne pourra excéder quinze ans à compter de la promulgation de la présente loi, le Gouvernement adressera au Parlement un rapport global d'évaluation de ces recherches accompagné d'un projet de loi autorisant, le cas échéant, la création d'un centre de stockage des déchets radioactifs à haute activité et à vie longue..."*

Le législateur devait ainsi être de nouveau saisi en 2006 au plus tard et disposer d'une évaluation globale des recherches. Cette évaluation était fondamentale puisque le législateur avait à se prononcer, le cas échéant, sur la création d'un centre de stockage.

Le Dossier 2005 Argile (voir document 43 : *Andra 2005 b*) et le référentiel associé (voir document 44 : *Andra 2005 a*) constituent cette évaluation. Ce dossier a été remis solennellement devant la presse par le directeur de l'Andra au Ministre chargé de l'Industrie et au Ministre chargé de la Recherche le 30 juin 2005 (voir document 45 : *"La vie du labo" n° 29, automne 2005, p. 5 et 6*).

En dehors des prospectus et des petits journaux des sites, le "Dossier 2005 Argile" est aussi le seul rapport conséquent de l'Andra, à diffusion très large, téléchargeable depuis 2005 sur son site internet.

Le référentiel associé (voir document 44 : *Andra 2005 a*), que l'on obtient sur demande, expédie la géothermie en un seul paragraphe, reprenant presque à la lettre les conclusions du rapport Andra 2004 b (voir document 44 : *Andra 2005 a, juin t1, chap. 8, p. 36; décembre et numérique, idem p. 63* ; mis en gras par nous) :

*"Concernant le Trias inférieur, les perméabilités moyennes à faibles de cette formation géologique, associées à la réduction d'épaisseur et à l'augmentation de l'argilosité d'est en ouest, confèrent à cette formation de **faibles potentialités aquifères**. (...) ... le **maximum** de  $2,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$  (= **28Dm**)...(…) ... les conditions de forte salinité et de **très faibles possibilités de production d'eau** sont, par ailleurs, **défavorables à un projet d'exploitation géothermique**."*

[nota : selon la meilleure interprétation du test n° 2, on est déjà à plus de 3 fois cette valeur, 91 D·m, pour seulement 25 m (voir pièce annexe 3 IV-c) ; or la "formation" sous Bure est épaisse de plus de 120 mètres...]

Ce document donne ensuite une description sédimentologique fautive :

*"... formation gréseuse et conglomératique déposée par des fleuves venant de l'Est... diminue rapidement vers la Champagne, tout en se chargeant en argile." (voir document 44 : *Andra 2005 a, juin, chap. 17, p. 106 ; décembre et numérique chap. 17 p. 454*)*

Pourtant, Bure est dans et sur l'axe où la porosité est élevée, d'apports venant du Sud-Ouest (voir figure 1 de la synthèse générale ; voir document 16 : *Maget et Rambaud 1979, p. 32-33, carte 26 et S4* ; voir document 36 : *Mégnien 1980, vol. I p. 65 et 69, vol. II carte TR4*). Le forage qui a précédé de peu l'arrivée de l'Andra dans la zone de Bure a décrit des grès "propres" (voir document 17 : *Rapport du forage de Lezévillle, p. 14*).

Dans le Dossier 2005 Argile, l'"aquifère" du Trias est mentionné une fois (voir document 43 : *Andra 2005 b, juin, II, p. 148; décembre, II, p. 152*) pour des problèmes de transport éventuel de matière avec l'aquifère du dessus (qui est celui du Dogger). Le mot géothermie est pratiquement absent du dossier.

Ce rapport de l'Andra a ensuite été repris par d'autres entités consultées avant l'élaboration de la loi :

- Le rapport OPECST 2005 ne mentionne pas la présence d'un potentiel géothermique (voir document 46 : *Rapport OPECST 2005*) ;
- "**Sur la base des explorations détaillées par l'ANDRA en 2005, l'IRSN considère comme l'ANDRA qu'il n'existe pas de potentiel géothermique rentable à l'aplomb du site, même dans l'aquifère du Trias (le plus producteur), pour des raisons de salinité excessive des aquifères et de leur faible capacité de production d'eau.**" (voir document 47 : *IRSN 2005*, p. 22 ; mis en gras par nous) ;
- "*Le groupe permanent [déchets] considère qu'il n'y existe pas non plus de potentiel pour des raisons de salinité excessive ou de faible capacité de production d'eau des aquifères.*" (voir document 48 : *GPE 2005*, p. 6) ;
- Selon l'Autorité de sûreté nucléaire, "*il n'existe pas non plus de potentiel géothermique exploitable pour des raisons de salinité excessive et de faible production d'eau des aquifères.*" (voir document 49 : *ASN 2006*, p. 6).

#### **IV. 28 juin 2006 : sur la base du "Dossier 2005 Argile", le parlement vote une loi qui est un choix géologique : celui exclusif de la zone du Laboratoire de Bure, pour l'étude d'un stockage géologique Cigéo**

Le Dossier 2005 Argile est le bilan des recherches sur lequel s'est appuyée la loi du 28 juin 2006 relative à la gestion durable des matières et déchets radioactifs. Or, sur la base de ce dossier qui est censé suivre les recommandations techniques du Groupe Goguel, de la RFS III.2.f et du guide de sûreté de l'ASN, cette loi va décider :

*"Dans l'article L. 542-6 du code de l'environnement, les mots : « des laboratoires » sont remplacés par les mots : « d'un laboratoire souterrain ou d'un centre de stockage en couche géologique profonde »." (article 11)*

*"« – la demande d'autorisation de création doit concerner une couche géologique ayant fait l'objet d'études au moyen d'un laboratoire souterrain ; " (article 12)*

Bure devient l'unique laboratoire de recherche pour un stockage en géologie profonde. Le centre d'enfouissement ne pouvant être autorisé que si des études ont été réalisées au moyen d'un laboratoire souterrain, la loi du 28 juin 2006 fait le choix du site de Bure pour l'implantation de Cigéo et exclut toute autre possibilité.

Le législateur a été encore plus loin en fixant à neuf ans le temps accordé pour toutes recherches complémentaires :

*[centre de stockage] "la demande de son autorisation ... puisse être instruite en 2015 et... le centre mis en exploitation en 2025." (article 3)*

Dans un tel cadre et face à de tels enjeux, le facteur temps a des implications considérables qui ne doivent pas être négligées.

Juste après le vote de la loi, le 05/10/06, la directrice de l'Andra et le directeur du Laboratoire de Bure annonçaient que l'Andra allait réaliser "*un forage profond dans le Trias...*" (voir document 50 : *CLIS, Plénière du 05/10/2006*, p. 69-71).

#### **V. 2006-2008 : Étude nationale sur la géothermie ("CLASTIQ") : aucun accès au Trias sous le laboratoire pour les géothermiciens du BRGM**

Entre temps, le CLIS de Bure avait commandité un rapport extérieur (voir document 51 : *Erdyn 2005*, mis en gras par nous) :

*"Dans le cadre de la relance de la géothermie au Trias dès 2006, engagée par l'ADEME et le BRGM,*

*L'ADEME exprime son **intérêt** pour la démarche entreprise dans la **région de Bure**. " (résumé p. 4)  
 "... L'ADEME et le BRGM relancent début 2006 un programme de recherche dirigé vers les réservoirs dits «clastiques», qui privilégie notamment les couches argilo-gréseuses du Trias. Dans ce cadre, la **Direction technique de l'ADEME à Sophia-Antipolis confirme son intérêt pour le projet de Bure**." (p. 23)*

Au Bureau du CLIS de Bure du 23 avril 2007, l'Andra présentait son "*Programme de reconnaissance de la zone de transposition*" incluant l'évaluation des ressources géothermiques dans les formations profondes (Trias). Un tableau montrait que les forages "Callovo-oxfordien + Trias" seraient faits entre octobre 2007 et mai 2008 (voir document 52 : *Andra D.TR.ALS.07.0344.A p. 21, p. 31*). On remarque que toute référence à l'ADEME et au BRGM pour la géothermie a disparu.

Le 27 novembre 2007, l'expert extérieur pris par le CLIS pour caractériser le potentiel géothermique intervenait en plénière et rappelait (voir document 53 : *CLIS, Plénière du 27/11/07* ; mis en gras par nous) :

*"fin 2005... Nous avons par exemple du coté de l'ADEME... des gens qui m'avaient **manifesté un intérêt explicite pour un projet de géothermie au Trias dans la région de Bure**... C'est toujours vrai en 2006... Dans le cadre d'un partenariat avec le BRGM... l'ADEME demandait au BRGM de relancer son programme d'exploration de l'horizon du Trias" (p. 5).*

Mais, dans sa description de ce qui était prévu, l'ADEME et le BRGM disparaissaient au profit de l'Andra (choix, réalisation, maîtrise) :

*"un document de 177 pages... document très technique de l'Andra qui est le document de la maîtrise d'ouvrage qui exprime en détail l'ensemble des spécifications de la campagne de forage... (p. 11...) la géothermie qui se trouve traitée au fil des pages. (p. 12...) ...essais de pompage... l'ensemble de ces essais se déroulera sur une période d'un à trois mois... (p. 16...) complété... avec une réunion de travail approfondie qui s'est déroulée au laboratoire de Bure avec Messieurs Vigneron et Forbes." (i.e un hydrogéologue et le Directeur de Bure Andra, p. 17...).*

"CLASTIQ", le programme national de recherche ADEME/BRGM "*sur les ressources géothermales de type basse à moyenne température, des réservoirs clastiques [séries grés-argileuses] profonds*" commençait le 20 décembre 2005 pour 33 mois. Il concernait évidemment notamment le Bassin Parisien. C'est la première grande étude sur les ressources géothermiques de la France entreprise depuis les rapports BRGM des années 1976-1983. Les rapports finaux "CLASTIQ" sont datés de septembre 2008.

L'Andra a fait réaliser la prolongation du forage EST433 au Trias à l'extrême fin de son programme de forage. Ainsi, le Trias n'a pas été atteint avant juin 2008 et le rapport final des tests hydrauliques (SIS) est daté du 22 janvier 2009. Ce rapport final révèle que l'Andra a choisi, pour les tests hydrauliques au Trias, des opérateurs qui travaillent presque exclusivement dans les programmes de recherche d'évacuation géologique des déchets radioactifs. Intera Engineering Ltd, qui a réalisé les interprétations logicielles, est un consultant canado-américain qui travaille notamment avec le D.O.E. (l'équivalent du CEA), via le département Sandia National Laboratories (qui a notamment pour mission de surveiller la sûreté des armes nucléaires et l'enfouissement des déchets radioactifs militaires). Pour l'appareillage, Solexperts est une PME suisse de géotechnique et d'hydrogéologie qui, à l'époque, "*est lourdement impliquée*" (selon ses termes) avec l'Andra à Bure sur le callovo-oxfordien depuis que celui-ci a été atteint en puits. Quant au troisième opérateur, le généraliste privé français Saunier & Associés, il ressort clairement du rapport qu'il n'apportait qu'un soutien technique.

L'équipe des géothermiciens de CLASTIQ n'a eu aucun accès aux données profondes sous la zone de Bure. Un paragraphe en exprime clairement le regret (voir document 54 : *Bouchot et al. 2008, p. 53* ; mis en gras par nous) :

*"Concernant les Grès du **Buntsandstein** de Lorraine, seule la **région de Saint-Dizier - Bar-le-Duc** présente un **potentiel géothermique** estimé à ~ 10 GJ/m<sup>2</sup> ... **Cette cible mériterait d'être étudiée de près, sachant cependant que les paramètres pétrophysique y sont réputés médiocres (Haenel, 1989).**"*

En effet, l'étude CLASTIQ donne le potentiel thermique des couches gréso-argileuses sans s'occuper des perméabilités/transmissivités. Cette zone de Bure a été la seule zone à potentiel thermique élevé, confirmée par CLASTIQ pour l'Est du Bassin parisien (voir pièce annexe 4 I-c). Mais les géothermiciens n'ont pas eu accès aux paramètres pétrophysiques du forage EST433 en raison du facteur temps.

## VI. Le choix géologique de Cigéo n'a pu se faire qu'à l'aveuglette

Parmi les critères à prendre en compte pour le choix d'un site, il y a le "**schéma hydrogéologique régional**" (voir document 1 : *Groupe Goguel 1987, p. 58* ; voir document 2 : *RFS III.2.f de 1991 annexe I, § 4.3* ; voir document 3 : *ASN 2008 Annexe 1, § A1-3.3*). Dans le Bassin parisien, il existe des connexions entre l'aquifère du Trias (la cible géothermique à Bure) et celui du Dogger (eau qui touche le contact inférieur de l'argilite visée pour l'enfouissement à Bure) le long de zones faillées :

*"L'eau de formation des grès triasique de Chaunoy a franchi plusieurs centaines de mètres de roches argileuses liasiques pour passer dans l'aquifère calcaire Dogger du Jurassique moyen." (voir document 55 : Worden et Matray 1995, Conclusion, p. 64)*

*"La différence principale entre les eaux du Trias et celles du Dogger s'exprime en termes de température et de salinité. Ce dernier paramètre a permis de mettre en évidence que la faille de Bray, principalement dans la zone centrale du bassin, mettait en relation hydraulique ces deux aquifères avec des flux d'eau salée du Trias vers le Dogger..." (voir document 56 : Gouze et al., 2001, p. 431)*

D'autres travaux importants sur le Bassin parisien aboutissant à la même conclusion en utilisant d'autres marqueurs pourraient être cités.

Il est impossible de comprendre l'aquifère du Dogger, élément central du schéma hydrogéologique régional, sans connaître les caractéristiques de l'aquifère du Trias inférieur. Ainsi, s'agissant du chlore, le rapport Andra indique (voir document 57 : *Andra 2001 a, t.1 II p. 24*) :

*"...concentrations maintenue faible dans l'Oxfordien calcaire du fait d'une recharge régulière en eau peu salée issue des affleurements et concentration plus importante dans le Dogger du fait par exemple d'apports réguliers issus du Trias..."*

Ou, à propos de l'eau du Dogger rencontrée dans l'un des forages (voir document 58 : *Andra 2004 a, vol. 1, p. 151*) :

*"Géochimiquement, cette eau est très similaire à celles rencontrées dans le Dogger du centre du Bassin Parisien (Matray et al. 1994). Ces auteurs attribuent l'origine des chlorures des eaux du Dogger au saumures triasiques situées à l'est du bassin. Actuellement c'est la seule source de chlorures que l'on connaisse dans la marge orientale du bassin."*

De même, l'IRSN expose (voir document 47 : *IRSN 2005, p. 37* ; mis en gras par nous) :

*"... aquifère du Trias, aucune donnée n'est à ce jour disponible à l'échelle du secteur. L'IRSN regrette qu'aucun forage ANDRA n'ait atteint ces niveaux, étant donné l'apport de connaissance qui aurait pu être apporté par de telles investigations, notamment sur l'origine du sel mesuré dans le Dogger... qui est une donnée **importante pour le calage de modélisation et, en conséquence pour la compréhension des écoulements souterrains.**"*

Sans donnée au Trias, il n'est possible de faire que des simulations numériques basées sur des hypothèses (voir document 23 : *Andra 2001 a, t.5 II, p. 4* ; mis en gras par nous) :

*"Le concept... retenu... repose sur les **hypothèses** suivantes : (...) - Hypothèse 4 : **Une perméabilité forte du***

**Trias détritique. La perméabilité de cette couche a été multipliée par 10 par rapport à celle utilisée jusqu'alors. Elle passe à une valeur de  $10^{-4}$  m/s en moyenne.** Cette hypothèse découle du raisonnement suivant, axé surtout vers la résolution du problème de calage avec les données piézométriques du **Dogger**, qui sont significativement plus élevées que celles calculées par le modèle lorsque la valeur de perméabilité moyenne du Trias détritique est plus faible : (...) la seule strate acceptable reste le Trias détritique (réservoir gréseux), seul véritable aquifère de la base du bassin de Paris, qui pourrait imposer ces charges dans les formations sus-jacentes beaucoup moins perméables. Si on peut remonter les charges locales dans le Trias détritique cette remontée **va se répercuter** dans les strates sus-jacentes **jusqu'au Dogger.**"

De plus, les hypothèses sur lesquelles reposent les simulations numériques sont variables puisque, dans le Dossier 2005 Argile, la perméabilité du Buntsandstein rentrée dans le modèle (toujours sans la moindre donnée au Trias) est un facteur 450 en dessous de l'hypothèse 4 ci-dessus :  $2,2 \cdot 10^{-7}$  m/s (voir document 44 : *Andra 2005 a, juin, chap. 20, p. 110 ou version numérique novembre, t.1, p. 603*). Cette nouvelle hypothèse de modélisation donne, pour l'aquifère Dogger "numérique", un écoulement perpendiculaire à celui déduit des mesures de forage (voir document 44 : *Andra 2005 a, juin chap. 20, p. 116 et fig. 20-8, p. 118, ou version numérique novembre, t.1, p. 609 et fig. 20-8, p. 611*). L'IRSN constate (voir document 47 : *IRSN 2005, p. 41*) :

*"ce qui montre que le comportement des écoulements dans cet aquifère n'est pas encore compris"*

C'est pourtant à ce moment-là que le site de Bure a été retenu comme unique solution pour Cigéo. Et le constat est le même pour les "scénarios" qui font partie des demandes réglementaires. Que vaut un "scénario" dans lequel on entre des données imaginaires ?

Lorsque finalement, deux ans après la loi et une fois l'étude CLASTIQ terminée, auront lieu les tests au Trias, on remarque que les rapports des opérateurs et du contrôleur ne parlent jamais de géothermie. Les opérateurs indiquent que leur mission était de déterminer la transmissivité, la pression de formation et :

*"Cependant, l'objectif principal du test était la récolte d'un échantillon représentatif d'eau de formation présente à la profondeur du test."* (voir document 11 : *Egis-géo. p. 4* ; mis en gras par nous).

La Synthèse Andra 2009 (voir document 5 : *Andra, Synthèse, p. 114* ; mis en gras par nous) mentionne, quant à elle, à côté de la géothermie :

*"... analyses géochimiques... pour restituer des profils de traceurs sur l'ensemble de la série... serviront de données d'entrée au programme de simulation."*

Aussitôt la partie profonde du forage EST433 commencée, est lancé le "programme TAPSS 2000" (Transferts Actuels et Passés dans un Système Sédimentaire, initié en 2008 pour ce forage). A l'évidence, il s'agit de rattraper le retard, de dispatcher vite des échantillons, carottes et eau de la colonne stratigraphique aux laboratoires travaillant pour l'Andra (ceux du groupement FORPRO essentiellement) pour qu'ils étudient enfin les divers sels, gaz rares, isotopes stables, radionucléides naturels dans l'eau porale et les niveaux producteurs. Les bonnes pratiques scientifiques voudraient que l'on commence par cela à l'arrivée sur une nouvelle zone à étudier. Comment ne pas l'avoir fait alors que le Trias était un spot marqué comme de "bonne productivité" sur les rapports historiques du Service géologique de l'Etat ? Les arguments que nous avons développés tendent à montrer que c'est certainement à cause de cela que ce forage a été si longtemps repoussé. Les assemblées parlementaires auraient-elles validé un site d'enfouissement juste au-dessus d'une double ressource géothermique incomparablement plus prometteuse que celle du Dogger qui fait déjà la fierté de la France (voir pièce annexe 4) ? L'Andra elle-même devait en douter...

## Pièce annexe 2

# Géothermie sous la zone de Bure : températures

### Résumé :

Suite à la note de A. Mourot de 2002, l'Andra a menti pendant 8 ans sur la seule donnée relevant du gradient de température en sa possession. Suite au forage EST433 de 2008, l'Andra a donné une valeur plus basse qu'elle ne l'est en réalité. Il n'est pas fait état de la cible permienne plus profonde, non étudiée. Sa température doit atteindre 160°C.

|   |   |
|---|---|
| I. Rôle du gradient de température.....                                   | 1 |
| II. L'Andra a menti pendant plusieurs années.....                         | 2 |
| III. Forage EST433, rabotage de la température et données partielles..... | 4 |
| IV. Diagraphies postérieures.....   | 5 |
| V. Au-delà du Trias.....  | 5 |

### I. Rôle du gradient de température

La température est l'un des paramètres importants d'une ressource géothermique. Plus elle est élevée et plus la ressource sera favorable. Tant qu'aucun forage à la cible n'a été réalisé, la température est estimée au moyen du gradient local (en degrés par centaine de mètres) que l'on applique au lieu et à la profondeur d'intérêt en partant de la température de surface. Cette dernière est donnée, par exemple, par la température moyenne des sources superficielles qui, à Bure, est de 10°C (voir document 13 : *Andra 2010, t.1, p. 175*).

Ainsi, pour un gradient de 3°C/100m, à 2000 m on aura :  $(20 \times 3) + 10 = 70^\circ\text{C}$ .

#### Une seule donnée du gradient a été mesurée en 8 ans : 3°C/100m

Avant que ne soit fait le forage EST433 en 2008, un seul forage un peu profond avait été réalisé : le HTM102, le tout premier réalisé à l'arrivée de l'Andra, terminé avant la fin de l'année 1994 et d'une profondeur de 1100 m. Aucun autre forage n'atteindra même les 800 m.

L'opérateur du forage HTM102 décrit ses mesures (voir document 59 : *Géoservices 1995, scan sur la p. 80*) :

figure 50).

#### 5.4.1 Thermométrie

La diagraphie de température a mis en évidence un gradient géothermique de 5°C/100m, supérieur au gradient habituel de 3°C/100m (cf. figure 50). Toutefois, la température mesurée à 1070 m/sol (42,5°C) est cohérente avec un gradient géothermique de 3°C/100m, ce qui correspond aux valeurs relevées régionalement qui indiquent des températures comprises entre 60 et 65 deg.C à 1500m de profondeur (Atlas of Subsurface Temperature in the European Community). Cette anomalie est probablement due aux perturbations thermiques engendrées par les tiges 5° dont la présence était rendue nécessaire par l'instabilité des mames de Longwy (Dogger) et des mames à septaria (Lias supérieur). Il existe une anomalie thermique entre 705 m/sol et la base des tiges 5° (cf. 3 figure 50) qui pourrait être due à une production d'eau de formation dans cet intervalle, ceci est toutefois peu probable compte tenu de la lithologie du Toarcien (argiles et schistes).

La donnée de l'opérateur est que le gradient moyen entre la surface et la base du forage est de 3°C/100m (calcul :  $42,5 - 10 = 32,5 \div 10,7 = 3,03^\circ\text{C}/100\text{m}$ ), " *ce qui correspond aux valeurs régionales normales* " écrit-il.

Forcément, si le gradient apparent est de 5°C/100m en fond de forage pour une moyenne de 3°C/100m sur toute sa hauteur, sa valeur est inférieure à 3°C/100m en partie haute. Dans ce cas précis, avec les tiges 5" mentionnées, elle est de 2,04°C/100m entre 0 et 700 m (~ 24,3°C à 700m) (voir document 59 : *Géoservices*

1995, fig. 50, p. 81). Plus tard, probablement suite à une stabilisation thermique, l'Andra donnera 2,5 °C/100m dans les 600 m supérieurs de ce forage (voir document 35 : *Andra 2004 b*, p. 15).

Les raisons de ces variations du gradient géothermique avec la profondeur sont qualitativement connues : l'empreinte thermique non encore dissipée de la dernière glaciation (voir document 60 : *Birch 1948* ; voir document 61 : *Carslaw & Jaeger 1988, éq. 2.13 (7), p. 85*, qui permet des calculs d'ordre de grandeur) et la circulation d'eau météorite "froide" dans les couches les moins profondes quand celle-ci est assez rapide (voir circulation karstique qui est observée dans les calcaires oxfordiens à certains forages par exemple).

## II. L'Andra a menti pendant plusieurs années

L'Andra ne commencera à parler température, par l'intermédiaire du gradient, qu'après la note de A. Mourot (voir document 4 : *A. Mourot, 2002* ; voir pièce annexe 1-III).

a) Le bal de la négation commence par un petit article dans le journal de l'Andra, "La vie du Labo" n° 22, mai-juin 2003 (voir document 31 : "*La vie du Labo*" n° 22, mai-juin 2003, p. 10 ; mis en gras par nous) :

*"«gradient géothermique». Il est, en moyenne, sur Terre, de 3 °C par 100 mètres. Dans le secteur du Bassin parisien où se situe le Laboratoire de Meuse/Haute-Marne, il est inférieur à cette moyenne. (...) Les mesures faites (...) dans le forage de Cirfontaines-en-Ornois [HTM102], confirment que le gradient géothermique local est faible. "*

b) Puis, une lettre du 15/01/04 du président de l'Andra (voir document 34 : *lettre réf. Pdt/04-0001*) répond à une saisine écrite du 17/12/2003 du président du CLIS du Laboratoire de Bure et préfet de la Meuse, sur le respect de la RFS III.2.f au regard de la géothermie. Sur le critère de la température, le président, qui annonce qu'un rapport va suivre, écrit :

*"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 roches du Trias, à la limite de la Meuse et de la Haute-Marne, a une relativement faible température. (...)  
En outre plusieurs forages Andra ont fait l'objet de mesures de température qui permettent de préciser encore le gradient géothermique du secteur. (...)*

*"... gradient géothermique... Autour du site du laboratoire, il est inférieur à la normale, de l'ordre de 2,5 à 2,7 °C/100 mètres. A l'emplacement du site, le Trias inférieur étant approximativement à 1500 m de profondeur, les estimations de températures varient de 50 à 55°C, en prenant respectivement des gradients géothermiques de 2,7 et 3,0 °C/100m, confirmant la faible valeur de la température de l'eau contenue dans les couches du Trias à cet endroit."*

c) Et le rapport annoncé, daté de mars 2004 (voir document 35 : *Andra 2004 b*), fait dans la même confusion. Il confirme que le gradient des forages pétroliers des environs est bon. Puis, dans un tableau (voir document 35 : *Andra 2004 b*, p. 15), il donne les gradients des forages de l'Andra, tous d'une profondeur inférieure à 800 m (donc logiquement avec un gradient plus faible, comme expliqué plus haut). Il indique ensuite en mentant aussi délibérément (voir document 35 : *Andra 2004 b*, p. 22) :

*"Les gradients géothermiques du secteur étudié par l'Andra sont donc nettement inférieurs aux gradients du nord-ouest de la zone d'étude, une valeur de 2,5 °C/100m jusqu'aux formations triasiques semblant être cohérente pour le forage HTM102."*

Or, l'unique mesure un peu profonde qu'ils ont est celle de 3°C/100m au HTM102, et elle a été donnée comme normale par leur opérateur. L'auteur (et le vérificateur/approbateur) n'a pas hésité à supprimer 0,5°C/100m à la valeur mesurée.

La conclusion qui suit est vague et confuse (voir document 35 : *Andra 2004 b*, p. 26) :

*"le gradient géothermique montre des valeurs tout à fait normales voire relativement plus faibles, notamment dans la partie centrale du secteur étudié par l'Andra." ; "Sur le secteur étudié par*

*"L'Andra, le gradient géothermique est encore moins intéressant pour une exploitation géothermique, celui-ci étant beaucoup plus faible".*

**d)** Avant que ne soit présenté à l'Assemblée nationale et au Sénat le projet de loi relatif à la gestion durable des matières et déchets radioactifs (qui deviendra ensuite la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006), l'Andra devait rendre un rapport sur la faisabilité de stockage des déchets. Ce rapport est le Dossier 2005 Argile, accompagné d'un référentiel reprenant les conclusions du rapport de l'Andra de 2004 (voir document 44 : *Andra 2005 a juin t1, chap. 8, p. 35 ; décembre et numérique, idem, p. 62*) :

*"le gradient géothermique montre des valeurs normales voire plus faibles que la normale, notamment dans la partie centrale du secteur étudié par l'Andra. Dans ce secteur, une valeur moyenne de 2,5°C/100 mètres, au moins jusqu'aux formations triasiques (forage HTM102), doit être retenue."*

Cependant, le référentiel ne peut être obtenu que sur demande. Seul le Dossier 2005 Argile au sens strict a fait l'objet d'une distribution très vaste (disponible sur le site internet de l'Andra depuis 2005). Dans les 520 pages de ce dossier, l'aquifère du Trias n'est mentionné qu'une seule fois (voir document 43 : *Andra 2005 b, juin, II, p. 148 ; décembre, II, p. 152*) pour des problèmes autres de transport de matière entre les aquifères (Trias géothermique et un autre appelé Dogger). Le sujet de la géothermie est totalement absent de ce dossier. Cependant, il n'est pas tout à fait innocent que ce dossier décrive le gradient géothermique régional de la manière suivante (voir document 43 : *Andra 2005 b ; juin ou décembre, II, scan sur la p. 107*) :

Le gradient moyen est de 2,3 °C/100 m (Bauer, 2005) et (Andra, 2005a, fiche 16). Homogène sur l'ensemble de la zone de transposition, il est sensiblement plus faible que celui observé ailleurs dans le bassin, de l'ordre de 3,3 °C/100 m (BRGM & ELF Aquitaine, 1976). Les variations du gradient thermique avec la profondeur, déterminées essentiellement par les variations de conductivité thermique des formations, sont peu importantes. Dans le Callovo-Oxfordien, les variations d'argilosité (cf. § 3.3.1.4) sont également à l'origine de très faibles variations de ce gradient. Aucune variation brutale, généralement associée aux aquifères et à des circulations d'eaux importantes, n'est observée, en accord avec le schéma hydrogéologique du secteur caractérisé de manière générale par des écoulements lents.

*"Le gradient moyen est de 2,3°C/100m...Homogène sur l'ensemble de la zone de transposition..."*

Ce n'est pas le gradient des 600-700 premiers mètres (valable pour le Callovo-oxfordien) qui est décrit là, mais le gradient au niveau pétrolier (1500 à plus de 2000 m) puisque la phrase enchaîne :

*"...sensiblement plus faible que celui observé ailleurs... qui est de l'ordre de 3,3°C/100m (BRGM & ELF Aquitaine, 1976)."*

avec la référence bibliographique citée, donnée un peu plus loin, p. 506 (*décembre, p. 508*) :

*"BRGM & ELF Aquitaine (1976) Potentiel géothermique du Bassin parisien - Rapport de fin de contrat DGRST. Rapport n° 74.7.0990."*

Or, cette référence est le rapport très connu Housse & Maget 1976 de Elf Aquitaine-BRGM basé sur l'ensemble des données pétrolières (voir document 37 : *Housse & Maget 1976*), qui sont donc des données profondes uniquement (essentiellement > 1500 m).

Le mensonge du rapport 2004 et du référentiel 2005 est donc encore accentué : de 2,5, on descend à 2,3 °C/100m. L'Andra soustrait maintenant 0,7°C/100m à la valeur de 3°C/100m mesurée par son opérateur dans son unique forage un peu profond. On cherchera, en vain, une autre information que celle-là dans le Dossier 2005 Argile. La nouvelle loi de 2006 qui désigne Bure comme unique site s'appuie pourtant entièrement sur ce dernier.

### III. Forage EST433, rabotage de la température et données partielles

Après la réalisation du forage EST433, l'Andra ne donnera qu'une seule température, celle de "66°C dans la chambre de test" (voir document 62 : *Andra 2008, diap. 22* ; voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*), et écrit même "une température stabilisée de l'ordre de 66°C" (voir document 5 : *Andra 2009, p. 109*). Pour les diagraphies postérieures, elle parlera de 65°C (voir document 5 : *Andra 2009, p. 107*) ou de 66°C (voir document 5 : *Andra 2009, p. 114*). Le gradient donné est maintenant de 3°C/100m (voir document 5 : *Andra 2009, p. 107, 114*).

L'Andra ne parle de la température que d'un seul test, le plus haut (et donc le plus froid), le n° 2, dont elle grignote au passage plus d'un demi-degré. En effet, d'une part, les deux sondes étaient à 66,5°C en fin de test et la température était clairement toujours en train de monter. La courbe du haut, de la sonde dans l'intervalle de test, chute lors du déplacement du train de test. Celle du bas, de la sonde au dessus de l'intervalle de test, chute lorsque l'eau de formation arrête de couler suite à la fermeture de la valve d'obturation au début de "RWS" (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.3, p. 62*). On a ajouté une ligne sur 66°C pour une lecture plus facile.

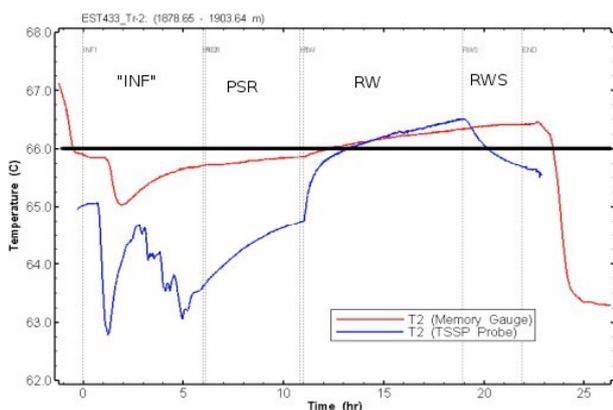


Figure P2-1 : Test n° 2, le seul pour lequel l'Andra donne une température. Il y avait deux sondes, les deux avaient atteint 66,5°C à la fin du test et la température était clairement toujours en train de monter. La courbe du haut, de la sonde dans l'intervalle de test, chute lors du déplacement du train de test. Celle du bas, de la sonde au dessus de l'intervalle de test, chute lorsque l'eau de formation arrête de couler suite à la fermeture de la valve d'obturation au début de "RWS" (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.3, p. 62*). On a ajouté une ligne sur 66°C pour une lecture plus facile.

La température augmentant avec la profondeur, celle du test le plus profond, le n°1, jamais donnée, ne pouvait qu'être supérieure à celle du test n° 2.

L'Andra fait disparaître ce test (donc ne donne pas la température) de la manière suivante :

*"Un autre test a été effectué dans la zone inférieure... La transmissivité déduite de ce test,  $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ , est nettement inférieure à celle déterminée pour la zone supérieure, confirmant ainsi les observations faites sur carottes (grès argileux) et en accord avec les diagraphies différées (porosité nettement inférieure à celle de l'horizon testé dans les "grès à Voltzia") (voir document ? : Saunier Associés, 2009). Cet horizon ne contribue donc que marginalement à la transmissivité totale de la formation." (voir document 5 : *Andra 2009, p. 105*, cette conclusion est répétée par p.114).*

La transmissivité est dite inférieure, mais cela ne signifie pas qu'elle est mauvaise pour autant. La porosité de 10 - 15% est qualifiée de régulière et moyenne par GEO-RS (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 37* ; celle au niveau du test n° 2 étant qualifiée de forte et régulière (p. 38)).

Pour les carottes, il n'y a eu que ~ 1,5 m carotté sur 25 m de test soit ~ 6 % (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 15*, carotte K2-20 dont le haut est à 1951 m alors que la base du test est à 1952,6 m).

La valeur de transmissivité donnée vient du rapport des opérateurs (voir document 6 : *SIS 2009, p. 8*). Une telle valeur ne serait pas si différente de celle du test n° 2 (en aucun cas mauvaise). Malheureusement, ce test n° 1 n'est pas interprétable pour la perméabilité selon le rapport de contrôle réalisé sur le travail des opérateurs (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 6, tableau*) :

*"Nous ne sommes pas d'accord avec l'affirmation que le test T1 a produit des réponses en pression qui convenaient pour la détermination des propriétés hydrauliques de la formation."*

Qualitativement, cependant, il n'y a aucun doute qu'on est bien dans un niveau d'intérêt pour la géothermie.

Pour le test n°1, le rapport des opérateurs indique par exemple (voir document 6 : *SIS 2009*, p. 32) :

*"réponse rapide à des évènements de retrait individuels est aussi une indication d'une haute perméabilité de formation qui permet aux évènements transitoires de se dissiper rapidement."*

Ce test n° 1 se trouve au milieu du Trias gréseux recoupé (la base n'ayant pas été atteinte ; voir document 63 : *GEO-RS 2008*, p. 36). C'est donc lui qui donnera la température médiane de cet aquifère géothermique.

La température maximale atteinte a été de 67,3°C (voir document 6 : *SIS*, fig. 3.1.3, p. 23 ; fig. P2-2 ci-dessous; ensuite le train de test a été monté pour le test n° 2). Cette température n'est pas celle "non dérangée" de la formation et de son eau parce qu'elle a été mesurée trop peu de temps après le forage. Pendant un forage, il y a circulation permanente de boue "froide" qui refroidit progressivement la roche à partir des parois du forage. Les pétroliers ont donc un modèle classique pour corriger cet effet sans attendre des jours qu'un équilibre thermique se rétablisse.

Les équations de diffusion pour la théorie d'écoulement de la chaleur et celle de l'écoulement des fluides en milieu poreux sont les mêmes à la nature physique des paramètres près. Aussi retrouve-t-on le modèle classique le plus simple utilisé pour les perméabilité/transmissivité : celui de Horner (voir pièce annexe 3-IV) mais adapté aux échanges thermiques. Disons simplement qu'il permet de retrouver la température initiale, "non dérangée" de la roche et l'eau qu'elle contient.

Le calcul, en annexe, donne 68,5°C. Ce modèle sous-estimant légèrement la température, une correction a été proposée à l'université de Stanford qui aboutit ici à une température de ~ 69°C (voir annexe technique ci-dessous). C'est la température la plus probable au milieu de l'aquifère. Le gradient géothermique entre la surface et le milieu du test n° 1 doit donc être de l'ordre de :

(température du milieu de l'aquifère - température de surface) divisé par le nombre de centaines de mètres :  $\{69 - 10\} \div 19,21 \approx 3,07^\circ\text{C}/100\text{m}$ .

#### IV. Diagraphies postérieures

Des diagraphies de température ont été réalisées début septembre 2008 et en février 2009 (voir document 13 : *Andra 2010*, p. 39). Ces diagraphies ont été arrêtées à 1855 - 1875 m, ce qui est juste avant l'entrée dans les grès du Trias (qui commence à 1874,5 m profondeur forage ; voir pièce annexe 3-I), curieuse façon de faire "pour l'évaluation du potentiel géothermique au droit du forage", but annoncé par l'Andra (voir document 13 : *Andra 2010*, p. 39). Pour connaître la température de fond, il aurait fallu une sonde placée en permanence. Descendre un outil pendant quelques instants dans le puits rempli de fluide ne peut apporter que des réponses imparfaites. Comme il y a des mesures en descente et en montée et que l'outil provoque des mouvements de fluide dans le forage, nous n'avons pas de valeur unique. Les températures lues à 1856 - 1875 m sont de 65,8 à 67 °C (voir document 64 : *Schlumberger 2008-2009*). La seule information que ces diagraphies peuvent apporter, si elles sont représentatives de la température de la roche, est que l'on atteint au moins 66°C avant même d'entrer dans les grès du Trias avec un gradient qui atteint au moins 3°C/100 m  $\{(>66 - 10) \div 18,7 = >3\}$ . C'est la valeur qui est donnée dans le rapport Andra 2009 (voir document 5 : *Andra 2009*, p. 107, 114).

Dans les documents destinés au public massivement distribués, l'Andra n'en continue pas moins de faire croire que le gradient est inférieur à la normale. Le Journal de l'Andra, Meuse - Haute Marne de printemps 2010 écrit (voir document 65 : *Le Journal de l'Andra Meuse – Haute Marne, printemps 2010*, p. 11 ; mis en gras par nous) :

*"Cette élévation de température est en moyenne de 3°C par 100 mètres. Dans le secteur du Bassin parisien où se situe le laboratoire souterrain, elle est inférieure à cette valeur."*

#### V. Au-delà du Trias

Les couches grés-argileuses ne s'arrêtent pas avec le Trias inférieur sous Bure. Elles continuent sur une profondeur remarquable de ~ 2800 m (jusqu'à ~ 4300 m NGF sous l'emplacement proposé pour Cigéo ; voir

figure P4-2 de la pièce annexe 4). Il s'agit cette fois de l'étage Permien (voir pièce annexe 4-III). L'Andra ne dit rien de cette autre cible géothermique.

La valeur du gradient géothermique en profondeur est forcément supérieure à  $\sim 3,07^\circ\text{C}/100\text{ m}$  puisque cela est la moyenne surface-1921 m/surface alors que le gradient est de l'ordre de  $2,5^\circ\text{C}/100\text{ m}$  sur les premiers 700 m. Pour l'estimer, nous prenons comme point de départ la température de la sonde qui a été laissée plusieurs mois dans le forage à une profondeur de 835 m/surface (voir document 13 : *Andra 2010, t. 1 p. 39*) :

*"La température à cette profondeur est d'environ  $31^\circ\text{C}$ ".*

On obtient alors sur l'intervalle avec le test n°1 :  $(69 - 31 =) 38^\circ$  sur  $(1921 - 835 =) 1086\text{ m}$ , soit un gradient géothermique moyen de  $\approx 3,5^\circ\text{C}/100\text{ m}$ .

Si on applique ce gradient à partir du milieu du test n° 1 (- 1563 m en cote NGF ; voir pièce annexe 3-I), on arrive à - 4300 m NGF à la base de cette série grés-argileuse permienne à la température de  $(4300 - 1563 = 2737 \times (3,5/100) = 95,8 + 69) \sim 165^\circ\text{C}$ . Comme on sait que le Permien est localement bon aquifère dans ses parties pas trop profondes (peut-être vers  $100^\circ\text{C}$  ; voir pièce annexe 4-III) et que, par ailleurs, l'Europe met au point des techniques pour augmenter la perméabilité là où elle est insuffisante (voir pièce annexe 4-IV), la zone même de Bure offre à priori, au moins sur le long terme, un potentiel géothermique sur une gamme de températures qui va de  $66^\circ\text{C}$  du sommet du Trias inférieur à  $165^\circ\text{C}$  à la base du Permien. C'est exactement le type de série profonde que l'ADEME et le BRGM recherchaient dans leur étude dite "CLASTIQ" de 2006-2008 sur le Bassin parisien. Mais le forage EST433 a été fait très tardivement et cette étude était alors terminée. Les techniciens de l'ADEME et du BRGM avaient pourtant indiqué clairement leur intérêt pour la zone de Bure (voir pièce annexe 1-V). En outre, à ces températures (à partir de  $90^\circ\text{C}$ ), il est possible de produire un peu d'électricité par le cycle de Rankine (un fluide s'évapore à basse température par la chaleur transmise par la saumure géothermale et va actionner une turbine).

## Annexe technique

### Estimation de la température peu après le forage

Le modèle de Horner est basé sur la durée du temps de refroidissement qui correspond au temps de circulation de boue "froide" à l'endroit considéré,  $t_p$ , et se sert du "temps de Horner" défini comme  $(t_p + \Delta t)/\Delta t$  où  $\Delta t$  est le temps qui commence à partir de l'arrêt du refroidissement (temps de Horner qui tend vers 1 pour un temps infini puisque  $t_p$  est constant et seul  $\Delta t$  varie  $\rightarrow$  le temps s'écoule donc de la droite vers la gauche dans ce diagramme, dessiné plus bas ; voir aussi pièce annexe 3-IV).

Au bout d'un temps assez long, la solution semi-logarithmique de Horner ("semi" car seule l'expression du temps est en logarithme), produit une ligne droite :

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

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

Le calcul peut être réalisé avec les données de la sonde située dans l'intervalle de test (voir figure P2-2, courbe du haut) sur la période d'augmentation lente, régulière, de la température entre 3 et 25 h de la figure. En effet, on entre ensuite dans les phases de mouvements de fluide avec la pompe et les données ne sont plus utilisables.

