

Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne

RT/PRP-DGE/2014-00067

Pôle radioprotection, environnement, déchets et
crise

Service de recherche sur les transferts dans la géosphère

RESUME

CE RAPPORT A POUR BUT DE PROPOSER UNE ANALYSE DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE DU SITE DE MEUSE/Haute-MARNE RETENU POUR LE PROJET CIGEO EN SE BASANT PRINCIPALEMENT SUR LES DONNEES DISPONIBLES DANS LA LITTERATURE ET EN PARTICULIER SUR CELLES ACQUISES RECEMMENT PAR L'ANDRA A PROXIMITE DE CE SITE. ELLE PRESENTE EGALEMENT UNE ANALYSE DU RAPPORT QUE GEOWATT AG A EFFECTUE POUR LE COMPTE DU CLIS DE BURE SUR CE MEME THEME.

SUR LE SECTEUR DE MEUSE/Haute-MARNE D'INTERET POUR CIGEO, LE PRESENT RAPPORT CONCLUT A L'EXISTENCE D'UNE RESSOURCE GEOTHERMIQUE DE TYPE BASSE ENERGIE POUR LE TRIAS INFERIEUR. POUR LE PERMIEN ET LE SOCLE, UNE RESSOURCE DE TYPE MOYENNE A HAUTE ENERGIE EST ENVISAGEABLE MAIS SA PRESENCE N'EST QU'HYPOTHETIQUE.

A L'APLOMB DU SITE, L'EXPLOITATION DU TRIAS SERAIT CONDITIONNEE PAR LA POSSIBILITE D'Y REINJECTER LA SAUMURE PRODUITE. OR, LES EXPERIENCES NATIONALES ET INTERNATIONALES MONTRENT QU'IL EST DIFFICILE DE REALISER CETTE REINJECTION DANS LES FORMATIONS ARGILO-GRESEUSES.

ENFIN, LA RENTABILITE D'UNE EXPLOITATION DANS LE TRIAS, LE PERMIEN OU LE SOCLE POSE QUESTION. EN EFFET, LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE NE PRESENTE PAS DE CARACTERE EXCEPTIONNEL, NI D'INTERET PARTICULIER PAR RAPPORT A D'AUTRES FORMATIONS OU ZONES SUR LESQUELLES, SOIT LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE EST MIEUX DEMONTRE ET LES CONDITIONS D'EXPLOITATION SONT PLUS AISEES, TELLES QUE PAR EXEMPLE LA FORMATION DU DOGGER DU CENTRE DU BASSIN PARISIEN, SOIT LES GRADIENTS GEOTHERMIQUES SONT PLUS ELEVES.

ABSTRACT

THIS REPORT AIMS TO ANALYZE THE GEOTHERMAL POTENTIAL OF THE MEUSE/Haute-MARNE SITE SELECTED FOR THE CIGEO PROJECT, PRIMARILY BASED ON DATA AVAILABLE IN THE LITERATURE AND PARTICULARLY ON THOSE RECENTLY ACQUIRED BY ANDRA NEAR THIS SITE. IT ALSO ANALYZES THE REPORT MADE ON THE SAME TOPIC BY GEOWATT AG AT THE REQUEST OF THE CLIS OF BURE.

FOR THE MEUSE/Haute-MARNE AREA RELEVANT TO CIGEO, THE PRESENT REPORT CONCLUDES TO THE EXISTENCE OF A LOW-ENERGY GEOTHERMAL RESOURCE IN THE LOWER TRIASSIC. FOR THE PERMIAN AND THE BASEMENT, A MEDIUM TO HIGH-ENERGY GEOTHERMAL RESOURCE IS CONCEIVABLE, BUT ITS OCCURRENCE IS HYPOTHETICAL.

BENEATH THE SITE, EXPLOITING THE TRIASSIC WOULD DEPEND ON THE POSSIBILITY OF RE-INJECTING THE PRODUCED BRINE. NATIONAL AND INTERNATIONAL EXPERIENCES SHOW THE DIFFICULTY TO CARRY OUT SUCH A REINJECTION IN SILTY-CLAYEY FORMATIONS.

THE PROFITABILITY OF SUCH EXPLOITATION IN THE TRIASSIC, THE PERMIAN OR IN THE BASEMENT IS QUESTIONABLE. INDEED, THE MEUSE/Haute-MARNE AREA NEITHER SHOWS AN EXCEPTIONAL NATURE NOR A SPECIFIC INTEREST COMPARED TO OTHER FORMATIONS OR ZONES FOR WHICH EITHER THE GEOTHERMAL POTENTIAL IS BETTER DEMONSTRATED, SUCH AS FOR INSTANCE THE DOGGER FORMATION IN THE CENTRAL PART OF THE PARIS BASIN WITH EASIER EXPLOITATION CONDITIONS, OR WHERE THE GEOTHERMAL GRADIENTS ARE HIGHER.

MOTS-CLES

Géothermie, très basse énergie, basse énergie, moyenne énergie, haute énergie, potentiel géothermique, Meuse/Haute-Marne, projet Cigéo, grès, Trias inférieur de Lorraine, formations argilo-gréseuses, saumures, réinjection, Trias, Permien, Dogger géothermique, hydrogéologie, GEOWATT AG

SOMMAIRE

1 INTRODUCTION	6
2 LES DIFFERENTES RESSOURCES GEOTHERMIQUES	7
3 ANALYSE DES DONNEES DE LA LITTERATURE SUR LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE	8
3.1 ETUDES ET AVIS ANTERIEURS	8
3.2 ANALYSE DES DONNEES DU FORAGE EST433	9
3.2.1 Lithostratigraphie et propriétés des aquifères	11
3.2.2 Le gradient géothermique	15
3.2.3 La composition de l'eau interstitielle du Trias.....	16
4 DISCUSSION SUR LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE ET LES CONDITIONS DE SON EXPLOITATION	17
4.1 TYPES D'EXPLOITATIONS GEOTHERMIQUES ENVISAGEABLES	17
4.2 COMPARAISON DE LA RESSOURCE BASSE ENERGIE IDENTIFIEE PAR EST433 AVEC CELLE DU DOGGER GEOTHERMIQUE.....	18
4.2.1 Caractéristiques des ressources.....	18
4.2.2 Extension des ressources.....	19
4.3 IMPACT DU PROJET CIGEO SUR L'EXPLOITATION POTENTIELLE DE LA RESSOURCE	20
4.4 DIFFICULTES LIEES A L'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE BASSE ENERGIE EN FORMATIONS ARGILO-GRESEUSES.....	21
4.4.1 Retour d'expérience des Tentatives d'exploitation par doublet en France	21
4.4.2 Exploitation par doublet en contexte argilo-gresex en europe.....	23
4.4.3 Conclusions sur le retour d'expérience de l'exploitation par doublet en contexte argilo-gresex	24
5 ANALYSE DU RAPPORT GEOWATT	26
5.1 PROGRAMME DE TESTS ET DE LOGGING DU FORAGE EST433 ET REVUE DES RAPPORTS TECHNIQUES	26
5.2 POSITION DE L'IRSN SUR L'AVIS DE GEOWATT AG CONCERNANT LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE DU TRIAS EN MEUSE/Haute-MARNE	27
6 CONCLUSIONS ET AVIS DE L'IRSN SUR LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE DE MEUSE/Haute-MARNE	29
7 REFERENCES	31
8 ANNEXES.....	33

1 INTRODUCTION

Ce rapport technique présente l'avis de l'IRSN sur le potentiel géothermique de la région de Bure dans laquelle l'Andra étudie le projet d'implanter une installation de stockage géologique profond de déchets radioactifs. Ce rapport répond notamment aux interrogations du CLIS de Bure sur l'existence d'un tel potentiel et tient compte également des résultats de l'expertise qu'il a commandé au cabinet Géowatt AG sur ce même sujet (GEOWATT AG Resources, 2013).

Le chapitre 5.3 du guide de sûreté relatif au stockage définitif des déchets radioactifs en formation géologique profonde (ASN, 2008) indique que « *le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines* ». Par ailleurs, ce texte précise également dans son Annexe A2-2.2.1 relative à la géothermie et au stockage de chaleur, que « *les sites retenus ne devront pas présenter d'intérêt particulier de ce point de vue* ». L'évaluation des ressources géothermiques potentielles des formations au droit de la zone retenue pour le projet de Centre Industriel de stockage Géologique (Cigéo) constitue donc un élément de la démonstration de sûreté du projet.

C'est pour cette raison que l'IRSN a pris position sur ce sujet à plusieurs reprises au cours des précédentes instructions (IRSN 2003, 2005). En 2013, à l'occasion du débat public relatif au projet Cigéo, l'institut a mis à jour cette position en s'appuyant entre autres sur de nouvelles connaissances scientifiques acquises dans le cadre du programme de recherche TAPPS 2000¹. En effet, dans le cadre de ce programme, un forage a été réalisé en 2007 jusqu'à la profondeur de la formation du Trias. Un des objectifs du programme était d'évaluer les ressources géothermiques sur la zone (Landrein *et al.*, 2013).

L'objet de ce document est de présenter cette mise à jour. Il détaille en premier lieu les différents types de ressources géothermiques possibles puis expose l'analyse des données de la littérature disponibles dans le secteur de Meuse/Haute-Marne (c'est-à-dire celles acquises au travers de forages pétroliers profonds et, plus récemment, grâce au forage du programme TAPPS 2000). Cette analyse est ensuite complétée par une réflexion sur la faisabilité d'une exploitation des ressources géothermiques autour du site retenu pour Cigéo. Le rapport d'expertise de GEOWATT AG sur le même sujet est analysé ensuite au regard des conclusions précédentes. Enfin, le document conclut globalement sur la question des ressources géothermiques potentielles et précise si l'exploitation d'une ressource géothermique profonde à proximité d'une installation de stockage géologique de déchets est envisageable.

