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 maitrisés 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, Groβ 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 maitrisée.....5
III. Permien sous Bure : des niveaux perméables plus chauds.....6
IV. Groβ 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 à 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 : *Menjoz 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 Menjoz et al. (voir document 40 : *Menjoz 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 : *Menjoz 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^3/h (à Melun l'Almont où l'on tire 120 m^3/h avec 2 puits producteurs) à 350 m^3/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 : *Menjoz 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_{th} 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'usager, 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 Maubuée (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 × 44 ≈ 109,6 D·m,

- modèle de Horner opérateur : 3,48 × 44 ≈ 153 D·m,

- meilleur calcul selon les règles de l'Art : 3,6 × 44 ≈ 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 ρc) :

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

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

C'est l'eau pure qui a la capacité calorifique la plus haute (c ~ 4180 à 50°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°C, exprimée sous la forme 3 molal [molalité : mole de soluté par kg d'eau]) et ρ = 1094 pour la saumure chaude décompressée.

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

On fait le calcul pour une saumure réinjectée à 40°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^3/h pour le Dogger moyen (0,0192 m^3/s) et de 190 à 380 m^3/h pour le Trias inférieur sous Bure (0,0528 à 0,106 m^3/s). On calcule alors avec l'équation 1 :

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

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

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

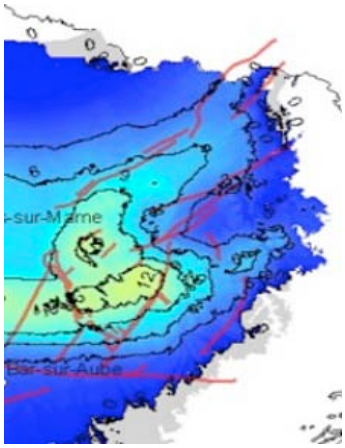

Figure P4-1. Scan sur la partie orientale de la fig. 18 de Bouchot et al. 2008
Potentiel géothermique des faciès gréso-argileux du Trias
Ce scan montre toute la partie Est du Bassin parisien, à partir d'environ Vitry-le-François (à gauche) jusqu'aux affleurements du Trias en Lorraine à droite, et dans les Ardennes au Nord. Les traits rouges sont des failles et celle Est-Ouest en bas est la faille de Vittel. La zone de Bure se reconnait 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^2) de toute la partie Est du Bassin parisien (la courbe d'isopotentiel suivante vert-bleuté qui prend la partie Sud de la Meuse plus une branche qui part à l'Ouest, est à 9 GJ/m^2 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^2 (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^2; voir figure P4-1).

II. La réinjection dans les grès : délicate mais maitrisée

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 Groβ 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 épaississement 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'égales profondeurs 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 gréso-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 gréso-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^3/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^3 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 Buntsandstien.*" (...)
"*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 × 3,5 = 28,7°C (+ 69 ≈ 98 °C); et, 140 m plus bas 960/100 × 3,5 ≈ 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_{th} thermique et un apport de 0,23 MWe^- électriques (ce qui permet de vendre un peu d'électricité plutôt que d'en consommer).

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 ≈ 1800 m de série gréseuse.

IV. Groβ 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 × 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 Groβ 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.

Groβ 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 (~ 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. Groβ 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 (> 10-20 µm) à la sortie du puits de production et les fins (>1-2 µm) avant le puits de réinjection (changeables sans arrêter la boucle).

Bure a un potentiel bien plus élevé que Groβ 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°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 ~ 6% à 90°C à ~ 12,5 % à 160°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.