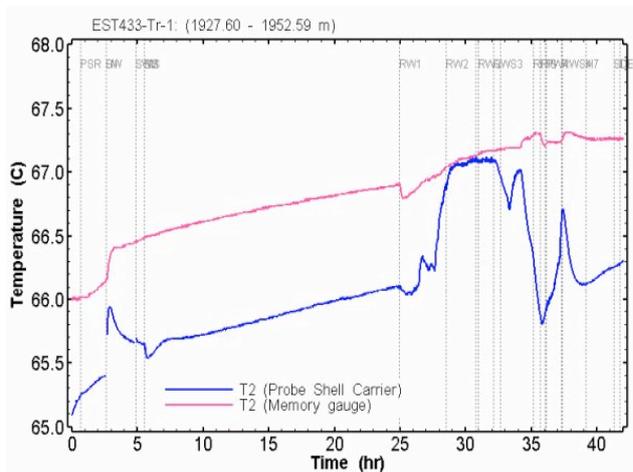


Fig. P2-2. Températures pendant le test n°1 : capteur à mémoire STS DL/N70 situé dans l'intervalle de test (ligne du haut) et capteur du segment TSSP au dessus de la valve d'obturation (ligne du bas) (voir document 6 : SIS fig. 3.1.3, p. 23)

Le texte du rapport SIS donne suffisamment de données pour calculer  $t_p$  et  $\Delta t$ , que l'on résume dans le tableau :

| Calculs des temps pour le modèle de Horner        |         |                        |  |        |
|---|---------|------------------------|--|--------|
| 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  |

ce qui donne :

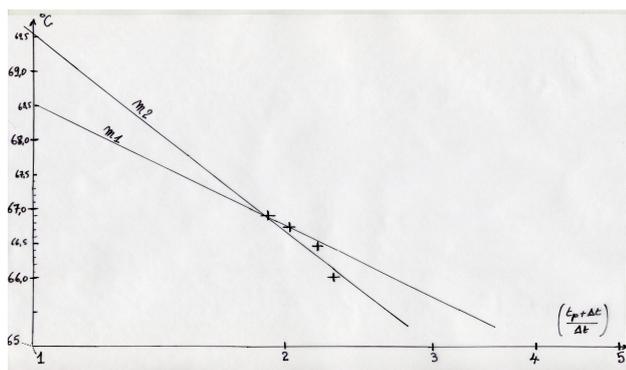


Fig. P2-3. Diagramme de Horner de température, test n°1.

La ligne droite  $m1$  (pente  $5,83^\circ\text{C}/\text{cycle}$  logarithmique, calculée sur papier millimétré, les droites sont reprises ici sur un calque) tracée sur les dernières données (les plus à gauche, qui sont les meilleures), l'intervalle de test étant isolé, donne une température  $T_i$  de Horner de  $68,5^\circ\text{C}$  (au temps de Horner = 1 = intersection de la droite avec l'ordonnée). 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, 120 h soit 5 jours). Sinon, parce que c'est une formule mathématique d'approximation, il est notable qu'elle donne une valeur inférieure à la valeur réelle de  $T_i$ . Roux et al. (voir document 65 bis : *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 de  $69^\circ\text{C}$ .

## 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<sup>3</sup>/h contre 5 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/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 dès 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) | <b>Profondeur verticale/sol</b> (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

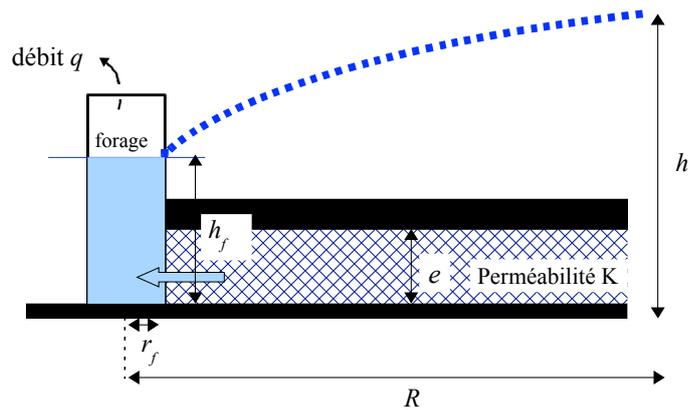
L'écoulement permanent radial le plus simple au niveau d'un puits est donné par la formule de Dupuit (établie en 1863), qui est la forme radiale de la loi de Darcy (par exemple, voir document 67 : *Cassan 1980, p. 165*, et tous les manuels d'hydrogéologie) :

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

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  $\times$  épaisseur ( $T=Ke$ ).

Figure  
P3-1

On retrouve l'équation de la Synthèse :

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

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

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 : *Menjot 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  $K_{form} = 6,26 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ."*

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  $D = 1400 \text{ m}$ .

- 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  $e = 44 \text{ m}$ . 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 :

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

Une première remarque est qu'à géométrie et rabattement équivalents, le forage "moyen" du Dogger exploité depuis une trentaine d'années en région parisienne ( $K_e = T = 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ; voir document 12 : *CNE 2010, annexes, p. 14*) ne produirait que 69 m<sup>3</sup>/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<sup>3</sup>/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 créée 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<sup>3</sup>/s), et qu'on le rapporte à (i.e. on le divise par) la surface (m<sup>2</sup>) 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 :

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

où  $\mu$  est la viscosité du fluide (unité : Pa·s),  $\rho$  la masse volumique du fluide (unité : kg/m<sup>3</sup>) et  $g$  est l'accélération de la pesanteur (9,81 m/s<sup>2</sup>).

Si l'on fait le bilan des unités dans l'équation 2, on voit que celle de  $k$  est en mètres carrés (m<sup>2</sup>), 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<sup>2</sup> pour un fluide avec une viscosité de 1centipoise sous un gradient hydraulique qui fait le terme  $\rho g dh/dl$  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 :

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

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

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

qui est d'unité légale en m<sup>2</sup>·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<sup>3</sup> et 1 10<sup>-3</sup> 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 Earllougher (voir document 70 : *Earllougher 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<sup>-3</sup> 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<sup>3</sup> :

$$\begin{aligned} \mu &= 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s} \\ \rho &= 1100,5 \text{ kg/m}^3 \end{aligned}$$

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<sup>-5</sup> m/s (voir document 6 : *SIS 2009, tableau 1 p. 8*) :

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

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

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

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

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

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

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

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

## 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  $\rho g$ , 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  $1\text{N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m}/\text{s}^2$ , le  $\text{Pa} = \text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s}^2)$ ]

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*,  $t_H$  :

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

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  $\Delta t$ .

On remarquera que plus le temps passe, plus ce temps va tendre vers 1 ( $t_p$  devient négligeable par rapport à  $\Delta t$  qui devient très grand). Réciproquement, comme  $\Delta t$  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 : *Earlougher 1977, p. 46 et 185*) :

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

$p$  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),  $\mu$  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 :

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

On voit tout de suite que, dès qu'on connaît cette pente  $m$ , on connaît 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 :

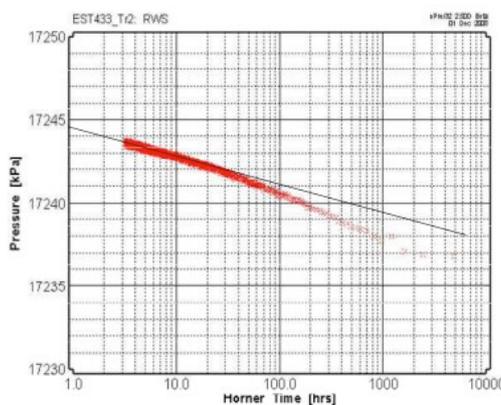


Figure P.3-2. Diagramme de Horner du test n°2 (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.16, p. 82*)  
«Plus le temps passe, plus le temps de Horner diminue pour finalement tendre vers 1»

(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  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  : "83,6 l/mn (5 018 l/h)" (voir document 6 : *SIS 2009, p. 81*), soit  $1,3933 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{sec}$ .

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  $T = 1,56 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ . La conductivité correspondante de formation est donc  $K_{\text{form}} = 6,26 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ ."

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  $2,3/4\pi \approx 0,183$ , elle peut en effet s'écrire :  $m = 0,183 q \rho g/T$ . 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  $1000 \text{ kg/m}^3$ . 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  $1 \cdot 10 \text{ Pa}\cdot\text{s}$  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  $0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ ) on calcule la transmissivité intrinsèque (équation 6) :

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

soit une perméabilité  $K (=T/e) \approx 3,82 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \approx 3,9$  darcies.

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

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

et donc une transmissivité  $T (=Ke) = 1,7 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ .

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  $t_p = 6,79 \text{ h}$  ; voir document 6 : *SIS 2009*, p. 81)  $\sim 0,23\text{h}$ , soit 14 min. Et les dernières données sont les meilleures et s'arrêtent ici à un temps de Horner de  $\sim 3$ , soit  $\sim 3,4 \text{ h}$  (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  $5 \text{ m}^3/\text{h}$  avec un rabattement équivalent eau fraîche de ( $h = p/\rho g = 1600/(1000 \times 9,81) \approx 16 \text{ cm}$  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  $35 \text{ m}^3$  d'eau de formation... ...( $4$  à  $5 \text{ m}^3/\text{h}$ ) sous un rabattement de  $30 \text{ m}$ ."

L'amplitude de l'échelle des ordonnées de la fig. P3-2 est de 20 kPa, soit  $\sim 2$  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) :

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

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 ( $\Sigma$ ) de la partie droite de l'équation 7 ( $\Sigma$  qui est sans unité), un graphique cartésien (i.e. sans aucun axe à échelle logarithmique) de la pression  $p$  vs ( $\Sigma$ ) dessine une ligne droite ( $p = p_i - m \Sigma$ ) de pente  $m$  et d'interception  $p_i$  (quand  $\Sigma = 0$  et quand  $\Delta t$  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) :

| $j$   | $t$<br>heures | $q$ moyen<br>m <sup>3</sup> /h<br>(m <sup>3</sup> /s) |
|-------|---------------|---|
| 0     | 0             | 0   |
| 1     | 1,75          | 3,96 (1,1 10 <sup>-3</sup> )                          |
| 2     | 5             | 4,59 (1,275 10 <sup>-3</sup> )                        |
| N = 3 | 8             | 4,95 (1,375 10 <sup>-3</sup> )                        |

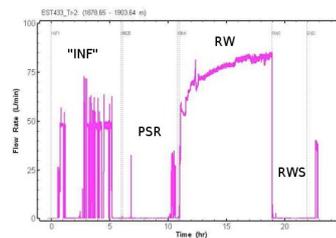


Figure P3-3. La phase de pompage est celle nommée RW. Elle se déroule entre "11h" et "19h". L'axe des Y est le débit en l/mn. (voir document 6 : SIS 2009, fig. 3.2.2b, p. 60)

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

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

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

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

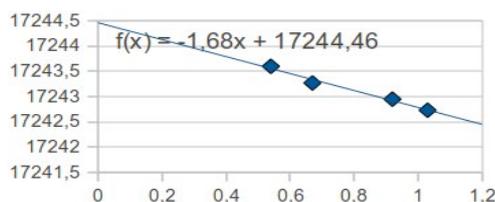
$$\text{pour } j=N = \frac{4,95}{4,95} \log \left( \frac{8-5+\Delta t}{8-8+\Delta t} \right) = \log \left( \frac{3+\Delta t}{\Delta t} \right)$$

Calculs de  $\Sigma$  pour différentes valeurs de  $\Delta t$  :

| $\Delta t$<br>(heure) | $0,8 \log \left( \frac{8+\Delta t}{6,25+\Delta t} \right)$ | $0,93 \log \left( \frac{6,25+\Delta t}{3+\Delta t} \right)$ | $\log \left( \frac{3+\Delta t}{\Delta t} \right)$ | $\Sigma$ | $p$<br>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  $\Delta t$  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 ( $\Sigma$ ) :



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

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

soit une perméabilité intrinsèque  $k$  ( $t_{\text{int}}/e$ )  $\approx 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2 \approx \mathbf{3,6 \text{ darcies}}$ , 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 :

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

et une transmissivité ( $Ke$ )  $\approx \mathbf{1,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}}$  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 ( $1 \cdot 10^3 \text{ m}^2/\text{s}$ ).

#### 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 gêne de la boue était bien présente pendant le pompage et cette gêne 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,  $\Delta p_{pel}$ , 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*) :

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

où  $q$ , le débit,  $\mu$ , 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*) :

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

Le premier terme du crochet de équation 9 est celui qui a le plus d'influence sur le résultat final.  $p(\Delta t=0)$  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  $\Delta t = 0$  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  $\mu$  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,  $c_{pr}$  + compressibilité du fluide,  $\beta$ ) 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 :  $m = 1,68 \cdot 10^3 \text{ Pa/1(débit variable)}$ ;  $k = 3,6 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$  (débit variable) ;  $\mu = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ .

Rayon du forage :  $r = 0,076 \text{ m}$  (opérateurs) ;  $n = 0,22$  (Géo-RS 2008 donnent  $20 \leq n \leq 25 \%$ ) ;  $c_t = c_{pf} + \beta$  avec  $c_{pf} = 3 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  (voir document 6 : *SIS*, p. 64) et  $\beta \approx 3,38 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  (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  $c_t \approx 6,38 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ .

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 :  $p_{(1\text{heure})} = 17\,243 \text{ kPa}$ .

La détermination de  $p(\Delta t=0)$  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).

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

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

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 ( $t_N - t_{N-1} \gg 1\text{h}$ ), *Earlougher* (voir document 70 : *Earlougher 1977*, p. 55) recommande d'ajouter un terme supplémentaire dans l'équation 9, qui devient alors :

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

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  $1,15129 [\log(4/3)] \approx 0,14$  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  $\sim + 20$ . 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 :

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

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

Converti  $\{\div \rho g$ , soit  $\div (1000 \times 9,81)\}$ , 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 :

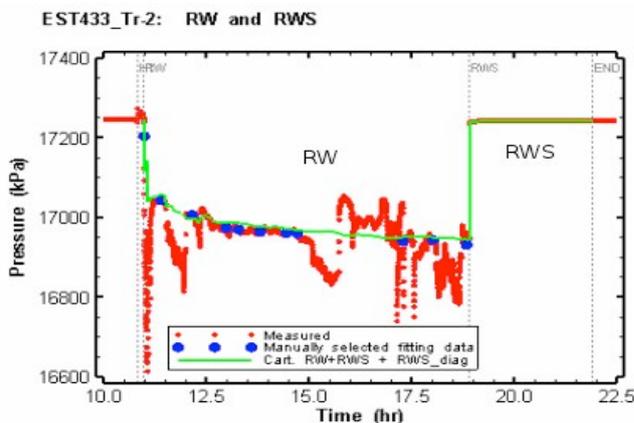


Figure P3-4. Diagramme pression vs temps, test n°2.

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 :

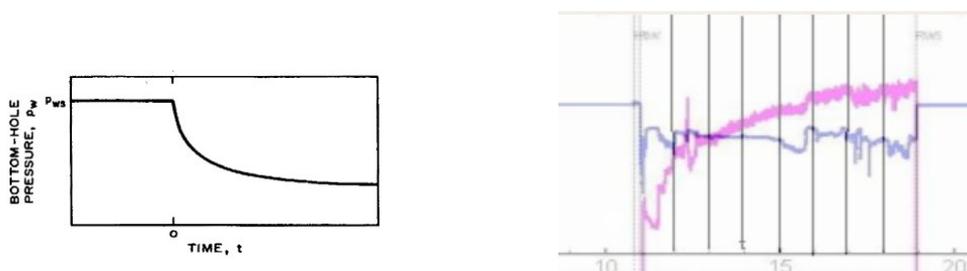


Figure P3-5. A gauche : allure théorique d'une courbe de pression vs temps au cours d'un pompage à débit constant;  
A droite, courbe pression vs temps lors du pompage du test n°2 avec superposition de la courbe de débit (la courbe qui monte est celle du débit).

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 côté 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<sup>3</sup>; 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<sup>3</sup> (on est déjà à 4 m<sup>3</sup> 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<sup>3</sup>. 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<sup>3</sup>), le volume à nettoyer est  $\sim 0,355$  m<sup>3</sup>. 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  $\sim 17\,250$  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  $12\,250 - (17\,030 \text{ ou } 16\,785)$ , c'est-à-dire entre 220 ou 465 kPa, ce qui en terme de rabattement équivalent eau fraîche ( $\div \{1000 \times 9,81 =\}$ ) 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) :

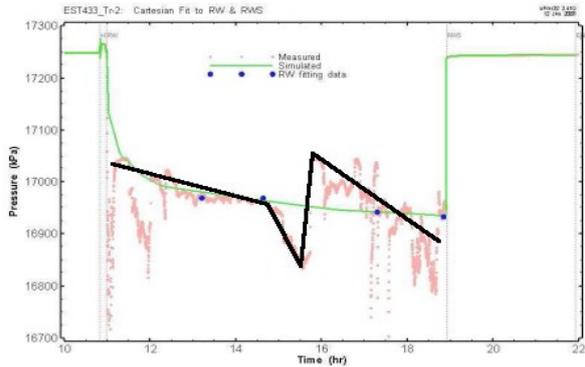


Figure P3-6. Comme les données de pression pour la séquence de pompage du test n° 2 ressemblent à un séismogramme, de nombreux choix de représentations arbitraires sont possibles. On en a tracé un ici avec une ligne brisée en gras.

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 calibration 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) :

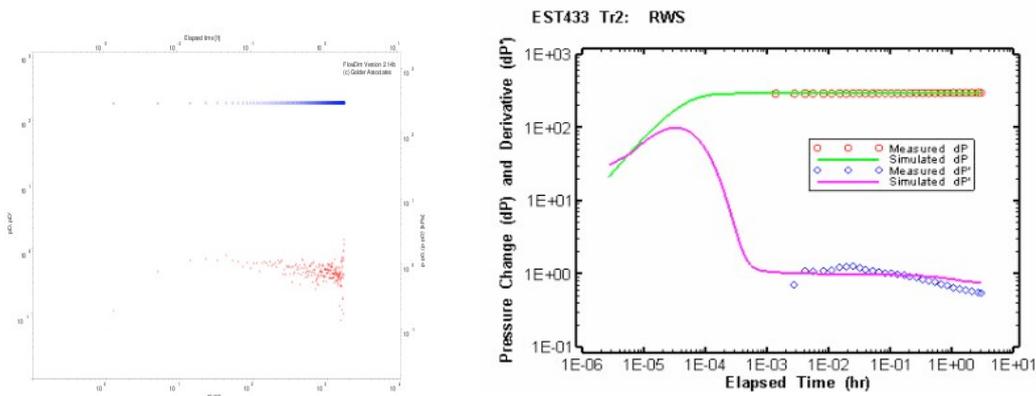


Figure P3-7. Données de la séquence de récupérations RWS mise sur le diagramme de diagnostique log-log.

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 précédent 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  $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$  ; qui se traduit  $\sim 62 \text{ D}\cdot\text{m}$ ). 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;  $1,62 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ). 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 côté 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 durée ( $t_p$ ) 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 inexploitable. 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.

## Pièce annexe 4

# Bure, un site géothermique unique : puissance et durabilité

### Résumé :

Quel que soit l'angle sous lequel on la regarde (transmissivité, puissance thermique ou évaluation par la récente étude BRGM "CLASTIQ"), la puissance du Trias inférieur sous Bure est plus de 2 fois plus élevée que celle du Dogger exploité depuis 30 ans en région parisienne. Si ce Trias inférieur n'avait finalement pas été foré pour sa chaleur en Meuse/Hte-Marne en 1983, c'était à cause de problèmes techniques s'agissant d'une exploitation géothermique sur ce même type de roche, ailleurs en France. Ces problèmes ont par la suite été maîtrisés chez nos voisins. L'exploitation géothermique des grès est aujourd'hui prévue en France également. Sous le Trias inférieur, les séries gréseuses continuent sur une épaisseur 20 fois la sienne. D'une part, on sait, d'après les rares forages existants, que cette puissante série, d'âge Permien cette fois, est localement perméable, probablement autant que le Trias (exploitation classique), mais plus chaude puisque plus profonde. D'autre part, ce type de série sédimentaire profonde, avec sans doute de grandes épaisseurs de faible perméabilité, est devenue une cible pour la géothermie "améliorée" (EGS : Enhanced Geothermal System). De ce point de vue, le site de Bure offre un potentiel bien plus grand que la meilleure cible identifiée par l'étude CLASTIQ du BRGM dans le Bassin parisien. La géologie de Bure ressemble, en beaucoup plus puissant, à celle du laboratoire européen le plus avancé en géothermie améliorée en roches sédimentaires, Groß Schönebeck au Nord de Berlin. Cela laisse entrevoir, à moyen terme, la possibilité d'exploiter des dizaines de doublets géothermiques (un forage pour tirer et un forage pour ré-injecter) sur la zone à des températures allant jusqu'à 160 °C, avec production possible d'électricité.

|   |   |
|---|---|
| I. Comparaison : le Trias inférieur sous Bure est nettement plus puissant que le Dogger parisien..... | 1 |
| a) Perspectives : les exploitations françaises du Dogger et transmissivités.....                      | 1 |
| b) Puissances thermiques .....  | 3 |
| c) Les conclusions de l'étude "CLASTIQ" de l'ADEME/BRGM .....   | 4 |
| II. La réinjection dans les grès : délicate mais maîtrisée.....                                       | 5 |
| III. Permien sous Bure : des niveaux perméables plus chauds.....                                      | 6 |
| IV. Groß Schönebeck : ce que les Allemands font sur un site comme Bure.....                           | 9 |

## I. Comparaison : le Trias inférieur sous Bure est nettement plus puissant que le Dogger parisien

### a) Perspectives : les exploitations françaises du Dogger et transmissivités

La perméabilité du Trias inférieur sous Bure est a priori de l'ordre de 3 darcies (unité employée pour la transmissivité présentée dans la pièce annexe 3-III). Cela est du même ordre de grandeur que le Dogger exploité en région parisienne depuis 30 à 40 ans pour lequel :

*"... l'analyse d'écoulement est que la perméabilité intrinsèque moyenne des couches (2-3 darcies) obtenue dans les tests ..."* (voir document 40 : *Menjot et al. 1993, p. 161*)

Mais le débit dépend de la transmissivité (voir équation de la synthèse générale et pièce annexe 3-II : débit = transmissivité × rabattement) donc de l'épaisseur puisque transmissivité = perméabilité × épaisseur.

Les niveaux perméables producteurs du Dogger ne sont pas spécialement épais. Le record est à Meaux où on a 40 m pour un des doublets. La moyenne arithmétique en épaisseur de 32 forages toujours exploités (Meaux inclus) repris de Maget (voir document 38 : *Maget 1983, annexe II*) est de ~ 21,4 mètres, confirmée par Menjot et al. (voir document 40 : *Menjot et al. 1993, p. 161*) qui donnent une épaisseur moyenne cumulée de 15 à 25m. On observe, en général, de 5 à 7 couches productrices, épaisses de quelques mètres, séparées par des intervalles non perméables de plusieurs mètres (voir document 69 : *Menjot et al. 1996, p. 39-47*).

Ainsi, la transmissivité indiquée dans le rapport Maget (voir document 38 : *Maget 1983, annexe II*), pour les

forages toujours exploités, oscille entre 8,3 D·m (injecteur d'Evry) et 85 D·m (injecteur de Meaux-Beauval) avec une moyenne arithmétique pour 31 forages de ~ **44,5 D·m**.

Les débits d'exploitation maximaux, ceux d'hiver, par doublet vont de ~ 60 m<sup>3</sup>/h (à Melun l'Almont où l'on tire 120 m<sup>3</sup>/h avec 2 puits producteurs) à 350 m<sup>3</sup>/h (Villeneuve-St-Georges ; voir document 20 : *Lemale et Jaudin 1998, p. 78*). L'exploitant choisit le débit en fonction de son besoin. Le rabattement est une variable dépendante (voir équation 1 de la pièce annexe 3) pour laquelle on trouve peu de données, mais qui est, pour de tels débits, inférieur à 100 m seulement pour les meilleurs doublets et nettement supérieur à 100 m pour les autres (par exemple, voir document 69 : *Menjot et al. 1996, p. 129-138* ; voir document 72 bis : *BRGM 1985, p. 117*). La température fond de trou, de 56 (La Courneuve Sud) à 85 (Coulommiers), est assez élevée : 72,8 °C comme moyenne arithmétique pour 37 doublets (voir document 20 : *Lemale et Jaudin 1998, p. 78*), soit 5-6% de plus qu'à Bure.

De ces exploitations au Dogger, un rapport parlementaire a écrit (voir document 73 : *Birraux et Le Déaut 2001, chap. II-II-1*):

*"Les réalisations du Bassin parisien sont incontestablement des expériences concluantes mais qui n'ont toutefois pas empêché, dans les années 1970-1980, la géothermie d'avoir une image négative pour des raisons de non rentabilité supposée et de problème de corrosion non maîtrisés. Or ces deux assertions sont totalement fausses aujourd'hui. (...) Le coût du MWh<sub>th</sub> géothermique ressortait à moins de 70 F HT en 1998, ce qui est un niveau attractif et témoigne de l'intérêt qu'il y aurait de développer la géothermie basse température dans notre pays."*

La ville de Tremblay-en-France montrait que le prix de son MWh géothermique (couvrant 85 à 90 % des besoins) avait baissé de 5 à 10 % entre 1999 et 2004 alors que dans le même temps le prix du MWh moyen au gaz naturel avait augmenté de ~ 20%, (voir document 74 : *La Géothermie en Ile de France n°5, 2004, p. 4*).

*"Si l'on compare une station géothermique, son doublet et sa centrale, à une chaudière, le prix de revient du MWh issu de cette chaudière géothermique (sur la base d'une production de cinquante MWh par an) s'élève à 15 €, alors que le gaz en sortie chaudière revient à 30 € par MWh. Le coût à l'utilisateur, cependant, dépend du nombre d'utilisateurs..."* (voir document 74 bis : *BRGM/ADEME/ARENE 2005, p. 8*)

Mais le chauffage géothermique restait pénalisé par un taux de TVA sur l'abonnement à 19,6 contre 5,5 % pour le chauffage électrique et le gaz. Ce taux a finalement été redescendu à 5,5 % en 2006.

A partir de 2004-2005, le prix du pétrole (et donc du gaz) est reparti fortement à la hausse (de l'ordre de 20 dollars à environ 80 \$/baril aujourd'hui) et la géothermie sur l'aquifère du Dogger connaît une nouvelle phase de développement. Trois nouveaux sites viennent d'être créés : en 2010, doublet à l'aéroport d'Orly ("Orly-III"); en 2012, doublet pour Paris Nord-Est/19ème/Porte d'Aubervilliers (Cie Parisienne de Chauffage Urbain ; 37ème centrale géothermique d'Ile-de-France, réinjectera au Dogger en été de l'eau chaude résultant de la production de froid) ; en 2012, doublet au Val Maubée (Val de Marne, municipalités de Torcy et Lognes). Huit dossiers sont déposés pour la création de nouveaux sites d'exploitation géothermique : Neuilly sur Marne, villes groupées d'Arcueil-Gentilly (qui le veulent opérationnel en 2015), Rosny sous Bois ; Bagneux, Grigny, Villejuif, Ivry sur Seine et Village Nature.

Par ailleurs, les anciens doublets ont ~ 30 ans (41 ans pour Melun l'Almont) et doivent être rénovés. Suivant l'état des forages, quelques uns ont été rebouchés et un nouveau doublet a été foré à proximité : en 2007, pour Orly-II (Orly-I fonctionne toujours) ; en 2012, pour Coulommiers et également pour Le Mée-sur-Seine (2012) et Chelles (2012).

D'autres installations anciennes rénovées (rechemisage) sont renforcées par un troisième forage formant désormais des triplets : en 2008, à Sucy-en-Brie (la couverture géothermique passera de 77 à 91% et 2300 nouveaux raccordements), à La Courneuve Nord (2011), Champigny sur Marne (2012), Bonneuil-sur-Marne (2012) et Meaux Beauval et Meaux Hopital (prévus en 2013) et cela est aussi prévu à Fresnes.

Les forages des autres exploitations seront simplement rechemisés (Vernier 2012).

Un seul doublet a vu une baisse de température (Alforville 74 → 71°C).

Un forage à 2000 m dure un mois et ces derniers forages au Dogger ont été réalisés par l'opérateur COFOR, celui-là même qui a foré le EST433 de Bure pour l'Andra.

En comparaison de celle du Dogger, la transmissivité du Trias inférieur sous la zone de Bure est nettement plus élevée. Celle du test n° 2, épais de 25 m (ce qui correspond à l'épaisseur du Dogger perméable exploitée), avec les chiffres des opérateurs transcrits en darcies, est de : 62,2 D·m ("*nominale*") ou 87,5 D·m (modèle de Horner) (voir pièce annexe 3-III). En faisant le calcul sur les données brutes selon les règles de l'Art avec le modèle de Horner, elle est de 91 D·m (voir pièce annexe 3-IV-c). Ce seul intervalle du test n° 2 est déjà l'égal du meilleur doublet du Dogger (Meaux-Beauval : 85 D·m).

Pour la zone de 44 m pour laquelle, selon la diagraphie CMR (expliquée en pièce annexe 3-II-b), "*les porosités et teneurs en eau libre sont dans l'ensemble fortes et régulières*" (voir document 63 : *GEO-RS 2008, p. 38*), on va donc avoir, suivant les perméabilités utilisées (voir pièce annexe 3-III) :

- "*nominale*" opérateur :  $2,49 \times 44 \approx 109,6$  D·m,
- modèle de Horner opérateur :  $3,48 \times 44 \approx 153$  D·m,
- meilleur calcul selon les règles de l'Art :  $3,6 \times 44 \approx 158$  D·m.

C'est 2 à 3 fois plus que la moyenne de celles du Dogger exploité depuis 30 ans. Pour l'ensemble du Trias inférieur et la base poreuse du Trias moyen adjacent, il n'est pas exclu, et même assez probable, que la transmissivité du tout soit le double de celle de ces 44 m et il faut donc probablement doubler ces valeurs de transmissivité : 200 à 300 D·m. C'est un aquifère puissant.

De plus, les profils de géophysiques (voir document 5 : *Andra 2009, p. 109*) "*indiquent que les mesures enregistrées à la base du Trias par le forage EST433 ne correspondent pas à une anomalie locale (fracturation, zone montrant une porosité anormalement élevée ou basse, ...) et peuvent être extrapolées à une vaste zone autour du forage. Les données acquises dans ce forage dans les formations du Trias inférieur paraissent donc représentatives de la plus grande partie de la zone de transposition (BEICIP, 2008).*"

## b) Puissances thermiques

La puissance thermique qui peut être extraite de la saumure chaude par un doublet de forages est (par exemple, voir document 69 : *Menjoz et al 1996, p. 66*, qui ont déjà fixé la valeur de  $\rho c$ ) :

$$P = \rho c q (T_{hp} - T_{inj}) \quad (\text{équation 1})$$

où P est la puissance en Watts (unités du S.I.),  $\rho$  la densité de la saumure, c la capacité calorifique massique (en  $\text{J kg}^{-1} \text{°C}^{-1}$ ), q le débit, et T les températures (en haut de puits, et à la réinjection). On appelle aussi " $\rho c$ " la capacité calorifique volumique.

C'est l'eau pure qui a la capacité calorifique la plus haute ( $c \sim 4180$  à  $50\text{°C}$ ). La capacité calorifique baisse un peu avec la concentration en sel (cela a à voir avec la viscosité).

- Pour la saumure du Trias,  $c = 3576,6$  (voir document 75 : *Phillips et al. 1981 tab. 5*, pour une concentration proche de celle de Bure, à  $50\text{°C}$ , exprimée sous la forme 3 molal [molalité : mole de soluté par kg d'eau]) et  $\rho = 1094$  pour la saumure chaude décompressée.

- La salinité moyenne du Dogger est aux environs de 20 g ( $\sim 0,35$  molal) et va jusqu'à 30g/l ( $\sim 0,53$  m). Le rapport Phillips et al donne pour une salinité de 0,47 molale à  $50\text{°C}$  :  $c = 4046,4$ . On retient une valeur un peu plus élevée : 4055. Densité décompressée du fluide à  $50\text{°C} \sim 1000$ .

On fait le calcul pour une saumure réinjectée à  $40\text{°C}$  et on retire un degré aux températures de fond de puits

(perte pendant la remontée que contrebalance la chaleur de la pompe). On suppose que la partie supérieure du réservoir (un peu moins chaude) sera plus productive que la partie inférieure et on utilise une température fond de puits de 68°C pour Bure.

Afin de pouvoir comparer les deux aquifères, on prend comme "dénominateur" commun un rabattement de 30 m. On a calculé (voir pièce annexe 3-II-b) que le débit est alors de 69 m<sup>3</sup>/h pour le Dogger moyen (0,0192 m<sup>3</sup>/s) et de 190 à 380 m<sup>3</sup>/h pour le Trias inférieur sous Bure (0,0528 à 0,106 m<sup>3</sup>/s). On calcule alors avec l'équation 1 :

Dogger *moyen* complet :  $1000 \times 4055 \times 0,0192 \times (71,8 - 40) \approx 2,5 \text{ MW}$

Trias EST433 pour 44 m :  $1094 \times 3576 \times 0,0523 \times (67 - 40) \approx 5,5 \text{ MW}$

Trias EST433 ?complet :  $1094 \times 3576 \times 0,106 \times (67 - 40) \approx 11,2 \text{ MW}$

C'est un fonctionnement "au repos" puisque la pleine puissance des doublets du Dogger, sur la période hivernale, est donnée de 9,5 MW et que l'énergie géothermique consommée a été de 39 700 MWh/an/doublet (moyennes arithmétiques constatées sur 31 installations citées ; voir document 76 : *Laplaige et al. 2000, tab. 3.1*). Mais c'est un moyen de comparer les puissances thermiques des deux aquifères. Celle du Trias inférieur sous Bure est de plus de 2 (il y a forcément plus que 44 m) à 4 fois supérieure à celle du Dogger exploité de la région parisienne.

### **c) Les conclusions de l'étude "CLASTIQ" de l'ADEME/BRGM**

De 2006 à 2008, a eu lieu une grande étude sur le potentiel géothermique des séries grés-argileuses très profondes du Nord de la France. Il est indiqué dans la partie relative au bassin de Paris (voir document 54 : *Bouchot et al. 2008, p. 53*) :

*"Concernant les Grès du Buntsandstein de Lorraine, seule la région de Saint-Dizier - Bar-le-Duc présente un potentiel géothermique estimé à ~ 10 GJ/m<sup>2</sup> en raison d'un réservoir épais d'environ 350-400 m, à 60-70°C, situé vers 1500 m de profondeur (fig. 18)."*

L'étude CLASTIQ était basée sur des critères bien plus larges que ceux de la simple exploitation d'un aquifère à perméabilité avérée à 1900 m de profondeur, comme on l'a traité ci-dessus. Elle prend en compte l'ensemble des séries grés-argileuses, qui dans le centre du Bassin parisien sont très profondes, sans s'occuper des perméabilités.

La figure 18 mentionnée dans la phrase ci-dessus joue sur les couleurs (voir figure P.4-1). Elle traite, pour l'ensemble du Bassin parisien, d'une séquence sédimentaire grés-argileuse d'âge surtout Trias moyen (appelée "grès de Donnemarie") qui n'existe pas en Lorraine. Mais les grès Buntsandstein Trias inférieur de Lorraine qui nous intéressent ici sont traités comme un équivalent latéral précoce dans le temps et à ce titre ont été intégrés à la carte.

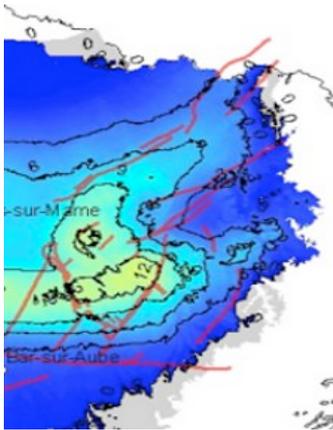


Figure P4-1. Scan sur la partie orientale de la fig. 18 de Bouchot et al. 2008  
**Potentiel géothermique des faciès grés-argileux du Trias**

Ce scan montre toute la partie Est du Bassin parisien, à partir d'environ Vitry-le-François (à gauche) jusqu'aux affleurements du Trias en Lorraine à droite, et dans les Ardennes au Nord. Les traits rouges sont des failles et celle Est-Ouest en bas est la faille de Vitte. La zone de Bure se reconnaît grâce à ces failles. C'est la partie de couleur vert-clair qui ressort bien, de forme ovale orientée WSW-ENE, située dans un "V" qui est formé : à gauche par la faille de la Marne et celle de Poissons, et à droite par le fossé de Gondrecourt (contre lequel est écrit "12"). Cette forme étirée ovale n'est autre que le "golfe" d'apport des grès du Trias inférieur reproduite en figure 1 de la Synthèse générale. Ces auteurs donnent à cette zone de Bure le potentiel thermique le plus élevé (12 GJ/m<sup>2</sup>) de toute la partie Est du Bassin parisien (la courbe d'isopotential suivante vert-bleuté qui prend la partie Sud de la Meuse plus une branche qui part à l'Ouest, est à 9 GJ/m<sup>2</sup> puis ça continue à baisser dans les tons de plus en plus bleus). C'est ce que dit la phrase citée ci-dessus : la "région de St Dizier-Bar-le-duc", plus précisément la zone de Bure, est la seule qui présente un potentiel géothermique élevé.

Le "golfe" d'apport de ces grès/argiles du Trias y est bien reconnaissable. Et CLASTIQ confirme que c'est ce golfe de Bure qui recèle le meilleur potentiel thermique de tout l'Est du Bassin Parisien. Les conclusions n'ont pas changé depuis le rapport Maget et Rambaud de 1979 (dont on a reproduit la carte en figure 1 de la synthèse générale).

On trouvera sur cette même figure 18 du rapport Bouchot et al. de 2008, plus à l'Ouest, dans une zone peu peuplée proche de Epernay-Sézanne-Nogent-sur-Seine, un potentiel encore meilleur que celui de cette figure P4-1. Mais c'est uniquement parce que les "grès de Donnemarie" sont plus profonds donc plus chauds. Alors, c'est au Permien sous Bure, absent de l'étude CLASTIQ, qu'il faut comparer la partie centrale de la figure. On comparera plus loin le potentiel maximal des "grès de Donnemarie" à celui du Permien sous Bure.

L'étude CLASTIQ donne, pour le Dogger exploité de la région parisienne, un potentiel de 2,5 à 5 GJ/m<sup>2</sup> (voir document 54 : Bouchot et al. 2008, p. 53 et 64) donc ~ 3 fois inférieur à celui qu'ils donnent dans l'axe du "golfe" d'apport des grès du Trias inférieur sous la zone de Bure (> 12 GJ/m<sup>2</sup>; voir figure P4-1).

## II. La réinjection dans les grès : délicate mais maîtrisée

En 1982, on s'apprêtait à forer deux doublets pour l'exploitation géothermique du Trias inférieur en Meuse/Hte Marne : un à Maizey contre St Mihiel, dans la Meuse, pour chauffer 10 ha de serres (voir document 77 : Desplan et al. 1981) et un à Saint-Dizier en Haute-Marne pour chauffer un quartier d'habitation (voir document 42 : Géochaleur 1982). In extremis, en décembre 1982, ces projets ont été stoppés par le BRGM. Celui-ci était face à un problème inattendu sur un projet équivalent dans des grès Trias près d'Orléans : Melleray. La productivité était bonne mais en ré-injection, les débits étaient divisés par 2 ou 3 et les raisons n'en étaient pas comprises. Le rapport Maget (voir document 38 : Maget 1983, p. 173) écrit :

*"... difficulté de réinjecter l'eau dans le même aquifère. Les causes de cet obstacle peuvent être multiples : mauvaises approximations dans les modèles hydrauliques, phénomènes chimiques, erreurs dans les opérations mêmes de développement ? Toutes ces possibilités doivent être analysées très rapidement si l'on veut débloquer la situation actuelle et confirmer le Trias comme objectif économique potentiel."*

La solution est venue du Danemark et d'Allemagne. Les responsables principaux de la baisse de débit lors de la ré-injection de saumure dans des grès profonds sont :

- la précipitation d'oxydes de fer : il faut donc empêcher tout contact entre le fluide hydrothermal et l'oxygène de l'air (mise en pression sous azote neutre);
- les fines particules argileuses : il faut filtrer l'eau à un ou deux microns ;
- les changements trop brutaux de débits : il faut "conduire" le doublet doucement (il apparaît que le puits de

Melleray a été endommagé suite à un arrêt, puis un redémarrage à fort régime peu après ; voir document 78 : Lopez et Millot 2008, p. 125).

Avec l'application stricte de ces principes, les Danois et Allemands, puis les Polonais, exploitent des saumures de grès profonds en doublet (production-injection) sans problème particulier. Cela a débuté il y a plus de 25 ans, pour ne citer que les plus profonds chez nos voisins : Thisted 1984 ; Warren 1985 ; Neubrandenburg 1989 ; Neustadt-Glewe 1995 ; Pyrzyce 1997 ; Uniejów 2001 ; Copenhague 2004 ; Neuruppin 2007 ; Bruchsal 2002 ; Landau 2007 ; démarrage actuel de Insheim (pour ces 3 derniers cas, grès en partie seulement) ; on verra plus loin le cas de Groß Schönebeck.

Le grès étant un filtre naturel, il faut être rigoureux pour l'exploitation géothermique en profondeur, et cela dès le forage (déjà avec le problème des particules qui pourraient être introduites par la boue de forage dans les grès autour du trou de forage), puis dans le choix du puits de réinjection après essais, et dans la mise en place de la crépine. La maintenance doit aussi être rigoureuse (les fuites de conduits permettent à l'air d'oxyder le fluide géothermique ; suivi des pression et système de nettoyage intégré pouvant être mis en action sans arrêter l'exploitation). La jeune compagnie lituanienne Geoterma en a fait l'expérience à Klaipėda (2000) peu de temps après l'accession à l'indépendance. Certains de ces principes n'ayant pu être respectés (dès les forages) pour causes administratives et financières, son exploitation fonctionne très mal, alors même que la profondeur n'est que de ~ 1000 m.

L'étude CLASTIQ (CLAYed sandSTone In Question) du BRGM/ADEME, première grande étude du potentiel géothermique de la moitié Nord de la France depuis celles de la fin des années 1970 - début des années 1980, s'intéresse aux séries gréseuses très profondes. C'est évidemment en vue de les exploiter dans un futur proche. Le rapport final de CLASTIQ indique donc (voir document 79 : Bouchot 2008 ; voir synthèse générale, p. 3) :

*"...la mise en évidence de sérieux problèmes de réinjection des fluides géothermaux a stoppé les opérations de démonstration comme celle de Melleray près d'Orléans. Cependant, dans plusieurs pays européens, ces formations clastiques sont exploitées pour la géothermie depuis une vingtaine d'années, certaines des principales difficultés ayant été surmontées. "*

et la partie de l'étude CLASTIQ consacrée à la ré-injection précise que (voir document 78 : Lopez et Millot 2008 ; voir synthèse générale, p. 3) :

*"...les projets géothermiques... où l'on prévoit la réinjection de saumures refroidies dans des formations clastiques doivent être planifiés très soigneusement. Une méthodologie et une technologie adaptées permettraient d'éviter pratiquement tous les problèmes de réinjection. "*

La raison de l'interruption du projet meusien de chauffage géothermique de serres agricoles de Maizey a donc disparu et on s'apprête à revenir aux grès français. On notera que la puissance thermique disponible pour une telle exploitation de serres (50 à 100 emplois) serait supérieure à Bure puisqu'à cause du pendage vers le centre du Bassin parisien, la couche est plus profonde, donc plus chaude, ~ 69°C sous Bure, pour 54 à 58 °C évalués pour Maizey pour une épaisseur semblable (voir document 77 : Desplan et al. 1981, p. 7).

### III. Permien sous Bure : des niveaux perméables plus chauds

Le Trias inférieur étant la couche la plus basse du Bassin Parisien (si on prend l'image souvent utilisée de la pile d'assiettes, le Trias serait l'assiette du dessous), il repose sur le socle, composé de roches granitiques et métamorphiques qui affleurent dans les Vosges, le Massif Central et le Massif Armoricain. Mais le socle peut aussi être composé de roches sédimentaires, simplement plus anciennes que celles qui forment le Bassin Parisien. C'est le cas ponctuellement en dessous de Bure, avec un bassin Permien reconnu par la géophysique (voir document 22 : Andra 2001, t.2, chap. II, p. 11-12 ; mis en gras par nous) :

*"Cette séquence est calibrée par les forages... Germisay (profil 88GAY07 **proche du laboratoire**) à **conglomérat et grès rouges épais**. Ces dépôts correspondent au "Rotliegend" supérieur défini en Allemagne*

(Sarre...)... Cette séquence oxydée s'est déposée dans **un bassin centré sur le secteur étudié...** ... La carte... montre un épaissement maximum sur la ligne 88B1E10 (environ 2800 m)... (...) l'extension du **bassin permien dit de "Germisay" qui s'étend à l'aplomb du secteur du laboratoire...** (...) ...vers l'Est, le remplissage du bassin de Germisay s'amincit fortement (de plus de 2500 mètres à 500 mètres). "



Figure P4-2. **Forme du bassin Permien gréseux sous Bure**

(voir document 22 : Andra 2001 t.2, fig. 2.3-10)

Courbes d'égalité de profondeur de la base du Permien/toit du Carbonifère sous-jacent : 4500 m au centre puis 4250, 4000, 3750, 3500, 3250, 3000 et 2750 m NGF.