¹ Le programme de recherche TAPSS 2000 « Transferts Actuels et Passés dans un Système Sédimentaire aquifère-aquitard » est un accord de collaboration entre l'Andra et 21 laboratoires (CNRS, Universités, BRGM, IFP, IRD, IRSN) reposant principalement sur les données et échantillons recueillis par l'Andra en 2007 dans le forage Trias, EST433, réalisé sur la commune de Montiers-sur-Saulx (Meuse). Les laboratoires participants ont pu avoir accès à la plate-forme de forage durant sa réalisation afin d'effectuer leur propre échantillonnage, sur des carottes servant leurs problématiques, en supplément de celui de l'Andra.

2 LES DIFFERENTES RESSOURCES GEOTHERMIQUES

On distingue quatre types de ressources géothermiques selon la température de la ressource, son caractère aquifère et la nécessité ou non de réinjecter l'eau prélevée dans le même aquifère².

La géothermie très basse énergie (TBE) qui correspond à des formations géologiques peu profondes (de quelques mètres à cent mètres actuellement) dont les températures sont inférieures à 30°C. Ce type de ressource peut être exploité y compris en l'absence d'aquifère. Son exploitation est destinée plus particulièrement au chauffage résidentiel individuel ou collectif ainsi qu'au secteur tertiaire. Cette géothermie est assistée par pompes à chaleur pour assurer le chauffage, le rafraîchissement et la production d'eau chaude sanitaire.

La géothermie basse énergie (BE) qui correspond à une gamme de température comprise entre 30 et 90°C. L'exploitation s'effectue par pompage de l'eau souterraine et nécessite donc la présence d'un aquifère. Lorsque la teneur en sels dissous de l'eau prélevée est suffisamment faible, un rejet en rivière est possible, il s'agit dans ce cas d'une exploitation dite par puits unique. Dans le cas où la salinité est élevée, la réinjection de l'eau dans le même aquifère est nécessaire, il s'agit dans ce cas d'une exploitation par doublet avec puits producteur et puits injecteur. Ce dernier type d'exploitation est reconnu rentable à partir de plusieurs milliers équivalent-logements et sa durée de vie est typiquement d'une quarantaine d'années. Au-delà en effet, la bulle froide du fluide réinjecté atteint le puits producteur et diminue le rendement. Les débits de production, et donc de réinjection, recherchés en région parisienne sont généralement compris entre 150 et 300 m³/h. Après une première phase de développement entre 1980 et 1988 (33 doublets au niveau du Dogger du Bassin de Paris ont été réalisés), cette ressource connaît, depuis 2006, un renouveau avec la réalisation de 6 nouveaux doublets. La plus grande exploitation géothermique est actuellement celle de Chevilly-Larue/L'Haÿ-Les-Roses/Villejuif qui exploite l'aquifère du Dogger au moyen de deux doublets sur une aire de 5x3 km². Cette dernière fournissait en 2012 environ 60 % du besoin en chaleur à 23 000 équivalent-logements (SEMHACH, 2012).

La géothermie moyenne énergie (ME) qui correspond à une gamme de température comprises entre 90 et 150°C au niveau de l'aquifère. Elle présente les mêmes contraintes de réinjection que la géothermie de type BE et peut produire de l'électricité à partir de 100°C.

La géothermie haute énergie (HE) qui nécessite une température de la roche supérieure à 150°C. Elle a pour but la production d'électricité. Elle est actuellement exploitée dans les systèmes hydrothermaux liés au volcanisme (e.g. la commune de Bouillante en Guadeloupe où trois forages profonds de 1000 m fournissent 15 MWe). Elle est encore au stade de démonstrateur dans les systèmes « roches chaudes sèches » comme à Soultz-sous-Forêts (Alsace) où trois forages profonds de 5000 m fournissent 1,5 MWe (MégaWatt électrique, terme désignant la puissance électrique d'une centrale géothermique).

² Une information détaillée sur les types d'exploitations géothermiques est accessible à partir des liens suivants :

- www.geothermie-perspectives.fr (site BRGM/ADEME),
- www.developpement-durable.gouv.fr/-Geothermie,422-.html (site du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie),
- www.brgm.fr/content/geothermie (site du BRGM).

3 ANALYSE DES DONNEES DE LA LITTERATURE SUR LE SITE DE MEUSE/Haute-MARNE

3.1 ETUDES ET AVIS ANTERIEURS

Une première évaluation du potentiel géothermique de la zone Est du Bassin de Paris a été effectuée au cours des décennies 1970 et 1980 (Housse et Maget, 1976 ; BRGM, 1980a, 1983a ; Haenel, 1989) sur l'ensemble de la colonne stratigraphique. Elle concluait à la présence d'un réservoir géothermique superficiel dans le Trias inférieur (Buntsandstein) en Lorraine (Nancy, Lunéville, Metz), compatible avec une exploitation de type basse à très basse énergie (BE à TBE). La nappe concernée, sub-affleurante et de faible salinité, ne nécessitait pas de réinjection. L'évaluation montrait que les qualités du réservoir diminuaient au fur et à mesure que l'on s'enfonçait vers le centre du Bassin de Paris. Le long de la Moselle, la qualité du réservoir était considérée comme très bonne avec une salinité réduite. Cependant, la température, de l'ordre de 30°C, en limitait l'utilisation à la géothermie de type BE et TBE. Ces études indiquaient également que la qualité du réservoir était probablement suffisante jusqu'à la Meuse, où la température atteint 50°C. Toutefois, la salinité plus élevée dans cette zone conduisait à qualifier la ressource de « *globalement médiocre* » eu égard aux problèmes de corrosion par piqûres liés aux chlorures dissous dans ces eaux et connus, dès les années 1990, dans les exploitations pétrolières et géothermiques du centre du Bassin de Paris (Rojas *et al.*, 1989). Les seuls forages profonds réalisés dans la région étaient d'anciens forages pétroliers comme par exemple le forage de Germisay 1 (GE1), situé à une vingtaine de km au Sud-Sud-Est de Montiers-sur-Saulx (Figure 1a), datant de 1955 et qui a atteint la profondeur de 2157 m. Les observations effectuées le long de ce forage (*cf.* log lithostratigraphique en Annexe 1) indiquaient que près de 1338 m de Permien gréseux avaient été recoupés ainsi que 157 m de grès au Trias inférieur et que ces horizons avaient produit de l'eau salée. Le forage de Lezéville 1 (LZV1), réalisé en 1989, n'avait traversé le Buntsandstein que sur 51 m et n'avait donc pu atteindre les niveaux du Buntsandstein inférieur ni ceux du Permien.

Une étude plus récente menée par l'IRSN en 2003 (IRSN, 2003) et basée sur l'inventaire des ressources géothermiques de la région Champagne-Ardenne (BRGM, 1980b) concluait quant à elle que l'aquifère des grès du Trias inférieur de Lorraine constituait un réservoir aquifère assez bien connu et exploité pour la géothermie très basse température à l'Est d'une ligne Nord-Sud passant approximativement par Nancy. Vers l'ouest, au droit du fossé tectonique de la Marne, cette étude précisait, d'une part que l'aquifère disparaît progressivement (biseau stratigraphique) et que l'épaisseur et la productivité des grès diminuent très rapidement, d'autre part que la salinité augmente en parallèle fortement pour atteindre 270 g/L de NaCl dans le secteur de Trois-Fontaines (Marne). Enfin, cette étude indiquait que, dans le secteur du site de Meuse/Haute-Marne (zone actuellement retenue pour le projet Cigéo), le potentiel en ressource géothermique que pourrait représenter l'aquifère des grès du Trias inférieur de Lorraine devait être analysé en termes économiques et techniques, en raison de sa très faible productivité et, surtout, des problèmes importants de corrosion qui seraient rencontrés lors de son exploitation.

De son côté l'Andra indiquait dans son Dossier en 2005 (Andra, 2005), en se basant sur l'analyse des forages pétroliers préexistants sur le secteur atteignant le Lias ou le Trias (Bourquin *et al.*, 2006) et de ses forages au Dogger (MSE101, HTM102, EST103, EST201, EST204, EST207, EST210, EST312, EST322, EST342 et EST361) que, d'une part le gradient géothermique du secteur était normal voire faible, d'autre part que les seuls aquifères présentant un éventuel intérêt pour la géothermie basse énergie, à savoir le Trias inférieur et le Rhétien, possédaient une salinité très élevée et une faible transmissivité, défavorables à un projet d'exploitation.

Sur la base du dossier fourni par l'Andra et des connaissances géologiques de l'époque, l'IRSN, en utilisant les mêmes sources d'information concluait en 2005 (IRSN, 2005) qu'il n'existait pas de potentiel géothermique rentable à l'aplomb du site, même dans le Trias, le niveau *a priori* plus producteur, pour des raisons de salinité³ excessive des aquifères et de leur faible capacité de production d'eau. Les connaissances géologiques en 2005 étaient basées essentiellement sur les rares forages pétroliers atteignant le Trias (Figure 1a) dont l'objectif était en priorité de qualifier les réservoirs d'hydrocarbures (e.g. le Rhétien) qui apparaissent beaucoup moins poreux et perméables en Meuse/Haute-Marne que plus à l'ouest (Marne, Aube) où ils sont toujours exploités.