- EST 103 = laboratoire de Bure
- EST433 (rajouté) : forage géothermique au Trias (n'a été qu'à - 1621 m NGF)
- Lignes noires pentagone : "Zone de transposition" Andra, rajoutée
- Germisay : forage qui a atteint 2362 m NGF discernable tout en bas (Sud de Lezéville)

Ce bassin (voir figure P4-2) est une sorte de montagne à l'envers, étirée Ouest-Est à sommet aplati (axe EST433-Gondrecourt). Ses flancs sont raides et remontent vite lorsque l'on s'éloigne de cet axe. C'est certainement un graben (fossé d'effondrement de l'époque) explique Paul Huvelin, géologue meusien qui a longtemps cartographié des séries hercyniennes du même âge.

En cote NGF (par rapport au niveau de la mer), le forage EST433 s'est arrêté dans le Trias inférieur, à 1621 m (voir pièce annexe 3-I). Sur cette même verticale, la base du Permien est à ~ 4400 m, soit ~ 2780 m plus bas. A cet endroit la série grés-argileuse permienne est 20 fois plus épaisse que celle du Trias inférieur recoupé.

Le caractère unique du site sera mieux apprécié par comparaison à la meilleure cible géothermique qui a été identifiée par l'étude CLASTIC 2006-2008 de l'ADEME/BRGM (voir document 54 : Bouchot et al. 2008, p. 81, 87) : les "grès de Donnemarie" (Trias grés-argileux du centre du bassin, d'âge Muschelkalk et Keuper inférieur) à l'Ouest immédiat d'une ligne Epernay-Sézanne-Nogent-sur-seine, zone peu peuplée (voir document 54 : Bouchot et al. 2008, p. 53 ; mis en gras par nous) :

*"... la profondeur du toit du réservoir est située entre 2500 et 3000 m, pour une température de 100 à 120°C et une épaisseur remarquable comprise entre 250 et 450 m."*

Que faut-il dire alors de l'épaisseur de 2700 m des grès profonds sous Bure avec un gradient de température visiblement équivalent ?

On a vu précédemment que la zone de Bure est bien classée par l'étude CLASTIQ pour le Trias au-dessus de 2000 m. Mais le petit et profond bassin permien situé juste en dessous de la zone de Bure n'a pas été traité dans l'étude CLASTIQ (la figure P4-1 ne traite que du Trias).

Le rapport Bouchot et al. indique que (voir document 54 : Bouchot et al. 2008, p. 27) :

*"Les grès de Donnemarie médians se composent de grès rouges déposés dans des chenaux en tresse, les grains sont moyens à grossiers, légèrement feldspathique, à ciment anhydrique et liant argileux. Ils sont organisés en bancs métriques à plurimétriques, avec des intercalations d'argile rouges sablo-silteuses à anhydrite..."*

avec des perméabilités qui sont faibles en général, < 10 mD (milli-darcies), sauf au sommet, et une salinité à cet endroit de 180 à 300g/l.

Si le Permien est connu à la limite Meuse/Hte Marne, c'est qu'il a été foré sur 1328 m au forage de Germisay (10 km au Sud du laboratoire, voir figure P4-2). En dehors de son épaisseur exceptionnelle, sa description ne diffère guère des grès de Donnemarie (voir document 33 bis : *SNPA 1956, rapport géologique p. 11-12*).

Un rapport mensuel de ce forage de Germisay, concernant un intervalle de 140 m (voir document 32 : *SNPA, février 1956*) mentionne des "*pertes de boue partielles irrégulières variant de 0,16 à 2,5 m<sup>3</sup>/h*" commençant à 760 m sous le contact avec le Trias (ce qui indique des niveaux perméables, la pression étant supérieure dans le forage, à l'inverse des figures 1 et 2 de la synthèse générale). Par ailleurs, deux tests hydrauliques ont été effectués : un dans des grès grossiers à 360 m sous le contact qui n'a rien produit (n° 11 : 12 l de boue de forage) et l'autre dans un conglomérat à 780 m sous le contact avec le Trias qui a donné 2,8 m<sup>3</sup> de saumure à 180 g/l en 40 mn (n° 12). C'est le plus productif des 12 tests (Dogger, Trias, etc.) réalisés en boue pendant le forage (tests à valeur purement qualitative comme présenté en pièce annexe 1-III-a).

Finalement, le rapport géologique conclut (voir document 33 bis : *SNPA 1956, p. 19*) :

*"Permien : En majeure partie gréseux, un peu argileux, moyennement poreux et perméable, il constitue par endroit un bon réservoir, où a été trouvé de l'eau fortement salée."*

Aux environs de St Dizier aussi (où l'épaisseur du Permien est seulement d'environ ~ 100 m), une conclusion semblable a été donnée (voir document 42 : *Géochaleur 1982, p. 54-55 puis 57*) :

*"La partie supérieure des grès du Saxonien-Permien... Nous noterons qu'au sondage Les Quatre Bras 1, leur traversée a provoqué des pertes totales de boue, 25 m sous la base du Buntsandstein." (...)*  
*"Il semblerait que les grès du Buntsandstein et ceux de la partie supérieure du Saxonien-Permien soient les plus perméables..."*

Ainsi, le Permien était la cible géothermique dominante du projet de St Dizier où l'épaisseur du Trias inférieur (Buntsandstein) est très limitée, ~ 15 m, puisque l'on sort du "golfe" d'apport de ces grès (voir figure 1 de la synthèse générale). Le BRGM comptait comme épaisseur de grès propres à St Dizier : 35 m de Permien, 10 m de Trias inférieur et 15 m de la base du Trias moyen (voir document 42 : *Géochaleur 1982, p. 56*).

Le Permien sous Bure ne sera pas le même que sous Germisay mais on note que, entre 760 et 900 m sous la base du Trias recoupé au EST433, niveau qui est perméable à Germisay, la température sera de l'ordre de 100°C.

A partir du milieu du test n°1 où l'on a une estimation de la température : 58 m base forage + 760 ≈ 820 ; avec un gradient de 3,5°C/100 m en profondeur (voir pièce annexe 2-V) :  $8,2 \times 3,5 = 28,7^\circ\text{C}$  (+ 69 ≈ 98 °C); et, 140 m plus bas  $960/100 \times 3,5 \approx 33,6$  (+ 69 ≈ 103 °C).

Outre la puissance thermique, ces températures offrent plus de choix. A partir de 90°C, on peut passer un excédent d'énergie pour produire un peu d'électricité (matière première gratuite et très peu d'investissement puisque les forages existent et que la saumure est déjà remontée). Par exemple, concernant le doublet géothermique de la petite ville de Neustadt-Glewe dans le Nord de l'Allemagne, la saumure était de 219 g/l dans des grès et les silts de 60 m d'épaisseur, la température était de 98°C et la perméabilité de 0,5 à 1 darcy. Cela permet de chauffer à 95% 1300 maisons, 20 commerces et une industrie du cuir (22 200 MWh géothermiques/an), mais ce doublet était souvent sous-exploité. Les Allemands lui ont alors ajouté une petite unité de production d'électricité par cycle de Rankine (un fluide secondaire s'évapore à basse température et actionne une turbine ; rendement faible à 90-100°C mais qui s'améliore pour des températures plus élevées). La centrale géothermique a désormais une puissance de 17 MW<sub>th</sub> thermique et un apport de 0,23 MWe<sub>é</sub> électriques (ce qui permet de vendre un peu d'électricité plutôt que d'en consommer).

## Neustadt-Glewe



Une telle zone, ou des zones équivalentes, existe donc probablement dans le Permien à la verticale sous Bure mais en plus, en-dessous, il restera encore  $\approx 1800$  m de série gréseuse.

### IV. Groß Schönebeck : ce que les Allemands font sur un site comme Bure

L'étude CLASTIQ de ADEME/BRGM sur les séries gréseuses profondes de la moitié Nord de la France était en symbiose avec le programme européen contemporain, ENGINE (ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe de novembre 2005 à avril 2008), auquel participait 16 pays (voir document 80 : *Calgagno et al. 2008, résumé*) :

*"le projet européen ENGINE avait pour but de coordonner les efforts de ceux qui sont impliqués dans le développement des systèmes géothermiques améliorés (EGS [Enhanced Geothermal Systems]). Le challenge de cette amélioration requiert le développement de méthodes innovantes pour explorer, développer et exploiter des ressources géothermiques qui ne sont pas économiquement viables par les méthodes conventionnelles. Cette définition inclut différentes méthodes pour étendre l'accès à la chaleur en profondeur afin de fournir une fourniture énergétique de base et contribuer à atteindre l'objectif du plan technique européen de stratégie énergétique (i.e. pénétration du renouvelable à 20 % du marché en 2020)."*

Pour les techniques EGS, on a beaucoup parlé en France de la géothermie "roche sèche" (granites) de Soultz-sous-Forêt. Mais le constat à l'heure actuelle, en Allemagne et en Suisse, est que tous les nouveaux projets de géothermie très profonde sont orientés sur des roches sédimentaires au moins en partie poreuses. Une perméabilité naturelle existe déjà et il suffit seulement de l'accroître.

Lorsque le rapport CLASTIQ sur le Bassin Parisien qualifie de "*remarquable*" les 250 à 450 m des grès de Donnemarie, entre 2500 et 3000 m de profondeur, sous une zone peu peuplée, tout en parlant de perméabilité très faible de " $< 10$  mD", c'est dans l'esprit du projet européen ENGINE. Or, le Permien sous Bure est un équivalent des grès de Donnemarie mais  $\times 6$ .

L'exemple le plus instructif pour un site comme Bure, et qui a déjà bénéficié de fonds européens dans le cadre de ENGINE, est celui de Groß Schönebeck (à 50 km au Nord-Est de Berlin). On y trouve le même Permien Rotliegend, peu fracturé, à une profondeur semblable de 4100 à 4200 m, avec une température de 150°C et une concentration en sels de 255g/l. Toutefois, son épaisseur n'est que d'une centaine de mètres.

Groß Schönebeck est un laboratoire de techniques EGS (Enhanced Geothermal Systems) soutenu par le gouvernement. Les deux forages sont à 28 m l'un de l'autre en surface, mais leurs extrémités, à une profondeur proche de 4300 m, sont séparées de 500 m.

La perméabilité moyenne dans la cible profonde est faible ( $\sim 10$  mD (jusqu'à 100 mD)).

Pour augmenter cette perméabilité, dans le cadre de ENGINE, les Allemands ont fracturé les grès en injectant un fluide portant des grains solides (billes de céramiques de 0,4 à 0,8 mm), qui garde la fracture ouverte. Ils ont réussi à augmenter de manière durable la productivité d'un facteur à 5-6 (voir document 81 : *Zimmermann et Reinicke 2010*). La création de telles fractures ouvertes perpendiculaires à la contrainte régionale mineure s'est faite à une pression légèrement supérieure à celle de la saumure dans la roche et a été

particulièrement silencieuse du point de vue sismique (voir document 82 : *Urpi et al. 2011*)

Une petite centrale géothermique de production électrique a ensuite été installée en 2011. Elle est prévue pour tester différents types d'échangeurs (en plaques, en tubes...). A la surface, une dérivation a été faite parallèlement au circuit de la boucle géothermale, pour que l'on puisse y plonger des spécimens pour l'étude de la corrosion (échantillons de métaux utilisés dans les échangeurs, les pompes...) et déterminer les meilleurs matériaux pour la géothermie. Groß Schönebeck est un laboratoire multi-disciplinaire du Centre de Recherche Allemand de Géoscience (GFZ, GeoForschungsZentrum, Potsdam) qui accroît son avance technologique en vue d'une application généralisée de ces techniques dans un futur proche :



Les tubages sont en acier ordinaire couvert de résine époxy. La pression est gardée entre 1 et 2,2 MPa pour éviter le dégazage. Il y a les habituels (au Danemark et en Allemagne) filtres grossiers ( $> 10\text{-}20\ \mu\text{m}$ ) à la sortie du puits de production et les fins ( $> 1\text{-}2\ \mu\text{m}$ ) avant le puits de réinjection (changeables sans arrêter la boucle).

Bure a un potentiel bien plus élevé que Groß Schönebeck (l'épaisseur du Permien est en millier de mètres plutôt qu'en centaine de mètres). Dans la "zone de transposition", il serait possible d'installer des dizaines d'exploitations de ce type (dit de "moyenne température" : de  $90$  à  $165^\circ\text{C}$  ; voir pièce annexe 2-V) avec production de chaleur et d'électricité (l'efficacité de la conversion thermique en énergie électrique avec le cycle de Rankine passe de  $\sim 6\%$  à  $90^\circ\text{C}$  à  $\sim 12,5\%$  à  $160^\circ\text{C}$ ).

Les doublets du Dogger étant exploités depuis plus d'un demi siècle, avec 2800 m de Permien en partie perméable, Bure est assis sur une réserve d'énergie géothermique inépuisable.

Il s'agit d'une énergie de terroir, invisible, exploitable au cœur des villages sans danger. Il n'y a ni importation, ni affolement des prix, ni insécurité d'approvisionnement (ni camion, ni pipeline traversant des pays, ni tankers, ni transformateur, ni ligne à très haute tension, ni risque d'explosion et pas de guerre pour la ressource). Elle est disponible 24h/24 et disons 335 jours par an, sans déchet ni rejet.

# Commentaires techniques sur la réponse de l'Andra du 18/01/13

|   |   |
|---|---|
| I. Des tromperies très graves .....   | 1 |
| II. Silence sur l'imposant potentiel du Permien.....                                      | 1 |
| III. RFS/Guide de Sûreté.....   | 2 |
| a) Il ne doit pas exister d'intérêt particulier en géothermie.....                        | 3 |
| b) Le "schéma hydrogéologique régional" n'a pu être réellement évalué.....                | 4 |
| VI. Le silence de l'Andra sur ses décisions et sur les événements au Trias.....           | 4 |
| V. Comment la réponse de l'Andra témoigne que les associations ont révélé la vérité ..... | 6 |
| Pièces jointes.....   | 9 |

## I. Des tromperies très graves

Le forage EST433 avait notamment pour but de démontrer qu'il n'y avait pas de ressource géothermique d'intérêt particulier.

- Or qu'a-t-il été fait ? Des tests rapides, plutôt de type surveillance pétrolière (avec une pompe cependant dans le Trias uniquement, le Permien n'ayant pas été atteint. Sur les 12 séquences qui ont constitué les 3 tests, et malgré la présence d'une pompe, une seule est à priori interprétable (celle dont la présentation du résultat est l'objet de notre mise en demeure).

Les spécifications techniques et les cahiers des charges, obtenus depuis, révèlent que la tromperie est plus importante que nous l'avions décelée. En effet, c'est une pompe d'un débit maximal de 6 m<sup>3</sup>/h qui a été programmée (voir pièce annexe 5). Les obstructions multiples ayant fait le reste, il était impossible d'avoir un débit supérieur à ce 5 m<sup>3</sup>/h, utilisé comme leitmotiv par l'Andra pour ridiculiser la ressource géothermique du site.

- Dans sa réponse à notre mise en demeure, l'Andra introduit un élément nouveau :

*"Le... SRCAE de Lorraine... confirme que ... potentiel... géothermie profonde est faible"* (SRCAE : Schéma Régional Climat Air Énergie).

Pour la géothermie, le SRCAE se base sur un "outil" cartographique multicritère d'aide à la décision qui traite du potentiel des "aquifères superficiels" pour "l'installation de pompes à chaleur", c'est-à-dire pour la "géothermie de très basse énergie". Il ne donne pas de données, mais une sorte d'avis à priori pour ceux qui cherchent à savoir s'ils sont à un endroit favorable à l'implantation de pompes à chaleur. Cet avis est construit sur quatre critères affectés de coefficients : la température (à laquelle il attribue un petit coefficient positif) ; la transmissivité/perméabilité (à laquelle il attribue un grand coefficient positif) ; la profondeur (à laquelle il attribue un grand coefficient négatif) ; la salinité (à laquelle il attribue un petit coefficient négatif). L'avis est donc systématiquement mauvais ("*très faible*") pour tout ce qui est très profond. Il le serait de la même manière pour le Dogger, exploité depuis plus de 30 ans en région parisienne. Il est bien précisé, dans les annexes, qu'aucune donnée n'a été entrée dans le logiciel concernant le Trias, sous le Sud de la Meuse, hormis la profondeur (voir pièce annexe 6).

## II. Silence sur l'imposant potentiel du Permien

Les débats au CLIS avaient abouti à une demande de "*.... caractériser une ressource géothermique (située dans ou en-dessous du Trias)...*" (voir document 30 : CLIS 05/04/04, p. 3 ; souligné par nous). C'est pour cela que l'on trouve, dans le rapport commandité par le CLIS : "*... prévoyant de forer les couches supérieures du Permien détritique...*" (voir document 51 : Rapport de synthèse, p. 19).

Les grès profonds/très profonds (3000 - 4000 m) du bassin de Paris sont étudiés en 2006-2008 par le BRGM, pour la géothermie dite de "moyenne température" (90 - 150°C). L'ADEME/BRGM fait connaître son intérêt pour le site géothermique de Bure (voir pièce annexe 1 V.).

Par ses spécifications techniques de 2007 écrites au moment de l'étude CLASTIQ du BRGM, l'Andra écarte toute étude des grès du Permien en faisant stopper le forage vers la base du Trias. Il en résulte une situation de "non-savoir", comme en témoigne sa réponse du 18/01/13 (p. 2/3) :

*"Il n'existe donc pas de ressource géothermique présentant un intérêt exceptionnel dans la zone étudiée".*

Même si elle avait été faite dans les règles de l'art, l'étude de l'aquifère du Trias, limitée à la profondeur verticale de 1980 m, n'aurait pu donner qu'une partie des informations sur le potentiel géothermique véritable de la zone de transposition.

La pièce annexe 4 (III. et IV.) montre, par comparaison, que la série grés-argileuse permienne sous Bure est d'une épaisseur exceptionnelle (6 fois celle de la meilleur cible de CLASTIQ et 20 fois celle du Buntsandstein de Bure). Les températures y sont donc élevées et elle est, au moins en partie, perméable. Il s'agit là d'un potentiel exceptionnel, contrairement à ce qu'affirme l'Andra dans sa réponse du 18/01/13.

Un gradient géothermique de 3,5°C/100 m a été calculé sur l'intervalle 835 à 1921 m TVD (voir pièce annexe 2 V.). Et des "*travaux les plus récents*", mentionnés par l'Andra dans sa réponse (annexe p. 3/6), indiquent que la zone de Bure est sur la meilleure zone de flux géothermique de la grande Europe (hormis zones magmatiques), avec une valeur de l'ordre de 125 mW/m<sup>2</sup> (voir document 86 : *Majorowicz et Wybraniec 2011, figures 4 et 5*).

### III. RFS/Guide de Sûreté

L'article 14 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (aujourd'hui codifié à l'article L 542-12 4° du Code de l'environnement) énonce :

*"... prévoir, dans le respect des règles de sûreté nucléaire, les spécifications pour le stockage des déchets radioactifs..."*

La Règle Fondamentale de Sûreté (RFS devenue en 2008 Guide de Sûreté) est l'unique référence technique qui existe en la matière. Toutes les parties ne peuvent que s'y référer.

Dans son évaluation du "Dossier 2005 Argile", le Groupe Permanent Déchet s'y réfère de manière répétitive (voir document 48) :

*"...au sens de la RFS III.2.f" (p. 6) ; "...objectif... de la RFS III.2.f." (p. 7); "...préconisé par la RFS III.2.f." (p. 8).*

Cela est d'autant plus vrai pour l'Autorité de sûreté nucléaire (voir document 49) :

*"Une règle fondamentale de sûreté (RFS III.2.f)... a été émise par l'ASN en juin 1991 pour définir les objectifs qui doivent être retenus pour permettre d'assurer la sûreté à long terme du stockage." (p. 2) ; "...cohérente avec la RFS III.2.f." (p. 6) ; "...objectifs... de la RFS III.2.f." (p. 7).*

Lors de la réunion du CLIS de Bure du 13/10/04 (voir document 83 : p. 56), l'un des membres de la CNE expliquait que, dans ses écrits et conclusions, elle ne pouvait que se référer à la "*règle de sûreté édictée par l'Autorité de sûreté*" :

*"Je vous renvoie à la RFS.III.2.f. C'est la bible, en gros, de la sûreté des stockages."*

Les spécifications techniques établies pour le forage EST433 (voir document 84 : *Andra 2007 SP, p. 16*) rappellent que les objectifs de recherche doivent satisfaire aux "contraintes" de "la Règle Fondamentale de Sécurité III.2.f".

#### a) Il ne doit pas exister d'intérêt particulier en géothermie

Les situations à étudier pour le stockage définitif en formation géologique profonde sont données en annexe 2 du Guide de Sécurité, anciennement RFS III.2.f (voir documents 3 et 2). La "géothermie et stockage de chaleur" y sont nommément cités dans les situations dites "altérées" (définies comme "incertaines, mais plausibles" en § 4.2.2 et qui étaient appelées "hypothétique correspondant à l'occurrence d'événements aléatoires de caractère conventionnel" dans la RFS III.2.f, annexe 2 § 3) liées à l'activité humaine au-delà de 500 ans.

Et si la "géothermie et stockage de chaleur" est nommément citée (A2-2.2.1.), c'est pour énoncer sans conditionnel que :

*"Cette situation n'est pas à étudier car les sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue."*

Les critères techniques généraux demandent que le site soit "choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines" (voir document 3 : *Guide de Sécurité, § 5.3*). Pour définir l' "intérêt exceptionnel", expression de principe totalement subjective, il faudrait identifier les types de ressources, déterminer ensuite la combinaison de paramètres définissant une ressource et les cadres de références (techniques, économiques, environnementaux...). Tout cela est absent.

*Exceptionnel ?* Exemple : pour un gradient géothermique, la grande majorité des exploitations géothermiques de faible et moyenne température en roches sédimentaires de par le monde (le Dogger parisien notamment) sont presque, par définition, implantées sur des zones dont le gradient thermique n'est absolument pas *exceptionnel* selon une définition interne officielle de l'Andra (voir pièce annexe 10 Point Pa-12).

Le cas de la ressource géothermie est cependant traité spécifiquement dans l'annexe 2 "sélective" de son titre même : "Sélection de situations...". Sur le sujet spécifique de la géothermie à Bure, aucune transgression apparente de la RFS III.2.f n'a été relevée car l'avis des autorités et groupes administratifs était basé sur le rapport de référence Andra 2005 qui écrivait :

*"... très faibles possibilités de production d'eau... défavorables à un projet d'exploitation géothermique "* (référentiel du Dossier Argile 2005, cité dans pièce annexe 1 III d).

Il n'y avait donc pas d'*intérêt particulier*. La même chose est observée pour la ZIRA (voir document 85 : *2010 annexe 1*), l'ASN s'appuyant sur les conclusions de la Synthèse Andra 2009, sortie 5 mois auparavant et qui tenait compte du nouveau forage EST433.

L' "*intérêt particulier*", au moins potentiel, est pourtant souligné dans les rapports du Service géologique de l'État à la fin des années 70 et au début des années 80, dont l'Andra, en charge de ce travail, a omis de mentionner l'existence :

*"Le réservoir du Trias présente les caractéristiques les plus intéressantes au Sud de la région, autour d'un axe passant par Joinville-Bar-sur-Seine, les conditions optimales étant coté oriental."* (voir document 16 : *BRGM 1979, p. 34* ; mis en gras par nous).

Le coté oriental de cet axe est tout simplement Bure. C'est ce que montre la carte reproduite en figure 1 de la synthèse technique. Cette conclusion figure en bonne place dans le résumé du même rapport :

*"les grès du Trias, **probablement très productifs** entre Saint-Dizier et Chaumont, où la température va de 20 à plus de 70°C."*

Dans sa réponse du 18/01/13 à notre mise en demeure, l'Andra reconnaît que la ressource n'est ni "*faible*" ni "*médiocre*" (mis en gras par nous) :

*"C'est pourquoi, il aurait été préférable de qualifier cette ressource de **banale plutôt que faible**."*

L' "*intérêt particulier*" est connu depuis longtemps.

#### **b) Le "schéma hydrogéologique régional" n'a pu être réellement évalué**

Bien qu'il s'agisse d'un sujet technique, les associations estiment que la RFS/Guide de Sûreté qui pose comme critère "*essentiel*" la prise en compte du "*schéma hydrogéologique régional*" a été transgressée par l'Andra jusqu'à juin 2008. En effet, en 14 ans de présence incluant le choix du site, rien a été fait pour obtenir des données sur l'aquifère le plus puissant de cette pile sédimentaire : les grès du Buntsandstein, qui font obligatoirement partie des logiciels d'hydrogéologie régionale (voir pièce annexe 1 VI.).

### **VI. Le silence de l'Andra sur ses décisions et sur les évènements au Trias**

Selon les 2° et 7° de l'article 14 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 (codifié aujourd'hui à l'article L 542-12 du Code de l'environnement), l'Andra est chargée :

*"de réaliser ou de faire réaliser... des recherches et études sur... le stockage en couche géologique profonde..." ;*

*"de mettre à disposition du public des informations relative à la gestion des déchets radioactifs et de participer à la diffusion de la culture scientifique et technologique dans ce domaine".*

Dans son fascicule "Projet Cigéo - Débat public -" de janvier 2013, en dépit des débats qui font rage au CLIS de Bure et de la mise en demeure de 6 associations, l'Andra se limite à donner en tout et pour tout comme information sur la ressource géothermique (voir document 87 : p. 29) :

*"... un forage effectué à 2000 mètres de profondeur a confirmé l'absence de ressource exceptionnelle à l'aplomb de la zone."*

Elle a ajouté depuis (version de février, voir document 87 bis : p. 31) :

*"Dans son rapport n°4 de juin 2010, la Commission nationale d'évaluation aboutit aux mêmes conclusions : « Le Trias dans la région de Bure ne représente pas une ressource géothermique potentielle attractive dans les conditions technologiques et économiques actuelles »."*

Cette citation est reprise dans la réponse de l'Andra du 18/01/13 (annexe p. 5/6), et que nous complétons en pièce annexe 10 Pa 17. La CNE parle ici de la seule expérience ancienne de réinjection en France. On va voir plus bas en quoi il ne peut pas y avoir une contradiction plus grande entre ce qu'a fait l'Andra et les souhaits de la CNE.

Par ailleurs, nous avons déjà fait la demande de la dernière référence citée par l'Andra dans sa réponse du 18/01/13 (voir document 88 : *Courrier du 31/12/12 réceptionné le 03/01/13*). Le CLIS nous a informé que l'Andra refusait de la communiquer parce qu'elle était "sous presse". L'Andra a donc cité une référence, qui était encore inaccessible pour le CLIS, le public et les associations.

Pourquoi l'expert du CLIS de Bure a-t-il expliqué en plénière, peu avant les tests, qu'il fallait retirer la boue de forage (voir synthèse technique et document 10 : 27/10/2007, p. 17 et 18) et les a-t-il décrit,

postérieurement à leur réalisation, comme "*pompage de longue durée*" (voir document 89 : p. 3) ?

Tout simplement parce que les spécifications techniques et les cahiers des charges révèlent que l'Andra avait prévu l'étude quantitative complète de l'aquifère géothermique par pompage de longue durée dans un forage crépiné et débarrassé de toute boue (voir pièce annexe 7 I.b). Dans sa réponse du 18/01/13, l'Andra indique que "*le maintien de la boue dans le forage est nécessaire*" (p. 2/3). Cette affirmation ne tient donc pas (voir également pièce annexe 7). Cette étude n'a jamais eu lieu et l'expert du CLIS, qui a eu un entretien avec l'Andra en décembre 2009 (voir document 89 : *Drouot 2010, p. 1*), soit un an et demi après les tests, ne le sait pas. Cela est démontré par sa confusion, 9 mois après que le forage ait été rebouché, entre les résultats de tests rapides en boue, seuls existants, et la description de l'étude en règle de l'aquifère après nettoyage du forage à l'eau claire et par pompage longue durée qui aurait dû être faite. Il n'est d'ailleurs pas le seul à être maintenu dans l'erreur...

Le rapport montre que les opérateurs eux-mêmes croyaient tester les grès du Buntsandstein (Trias inférieur) jusqu'à la partie tubée du forage, en ce qui concerne le test n° 3. Il en est de même pour les autres personnes présentes avec eux sur la plate-forme de forage, le contrôleur et un intervenant (voir pièce annexe 7 IV.c).

Le test n° 3 a été réalisé sur un intervalle constitué à 76 % de roche argileuse rouge. Il ne s'agit pas du Buntsandstein, comme l'écrivent 4 fois les opérateurs dans leur rapport sept mois après les tests, mais du Muschelkalk, l'étage du dessus, qui n'a rien à voir du point de vue hydraulique. Ce sont les spécifications techniques de l'Andra qui ont imposé qu'un intervalle d'environ 150 mètres, dont 90 m de roche argileuse (l'équivalent en épaisseur des argilites s.s. du Callovo-oxfordien) soit laissé en "trou nu" au dessus des grès du Buntsandstein (voir pièce annexe 7 IV.a). Nous avons cherché une explication à cette directive contraire à tout raisonnement hydrogéologique. La seule possibilité est que l'Andra a cherché à mêler de l'argile aux grès. En effet, cela faisait quatre ans qu'elle affirmait au CLIS de Bure qu'on ne trouverait que de l'eau boueuse "*du fait d'un mélange d'argile aux grès*" (voir pièce annexe 7 II.). De plus, le forage EST433 a montré que la moitié de cette roche argileuse était friable (élargissement irrégulier du forage sur 47 m, formation de "caves"). Dans un forage incliné de 15-19°, des débris argileux étaient donc libérés dans le forage. Sans que les intervenants sur le forage en soient conscients, cette épaisse zone argileuse a été traversée plusieurs fois par leurs appareillages : diagraphies à câbles, train de test sur tubage, sonde à câble. Cette zone a ensuite été passée à l'eau claire selon les directives (voir pièce annexe 7 I.b). ~ 90 m de roche argileuse en moitié friable ont donc été mis en eau pendant des semaines, alors que l'Andra prétend dans sa réponse du 18/01/13 que, pour les 25 m de test sur quelques heures sur un intervalle composé de grès à 80%, le maintien de la boue était "*nécessaire à sa stabilité du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès*".

Cet ensemble argileux (Muschelkalk = Trias moyen) est clairement à l'origine des problèmes qui se sont succédés dans l'étude desdits grès du Buntsandstein. Cela a commencé dès le dernier test de type routine pétrolière fait en boue dans la foulée du forage : le test n° 3 avec une sonde coincée juste après. Mais les problèmes ont peut-être commencé avec les obstructions des deux tests précédents que le contrôleur attribue à des cuttings (débris) présents dans la boue (voir pièce annexe 7 III.c).

Très peu de temps a été alloué au déblocage de la sonde, qui a finalement été abandonnée dans le forage. La crépine prévue pour l'étude de l'aquifère a donc été posée, dans des conditions désastreuses, sur cet ensemble. Une crépine n'arrête pas les fines argileuses et, d'après un courrier du directeur du Laboratoire de Bure, l'intervalle a continué à produire des fines argileuses dans le puits. Il n'est pas mentionné de nettoyage du forage : avec 90 m de roche argileuse en partie friable mise sous crépine, les fines seraient nécessairement revenues. Le forage a été rebouché sans l'étude prévue et annoncée de l'aquifère (voir pièce annexe 7 IV. c et d).

Le silence de l'Andra sur ses décisions et sur les événements logiques qui en ont découlé est total, y compris vis-à-vis du CLIS de Bure et de la CNE. En effet, lorsque la CNE en juin 2008 parle d' "*un ouvrage exceptionnel d'accès à un aquifère profond du Bassin parisien... surveillance à long terme... recherches futures sur le comportement hydrodynamique... du Trias*" (voir document 14 : p. 28), elle n'imagine pas que, dans ses spécifications techniques de l'année précédente, l'Andra avait fait en sorte qu'une série argileuse

d'une centaine de mètres soit laissée en commun avec ces grès, sous une crépine commune. La CNE n'imagine pas non plus que, dans le cahier des charges, l'Andra a donné cet ordre : "*test d'injectivité ... sur l'ensemble des formations triasiques non tubées*" donc sur un ensemble mixte 120 m de grès + 90 de roche argileuse pour moitié friable (voir pièce annexe 7 IV.b). En effet, la CNE ayant consacré un paragraphe entier aux difficultés de réinjection rencontrées en France au début des années 80 (voir document 12 : *bas de p. 14* et aussi pièce annexe 10 Point Pa-17), les précautions à prendre étaient évidentes.

## V. Comment la réponse de l'Andra témoigne que les associations ont révélé la vérité

L'Andra écrit comme conclusion de son résumé que les allégations des associations, quant au caractère "péremptoire", "erroné", voire "délibérément partial" de ses conclusions, "*ne reposent sur aucun fondement technique sérieux*" (voir réponse du 18/01/13 : p. 3/3).

### Pourtant :

- **V-1**, page 2/3 et annexe p. 5/6 : l'Andra reconnaît que sa comparaison chiffrée des débits, à savoir "(5 m<sup>3</sup>/h) est nettement inférieure à la gamme des débits des exploitations géothermiques (150 à 400 m<sup>3</sup>/h)", porte à confusion.

Ce débit de 5 m<sup>3</sup>/h est le fondement sur lequel repose la conclusion de l'Andra selon laquelle la ressource est "*faible*". Ce chiffre est mis en avant depuis octobre 2008 (voir document 91 : p. 37, 38 et annexe 14).

On le retrouve dans pratiquement chaque phrase de sa Synthèse 2009 (voir synthèse technique).

Fin octobre 2010 pour la réunion des sciences de la Terre à Bordeaux, l'Andra écrit (voir document 92 ; mis en gras par nous) :

*"Seuls les faciès des Grès à voltzia (Trias supérieur) montrent des transmissivités moyennes à bonnes permettant des productivités en test de 5 m<sup>3</sup>/h.... la ressource géothermique à l'échelle de la zone est faible."*

Dans son journal "automne" 2012 (voir document 93 : p. 4), l'Andra décrit à plusieurs reprises le potentiel ou la ressource comme "*médiocre*" en mettant ce même chiffre à l'appui (sous la plume de Maurice Pagel, président scientifique du GNR FORPRO-II et coordinateur du programme TAPSS 2000, un grand spécialiste des gisements d'uranium, tout comme le directeur scientifique de l'Andra, tous deux piliers historiques du Crégu société civile Areva-Total) :

*"Enfin des essais de pompage ont permis de mesurer un débit moyen de 5 m<sup>3</sup> par heure. La faible circulation de l'eau...."*

La confusion est ubiquiste, insistante et durable.

- **V-2** : L'Andra écrit (voir annexe ; mis en gras par nous) :

*"Le forage EST433 était un forage de reconnaissance... son équipement était différent d'un forage à but d'exploitation géothermique permettant de tester la productivité de l'aquifère à grande échelle pour évaluer un débit d'exploitation commercial en conditions réelles." (p. 1/6)*

*"... une pompe Moyno de petit gabarit dont le débit a été constamment ajusté pour extraire un volume significatif d'eau..." (p. 1/6)*

*"La productivité... dépend... des moyens mis en œuvre pour extraire l'eau (puissance de la pompe, techniques de développement utilisées, équipement de l'ouvrage)." (p. 4/6)*

Avec une pompe commanditée d'un débit maximum de 6 m<sup>3</sup>/h et un outil obstrué de boue on ne peut nécessairement pas atteindre les 150 à 400 m<sup>3</sup>/h auxquels l'Andra compare le 5 m<sup>3</sup>/h depuis 4 ans. Quant à la

pompe utilisée, les opérateurs n'ont pu que se plaindre de son manque pré-déterminé de puissance (voir pièce annexe 5).

- **V-3**, annexe p. 2/6 (mis en gras par nous) :

*"... les associations... anticipent **un débit permanent considérable** avec un rabattement de 30 m."*

Ce débit, issu du calcul le plus simple qui puisse être fait (forme radiale de la loi élémentaire de Darcy) avec la perméabilité de Horner donnée par les opérateurs, est de 190 à 380 m<sup>3</sup>/h (voir pièce annexe 3 II.b). Il continuera à augmenter proportionnellement au rabattement (pour la plupart des doublets du Dogger, le rabattement en débit maximum d'hiver est bien plus grand que 30 m ; voir pièce annexe 4 I.a). La ressource géothermique du seul Buntsandstein sous Bure peut être qualifiée de "considérable". Ce qualificatif prend d'autant plus de poids qu'il n'y a jamais eu de désaccord important sur la perméabilité (voir annexe p. 2/6) :

*"On peut noter par ailleurs que les valeurs de perméabilité données par les associations ne diffèrent pas significativement de celles provenant des interprétations conduites par l'Andra."*

- **V-4**, annexe p. 2/6 puis p. 4/6 (mis en gras par nous) :

A propos des grès du Trias : *"Leur **transmissivité hydraulique est bonne** dans le niveau supérieur (test n°2 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s) **en accord avec sa porosité libre de 10 à 15 %**"; "... la transmissivité intrinsèque du niveau aquifère le plus productif des grès du Buntsandstein de Meuse/Haute-Marne **est bonne**..."*

Seuls ceux qui ont lu la synthèse Andra 2009 savent que l'Andra reconnaît cette bonne transmissivité. La communication de l'Andra a alors misé sur la non-connaissance des b.a.-ba de l'hydrogéologie. Elle est passée outre cette bonne transmissivité, qui est la seule chose qui importe en réalité, pour annoncer publiquement une conclusion inverse : productivité "*faible*" basée sur le débit du test. Pourtant, la bonne transmissivité confirmait les prévisions des rapports BRGM 1979/80 mises en avant par A. Mourot et les associations (voir document 16 : *carte S4* et la figure 1 de la synthèse technique).

- **V-5**, annexe p. 2/6 :

*"... les associations, dans cette annexe, admettent (paragraphe III & IV) que les valeurs de paramètres proposées par l'Andra sont correctes. Il est donc évident que les pertes de charges ont été prises en compte, et vouloir insinuer le contraire est un prétexte irrecevable."*

En haut de la page suivante (annexe p. 3/6), l'Andra revient sur le sujet en scindant en deux **l'équation de notre synthèse technique**, c'est-à-dire la loi de Darcy. Elle refuse qu'on associe les 30 m de rabattement au débit de 5 m<sup>3</sup>/h et à la transmissivité. Pourtant, la simplicité de la loi de Darcy est sans appel : ce qu'elle a écrit et fait croire est insoutenable. "**Cela pourrait être assimilé à une tromperie**" écrit-elle en gras. Mais il n'y a pas à mettre de conditionnel, car **c'est** une tromperie caractérisée destinée à ridiculiser la ressource géothermique et à nier ainsi le potentiel du site. Elle est d'autant plus calculée qu'un tel rabattement n'est dû, qu'à la boue de forage, boue dont l'Andra s'était bien gardée de parler avant notre mise en demeure (voir pièce annexe 3 IV. et pièce annexe 7 II.).

Nous n'avons aucun doute sur le fait qu'en interne l'Andra n'a jamais confondu les "30 m" (un rabattement/pression à plus de 99 % absorbée par la traversée du manteau de boue) et la perméabilité. Elle a fait croire qu'il fallait 30 m de rabattement pour arriver à 5 m<sup>3</sup>/h et ce, dès le début (voir document 91 : *Plénière CLIS octobre 2008, p. 37-38, et annexe 14* ; mis en gras par nous) :

*"... Nous avons pompé **3 à 5 m<sup>3</sup>/heure**, ce qui fait une certaine quantité **sous 30 mètres de rabattement**. (...) Pour que cela soit rentable, les débits sont plutôt de 100, 200, voire 300 m<sup>3</sup>/h. Nous n'avons que **5 m<sup>3</sup>/h**... débits insuffisants pour une exploitation géothermique."  
"Pompage 3 à 5 m<sup>3</sup>/h sous 30 m de rabattement"*

Elle l'a écrit dans "Résultats" de "L'évaluation du potentiel géothermique du Trias" de la Synthèse Andra 2009 (voir document 5 : p. 105) :

".. (4 à 5 m<sup>3</sup>/h) sous un rabattement de 30 m."

• V-6, annexe p. 3/6 :

Température : L'Andra expose dans sa réponse qu'il est de notoriété publique que le gradient de température mesuré à 700 m est affaibli par l'empreinte thermique non encore dissipée de la dernière glaciation. Le paragraphe II de notre pièce annexe 2 ("L'Andra a menti pendant plusieurs années") est pleinement validé.

Le mensonge est direct puisque l'Andra avait une mesure, et une seule, au delà de 1 000 m (3°C/100 m, "normale" selon son propre opérateur ; voir pièce annexe 2 I.). A cela, la réponse du 18/01/13 de l'Andra n'a pas de réponse.

Un calcul élémentaire indique que le gradient est de 3,5°C/100 m sur l'intervalle 835 à 1921 m TVD du forage EST433 (voir pièce-annexe 2 V.), soit 0,5°C/100 m de plus que ne l'affirme l'Andra : la réponse de l'Andra ne donne pas de réponse directe. Mais... les "*travaux les plus récents*" qu'elle cite montrent que la zone de Bure est sur la meilleure zone de flux géothermique de la grande Europe (hormis les zones magmatiques), avec une valeur de l'ordre de 125 mW/m<sup>2</sup> (voir document 86 : *Majorowicz et Wybraniec 2011, figures 4 et 5*). C'est le double du calcul qu'avait présenté l'Andra à partir de ses mesures, à une profondeur de 300 à 600 m (54,6 mW/m<sup>2</sup> ; voir document 35 : p. 29, 30 ; le principe de ce calcul de l'Andra est présenté dans le Point Pa-11 de la pièce annexe 10).

• V-7, annexe p. 4/6 :

"... transmis au CLIS, et que l'expert mandaté... a eu connaissance du programme de tests en amont de la réalisation du forage."

C'est pourquoi cet *expert* avait expliqué au CLIS de Bure en novembre 2007 qu'il fallait retirer la boue sinon on n'aurait pas "*une idée très claire du débit possible*" (voir pièce annexe 7 II.a).

• V-8, annexe p. 5/6 :

"La CNE a d'ailleurs corrigé cette confusion dans son rapport n°4 de juin 2010, en indiquant que « ... la productivité observée lors des tests ne peut être considérée comme représentative de celle d'une installation industrielle réalisée dans les règles de l'art. »..."

L'Andra n'est pas engagée par ce qu'écrit la CNE. Par l'article 9 de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006, la CNE est recrée pour 9 ans, avec comme seule attribution d' "évaluer" les recherches et de faire un rapport qu'elle transmet au Parlement.

Ce qu'a écrit la CNE, mis entre guillemets par l'Andra, est une révélation grave d'un organisme institutionnel. Cela nous a encouragé à rechercher les raisons de cette non représentativité et ce en quoi les règles de l'art n'ont pas été respectées.

La CNE avait aussi regretté que tout le Buntsandstein n'ait pas été testé (voir document 12 : p. 14), et avait demandé qu'on garde ce forage ouvert pour un suivi long terme de cette aquifère (voir document 14 : p. 28). Quelques mois après, l'Andra a annoncé qu'elle allait reboucher le forage (voir pièce annexe 7 IV.d). Le test n° 1 avait été volontairement abandonné (la CNE regrettant le manque d'étude de tout l'aquifère) : les injections de boue que nous décrivons en pièce annexe 3 V., qui ont débloquent le train de test, auraient pu être faites lors du test n° 1.