Le manque de données, en particulier sur les propriétés hydrauliques des niveaux poreux et perméables des formations triasiques, a mis en lumière le besoin de réaliser un forage afin d'investiguer les niveaux plus profonds et potentiellement aquifères⁴ (Trias inférieur et formations antérieures du Permien, Carbonifère...). Ce besoin a été au centre de la décision de lancer le programme TAPPS 2000 dont les objectifs étaient plus largement destinés à (i) acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement global du système hydrogéologique et des échanges verticaux entre les formations et (ii) d'évaluer les ressources géothermiques potentielles sur la zone. Ce programme a conduit à la réalisation, par l'Andra en 2007, du forage subvertical EST433.

3.2 ANALYSE DES DONNEES DU FORAGE EST433

Ce forage est situé au Nord-Est de la commune de Montiers-sur-Saulx (Figures 1a et 1b) et au centre de la Zone de Transposition (ZT)⁵ d'environ 250 km². Il est par ailleurs localisé à moins de 5 kilomètres de la Zone d'Intérêt pour une Reconnaissance Approfondie (ZIRA)⁶ d'environ 30 km² de superficie. L'évaluation de la ressource géothermique au travers du forage EST433 a été réalisée par l'analyse successive des propriétés hydrauliques, de la température, de la porosité et de la composition géochimique des aquifères identifiés. Les principaux résultats de cette analyse sont présentés dans les chapitres suivants.

³ La salinité joue un rôle majeur sur la corrosion des matériaux métalliques par les composants dissous qui la compose. Les chlorures, les sulfates et autres espèces sensibles aux réactions d'oxydo-réduction et les bactéries peuvent engendrer respectivement une corrosion par piqûration, généralisée et bactérienne. Ces problèmes ont conduit à arrêter de nombreux forages dans les débuts de l'exploitation géothermique du Dogger du Bassin de Paris alors que la salinité y est modérée comparée à celle du Trias. Les recherches et développements techniques récents permettent maintenant de limiter ces problèmes de corrosion soit par l'emploi d'une surépaisseur ou d'une protection cathodique (corrosion généralisée), soit par l'utilisation d'aciers plus résistants enrichis en Cr (corrosion par piqûration), soit encore par l'emploi de bactéricides (corrosion bactérienne). Actuellement de nombreux forages en phase d'exploitation dans le Dogger font l'objet d'une réhabilitation par rechemisage, ajout d'une surépaisseur ou d'un traitement antibactérien.

⁴ Un aquifère est une formation géologique ou une roche à la fois suffisamment poreuse et/ou fissurée et perméable pour qu'un fluide puisse s'y déplacer.

⁵ Zone dans laquelle l'Andra estime que les données acquises dans le laboratoire souterrain de Meuse/Haute-Marne peuvent être transposées au regard de son homogénéité géologique, de ses propriétés mécaniques, hydrauliques et de transfert dans le Callovo-Oxfordien et enfin de l'absence de failles.

⁶ Zone d'intérêt pour une recherche approfondie, d'environ 30 km², proposée par l'Andra fin 2009 au regard de ses caractéristiques géologiques afin d'y implanter les installations souterraines de Cigéo destinées à recevoir les déchets français de haute activité (HA) et de moyenne activité à vie longue (MAVL).

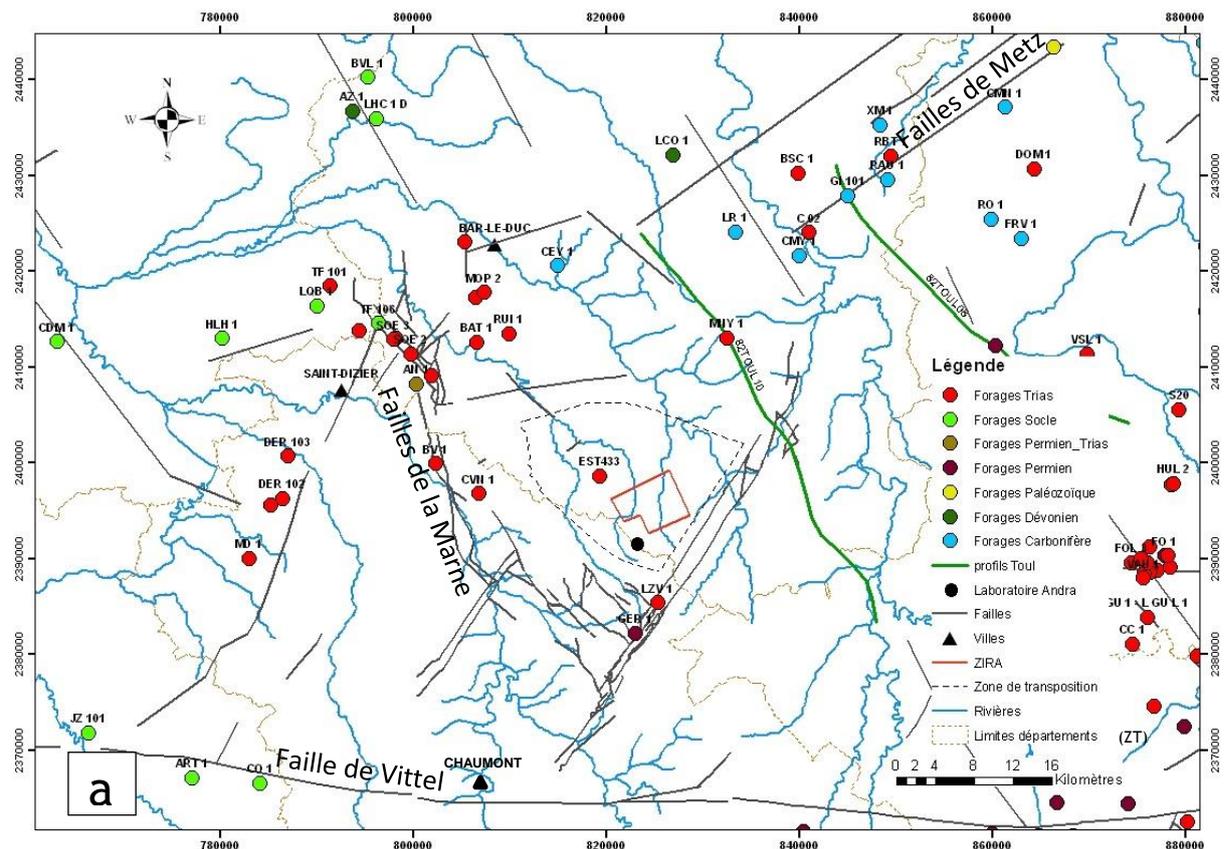


Figure 1a : Localisation de la ZT et de la ZIRA dans les secteurs de Meuse et Haute-ainsi que des forages pétroliers

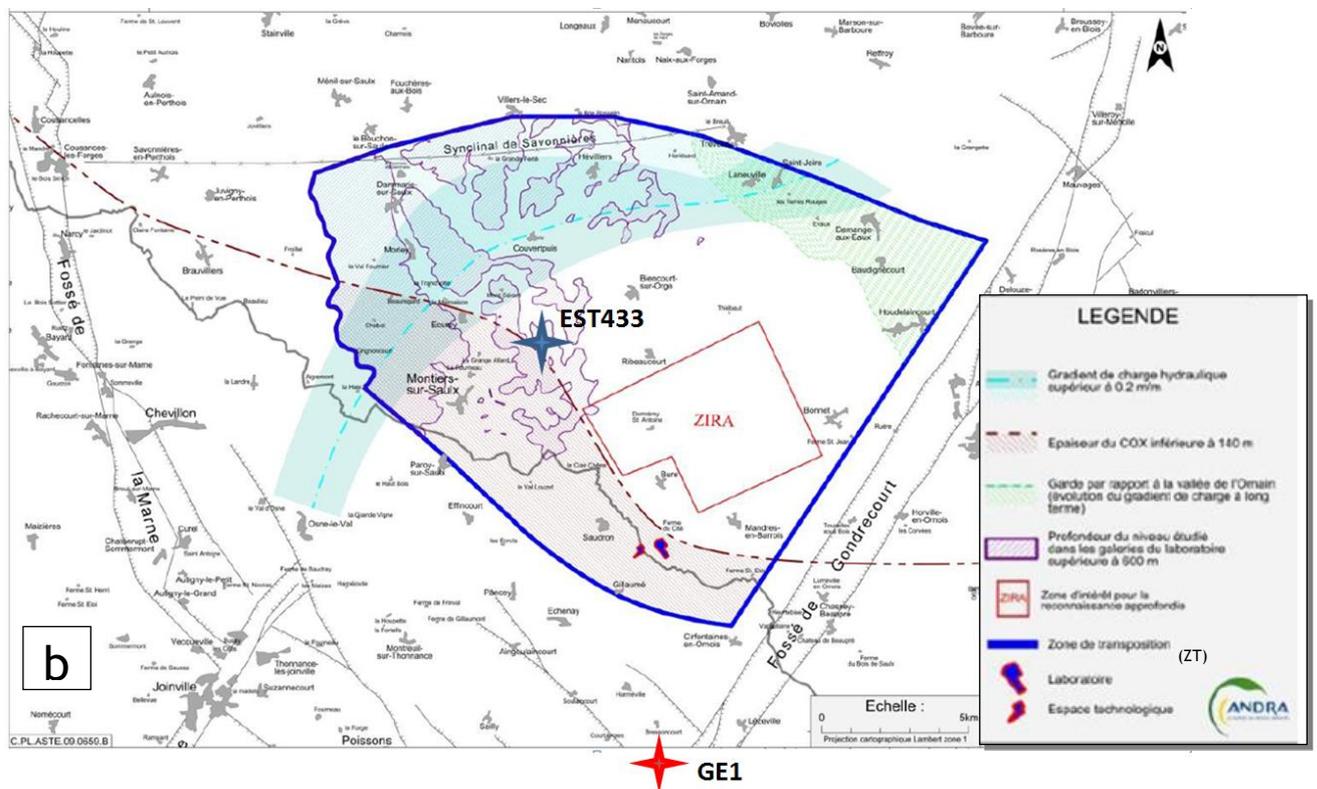


Figure 1b : Localisation de la ZT et de la ZIRA dans les secteurs de Meuse et Haute-Marne ainsi que des forages EST433 et GE1 situés respectivement à proximité des communes de Montiers-sur-Saulx et Germisay (d'après rapport Andra C.PL.ASDTE.0161F)