Dans son journal du "printemps" 2010 (voir document 94 : p. 11), 2 ans après les tests, l'Andra écrit :

*"A ce jour, aucune zone présentant un intérêt particulier en matière de géothermie n'a été identifiée dans le sous-sol de la région."*

Nous venons de voir plus haut (Point V-1) que l'Andra n'a jamais cessé de nier la ressource jusqu'à notre mise en demeure.

- V-9, annexe p. 5/6 :

*"C'est pourquoi, il aurait été préférable de qualifier cette ressource de banale plutôt que faible."*

Par cette phrase écrite à la fin de sa réponse, l'Andra reconnaît que, contrairement à ce qu'elle a affirmé pendant 10 ans, la ressource géothermique à Bure n'est ni "faible", ni "médiocre".

## Pièces jointes :

Annexe : Réponse de l'Andra du 18/01/13 à notre mise en demeure

Pièce annexe 5 : Un débit de pompage faible et inadapté imposé dès le cahier des charges

Pièce annexe 6 : *"Le... SRCAE de Lorraine... confirme que ... potentiel... géothermie profonde est faible"*

Pièce annexe 7 : *"le maintien de la boue dans le forage est nécessaire"*

Pièce annexe 8 : *"Désormais l'article qui fait référence..."*

Pièce annexe 9 : Le programme TAPSS 2000 dans la tourmente

Pièce annexe 10 : Sur les autres affirmations de la réponse de l'Andra du 18/01/13 dans l'ordre de leur première apparition



Châtenay-Malabry, le 18 Janvier 2013

CABINET BENOIST BUSSON  
280, Boulevard Saint Germain  
75007 PARIS

A l'attention de Maître Benoist BUSSON

La directrice générale

Tél. 01 46 11 80 00

Affaire suivie par : Patrick LEBON/Delphine HONORE

V/réf : Courrier du 17 décembre 2012

N/réf : DG/DIR/13-0016 - Lettre avec A/R

Objet : Projet Cigéo : sous-estimation du potentiel géothermique du site de Bure - demande d'indemnisation

Cher Maître,

Par courrier en date du 17 décembre 2012 (réceptionné le 19 décembre 2012), vous nous avez adressé en tant que conseil des associations Réseau Sortir du Nucléaire (RSN), Bure Stop 55, CEDRA, ASODEDRA, Les Habitants Vigilants et MIRABEL LNE, une demande de réparation d'un prétendu préjudice - à hauteur de 10.000 euros - que leur aurait causé l'« appréciation délibérément partielle de l'ANDRA des données » relatives aux ressources géothermiques, présentée dans la « synthèse du programme de reconnaissance géologique de la zone de transposition 2007-2008 » du 21 juillet 2008 (réf. D.RP.ALS.08.1356).

Les associations affirment, en effet :

- que l'Andra aurait dissimulé délibérément le potentiel géothermique de la zone potentielle d'implantation du futur centre Cigéo ;
- que les conclusions de l'étude de 2009 serait erronées du fait du non-respect par l'Andra de méthodes d'études respectueuses des règles de l'art.

Ainsi, selon vous, la zone actuellement étudiée pour l'implantation potentielle du centre Cigéo le serait en violation des dispositions du « Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets en formation géologique profonde » du 12 février 2008.

Au préalable, nous souhaitons rappeler que le Guide de sûreté mentionne comme critère technique de choix du site l'absence de stérilisation de ressources souterraines extractibles, le site devant « être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines » (p12). L'Annexe 2.2.1 de ce Guide précise les conséquences de l'absence d'intérêt exceptionnel en matière de méthodologie d'analyse de risques, en indiquant que le scénario d'intrusion humaine pour la recherche de ressources géothermiques peut ne pas être étudié « car les sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue ». Par conséquent, les études de synthèse de l'Andra s'attachent à rechercher s'il existe ou non une ressource géothermique exceptionnelle, la notion d'intérêt particulier n'étant pas définie par le Guide comme un critère de sélection du site.

Vous affirmez en premier lieu que la ZIRA serait située sur un site présentant un « intérêt tout à fait particulier en ce qui concerne la géothermie ». Vous citez pour étayer cette affirmation les propos d'A. MOUROT s'appuyant sur des données géologiques du BRGM de 1979 (figure 1 page 1 du document « Synthèse générale - Dossier technique »). Désormais, l'article qui fait référence sur le sujet est l'article « Lower triassic sequence stratigraphy of the western part of the Germanic basin (west of the Black Forest) : fluvial system evolution through time and space » de S. Bourquin, S. Perin et M. Durand dans la revue *Sedimentary geology* n°186 de 2006 (pages 187 à 211).

Aucune des caractéristiques intrinsèques habituellement recherchées (salinité, température et productivité) pour caractériser un potentiel géothermique ne présente un caractère exceptionnel en tant que ressource potentielle pour une exploitation géothermique basse énergie des grès du Buntsandstein de Meuse/Haute-Marne (voir Annexe de la présente lettre). Concernant plus spécifiquement la productivité, l'Andra reconnaît que la phrase « La production mesurée en test dans EST433 (5 m<sup>3</sup>/h) est nettement inférieure à la gamme de débits des exploitations géothermiques (150 à 400 m<sup>3</sup>/h) » constitue un raccourci qui pouvait porter à confusion. Le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) de Lorraine (décembre 2012) qui étudie le potentiel de développement des filières d'énergies renouvelables (dont la géothermie), et élaboré sur la base notamment des données BRGM les plus récentes, confirme que le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible.

**Il n'existe donc pas de ressource géothermique présentant un intérêt exceptionnel dans la zone étudiée, ce que confirment les résultats obtenus dans le forage EST433.**

Vous contestez par ailleurs les méthodes utilisées par l'Andra pour réaliser ses mesures et tests dans ce forage EST433 et par conséquent la fiabilité et la validité des résultats obtenus en vous appuyant sur une étude d'Antoine GODINOT.

Nous attirons votre attention sur le fait que le rapport d'Antoine GODINOT a uniquement été établi à partir de données bibliographiques, alors que les analyses de l'Andra se fondent aussi sur des années d'études et de recherches supplémentaires pour compléter les connaissances.

L'Annexe de la présente lettre vous donnera toutes les explications aux points techniques soulevés par l'étude d'Antoine GODINOT. En synthèse, il convient de retenir que le maintien de la boue dans le forage est nécessaire à sa stabilité du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès. Il est habituel de réaliser des essais de type slug-test en boue, cela n'obère en rien les résultats qui peuvent en être tirés. Les conditions réelles au moment du test sont prises en compte dans les interprétations qui en sont faites.

Les principales données acquises lors de ce forage sont donc le résultat de mesures fiables et d'interprétations robustes. Elles ne sont d'ailleurs pas contestées par les associations et sont en accord avec la connaissance actuelle sur les grès du Buntsandstein (voir l'article de 2006 suscitée) et sont conformes aux formations retrouvées dans le forage de recherche pétrolière de Germisay, réalisé antérieurement aux reconnaissances menées par l'Andra.

Le travail d'étude de l'Andra est donc loin d'être « radicalement erroné » comme vous essayez de le démontrer. Par ailleurs la fiabilité et la pertinence de ce travail a été évaluée dans le cadre du dossier 2009 qui a servi de base à la définition de ZIRA et qui reposait notamment sur les conclusions du rapport de synthèse de 2008. À cet égard, il convient de rappeler que l'ASN, auteur du Guide de sûreté, prétendument non respecté, a estimé que les critères retenus par l'Andra pour choisir la ZIRA étaient « pertinents » et « cohérents avec le Guide de sûreté ».

En outre, il convient de rappeler que ces études ont été réalisées en toute transparence et ont fait l'objet d'un travail concerté avec de nombreux organismes extérieurs à l'Andra. Le programme d'échantillonnage, de diagraphies et d'essais *in situ* spécifique à ce forage a été établi en lien avec un groupement de 22 organismes de recherche.

Les équipes de scientifiques travaillant sur ce programme ont été présentes sur le chantier tout au long de la réalisation de ce forage. L'ensemble des éléments relatifs à l'étude du potentiel géothermique a été transmis au CLIS, et l'expert mandaté par celui-ci a eu connaissance du programme de tests en amont de la réalisation du forage et de ses résultats. Il n'a émis aucune objection quant à la fiabilité et la qualité du travail accompli.

**Les résultats sur lesquels s'appuie l'Andra pour conclure à une absence de ressource géothermique exceptionnelle sont donc fiables et ont été obtenus selon des méthodes respectueuses des règles de l'art.**

En conséquence, les allégations quant au caractère « péremptoire », « erroné », voire « délibérément partial », des conclusions de l'Andra relatives aux qualités de la ZIRA et à l'absence d'intérêt particulier exceptionnel de cette zone d'un point de vue géothermique ne reposent sur aucun fondement technique sérieux et ne sont pas susceptibles de justifier une quelconque demande d'indemnisation, en l'absence de toute faute imputable, volontaire ou involontaire, à l'Andra.

Je vous prie d'agréer, cher Maître, l'assurance de ma considération distinguée.

Marie-Claude DUPUIS

PJ : « Annexe - Eléments de réponse au dossier technique des associations »

## Annexe - Éléments de réponse au dossier technique des associations

### *Sur les conditions de forage et de réalisation des tests*

Du fait des difficultés techniques inhérentes aux horizons argilo-gréseux, peu de doublets géothermiques réalisés en France dans ces formations géologiques ont connu un succès, et encore très relatif. De telles conditions de foration et de test ont été rencontrées au cours du forage EST433.

Les associations affirment que plusieurs décisions lors de la conduite et de l'interprétation des tests auraient été prises en désaccord avec les règles de l'art.

Les associations indiquent dans leur mémoire que : « *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.* » (Annexe 3 page 1 du dossier des associations).

Prétendre, comme l'écrivent les associations qu'il y aurait eu, volontairement, une injection de boue pour fausser les résultats de test est une contre vérité que des hydrogéologues responsables n'admettraient pas. Ainsi, **le maintien de la boue dans le forage pendant les tests était nécessaire à la stabilité du forage** du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès, car le forage était en trou nu sur toute la hauteur de ces grès. Cependant, des particules argileuses du terrain (sédiments) passent dans la boue. Le recyclage de la boue de forage permet d'en évacuer une grande partie, le reste sédimente dans le fond du forage. La réussite de l'opération impliquait un compromis dans la gestion de la boue dans le forage pour à la fois garantir la tenue du trou nu pendant les tests et la réalisation des tests, qui nécessitait d'arrêter la circulation de la boue pendant toute leur durée. La colonne de boue dans le forage faisant alors plus de 1800 mètres de hauteur, la boue a partiellement sédimenté induisant de pertes de charge lors des pompages. La perméabilité des grès a néanmoins été approchée, et de l'eau de formation prélevée, selon les objectifs de ce forage de recherche.

**Il est habituel de réaliser des essais de type slug-test en boue, et cela n'obère en rien les résultats qui peuvent en être tirés. Les conditions réelles au moment du test sont prises en compte dans les interprétations qui en sont faites.**

La dégradation des polymères avant test hydraulique ne se fait que lorsque la formation testée est dure et les parois du forage stables, et après avoir isolé cette formation. Les exemples donnés par les associations correspondent à des formations calcaires (Dogger du Bassin de Paris alimentant les forages géothermiques de la région parisienne) ou granitiques (site de Schäfisheim en Suisse), qui n'ont pas de problème de stabilité de paroi de forage et ne sont donc pas transposable au forage EST 433.

### *Sur le programme de tests*

Le forage EST433 était un forage de reconnaissance dont l'un des objectifs était de caractériser les formations profondes du Trias du point de vue de leur potentiel géothermique. En tant que tel, son mode de foration et son équipement était différent d'un forage à but d'exploitation géothermique permettant de tester la productivité de l'aquifère à grande échelle pour évaluer un débit d'exploitation commercial en conditions réelles.

Chaque test hydraulique dans le forage EST433 a été constitué de plusieurs phases enchainées :

- slug- test par extraction d'eau, puis suivi de la remontée en pression,
- slug- test par ajout d'eau, puis suivi du retour à la pression initiale,
- phase de pompage, puis suivi de la remontée en pression,
- phase d'injection, puis suivi du retour à la pression initiale.

Le pompage de longue durée au cours de la séquence de test avait pour objectif principal de prélever de l'eau représentative de la formation, notamment pour déterminer sa salinité. Cela imposait d'utiliser une pompe Moyno de petit gabarit, dont le débit a été constamment ajusté pour extraire un volume significatif d'eau (six fois le volume de la chambre de test dans le test 2).

### *Sur l'interprétation des tests*

Les associations contestent les méthodes d'interprétation. (Synthèse des associations pages 3 à 5 et annexe 3 du dossier des associations). Les associations indiquent dans leur mémoire que « .../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. » (Annexe 3 page 1 du dossier des associations).

La valeur de transmissivité de l'ordre de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s pour le test 2 a été estimée de manière concordante en utilisant à la fois des techniques analytiques classiques (diagramme d'Horner) et des techniques d'interprétations sophistiquées permettant de s'affranchir des effets spécifiques du puits (diamètre, boue...).

Le modèle de Horner mis en avant dans le dossier des associations est une méthode d'interprétation de tests hydrauliques en forage relativement simple et rapide d'où sa large utilisation. Les critiques des associations vis-à-vis du modèle de Horner (§ IV) utilisent alternativement les 2 paramètres kintrin et K pour prétendre à une volonté de l'Andra d'ignorer les variations de caractéristiques du fluide. Toutes les interprétations conduites par l'Andra ont intégré les caractéristiques des fluides en place : les paramètres indiqués par l'Andra s'appliquent au droit des réservoirs testés, sans aucune ambiguïté, et « sans tromperie ». D'ailleurs, les associations, dans cette annexe, admettent (paragraphes III & IV) que les valeurs de paramètres proposées par l'Andra sont correctes. Il est donc évident que les pertes de charges ont été prises en compte, et vouloir insinuer le contraire est un prétexte irrecevable. Par contre les associations extrapolent de façon hasardeuse cette valeur sur une épaisseur de formation non fondée sur des données géologiques, et anticipent un débit permanent considérable avec un rabattement de 30 m. Comme le note le BRGM dans son rapport sur le potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris, les formations argilo-gréseuses sont caractérisées par une grande variabilité spatiale des faciès. Du point de vue de leur exploitation géothermique, cette variabilité de faciès se traduit par la variabilité des propriétés hydrauliques qui y sont associées.

Dans le cadre des études de sites pour le stockage de déchets radioactifs, l'utilisation du modèle de Horner est en général complétée par l'utilisation de modèles numériques plus sophistiqués. Ces modèles permettent une analyse plus fouillée que ne le permet le modèle de Horner :

- test d'un grand nombre de paramètres tels que des modèles d'écoulements composites et des facteurs influençant les tests (par exemple pertes de charge en paroi de forage, positives lorsqu'il y a colmatage ou négatives lorsqu'il y a augmentation de perméabilité par endommagement lors de la foration),
- analyses de sensibilité sur les paramètres qui sont peu ou mal connus (compressibilité, salinité, pression).

Quel que soit le modèle utilisé, toutes les techniques de restitution des mesures passent par une discrétisation de leurs évolutions, ce qui ne retient en général qu'une partie de ces mesures. On peut y voir un côté arbitraire, comme le font les associations, mais elles-mêmes ont suivi la même démarche dans l'annexe 3 (dont item c) au paragraphe IV.

**Le résultat obtenu est plus robuste que la simple utilisation du modèle de Horner. On peut noter par ailleurs que les valeurs de perméabilité données par les associations ne diffèrent pas significativement de celles provenant des interprétations conduites par l'Andra.**

### *Sur les résultats des mesures et des tests*

Les caractéristiques des grès du Buntsandstein dans le forage EST433 sont en accord avec la connaissance actuelle sur cette formation géologique (l'article qui fait référence sur le sujet est l'article Lower triassic sequence stratigraphy of the western part of the Germanic basin (west of the Black Forest) : fluvial system evolution through time and space de S. Bourquin, S. Perrin et M. Durand dans la revue Sedimentary geology n°186, 2006, pages 187 à 211).

Leur transmissivité hydraulique est bonne dans le niveau supérieur (test n°2  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s) et en accord avec sa porosité libre de 10 à 15%, l'horizon inférieur plus argileux ayant une porosité libre plus faible, et donc une transmissivité plus basse (test n°1  $2.10^{-4}$  m<sup>2</sup>/s). Elle est du même ordre de grandeur que celle constatée dans les forages d'Achères et de Melleray.

Dans la Synthèse des associations page 3, il est indiqué que les valeurs de débit et de transmissivité présentées par l'Andra seraient physiquement incompatibles : « *L'information qu'apporte cette synthèse est donc une impossibilité physique* ». **Lorsque les associations associent ces valeurs de paramètres (qui sont exacts) et le couple (volume produit de 35 m<sup>3</sup> - rabattement de 30m), cela pourrait être assimilé à une tromperie. En effet, ces deux notions sont totalement différentes et n'ont pas été confondues par l'Andra. Il y a manifestement là une volonté d'induire le lecteur externe vers une appréciation négative du travail conduit par l'Andra.**

La forte valeur de la salinité de l'eau de formation (179 g/l) a été mesurée au bout de 8 h de pompage (35 m<sup>3</sup> extraits au cours du test n°2), ce qui garantit sa représentativité.

Les valeurs du gradient géothermique fournies par l'Andra seraient fausses : « *Bien avant ce forage, l'Andra avait déjà menti sur la valeur du "gradient géothermique" pour minimiser l'intérêt d'une exploitation géothermique* » (Synthèse des associations page 7).

Seul le flux de chaleur provenant des profondeurs de la Terre est constant sous un point donné de la surface du globe. La température des différentes formations géologiques de la croûte terrestre est le résultat de la dissipation de la chaleur dans ces formations au fur et à mesure de sa remontée vers la surface du sol.

Le gradient de température, dit gradient géothermique, est la pente locale de la courbe de température en fonction de la profondeur. Elle dépend de la conductivité thermique de la roche à la profondeur considérée. Par abus de langage, on appelle souvent gradient géothermique la différence de température constatée entre le haut et le bas d'un forage divisée par sa profondeur.

De façon générale, les écrits des associations ne font pas du tout référence à cette notion de flux de chaleur terrestre, et à son lien avec les gradients géothermiques par le biais des conductivités thermiques des roches. Il en résulte certains raccourcis et extrapolations très discutables. **La conductivité thermique des roches sédimentaires pouvant varier de 1,3 (formations très argileuses) à 5 W/m<sup>2</sup>/°C (formations salifères), le gradient géothermique moyen peut varier en un même lieu suivant la profondeur des forages réalisés. C'est pourquoi, dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne, le gradient géothermique moyen a varié de 2,5-2,7°C/100 m dans les forages de 700 m de profondeur au maximum à 3°C/100 m dans le forage EST433 de 2000 m.**

Concernant la température naturelle dans les grès du Buntsandstein, l'annexe 2 du dossier des associations fait deux critiques : l'une sur la prise en compte des effets de mémoire de la dernière glaciation, l'autre sur la correction à apporter à la température mesurée dans l'eau en cours de pompage.

La première critique est caduque puisque les mesures dans le forage EST433 sont largement au-delà de la limite d'influence de l'onde thermique de la glaciation, qui est de 1000 m. Qui plus est, cette annexe ne cite pas les travaux les plus récents (J. Marjorowicz et S. Wybraniec : New Terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application. Publié dans Int J Earth Sci (2011) 100-881-887), qui montrent que le site de Meuse/Haute-Marne se situe dans une zone où la correction à apporter est parmi les plus faibles de l'Europe continentale.

La seconde se base sur une méthode éprouvée, mais peu précise, pour tenir compte d'une stabilisation thermique imparfaite pendant le pompage, qui aboutit à une température de 69°C à 1920 m. Or, l'Andra a mesuré une température de 66°C à 1875 m de profondeur après 7 mois de stabilisation, ce qui est une mesure beaucoup plus précise. **En tenant compte du gradient géothermique, l'écart entre les deux valeurs n'est que de l'ordre d'un degré. On peut donc considérer les deux estimations comme identiques compte tenu des méthodes approchées utilisées par les associations. L'Andra n'a donc pas minimisé la température des grès du Trias.**

**Les données acquises lors de ce forage sont donc le résultat de mesures fiables et d'interprétation robuste. Elles ne sont d'ailleurs pas contestées par les associations.**

### ***À propos de la transparence du processus***

Le forage EST433 a fait partie d'une campagne de reconnaissance, comprenant 12 forages et des profils de sismique réflexion 2D, réalisée en 2007 et 2008 avec pour objectifs :

- Apporter les données permettant d'appréhender les variations éventuelles de la couche du Callovo-Oxfordien en support à la proposition d'une ZIRA,
- Compléter la connaissance sur les écoulements et des transferts dans les formations sus- et sous-jacentes à la couche.
- Caractériser les formations profondes (Lias et Trias), tant du point de vue de leur impact sur les transferts globaux que de leur potentiel géothermique.

Ce forage a été approfondi jusqu'à 2000 m pour répondre à ce dernier objectif. Il a accueilli aussi un programme de recherche multidisciplinaire et multi-organismes (Universités, CNRS, IFPEN, BRGM, IRSN) dont la thématique était « Transferts actuels et passés dans un système sédimentaire aquifère - aquitard : un forage de 2000 mètres dans le Mésozoïque du Bassin de Paris (TAPSS) » : 22 laboratoires y ont participé.

De ce fait, le programme d'échantillonnage, de diagraphies et d'essais in situ spécifique à ce forage a été établi en concertation avec ce groupement d'organismes.

Les équipes de scientifiques travaillant sur le programme TAPSS ont été présentes sur le chantier tout au long de la réalisation de ce forage. Elles ont tenu plusieurs réunions de travail au cours desquelles elles ont échangées leurs résultats. L'Andra y a également présenté les résultats de ses recherches en lien avec les trois grands objectifs définis ci-avant. Dans le cadre de ce programme, 7 thèses ont été soutenues à partir de données provenant de ce forage, 6 articles scientifiques ont été publiés dans des revues internationales à comités de lecture et 2 sont actuellement sous presse (voir références).

Les conditions de réalisation du forage, des diagraphies et des essais in situ ainsi que l'interprétation de ces derniers ont fait l'objet de rapports détaillés, de même que les essais réalisés sur les échantillons prélevés. L'ensemble des résultats a été repris dans le rapport de synthèse D RP ALS 08-1356.

Il est à noter que l'ensemble des éléments relatifs à l'étude du potentiel géothermique a été transmis au CLIS, et que l'expert mandaté par celui-ci a eu connaissance du programme de tests en amont de la réalisation du forage.

### ***Quelle ressource géothermique dans le Trias de Meuse/Haute-Marne ?***

À la différence des énergies fossiles les plus utilisées aujourd'hui, dont les réserves sont situées dans quelques sites particuliers, la chaleur du sous-sol est présente partout. L'énergie de ce flux de chaleur est plus ou moins facile à extraire selon la structure des formations géologiques ou la composition des roches (Brochure BRGM « La géothermie », 2004).

Deux paramètres déterminent la chaleur disponible pour extraction : la température de la ressource et la productivité possible des puits qui détermine le débit, mais la profondeur de la ressource détermine directement le coût d'investissement et donc la valeur de cette ressource : ainsi une ressource à 30°C à 300 mètres de profondeur peut-elle être considérée comme exceptionnelle, mais pas une ressource à 66°C à 1850 m.

Le gradient géothermique moyen de 3°C/ par 100 mètres sur le site de Meuse/Haute-Marne est dans la moyenne basse. Les exploitations géothermiques en région parisienne ou bordelaise sont des zones de gradient géothermique moyen le plus souvent supérieur ou égal à 3,5°C/ par 100 mètres.

La productivité de l'ouvrage de captage (c'est-à-dire le débit d'eau que l'on peut extraire de façon constante sur la durée de fonctionnement de l'installation) dépend évidemment de la transmissivité hydraulique de la formation aquifère exploitée, mais également des caractéristiques géométriques de l'ouvrage et des moyens mis en œuvre pour extraire l'eau (puissance de la pompe, techniques de développement de puits utilisés, équipement de l'ouvrage). Si la transmissivité intrinsèque du niveau aquifère le plus productif des grès du Buntsandstein de Meuse/Haute-Marne est bonne, son caractère argilo-gréseux peut fortement influencer sur la productivité réelle d'un ouvrage sur plusieurs dizaines d'années (développement de puits plus difficile, production de fines à maîtriser).

Par ailleurs, d'autres paramètres importants viennent déterminer l'exploitabilité de la ressource, tels que la salinité de l'eau et la nature de la formation.

La forte salinité naturelle de l'eau de l'aquifère (179 g/l) implique un potentiel de corrosion important qui complexifiera l'exploitation de l'installation et donc la renchéra (utilisation d'inhibiteurs de corrosion à forte concentration, renouvellement prématuré des installations, utilisation de matériaux moins sensibles à la corrosion, précipitation d'une partie des sels et plus particulièrement des sels de fer lors de la réinjection de l'eau dans la formation à une température plus basse).

Les caractéristiques argilo-gréseuses de la formation imposent également une complétion de puits de réinjection et des protocoles de développement des deux puits (production, injection) spécifiques pour avoir une exploitation fiable, il est clair que cela aura également des répercussions sur les coûts de réalisation, qui seront plus élevés qu'un doublet type au Dogger.

Mais surtout, le facteur qui détermine l'intérêt de la ressource est le niveau de risque sur la ressource attendue. En effet, les maîtres d'ouvrage sont réticents à prendre des risques dans les projets de géothermie, car la géothermie a un usage local, et la prise de risque joue sur un seul forage à la fois, alors que par exemple les pétroliers peuvent moyenniser leurs risques sur plusieurs champs. Ainsi, le Dogger en région parisienne présente un risque assez faible parce que (relativement) prédictible dans ses propriétés. À contrario, la variabilité des faciès dans les grès clastiques rend hasardeuse la ressource potentielle à chaque forage.

**Aucune de ces caractéristiques ne confère un caractère exceptionnel en tant que ressource potentielle pour une exploitation géothermique basse énergie aux grès du Buntsandstein de Meuse/Haute-Marne**, la salinité étant plutôt médiocre, de même que la température compte de la profondeur de cet aquifère.

La conclusion de l'Andra sur la faible ressource géothermique serait fautive : « *La conclusion de la synthèse, indiquant que "la ressource géothermique à l'échelle de la zone de transposition est faible"*, est écrite en déni des données » (Synthèse des associations page 6).

Les associations assimilent abusivement ressource géothermique et productivité en eau de l'aquifère.

Concernant la productivité d'une exploitation géothermique dans les grès du Buntsandstein, la phrase de conclusion de la version B de la synthèse faite par l'Andra : « *La production mesurée en test dans EST433 (5 m<sup>3</sup>/h) est nettement inférieure à la gamme de débits des exploitations géothermiques (150 à 400 m<sup>3</sup>/h)* » porte en effet à confusion. La CNE a d'ailleurs corrigé cette confusion dans son rapport n°4 de juin 2010, en indiquant que « ...la productivité observée lors des tests ne peut être considérée comme représentative de celle d'une installation industrielle réalisée dans les règles de l'art. »...

Quant aux potentialités d'une ressource géothermique elles doivent également prendre en compte la température de l'aquifère et les conditions d'exploitation. C'est pourquoi, il aurait été préférable de qualifier cette ressource de banale plutôt que de faible. La CNE dans ce même rapport n°4 de juin 2010 aboutit aux mêmes conclusions : « *le Trias dans la région de Bure ne représente pas une ressource géothermique potentielle attractive dans les conditions technologiques et économiques actuelles* ».

Enfin, il ne faut pas oublier qu'à la différence de l'énergie tirée des éoliennes, la géothermie est par nature une énergie locale, à consommer sur place par des usagers résidant au plus à quelques kilomètres de la source de production de chaleur.

### ***La géothermie dans les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie***

La loi portant engagement national pour l'environnement (dite loi Grenelle II), promulguée le 12 juillet 2010, instaure les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE). Ces schémas étudient le potentiel de développement des filières d'énergies renouvelables (dont la géothermie).

De manière générale les SRCAE sont élaborés conjointement par le préfet de région et le président du conseil régional, qui s'appuient sur un comité de pilotage rassemblant les représentants de l'État, des établissements publics de l'État et de la Région, ainsi que sur un comité technique réunissant l'ensemble des acteurs et parties prenantes.

Le SRCAE de Lorraine indique que « *Le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible. Cependant, il peut être compensé par le développement de la géothermie basse et très basse énergie recourant à l'utilisation de pompes à chaleur. Cette filière connaît un fort développement ces dernières années, notamment chez les particuliers. Cette solution technique constituera à l'avenir un levier important pour l'atteinte des objectifs.* » (p 64).

## Références bibliographiques du programme interdisciplinaire TAPSS

### Thèses soutenues

- REBEIX, R. - Temps de résidence et origine des eaux souterraines profondes : application au site de stockage de déchets nucléaires (CEREGE – GIS Nîmes)
- BENSENOUCI, F. - Apport des traceurs naturels à la compréhension des transferts au sein de formations argileuses compactées (IDES/IRSN).
- SMITH, T. - Étude du transfert des gaz rares dans le Mésozoïque du bassin de Paris du forage profond (CNAB).
- BARSOTTI, V. - Recherche et caractérisation de micro-organismes dans des compartiments géologiques profonds (CNAB/BRGM)
- PLOQUIN, F. - Paléo-conditions diagénétiques des séries triasiques du forage EST 433 : Approches minéralogiques et pétrographiques (Hydrasa Poitiers)
- KARS M. - Calibration et application du géothermomètre magnétique MagEval dans les roches sédimentaires.
- BLAISE, T. - Histoire thermique et interactions fluides-roches dans l'Est du Bassin de Paris (G2R Nancy).

### Articles publiés

- BLAISE et al. (2011). - Vertical and lateral changes in organic matter from the Mesozoic, eastern Paris Basin, *International Journal of Coal Geology*, 88, 2-3, 163-178.
- BOULIN P.F., BRETONNIER P., GLAND N., LOMBARD J.M. (2011) - Contribution of the steady state method to water permeability measurement in very low permeability porous media. *Oil and Gas Science and Technology*, 59-69.
- BATTANI A., SMITH T., ROBINET J.C., BRUHLET J., COELHO D. & LAVIELLE B. (2011) - The use of logging tools in modeling Helium transfer across the Mesozoic sequence of East Paris Basin. Comparison with helium depth profile data. *Geochimica Cosmochimica Acta*. 75, 7566-7584.
- FOURRÉ E., JEAN-BAPTISTE P., DAPOIGNY A., LAVIELLE B., SMITH T., THOMAS B. & VINSOT A. (2011) - Dissolved helium distribution in the Oxfordian and Dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area. *Physics and Chemistry of the Earth*. 36, 17-18, 1511-1520.
- REBEIX R., LE GALL LA SALLE C., MICHELOT J.P., VERDOUX P., NORET A., MONTVOISIN G., GIANESINNI S. & LANCELOT J. (2011) - Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin - France. *Physics and Chemistry of the Earth*. 36, 17-18, 1496-1510.
- LINARD Y., VINSOT A., VINCENT B., DELAY J., WECHNER S., DE LA VAISSIÈRE R., SCHOLZ E., GARRY B., LUNDY M., CRUCHAUDET M., DEWONCK S. & VIGNERON G. (2011) - Water flow in the Oxfordian and Dogger limestone around the Meuse/Haute Marne Underground Research Laboratory. *Physics and Chemistry of the Earth*. 36, 17-18, 1450-1468.

### Articles acceptés ou sous presse

- BENSENOUCI et al. - Profiles of chloride and stable isotopes in pore-water obtained from a 2000 m-deep borehole through the Mesozoic sedimentary series in the eastern Paris Basin, *Physics and Chemistry of the Earth*.
- LANDREIN et al. - Lithologie, hydrodynamisme et thermicité dans le système sédimentaire multicouche recoupé par les forages Andra de Montiers-sur-Saulx (Meuse). *Bull. Soc. Géol. France*.

## Pièce annexe 5

# Un débit de pompage faible et inadapté imposé dès le cahier des charges

*Les spécifications techniques et les cahiers des charges qui concernent la détermination de la ressource géothermique ont été réclamés avant l'envoi de notre mise en demeure. Cependant ils n'ont été obtenus que postérieurement, environ deux mois après la demande initiale et suite à trois lettres recommandées (voir document 88). Ces informations sont donc nouvelles par rapport au dossier de mise en demeure du 17/12/12.*

Les spécifications techniques (ST) correspondent au document 84 et les cahiers des charges (CC) au document 90. Les ST constituent le document écrit en amont par l'Andra. Les CC sont écrits par le maître d'œuvre, conformément aux ST.

L'Andra avait programmé, sur plusieurs semaines, l'analyse de la productivité/injectivité des grès du Trias après remplacement de la boue de forage par de l'eau claire. Cela ne sera cependant jamais réalisé (voir pièce annexe 7).

Avant cela, l'Andra avait programmé trois tests courts, en boue, en "*fonction des possibilités de production des niveaux gréseux*" (voir document 84 : p. 140 et 120 ; voir document 90 : p. 81), avec une pompe permettant d'ajuster le débit entre 1 et 100 l/mn, **soit entre 0,06 et 6 m<sup>3</sup>/h** (voir document 84 : p. 140 ; voir document 90 : p. 89).

Les caractéristiques physiques que l'Andra a donné au maître d'œuvre pour planifier le travail sont celles de son inventaire de 2004 (voir document 35) que nous avons analysées en détail dans la pièce annexe 1 III.c. Cet inventaire cherchait à minimiser la perméabilité du Buntsandstein :  $1,7 \cdot 10^{-8}$  m/s minimum à  $1 \cdot 10^{-5}$  m/s maximum. Ainsi, l'Andra n'a pas donné de meilleures informations à son maître d'œuvre que celles qu'elle avait données au CLIS de Bure suite à la note de A. Mourot.

De plus, comme l'Andra a donné des valeurs en unités des hydrogéologues, le maître d'œuvre a dû les convertir en perméabilités intrinsèques, comme nous avons dû le faire dans la pièce annexe 3 III. En prévoyant une température de l'ordre de 60°C et une salinité de l'ordre de 30 g/l, le maître d'œuvre a déduit de la littérature pétrolière une masse volumique de 1014 kg/m<sup>3</sup> et une viscosité de  $0,5 \cdot 10^{-3}$  Pa·s. Les valeurs prévisionnelles fournies par l'Andra deviennent alors (voir équation 2 de la pièce annexe 3) :  $5,03 \cdot 10^{-16}$  mini à  $5,03 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup> maxi, soit entre 0,0005 et 0,5 darcy (voir document 90 : p. 104-105).

Pour de telles perméabilités et pour la partie haute de cette fourchette donnée par l'Andra, le maître d'œuvre **prévoyait un débit de pompage de 3,6 m<sup>3</sup>/h** (60 l/mn) : cette prévision a été faite pour une perméabilité de  $1 \cdot 10^{-6}$  m/s  $\sim 5 \cdot 10^{-14}$  m<sup>2</sup>  $\sim 0,05$  darcy (voir document 90 : p. 105). Pour la partie basse de la fourchette donnée par l'Andra, il prévoyait un débit extrêmement faible (1 l/mn).

Ainsi, la décision de réaliser des tests avec une pompe n'ayant pas besoin de beaucoup de débit trouve son origine en 2004, c'est-à-dire quatre ans auparavant, lorsque, suite à la note de A. Mourot, l'Andra cherchait par tous les moyens à minimiser les qualités attendues de l'aquifère du Buntsandstein.

Le maître d'œuvre a dû faire ses prévisions pour une perméabilité de 0,05 darcy, valeur dans la partie haute de la fourchette fournie par l'Andra, alors que celle des grès se révélera être  $> 3$  darcies, 60 fois supérieure.

L'opérateur ne pourra que s'en plaindre :

*"La pompe Moyno était utilisée au nombre de tours maximal pour lequel elle est conçue, le système ne permettait pas de pomper plus et donc d'augmenter le rabattement." (voir document 6 : SIS, p.*

59).

Les CC demandent que les réponses des tests soient reportées sur le diagramme de Horner et sur le diagramme log-log par la méthode de superposition, et aussi en simulation cartésienne (voir document 90 : p. 84).

Par ailleurs, la température a été mesurée par diagraphie, entre 1742 et 2001 m, les 6 et 7 juin 2008 (diagraphie programmée par les ST : voir document 84, p. 67 et document 90, p. 192-3 ; réalisation confirmée dans le document 63 : *GEO-RS*, p. 29). L'Andra qui n'a jamais dit la vérité sur la température (voir pièce annexe 2) n'a jamais parlé de cette mesure jusqu'au fond du puits qu'elle possède.

## Pièce annexe 6

### **« Le... SRCAE de Lorraine... confirme que ... potentiel... géothermie profonde est faible »**

D'après l'Andra (voir DG/DIR/13-0016) :

*"Le schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE) de Lorraine (décembre 2012) qui étudie le potentiel de développement des filières d'énergie renouvelable (dont la géothermie), et élaboré sur la base notamment des données BRGM les plus récentes, confirme que le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible." (p. 2/3)*

*"La géothermie dans les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie : La loi portant engagement national pour l'environnement (dite loi Grenelle II), promulguée le 12 juillet 2010, instaure les schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie (SRCAE). Ces schémas étudient le potentiel de développement des filières d'énergies renouvelables (dont la géothermie). De manière générale les SRCAE sont élaborés conjointement par le préfet de région et le président du conseil régional, qui s'appuient sur un comité de pilotage rassemblant les représentants de l'État, des établissements publics de l'État et de la région, ainsi que sur un comité technique réunissant l'ensemble des acteurs et parties prenantes. Le SRCAE de Lorraine indique que "Le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible. Cependant, il peut être compensé par le développement de la géothermie basse et très basse énergie recourant à l'utilisation de pompes à chaleur. Cette filière connaît un fort développement ces dernières années, notamment chez les particuliers. Cette solution technique constituera à l'avenir un levier important pour l'atteinte des objectifs." (p. 64)." (annexe p. 5/6)*

#### **Le SRCAE de Lorraine ne s'occupe absolument pas de géothermie profonde**

Au bout de 19 ans d'exclusivité de recherches sur la géologie en profondeur sur la limite Meuse/Hte-Marne, l'Andra va chercher un mot dans un rapport de généralités de services extérieurs pour "*confirmer*" ses anciennes affirmations.

*"Le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible"* (voir document 95 : SRCAE Lorraine, p.64)

Cette phrase est la seule dans laquelle on trouve le mot "*profond*" sur l'ensemble du document (164 pages). Il ne figure pas dans la fiche spécifique à la géothermie "*orientation 2.1.2....Géothermie et pompes à chaleur*" (p. 90-92). L'unique référence au BRGM est le renvoi vers son site généraliste sur la géothermie, sur la page régionale.

L'internaute se trouve alors face à un "outil" cartographique multicritère d'aide à la décision (avec la mention "*ne doit en aucun remplacer l'étude de faisabilité réalisée par des bureaux d'études compétents !*") qui traite du potentiel des "*aquifères superficiels*" pour "*l'installation de pompes à chaleur*", c'est-à-dire pour la "*géothermie de très basse énergie*", et à l'élaboration duquel EDF a participé. Les critères de cette notation ne sont cependant pas révélés à cet endroit.

Si l'on se reporte sur la Meuse (Bure, Ribeaucourt, Montiers-sur-saulx...), cet "outil" indique que la nappe Tithonien (i.e. les calcaires du barrois, karstique, température que nous savons être  $\approx 10^{\circ}\text{C}$ ) possède un potentiel "*fort*", alors que pour le Buntsandstein (débit et température "non connus"), il indique un potentiel "*très faible*". La réponse du logiciel est donc que, d'un point de vue énergétique, les calcaires du barrois sont d'un grand intérêt, contrairement aux grès du Buntsandstein, s'agissant uniquement de l'installation de pompes à chaleur. A contrario, le logiciel renvoie un potentiel "*fort*" pour l'aquifère du Buntsandstein lorsqu'il est affleurant, donc "froid" (ex. vers Saints-Avold en Moselle).

L'élaboration de cet atlas de potentiel géothermique "pour pompes à chaleur", PAC, est présentée dans Bourguine et al. 2007 (voir document 96). L'évaluation est basée sur un jeu de critères. Pour les pompes à chaleur, la température est d'importance modérée (affecté d'un facteur "10%" positif). Le débit est jugé beaucoup plus important, et est affecté lui d'un facteur "40%" positif. La profondeur, parce qu'elle "*se traduit directement en coût d'investissement*", est affectée au contraire d'office d'un facteur "40%" négatif. Enfin, la minéralisation est affectée d'un facteur négatif "10%" (voir document 96 : Bourguine 2007, p. 41-42). Ce document ne donne que ce principe de calcul, sans exemple concret, mais le point essentiel est que la profondeur est affectée par principe d'un coefficient 4 fois plus élevé que celui de la température.

Bien sûr, les auteurs mentionnent l'insuffisance des données pour les débits (voir document 96 : Bourguine 2007 p. 3, 51). Dans l'annexe 2 qui liste "*toutes les formations... à prendre en compte dans la modélisation...*", pour la feuille géologique Gondrecourt-le-Château (qui est aussi l'amont hydraulique de Bure = lieu de charge des aquifères), il y a l'aquifère Oxfordien/Terrains à Chailles et celui du Dogger/Bathonien (voir document 96 : p. 74). Il n'y a rien de plus profond. Ce Bathonien oolithique se trouve immédiatement sous l'argilite visée pour les déchets et, l'année suivante, le forage EST432 (contre le EST433 mais moins profond) a en effet recoupé des niveaux bien perméables :  $1,4 \cdot 10^{-5}$  m/s dix mètres sous les argilites (voir document 97 : Linard et al. 2011, fig. 5 : EST432 à 700 m : transmissivité  $7 \cdot 10^{-5}$  m<sup>2</sup>/s pour 5 m) assez proche de ce qu'on a dans le Buntsandstein ( $6,5 \cdot 10^{-5}$  m/s ; voir pièce annexe 3 IV.c). On se trouve là à environ 1070 mètres plus haut que le Buntsandstein.

Ainsi, le "*très faible*" et la très mauvaise note donnée au Trias inférieur dans l' "Atlas PAC" à Bure, signifie seulement que, si vous pensez installer une pompe à chaleur chez vous, le Trias "est mille fois trop profond pour ça" (aucune donnée de débit, aucune donnée de température, aucune donnée de salinité sous le Sud Meuse où seule la profondeur, le critère défini comme le plus pénalisant, a été entrée dans le logiciel). Ces critères produisent leur carte 34 (voir document 96 : p. 48) qui donne une note de plus en plus mauvaise de "potentiel d'exploitation-PAC" au Trias inférieur, au fur et à mesure qu'il s'enfonce. Il en serait de même si on appliquait ce "multicritère-PAC" au Dogger, en Île de France. Pour chaque localité des 37 doublets géothermiques, l'outil-logiciel renverrait invariablement pour le Dogger un potentiel "*très faible*".

Et si l'on appliquait ce logiciel "critères Atlas PAC" à la géothermie étudiée par le projet européen ENGINE et le projet français CLASTIC (du BRGM), il indiquerait un potentiel "*exceptionnellement faible*", tout comme pour le bassin Permien sous Bure.

Cette absence de prise en compte de l'eau chaude du sous-sol plus profond explique que le scénario SRCAE-Lorraine PAC est incapable de prévoir plus que 550 GWh de dite "géothermie". En réalité il s'agit essentiellement d'aérothermie, alors que pour suivre le scénario Grenelle, il faudrait 1850 GWh (voir document 95 : SRCAE, p. 90). On a vu que les doublets Dogger produisaient 39,7 GWh/an/doublet et que la puissance des doublets dans le Buntsandstein, à Bure, serait facilement le double (voir pièce annexe 4 I.), soit environ 79 GWh/an. Les 550 sont atteints avec 7 doublets et la zone de transposition de Bure, avec 23 doublets géothermiques au Trias, pourrait produire à elle seule les 1850 GWh du scénario Grenelle 2020 pour toute la Lorraine. Dessous, les 2800 m de Permien, avec encore plus de puissance, assureraient la relève pour d'autres siècles (d'abord en tirage classique, puis éventuellement en technologie EGS).