3.2.1 LITHOSTRATIGRAPHIE ET PROPRIETES DES AQUIFERES

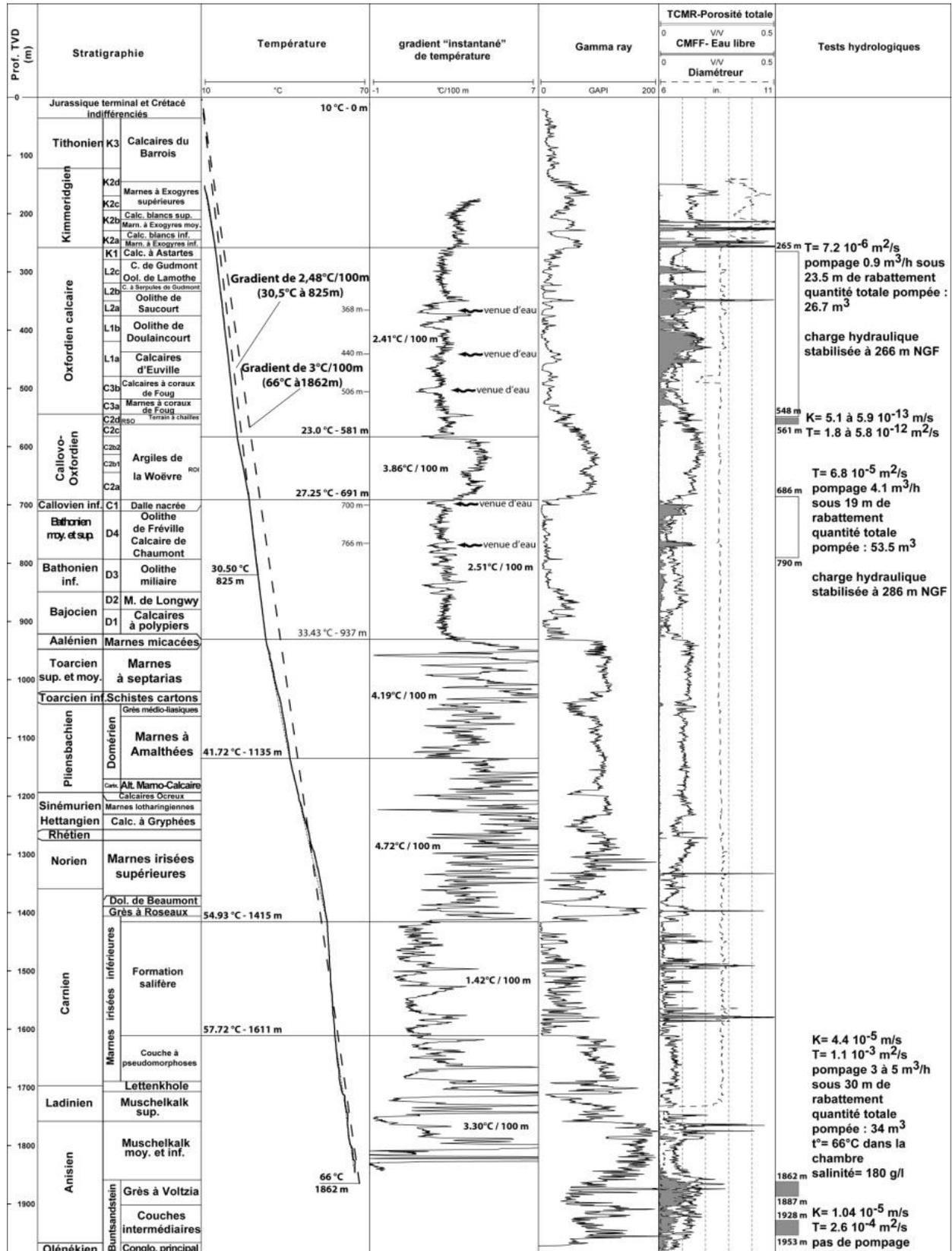


Figure 2 : Colonne lithostratigraphique du forage EST433 avec synthèse des mesures hydrogéologiques et thermométriques (Landrein et al., 2013)

Le forage EST433 a recoupé toute la série sédimentaire jusqu'au conglomérat principal (Landrein *et al.*, 2013, Figure 2). Outre la lithostratigraphie identifiée par analyse des carottes et débris de forage (cuttings), la Figure 2 montre aussi les diagraphies de température, discutées au chapitre 3.2.2, celles de rayonnement gamma naturel (GR⁷) et de Résonance Magnétique Nucléaire (RMN par outils TCMR et CMFF⁸) et les résultats de tests hydrauliques. Les niveaux stratigraphiques recoupés par le forage EST433 sont, du bas vers le haut de la série :

1) **Trias inférieur - Buntsandstein moyen et supérieur (120,6 m)** qui comprend trois faciès.

Le **conglomérat principal**, qui est un conglomérat polygénique à galets centimétriques recoupé sur 11 m et attribué à l'Olénékien. Vers 1978 m TVD⁹, dans le conglomérat principal, la porosité par teneur en eau a été estimée à 9,84 %, valeur conforme aux valeurs de TCMR⁸. Un test hydraulique, réalisé en 1955 entre 2195 et 2227 m, aurait produit près de 2 m³ d'eau boueuse fortement salée, ce qui laisse supposer l'existence d'un aquifère au droit de cet intervalle. Ce conglomérat correspond au cycle sédimentaire B4, d'après la colonne lithostratigraphique établie par Bourquin *et al.* en 2006 (Figure 3) ce qui le situe au-dessus des grès vosgiens et du conglomérat basal. Cela pourrait signifier que plusieurs dizaines de mètres de grès et conglomérats potentiellement aquifères n'auraient pas été recoupés par le forage EST433. Il en est de même pour le Permien situé sous le Trias. Les connaissances actuelles sur le Bassin de Paris permettent de supposer l'existence d'un bassin argilo-gréseux daté du Permien allant de l'Île de France aux Vosges, qui pourrait renfermer de tels niveaux de grès et conglomérats (BRGM, 1980a). Dans le secteur de Meuse/Haute-Marne, seul le forage Germisay 1 a recoupé le Permien entre 1429 m et 2757 m (Figure 1 et Annexe 1).

Les **couches intermédiaires**, argilo-gréseuses qui ont été recoupées entre 1909 et 1948 m TVD. Les diagraphies TCMR⁸ donnent des porosités totales comprises en moyenne entre 12 et 15 % et des porosités eau libre par CMFF⁸ inférieures à 10 %. Vers environ 1932 m TVD, une valeur de porosité par autoradiographie a été évaluée à 32 % (Ploquin, 2011). La transmissivité¹⁰ a été estimée à $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ par le groupement SIS¹¹, lors du test hydraulique 1 effectué par type *slug-test*¹² sur 25 m entre 1928 et 1953 m TVD, soit une conductivité hydraulique (K) de $1,04 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ (cf. Tests hydrogéologiques, Figure 2).

⁷ La mesure des rayons gamma naturels permet de détecter les variations de la radioactivité naturelle attribuables aux changements dans la teneur en éléments traces comme l'uranium (U) et le thorium (Th), et en potassium (K), élément majeur des roches. La diagraphie par rayons gamma est un outil important pour la cartographie des lithologies et pour la corrélation stratigraphique. Dans les roches sédimentaires, ces diagraphies permettent de distinguer aisément les formations argileuses car elles contiennent plus de potassium et autres éléments en trace que les grès et les carbonates.

⁸ Les diagraphies RMN donnent accès aux porosités totales (volume de pores sur le volume total) via l'outil TCMR (*Total Combinable Magnetic Resonance*) et aux porosités "eau libre" (volume d'eau mobilisable par pompage sur le volume total) via l'outil CMFF (*Combinable Magnetic resonance Free Fluid* - calibré par mesures pétrophysiques).

⁹ TVD *True Vertical Depth* - Profondeur verticale réelle, exprimée en mètres, par rapport à la tête du forage.

¹⁰ La transmissivité (T) et la conductivité hydraulique (K) sont des propriétés hydrauliques de l'aquifère qui représentent sa capacité à conduire l'eau. La conductivité hydraulique est encore appelée coefficient de perméabilité de Darcy, elle relie le flux d'eau au gradient de charge et s'exprime en m/s. T est égale à K intégrée sur l'épaisseur verticale de l'aquifère testé et s'exprime en m²/s.

¹¹ SIS pour Sauniers & Associés - Solexperts - Intera.

¹² Essai hydraulique aussi dénommé "essai d'injection-relaxation". Il consiste à injecter ou laisser produire de l'eau à débit constant pendant un temps déterminé, puis à stopper l'injection/la production et à mesurer la relaxation de pression après fermeture.

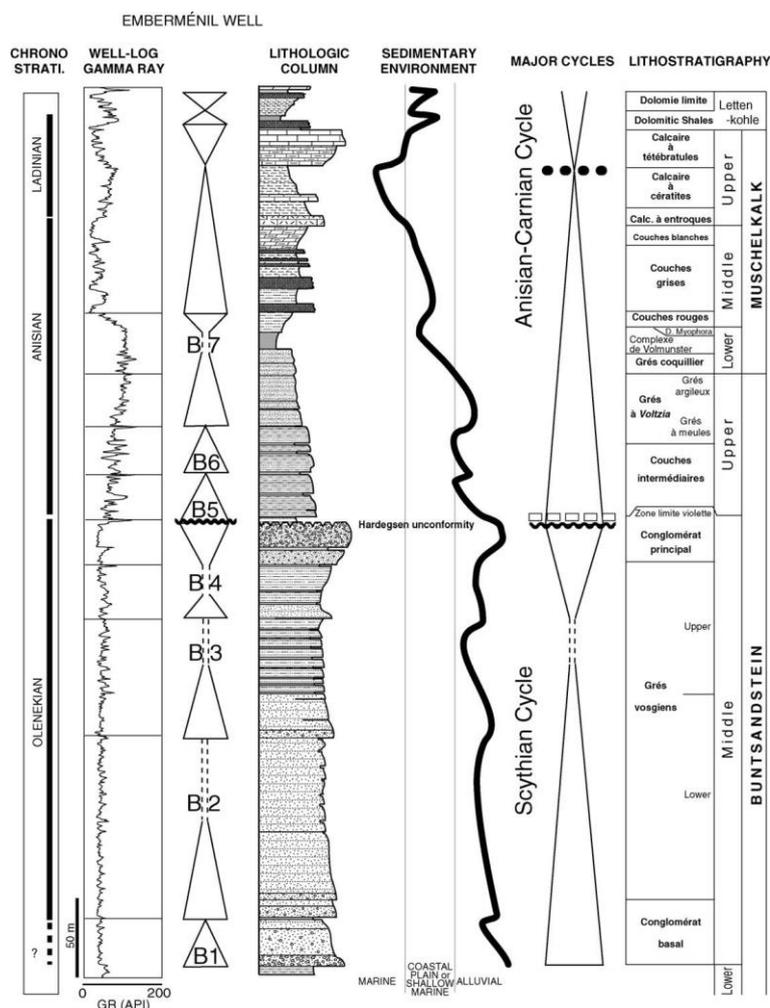


Figure 3 : Colonne lithostratigraphique du Trias inférieur (Bourquin et al., 2006)

Les grès à Voltzia¹³, qui ont été recoupés sur 40 m entre 1860 et 1900 m TVD. Les diagraphies RMN⁸ donnent des porosités totales (TCMR⁸) comprises en moyenne entre 16 et 18 % (avec deux pics extrêmes à 28 %) et des porosités "eau libre" (CMFF⁸) de 12 à 14 %. Ces porosités totales (TCMR⁸) sont à comparer aux porosités neutron et densité (indicateurs de porosité totale) qui sont mesurées dans l'aquifère géothermique du Dogger du centre du Bassin de Paris (13 à 18 % d'après Rojas et al., 1989). Vers environ 1868 m TVD, la porosité totale (obtenue par une mesure pétrophysique de la teneur en eau) est de 20,34 % (Nagra, 2011). Vers environ 1873 m TVD, une porosité de 24 % a été mesurée (déterminée par autoradiographie après imprégnation de résine dopée au radiocarbone) (Ploquin, 2011). La transmissivité des grès à Voltzia a été évaluée à $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$, après un essai hydraulique par pompage réalisé entre 1862 et 1887 m TVD (test 2, d'après Figure 2). Ce résultat équivaut à une conductivité hydraulique moyenne (K) de $4,43 \pm 0,02 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ en considérant un intervalle de confiance à 95 %. Cette valeur de conductivité hydraulique et son incertitude apparaissent plausibles compte tenu du volume important d'eau produit (35 m³). Cet essai a été réalisé sous 30 m de rabattement, ou baisse du niveau d'eau, lors du pompage au débit moyen de 3 à 5 m³/h (débit maximal autorisé de la pompe). Le volume d'eau collecté lors de l'essai a permis de considérer l'eau produite comme étant représentative de l'eau de l'aquifère des grès à Voltzia et d'obtenir sa composition chimique et isotopique avec un assez bon niveau de confiance.

¹³ Le Voltzia était un conifère caractéristique du Buntsandstein supérieur (Olénékien).

2) Trias moyen - Muschelkalk (152,3 m)

Il est essentiellement composé d'argiles gréseuses coiffées par des dépôts dolomitiques. Le test hydraulique n°3, prévu initialement sur cet horizon, n'a pu être réalisé en raison du colmatage de la crépine de la pompe par la boue de forage. Néanmoins, les diagraphies RMN⁸ réalisées au droit de cet horizon n'ont pas décelé de niveau à « eau libre », ce qui laisse supposer que la formation n'est pas aquifère.

3) Trias supérieur - Carnien, Norien et Rhétien (441 m)

Le Carnien (323 m) démarre par des marnes irisées (77 m) silteuses à nodules ou bancs d'anhydrite. Il est suivi, d'une formation salifère (200 m) constituée de bancs de halite (NaCl, équivalent de notre sel de cuisine) massive à nodules de gypse et parfois d'anhydrite et par des argiles indurées à traces charbonneuses (10 m). La sédimentation se poursuit ensuite par des grès argileux avec des grès fins (17 m), appelés grès à Roseaux, suivis de bancs dolomitiques massifs avec quelques intercalations d'anhydrite (9 m), nommés dolomie de Beaumont.

Le Norien (109 m) est représenté par un ensemble appelé Marnes irisées Supérieures constituées d'argiles contenant du gypse et de l'anhydrite (55 m) puis d'argiles dolomitiques à fins niveaux de dolomie et très fins niveaux d'anhydrite et de gypse (38 m). L'ensemble se termine par de l'argile (16 m).

Le Rhétien (9 m) se caractérise par quelques intercalations gréseuses au sein d'argiles (4 m) suivies du faciès des Argiles de Levallois, sus-jacent (5 m). Alors que le Rhétien est connu plus à l'ouest (Marne et Aube) pour être une formation aquifère et parfois même un réservoir d'Hydrocarbures Conventionnels (*i.e.* pétrole extrait directement par pompage), les diagraphies RMN⁸ n'ont pas révélé de niveau à « eau libre » dans le forage EST433.

4) Jurassique inférieur - Lias (290 m)

Du Rhétien au Toarcien supérieur suivent ensuite près de 260 m de formations majoritairement argileuses identifiées par diagraphies de Gamma ray⁷. Cet ensemble argileux non aquifère est encadré par les argiles calcaires et des calcaires marneux (30 m) de l'Hettangien et du Sinémurien inférieur et par les formations du Dogger (Jurassique moyen).

5) Jurassique moyen - Dogger (200 m)

Cet ensemble (de l'Aalénien au Callovien) est caractérisé par des formations essentiellement carbonatées. Les diagraphies et tests hydrauliques ont permis d'identifier deux niveaux poreux et perméables. Un pompage global réalisé entre 686 et 790 m TVD et sollicitant ces deux venues d'eau a permis d'estimer une transmissivité (T) de l'ensemble de $6,8 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, donnant une conductivité hydraulique ou perméabilité de Darcy (K), de $6,5 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$, soit environ deux ordres de grandeur inférieure à celle estimée pour les grès à Voltzia. Sachant que plus de 95 % du débit aurait été produit par les 12 m de niveau poreux du Callovien, on peut estimer la perméabilité (K) de cet horizon à $5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$.

6) Jurassique supérieur - Malm (403 m)

Le passage du Jurassique moyen au Jurassique supérieur est marqué par le dépôt du Callovo-Oxfordien (150 m). Cette formation argileuse, considérée comme la couche hôte potentielle pour le projet Cigéo, a confirmé sa très faible perméabilité (K)¹⁰ avec des valeurs comprises entre $5,1 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ et $5,9 \cdot 10^{-13} \text{ m/s}$ pour l'intervalle C2d compris entre 551 et 561,36 m TVD (*cf.* figure 2). Vient ensuite la formation de l'Oxfordien calcaire (283 m). Cette formation a fait l'objet d'un essai hydraulique court réalisé entre 265 et 548 m TVD. Cet essai a donné une transmissivité (T) globale moyenne au droit de la plate-forme de $7,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, soit une perméabilité (K) moyenne de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$.

En conclusion, les relevés géologiques (lithologie, stratigraphie) effectués lors du forage EST433 couplés aux mesures pétrophysiques (porosité), diagraphiques (profils GR et RMN) et aux tests hydrauliques menés par l'Andra ont permis d'identifier trois zones poreuses, perméables et productrices, donc aquifères, localisées dans : i) l'Oxfordien calcaire entre 265 et 548 m TVD, ii) le Bathonien moyen et supérieur (Dogger) entre 686 et 790 m TVD et iii) les grès à Voltzia entre 1860 et 1900 m TVD et les grès intermédiaires du Buntsandstein entre 1908 et 1948 m TVD. Des trois horizons aquifères identifiés, les grès du Buntsandstein, et plus particulièrement les grès à Voltzia testés entre 1862 et 1887 m TVD, présentent les meilleures propriétés hydrauliques avec des valeurs de transmissivité et de perméabilité, respectivement de $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ et $4,4 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, seules compatibles avec une exploitation géothermique de type Basse Energie. Une seconde phase de tests était prévue avec des pompages de longue durée, des diagraphies géochimiques et un test d'injectivité, ces tests ayant pour objectif d'évaluer la productivité (débit) des grès du Trias inférieur dans leur ensemble (grès à Voltzia et grès intermédiaires du Buntsandstein). Cependant, le coincement d'une sonde à la base du Trias n'a pas permis de les réaliser.