En février 2010, Fabrice Boissier, alors directeur du département géothermie du BRGM, a été interrogé à la conférence européenne sur le chauffage et le rafraîchissement renouvelables (RHC, Renewable heating and Cooling) (voir document 98) :

*"Quelles sont les applications principales pour la géothermie ?"*

F. Boissier :

*"Pour être simple, il y a deux types principaux : d'un côté vous avez l'énergie de surface qu'on utilise avec des pompes à chaleurs pour chauffer et rafraîchir des maisons individuelles jusqu'à de grands immeubles ou même des petits réseaux de chaleur et de rafraîchissement. De l'autre côté, vous avez l'énergie géothermique profonde. Là vous avez de grosses installations, des installations*

*industrielles, qui vont chercher la chaleur à des profondeurs en kilomètres, de 1 à 5 km, et elles alimentent le chauffage pour de vastes quartiers ou des installations industrielles". (...)*

*"En se référant aux intentions, Votre but pour 2050 est de cent cinquante mégatonne équivalent pétrole de production de chaleur. Quelle est le principal sujet de recherche nécessaire pour arriver à cela ?"*

F. Boissier :

*"Le point clé pour cela est de développer la technologie EGS. EGS signifie Enhanced Geothermal Research. C'est un saut technologique qui va permettre d'exploiter l'énergie géothermique où vous avez des roches de basse perméabilité. C'est l'objectif principal dont on doit s'occuper dans les 20 prochaines années."*

De par sa position (ingénieur des mines, pas géologue, il ne passera que 3 ans et demi au BRGM), Fabrice Boissier a apposé sa signature sur tous les rapports BRGM de CLASTIQ, entièrement consacrés à une pré-étude en prévision de l'exploitation spécifique des grès très profonds (3000-4000 m), en EGS si nécessaire. Il a signé notamment le rapport qui pointe l'intérêt géothermique de Bure ("*Cette cible mériterait d'être étudiée de près*") par le seul Trias, à moins de 2000 m de profondeur, et accessible par les technologies classiques (voir pièce annexe 4 I.c).

Or, à peine cet interview réalisée, F. Boissier est nommé à l'Andra, à Bure, aux cotés de la directrice générale. L'Andra a pourtant continué de nier tout intérêt géothermique sous la zone de transposition. Il ne s'agit donc pas d'un manque de connaissance.

Jean-Pierre Masseret, président de région, qui appose sa signature sur le SRCAE Lorraine, n'a pas été induit en erreur par "*le potentiel régional de développement de la géothermie profonde est très faible*", si et seulement si : on lui a expliqué qu'il s'agit du résultat du logiciel "multicritère pompe à chaleur" qui tient assez peu compte de la température, mais pénalise fortement par principe tout ce qui est profond ; et qu'aucune donnée n'a été entrée dans le logiciel pour le Trias, sous le Sud Meuse, en 2007 déjà (et depuis il n'y a eu que le forage EST433 de l'Andra).

Par contre, que l'Andra réécrive cette phrase dans sa réponse à notre mise en demeure est une tromperie. Elle ajoute en plus : "*élaboré sur la base notamment des données BRGM les plus récentes*", alors qu'elle a tenu le BRGM à l'écart des tests hydrauliques du Trias sous Bure (voir pièce annexe 1 V. et pièce annexe 9 II.).

## Pièce annexe 7

### ***"Le maintien de la boue dans le forage est nécessaire"***

Dans sa lettre DG/DIR/13-0016, l'Andra écrit :

***"Il convient de retenir que le maintien de la boue dans le forage est nécessaire à sa stabilité du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès. Il est habituel de réaliser des essais de type slug-test en boue. Cela n'obère en rien les résultats qui peuvent en être tirés. Les conditions réelles au moment du test sont prises en compte dans les interprétations qui en sont faites."***

Ce petit paragraphe provient de l'annexe (p. 1/6). Dans l'annexe de la lettre Andra DG/DIR/13-0016, il est précédé d'un long paragraphe :

*"Prétendre, comme l'écrivent les associations qu'il y aurait eu, volontairement, une injection de boue pour fausser les résultats de test est une contre vérité que des hydrogéologues responsables n'admettraient pas. Ainsi le **maintien de la boue dans le forage pendant les tests était nécessaire à la stabilité du forage** du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès, car le forage était en trou nu sur toute la hauteur de ces grès. Cependant, des particules argileuses du terrain (sédiments) passe dans la boue. Le recyclage de la boue de forage permet d'en évacuer une grande partie, le reste sédimente dans le fond du forage. La réussite de l'opération impliquait un compromis dans la gestion de la boue dans le forage pour à la fois garantir la tenue du trou nu pendant les tests et la réalisation des tests, qui nécessitait d'arrêter la circulation de la boue pendant toute leur durée. La colonne de boue dans le forage faisant alors plus de 1800 mètres de hauteur, la boue a partiellement sédimenté induisant de pertes de charge lors des pompages. La perméabilité des grès a néanmoins été approchée, et de l'eau de formation prélevée, selon les objectifs de ce forage de recherche."*

On peut ajouter le paragraphe suivant de l'annexe (p. 5/6) :

*"Les caractéristiques argilo-gréseuses de la formation imposent également une complétion de puits de réinjection et des protocoles de développement des deux puits (production, injection) spécifiques pour avoir une exploitation fiable, il est clair que cela aura également des répercussions sur les coûts de réalisation, qui seront plus élevés qu'un doublet de type au Dogger."*

#### **Réponse : résumé**

Les spécifications techniques et les cahiers des charges prévoyaient une étude en règle de tout l'aquifère des grès du Trias inférieur (Buntsandstein) après mise en eau claire du forage et pose d'une crépine. Ses différents niveaux producteurs devaient être reconnus, puis l'aquifère devait être testé en injection avec la saumure extraite lors des pompages (chapitre I. b), ce qui n'a jamais été effectué.

Trois tests en boue, de type reconnaissance pétrolière, étaient aussi programmés. Ils ont bien eu lieu, mais se sont déroulés dans des conditions désastreuses puisque, sur 12 séquences en 3 tests, une seule est interprétable (chapitre III).

Les spécifications techniques de l'Andra ont imposé de laisser en trou nu, avec les grès du Buntsandstein, un ensemble argileux de 90 mètres. La moitié de cet ensemble argileux a montré des instabilités mécaniques dès le forage. Les rapports témoignent que l'Andra a laissé croire à ses opérateurs, au contrôleur et autres intervenants que le trou nu sur lequel ils intervenaient était la série gréseuse de la base du Trias. Cet ensemble argileux est à l'origine de la plupart des troubles qui ont commencé dès les tests en boue : le coincement d'une sonde, le remplissage de la partie restante par des fines d'argiles et l'abandon de tout (tests (- 1 séquence), sonde, étude normale de l'aquifère géothermique et forage). Auprès du CLIS de Bure également, l'Andra observe un mutisme presque complet sur toutes ses décisions et les événements qui en ont résulté (chapitre IV).

|  |    |
|--|----|
| I. L'étude des grès était programmée avec crépine et sans boue.....  | 2  |
| a) Séries gréseuses : des crépines parce que le risque vient du sable.....   | 2  |
| b) L'Andra avait programmé l'analyse de la productivité/injectivité de l'aquifère crépiné en longue durée après nettoyage du forage.....   | 3  |
| II. La boue de l'Andra.....  | 5  |
| a) Avant notre mise en demeure, cette boue « nécessaire » était officiellement interdite .....   | 5  |
| b) L'ANDRA aurait tendance à mélanger les grès , l'argile et la boue.....  | 6  |
| c) Comme justification : une bouillie de chat.....   | 7  |
| III. Qualité des tests en boue.....  | 8  |
| a) Les tests rapides de surveillance en boue des pétroliers.....   | 8  |
| b) L'Andra avait prévu d'abord trois tests dans la boue polymère.....  | 9  |
| c) Non, il n'est pas habituel d'avoir des obstructions massives multiples dont l'Andra s'est bien gardé de rendre compte : crépine, valve d'obturation, port d'entrée des capteurs de pression... .. | 9  |
| IV. A l'origine des troubles, l'IMPOSITION par l'Andra de 90 mètres de roche argileuse dans le trou nu avec les grès. .  | 10 |
| a) L'équivalent des argilites du Callovo-oxfordien, pour moitié friable, laissé en trou nu.....  | 10 |
| La contradiction majeure vient des spécifications techniques de l'Andra.....   | 10 |
| Les cahiers des charges du maître d'œuvre entraînés dans la contradiction.....   | 11 |
| Les données du forage.....   | 12 |
| b) Un échec planifié .....   | 14 |
| c) La mascarade du test n° 3 et le coincement de la sonde.....   | 14 |
| d) Tricherie, mutisme, véritable gâchis et pas d'étude de l'aquifère géothermique.....   | 16 |
| Premiers résultats annoncés par l'Andra.....   | 16 |
| Mutisme et incohérences.....   | 17 |
| Annexe 1 : Diagraphies moulinet ou géochimie-température et pompage.....   | 19 |
| Annexe 2 : les "grès de Trois Fontaines".....  | 20 |

## I. L'étude des grès était programmée avec crépine et sans boue

### a) Séries gréseuses : des crépines parce que le risque vient du sable

La majorité des gisements de gaz/pétrole de la Mer du Nord par exemple, exploités depuis plus de 30 ans, sont de séries gréseuses (gaz dans les grès du Permien, pétrole de Brent dans les grès du jurassique supérieur et inférieur) et il en est de même dans bien d'autre champs à travers le monde. Bien qu'il y ait toujours de l'argile dans les séries gréseuses (on les appelle aussi séries clastiques), la littérature pétrolière, très abondante, établit que les problèmes qui peuvent être rencontrés dans ces aquifères sont dus à la déstabilisation de grès/sables des parois du forage lorsque ceux-ci sont peu consolidés (par ex., sur <http://www.onepetro.org/mslib/app/search.do>, site technique des pétroliers, faire une recherche sur "Production testing, sand", "sand production", "sand management", etc.).

Ce sont des grains de sables qui sont libérés et qui sont non désirables (abrasion, etc.). Un éboulement/liquéfaction du sable est possible, et comme nous l'avons mentionné dans la pièce annexe 4 II., c'est apparemment ce qui s'est passé au forage géothermique de Melleray le 16 juin 1982 (voir document 78 : Lopez et Millot 2008, p. 125). La fragilité de ce type de niveau de peu de cohésion est en partie mécanique (la contrainte déviatorique est maximale au bord du puits de forage et peut approcher la tenue de la parois de grès) en même temps que hydrodynamique (effet d'entraînement par la saumure en mouvement, "coups de béliers" lors d'arrêt ou démarrage trop brusques de la pompe, "fatigue" résultante de cycles de chargement...), et voir chimique (changement de salinité).



Tubes crépinés à fil enroulé

Ce n'est pas une pellicule de boue de forage qu'il faut pour tenir des grès friables et, de toute façon, elle s'opposerait à la production ! Elle est donc bannie par les hydrogéologues, pétroliers et géothermiciens au droit des niveaux exploitables, et par l'Andra pour les pompages longue durée qui étaient prévus au EST433. Affirmer, comme le fait l'Andra, qu'une série gréseuse ne pourrait pas être testée sans boue, c'est un peu prétendre qu'elles sont inexploitable.

La protection la plus simple est la mise en place de tubes crépinés/crépines en fil

enroulé, mais on peut, en plus, mettre en place un massif de gravier, ou choisir un tube crépiné double avec massif gravier intégré, etc., et toujours une conduite de l'exploitation adaptée et calculée. De nos jours, il y a même un inversement de situation : on sait tirer profit de cette fragilité par "*sand management*" pour se débarrasser d'une baisse de perméabilité qui se développerait sur les parois d'un forage au fil des années : le "*skin removing burst*" ou "*self cleanup*" en suivant des protocoles stricts.

Pour le forage EST433, le contrôleur écrit de la non-interprétabilité de la première séquence du test n° 2 dite PSR (voir document 11 : *Egis-Géotechnique 2008, p. 9*) :

*"Nous suggérons que la réponse PSR pourrait avoir été affectée par un phénomène géo-mécanique lié à la forte baisse de pression dans l'intervalle de test pendant la PSR."*

Cette séquence PSR (Pressure Static Recovery, on ferme la valve d'obturation, début du test) succédant immédiatement aux injections en pression (12 injections sur 5 heures), la chute de pression dans le forage est de l'ordre de ~ 2,5 MPa (voir document 6 : *SIS, fig. 3.2.2 p. 60*).

Or, GEO-RS (voir document 63 : p. 38, mis en gras par nous) décrit l'unité dans laquelle a été faite le test n° 2 :

*"Le faciès des grès à Voltzia se caractérise par un **grès moyen à grossier**, blanchâtre à verdâtre, propre, **friable**, argileux, plus ou moins riche en matière organique et à intercalations de tailles variables (centimétriques à pluri-métriques) d'argile verte micacée."*

Le Log (voir document 66) montre que plus de 80 % de l'intervalle de test était des grès (ce que confirme évidemment la bonne transmissivité de l'intervalle). Le seul élargissement de trou sur une petite hauteur de ~ 1 m dans les grès du Buntsandstein se trouve au niveau d'un banc de grès si la diagraphie est exacte (voir document 66 : à 1891 m). On savait donc dès la phase de forage du EST433 qu'au niveau du test n° 2 les grès étaient "*friables*". Cela reste qualitativement vague. Une étude préliminaire de leur tenue (théorique d'après les valeurs physiques des diagraphies, pratique sur carotte...) aurait dû permettre de décider des conditions de test afin d'éviter un éventuel accident sur des tests réalisés en trou nu.

Enfin, un puits de forage peut toujours être nettoyé avec l'aide d'un tube souple (air lift, etc.).

#### **b) L'Andra avait programmé l'analyse de la productivité/injectivité de l'aquifère crépiné en longue durée après nettoyage du forage**

La communication des spécifications techniques et des cahiers des charges concernant la détermination de la ressource géothermique a été demandée avant l'envoi de notre mise en demeure. Cependant, ils n'ont été obtenus que postérieurement, soit environ deux mois après la demande initiale et suite à trois lettres recommandées (voir document 88).

Le chapitre III des cahiers des charges (voir document 90, ci dessous abrégé comme CC) donnait les directives pour une véritable étude des productivité/injectivité des grès du Trias prévue par les spécifications techniques (voir document 84, ci-dessous abrégé comme SP). Les objectifs de cette étude étaient de réaliser des prélèvements de fond au droit des venues d'eau identifiées dans le Trias et de réaliser un test d'injectivité afin d'obtenir une valeur représentative globale de cette grandeur pour les formations gréseuses du Trias.

La réponse Andra du 18/01/13 confirme cette nécessité (p. 5/6 de l'annexe) :

*"Les caractéristiques argilo-gréseuses de la formation imposent également une complétion de puits de réinjection et des protocoles de développement des deux puits (production, injection) spécifiques pour avoir une exploitation fiable..."*

Pourtant, ces essais n'ont jamais été effectués.

Les spécifications techniques de l'Andra programmaient des "*pompages longue durée*" "...à la fin de toutes

les opérations se déroulant sur le forage [EST433] et décrites dans le présent document (pas de co-activité avec le foreur)"; "Chaque pompage [dans les différents forages, incluant Oxfordien et Dogger] devrait durer de 1 à 3 **mois**..."; "le volume du puits doit être renouvelé au moins de 10 à 20 fois.". "Des pompages... prévus... dans le forage au Trias EST433, après le départ de l'appareil." (voir document 90: CC p. 112). Ces pompages seront réalisés après "remplacement boue par eau" (du captage AEP d'Echenay) et la pose d'un "liner 5" crépiné" si le trou, après contrôle montre des instabilités (voir document 84 : ST p. 70, p. 120, p. 176 ; document 90 : CC p. 143). Pour "cette mise en eau (circulation deux cycles de l'eau d'Echenay)", l'eau sera amenée par citerne de 20 m<sup>3</sup> (voir document 90 : CC p. 210, 217). On verra, dans le paragraphe IV.d, que la crépine était là et sera mise en place dans ce forage.

Pour ce programme de pompage longue durée du EST433, les cahiers des charges sont écrits par l'Andra qui devient le maître d'œuvre une fois la machine de forage partie.

Des diagraphies géochimiques (principe décrit en annexe 1 ci-dessous) étaient prévues parallèlement jusqu'au fond du forage (voir document 84 : ST p. 147). Le titulaire prévu était le groupement HYDROINVEST/Colenco (voir document 90 : CC p. 205). "Pour le forage Trias, des diagraphies géochimiques seront réalisées par un autre dispositif fourni par le Titulaire [celui de l'Andra ne va pas assez profond] et qui permettra de descendre jusqu'à 2000 m de profondeur." (voir document 84 : ST p. 147) ou : "Les diagraphies géochimiques (Température, conductivité) seront réalisées à l'aide d'une unité mobile de diagraphie mise à disposition par le prestataire." (voir document 90 : CC p. 208). "La mobilisation d'HYDRO INVEST pour ces opérations sera effectuée directement par ordre écrit (fax ou mail) au plus tard 48 h avant le début des opérations" (voir document 90 : CC p. 205).

"Les pompages de longue durée pourront être mis en œuvre avec l'unité de pompage complémentaire [le dispositif nominal ne convenant pas pour profondeur du EST433]. Cette unité sera fournie par l'Andra dans le cadre du contrat "pompages et diagraphies géochimiques" et comporte uniquement le système de pompage, de suivi de niveau et de débit." (voir document 90 : CC p. 206).

"Le contrôle des données en temps réel est essentiel à la conduite du pompage... (...) ... Les données de diagraphie géochimique seront acquises manuellement sur site par un technicien mis à disposition par HYDRO INVEST... (...) ...l'historique et des caractéristiques de chaque pompage sera consigné..."; "L'objectif de ce pompage est de réaliser des prélèvements de fond au droit des venues d'eau identifiées dans le Trias... (...) ... Le premier critère retenu pour l'arrêt du pompage est la reproductibilité de deux logs géochimiques réalisés à **24 heure d'intervalle au moins**... (...) Quand ce premier critère est atteint... au moins deux prélèvements sont réalisés pour analyse des majeurs dans les 48 heures... Si ces prélèvements ont pu être réalisés, les prélèvements finaux sont réalisés et le pompage est arrêté si les concentrations en majeurs sont stationnaires. Si les prélèvements n'ont pu être réalisés, le pompage est arrêté au maximum **une semaine après l'obtention du premier critère**." (voir document 90 : CC p. 207 ; mis en gras par nous pour montrer le type de durées prévues *a priori*). De même, les contrôles gazole et huile du groupe électrogène pour ces pompages longues durées seront "**hebdomadaires**" (voir document 90 : CC p. 208).

Le programme précise (extraits/résumé ; voir document 90 : CC p. 208-209) :

- "Arrivée après départ du foreur",
- réalisation d'une diagraphie température conductivité,
- mise en place de l'unité de pompage complémentaire sur le forage, choix de la cote d'installation de la pompe et du capteur de niveau en accord avec l'Andra,
- mise en route du pompage,
- réalisation de diagraphies température/conductivité en cours de pompage en fonction des demandes de l'Andra. "Elles nécessiteront le démontage du pompage et la libération du forage, puis la remise en place du pompage après l'opération."
- Arrêt du pompage : lorsque le profil géochimique est stabilisé... démontage du pompage; suivi de remontée de niveau [c'est une séquence de *récupération* comme discutée dans notre pièce annexe 3 IV.].
- prélèvements : en collaboration avec le titulaire du contrat "Suivi hydrogéochimique des forages profonds" (IRH, une PME environnement nancéenne pour les suivis classiques de l'eau). La mobilisation de ce prestataire est du ressort de l'Andra.

"Des prélèvements de fond au niveau des différentes venues d'eau repérées (par température, conductivité et analyse des diagraphies) dans le Trias..." (voir document 90 : CC p. 211). C'est à ce moment-là qu'étaient prévus les prélèvements pour les analyses très spécialisées par différents laboratoires de FORPRO, le BRGM et autres : isotopes, gaz rares, éléments majeurs et traces. "**Ces pompages ont pour but d'obtenir des fluides les plus représentatifs possibles de la formation...** (...) Selon les caractéristiques des venues d'eau, un obturateur au câble pourra être mis en place pour isoler des venues profondes qui seraient dominantes. Deux phases de pompage de longue durée pourront être envisagées dans ce cas : la première sans l'obturateur pour prélever les venues profondes et la deuxième au dessus de l'obturateur pour prélever les venues supérieures." (voir document 84 : ST p. 146).

"Le planning de ces opérations dépendant de la disponibilité du forage et des productivités des niveaux testés, sera stabilisé avant la réalisation de ces pompages." (voir document 90 : CC p. 209, 218)

### Test d'injectivité

"Un autre objectif de cette prestation est de réaliser un test d'injectivité afin d'obtenir une valeur représentative globale de cette grandeur pour les formations du Trias." (voir document 90 : CC p. 205).

Le cahier des charges ne décrit pas en détail ces tests qui devaient être précisés à la suite des opérations des tests entre obturateurs et des pompages de longues durées. Ce test devait être réalisé avec de l'eau issue des pompages longues durées (on constate que le problème de son oxydation n'est pas mentionné/discuté; on verra ci dessous (paragraphe IV) qu'on est en droit de s'inquiéter aussi du terme "*les formations du Trias*").

"Le prestataire mènera un test d'injectivité permettant d'évaluer ce paramètre globalement sur l'ensemble des formations triasiques non tubées." (voir document 90 : CC p. 209). A ce stade on ne peut pas comprendre l'importance de la précision redoutable des deux derniers mots ("non tubées") de cette phrase. On vient de lister un projet sur le papier tout à fait satisfaisant d'une étude complète d'un aquifère, en production et en injection. Mais qu'allait-il en être réellement ? Quelle étaient les intentions de l'Andra ? On ne le comprendra qu'au paragraphe IV ci-dessous.

En attendant, la description de ces cahiers des charges permet de montrer que la réponse de l'Andra à notre mise en demeure est bien loin des objectifs affichés alors (annexe p. 1/6, mis en gras par nous) :

*"La perméabilité des grès a néanmoins été approchée, et de l'eau de formation prélevée, **selon les objectifs de ce forage de recherche.**"*

## **II. La boue de l'Andra**

Comme expliqué plus haut (paragraphe I.a), l'affirmation "*Il convient de retenir que le maintien de la boue dans le forage est nécessaire à sa stabilité du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès*" est à l'exact opposé de décennies de pratiques et de savoir faire hydrogéologique, pétrolier et géothermicien . Elle est démentie par ce que l'Andra elle-même avait planifié.

### **a) Avant notre mise en demeure, cette boue « nécessaire » était officiellement interdite ...**

En préparation à ce forage EST433 pour la détermination de la ressource géothermique du Trias, L. Drouot présenté comme expert avait exposé devant toute la plénière du CLIS de Bure (dont l'Andra est membre de droit) que :

*"nous pourrions imaginer que la boue puisse colmater partiellement autour du forage la roche, ce qui évidemment nous empêcherait d'avoir une idée très claire du débit possible"*

Il fallait donc s'assurer que toute la boue avait été nettoyée, et il expliquait comment (voir synthèse

technique). Or, cet expert n'en était pas un (centralien avec un master d'électronique) et avait préparé son intervention a-t-il expliqué par "...une réunion de travail approfondi..." avec le directeur du Laboratoire de Bure et un hydrogéologue Andra de l'équipe du forage EST433 (voir document 10 : *CLIS de Bure plénière du 27/11/2007, p. 17*). Les conclusions d'un rapport postérieur de cet intervenant (voir document 89 : *Drouot 2010*) citées dans la réponse du 18/01/13 de l'Andra (p. 3/3 : "*il n'a émis aucune objection quant à la fiabilité et la qualité du travail accomplis*") ont été mises en cause à la plénière du CLIS du 04/02/13 par un débat contradictoire. L. Drouot a refusé d'aborder les questions techniques, notamment sur la boue pour laquelle il était mis face à une contradiction personnelle : "*mon métier n'est pas d'être expert... mon métier consiste depuis 40 ans à écouter les experts et à être un homme de synthèse préparant les décisions*" (voir document 112 : p. 22 ). Poussé par la salle, il n'ira pas plus loin que : "*comme l'a rappelé Pierre Robin de l'Andra, les forages ont été faits dans de bonnes conditions pour obtenir la mesure des paramètres dont nous avons besoin*" (voir document 112 : p 36 ). C'est le serpent qui se mord la queue : l'Andra s'appuie sur un expert qui s'appuie lui sur l'Andra.

Plus sérieusement, deux hydrogéologues de l'Andra avaient expliqué dans une revue française d'hydrogéologie : pour "*une caractérisation hydrogéologique précise du milieu «hôte» (en l'occurrence la couche d'argile... ) et des formations géologiques qui le jouxte...*" (...) "*le but du forage de reconnaissance... (...) pour la réalisation des tests hydrogéologiques...*". La première chose à faire est de remplacer la boue par de l'eau, poursuivent-ils. Ce sont les passages que nous citons dans la synthèse technique (voir aussi document 9 : p. 54-55). C'est effectivement ce qui était prévu à Bure pour les grès du Trias aussi (l-b ci-dessus).

L'Andra disposait pourtant de tous les éléments nécessaires à prévenir des obstructions qui ont mis à mal l'ensemble des investigations réalisées sur le forage EST 433.

En 1995 dans le forage MSE101 de Bure, le puits est mis en eau pour la réalisation des tests hydrauliques dans les séries calcaires Oxfordien et Dogger. La formation Callovo-Oxfordienne ayant montré dans le forage précédent HTM102 une mauvaise tenue mécanique si le puits était mis en eau, le MSE101 a été gardé "en boue" pour le Callovo-oxfordien. La mauvaise tenue mécanique de la partie centrale de l'argilite avait été confirmée par les mesures du diamètreur, aussi le forage a été alésé avant de procéder aux tests (voir document 106 : p. 71).

Suite à cela, dans le Callovo-oxfordien, la boue a été évacuée du volume de test le temps du test :

*"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)."*(voir document 106 : *Géoservices, Cie de Schlumberger, 1995, p. 71 ; mis en gras par nous*)

Or, les tests n° 6, 7 et 8 du MSE101 ont été réalisés en pleine argilite s.s. après cette mise en eau et ont pu être exploités tout à fait raisonnablement pour ce type de roche selon l'opérateur (voir document 106 : *Géoservices 1995, p. 71 à 97*). La relativement bonne interprétabilité a été confirmée par une analyse postérieure (voir document 107 : *Baker & Hughes 2005*). Cette pratique et son résultat sont cohérents avec la publication 1994 des deux hydrogéologues de l'Andra (voir document 9 : p. 54-55). Autrement dit, même dans de l'argile s.s. à 100 %, qui est la roche la plus sensible à l'eau, on peut dire au minimum que le maintien de la boue de forage n'est pas une « nécessité » pendant la durée du test. La compagnie Géoservices se méfiait donc surtout des conséquences en termes de dysfonctionnements de l'équipement de test.

Nous avons aussi cité dans la synthèse technique l'homologue suisse de l'Andra pour les tests réalisés en boue, dans son forage de Schafisheim près de Zurich au début des années 80 (en séries argileuses, calcaires et grès-argileuse). Tous ont montré des obstructions manifestes et problématiques de l'outil (voir document 8 : 1990, p. 8 ; voir aussi le Point Pa-4 de la pièce annexe 10).

## b) L'ANDRA aurait tendance à mélanger les grès , l'argile et la boue...:

Par exemple pour le forage de Germisay alors que nous rectifions en Pièce-annexe 1-III-a qu'il s'agit de la boue artificielle de forage parfaitement décrite comme telle dans le rapport des opérateurs (Document 31 : Andra, "La vie du Labo" n°22, p. 10) :

"... n'ont permis de retirer qu'un **très faible débit d'eau boueuse**. Ce résultat **s'explique** car le laboratoire se trouve sur la bordure Ouest de l'aquifère du **Trias** dont les **caractéristiques vont en se dégradant d'est en ouest**."

Ou l'unique description du Trias inférieur donné dans ses grands documents de référence :

"- 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. " (voir document 34 ; Affirmation écrite du Président de l'Andra au Président du CLIS de Bure, aussi Préfet de département)

"...grès du trias inférieur... : leur épaisseur diminue fortement d'est en ouest en même temps que **les grès se chargent en argiles, la productivité attendue est faible...**" (voir document 35 : 2004, c'est "le" document de référence de l'Andra sur la géothermie, p. 26);

"**l'augmentation de l'argilosité d'est en ouest, confèrent à cette formation de faibles potentialités aquifères.**" (voir document 44, ceci est "la" référence pour le vote de la Loi 2006-739 du 28 juin 2006 : Andra 2005a, juin t1, chap. 8, p. 36; décembre et numérique, idem p. 63).

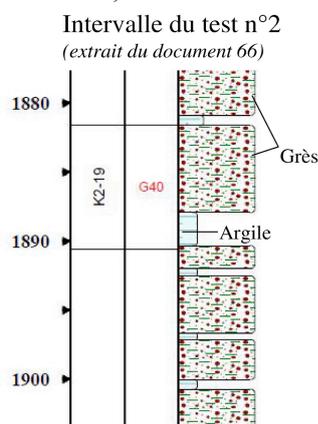
Or, le forage de Lezéville, situé entre Germisay et le laboratoire, avait montré des "grès moyens à grossiers, dans l'ensemble assez "propres", peu cimentés, manifestement poreux et perméables." (document 17 : Coparex 1989, p. 14 soulignés dans le rapport; cf. notre pièce annexe 1 I.). D'autre part ce qui est "désormais l'article qui fait référence" pour l'Andra selon sa réponse du 18/01/13 (voir pièce annexe 8) montre que l'on a à faire à une série gréseuse plus pauvre en particules fines dans sa partie Ouest, exactement l'opposé de ce que l'Agence prétendait dans ses documents de référence ci-dessus nommés.

## c) Comme justification : une bouillie de chat

Afin de réconcilier la présence désormais « nécessaire » de la boue de forage et celle provoquée par les « grès chargés en argile », l'Andra donne donc cette explication dans sa réponse du 18/01/13 (annexe p. 1/6) :

"Cependant, des particules argileuses du terrain (sédiments) passent dans la boue. Le recyclage de la boue de forage permet d'en évacuer une grande partie, le reste sédimente dans le fond du forage. La réussite de l'opération impliquait un compromis dans la gestion de la boue dans le forage pour à la fois garantir la tenue du trou nu pendant les tests et la réalisation des tests, qui nécessitait d'arrêter la circulation de la boue pendant toute leur durée. La colonne de boue dans le forage faisant alors plus de 1800 mètres de hauteur, la boue a partiellement sédimenté induisant des pertes de charge lors des pompages."

La colonne de boue sédimente parce qu'elle est haute de 1800 m ? D'où proviennent ces sédiments? Certainement pas de l'argilosité des grès du fond de forage dont il a été tant question depuis 10 ans (voir ci-dessus II.b).



Des "particules argileuses du terrain" sédimentent, elles aussi, dans le fond du forage ? Le Log de forage montre que l'intervalle du test n°2 dans le haut du Buntsandstein est composé à plus de 80% de grès, et que la seule fragilité de paroi sur une hauteur de ~ 1m a été détectée sur un banc de grès si la diagraphie est exacte (Document 66 : 1891 m). D'où proviennent ces sédiments alors? Et si par magie ce retournement de proportion et cet étonnant

phénomène physique (ces *particules argileuses* passent à travers l'autre boue gélatineuse qui est celle de forage ?) étaient possibles, qu'est-ce que cela aurait à voir avec le test n°2 dont la base est située 100 mètres plus haut que le fond du forage et son sommet à 125 mètres ?

Nous avons une dernière petite question : où sont dans ce petit-modèle-explicatif les cuttings/débris des 45 mètres friables des 90 m de l'*ensemble argileux* rouge du Muschelkalk que l'Andra a imposé dans le trou nu au dessus des grès ? : voir ci-dessous IV-a. En effet la réponse Andra du 18/01/13 précise qu'elle ne parle que de "*petits lits argileux dans les grès, car le forage était en trou nu sur toute la hauteur de ces grès.*" (Annexe p. 1/6). Les cuttings de l'*ensemble argileux* du Muschelkalk n'auraient pas eux sédimentés au fond parce qu'ils seraient restés collés sur la crépine peut-être par exemple ?

### III. Qualité des tests en boue

#### a) Les tests rapides de surveillance en boue des pétroliers

Les pétroliers peuvent décider de tester toute zone montrant de l'huile dans les cuttings (débris de la roche) et cela pouvait aller jusqu'à 20 à 30 tests au cours d'un même forage. Pour cet usage répétitif intensif rapide de surveillance de principe, il n'y a pas de pompe et travailler en boue de forage permet de faire des économies substantielles. Cependant si la formation est sensible au colmatage ils utilisent de la saumure (Document 113). S'ils travaillent en boue, la bonne pratique chez les pétroliers est avant un test de lui faire faire "à vide" plusieurs circuits (passage dans les tamis) qu'elle soit dépourvue de cuttings. Afin d'éviter le maintien d'un cake sur les parois du forage, ils font des tests de *production* (ouvrent la vanne d'obturation alors que la pression dans le tubage du forage est inférieure à celle de la formation) plutôt que d'*injection* (où la pression dans la colonne serait supérieure à celle de la formation). Le cake peut subsister de la phase de forage et circulation de la boue. Cette situation s'appelle chez les pétroliers : *wellbore damage*, "*puits endommagé*" (Document 70 : Earlougher 1977, p. 8) ce qu'ils évaluent par le facteur de pellicule, un paramètre fondamental qui n'est jamais omis des résultats. Comme nous l'avons mentionné en Pièce-annexe 3-IV-d, la plus grande valeur du facteur de pellicule qui figure dans le livre de Earlougher (la "bible") : 81 (contre 210 pour le calcul de la transmissivité des grès dans EST 433 !), est associée à la remarque : "*le puits était sévèrement endommagé.*" (dans le sens pétrolier : sa capacité de production était *sévèrement* affaiblie, sachant que les boues bentonite peuvent affecter durablement la perméabilité des parois du puits) .

L'Andra écrit dans sa réponse du 18/01/13 :

*"Il est habituel de réaliser des essais de type slug-test en boue.", "Les conditions réelles au moment du test sont prises en compte dans les interprétations qui en sont faites." et "La perméabilité des grès a néanmoins été approchée"*

Habituel en surveillance pétrolière rapide, oui. Première remarque, le contrôleur suggère que lors des tests du EST433 il y avait des "*débris dans la colonne de boue*" (voir ci-dessous : "Non il n'est pas habituel.."). Les pétroliers prennent des précautions pour éviter cela bien qu'il s'agisse de tests de surveillance.

D'où la question :

- Ces précautions n'ont-elles pas été prises pour les tests en boue du EST433 ?
- Aurait-il pu exister une autre source de débris que ceux produits au niveau du trépan ? Par exemple un long intervalle argileux s'effritant dans le forage ? (→ paragraphe IV ci-dessous).

L'Agence affirme qu'il est « *nécessaire* » d'utiliser de la boue à cause "*de la présence de petits lits argileux dans les grès*". Mais il s'agit là de boue à base... d'eau, or l'Agence écrit par ailleurs :

- "*de passées argileuses trop importantes pouvant créer des instabilités de trou lors de la phase 6" en boue à base d'eau.*" (Document 84, SP p. 120);
- "*les épais intervalles marneux du Trias supérieur et du Lias interdisent une boue à base d'eau.*" (Document 84, SP p. 45, c'est nous qui mettons en gras).

Ensuite, elle parle de *slug test*, le type essentiellement réalisé en surveillance pétrolière (on baisse le niveau fluide dans le tubage, par air-lift, en épongeant ou une mini pompe, et on ouvre la valve d'obturation : la

formation produit alors dans le tubage, il n'y a pas besoin de pompe dans le forage, dont l'installation est exclue pour des tests rapides de routine). Or, justement aucun slug-test dans le Trias du EST433 n'a été interprétable à cause des obstructions. Seule la séquence de récupération d'un pompage (non pas d'un slug test) l'a été *a priori* (le fameux et unique " $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ ").

L'Andra affirme dans sa réponse du 18/01/13 (annexe p. 1/6) que : "*Chaque test hydraulique dans le forage EST433 a été constitué de plusieurs phases enchainées : - slug-test par extraction d'eau...; - slug test par ajout d'eau...*". C'est malencontreusement inexact. La séquence de slug prévue lors du test n°2, le seul test dont on parle vraiment, a été supprimée volontairement : "*il n'y a pas eu de phases de diagnostique (SW et SWS) réalisées. Il a été considéré qu'elles n'étaient pas nécessaires et sautées.*" écrit le contrôleur visiblement surpris (Document 11, Egis géotechnique 2008, p. 7; SW est pour Slug Withdrawal, slug en dépression, et SWS est la phase de récupération associée).

Pour ce qui est d'un pompage, il n'est pas habituel du tout de le réaliser avec forage et crépine couverts et remplis de boue de forage ! Quant aux conditions "réelles" "prises en compte dans les interprétations" que notre Mise en demeure décrit en français pour la première fois et pour lesquelles elle produit la valeur exceptionnelle du facteur de pellicule pour la première fois aussi, elles confirment à la France la tromperie qui consistait à jauger la ressource géothermique à partir d'une comparaison sur des débits qui n'étaient physiquement pas comparables.

La présence d'une pellicule affecte le débit et la pression/rabattement nécessaire (*dammaged well*), et avec la courte durée de ce type de test, elle limite la profondeur de roche testée. La pellicule introduit des incertitudes dans la détermination de la perméabilité, plus ou moins grandes selon la qualité des tests, parce qu'elle ne peut pas être connue, ni donc ses effets réels. Elle est seulement caricaturée par les modèles.

Lorsqu'ils arrivent à une couche visée pour une exploitation potentielle, les hydrogéologues, les géothermiciens et les pétroliers réalisent des tests longs dans des forages qui sont débarrassés de la boue de forage si celle-ci a été utilisée au niveau visé. Nous en avons déjà parlé pour les rapports BRGM pour les pré-étude géothermiques du Dogger (cf. notre "Synthèse technique"; et fin de Pièce-annexe 3-IV-d; voir aussi Point Pa-4 de la Pièce-annexe 10). Cela supprime les incertitudes et teste le réservoir en profondeur. A la différence des tests de routine pétrolière, il s'agit de collecter des informations fiables sur lesquelles peuvent s'appuyer des décisions d'investissements financiers à amortir sur le long terme (Eau potable, puits de pétrole ou ressource géothermique). C'est à ce type d'objectif de production potentielle que devait répondre l'étude de l'aquifère du Trias inférieur sous Bure et ces tests longue durée figuraient donc dans les spécifications techniques et Cahiers des charges (paragraphe I-b ci-dessus). On verra au chapitre IV pourquoi cela n'aura été que des belles paroles.

#### **b) L'Andra avait prévu d'abord trois tests dans la boue polymère**

On lit dans les Spécification techniques que l'Agence avait programmé en premier 3 tests sur une durée de 6 à 10 jours "*fonction des possibilités de production des niveaux gréseux*" (Document 84 SP p. 140, 120; Document 90 CC p. 81) avec une pompe pouvant tirer jusqu'à 6 m<sup>3</sup>/h (voir Pièce-annexe 5).

Et si l'Agence demande l'évacuation de la boue de forage et son remplacement par de l'eau claire c'est postérieurement, juste après, ces trois tests (SP p. 120). "*Les tests dans le Trias se feront le forage en boue polymère...*" (SP p. 95, p.120) sans aucune évacuation de la boue avant de gonfler les deux obturateurs (SP p. 141), c'est une directive.

#### **c) Non, il n'est pas habituel d'avoir des obstructions massives multiples dont l'Andra s'est bien gardé de rendre compte : crépine, valve d'obturation, port d'entrée des capteurs de pression...**

Nous avons présenté dans la pièce annexe 3 V. les évidences accablantes de l'injection volontaire de plusieurs mètres cubes de boue dans le tubage interne du train de test sous la direction de l'Andra.

Ces injections ont été faites en introduction du test n°2. Elles correspondent exactement à ce qu'il aurait fallu faire pour nettoyer l'intervalle de test de toute boue, eussent-elles été faites à l'eau claire comme l'avait fait Géoservices lors des tests dans l'argilite du forage Andra MSE101 comme on l'a vu ci-dessus dans II-a. La réponse Andra du 18/01/13 (Annexe p. 1/6) prend le ton de la personne qui proteste énergiquement en même

temps confirmant que... il n'a pas été utilisé d'eau claire : *"le maintien de la boue dans le forage est nécessaire... Il est habituel de réaliser des essais de type slug-test en boue..."*.

Travailler en boue comme s'il s'agissait de tests de surveillance de routine pétrolière est une chose, avoir des tests in-interprétables en est encore une autre.

Sur un total de ~ 12 séquences en trois tests, une seule séquence de l'un des tests est (sous réserves) exploitable :

- Le contrôleur refuse toutes interprétations proposées par les opérateurs pour l'ensemble du premier test composé d'au moins 5 séquences (Document 11 : Egis géotechnique 2008, p. 6) : *"Le test présente des incertitudes considérables"*. De leur côté les opérateurs écrivent : *"... limitation du modèle conceptuel qui ne tient pas compte des phénomènes potentiels associés avec l'obstruction apparente de la crépine affectant les propriétés de pellicule pendant les séquences de test."* (Document 6 : SIS p. 53, test n°1).

- Le test n°2, composé de 3 séquences commence sur un (Document 6, SIS, Rapports journaliers p. 140) : *"... → système obstrué"*, avec : *"Discussion pour savoir si c'est la valve d'obturation qui est obstruée ou la crépine. Il y a des indices que la valve d'obturation est obstruée ce qui fait lien avec la diminution de débit du test précédent."* Sa dernière séquence est la seule *a priori* exploitable.

- Enfin le test n°3 composé de 4 séquences sera aussi évacué par le contrôleur (Document 11 : Egis géotechnique 2008, p. 4) : - *"... les mesures effectuées dans le cadre de ce dernier test, ne sont pas représentatives de la formation."*

Aucun des documents cités ne donnent la composition de cette boue polymère qui apparaît épaisse et gélatineuse sur les photos (Document 6 p. 129, 130). Le constat est qu'elle a gravement affecté les écoulements à tous les passages étroits de l'outil. Pour le test n°2 le contrôleur écrit (Document 11 : Egis géotechnique 2008, p. 7 puis 8) : *"On suspecte que l'outil de test était bouché au départ du test à cause de débris dans la colonne de boue."* et : *"le bouchon dans l'équipement de fond a été le plus vraisemblablement provoqué par des débris dans la colonne de boue..."*; *"Le débit était inférieur à celui prédit par les documentations de la pompe, ce comportement résultant probablement d'une obstruction dans l'outil... (... ) ... Un grand facteur de pellicule a été identifié dans l'analyse. Cela semble consistant avec l'hypothèse que l'outil était en partie obstrué."* En rapport à la littérature, la valeur très élevée de ce facteur de pellicule qu'il nous a fallu calculé (= 210 ; Pièce-annexe 3-IV-d) représente une gêne *exceptionnelle* à l'écoulement. S'ajoute à tout cela les obstructions très probables du port d'ouverture du capteur P2 décrites dans notre Pièce-annexe 3-V et VI (figs P3-4 et P3-6).

#### **IV. A l'origine des troubles, l'IMPOSITION par l'Andra de 90 mètres de roche argileuse dans le trou nu avec les grès**

##### **a) L'équivalent des argilites du Callovo-oxfordien, pour moitié friable, laissé en trou nu**

Le problème que l'on aborde maintenant est **arithmétique** et **très simple** : **150 m n'est pas 300 mètres**.

Nous donnons les citations des spécifications technique (Document 84, abrégé ST ci-après) et cahiers des charges (Document 90, abrégé CC ci-après).

##### La contradiction majeure vient des spécifications techniques de l'Andra

Dans les spécifications techniques l'évaluation du potentiel géothermique concerne le **Trias inférieur** : diagraphies thermiques jusqu'au fond du forage, évaluation de la productivité et de l'injectivité (ST p. 67). Son épaisseur y est estimée entre **100 et 150 mètres** (ST p. 18). Il doit être garni d'un tubage crépiné si le trou est instable (ST p. 70, p. 120).

Le **Muschelkalk (Trias moyen)** au dessus est estimé d'une hauteur de **150 mètres** : *"des niveaux argilo-carbonatés...avec quelques passées finement gréseuses"* (ST p. 19). Ces deux ensemble, Trias inférieur et moyen, font qu'à environ à **300 mètres** de la base, on devait passer au Trias supérieur (coupe prévisionnelle ST p. 20, p. 66).