3.2.2 LE GRADIENT GEOTHERMIQUE

Les profils de température ont été obtenus au moyen de 2 outils (EMS - *Environmental Measurement Sonde* jusqu'à 1710 m TVD et PSPT - *combined Pressure and Temperature Sensor* - jusqu'à 1847 m TVD) et ceci après 5 mois sans opération, ce qui laisse supposer que les fluides ont eu le temps de s'équilibrer avec leur encaissant. Il n'y a pas eu de mesure diagraphique au-delà de 1847 m TVD du fait du comblement du forage sur les 140 derniers mètres. Néanmoins, une mesure ponctuelle à 66°C a pu être réalisée dans les grès à Voltzia. Cette température, quoique modeste, est compatible pour cet horizon avec une exploitation géothermique de type basse énergie (BE). Les résultats obtenus sur le reste de la colonne, qui sont concordant pour les deux outils, indiquent un gradient géothermique moyen de l'ordre de 3°C/100 m sur la colonne sédimentaire avec des valeurs sensiblement plus faibles dans la halite (2,15°C/100 m) et plus élevées dans les niveaux argileux (3,7 à 3,9°C/100 m) en cohérence avec la conductivité thermique des minéraux constitutifs de ces formations.

Ce gradient géothermique moyen de 3°C/100 m peut être qualifié de normal pour la France car il est comparable à ce qui est connu en dehors des zones anomaliques. De telles zones peuvent être liées à la présence de points chauds par remontée volcanique, comme il en existe dans et autour du Massif Central, ou à une remontée des isothermes lors d'une période d'amincissement de la croûte terrestre avec mise en place de circulations de fluides sous forme de cellules de convection (Le Carlier *et al.*, 1993). Ce dernier cas est par exemple observable en bordure du fossé Rhénan dans la région de Soultz-sous-Forêts où le gradient géothermique atteint actuellement 10,5°C/100 m dans la couverture sédimentaire contre seulement 3,8°C/100 m dans le granite sous-jacent.

La linéarité du gradient géothermique mesurée dans le forage EST433 laisse supposer l'absence de telles anomalies dans les sédiments anté-triasiques des bassins permien et carbonifères. Ces sédiments seraient constitués majoritairement de grès et de schistes avec une épaisseur qui pourrait atteindre 4000 m au droit du site (Beccaleto *et al.*, 2011). Cette évaluation est déduite des données de forages profonds (*cf.* Annexe 1 où le Permien atteint plus de 1300 m d'épaisseur) et de la réinterprétation de profils sismiques (Beccaleto *et al.*, 2011).

En revanche, le gradient pourrait augmenter dans le socle granitique situé à plus de 6 km de profondeur, car la conductivité thermique (ou aptitude d'une roche à conduire la chaleur) du granite (de l'ordre de $3 \pm 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ pour le granite saturé d'après Rosener, 2007) est connue pour être légèrement supérieure à la conductivité thermique moyenne des sédiments (comprise entre 0,5 et $2 \pm 0,6 \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$). Néanmoins, exploiter de tels réservoirs à si grande profondeur relève encore de nos jours du domaine expérimental.

Il convient de retenir que la température de 66 °C mesurée dans les grès à Voltzia est compatible pour cet horizon avec une exploitation géothermique de type basse énergie (BE).

3.2.3 LA COMPOSITION DE L'EAU INTERSTITIELLE DU TRIAS

Une eau issue de l'aquifère des grès à Voltzia a été collectée en fin de pompage longue durée (intervalle 1861 à 1886 m TVD) après production de 35 m³ d'eau au débit de 4 à 5 m³/h sous rabattement de 30 m. Le colmatage partiel de la crépine de la pompe par les boues de forage a pu faire office de filtre et retenir une bonne partie des particules fines (argileuses notamment) produites lors du test hydraulique. Ce colmatage n'a donc pas permis d'estimer avec précision la quantité de fines extraites avec l'eau pompée. Or, l'estimation de la quantité de fines est un paramètre important pour évaluer le type de traitement à appliquer (filtration, traitement chimique, maintien sous pression du fluide...) dans le cas d'une éventuelle réinjection lors d'une exploitation par doublet géothermique. Cette eau a été analysée par l'IRSN : elle présente un faciès chloruré-sodique (Cl-Na) avec une salinité de 153 g/L (balance électrique à 2,7 %) contre 180 g/L annoncé par l'Andra, soit environ 5 fois la concentration de l'eau de mer (35 g/L). Cet écart reflète l'incertitude d'environ 10 % relative à l'analyse de cette saumure¹⁴ qui nécessite de nombreuses dilutions.

Le volume produit (35 m³), la clarté de l'eau et sa composition chimique et isotopique permettent de supposer que l'eau collectée est représentative de l'eau interstitielle. En effet, les teneurs en ²H et ¹⁸O sont dans le domaine des eaux de la base du Lias et du Keuper supérieur. De plus, les valeurs du rapport Cl/Br, voisines de 88, sont également proches de celles des saumures du Keuper supérieur situées plus à l'ouest (Fontes & Matray, 1993 ; Bensenouci *et al.*, 2011 ; Millot *et al.*, 2011). Les sels utilisés dans les boues de forage sont en général beaucoup plus appauvris en Br⁻ et une pollution par ces derniers conduirait à augmenter très fortement le rapport. Ceci pourrait être confirmé par l'analyse de la boue utilisée, si celle-ci est encore disponible. Il convient également de rappeler que la forte chlorinité de cette saumure (environ 90 g Cl⁻/L) est susceptible d'induire une forte corrosion des aciers (tubings et pompe notamment) qui pourraient être utilisés en cas d'exploitation du réservoir.

¹⁴ On peut qualifier cette eau de saumure, terme généralement utilisé pour désigner une eau dont la salinité atteint ou dépasse 100 grammes de sels dissous par litre de solution, soit 100g/L.

4 DISCUSSION SUR LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE ET LES CONDITIONS DE SON EXPLOITATION

4.1 TYPES D'EXPLOITATIONS GEOTHERMIQUES ENVISAGEABLES

Comme suite à l'analyse de ces données, les principaux résultats concernant le potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne (MHM) peuvent être résumés ainsi :

1) La géothermie TBE ne concerne que les couches très superficielles situées bien au-dessus du Callovo-Oxfordien. Les perturbations qui seraient occasionnées par une telle exploitation ne sont pas susceptibles d'affecter l'installation en profondeur. Ce type d'exploitation ne constitue donc pas un enjeu de sûreté pour le stockage géologique.

2) Les informations concernant le potentiel géothermique BE dans les environs du site s'appuient sur les forages réalisés entre 1956 et 1994, dans les environs de la ZIRA (Figure 1a) et, depuis 2007, par le forage EST433 (Figure 1b). Il ressort de ces informations que :

i) le Trias inférieur présente une perméabilité comprise entre $\sim 10^{-5}$ et $4 \cdot 10^{-5}$ m/s et une température de $\sim 66^\circ\text{C}$ qui sont équivalentes à celles relevées au niveau de la formation du Dogger¹⁵ en Ile de France, formation qui y est exploitée par géothermie BE. Ainsi, le Trias de Meuse/Haute-Marne ne pourrait pas produire de l'électricité mais est potentiellement exploitable pour de la géothermie de type BE ;

ii) le Lias et le Callovo-Oxfordien ne sont pas aquifères. Ils ne présentent donc pas d'intérêt pour la géothermie BE à HE ;

iii) le Dogger et l'Oxfordien sont localement aquifères avec une perméabilité de 2 à 3 ordres de grandeur plus faible que le Trias et des températures inférieures à 30°C . Ils ne sont donc pas intéressants pour la géothermie BE.

3) La géothermie ME et HE nécessiterait d'exploiter des couches plus profondes que le Trias, non atteintes par le forage EST433. Ce dernier a néanmoins permis de confirmer que l'augmentation de température avec la profondeur en Meuse/Haute-Marne (max. $3^\circ\text{C}/100\text{ m}$) s'inscrit dans la moyenne nationale. Compte tenu de ce gradient géothermique, il serait nécessaire de rechercher des niveaux aquifères (ou de les fracturer) à des profondeurs minimales de 3000 m pour de la géothermie ME et de 5000 m pour de la géothermie HE. Sous le Trias, les connaissances actuelles permettent de postuler l'existence d'un bassin argilo-gréseux daté du Permien, allant de l'Ile de France aux Vosges et d'un autre, daté du Carbonifère, qui pourraient renfermer des niveaux de grès et conglomérats (BRGM, 1980a) potentiellement exploitables par géothermie ME ou HE. Cependant, ils sont très peu connus dans le secteur de Meuse/Haute-Marne où seul le forage de Germisay 1 a traversé le Permien sur plus de 1300 m entre 1429 m et 2757 m (Figure 1 et Annexe 1) sans en atteindre la base. Ce forage aurait produit de l'eau salée (salinité et débit inconnus) vers 2200 m.

¹⁵ Les niveaux producteurs principaux du Dogger géothermique (entre 50 et 70 % de la production) se situent dans l'ensemble oolithique du Bathonien (constitué par l'oolithe blanche principalement). Ce dernier a une épaisseur comprise entre 10 et 30 m, une perméabilité globale comprise entre 1 et 6 D (soit une conductivité hydraulique comprise entre 1 et $6 \cdot 10^{-5}$ m/s) et possède des porosités comprises entre 12 et 18 % (Rojas *et al.*, 1989).

Parmi les couches géologiques recoupées par le forage EST433, seule la formation argilo-gréseuse du Trias inférieur présente *a priori* un potentiel géothermique compatible avec une exploitation de type Basse Energie (BE). Cette ressource n'a toutefois aucun caractère exceptionnel en comparaison d'autres régions de France qui présentent un gradient géothermique nettement plus favorable (comme par exemple, le Massif Central et l'Alsace). L'existence de ressources au niveau du Permien et, au-delà, à des niveaux inférieurs est à ce stade hypothétique. L'IRSN estime qu'elle doit être postulée dans le cadre de l'étude de sûreté.

4.2 COMPARAISON DE LA RESSOURCE BASSE ENERGIE IDENTIFIEE PAR EST433 AVEC CELLE DU DOGGER GEOTHERMIQUE

4.2.1 CARACTERISTIQUES DES RESSOURCES

Les données obtenues pour les grès du Buntsandstein du forage EST433 sont comparées dans le Tableau 1 à celles acquises sur 110 forages du domaine géothermique BE du Dogger carbonaté du Bassin de Paris (Rojas *et al.*, 1989). Les faciès carbonatés sollicités de l'aquifère du Dogger sont le Comblanchien, l'Oolithe blanche et les Alternances et les zones productrices sont comprises entre 10 et 26 m d'épaisseur, c'est-à-dire comparables à celles testées dans le forage EST433 (25 m).

Pour faciliter la comparaison, les données de conductivité hydraulique (K) et de transmissivité (T) du forage EST433 ont été converties en Darcy (1 Darcy = $0,987 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$). La formule permettant de convertir le Darcy, qui a la dimension d'une perméabilité intrinsèque (k, en m^2), en conductivité hydraulique (K, en m/s) est la suivante :

$$K = \frac{k \cdot \rho \cdot g}{\mu}$$

où ρ représente la masse volumique du fluide (en kg/m^3), g l'accélération de la pesanteur (en m/s^2) et μ la viscosité dynamique (en Pa·s ou $\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$).

	Dogger	Buntsandstein	
Référence	Rojas et al., 1989	Landrein et al., 2013	
Faciès	Tous	Grès à Voltzia	Couches intermédiaires
Nombre forages	110	1	1
Temp. (°C)	69,5 ± 7,8	66	67?(extrapolée)
T=Kh (D.m)	38±23 (max 114)	114	25
h (m)	18 ± 8	25	25
K (D)	2,2±1,4 (max 11)	4,6	1
Porosité totale (%)	15,6±2,4	16-18 TCMR	12-15 TCMR
Salinité (g/L)	1-35	180	Non déterminée

Tableau 1 : Données comparées des valeurs de température, porosité, salinité et paramètres hydrauliques exprimés en Darcy (D), des Grès à Voltzia et des Couches intermédiaires du Buntsandstein du forage EST433 avec celles des carbonates (tous faciès en incluant le Comblanchien, l'Oolithe Blanche et les Alternances) du domaine géothermique du Dogger du centre du Bassin de Paris.

Le Tableau 1 montre que les données acquises sur le Buntsandstein à l'aide du forage EST433, y compris les hauteurs testées, sont majoritairement dans la gamme de celles du domaine géothermique du Dogger carbonaté du centre du Bassin de Paris. La seule différence significative concerne la salinité des fluides (eau salée entre 1 et 35 g/L pour le Dogger, saumure de salinité supérieure à 150 g/L pour le Buntsandstein).

4.2.2 EXTENSION DES RESSOURCES

L'extension potentielle ou superficie de la ressource de Meuse/Haute-Marne dans le secteur peut être évaluée à partir de deux critères : une température supérieure à 60°C et l'homogénéité supposée des propriétés hydrauliques dans la zone en termes de conductivité hydraulique et de hauteur de zone productrice.

Cette superficie a été évaluée par l'IRSN à partir de la géométrie du réservoir du Buntsandstein en s'appuyant, d'une part sur la base de données de forages et des profils sismiques, d'autre part sur l'hypothèse d'un gradient géothermique de 3°C/100 m :

- L'aire de l'ensemble Buntsandstein concernée par une température supérieure à 60°C est donnée en Figure 4a ;
- La limite correspondant à cette température ($T > 60^\circ\text{C}$) a été superposée au domaine d'extension des grès à Voltzia (Bourquin *et al.*, 2006) sur la Figure 4b et donne une superficie d'environ 3 000 km².

A titre de comparaison, les limites de la ZT (~ 250 km²) et celles du domaine géothermique du Dogger carbonaté exploité en BE dans la région parisienne (~ 10 000 km²) sont également représentées sur ces deux figures.

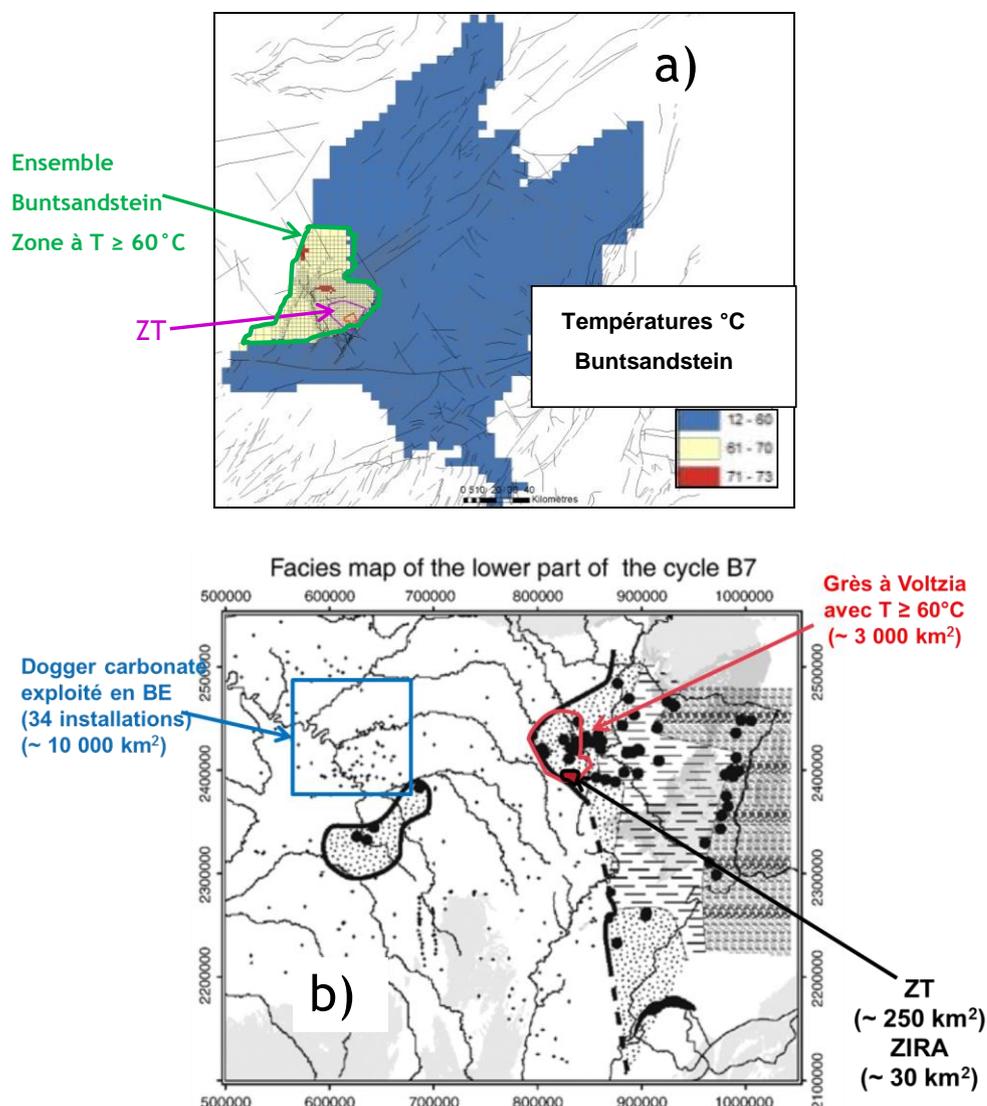


Figure 4 : Aires concernées par des températures supérieures à 60°C en a) pour l'ensemble du Buntsandstein (limite en vert) et b) pour les seuls grès à Voltzia (limite en rouge). Comparaison aux aires de la ZT et du domaine géothermique du Dogger carbonaté. Les points noirs symbolisent les forages ayant permis à Bourquin *et al.* (2006) d'établir cette carte du cycle sédimentaire B7 des grès à Voltzia.

4.3 IMPACT DU PROJET CIGEO SUR L'EXPLOITATION POTENTIELLE DE LA RESSOURCE

S'agissant de la possibilité d'exploiter une ressource géothermique à proximité de Cigéo, deux aspects doivent être considérés. Le premier concerne l'éventualité d'une contamination de l'exploitation géothermique et les risques associés pour l'environnement et la population. Le second concerne la possible privation de l'accès à la ressource du fait de la présence du stockage à son aplomb. Concernant le risque de contamination radioactive d'une exploitation géothermique, l'IRSN n'a pas connaissance d'une étude spécifique réalisée à ce jour sur ce sujet mais rappelle qu'en tout état de cause, une telle étude devra être intégrée dans la démonstration de sûreté.

Concernant l'accès à la ressource, l'IRSN a évalué les éléments présentés suivants. Comme présentés ci-avant, la ressource potentielle des grès à Voltzia s'étendrait sur une superficie d'environ 3000 km², soit une centaine de fois la superficie de la ZIRA (~30 km²). A noter que la ressource principale serait majoritairement située au nord et à l'ouest de la ZIRA. Les fortes analogies en termes de débit de production entre les grès à Voltzia et le Dogger géothermique nous permettent de considérer en première approximation que la zone d'influence hydraulique d'une exploitation par doublet dans le Buntsandstein devrait être d'extension similaire à celle observée dans le Dogger carbonaté. En effet, si l'on prend l'exemple d'une exploitation géothermique du Dogger économiquement viable, comme celle du doublet double de La Courneuve (Figure 5), on peut estimer que l'aire d'influence¹⁶ d'une exploitation par doublet simple en termes de champ de pression couvrirait une superficie comparable à celle de la ZIRA. Ce résultat revient à ne considérer qu'un seul doublet dans un scénario d'intrusion.