Dans la description prévisionnelle du carottage prévu, il en est dit un peu plus : "*Le Muschelkalk moyen à inférieur qui présente des faciès très variés. Cet **ensemble argileux**, s'enrichit en silt et en grès fin vers la base à Lezéville ([l'ensemble argileux :] épaisseur de l'ordre de la centaine de mètres sous les calcaires du Muschelkalk supérieur). A Chevillon, cet ensemble fait également de l'ordre de la centaine de mètres mais, même si la tendance générale est respectée, il peut montrer des niveaux gréseux fins plus massifs dans la partie supérieure.*" (CC p. 184; c'est nous qui mettons en gras; pour les niveaux gréseux de la partie supérieure voir Annexe 2 ci-dessous). Ainsi, pour situer la carotte qui devra échantillonner le sommet du Buntsandstein il est calculé : "*la carotte sera donc déclenchée à environ 100 m sous la base des niveaux calcaires du Muschelkalk supérieur lorsque la tendance gréseuse sera bien installée.*" (CC p. 186). Entre la base des calcaires et le haut de la tendance gréseuse, c'est l'*ensemble argileux*.

Les spécifications techniques prévoient que le haut du forage EST433 soit tubé. Ce **tubage** est programmé jusqu'à la **profondeur fixée d'avance** de ~ 1700 mètres, **soit à 300 m de la base du forage aussi fixée d'avance** (ST p. 120; CC p. 20). Il est argumenté à cette occasion qu'ainsi il n'y aura pas "*de passées argileuses trop importantes pouvant créer des instabilités de trou lors de la phase 6*" en boue à base d'eau." (ST p. 120).

C'est là l'aiguillage majeur : Selon les spécifications techniques 2007 de l'Andra, l'*ensemble argileux* du Trias moyen (Muschelkalk) qui sera traversé par une suite d'outils, lavé à l'eau claire puis laissé en saumure pendant des mois n'est pas "*trop important*" et ne "*pourrait*" donc pas créer des instabilités de trou. Cette même Andra nous prétend en 2013 pour un test de 25 mètres (test n°2) à plus de 80 % gréseux et pour seulement plusieurs heures (p. 2/3) : "*Il convient de retenir que le maintien de la boue dans le forage est nécessaire à sa **stabilité du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès.***"

Sur le type de boue ensuite, l'Andra écrit (ST p. 45, nous mettons en gras) : "*les forages à objectif «Callovo-oxfordien» doivent montrer un bon calibrage des parois, une bonne tenue de trou sur plusieurs jours... Ces contraintes imposent ... une boue à l'huile. C'est également le cas pour le forage au Trias, pour lequel la **traversée du sel du Keuper**, ainsi que les épais **intervalles marneux** du Trias supérieur et du Lias **interdisent une boue à base d'eau.***"

Ce qu'elle *interdit* ne soit-ce que le temps du forage pour le Callovo-oxfordien (96 m d'argilites à Bure; voir Document 101) et des intervalles marneux, elle l'impose pour des mois (boue à l'eau puis eau d'Echenay puis saumure) via les mêmes spécifications techniques pour l'*ensemble argileux* du Muschelkalk épais d'une centaine de mètres.

Enfin au delà de ce problème majeur de l'instabilité du forage, quelle pourrait bien être la raison hydrogéologique d'imposer l'*ensemble argileux* en trou nu ?

Quel rapport avec la géothermie ?

Il n'y a nul part de but mentionné.

A moins... que... l'Andra tenait beaucoup à mêler de l'argile aux grès. Ne prétend-t-elle pas avec insistance depuis 10 ans que les grès sont argileux ? (voir ci-dessus II-b). Ainsi l'Agence va pouvoir nous affirmer dans sa réponse du 18/01/13 (annexe p. 1/6, nous mettons en gras) : "*Du fait des **difficultés techniques inhérentes aux horizons argilo-gréseux**... De telles conditions de foration et de tests ont été rencontrées au cours du forage EST433.*"

Et cette réponse du 18/01/13 se garde bien de dire que l'Agence a imposé l'*ensemble argileux* du Muschelkalk dans le trou nu (annexe p. 1/6, nous mettons en gras) :

*"Ainsi le maintien de la boue dans le forage pendant les tests était **nécessaire à la stabilité** du forage du fait de la présence de **petits lits argileux dans les grès**, car le forage était en trou nu sur toute la hauteur de ces grès."* (annexe p. 1/6).

### Les cahiers des charges du maître d'œuvre entraînés dans la contradiction

Les cahiers des charges ne peuvent que mettre les spécifications techniques en pratique : "*La longueur de l'intervalle [de test] sera adaptée aux paramètres de formation et à l'épaisseur des zones productives. Au vue de l'extension de telles zones productives dans la formation du Buntsandstein (épaisseur des grès de jusqu'à 150 mètres) on préférera les plus grands intervalles de test.*" (CC p. 105). En même temps le tableau de la même page indique (sans commentaire) que l'intervalle à tester est celui (imposé par les spécifications techniques) de 1700 à 2000 m, le double de l'épaisseur des grès que décrit le texte. A la page 103 il y a cette phrase : "*détermination des formations gréseuses dans le Trias inférieur (i.e. Buntsandstein, Muschelkalk)*" et dans les prévisions de carottage il est écrit : "*En référence à Germisay, le trias gréseux fait de 150 à 200 m à l'aplomb du forage EST433*" (CC p. 190; Nota le rapport de forage de Germisay, Document 33bis p. 11, donne 157 m de Trias inférieur, avec beaucoup beaucoup de grès permien en dessous mais au dessus par contre des argiles compactes, dolomie à pâte fine et anhydrite sur 54 m puis c'est le Trias supérieur, le Muschelkalk étant probablement tronqué par faille indique le Cahier des charges : Document 90 CC p. 189). Le Maître d'œuvre (auteur du CC) travaille exclusivement sur les données géologiques que lui fournit l'Andra. Pour l'ensemble du Trias (inférieur, moyen et supérieur) il cite deux niveaux gréseux dont étrangement l'Agence lui a fourni des caractéristiques : le Réthien (c'est 600 m plus haut que le Buntsandstein au sommet-sommet du Trias supérieur !) et le Buntsandstein. Puis il constate : "*Il est programmé que le puits soit en trou nu sur l'intervalle 1700 à 2000 m ce qui ne couvre pas l'intervalle de sable du sommet du Trias (Rhétien). Les données utilisées pour la prévision du test sont donc basées sur les propriétés hydrauliques attendues des grès du Trias inférieur...*" (CC p. 104) dont l'épaisseur est de... 150 m et non pas 300 m (2000 - 1700) !

Il en résulte une confusion :

*"Une série de 3 tests entre obturateurs est prévue sur la hauteur de la phase 6", de 1700 à 2000 m, dans le Trias inférieur." (CC p. 194)*

Cette phrase du maître d'œuvre n'est pas seulement ambiguë, elle est fautive strictement puisque tout le monde est d'accord que le Trias inférieur est < 150 m (et la tendance gréseuse < 200 m). Le volontarisme de la tromperie envers les opérateurs étant avéré par le test n°3, le maintien au forceps de cette confusion n'est pas du à de la négligence

### Les données du forage

Quelques mois plus tard, le forage EST433 a donné à partir de 1700 m (Document 66 : Log EST433) en allant vers le bas :

- ~ 70 mètres de dolomies et argiles dolomitiques sans problème de tenue mécanique et sans eau libre,
- ~ 90 m de roche essentiellement argileuse rouge brique avec de fines passées gréseuses par endroit,
- ~ 15 derniers mètres adjacent au Buntsandstein (qui commence à 1874,5 m profondeur forage) décrit qualitativement comme argileux rouge à passées silteuses mais pour lesquels la diagraphie gamma montre des valeurs intermédiaires entre celle de la roche argileuse du dessus et celle des grès du dessous. Ils sont donc plus silto-sableux que l'intervalle du dessus est s'en différencient nettement l'apparition franche d'eau libre selon la diagraphie et sans interruption désormais avec l'eau libre du Buntsandstein.

Au vue de la diagraphie "eau libre" il est légitime d'inclure *a priori* ces 15 derniers mètres avec le Buntsandstein pour les tests. Par contre la diagraphie indique qu'il n'y a d'eau libre dans les 90 mètres de roche essentiellement argileuse du dessus que sur 6 m isolés vers le haut (1796-1802 m profondeur forage; GEO-RS 2008, p. 39). Les "grès de Trois Fontaines" (voir annexe 2) sont donc ici réduits à une passé de ~ 5,5 m (verticalisée). Dessous c'est 53 mètres de roche argileuse non stop sans eau libre. La diagraphie diamètreur a révélé que plus de la moitié de l'ensemble argileux de 90 m : 47 m (1775 à 1822 m profondeur forage) avait eu des instabilités de parois (fortes entre 1775 et 1792; Document 66, ligne rouge de la colonne la plus à gauche). "*Les zones caves, mises en évidence grâce au diamètreur dans la moitié supérieure de l'ensemble...*" (Document 63 : Geo-RS 2008, p. 39). La situation est donc juste l'inverse de la "raison" donnée par l'Andra pour imposer cet ensemble argileux en trou nu, on la rappelle, qu'il n'y aurait pas selon elle, pour

justifier 300 m sans tubage : "de passées argileuses trop importantes pouvant créer des instabilités de trou lors de la phase 6" en boue à base d'eau." (ST p. 120, on met en gras).

Par comparaison, il n'y a eu qu'une cave sur une hauteur de ~ 1m dans les grès du Buntsandstein, et qui se trouve au niveau d'un banc de grès si la diagraphie est exacte (Document 66 : 1891 m).

| Epoque                                   | Etage                          | Profondeur forage EST 433 (m) | Forage tubé |  | Zones de test | Description  | Compléments   |  |
|--|--------------------------------|-------------------------------|-------------|--|---------------|--|---|--|
|  |                                |                               |             | Forage non tubé laissée en trou nu           |               |  |   |  |
| TRIAS MOYEN                              | Lettenkohle                    | 1700                          |             |  |               | 70 mètres de dolomies et argiles dolomitiques sans problème de tenue mécanique et sans eau libre |   |  |
|  |                                | 1710                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1720                          |             |  |               |  |   |  |
|  | Muschelkalk supérieur          | 1730                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1740                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1750                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1760                          |             |  |               |  |   |  |
|  | Muschelkalk moyen et inférieur | 1770                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1780                          |             |  |               |  | 90 mètres de roche essentiellement argileuse rouge brique avec de fines passées gréseuses par endroit |  |
|  |                                | 1790                          |             |  |               |  |   | Zones caves, fortes instabilités de parois |
|  |                                | 1800                          |             |  |               |  |   | Instabilités de parois                     |
|  |                                | 1810                          |             |  |               |  |   | Grès de Trois Fontaines                    |
|  |                                | 1820                          |             |  |               |  |   | Instabilités de parois                     |
|  |                                | 1830                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1840                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1850                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1860                          |             |  |               |  |   |  |
| 1870                                     |                                |                               |             | Argile rouge à passées silteuses - eau libre |               |  |   |  |
| TRIAS INFÉRIEUR - Etage du Buntsandstein | Grès à Voltzia                 | 1880                          |             |  |               | Grès, présence de petits lits argileux   |   |  |
|  |                                | 1890                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1900                          |             |  |               |  |   |  |
|  | Grès Vosgiens                  | 1910                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1920                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1930                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1940                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1950                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1960                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1970                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1980                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 1990                          |             |  |               |  |   |  |
|  |                                | 2000                          |             |  |               |  | Grès - conglomérat  |  |

Schéma récapitulatif réalisé à partir des données du document 66

90 mètres argileux en partie friables sans eau libre hormis un banc de silt dans le haut, c'est presque l'épaisseur des argilites s.s. du Callovo-Oxfordien au niveau du laboratoire de Bure ( 96,5 mètres, voir document 101).

Le tubage effectivement posé dans le EST433 s'arrête à 1740 m (1730 en profondeur verticale) laissant 261 mètres en trou nu. Le Buntsandstein recoupé faisant 126,5 m, environ la moitié de la zone non tubée ne concerne pas la série gréseuse, ce qui était évident dès les spécifications techniques. Particulièrement, les 90

mètres argileux, friables pour moitié, sont restés en trou nu dans un forage incliné entre 15° et 19° (Document 6, SIS 2009, p. 12).

Cet intervalle de puits nu, destiné à être traversé à plusieurs reprises par divers appareillages, est destiné à être mis en eau claire, puis pose d'une crépine d'un diamètre de 10 cm pour un forage de 15 cm hors effritement, puis soumise à des pompages sur des semaines, des injections... Et cela n'empêche pas l'Andra de répondre à notre mise en demeure pour quelques heures de tests (p. 2/3, on met en gras) :

*"Il convient de retenir que le maintien de la boue dans le forage est nécessaire à sa stabilité **du fait de la présence de petits lits argileux dans les grès.**" !*

#### **b) Un échec planifié**

Pour les opérations prévues après le départ de l'appareil de forage, l'Andra devient maître d'œuvre en plus de spécificateur. Il donne l'instruction, toujours sans conditionnel (CC p. 209, c'est nous qui mettons en gras) :

*"Le prestataire mènera un test d'**injectivité** permettant d'évaluer ce paramètre globalement **sur l'ensemble des formations triasiques non tubées.**"*

La précision "*l'ensemble... non tubées*" est diabolique au vu des 300 m trou nu imposés par l'Agence. Il est indispensable de prendre de sérieuses précautions pour préserver la perméabilité de la surface des parois de forage utilisés pour la réinjection dans les grès (voir pièce annexe 4 II.) : cet ordre d'inclure les 90 m de l'ensemble argileux sus-jacent dans l'espace de réinjection est en opposition totale aux règles de l'art de la réinjection dans des grès. D'une part, la saumure issue des pompages se sera oxydée et cela demande discussion avec des spécialistes expérimentés en géothermie et une filtration. Et dans le cas présent, l'argile du dessus viendra déjà dans l'intervalle entre les grès (diamètre 10 cm) et la crépine (15 cm) et lors de l'injection cet argile de l'annulaire ira se loger dans les pores des grès des bordures du forage. Le résultat d'une telle opération était connu d'avance.

Cela n'empêche pas l'Agence dans sa réponse du 18/01/13 d'être généreuse en conseils (annexe p. 5/6) :

*"Les caractéristiques argilo-gréseuses de la formation imposent également une complétion de puits de réinjection et des protocoles de développement des deux puits (production, injection) spécifiques pour avoir une exploitation fiable."*

#### **c) La mascarade du test n° 3 et le coincement de la sonde**

Le troisième test est ainsi décrit par ses opérateurs (mis en gras par nous) :

*"Le 3ème et dernier test réalisé au Est 433 (test n°3) a été sur l'intervalle 1785,60 et 1810,49 m sous le niveau du sol **dans les grès triasiques de la formation du Buntsandstein.**" (Document 6 : SIS p. 10)*

*"Le dernier test n°3 était aussi localisé **dans le Buntsandstein** ...." (idem p. 13)*

*"...3 tests dans la formation du **Buntsandstein**..." (idem p. 9)*

*"Les tests dans la formation triasique du **Buntsandstein** dans le forage EST433 comprenaient trois intervalles de 25m d'épaisseur... (...) ...Le focus des tests 1 et 2 étaient sur le pompage d'assez d'eau pour pour des analyses hydrochimiques d'eau de formation et l'estimation des paramètres de formation. Cette dernière était le seul focus pour le test n°3..." (idem p. 84).*

Les cahiers des charges écrivent que "*La location et longueur des intervalles de test seront définis pendant le forage...*" et : "*Les cotes exactes des tests seront déterminés en concertation avec le chargé d'affaire Andra...*" (CC p. 81 et 194). Il est clair que des opérateurs qui n'ont jamais eu la curiosité de même regarder le Log de forage ni avant ni pendant ni après (mais peut-être n'a-t-il pas été rendu accessible ?) n'ont rien pu décider du tout. L'Andra seule décidait, les données du forage en main. On notera qu'elle demande d'avance à ses opérateurs de pomper de l'eau seulement aux tests n° 1 et n° 2.

L'Andra, qui a visé ce rapport (Document 6 : SIS) a donc toujours fait croire à ses opérateurs qu'ils opéraient dans les grès du Buntsandstein, ce qui vaut aussi pour le contrôleur présent avec eux lors du test n° 3. Dans la foulée immédiate du test n° 3 avant la pose de la crépine et avant que l'appareil de forage ne s'en aille, une petite fenêtre de temps avait été accordée à l'Institut Physique du Globe (IPG) pour des mesures de contraintes par fracturation hydraulique (CC Document 90 p. 143; p. 194). Ils devaient attendre sur place que Solexperts leur cède la place et comme tous les présents autour de la plate-forme ont reçu le discours du trou nu ouvert sur la série gréseuse du Trias.

Ce test n° 3 est bien sûr en plein dans l'*ensemble argileux* du Muschelkalk, incluant la passée gréseuse de 6 m si bien que 76 % de l'intervalle du test est dans un faciès argileux. Il est de plus entièrement situé dans la partie friable de l'*ensemble argileux* et l'obturateur supérieur était même au niveau de la partie la plus friable (Document 66).

Pas plus que pour l'ordre de l'Andra de laisser l'*ensemble argileux* du Muschelkalk hors tubage, on ne trouve d'explication au choix du test n°3 au sein de cet *ensemble argileux*. Une telle explication est impossible puisqu'on est officiellement dans la série gréseuse du Buntsandstein !

En dépit du "*focus*" qui leur avait été indiqué de ne déterminer que les paramètres de formation pour ce test là (pas de pompage; voir ci-dessus), les opérateurs proposent en début de ce test n°3 "*de réaliser un test de pompage afin d'obtenir un échantillonnage d'eau et de nettoyer l'intervalle de formation par la même occasion*", réflexe de bonne pratique pour qui se croit dans des grès. Les deux hydrogéologues présents de l'Andra répliquent qu'il ne sera fait qu'un slug test, et en injection (Document 6 : SIS p. 143, "8h30"). Comme on l'a vu dans les "*tests rapides de surveillance pétrolière*", si on travaille en boue les injections ne sont pas recommandées car elles plaquent la boue sur les parois du forage accentuant l'effet de pellicule.

Trois heures après le début du slug test, les rapports journaliers écrivent qu'on prépare un pulse-test (Document 6 : SIS p. 144, "18h16"). Les pulse-tests sont les seuls adaptés aux formations très peu perméables. Ce changement de cap témoigne de la surprise des contrôleur/opérateurs devant la réponse hydraulique des "*grès du Buntsandstein*".

Disons tout de suite qu'aucune séquence de ce test ne sera interprétée. "*les mesures effectuées dans le cadre de ce dernier test, ne sont pas représentatives de la formation.*" écrit le contrôleur qui se croit en série gréseuse (Document 11 : Egis-géotechnique 2008, p. 4). S'ils n'ont pas vu le Log et diagraphies, opérateurs et contrôleur ne peuvent même pas connaître le diamètre irrégulier du forage au niveau de ce test alors que c'est nécessaire pour les interprétations.

Au CLIS de Bure l'Andra n'a jamais mentionné l'existence d'un test n° 3.

Le choc imposé en slug injection dans ce test a été de ~ 2,9 MPa et quelque chose d'anormal s'est produit (instabilité géomécanique ? fracturation hydraulique ? glissement d'un obturateur ?) puisque la pression redescend en partie brutalement puis ne bouge presque plus. Lorsque les opérateurs ferment la valve d'obturation pour une séquence de récupération, on aura de nouveau une variation de pression, dans l'autre sens, de 2,1 MPa. Puis est ré-appliquée en injection pour le pulse-test un choc de pression de 3 MPa (Document 6, SIS fig. B.3.2-2a p. 125). Finalement la valve d'obturation n'est plus étanche, on arrête tout, on dégonfle les obturateurs et le train de test remonté.

Si l'on mentionne ces détails du test c'est que l'on peut se demander dans quel état se trouve alors cette traversée argileuse la plus friable : effet des passages d'outils, des obturateurs, de ces chocs hydrauliques ? production de débris tombant dans le forage ? car l'IPG entre en scène juste à ce moment. Or, contrairement au train de test descendu et remonté à l'aide de tubes vissés, la couteuse sonde haut de gamme de l'IPG a été descendue par câble d'où un maniement nettement plus délicat au cas où il y aurait problème. Officiellement on était dans une série gréseuse...

Toujours est-il qu'on apprend de la coupe de forage de Andra 2010 (Document 115, t.2 p. 267) : "*Sonde*

*HTPF de l'IPG coincée à 1927 m (top). Longueur 9 m*". Bien que ce document soit de 254 + 433 pages (Documents 13 et 115) il n'y a pas un mot sur le sujet dans le texte, ni dans aucun autre document de l'Andra que nous avons consulté d'ailleurs.

Un dégagement d'outil n'est pas chose aisée et risque de demander plusieurs tentatives, donc du temps, peut-être une paire de jours. Or, la plage allouée à l'IPG a visiblement été courte puisque le 3ème test s'est terminé le 12 juin tôt (Document 6, SIS p. 144), qu'il fallait encore remonter le train de test et libérer la place, puis l'IPG s'installe, intervient, temps alloué pour la tentative de dégagement compris, puis est prévu le "contrôle du trou" puis le nettoyage du forage à l'eau claire, deux fois, puis la mise en place de la crépine. Or le 18 juin tout était terminé selon Andra 2010 (Document 13, t. 1, p. 38). Et les trois tests en eux-même ont été bouclés en 3,5 jours (du 08 en début d'après midi au premières heures du 12) alors que selon les CC, ils devaient durer entre 6 et 10 jours (Document 90 CC p. 81). On était pressé à l'Andra.

#### **d) Tricherie, mutisme, véritable gâchis et pas d'étude de l'aquifère géothermique**

##### Premiers résultats annoncés par l'Andra

Les premiers résultats de l'étude de la ressource géothermique sont donnés 4 mois après ces événements à la plénière du CLIS de Bure du 16 octobre. La présentation est ambiguë et bascule dans la tromperie en tablant sur la méconnaissance générale totale du b.a.-ba de l'hydrogéologie :

*"Il s'agit d'une bonne perméabilité, ce n'est pas mauvais. Nous avons pompé 3 à 5 m<sup>3</sup>/heure, ce qui fait une certaine quantité sous 30 mètres de rabattement.. Des chiffres de 3 à 5 m<sup>3</sup>/heure, en soi ce sont de bons chiffres."*,

et la page suivante :

*"Pour que cela soit rentable, les débits sont plutôt de 100, 200, voire 300 m<sup>3</sup>/h. Nous n'avons que 5 m<sup>3</sup>/h. Donc ces débits qui peuvent sembler importants, sont vraiment des débits insuffisants pour une exploitation géothermique."* (Document 91, p. 37 et 38 ; mis en gras par nous).

L'Andra annonçait cependant que ce n'était pas fini :

*"nous allons aller un peu plus loin... données qui vont tomber au début de l'année prochaine"* (p. 38)

et la diapositive d'accompagnement écrivait en gras :

*"Investigations à compléter début 2009 par la mesure de l'injectivité qui permettra également de vérifier la gamme de valeur obtenue sur toute la hauteur du Trias."* (Document 91, Annexe 14)

Pas un mot de la sonde coincée. Mais l'expression de l'Andra : *"toute la hauteur du Trias"* redoutable comme elle est (inclus l'ensemble argileux) pourrait laisser penser qu'il avait été décidé de prendre des mesures pour dégager et nettoyer le forage.

L'Andra dit aussi au CLIS de Bure :

*"Nous avons d'autres investigations prévues sur ce forage au Trias avant de le refermer en mars 2009."* (Document 91, p. 38; c'est nous qui mettons en gras)

Or, le rapport CNE-2 qui sortait au moment même des tests hydrauliques (Document 14, t.1, juin 2008, p. 28; c'est nous qui mettons en gras) venait de faire la recommandation inverse :

*"la Commission recommande que le forage au Trias qui constituera un ouvrage exceptionnel d'accès à un aquifère profond du Bassin parisien soit conservé pour être inclus dans le dispositif de surveillance à long terme de l'Andra et pour permettre des recherches futures sur le*

***comportement hydrodynamique et hydrochimique du Trias."***

L'Andra n'avait aucune intention de tenir compte de cette recommandation, semblant une nouvelle fois très pressée.

Arrive la *Synthèse* Andra datée de juillet 2009, objet de notre mise en demeure. Dans un petit chapitre administratif discret sur la conformité des prestations par rapport au programme, il est écrit (Document 5, p. 24 ; mis en gras par nous) :

*"un test d'injectivité était prévu au printemps 2009 sur le Trias dans le forage EST433 afin de compléter la caractérisation de cet aquifère. **Du fait du comblement de la crépine au droit des zones productrices mis en évidence lors des mesures de température de février 2009 et des résultats déjà disponibles suffisant à caractériser le potentiel, ce test n'a pas été réalisé.**"*

...et la fin omise de cette phrase sera donnée 10 mois plus tard (Document 13 : Andra 2010 t.1, p. 38) :

*"Forage au Trias EST433... Le forage a été rebouché par cimentation de 17/03/09."*

Le Buntsandstein du EST433 est dès lors définitivement à l'abri des regards. Avec un mélange des genres : qu'une crépine soit bouchée ou que la Direction scientifique Andra décide finalement qu'on en savait « *suffisamment* » sont deux choses qui n'ont rien à voir.

Il ne restera plus à la CNE qu'à se plaindre en espérant que quelqu'un l'entende (Document 12, 2010 p. 14) :

*"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."*

Mutisme et incohérences

Suite à une demande d'informations sur la crépine et ce comblement mentionnés dans la *Synthèse* Andra 2009, le directeur du Laboratoire de Bure (Document 114 : 12 mai 2011, lettre adressée au Président du CLIS) écrit que :

*"la crépine mentionnée dans le texte a été mise en place en juin 2008 à la suite de la réalisation du forage. Ses côtes sont 1698 à 1925 m (voir coupe technique du forage page 267 du tome 2 du bilan MHS). Le comblement du forage a été constaté lors des deux opérations de diagraphies thermiques réalisées en aout 2008 et février 2009 lors desquelles les outils de mesure ont posés à respectivement à 1856 et 1841 m, montrant le comblement progressif du forage par des fines au travers de la crépine."*

Toujours pas un mot de la sonde coincée, pas la moindre mention des évènements réels et encore moins de ce qui était prévu dans les Cahiers des charges que personne ne connaissait.

C'est cependant sur la coupe de forage (Document 115, Andra 2010, t.2, p. 267) indiquée dans cette lettre, document que nous avons demandé en même temps que des informations sur la crépine, qu'on remarque pour la première fois la mention d'une sonde coincée. La sonde n'a donc jamais été retirée bien que l'Andra annonçait qu'elle allait faire des mesures sur "***toute la hauteur du Trias***" en plénière du CLIS en octobre 2008. La crépine a été posée. Sa base est juste au dessus de la sonde (1925 pour 1927 m) et sa partie supérieure est à cheval sur le tubage sur 42 mètres.

Haute de 227 m (Document 115 : t.2 p. 267), elle n'aurait de toute façon pas couvert la totalité du Buntsandstein puisque le trou nu était haut lui de 261 mètres soit 34 mètres de plus (le "*Conglomérat de*

base" et le tiers inférieur des "Grès vosgiens" étaient trou nu de toute façon).

Le Buntsandstein commence à 1874,5 m profondeur forage et le début de la série gréseuse à eau libre 15 mètres plus haut soit à ~ 1860 m. Entre la base du tubage et la série gréseuse se trouve 120 m de crépine, 65% de sa hauteur hors tubage qui n'ont rien à voir avec l'étude de l'aquifère géothermique. Et il s'y trouvent bien sûr les 90 m de l'ensemble argileux.

Selon les spécifications techniques et cahiers de charges (Document 90 CC p. 143), un "contrôle de trou" devait être réalisé tout de suite après les mesures de la sonde IPG. Puis le forage devait être débarrassé de la boue en la remplaçant par de l'eau du captage d'Echenay avant d'installer la crépine. Ces deux opérations de contrôle et nettoyage, si elles ont eu lieu, ont du révéler l'état du forage.

Revenons aux affirmations du directeur du Laboratoire de Bure citées plus haut :

*"...comblement progressif du forage par **des fines au travers de la crépine.**"*

Les 65 m de la base de la crépine sont face à des grès à plus de 80%. Mais ils sont surplombés par l'ensemble argileux dont 47 mètres effrités déjà lors du forage (trou large par endroit de 23 cm au lieu de 15; Document 66; et après cela il y a eu test n°3, la sonde, l'installation de la crépine).

Une phrase parlant d'un autre capteur plus superficiel révèle qu'il y a eu quatre diagraphies postérieures de température (Andra 2010 Document 13, Andra 2010 t.1, p. 39) :

*"Les interruptions qui ont eu lieu **du 25/06 au 02/07/08, du 26 au 28/08/08, du 01 au 04/09/08 et du 02 au 19/02/09** sont liées au retrait du capteur pour la **réalisation de diagraphies thermiques** pour l'évaluation du potentiel géothermique au droit du forage."*

Mais le directeur n'en mentionne et n'a fourni les données que de deux (Document 114 : 12 mai 2011 déjà cité) :

*"Le comblement du forage a été constaté lors des deux opérations de diagraphies thermiques réalisées en août 2008 et février 2009 lors desquelles les outils de mesure ont posés à respectivement à 1856 et 1841 m, montrant..."*

Ces deux diagraphies ne concernent pas le Buntsandstein qui commence à 1874,5 m.

En août 2008 l'outil de mesure a « posé » à 1856 mètres dit-il concluant à un comblement du forage. Or deux mois après la diagraphie d'août, l'Andra annonçait à l'assemblée plénière du 16 octobre 2008 qu'elle aller procéder à "...la mesure de l'injectivité qui permettra également de vérifier la gamme de valeur obtenue sur **toute la hauteur du Trias.**" ! Tout cela est incohérent.

Lorsque le 04 février 2013 le Président du CLIS de Bure demande en séance plénière à l'envoyé de l'Andra, "Vous avez suivi le forage", on "nous parle de boue, qu'en pensez vous ?", il aura en tout et pour tout comme "explication" (Document 112 p. 32 , mis en gras par nous) :

*"Nous avons eu des problèmes, des difficultés. Nous avons coincé des outils, du matériel cassé, le terrain s'est resserré, des crépines se sont bouchées, **mais tout a été repris sans problème...**"*

## Annexe 1

**Diagraphies moulinet ou géochimie-température et pompage**

En forage d'exploration pour les aquifères on réalise un test de pompage "en trou ouvert". *"La formation est en général testée sur toute son épaisseur, ce qui implique des intervalles d'une longueur supérieure à 100m."* (Document 106, Géoservices 1995, p. 11). Le forage est nettoyé : on retire la boue de forage qu'on remplace par de l'eau claire souvent marquée avec un traceur qui, pour le Trias du EST433, était prévu être le contenu en nitrates de l'eau du captage d'Echenay (Document 84, ST p. 151). L'appareil de Géoservices en 1995 par exemple consistait en une colonne d'exhaure d'un diamètre de  $2\frac{7}{8} = 7,3$  cm (diamètre intérieur 6,2 cm), un capteur de pression immergé pour l'annulus et une pompe électrique immergée. Il n'y a pas de valve d'obturation et la hauteur du fluide dans l'annulus correspond à la pression de fond.

La détermination des propriétés hydrauliques de la roche est réalisée de la manière tout à fait classique sur la séquence de Récupération de Pression Statique (PSR) en fin de forage, puis sur pompage à débit constant et sur la phase de récupération de pression à l'arrêt d'un pompage (ou suite à un changement du débit de pompage). La même série de déterminations est faite (seule le sens, le signe, change) lorsqu'on injecte de l'eau dans l'aquifère plutôt que d'en pomper.

Les niveaux productifs sont identifiés et quantifiés par débitmétrie avec le micromoulinet (une hélice) mis en place avant et sous la pompe, et qui mesure les vitesses verticales dans le puits. Il est déplacé de 0,5 à 0,1 m avant chacune de ses mesures. Il détecte des vitesses d'écoulement locales d'environ 1cm/s, à partir desquelles, à partir du diamètre du puits et connaissant la transmissivité globale de la formation (obtenue par les calculs classiques sur les séquences du test), on peut calculer les perméabilités relatives de chaque zone de production. Géoservices parle de PLT (Production Logging Tool). Descendu avant la pompe immergée, le PLT est actionné par câble (par un camion de logging avec panneaux de contrôles et enregistreurs intégré, et le treuil). On peut faire autant de passages que l'on veut.

En deçà du seuil de détection du micromoulinet, des diagraphies quantitatives des profils de température et de conductivité (l'eau tracée du puits a une conductivité différente de l'eau de formation), peuvent permettre de déterminer des transmissivités pour ces zones. Cela est adapté aux formations d'une perméabilité intermédiaire, dans l'intervalle  $10^{-5}$  à  $10^{-10}$  m/s (Document 106, Géoservices 1995, p. 10). La procédure PLT est la même que pour le micromoulinet. Descendu avant la pompe immergée, le PLT est actionné par câble. On peut faire autant de passages que l'on veut. Par exemple, pendant le test n°10 en trou ouvert sur le Dogger, entre 800 et 653m de profondeur au forage MSE101, Géoservices a réalisé 7 passages (pendant la descente ou la remonté ou les deux) qui montrent le répondeur en fonction de la séquence en cours : séquence initiale de récupération RPS, pompages à différents débits et récupération (Document 106, Géoservices 1995, p. 142). L'analyse quantitative des diagraphies PLT par simulation est faite par un logiciel spécifique qui permet de calculer débits, concentrations et transmissivités de chaque zone de production, et par conséquent la transmissivité totale. Cette dernière a été trouvée en parfait accord avec celle déterminée par ailleurs sur les séquences du test. Mais l'interprétation quantitative PLT montre en plus, dans cet exemple là, que ~ 80 % du débit provenait de deux niveaux de production bien identifiés (Document 106, Géoservices 1995, p. 149).

Dans le Cahier des charges pour le EST433, l'Andra ne prévoyait que des diagraphies température/conductivité puisqu'elle annonçait une perméabilité moyenne à faible. Pour un aquifère de la perméabilité du Buntsandstein, c'est le micromoulinet qui est approprié. Mais cela aurait pu être changé une fois les premières données obtenues. Il semble aussi que la procédure et le matériel auraient été un peu différents puisque ces cahiers des charges (Document 90, CC p. 208) précisent pour la réalisation de diagraphies température/conductivité que *"Elles nécessiteront le démontage du pompage et la libération du forage, puis la remise en place du pompage après l'opération."*

## Annexe 2

**Les "grès de Trois Fontaines"**

Le Muschelkalk pouvait-il avoir *a priori* un intérêt géothermique autre que *la tendance gréseuse* de sa base qui est collée au Buntsandstein ? La question pourrait être soulevée pour le passage gréseux d'une 15 aines de mètres dans le Muschelkalk moyen (donc pas à la base) de la région de St Dizier au Nord, connu sous le nom de "grès de Trois-Fontaines". Ces grès constituaient le gisement principal de gaz du même nom (2 milliards de m<sup>3</sup>) découvert dans les années 1980 par Eurafrep, exploité par Coparex sur les départements de la Marne, de la Hte Marne et de la Meuse. Il a été racheté par GDF en 1994 et son exploitation terminée en 2007. Storengy la filiale de GDF-Suez a mis en service en 2011 une station de compression et soutirage pour le convertir en stockage tampon de gaz. On savait ces grès fins présents (sans gaz) au forage de Chevillon 13 km à l'Ouest du EST433 : deux bancs massifs de 8 et 7 mètres + trois niveaux d'un mètre chacun (Document 116 Eurafrep p. 6) alors qu'il n'y a que 4 m, fins et de mauvaise perméabilité 15 km au S-SE du EST433 à Lezéviller (Document 17, Coparex p. 13-14). Une reprise des investigations a lieu aujourd'hui sur la même région (Sud de Bar-le-duc) parce qu'il peut aussi y avoir du gaz en quantité exploitable dans les dolomies un peu plus haute dans la stratigraphie (là où a été arrêté le tubage au EST433) lorsque celles-ci sont fracturées. Les "grès de Trois-Fontaines" sont fins, moins perméables que les aquifères classiques (GDF a fait faire un forage horizontal, le TF111, pour multiplier la surface d'échange avec la roche). Le Buntsandstein est 8 fois plus épais, d'une perméabilité réputée nettement supérieure et plus chaud parce que plus profond. Si c'est la géothermie qui intéresse, le Permien collé à la base du Buntsandstein a un potentiel incomparable. Dans le cadre du EST433, les "grès de Trois-Fontaines", s'ils étaient présents, ne constituaient donc pas une cible géothermique d'autant plus pour une Agence qui affirmait depuis plus de 5 ans que le Buntsandstein lui-même n'avait pas d'intérêt ! Au EST433, on ne trouvera qu'un niveau à caractère gréseux *a priori* perméable de 6 mètres en longueur forage (Document 63, Geo-RS p. 39).

## Pièce annexe 8

### ***"Désormais l'article qui fait référence..."***

Dans sa lettre DG/DIR/13-0016 (p. 2/3) et son annexe (p. 2/6), l'Andra écrit :

*"Vous citez... données géologiques du BRGM de 1979 (fig. 1 p. 1 du document "Synthèse générale - Dossier technique"). Désormais, l'article qui fait référence sur le sujet est l'article "Lower triassic sequence...." de S. Bourquin et al... 2006".*

Les données géologiques BRGM de la fin des années 70 - début de années 80 ont été révélées par des bénévoles en décembre 2002. Il n'y avait pas d'article S. Bourquin et al 2006 alors. Pendant 12 ans, avant la sortie de cet article "*de référence*", l'Andra a masqué l'existence des rapports phares existants du service géologique de l'État.

Le rapport Maget et Rambaud BRGM 1979 (voir document 16) réalisé à la demande du gouvernement était de géologie appliquée, spécifique au potentiel géothermique de la région Champagne-Ardenne. Ses cartes étaient des outils pour le choix de lieux précis et de support à la décision d'engagements financiers pour lancer des opérations de forage en vue d'exploitations.

L'article de Bourquin et al 2006 (voir document 117), 27 ans plus tard (postérieur au choix du site de Bure par la loi sur l'expertise de l'Andra) est un travail académique de stratigraphie. Il raisonne à une échelle de bassin : d'Orléans à la bordure occidentale de l'Allemagne incluse. Ce n'est ni un travail de géologie appliquée, ni un travail qui s'occupe des particularités locales.

Bourquin et al. 2006 s'intéressent aux cycles sédimentaires individuels (c'est-à-dire de petites portions individuelles isolées au sein de l'épaisseur du Trias inférieur), à l'histoire du bassin. Ces cycles sont définis dans l'article. La Synthèse Andra 2009, sur laquelle porte notre mise en demeure (voir document 5 : p. 106), aurait au moins pu identifier les cycles sédimentaires définis par Bourquin et al (voir document 117). Mais ce n'est même pas le cas !

Alors qu'est-ce que la "*référence*" de la réponse Andra ?

Il n'y a pas de carte d'épaisseur globale de la série gréseuse dans cet article (la coupe traitée est beaucoup plus au Nord). Pour le cycle majeur supérieur (l'ensemble autour des "grès à voltzia"), aucune épaisseur n'est indiquée. Pour le cycle majeur inférieur (celui des "grès vosgiens" sens large), seuls les dépôts de deux cycles ("B3" et "B4") approchent de la zone de transposition avec une épaisseur quasi nulle (voir document 117). Le forage EST433 a montré une importante épaisseur de la partie inférieure du Buntsandstein ("grès vosgiens" sens large). Le forage EST433 apporte donc du nouveau par rapport à 2006.

Justement, ces auteurs (Bourquin et al.) ont étudié depuis la stratigraphie du EST433 dans le cadre de FORPRO (communication orale à une réunion du programme TAPSS le 10/02/2011). Sur cela, la réponse Andra du 18/01/13 reste muette.

**Par contre**, le trait sédimentologique majeur de toutes ces cartes est que **les faciès deviennent moins argileux en allant vers l'Ouest** (exception des cycles B5-B6, fig. 8A où l'évolution est en Nord Sud, mais la zone de transposition déjà non touchée est plus en plein dans l'axe potentiel d'un couloir à dominante sableuse WSW-ENE). Cet article montre **exactement l'inverse de ce que l'Andra prétend à Bure depuis la note Mourot** :

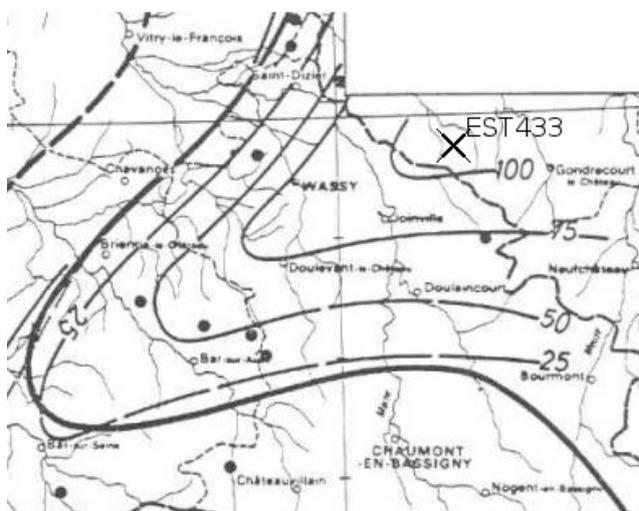
*"des essais de pompage réalisés dans le forage profond de Germisay à une dizaine de kilomètres au Sud du laboratoire n'ont permis de retirer qu'un très faible débit d'eau boueuse. Ce résultat s'explique car le laboratoire se trouve sur la bordure Ouest de l'aquifère du Trias dont les caractéristiques vont en se dégradant d'est en ouest." (voir document 31 : "La vie du Labo" n° 22*

de mai-juin 2003, p. 10 ; on a vu en pièce annexe 1 III.a que cette boue n'est autre que celle artificielle de forage) ;

"...grès du trias inférieur... : leur épaisseur diminue fortement d'est en ouest en même temps que les grès se chargent en argiles, la productivité attendue est faible..." (voir document 35, "le" document de référence de l'Andra sur la géothermie, p. 26) ;

"Concernant le Trias inférieur, les perméabilités moyennes à faibles de cette formation géologique, associées à la réduction d'épaisseur et à l'augmentation de l'argilosité d'est en ouest, confèrent à cette formation de faibles potentialités aquifères." (voir document 44, ceci est "la" référence pour le vote de la loi n° 2006-739 du 28 juin 2006 : *Andra 2005a, juin t1, chap. 8, p. 36* ; décembre et numérique, idem p. 63).

Revenons à la géologie appliquée à l'échelle locale. Le Buntsandstein du EST433 avec des grès largement dominants (voir document 63 : *GEO-RS p. 68 notamment*) dépasse déjà 120 m. Il est remarquable que cela s'intègre parfaitement à la carte de Maget et Rambaud 1979 (voir document 16 : *carte 26*) :



Scan sur la carte 26 de Maget et Rambaud 1979 (voir document 16) : Épaisseur du réservoir des "grès lorrains" (en m). "Ils forment un "golfe" qui s'avance jusqu'à la Seine" (p. 32). Cette carte prévoyait que Bure devait être à peu près pile dans l'axe et la zone la plus épaisse, à partir de, et au delà de 100 m d'épaisseur. Les forages qui ont servi à établir la carte sont les points noirs. Il est remarquable que le forage EST433 positionné par une croix, avec ses >120 m, valide pleinement cette carte de géologie locale appliquée.

Ces articles de Maget et Rambaud (celui de 1980 mentionné par Mourot 2002 et celui de 1979 mentionné dans notre synthèse technique) ne sont donc pas seulement d'intérêt historique. Ils restent valables pour la zone (le seul nouveau forage entre temps a été celui de Lezéville).

On en est plus aux cartes en 2013. On a des données locales, le forage de Lezéville depuis 1989 (voir document 17) et depuis 2008, le EST433. Et il y a la géophysique qui va avec (voir document 5 : *Andra 2009, p. 109*) :

"indiquent que les mesures enregistrées à la base du Trias par le forage EST433 ne correspondent pas à une anomalie locale (fracturation, zone montrant une porosité anormalement élevée ou basse, ...) et peuvent être extrapolées à une vaste zone autour du forage. Les données acquises dans ce forage dans les formations du Trias inférieur paraissent donc représentatives de la plus grande partie de la zone de transposition (BEICIP, 2008)."

Le Trias ne représente cependant qu'une partie du potentiel géothermique sous la zone de transposition. La série gréseuse permienne, d'épaisseur exceptionnelle, et dont ne s'occupe ni Maget et Rambaud 1979, ni Bourquin et al. 2006, s'annonce d'un potentiel incomparable.

## Pièce annexe 9

# Le programme TAPSS 2000 dans la tourmente

Dans sa lettre DG/DIR/13-0016, l'Andra écrit :

*"Le programme d'échantillonnage, de diagraphies et d'essais in situ spécifique à ce forage a été établi en lien avec un groupement de 22 organismes de recherche"; "Les équipes scientifiques travaillant sur ce programme ont été présentes tout au long de la réalisation de ce forage" (p. 2/3, 3/3)*

*"Caractériser les formations profondes (Lias et Trias), tant du point de vue de leur impact sur les transferts globaux que de leur potentiel géothermique.*

*Ce forage a été approfondi jusqu'à 2000 m pour répondre à ce dernier objectif. Il a accueilli aussi un programme de recherche multidisciplinaire et multi-organisme (Universités, CNRS, IFPEN, BRGM, IRSN) dont la thématique était "Transferts actuels et passés dans un système sédimentaire aquifère-aquitard : un forage de 2000 mètres dans le Mésozoïque du Bassin de Paris (TAPSS)" : 22 laboratoires y ont participé.*

*De ce fait, le programme d'échantillonnage, de diagraphie et d'essais in situ spécifique à ce forage a été établi en concertation avec ce groupement d'organisme.*

*Les équipes scientifiques travaillant sur le programme TAPSS ont été présentes sur le chantier tout au long de la réalisation de ce forage. Elles ont tenu plusieurs réunions de travail au cours desquelles elles ont échangées leurs résultats. L'Andra y a également présenté les résultats de ses recherches en lien avec les trois grands objectifs définis ci-avant. Dans le cadre de ce programme, 7 thèses ont été soutenues à partir de données provenant de ce forage, 6 articles scientifiques ont été publiés dans des revues internationales à comités de lecture et 2 sont actuellement sous presse (voir références)." (voir annexe : p. 4/6)*

Sont donnés en dernière page (voir annexe : p. 6/6) les titres et laboratoires de 7 thèses, les références de 6 articles publiés et de 2 articles "acceptés ou sous presse".

Les affirmations *"Le programme d'échantillonnage... spécifique à ce forage a été établi en lien avec un groupement de 22 organismes de recherche..."* et *"Les équipes scientifiques travaillant sur ce programme ont été présentes tout au long de la réalisation de ce forage"* ont été rendues impossibles dans leur réalisation pour le Buntsandstein étant donné :

- a) l'abandon pur et simple du programme des pompages représentatifs longues durées prévu pour ce programme TAPSS 2000 (voir pièce annexe 7 IV.d) ;
- b) le mutisme de l'Andra sur ce qui s'est réellement passé dans la partie basse du forage.

L'échantillonnage de saumure profonde *"spécifique à ce forage"*, le seul pouvant débloquent le "schéma hydrogéologique régional" en manque de données depuis 18 ans, a dû être réalisé sur une prise antérieure, en dehors de tout protocole. Les scientifiques ignorent visiblement ce qui s'est réellement passé. A l'opposé de toutes les annonces des années précédentes, les ADEME/BRGM ont été exclus de la conception et de la réalisation des tests hydrauliques de la même couche, avec le résultat qu'on connaît.

|   |   |
|---|---|
| I. Buts du forage profond.....  | 2 |
| II. Les organismes compétents pour la géothermie interdits de forage.....   | 2 |
| III. Les laboratoires impliqués dans TAPSS 2000 reçoivent chez eux ou ne viennent que pour le conditionnement de leurs échantillons, sauf cependant pour la saumure du Buntsandstein échantillonnée en dehors de tout protocole ..... | 4 |
| a) Carottes.....  | 4 |
| b) Saumure, ce qui était prévu.....   | 4 |
| c) Saumure, ce qui s'est fait.....  | 5 |
| IV. Les va et vient de la (des ?) chimie(s) de la saumure.....  | 5 |
| V. Les scientifiques ignorent ce qui s'est réellement passé, exemple de l'hélium.....   | 6 |

## I. Buts du forage profond

Le forage EST433 devait apporter des informations pour :

- a) l'étude du "schéma hydrogéologique régional", tout particulièrement le lien entre le gros aquifère du Nord-Est de la France, le Buntsandstein et celui du Dogger qui est immédiatement sous la couche visée pour les déchets (voir pièce annexe 1 VI.). Comme plusieurs forages allaient déjà au Dogger, ce forage était essentiellement la découverte de l'aquifère du Buntsandstein. Le "schéma hydrogéologique régional" est un critère essentiel de la RFS/Guide de sûreté pour le choix d'un site de "stockage définitif". Il a la lourde tâche de devoir établir le fonctionnement hydrogéologique actuel d'une série multi-strate d'aquifères et de le projeter dans le futur sur 1 million d'années. Pour cela, il doit chercher à comprendre comment il a fonctionné dans le passé géologique.
- b) connaître la puissance de la ressource géothermique qui, toujours suivant la RFS/Guide de sûreté, ne doit pas présenter d'intérêt particulier. Au vu de la profondeur, on connaissait d'avance la température à 5-6°C près et on savait qu'il y aurait plus ou moins de sel dans cette partie du bassin. L'inconnue était surtout la perméabilité/transmissivité (la facilité de l'eau à "bouger").
- c) améliorer les connaissances générales de manière opportuniste à l'occasion d'un forage profond.

Le programme TAPSS 2000 se concentre surtout sur l'objectif a), partie géochimie. Les intervenants récupèrent des échantillons pour leurs analyses/études. Avec leurs mesures, ils tentent ensuite de déterminer par exemple si l'eau est venue il y a 20 000 ou 5 millions d'années, en les intégrant dans des modèles plus ou moins simples, des raisonnements... Ils chercheront aussi à évaluer les échanges de matières, à l'échelle géologique, dans la pile sédimentaire. La plupart sont des géochimistes. Il s'agit essentiellement de chimie de laboratoire. La nouveauté du EST433 était le Buntsandstein. On va voir ci-dessous que, bien que le forage ait été rebouché, la composition de sa saumure apparaît fluctuante...

La détermination de la perméabilité et de la charge hydrostatique de l'aquifère Buntsandstein (tests hydrauliques) est nécessaire aussi bien pour les objectifs a) que b). Pour les tests d'aquifères en profondeur, les grands organismes compétents sont les géothermiciens et les pétroliers. Aucun n'a pu approcher les tests du EST433, ce qui explique quelques initiatives peu conventionnelles et quelques problèmes...

Un travail opportuniste de connaissances générales est par exemple des études stratigraphiques dans la colonne sédimentaire, ou encore la mesure des contraintes en profondeur sous l'épaisse couche de sel du Trias supérieur, qui intéresse l'Institut de Physique du Globe (IPG). La réponse de l'Andra cite une équipe qui a étudié les carottes du Buntsandstein du point de vue stratigraphique (Bourquin et al., Univ. Rennes), mais elle cite un de ses travaux antérieur au forage (voir pièce annexe 8). Quant à l'IPG, pour des raisons indépendantes de sa volonté, elle a tout perdu dans l'histoire (voir pièce annexe 7 IV.c).

## II. Les organismes compétents pour la géothermie interdits de forage

Suite à la note de A. Mourot, l'Andra répondait en 2003-2004 :

*"la détermination des ressources géothermiques françaises ne relève pas des compétences de l'Andra. Il apparaît que les deux établissements concernés seraient plutôt l'ADEME et le BRGM..."* (voir document 34 : *Président de l'Andra 15/01/04*);

*"Ce n'est pas à l'Andra d'aller caractériser les ressources géothermiques en France"* (voir document 26 : *Dir. Gén. Andra 26/05/03*);

et parlant de cette détermination :

*"...de toute façon je crois qu'elle [l'Andra] n'en aurait pas les compétences..."* (voir document 28 : *Directeur de Bure 15/01/04, p. 26*).

On était alors en symbiose puisque (voir document 51 : *Erdyn 2005*) :

"Dans le cadre de la relance de la géothermie au Trias dès 2006, engagée par l'ADEME et le BRGM, l'ADEME exprime son intérêt pour la démarche entreprise dans la région de Bure. " (voir résumé p. 4)

"... l'ADEME et le BRGM relancent début 2006 un programme de recherche dirigé vers les réservoirs dits «clastiques», qui privilégie notamment les couches argilo-gréseuses du Trias. Dans ce cadre, la Direction technique de l'ADEME à Sophia-Antipolis confirme son intérêt pour le projet de Bure." (p. 15)

Et après encore (voir document 53 : L. Drouot, Plénière CLIS 27/11/07 p. 5) :

"fin 2005... Nous avons par exemple du côté de l'ADEME... des gens qui m'avaient manifesté un intérêt explicite pour un projet de géothermie au Trias dans la région de Bure... C'est toujours vrai en 2006... Dans le cadre d'un partenariat avec le BRGM... l'ADEME demandait au BRGM de relancer son programme d'exploration de l'horizon du Trias"

Finalement au bout de 13 ans de présence, le forage se prépare. On est en 2007. L'étude CLASTIQ des ADEME/BRGM bat son plein. Il n'y a jamais eu autant de techniciens ADEME/BRGM qui se concentrent sur l'étude des grès profonds/très profonds pour leur contenu d'énergie géothermique, notamment dans le bassin de Paris.

Et qu'observe-t-on, ou plutôt n'observe-t-on pas ?

Il n'y a pas l'ombre d'un technicien BRGM ou de sa filière industrielle CFG Services, ou de l'ADEME pour la préparation des tests qui vont quantifier cette ressource. L'Andra qui se définissait incompétente 3 ans auparavant décide seule de tout dans les spécifications techniques. Elle décide par exemple qu'on va tester ensemble, dans un même sac, les grès du Buntsandstein avec l'ensemble argileux du Muschelkalk, c'est-à-dire qu'on arrêtera le tubage du forage au dessus de ces deux entités (voir pièce annexe 7 IV.a). Puis on fera des injections sur cet ensemble indivisible pour voir ce qui se passe (voir pièce annexe 7 IV.b). Pourquoi marier ensemble Buntsandstein et Muschelkalk ? Parce que, explique l'Andra, il n'y aura pas "de passées argileuses trop importantes pouvant créer des instabilités de trou lors de la phase 6" en boue à base d'eau." (voir document 84 : ST p. 120; voir pièce annexe 7 IV.a). L'explication est intrigante, mais il n'y en a pas d'autre.

Début 2008, arrivent les cahiers des charges rédigés par un maître d'œuvre, Egis géotechnique (qui a déjà assumé la maîtrise d'œuvre complète du centre de stockage des déchets TFA de l'Andra, à Morvilliers dans l'Aube), et qui énumère les noms des opérateurs sélectionnés. Il n'y a pas l'ombre du BRGM ou de CFG Services ou de l'ADEME, ni pour la maîtrise d'œuvre, ni dans les opérateurs.

La personne choisie pour la conduite des tests, sous le contrôle de l'Andra, est R.K. Senger de Intera Engineering Ltd (voir document 90 : CC p. 81, 83), un consultant canado-américain qui travaille sur le problème de l'enfouissement des déchets radioactifs, donc sur des roches de très faible perméabilité à moyenne profondeur, depuis les années 1980. Intera a développé un logiciel pour ce type de roches de très faible perméabilité avec le Sandia National Laboratories (qui a notamment la mission de surveiller la sûreté des armes nucléaires et l'enfouissement des déchets radioactifs militaires aux USA). L'outillage sera celui d'une PME suisse qui "est lourdement impliquée" (selon ses termes) avec l'Andra à Bure depuis que le Callovo-oxfordien a été atteint et qui n'a pas non plus l'habitude de travailler à cette profondeur (même la CNE en fera le constat : voir document 12, p. 14). Enfin, l'équipe a été complétée par des "petites mains" d'une entreprise familiale généraliste à l'histoire tourmentée, Saunier, et qui seront sous la responsabilité de l'intervenant de Solexperts (voir document 90 : CC p. 24). Il y a également le contrôleur du maître d'œuvre, Golder Associates, et l'Andra en tant que donneur d'ordres.

Un seul universitaire, l'IPG, a été sur place pour prendre son tour derrière cette équipe composite (voir pièce annexe 7 IV.c). L'IPG est-il inclus dans les 22 laboratoires dont parle la réponse de l'Andra ? En tout cas, il n'a pas l'honneur de figurer dans les références données par l'Andra à la fin de sa réponse du 18/01/13.

Les résultats de ces tests, on les connaît...

### III. Les laboratoires impliqués dans TAPSS 2000 reçoivent chez eux ou ne viennent que pour le conditionnement de leurs échantillons, sauf cependant pour la saumure du Buntsandstein échantillonnée en dehors de tout protocole

Les 9/10 ème de ces échantillons ont à voir avec le "schéma hydrogéologique régional"/programme de géochimie de la pile sédimentaire TAPSS pour comprendre le passé et prévoir le futur.

#### a) Carottes

C'est l'Andra qui fixe à 3 le nombre de carottes dans le Buntsandstein (9 + 8 + 2 m = 15% du Buntsandstein traversé) et à 2 dans le Muschelkalk (voir document 84 : ST p. 66). Dans ses critères, figure le facteur temps : "... un nombre d'échantillons... que l'on peut traiter dans des délais raisonnables." (voir document 84 : ST p. 65). C'est GEO-RS (SARL française créée en 1994), qui avait la charge du prélèvement et du conditionnement des carottes (voir document 90 : CC p. 51). C'est GEO-RS qui nettoie, fait le relevé géologique, photographie la carotte, tronçonne, identifie et seulement alors les labos de FORPRO, ceux venus jusque sur place, peuvent avoir leur échantillon contre signature et le conditionner comme ils le juge nécessaire. Sinon, c'est GEO-RS (voir document 90 : CC p. 148, 149) qui conditionne sous sac aluminium sous atmosphère azote et les échantillons sont envoyés aux laboratoires destinataires (au GIS à Nîmes, à Toulouse, à l'IPF...). Aucune des "équipes scientifiques travaillant sur ce programme... présentes tout au long de la réalisation de ce forage" (réponse Andra 18/01/13 p. 2/3, 3/3) n'a à voir avec la réalisation du forage. Ils interviennent pour l'emballage de leur(s) échantillon(s) pour certaines mesures très spécifiques.

"GEO-RS assure le transport de tous les échantillons (archivage et analyses) jusqu'à la carothèque Andra à Bure. Les échantillons pour analyses hors site, non collectés sur le chantier par les prestataires d'analyses, seront mis en caisse plastique et remis au responsable carothèque avec le bordereau pour l'envoi aux différents laboratoires extérieurs par l'Andra.", suit un tableau avec les adresses de 33 laboratoires. Mais certains laboratoires étaient alors prévus venir conditionner eux-mêmes leur(s) échantillon(s) (voir document 90 : CC p. 225 à 228).

#### b) Saumure, ce qui était prévu

Le prélèvement de la saumure des grès du Trias pour les équipes de géochimistes était prévu à la fin de pompages longue durée, eux-mêmes postérieurs au forage et postérieurs au remplacement de la boue du forage par de l'eau claire et pose d'une crépine :

*"L'objectif de ce pompage est de réaliser des prélèvements de fond au droit des venues d'eau identifiées dans le Trias... (...) ... Le premier critère retenu pour l'arrêt du pompage est la reproductibilité de deux logs géochimiques réalisés à 24 heure d'intervalle au moins... (...) Quand ce premier critère est atteint... au moins deux prélèvements sont réalisés pour analyse des majeurs dans les 48 heures... Si ces prélèvements ont pu être réalisés, les prélèvements finaux sont réalisés et le pompage est arrêté si les concentrations en majeurs sont stationnaires. (voir document 90 : CC p. 207).*

*"Ces pompages ont pour but d'obtenir des fluides les plus représentatifs possibles de la formation... (voir document 84 : ST p. 146).*

Pour cet échantillonnage prévu un titulaire de "suivi hydrochimique", IHR-GEOTER (qui ne devait arriver que pour les pompages après le forage), devait suivre la qualité du fluide et faire des sélections de lots très purs pour les analyses d'isotope de traces et de gaz, gardant les moins purs pour les majeurs (voir document 90 : CC p. 213). Pour en juger, il devait suivre les paramètres physiques de la saumure, ses cations principaux, son alcalinité (voir document 90 : CC p. 211). C'est ce titulaire qui devait faire la plupart des conditionnements, flacons, glacières, prélèvement sur site, sauf ceux très spécialisés (voir document 84 : ST p. 158 ; voir document 90 : CC p. 210, 211) qui pourront être réalisés par l'Andra ou le laboratoire demandeur (voir document 90 : CC p. 216). "Il pourra également [IHR] être sollicité pour des expéditions d'échantillons vers les laboratoires." (voir document 90 : CC p. 210). **"Les échantillons liquides seront**

*envoyés aux laboratoires (y compris aux laboratoires des partenaires scientifiques) par IHR. Les adresses d'expédition sont les suivantes...*" (suit : Hydroisotop en Allemagne, IRSN à Fontenay-aux-roses ; BRGM à Orléans ; GIS à Nîmes, IDES à Orsay, LSCE au CEA/Saclay; CNAB à Bordeaux; CAREN à Rennes ; voir document 90 : CC p. 223,24). Une bonne partie des laboratoires participant à TAPSS 2000 n'avait donc pas à mettre les pieds sur le forage pour la saumure. Quelques-uns devaient venir pour un conditionnement spécifique à leur spécialité de(s) échantillon(s) qui leurs ont été attribués.

### c) Saumure, ce qui s'est fait

Rien de tout cela n'a eu lieu (voir pièce-annexe 7 IV.d). L'unique prélèvement de saumure est celui de la séquence de ~ 8h du test n° 2 dans les grès à Voltzia. La saumure qui a été récoltée a du traverser le manteau de boue polymère de forage du pourtour de la crépine (fig. 5 de notre synthèse technique) passant dans la crépine "*remplie de boue solide jusqu'à proximité de son sommet*" qui elle même a du contenir longtemps de l'eau introduite pour forer (voir document 6 : SIS 2009, p. 13), et autres obstructions dans l'outil. La saumure entraînait vraisemblablement avec elle des grumeaux de cet amas de boue de forage dans la crépine, comme en laisse la trace les sauts de pression qui ne sont guère compatibles qu'avec des obstructions mouvantes du port d'entrée du capteur de pression. C'est la boue que l'Andra avait fait injecter qui ressortait (voir pièce annexe 3.V).

C'est l'équipe composite Solexperts-Intera-petites-mains de Saunier qui gérait :

*"Un volume total de fluide d'approximativement 35 m<sup>3</sup> a été retiré pendant RW avec une production d'approximativement 29 m<sup>3</sup> de fluide de formation." (SIS p. 59).*

Il n'y a pas ici de protocole de qualité. Il y a juste ces 2 phrases :

- "*slug ou pompage... avec prélèvement de fluides en surface par le prestataire "suivi hydrogéochimique"...*" ( voir document 84 : ST p. 141);
- dans le Cahiers des charges (voir document 90 : CC p. 103) : "*L'objectif... détermination des propriétés hydrauliques des formations gréseuses du Trias inférieur... et échantillonnage de fond de l'eau de formation pour analyses hydrogéochimiques. Pour cela, la conception du test inclura de préférence un test de pompage pour l'échantillonnage de l'eau.*" (voir document 90 : CC p. 103).

Ce n'est pas du tout cet échantillonnage là qui était prévu pour les 22 laboratoires dont parle avec générosité la réponse Andra du 18/01/13. Mais il n'y en aura jamais d'autre. La présence d'une pompe n'était même pas une obligation selon ces spécifications techniques et cahiers des charges ("*slug ou pompage*"; "*de préférence un test de pompage...*"). Vu la récupération précoce de cet échantillonnage là, et la suite d'imprévus ensuite, personne d'autre que l'opérateur Andra "*suivi hydrogéochimique*" (? , celui-là non défini car on est encore dans les spécifications techniques) ne pouvait être là pour le prélèvement de la saumure du pompage. Le test n° 3 n'était même pas encore fait (voir pièce annexe 7 IV.).

L'Andra a-t-elle fait mettre préventivement aussitôt quelques échantillons sous emballages spécifiques ayant son idée sur les événements qui allaient suivre ? C'est possible puisque les cahiers des charges prévoyant que la plupart des échantillons devaient être envoyés, quelqu'un sur place devait connaître le conditionnement adéquate et avoir les emballages correspondants. Mais l'Andra a pu aussi décider plus tard d'utiliser cet alors "*vieux*" échantillonnage qui attendait dans une ou des citernes au contact de l'air ambiant.

## IV. Les va et vient de la (des ?) chimie(s) de la saumure

Nous avons signalé dans la Pièce-annexe 3 III de la Mise en demeure que nous ne connaissons pas l'origine des deux valeurs différentes de salinité totale/TDS (Total Dissolved Solid) données par l'Andra : 120 ou 179 g/l pour la saumure du Buntsandstein. L'Andra nous répond le 18/01/13 (annexe p. 3/6) :

*"La forte valeur de la salinité de l'eau de formation (179 g/l) a été mesurée au bout de 8 h de pompage (35 m<sup>3</sup> extraits au cours du test n°2), ce qui garantit sa représentativité."*

De fait, ce qui est ressorti en premier, c'est la boue polymère de forage. Mais quand même lorsque l'Andra

annonce "120 g/l" en plénière du CLIS 4 mois après les tests, les 8 h de pompage sont finies depuis belle lurette. Par ailleurs les "35 m<sup>3</sup>", on l'a vu plus haut, incluent la boue de forage ressortie.

La seule publication dans laquelle nous avons trouvé des fragments d'une analyse est Rebeix et al 2011 (Document 118, tab. 1; pour la comparaison, on a remis en g/l à partir de mole/l en multipliant par la masse de l'ion) :

| Cl <sup>-</sup> | Br <sup>-</sup> | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | Na <sup>+</sup> | K <sup>+</sup> | Ca <sup>2+</sup> | Mg <sup>2+</sup> | ce total   |
|-----------------|-----------------|-------------------------------|-----------------|----------------|------------------|------------------|------------|
| 91 g/l          | 1,25 g/l        | 1,2 g/l                       | 45,5 g/l        | 2,2 g/l        | 6,7 g/l          | 3,5 g/l          | 151,35 g/l |

151,35 g/l, et comme il ne manque que les ions solubles mineurs et traces, on restera loin d'un TDS (que eux ne donnent pas) de "179 g/l" avec cette analyse là.

Une autre publication essentiellement Andra celle-là (voir document 97 : *Linard et al. 2011 p. 1459*) donne le "179 g/l" officiel sans justification et met seulement une concentration Cl<sup>-</sup> sur une figure (fig. 7) : > 3 mol/l (× 35,453) → > 106 g/l, ce qui est significativement différent de Rebeix et al ci-dessus (> 15 g/l).

"Dans le cadre de ce programme [TAPSS], 7 thèses ont été soutenues à partir de données provenant de ce forage..." dit l'Andra dans sa réponse du 18/01/13.

Prenons l'une des thèses citées. V. Barsotti (voir document 119 : *2011 p. 249*) rapporte que : "... les échantillons de roches qui nous ont été alloués..."; ce sont des extraits de carotte de 30 cm (*p. 155*). Ce n'est pas une thèse de géologie mais de microbiologie (traces d'ADN). Le résumé de cette thèse écrit notamment :

*"Cette communauté bactérienne inattendue, également retrouvée dans divers écosystèmes de subsurface ainsi que dans des biotopes extrêmes, pourrait provenir en partie d'une paléo-recharge de l'aquifère du Trias par des eaux froides dérivées de la fonte des glaces formées lors de la dernière glaciation du Pléistocène."*

Il s'agit de l'aquifère. Pour qui étudie les traces de vie qui peuvent s'y développer, sa composition chimique est donc très importante. C'est l'Andra qui a donné la composition de la saumure à la thésarde. Pour le niveau des grès à voltzia "salinité totale" (*p. 155*) : 180 g/l, "mesure sur les eaux souterraines (ANDRA)". On lui a aussi donné une composition de la saumure pour le niveau des grès vosgiens, test n° 1 : 120 g/l "approximation (ANDRA)".

Tiens ! revoilà donc le "120 g/l" dans une thèse de novembre 2011 du programme TAPSS 2000 avec comme examinateurs de thèse Maurice Pagel, Président scientifique du GNR FORPRO-II et coordinateur du programme TAPSS 2000, et Scott Altmann, ingénieur Andra. Là où la situation se corse c'est qu'en octobre 2008 en plénière du CLIS, l'Andra avait aussi annoncé "120 g/l", mais c'était non pas pour les "grès vosgiens" mais pour les grès à voltzia (test n° 2 ; voir document 91 : *annexe 14*) pour lesquels à la thésarde l'Agence a fourni la valeur de "180 g/l"... (voir document 119 : *p. 155*).

## V. Les scientifiques ignorent ce qui s'est réellement passé, exemple de l'hélium

Des résultats de mesure de l'hélium sont publiés par les équipes du CEA-Saclay (LSCE) et de Chimie Nucléaire de Bordeaux (CNAB) en collaboration avec un géochimiste de l'Andra mis en fin de liste. Ils écrivent (voir document 120 : *Fourré et al. 2011, p. 1514*) :

*"Lorsqu'on a foré sous le Dogger à la plate-forme C, il n'a pu être échantillonné qu'une venue d'eau rencontrée à une profondeur de 1880-1900 (le tubage du puits a prévenu le mélange avec les eaux souterraines du dessus)."*

On est déjà dans la confusion. Préciser que le tubage au fond du EST433 a prévenu le mélange avec les eaux

du dessus n'a de sens que pour les pompages longues durées sans obturateur. C'est bien ce qui était prévu (Pièce-annexe 7 Ib). Dans les faits, ce sont deux obturateurs en caoutchouc espacés de 25 m qui ont fait office de barrières. Il n'est pas évident que les auteurs qui donnent une hauteur en chiffres arrondis sur 20 m le savent puisque les équipes de TAPSS avaient du être informées au départ de ce qui allait être fait avec les pompages longues durées (voir document 90 : CC p. 211, mis en gras par nous) :

*"Des prélèvements de fond au niveau des différentes venues d'eau repérées (par température, conductivité et analyse des diagraphies) dans le Trias..."*

Aussi, "le tubage du puits a prévenu le mélange avec les eaux souterraines du dessus..." de Fourré et al. aurait été relatif puisque s'il n'y avait peut-être pas de venues d'eau au dessus de la série gréseuse, il y avait une roche argileuse qui s'effritait... (voir pièce annexe 7 IV.).

Visiblement ces équipes là n'étaient pas "présentes tout au long de la réalisation de ce forage" (Réponse Andra du 18/01/13 p. 2/3, 3/3). C'était prévu ainsi dans les Cahiers des charges (voir document 90 : CC p. 223, 224) même si les pompages de longues durées avaient pu avoir lieu : "Les échantillons liquides seront envoyés aux laboratoires... par IHR. Les adresses d'expédition sont les suivantes..." avec dans cette liste le LSCE au CEA/Saclay et le CNAB à Bordeaux auteurs de cet article.

En 2003, une lettre publié dans la revue internationale "Nature", utilisait une mesure d'hélium de l'eau du Dogger du forage Andra MSE101 proche du EST433. Elle la comparait à l'hélium contenu dans l'eau du Buntsandstein dessous. Mais comme c'était avant la loi qui a imposé Bure, et que l'Andra refusait alors de faire un forage au Trias inférieur (voir pièce annexe 1), Marty et al. 2003 (voir document 121) avaient du aller chercher le contenu hélium de l'eau du Buntsandstein "un peu plus loin", sous le triangle Vittel-Baccarat-Nancy. Le rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  là-bas est très différent de celui dans l'eau du Dogger à Bure (facteur 10), grosse différence sur laquelle ils tissaient tout leur raisonnement à une mega échelle (vitesse des eaux dans le quart Nord-Est de la France, remontée d'Hélium du manteau terrestre...). Et leurs conclusions ont été mises comme référence dans le "Dossier 2005 Argile" (voir document 43 : II déc, p. 151) bien que l'Andra soit plutôt bien placé pour savoir que Marty et al. 2003 n'avaient pas d'information sur le Trias sous la zone de transposition.

La mesure de Fourré et al (voir document 120 : tab. 2) est le contraire du postulat Marty et al. 2003 : la valeur du rapport  $^3\text{He}/^4\text{He}$  de l'eau du Buntsandstein sous Bure est à peu près la même que celle de l'eau du Dogger sous Bure. Eux aussi font des interprétations à une méga échelle (quart Nord-Est de la France, Manteau terrestre). Mais ils regrettent que (voir document 120 : p. 1517) "seulement un seul échantillon d'eau de la formation du Trias ait pu être échantillonné... ce qui limite la portée de toute interprétation."

Auraient-ils un doute sur sa représentativité ? Quel échantillon de saumure leur a-t-on envoyé ? celui à "179 g/l" ?, celui à "120 g/l" ? ou celui intermédiaire analysé par Rebeix et al. 2011 ? Combien de temps cet échantillon a-t-il attendu dans des citernes si c'est le cas ? etc.

Normalement les échantillons pour l'hélium sont échantillonnés sous pression directement à l'arrivée du fluide aussi pur que possible en haut du forage. Leur contamination par l'air doit être absolument évitée. Leur analyse suite à une extraction/purification complexe et très lourde techniquement se fait sur des quantités infimes. On est toujours étonné de voir le nombre de laboratoires qui ne font que ce genre de mesures extrêmement couteuses sur des traces infinitésimales quand 4 ans et demi après un forage à 2000 mètres fait juste pour ça, on ne connaît même pas la salinité de la saumure...

## Pièce annexe 10

### Sur les autres affirmations de la réponse de l'Andra du 18/01/13 dans l'ordre de leur première apparition

□ **Pa-1**, p. 2/3 et annexe p. 2/6 : "*Désormais l'article qui fait référence sur le sujet...*" (géothermie sur la limite Haute-Marne/Meuse) : voir pièce annexe 8.

□ **Pa-2**, p. 2/3, 3/3 et annexe p. 4/6, les : "*Le programme d'échantillonnage, de diagraphies et d'essais in situ spécifique à ce forage a été établi en lien avec un groupement de 22 organismes de recherche*", "*Les équipes scientifiques travaillant sur ce programme ont été présentes tout au long de la réalisation de ce forage*". Mais aussi, annexe p. 4/6 : "*Caractériser les formations profondes (Lias et Trias), tant du point de vue de leur impact sur les transferts globaux que de leur potentiel géothermique. Ce forage (...) 22 laboratoires y ont participé*" : voir pièce annexe 9.

□ **Pa-3**, annexe p. 1/6 : "*Prétendre... qu'il y aurait eu, volontairement, une injection de boue...contre vérité que des hydrogéologues responsables n'admettraient pas.*" : voir pièce annexe 7 III.c et relire les preuves techniques dans la pièce annexe 3 V.

□ **Pa-4**, annexe p. 1/6 : "*La dégradation des polymères avant test hydrauliques ne se fait que lorsque la formation testée est dure... Les exemples donnés par les associations...*"

La dégradation des polymères n'est qu'une méthode parmi d'autres pour qu'il n'y ait plus de boue de forage dans l'intervalle pour commencer les tests hydrauliques. Pour cela, le BRGM faisait mettre très peu de polymères lors du forage lorsqu'il arrivait à l'aquifère (le fluide de forage était alors surtout une saumure), et du type biodégradables, ils étaient attaqués à l'acide et le puits "dégorgé" à l'air lift qui est aussi en soi une méthode de nettoyage. Le Dogger aquifère est oolithique, donc lui-même une sorte de grès calcaire et facilement attaqué par l'acide.

Mais on peut tout simplement faire partir la boue en injectant de l'eau claire avec le seul obturateur inférieur gonflé. Après discussion avec l'Andra, l'*expert* du CLIS avait lui même rapporté la recette en plénière (voir document 10 : p. 18). Géoservices l'a fait pour l'Andra avec succès le temps du test sur le Callovo-oxfordien friable (voir pièce annexe 7 II.a) et c'est bien en parlant de roche argileuse les plus fragiles que ce nettoyage était décrit comme indispensable par les hydrogéologues de l'Andra (voir document 9). L'Andra a bien fait réaliser cette opération de "rinçage" en en-tête du test n°2, mais cette fois-là avec de... la boue (voir pièce annexe 7 III.c et pièce annexe 3 V). Le puits EST433 devait lui-même être lavé à l'eau claire avant l'étude/pompages longue durée du Buntsandstein selon les spécifications techniques et cahiers des charges et la présente discussion n'a pas lieu d'être (voir pièce annexe 7 I.a et b). A Schafisheim, le Buntsandstein grésoconglomératique épais de 12 m a été testé pendant une dizaine de jours à l'eau claire ensemble avec avec 10 m de socle granitique sous-jacent et les interprétations sont rapportées excellentes, évidemment sans aucun problème d'obstruction (voir document 8 : p. A36-A38).

□ **Pa-5**, annexe p. 2/6 : "*La valeur de transmissivité de l'ordre de  $10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s a été estimée de manière concordante en utilisant à la fois des techniques analytiques classiques (diagramme de Horner)...*" : Faux. La valeur  $1,1 \cdot 10^{-3}$  a été obtenue par combinaison de deux simulations numériques, une sur diagramme cartésien, une sur diagramme log-log, relire notre pièce-annexe 3 VI. Lorsque les opérateurs utilisent le modèle analytique de Horner, ils obtiennent  $1,56 \cdot 10^{-3}$  m<sup>2</sup>/s soit une valeur 50 % supérieure (Document 6, SIS 2009, p. 81).

□ **Pa-6**, annexe p. 2/6 : "*Toutes les interprétation conduites par l'Andra ont intégré les caractéristiques des fluides en place...*" : Faux. Nous démontrons sur les chiffres du rapport des opérateurs que la saumure chaude et salée a été modélisée comme de l'eau pure à température ordinaire (voir pièce annexe 3 IV.b).

□ **Pa-7**, annexe p. 2/6 : "... les associations extrapolent de façon hasardeuse cette valeur sur une épaisseur

*de formation non fondée sur des données géologiques, et anticipent un débit permanent considérable avec un rabattement de 30 m."*

Pour les 44 m nous citons à la lettre la description de la Synthèse 2009 de l'Agence qui n'est qu'une lecture du Log de forage ce qui produit 190 m<sup>3</sup>/h pour un rabattement de 30 m (voir pièce annexe 3 II.b). Vu qu'il reste encore 93 m, le double, de roche gréseuse à eau "libre", il faut bien admettre que le résultat est forcément nettement plus fort : "*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, p. 14).

□ **Pa-8**, annexe p. 2/6 : "*Comme le note le BRGM dans son rapport sur le potentiel géothermique du Trias clastic du Bassin de Paris... grande variabilité spatiale des faciès*" : et le BRGM 2008 (voir document 54 : fig. 18) est en harmonie avec le BRGM 1979 (voir document 16 : carte S4) sur la disposition du "golfe" d'apport des grès du Buntsandstein. Bure est l'endroit optimal pour la géothermie du quart Nord-Est de la France (fig. 1 de notre "Synthèse technique" ensemble avec la fig. P4-1 de la pièce annexe 4), sans même avoir pris en compte les 2800 m de Permien.

□ **Pa-9**, annexe p. 2/6 : "*... modèle de Horner est en général complétée par l'utilisation de modèles numériques plus sophistiqués... analyse plus fouillée... (...) Le résultat obtenu est plus robuste que la simple utilisation du modèle de Horner*" (mis en gras par l'Andra).

Bien sûr, ces modèles sont maintenant utilisés d'autant qu'ils sont indispensables pour les roches très peu perméables. Malheureusement il faut rentrer les valeurs mesurées de pression autant que celles de débit, ce qui est impossible pour la seule séquence rescapée des tests, le port d'entrée du capteur de pression étant visiblement obstrué (voir pièce annexe 3 VI.). Le modèle de Horner n'utilise que le débit et, s'il n'est pas réputé pour sa précision, il l'est par contre de manière indiscutée dans la littérature pour sa "robustesse" ce qui ne date pas d'hier. Avec un test aussi désastreux, l'honnêteté est surtout de prévenir que tous les résultats sont à prendre avec beaucoup de prudence.

- "*test... modèle d'écoulement composite...*" [i.e. avec plusieurs anneaux de perméabilités différentes] : Exact et c'est la première fois que l'Andra en parle vu qu'elle avait omis de mentionner la boue (sachant qu'en numérique il faut donner une épaisseur à un anneau théorique de boue, épaisseur qui ne peut être qu'arbitraire). Le modèle de Horner a aussi son propre système, imparfait également, le facteur de pellicule, paramètre essentiel dont les associations ont fait connaître pour la première fois à Bure l'existence et la valeur *exceptionnelle*.

- A quoi sert d'avoir un modèle "*sophistiqué*" pouvant faire des "*analyses de sensibilité*" sur la "*salinité*" si c'est pour modéliser la saumure chaude comme de l'eau à température ambiante comme cela a été fait ? (Pièce-annexe 3 IV.b et Point Pa-6 ci-dessus).

□ **Pa-10**, annexe p. 2/6 : "*... l'horizon inférieur plus argileux ayant une porosité libre plus faible, et donc une transmissivité plus basse (test n°1 2 10<sup>-4</sup> m<sup>2</sup>/s).*" : L'Andra a fait abandonner le test n°1 complètement bouché. La diagraphie indique au niveau des "grès vosgiens" une proportion d' "eau libre" qui est à peu près les 2/3 de celle du niveau des "grès à Voltzia". Sa perméabilité est attendue *a priori* inférieure à celle des "grès à voltzia". C'est une indication rapide très utile mais aussi très indirecte et seuls des tests hydrauliques, qui font effectivement bouger l'eau, diront ce qu'il en est réellement. Le niveau est attendu aquifère vu que : "*la porosité et les teneurs en eau libre sont régulières et moyennes...*" rapporte GEO-RS le chargé géologique de l'Andra (voir document 63 : 2008 p. 37). L'Andra divulgue volontairement de nouveau comme acquis un chiffre (différent de tous ceux qu'elle a donné jusqu'alors), qu'elle sait ne pas avoir de valeur scientifique. Le contrôleur a réfuté la validité d'une analyse de ce test n°1 (voir document 11 : *Egis-géotechnique 2008, p. 6*) : "*Nous ne sommes pas d'accord avec l'affirmation que le test T1 a produit des réponses en pression qui convenaient pour la détermination des propriétés hydrauliques de la formation.*".

☐ **Pa-11**, annexe p. 3/6 : Température.

- Effet des glaciations : "*travaux les plus récents... Marjorowicz... qui montre que le site de Meuse/Haute-Marne se situe dans une zone où la correction à apporter est parmi les plus faible d'Europe continentale.*" : Ah oui ? et c'est quoi cette correction ? : il est écrit deux fois dans la même page de l'article qu'elle "*dépend principalement de la profondeur à laquelle le flux de chaleur a été calculé.*" (Document 86, p. 885). Dans les pays Baltiques de socle où les forages sont peu profonds, il faut beaucoup corriger, mais peu dans le bassin sédimentaire de Paris où les forages pétroliers sont déjà assez profonds. Bis repetita pour le flux, comme pour le "gradient géothermique" de 2,3 °C/100m du "Dossier 2005 Argile", l'Agence fait passer pour phénomène géologique ce qui dépend principalement de la profondeur de mesure (voir déjà Commentaire technique, Point V-6).

- L'Andra nous accuse de "*raccourcis et extrapolations très discutables*" (annexe p. 3/6) parce qu'on ne rentre pas dans des considérations de conductivités thermiques de la pile sédimentaire. Rappelons déjà que la conductivité thermique est des W/m·°C (ou °K) et non pas des W/m<sup>2</sup>·°C comme il est imprimé dans la Réponse de l'Andra. Un calcul qui utilise les conductivités thermiques avait été fait par l'Agence dans son rapport spécifique de prévision pour la géothermie à Bure en 2004 (voir document 35 : *annexes p. 29, 30*). Basé sur le forage HTM102, il prédisait à 1484 m une température donnée d'une très grande précision, "47,69°C" d'où un gradient global moyen de "2,54°C/100 m" ce sur quoi s'appuyait aussi l'Andra pour dire qu'on était à un endroit du monde au gradient géothermique particulièrement faible.

Sur quoi repose ce calcul réalisé sur 21 couches sédimentaires ? il repose uniquement sur l'écart de température entre sommet et base du callovo-oxfordien et sur celui entre deux niveaux du Dogger, avec les épaisseurs correspondantes. De là on calcule deux gradients (écarts de températures ÷ épaisseurs) puis deux flux (Flux = gradient × conductivité), puis elle a prise la moyenne de ces deux flux ≈ 54,6 mW/m<sup>2</sup>. De là, avec des propriétés thermiques moyennes issues de la littérature elle a répercuté en dominos aux niveaux suivants jusqu'à 1484 m avec la même petite équation ("*marnes gréseuses*" de conductivité 2 : gradient =  $54,6 \cdot 10^{-3} \div 2 = 2,73 \cdot 10^{-2} \text{ °C/m}$  d'où calcul d'augmentation de la T° vu son épaisseur et ainsi de suite). Ne pas jouer à ce petit jeu de dominos étant qualifié de "*raccourcis et extrapolations très discutables*", nous déduisons que l'Andra juge qu'elle a produit là un "développement et vérité indiscutable".

Ce joli calcul repose totalement sur les 4 chiffres de départ qui venaient de profondeurs de 300 à 600 m. Et si l'Agence a été obligée de faire ça pour trouver une température "estimée" au Buntsandstein c'est parce qu'elle avait fait stopper le forage 600 m avant de l'atteindre. Sans quoi, on aurait eu la température dans le forage tout simplement et on aurait évité 14 ans de polémique et beaucoup de mensonges puisqu'en réalité le gradient à ce HTM102 avait été mesuré de 3°C/100 m à 1100 m dès le forage (voir Pièce-annexe 2 I). Le calcul n'était qu'un leurre pour tromper l'ennemi. Les "*travaux les plus récents... Marjorowicz...*" (Document 86, figure 4 et 5) cités par la réponse de l'Andra mettent un flux ~ 125 mW/m<sup>2</sup> là où on trouve Bure. C'est le double de celui du calcul ci-dessus de l'Andra.

Ce qu'on veut tout simplement est la température mesurée dans la couche géothermique. Rien ne pourra l'invalider ! Et si pour des raisons techniques *exceptionnelles* ça n'était pas possible, il faudrait alors pour jouer aux dominos que soit fournies plusieurs mesures de températures à plusieurs profondeurs précises, de préférence pas trop loin de la cible. Or :

- L'Andra a fait réaliser en mai-juin 2008 un forage jusqu'à 1980 m TVD (True Vertical Dept; Pièce-annexe 3 I) mais elle ne fournit en janvier 2013 qu'une donnée (66°C) à une profondeur de 1875 m. A propos..., de quel type de profondeur s'agit-il ? Il s'avère que c'est une profondeur forage (Document 64, scb2009-02\_est433\_combined\_psp.pds, 2ème log) et qui correspond à ~ 1859 m TVD (Document 66). Et l'Agence ne donne pas la nature de la roche au niveau de la mesure (quelle conductivité thermique ?). Pourtant selon sa logique, la ressource géothermique est de nature rocheuse différente et située plus bas que cette mesure et il est impossible de faire le petit calcul en dominos qu'elle semble exiger si on a qu'un chiffre. Quatre ans auparavant en plénière du CLIS (Document 91, p. 38 et annexe 14) l'Andra ne donnait déjà que un chiffre "dit" issu de la chambre du test n°2 donc à la profondeur médiane de 1874 TVD (voir pièce annexe 3 I.). La surprise est que c'est exactement le même, 66°C, que celui qu'elle donne dans sa réponse du

18/01/13. Nous laissons à l'Agence le soin d'expliquer au pays si cela est dû à un "*biais des conductivités thermiques des roches*", ou du à un gradient géothermique nul (0°C/100 m) entre 1859 et 1874 m TVD, ou encore si en février 2009 le gradient géothermique n'était plus le même qu'en juin 2008.

- L'Andra a gardé pour elle seule les données de la diagraphie continue de température réalisée en fin de forage jusqu'à 1980 m TVD (voir fin de pièce annexe 5). Ainsi le pays à qui l'Agence a jeté en pâture un unique "*66°C à 1875 m*" ne risque pas plus de connaître les ondulations de gradient du au "*biais des conductivités thermiques des roches*", que l'évolution due à l'empreinte thermique des glaciations (voir Commentaire technique, point V-6), et beaucoup plus simplement il ne peut pas connaître la température qui a été mesurée à 1980 m TVD dans le forage Andra, même si cette température ne pouvait être encore à l'équilibre thermique (il existe des méthodes de correction).

- La longue tirade monobloc qui suit, avec son passage original en gras, travaille donc à tromper le(a) lecteur(rice) en organisant une bouillie de chat entre nature des roches et profondeur, en se défaussant sur "*la conductivité thermique des roches*" de 6,5 ans de mensonges, le tout en ne donnant que un chiffre unique sans même préciser la couche. Elle travaille à faire oublier qu'elle donnait ces gradients en parlant de géothermie en profondeur et omet l'apogée : le 2,3°C/100 m comparés aux mesures pétrolières profondes du "Dossier 2005 Argile" (cf. Pièce-annexe 2 II).

Cette tirade est pour nous assez effrayante en provenance de l'organisme à qui on a confié la charge technique d'un stockage définitif dans le Bassin de Paris de la deuxième pile de radioactivité du monde :

*"De façon générale, les écrits des associations ne font pas du tout référence à cette notion de flux de chaleur terrestre, et à son lien avec les gradients géothermiques par le biais des conductivité thermiques des roches. Il en résulte certains raccourcis et extrapolations très discutables. **La conductivité thermique des roches sédimentaires pouvant varier de 1,3 (formations très argileuses) à 5 W/m²/C (formations salifères), le gradient géothermique moyen peut varier en un même lieu suivant la profondeur des forages réalisés. C'est pourquoi, dans le cas du site de Meuse/Haute-Marne, le gradient géothermique moyen a varié de 2,5 - 2,7°C/100 m dans les forages de 700 m de profondeur au maximum à 3°C/100 m dans le forage EST433 à 2000 m.**"*

- La phrase (annexe fin de p. 3/6) : "*Les données acquises lors de ce forage sont donc le résultat de mesures fiables et d'interprétation robuste. Elles ne sont d'ailleurs pas contestées par les associations*", n'engage que celle qui l'a écrite. A partir des données que nous avons pu rassembler et par une méthode classique, nous avons produit un calcul provisoire d'un gradient de 3,07°C/100 m à 1921 m TVD, celui-là valable au milieu de la ressource géothermique Trias (voir pièce annexe 2 III. et son annexe ; pas besoin de jouer aux dominos). C'est plus près de 3,1 que de 3,0 et témoigne de l'augmentation apparemment progressive du gradient avec la profondeur jusqu'à au moins 1921 m (voir Point V-6 du Commentaire technique) ce qui est quelque chose d'attendu (voir document 61 : c'est ce que montre l'équation simplifiée éq. 2.13 (7), p. 85 quand on l'applique).

□ **Pa-12**, annexe p. 4/6 : L'Andra indique de manière chiffrée un gradient thermique qui "*peut*", pour elle, être affecté de l'adjectif *exceptionnel* :

*"une ressource à 30°C à 300 mètres de profondeur peut... être considérée comme exceptionnelle..."*

C'est un gradient géothermique de  $[(30 - 10) \div 3] \approx 6,7^\circ\text{C}/100 \text{ m}$ . Même dans le graben d'Alsace, l'anomalie thermique positive sub-circulaire  $30 \times 35 \text{ km}$  près d'Obernai sélectionnée par le BRGM dans CLASTIQ, et de très loin la plus forte valeur de toute l'étude CLASTIQ, n'atteint pas cette valeur (moyenne 5,5, voir document 122 : p. 3 et fig. 4). La géothermie de faible et moyenne température (40 à 150 °C) de par le monde est et sera donc, on peut presque dire par définition, presque toujours exploitée sur des zones dont le gradient thermique n'est absolument pas *exceptionnel* selon une définition interne officieuse de l'Andra (à commencer par le Dogger parisien).

□ **Pa-13**, annexe p. 4/6 : "... grès du Buntsandstein... son caractère argilo-gréseux peut fortement influencer sur

*la productivité réelle d'un ouvrage sur plusieurs dizaines d'années (développement de puits plus difficile, production de fines à maîtriser)." : Les grès "argileux" sont un autre leitmotiv de l'Andra (voir pièce annexe 7 II.b). Si le "caractère agilo... peut fortement influencer sur la productivité réelle", alors l'Agence savait exactement ce qu'elle faisait en laissant hors tubage 90 de roche argileuse pour moitié friable... (voir pièce annexe 7 IV.). Pour ce qui est des séries gréseuses, les pétroliers ont des techniques pour supprimer les baisses de perméabilités (voir pièce annexe 7 I.a, "sand management").*

□ **Pa-14**, annexe p. 5/6 : "*La forte salinité naturelle de l'eau de l'aquifère (179 g/l)...*" : C'est un paramètre très important pour le "schéma hydrogéologique régional". Il a permis de mettre en évidence des liens entre aquifères dans la région parisienne alors que sur ce sujet, le site de Bure a été choisi à l'aveugle (voir pièce annexe 1 VI.). Pour ce qui est de la géothermie sur des saumures de grès profonds nos voisins européens savent gérer (voir pièce annexe 1 I.) et le BRGM en attend l'opportunité (voir pièce annexe 4 II.). A propos, l'Andra est-elle si sûre de cette "salinité naturelle" de "179 g/l" ? (voir pièce annexe 9 IV.).

□ **Pa-15**, annexe p. 5/6 (nous mettons en gras) : "*Mais surtout, le facteur qui détermine l'intérêt de la ressource est le niveau de risque sur la ressource attendue... la variabilité des faciès dans les grès clastiques rend hasardeuse la ressource potentielle à chaque forage...*".

S'il se trouve à Bure des déchets nucléaires entre la surface et la ressource géothermique et dont la mémoire est oubliée (que faisait-on en Meuse il y a 3257 ans ?), avertir d'un "risque"... "hasardeux" pendant de nombreuses dizaines de millénaires est une sacré problématique, sans parler de la triste contrainte de ne plus pouvoir toucher au sous-sol. Sans ces déchets le prospect énergétique de la "zone de transposition" peut difficilement être plus excellent puisque le forage EST433 a confirmé que la transmissivité est "bonne" avec un petit bout de 25 m de l'aquifère, qu'il y a encore de la réserve dans le Trias avant de toucher à la série gréseuse permienne plus chaude, illimitée avec ses 2800 mètres.

De leur côté les relevés géophysiques :

*"...indiquent que les mesures enregistrées à la base du Trias par le forage EST433 ne correspondent pas à une anomalie locale (fracturation, zone montrant une porosité anormalement élevée ou basse, ...) et peuvent être extrapolées à une vaste zone autour du forage. Les données acquises dans ce forage dans les formations du Trias inférieur paraissent donc représentatives de la plus grande partie de la zone de transposition (BEICIP, 2008)." (voir document 5 : Andra 2009, p. 109)*

□ **Pa-16**, annexe p. 5/6 : "*Les associations assimilent abusivement ressource géothermique et productivité en eau de l'aquifère*" : cette réponse semble avoir été écrite évasivement avant que la pièce annexe 4 I.b et c de notre mise en demeure ait été lue.

□ **Pa-17**, annexe p. 5/6 : "*La CNE dans ce même rapport n°4 de juin 2010 aboutit aux mêmes conclusions : «Le Trias dans la région de Bure ne représente pas une ressource géothermique potentielle attractive dans les conditions technologiques et économiques actuelles»"*.

La CNE n'aboutit en aucun cas "*aux mêmes conclusions*" et l'Andra ne se sent pas engagée par ce qu'écrit la CNE, la preuve :

- la CNE écrit en juin 2010 (on met en gras ces petits mots porteur d'un message particulièrement direct dans son langage si diplomatique) : "*réalisé dans les règles de l'art à des fins de captage d'eau permettrait d'atteindre sans aucun doute des performances bien supérieures.*" (voir document 12 p. 14). L'Andra imperméable n'en continue pas moins jusqu'à sa mise en demeure fin 2012 de présenter la ressource avec le 5 m<sup>3</sup>/h (voir point V.1 du Commentaire technique) ;

- c'est encore la CNE qui donne la valeur moyenne des transmissivités des exploitations du Dogger : 1 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s d'où il ressort immédiatement qu'elle est déjà atteinte par la seule transmissivité officielle du test n° 2 : 1,1 10<sup>-3</sup> m<sup>2</sup>/s. Cela garantit une transmissivité allègrement supérieure de l'ensemble du Trias inférieur sous Bure. La CNE n'écrit pas cette déduction cependant, c'est au lecteur(riche) de le faire (autre "indice" que donne la CNE : "*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." !)*

- la CNE recommande en juin 2008 qu'on ne rebouche pas ce forage (voir document 14 : p. 28) et l'Andra annonce 4 mois plus tard qu'elle le rebouche (voir pièce annexe 7 IV.d).

Car la phrase CNE citée par l'Agence : "... *technologiques et économiques actuelles*" est ensuite développée : "*Cependant cette considération repose plus sur la modestie de la température et l'incertitude qui demeure sur les possibilités de réinjecter l'eau que sur la productivité de l'aquifère du Trias inférieur dont il n'est pas pour l'instant démontré qu'elle soit inférieure à celle constatée dans les installations géothermiques au Dogger existantes dans le centre du Bassin parisien.*" (voir document 12 : p. 15).

- Cette dernière mise au point est de nouveau un désaveu cinglant au critère majeur/leitmotiv de l'Andra : le 5 m<sup>3</sup>/h (cf. Point V-1 du "Commentaire technique").

La CNE est composée de 13 personnes d'horizons très différents (un hydrogéologue et un pétrolier, mais aussi un économiste, un sociologue, un diplômé de sciences-Po/administratif...) et de positions très différentes vis à vis des industries nucléaires (un métallurgiste du Cons. Sc. de la DAM/haut Commissaire CEA, le Directeur de "l'Andra suédois", un retraité Autorité de sûreté nucléaire allemande/AIEA/conseil scientifique EDF, un chimiste des actinides du cabinet du Haut Commissaire du CEA...). Elle emploie une phraséologie hautement diplomatique puisque chaque membre doit donner son accord pour chaque mot. Gardant ce fonctionnement en tête, on remarque alors que l'expression employée : "*productivité... il n'est pas pour l'instant démontré qu'elle soit inférieure... Dogger existantes*" n'est pas fautive pour une productivité qu'un peu plus de recherche montre être à priori le triple de celle des installations du Dogger comme l'indique le calcul (voir pièce annexe 4 I.a). On a vu plus haut que la CNE donne le chiffre et les remarques qu'il faut pour démontrer qu'il y a mieux à Bure qu'au Dogger.

- Le rapport CNE ne cite que le chiffre d'une température de 66°C donné par l'Agence. La valeur provisoire de température calculée dans notre Mise en demeure, 69°C non contestée par la réponse de l'Andra, est 5 à 6 % inférieure à celle de la moyenne des doublets parisiens (~ 72,8 °C, voir pièce annexe 4 I.). Et dessous à Bure, toujours en série gréseuse on a encore 2800 mètres à priori en partie perméables, jusqu'à une température qui doit excéder 150°C. La CNE ne parle pas du Permien.

- Jamais, l'Andra n'a parlé de "... *l'incertitude qui demeure sur les possibilités de réinjecter...*" puisque pour cela il aurait déjà fallu reconnaître que la productivité en soi se prête à l'exploitation. Si la CNE s'occupe du problème de la réinjection, c'est qu'elle a reconnu d'abord que la ressource est là en terme de productivité (i.e. celui des deux forages qui a la charge de tirer l'eau). Elle passe alors à l'étape suivante de l'évaluation. La CNE donne la source de son raisonnement dans un long paragraphe (voir document 12 : les 11 lignes en bas de p. 14) : les données françaises : "*une expérience faite à Melleray au nord d'Orléans dans le Trias s'était semble-t-il soldée par un échec dans les années 1980.*", parle un peu du fait qu'il va bien falloir s'en préoccuper si on veut réinjecter du CO<sub>2</sub>, et conclue "*la faisabilité ou non de la réinjection ne peut donc à l'heure actuelle pas être considérée comme démontrée.*". La phrase citée par l'Andra "*ne représente pas une ressource attractive... dans les conditions technologiques et économiques actuelles.*" est donc expliquée. Ce que la CNE apparemment ignorait, c'est qu'au contraire du seul exemple français qu'elle cite, de l'autre côté des frontières, la réinjection de saumures géothermiques dans des grès profonds **est** maîtrisée au Danemark et Allemagne depuis plus de deux décennies (voir pièces annexes I-I et 4-II et/ou par ex. les documents 18 et 19 : *Mahler 1995 ; Mahler et Magtengaard 2010*). Mais même en restant sur la France, la CNE a failli en ne mentionnant pas la grande étude CLASTIQ des ADEME/BRGM de 2006-2008 (voir pièce annexe 4) qui cite bien sûr les danois et allemands et n'est autre qu'une première étape de la préparation à faire de même en France là où des grès profonds existent.

Il n'est pas un hasard que l'Andra avait programmé de tester la réinjectivité dans les grès du Buntsandstein (voir pièce annexe 7 I b.). Mais en continuité de sa négation de la ressource, on voit aussi comment elle comptait s'y prendre pour aboutir à un échec certain si elle avait été jusque là (voir pièce annexe 7 IV.b).

☐ **Pa-18**, annexe p. 5/6 : "*Enfin, il ne faut pas oublier... la géothermie... une énergie locale, à consommer sur place...*" : remarque de bon sens qui avait amené un journaliste de l'Est-Républicain de Bar le duc à titrer son article sur la géothermie à Bure (12/06/12) avec : "La géothermie ne se déplace pas contrairement aux déchets". Le Permien plus chaud offrirait ensuite en plus le choix de faire un peu d'électricité si on le souhaite (voir pièce annexe 4 IV.). Et lorsque le Guide de Sûreté/RFS indique qu'il ne doit pas y avoir d'intérêt particulier du point de vue de la géothermie, cette contrainte doit être justifiée pour des centaines d'années.

# Bibliographie générale

## Dossier technique géothermie Bure

### Documents techniques :

- **Document 1** => Groupe "Goguel" 1987 : "Stockage des déchets radioactifs en formations géologiques - critères techniques de choix de site", juin 1985-mai 1987, Rapport du groupe de travail présidé par le professeur Goguel, mais au final par P. Candès du CEA. Ministère de l'Industrie, des P. & TL. et du Tourisme: 63p. puis 9 annexes: p. 65-227.
- **Document 2** => RFS n° III.2.f, 10 juin 1991, "Stockage définitif de déchets radioactifs en formation géologique profonde", Service central de Sûreté des installations nucléaires, Journal officiel de la République française, fascicule 1606.
- **Document 3** => ASN 2008, "Guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde", Autorité de Sûreté Nucléaire, 12 février.
- **Document 4** => Mourot, A. 2002, "Lorraine-Champagne Ardennes - Bure et la Règle Fondamentale de Sûreté", polycopié 7p. et 7 cartes annexes, décembre, présenté et déposé au CLIS dont l'Andra est membre de droit.
- **Document 5** => 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.
- **Document 6** => 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
- **Document 7** => BRGM 1983, "Opération géothermique de Garges-les-Gonnesse - Spécification techniques détaillées - Plan d'exécution des ouvrages (2è Partie)", rapport 83 SGN 409 GTH, juin, 87p. et 3 planches dont le Log.
- **Document 8** => 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.
- **Document 9** => Delay, J. - Aranyossy, J-F. 1994, "Les mesures hydrogéologiques dans les forages de reconnaissance des sites potentiels pour le stockage géologique des déchets radioactifs", Hydrogéologie n°4: 53-62.
- **Document 10** => CLIS 2007, "Réunion du Comité Local d'Information et de Suivi à Montiers sur Saulx", 27 novembre.
- **Document 11** => Egis-géotechnique (Golder Associates) 2008, "Lot D09 - Maitrise d'œuvre du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 (RTZ) - Rapport de contrôle scientifique Tests entre obturateurs EST 433 Trias - Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne"; émission provisoire 16/07/08, définitive sans correction 24/07/03; Préambule de 8 lignes en français puis texte en anglais; Rapport Andra D RP OSCA 08 0040, 9p.

- **Document 12** => CNE, juin 2010, "Rapport d'évaluation n°4", tome 2 : Annexes scientifiques et techniques, Annexe 3 : "Évaluation du potentiel géothermique au Trias".
- **Document 13** => Andra 2010, "Expérimentation MHS - Synthèse annuelle 2009 des mesures hydrogéologiques de surface - Centre Meuse Haute-Marne", 4 mai, tome 1: 254p.; t.2 "Historique techniques": 433p.
- **Document 14** => CNE, juin 2008, "Rapport d'évaluation n°2".
- **Document 15** => Bataille, C. 2003, "Mission de médiation sur l'implantation de Laboratoires de Recherche Souterrains - Rapport du Médiateur", 20 décembre, La documentation française, 169p.
- **Document 16** => Maget, P. - Rambaud, D. 1979, "Possibilités géothermiques de la région champagne-Ardenne", BRGM, décembre, rapport 79 SGN 739 GTH/CHA, 37p., 36 cartes HT.
- **Document 17** => Coparex 1989, "Rapport final forage "Lezéville 1" (LZV1) - permis de Biencourt", septembre 1989 SC/NG/EG, 31p. et un log final dépliant du forage au 1/500.
- **Document 18** => Mahler, A. 1995, "Geothermal Plant in Thisted with absorption heat pump and 10 years operation without corrosion or reinjection problems in sandstone for 15% saline water", World Geothermal Congress: 2161-6
- **Document 19** => Mahler, A. - Magtengaard, J. 2010, "Country Update - Report for Denmark", Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April, 9p.
- **Document 20** => 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.
- **Document 21** => Andra 2001 b : "Dossier 2001 Argile - sur l'avancement des études & recherches relative à la faisabilité d'un stockage de déchets à haute activité et à vie longue en formations géologiques profondes - Rapport de synthèse", décembre, Partie A: 159p ; Partie B "compléments scientifiques et techniques" : 331p.
- **Document 22** => Andra 2001 a : "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", t.2 : "Les connaissances à l'échelle régionale", 230p.
- **Document 23** => Andra 2001 a : "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", t.5 : "État d'avancement de la modélisation", 107p.
- **Document 24** => Fleury, J.M. 2003, A.E.M.H.M. (Association des Élus Meusiens et Haut-Marnais opposés à l'implantation d'un «laboratoire» en vue de l'enfouissement de déchets nucléaires et favorables au développement durable) ; lettre du 24/06 à Monsieur le Rédacteur en chef de l'Est Républicain, Bar-le-Duc, en réponse à l'article "Bure sans surprise majeure".
- **Document 25** => CLIS, Bureau 28 janvier 2003.
- **Document 26** => CLIS, Plénière du 26 mai 2003.

- **Document 27** => CLIS, Bureau 17 novembre 2003.
- **Document 28** => CLIS, Plénière du 15 janvier 2004.
- **Document 29** => CLIS, Bureau 11 février 2004.
- **Document 30** => CLIS, Bureau 5 avril 2004.
- **Document 31** => La Vie du Labo n° 22, mai-juin 2003, Journal d'information du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.
- **Document 32** => Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine (SNPA); Sondage Germisay n°1 = LGe.1, rapports mensuels septembre 1955 à avril 1956
- **Document 33** => SNPA 1956, "Germisay, L.Ge.1" Log de forage, échelle 1/2000 suivi du tableau "Résultat des essais" de production;
- **Document 33 bis** => SNPA 1956, Germisay 1, L.Ge.1, "Dossier de fin de Sondage - Rapport géologique", RG n°225 (M. Delmas et J.P. Cabrit), 25p. + 5 cart.; Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine.
- **Document 34** => Le Bars, Y. (Président) 2004, Andra ; lettre du 15/01 au président du CLIS du Laboratoire de Bure à propos du potentiel géothermique de la région de Bure.
- **Document 35** => Andra 2004 b (Grateloup, S), "Site Meuse/ Haute Marne, Géothermie, Inventaire de nouvelles données", Rapport C.NT.ASMG.04.0001, 18 mars, 32p.
- **Document 36** => Mégnien, Cl. 1980 (sous la dir. de), "Synthèse géologique du bassin de Paris", Mémoires du BRGM n° 101 : vol. I : "Stratigraphie et paléogéologie", 468p.; n° 102 : vol. II : "Atlas", 52 cartes dépliantes; et n°103 : vol. III : "Lexique des noms de formations", 469p.
- **Document 37** => Housse, B. - Maget, P. 1976, "Potentiel géothermique du Bassin Parisien", Elf Aquitaine et BRGM, rapport DGRST (Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique) 74-70-990, mai, BRGM édit., 125p., 29 cartes hors texte.
- **Document 38** => Maget, P. 1983, "Potentiel géothermique «basse température» en France", CCE et BRGM, rapport 83 SGN 375 SPG, 315p., + annexe I, forages néocomiens 261 fiches; annexe II, forages Dogger 62 fiches; et 86 figures/cartes hors texte.
- **Document 38 bis** => Maget, P. - Rambaud, D. 1980, "Possibilités géothermiques de la région champagne-Ardenne - II. Étude hydrogéologique des sites", BRGM, septembre, rapport 80 SGN 649 GTH/CHA, 54p.
- **Document 39** => BRGM 1984, "Projet de géothermie de Villeneuve-Saint-Georges - Étude géologique", rapport n° 84 SGN 402 GTH, décembre, 68p.

- **Document 40** => 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. London, 344: 159-69.
- **Document 41** => RAP 1954, "Rapport de Sondage d'Ancerville 1 (An. 1)", 11 juillet, extraits; "Commentaires des mesures de porosité et de perméabilité", 6p. + de "Description lithologique des terrains traversés" : le Muschelkalck.
- **Document 42** => Géochaleur 1982, "Saint Dizier - Géothermie - I. Inventaire des opérations, II. Bettancourt, avant projet sommaire", janvier, Géochaleur, BRGM, BERIM, 127p.; extrait.

- **Document 43** => Andra 2005 b, "Dossier 2005 Argile":

I. "Tome Architecture et gestion du stockage géologique", juin, 497p.

II. Tome Évolution phénoménologique du stockage géologique, juin, 520p.

III. Tome Évolution de sûreté du stockage géologique, juin, 737p.

*L'Andra réactualise ce dossier en décembre, disponible sur papier au CLIS du Laboratoire de Bure à partir de la deuxième partie de janvier 2006. Des modifications ont été glissées dans les 1754 pages. Le dossier a été réimprimé (1867 pages) et la pagination a changé.*

*Plus tard une traduction anglaise de la version de décembre sera mise sur le site de l'Agence.*

- **Document 44** => Andra 2005 a, "Dossier 2005 Argile : Référentiel du site de Meuse/Haute-Marne", version papier "juin", la seule disponible au CLIS en 2005 : 35 chapitres (8 à 43, il n'y a pas de chapitre 1 à 7) répartis en reliures, eux-mêmes sous-divisés en "volumes" (conceptuels) sur lesquels démarre une nouvelle pagination: 1246p.

*L'Andra réactualise ce dossier en décembre, disponible sur papier au CLIS du Laboratoire de Bure à partir de la deuxième partie de janvier 2006. Il commence toujours au chap. 8 mais des modifications ont été glissées dans le corps du texte et en plus la pagination a été complètement reprise en commençant à la p. 1 au chapitre 8 et cohérente à partir de là. Cette pagination n'a donc plus aucun rapport avec celle de la version "juin".*

*Enfin beaucoup plus tard encore, ceux qui se sont renseignés ont découvert une version numérique de ce Référentiel. C'est une troisième version, datée Indice A du "29 avril 2005" et Indice B du "15 nov. 2005". Cette troisième version comporte un volume supplémentaire avec l'apparition des chapitres manquants (les chapitres 1 à 8 qui ont une pagination indépendante).*

- **Document 45** => La Vie du Labo n° 29, automne 2005, Journal d'information du Laboratoire de recherche souterrain de Meuse/Haute-Marne.
- **Document 46** => OPECST 2005, "L'état d'avancement et les perspectives des recherches sur la gestion des déchets radioactifs", 15 mars, réf. Ass Nat. n° 2159, réf. Sénat n° 250: 67p.
- **Document 47** => IRSN 2005, "Avis de l'IRSN sur le dossier 2005 Argile", décembre, Rapport DSU n°106, 247p.
- **Document 48** => GPE 2005, "Avis relatif à l'examen du "Dossier 2005 Argile", Groupe Permanent d'Experts pour les Installations destinées au stockage à long terme des déchets radioactifs au Directeur Général de la Sûreté Nucléaire et de la Radioprotection, réunion des 12-13 décembre à Fontenay-aux-roses, 9p.
- **Document 49** => ASN 2006, "Avis de l'Autorité de sûreté nucléaire sur les recherches

relatives à la gestion des déchets à haute activité et à vie longue (HAVL) menées dans le cadre de la loi du 30 décembre 1991, et liens avec le PNGDR-MV", 01 février, 10p.

- **Document 50** => CLIS, Plénière du 5 octobre 2006.
- **Document 51** => Rapport de synthèse de l'évaluation des moyens à mettre en œuvre pour la caractérisation du potentiel géothermique de la région de Bure – GIP objectif Meuse – CLIS (15 novembre 2005, Erdyn).
- **Document 52** => CLIS du 23 avril 2007, "Contexte du projet HAVL", présentation Andra D.TR.ALS.07.0344.A, 48 diapositives, dont Programme de reconnaissance de la zone de transposition.
- **Document 53** => CLIS, Plénière du 27 novembre 2007.
- **Document 54** => Bouchot, V. - Bialkowski, A. - Lopez, S. - Ossi, A. 2008, "Évaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris - Rapport final", BRGM/RP-56463-FR, septembre, 96p.
- **Document 55** => Worden, R.H. - Matray, J.M. 1995, "Cross formational flow in the Paris Basin", Basin Research, 7: 53-66.
- **Document 56** => Gouze, P. - Hassani, R. - Bernard, D. Coudrain-Ribstein, A. 2001, "Calcul de l'évolution de la perméabilité des réservoirs sédimentaires contenant des argiles : application à la faille de Bray (Bassin de Paris)", Bull. Soc. Géol. Fr., t. 172, n°4: 427-36.
- **Document 57** => Andra 2001 a : "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", t.1 : "Contexte et objet".
- **Document 58** => Andra 2004, "Forages scientifiques profonds - Synthèse FSP", vol. 1 texte : 173p., vol.2 figs : 125p, vol.3 annexes : 57p.; date d'origine 28/11/03, modification : 27 février 2004.
- **Document 59** => Géoservices 1995, "Rapport final : Tests hydrogéologiques sur le site de forage d'exploration HTM102 de Haute-Marne entre Cirfontaines-en-Ornois et Gillaumé", avril, Rapport ANDRA B RP 1GSV 95-002, 92p.
- **Document 60** => Birch, F. 1948, "The effects of Pleistocene climatic variations upon geothermal gradients", American Journal of Science, vol. 246, n° 12, p. 729-60.
- **Document 61** => Carslaw, H.S. - Jaeger, J.C. 1988, 2<sup>nd</sup> ed., (1959), "Conduction of heat in solids", Clarendon press, Oxford, 510p.
- **Document 62** => Andra 2008, "Le programme de reconnaissance depuis la surface : Principaux résultats à octobre 2008", CLIS du 16 octobre, 25 diapositives Power Point.
- **Document 63** => 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.

- **Document 64** => Schlumberger 2008-2009, fichiers de données sur les diagraphies températures, résistivité, pression des 27/08/2008 et et 05/02/2009 au forage EST433 : "scb2008-08\_est433\_ema.pds"; "scb2008-08\_est433\_psp.pds"; "scb2008-08\_est433\_ema\_main\_up\_012puc.las"; "scb2008-08\_est433\_psp\_main\_up\_020luc.las"; "scb2009-02\_est433\_combined\_ema.pds"; "scb2009-02\_est433\_combined\_psp.pds"; "scb2009-02\_est433\_ema\_up\_repeat\_008puc.las"; "scb2009-02\_est433\_psp\_up\_repeat\_021puc.las".

*Nota : les fichiers pds ne sont lisibles qu'avec le logiciel pdsview qui est dans le dossier, et qui ne fonctionne que sous Windows (il suffit de cliquer directement sur l'un des fichiers pds). On a rajouté des scans pour les systèmes qui ne pourraient pas faire fonctionner pdsview.*

- **Document 65** => Le Journal de l'Andra, édition Meuse – Haute Marne, n°2, printemps 2010, p. 11 : "Le sous-sol de Bure recèle-t-il des ressources géothermiques ?".
- **Document 65 bis** => 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.
- **Document 66** => 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<sup>ème</sup>" (nota : ce document met un certain temps à s'ouvrir)
- **Document 67** => Cassan, M. 1980, "Les essais d'eau dans la reconnaissance des sols", Eyrolles édit., 275p.
- **Document 68** => Gringarten, A.C. 1978, "Reservoir Lifetime and Heat Recovery Factor in Geothermal Aquifers used for Urban Heating", Pageoph, vol. 117, Birkhäuser Verlag, Basel: 297-308.
- **Document 69** => Menjoz, A. - Fillion, E. - Lesueur, H. - Matray, J.M. - Noyer, M.L. 1996, "Comportement des doublets géothermiques exploitant le réservoir du Dogger et analyse du contexte de la percée thermique - Bassin parisien (France)", BRGM/ADEME, septembre, R39095, 159p.
- **Document 70** => Earlougher, R. C. Jr. 1977, "Advances in well test analysis", Monograph vol. 5, Soc. Petrol. Eng. of AIME, 264p.
- **Document 71** => Bourdet, D. - Ayoub, J.A. - Pirard, Y.M. 1989, "Use of Pressure Derivative in Well-Test Interpretation", SPE paper 12777: 293-302.
- **Document 72** => Gringarten, A.C. - Bourdet, D.P. - Landel, P.A. - Kniazeff, V.J. 1979, "A comparison between different skin and wellbore storage type-curves for early-time transient analysis", Society of Petroleum Engineers Reprint SPE-8205, 11p. (+ 16 fig.).
- **Document 72 bis** => BRGM 1985, "Opération de Champigny-sur-Marne - Spécifications Techniques Détaillées - Plan d'exécution des ouvrages - 2<sup>ème</sup> partie", rapport 85 SGN 222 GTH, mai, 178p. + log échelle 1/500.

- **Document 73** => Birraux, Cl. - Le Déaut, J.Y. 2001, "L'état actuel et les perspectives techniques des énergies renouvelables", Rapport OPECST, novembre, Réf Ass. Nat. 3415, Sénat n° 94, 135p.
- **Document 74** => ENER : "L'énergie du sous-sol - La Géothermie en Ile-de-France", revue commune à l'ADEME, le BRGM et l'ARENE, adresse : BRGM/CDG/CITEG BP 6009, 45 060 Orléans cedex 2 ; bulletin n°5, avril 2004 : Le réseau de chauffage géothermique de Tremblay-en-France : 20 ans de passé, 20 ans d'avenir...", par. R. Durand
- **Document 74 bis** => BRGM/ADEME/ARENE 2005, "Une nouvelle dynamique en faveur de la géothermie en France : cas de l'Ile de France, de l'Aquitaine et de la région Centre"
- **Document 75** => Phillips, S.L. - Igbene, A. - Fair, J.A. - Ozbek, H. - Tavana, M. 1981, "A Technical Databook for Geothermal Energy Utilization", Lawrence Berkeley Laboratory; University of California, June, 46p.
- **Document 76** => Laplaige, P. - Jaudin, F. - Desplan, A. - Demange, J. 2000, "The French Geothermal Experience - Review and perspectives", Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, June 10: 283-95.
- **Document 77** => Desplan, A. - Lejeune, J-M. - Maiaux, C. 1981, "Les possibilités de réalisations géothermiques en Meuse : Étude de la faisabilité du projet géothermique de Maizey", BRGM/SGN, Établissement public Régional de Lorraine - Comité géothermie, avec la collaboration de l'omnium d'Études techniques, Rapport 81 SGN 372 LOR, mai, 46p. et 3 annexes.
- **Document 78** => Lopez, S. - Millot, R. 2008, "Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris", rapport BRGM/RP-56630-FR, septembre, 195p.
- **Document 79** => Bouchot, V. 2008, "Projet CLASTIQ : CLAYed sandSTone In Question - Rapport final", BRGM/RP-56626-FR, septembre, 66p.
- **Document 80** => Calgagno, P. - Genter, A. - Huenges, E. - Kaltschmitt, M. - Karytsas, C. - Kohl, T. - Ledru, P. - Manzella, A. - Thorhallsson, S.- van Wees, J.D. 2010, "The ENGINE Coordination Action (ENhanced Geothermal Innovative Network for Europe) ", Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 april, 7p.
- **Document 81** => Zimmermann, G. - Reinicke, A. 2010 : "Hydraulic stimulation of a deep sandstone reservoir to develop an Enhanced Geothermal System: Laboratory and field experiments", Geothermics, 39, 1: 70-77.
- **Document 82** => Urpi, L. - Zimmermann, G. - Blöcher, G. - Kwiatak, G. 2011, "Microseismicity at Groß Schönebeck - A case review", Proceeding 36th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, Stanford University, January 31-february 2, SGP-TR-191, 8p.
- **Document 83** => CLIS, Assemblée plénière du 13 octobre 2004, extrait.

- **Document 84** => "SP" : ANDRA 2007, "Spécifications de la Campagne de forages - SP\_FZT - Campagne de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 (Campagne RZT)", 04 avril ("mise à jour"), D.SP.ADPE.06.0768, 177p.
- **Document 85** => ASN 2010, "Avis n° 2010-AV-0084 de l'Autorité de sûreté nucléaire du 5 janvier 2010 sur le dossier de l'agence nationale de gestion des déchets radioactifs (ANDRA) relatif à la proposition d'une zone d'intérêt pour la reconnaissance approfondie et de scénarios d'implantation en surface pour un stockage réversible en formation géologique profonde ", 5 janvier, 2p. 2 annexes.
- **Document 86** => Majorowicz, J. - Wybraniec, S. 2011, "New terrestrial heat flow map of Europe after regional paleoclimatic correction application", short note, Int. Jl. Earth Sci. (Geol Rundsch) 100: 881-887.
- **Document 87** => ANDRA 2013, "Projet CIGÉO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne - Débat public : Le Dossier du Maître d'ouvrage", Version du 24 janvier, 101p.
- **Document 87bis** => ANDRA 2013, "Projet CIGÉO - Centre industriel de stockage réversible profond de déchets radioactifs en Meuse/Haute-Marne - Le Dossier du Maître d'ouvrage - Débat public du 15 mai au 15 octobre 2013", février, 103p.
- **Document 88** => Demande des Cahiers des charges et Spécifications Techniques pour les tests : Recommandé 1A 072 628 0421 6 réceptionné le 05/12/12 au CLIS de Bure; Recommandé 1A 080 392 9263 2 réceptionné le 03/01/13 au CLIS de Bure demandant deux publications de l'Andra et réclamant de nouveau Cahiers des charges et Spécifications Techniques; mail du CLIS du 17/01/13 avec les Spécifications Techniques; Recommandé 1A 079 696 8811 9 réceptionné le 23/01/13 par Mme la Préfète demandant de mettre en demeure Andra et CLIS de respecter la mission d'information que la loi leur a confiée; mail du CLIS du 01/02/13 18h05 avec les Cahiers des charges.
- **Document 89** => 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, 4p.
- **Document 90** => "CC" : ANDRA - Egis Géotechnique 2008, "Maitrise d'œuvre du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008 (Campagne RZT) : Forages carotés, Cahier des Charges d'Exécution (CCE-FZT2)", D.SP.OSCA.07.0007, 27 mars, 240 p.
- **Document 91** => CLIS, Plénière du 16 octobre 2008, 61p. et 18 diapositives powerpoint Andra en annexes.
- **Document 92** => Landrein, P. - Vigneron, G. - Delay, J. - Lebon, P. - Pagel, M. 2010, "Potentiel géothermique du secteur Meuse/Haute-Marne de l'Andra (Est du Bassin de Paris)", Réunion des Sciences de la Terre, Bordeaux, 25-29 octobre, Résumés, -381-. Avertissement : ceci est la version numérique que l'Andra a envoyé au CLIS de Bure. Le titre et les auteurs ont été caviardés. On peut cependant les lire en les surlignant (deviennent alors visibles).
- **Document 93** => Le journal de l'Andra, Édition Meuse/Haute-Marne, "automne 2012", n°12, 15p., tirage 180 000 exemplaires.

- **Document 94** => Le journal de l'Andra, Édition Meuse/Haute-Marne, "printemps 2010", n°2, 15p., tirage 70 000 exemplaires.
- **Document 95** => SRCAE, Schéma Régional Climat Air Énergie de Lorraine 2012, Préfet de Région Lorraine, Région Lorraine, 164p.
- **Document 96** => Bourguine, B. - Denis, L. - Filhine-Tresarrieu, T. - Monnot, P. - Nguyen-Thé, D. - Robelin, C. 2007, "Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains", BRGM/RP-54987-FR, juin, DRIRE Lorraine, ADEME, Conseil Régional de Lorraine, EDF, BRGM, 83p. [disponible sur le net]
- **Document 97** => Linard, Y. - Vinsot, A. - Vincent, B. - Delay, J. - Wechner, S. - De la Vaissière, R. - Scholz, E. - Garry, B. - Lundy, M. - Cruchaudel, M. - Dewonck, S. - Vigneron, G. 2011, "Water flow in the Oxfordien and Dogger limestone around the Meuse/Haute-Marne Underground Research Laboratory", Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, vol. 36, iss. 17-18: 1450-68.
- **Document 98** => Boissier, F. 2010, BRGM, chair of the geothermal geothermy panel, interview at the 1th Annual conference of the RHC-Platform (Renewable heating and Cooling), European Technology Platform, 23-24 February, Bilbao, Spain, video, en anglais, portée par [www.solarthermalworld.org](http://www.solarthermalworld.org) : copie.
- **Document 99** => Lemale, J. - Gourmez, D. 2008, "Guide technique : pompe à chaleur sur aquifère - Conception et mise en œuvre - cas de la Lorraine", Guide coédité par l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine (AREL), le BRGM, EDF, et la Délégation régionale Lorraine de l'ADEME, février, 72p.
- **Document 100** => Marre, A. et al, GEGENAA 2009, "Caractérisation du karst dans les calcaires oxfordiens en bordure sud du secteur Meuse/Haute-Marne", Andra C.RP.0GRU.09.0001, 17 octobre, 166p.
- **Document 101** => cotes du forage EST207 in Andra For. Recon. Form, vol. 1, tab. 5-4 p. 186 (extrait), avec texte explicatif.
- **Document 102** => Hibsich, C. - Lathuilière, B. - Le Roux, J. 2001, "Site Meuse/Haute Marne - Cartographie géologique et structurale de l'environnement régional du site", rapport ANDRA D RP 0G2R 00-003, titulaire : Université de Nancy I (sédimentologie structurale) G2R.
- **Document 103** => ANDRA 2010, "Référentiel du site Meuse/Haute-Marne, Rapport C.RP.ADS.A09.0007, date d'origine 05/03/2009, édit. février 2010; "Présentation générale" (chap. 1 à 5): 91p.; tome 1 "histoire géologique et état actuel" (chap. 6 à 16): 582p.; tome 2 "Caractérisation comportementale du milieu géologique sous perturbation" (chap. 17 à 25): 347p. ; tome 3 "L'évolution naturelle du site Meuse/Haute-marne" (chap. 26 à 34): 298p. : extrait.
- **Document 104** => de Marsily, G. 1981, "Hydrogéologie quantitative", Masson édit., 214p.

- **Document 105** => Andra 2001, "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", t.4, Le Callovo-oxfordien, 45p. + figs et tabs. On a rajouté les cotes du forage EST103 de Andra FRF tab. 5-4 p. 186.
- **Document 106** => Géoservices 1995, "Rapport final : tests hydrogéologiques sur le site de forage d'exploration MSE 101 de la Meuse", 159p, août, rapport Andra B RP 1GSV 95 - 024/A.
- **Document 107** => Baker Hughes 2005, "Laboratoire de recherche souterraine Meuse Haute Marne - Re-interpretation of hydraulic packer tests - Borehole MSE101 - MSE101 Test 5 - MSE101 Test 6 - MSE101 Test 7 - MSE101 Test 8 - MSE101 Test 9", Rapport Andra D.RP.0BAK.04.021/A, 7 avril, 136p.
- **Document 108** => "Dossier 2005 Argile" II et III (le document en lui-même a déjà été présenté comme Document 43) : nouveaux extraits
- **Document 109** => "Dossier 2005 Argile" I (le document en lui-même a déjà été présenté comme Document 43) : extraits
- **Document 110** => CNE, novembre 2011, "Rapport d'évaluation n°5", annexes scientifiques et techniques, extrait.
- **Document 111** => ANDRA 2001a, "Référentiel géologique du site Meuse/Haute-Marne", janvier, t.4 : "Le Callovo-Oxfordien", 154p., extraits
- **Document 112** => CLIS, Assemblée Générale extraordinaire du 04 février 2013.
- **Document 113** => extrait de "Wellsite geology" Baker & Hughes INTEQ 1996; => extrait de "Operational Aspects of oil and gas well testing" Stuart McAleese, 2000.
- **Document 114** => Andra, JP. Baillet/S. Bohaud, Centre de Meuse/Haute-Marne, Direction, 12 mai 2011, Lettre à Mr Jean-Louis Canova, Président du CLIS de Bure en réponse à son courrier du 17 mars 2011 accompagnée d'un Cd-rome avec les fichiers demandés.
- **Document 115** => ANDRA 2010, "Expérimentation MHS - Synthèse annuelle 2009 des mesures hydrogéologiques de surface - Centre Meuse Haute-Marne", 4 mai, tome 2 "Historique techniques": 433p.
- **Document 116** => Eurafrep 1989, "Rapport de fin de sondage, Chevillon 1 (CVN. 1) (Permis de Wassy)", 20 p. + Log fondamental au 1/500 ème, fiches de carottes; extrait.
- **Document 117** => Bourquin, S. - Peron, S. - Durand, M. 2006, "Lower Triassic sequence stratigraphy of the western part of the Germanic Basin (west of Black Forest): Fluvial system evolution through time and space", Sedimentary Geology 186: 187-211.
- **Document 118** => Rebeix, R. - Le Gal La Salle, C - Michelot, J.L. - Verdoux, P. - Noret, A. - Monvoisin, G. - Gianesinni, S. - Lancelot, J. - Simler, R. 2011, "Tracing the origin of water and solute transfers in deep groundwater from Oxfordian, Dogger and Trias formations in the east of the Paris Basin - France", Physics and Chemistry of the Earth, n°36: 1496-1510.

- **Document 119** => Barsotti, V. 2011, "Recherche et caractérisation de microorganismes dans des compartiments géologiques profonds", thèse Bordeaux-1, Novembre, 298p., extraits
- **Document 120** => Fourré, E. - Jean-Baptiste, P. - Dapoigny, A. - Lavielle, B. - Smith, T. - Thomas, B. - Vinsot, A. (CEA, CNAB, Andra) 2011, "Dissolved helium distribution in the Oxfordian and Dogger deep aquifers of the Meuse/Haute-Marne area", *Physics and Chemistry of the Earth*, 36: 1511-20.
- **Document 121** => Marty, B. - Dewonck, S. - France-Lanord, C. 2003, "Geochemical evidence for efficient aquifer isolation over geological timeframes", *Nature*, vol. 425, 4th September: 55-58.
- **Document 122** => Dezayes, C. - Thinon, L. - Courrioux, G. - Haffen, S. - Bouchot, V. 2010, "Towards a better knowledge of the clastic Lower Triassic reservoirs in the Upper Rhine Graben (France)", *Proceedings World Geothermal Congress, Bali, Indonesia, 25-29 April*, 7p.