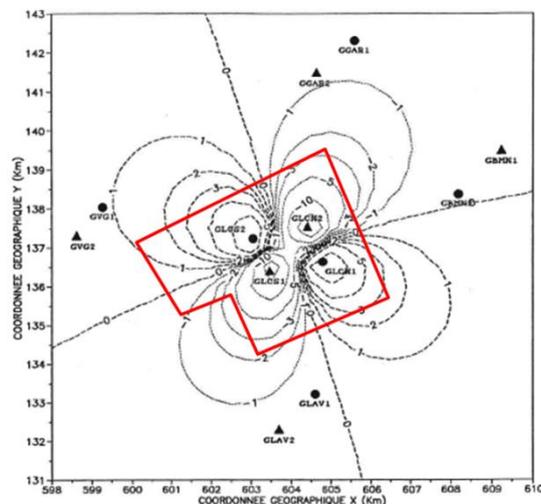


Figure 5 : Champ de pression (en équivalent mètres d'eau) induit par une exploitation par doublets dans le Dogger (exemple de La Courneuve avec 2 injecteurs et 2 producteurs, d'après Menjot et al., 1989) ; Comparaison à la superficie de la ZIRA (en rouge).

Ainsi, s'il était réalisé, Cigéo ne gênerait au maximum qu'une portion très réduite (1-2 %) de la ressource au Trias (Buntsandstein, grès à Voltzia) dans l'Est de la France (~ 98 % de cette ressource resterait donc disponible à une éventuelle exploitation). En outre, sur le plan strictement technique, les méthodes de forage directionnel développées par l'industrie pétrolière devraient pouvoir permettre une exploitation de la totalité de la ressource géothermique (y compris à l'aplomb du site) à l'aide de forages déviés contournant l'installation souterraine.

¹⁶ Aire caractérisée par un champ de pression modifié par l'exploitation géothermique par rapport au champ de pression initial. Le champ de pression est considéré modifié dès lors que la variation de pression excède 1 mètre en équivalent hauteur d'eau soit 0,1 bar.

4.4 DIFFICULTES LIEES A L'EXPLOITATION DE LA RESSOURCE GEOTHERMIQUE BASSE ENERGIE EN FORMATIONS ARGILO-GRESEUSES

Outre les aspects économiques liés à la demande et à l'utilisation de la chaleur, il existe au moins quatre contraintes à ce type d'exploitation :

- 1) En France, la loi sur l'eau¹⁷ impose que l'eau géothermale produite soit réinjectée dans le même réservoir en cas d'incompatibilité bio-géochimique avec les aquifères situés au-dessus et avec les eaux de surface. La salinité de la saumure du Buntsandstein (supérieure à 100 g/L) imposerait nécessairement une réinjection, donc un fonctionnement par doublet avec puits injecteur(s) et puits producteur(s).
- 2) Les débits d'exploitation, au producteur comme à l'injecteur, doivent être pérennes et identiques (dans le cas du Dogger les débits moyens sont de 150 à 250 m³/h minimum au producteur comme à l'injecteur) notamment pour estimer la température nominale de l'exploitation. Cela ne peut s'évaluer que par essais hydrauliques de longue durée.
- 3) Les positions des forages d'injection et de production doivent être optimisées afin d'éviter une percée thermique (arrivée au puits producteur de la bulle d'eau froide réinjectée) trop rapide.
- 4) Les débits de fonctionnement du doublet doivent éviter les risques sismiques potentiellement engendrés par le pompage ou la réinjection. Citons l'exemple récent du projet de géothermie profonde par doublet à St Gall (Suisse), où la stimulation du forage à 4500 m de profondeur a produit en juillet 2013 un séisme de magnitude 3,5. Ce séisme a eu pour conséquence l'arrêt des opérations d'injection, le rebouchage du forage (www.swissinfo.ch, 14/05/2014) et la remise en question d'une exploitation par doublet (www.geothermie.ch, 02/06/2014).

4.4.1 RETOUR D'EXPERIENCE DES TENTATIVES D'EXPLOITATION PAR DOUBLET EN FRANCE

En France, l'exploitation d'une ressource géothermique BE dans un réservoir argilo-gréseux et par doublet a été tentée à Cergy-Pontoise, Achères et Melleray. Cependant, de fortes complications sont apparues pour ces 3 exploitations. Dans le cas de Cergy-Pontoise, la productivité insuffisante du Trias a conduit à un repli de l'exploitation au Dogger. Quant aux projets d'Achères et de Melleray, ils ont été abandonnés du fait de problèmes liés à la réinjection dans les formations argilo-gréseuses du Trias. En outre, pour ces deux projets, une réinjection au Dogger s'est avérée impossible eu égard à l'incompatibilité des eaux des aquifères de salinités trop différentes. A la suite de ces échecs, l'IMRG (Institut Mixte de Recherches Géothermiques, institut cofinancé par le BRGM et l'AFME, maintenant ADEME) a été mandaté, via un projet international soutenu par la CCE (Commission des Communautés Européennes) pour, d'une part comprendre les phénomènes qui peuvent limiter l'injectivité dans les formations argilo-gréseuses, d'autre part définir les conditions d'une exploitation pérenne, par doublet de forages du gisement géothermique du Trias et, par extension, des formations argilo-gréseuses en général.

Les informations qui suivent sont directement tirées d'un rapport du BRGM (1983b) et de rapports annuels de l'IMRG de 1985 à 1992 (date de disparition de l'IMRG). L'IMRG s'est concentré sur le doublet de Melleray (situé à quelques km au sud-est d'Orléans) caractérisé par un forage producteur (GMY1, 1669 m) et un forage injecteur (GMY2, 1661 m), tous deux forés en 1980 et équipés de tubage à fentes entre 1400 et 1600 m.

¹⁷ Loi n° 2006-1772 du 30 décembre 2006 sur l'eau et les milieux aquatiques (1) et sa version consolidée du 14 juillet 2010.

Les deux forages, distants de 1000 m, qui étaient destinés au chauffage de serres, se sont révélés artésiens au débit de 35 m³/h et ont produit une eau chlorurée sodique à 35 g/L et 73 °C, au débit moyen pompé de 150 m³/h. Les essais d'injection en phase d'exploitation ont rapidement mis en évidence une anomalie de surpression hydraulique importante provoquant le blocage quasi instantané de l'écoulement par « fermeture des pores » (BRGM, 1983b). Cette anomalie a conduit à limiter les débits d'injection à 80-85 m³/h en 1981, l'eau résiduelle du puits producteur étant évacuée dans la Loire (BRGM, 1983b ; Vuataz *et al.*, 1988). L'exploitation en doublet a été arrêtée au tout début de l'année 1982 mais le forage producteur a continué d'être utilisé à des fins de recherche. Un projet de recherche a consisté à mettre en œuvre un pilote de percolation haute pression sur des carottes de grès des Vosges (Buntsandstein de la région Lorraine) utilisant les fluides issus du forage GMY1. Il avait pour objectif de mener à bien des essais de percolation visant à tester l'efficacité de différents traitements à appliquer lors de la réinjection. Dans l'explication des surpressions, ces essais ont permis en particulier d'éliminer rapidement les effets pariétaux (endommagement de la roche en périphérie du forage) et les effets dus au piégeage de particules d'argile d'une taille supérieure au micron (Rapport IMRG, 1985). Ils ont en revanche permis de proposer deux types de causes pour expliquer cette surpression :

1) Des causes exogènes, liées à l'exploitation avec notamment un colmatage essentiellement par les microbulles de gaz à l'injection consécutivement au dégazage opéré dans les puits. Ces causes recouvrent également les dépôts de phases minérales précipitées à la suite d'une part de l'entrée d'air dans le système provoquant la corrosion des enveloppes métalliques et l'oxydation d'espèces dissoutes (dépôt d'oxy-hydroxydes de fer, de manganèse, de zinc...) et d'autre part de variations de la pression et de la température dues au dégazage (dépôt de silice ou de carbonates). La présence de microbulles a été qualifiée de cause exogène prépondérante pour interpréter les surpressions anormales au puits injecteur.

2) Des causes endogènes liées d'une part à la présence de particules mobilisables dans le milieu poreux, notamment les minéraux argileux et d'autre part à la composition chimique de l'eau souterraine à l'origine de la corrosion bactérienne par piqûration des tubes en acier. Cette corrosion est d'autant plus active que l'activité bactérienne est intense et la salinité de l'eau élevée. La présence de particules fines a été qualifiée de cause endogène prépondérante pour interpréter les surpressions anormales. La distribution de la taille des particules produites a été évaluée sur la charge solide obtenue par filtration. La masse journalière des particules produites a été estimée à environ 17 kg/jour (soit 7 tonnes par an) au débit de 150 m³/h et à 6,5 kg/jour (soit 1,4 tonne/an) au débit artésien de 35 m³/h. Environ 95 % de la masse des particules était de taille inférieure à 1 µm¹⁸, la moitié de ces 95 % étant même inférieure à 0,1 µm. La composition chimique de ces particules suggérait différentes origines : des produits de corrosion du tubage du forage avec des oxy-hydroxydes de fer présentant des traces de Cr et de Ti, une phase amorphe composée majoritairement de ZnS, mais surtout d'autres éléments (Si, Al, S, Ca ou Mg) propres au milieu géologique et indicateurs de minéraux argileux.

Ces informations ont conduit l'IMRG à proposer un protocole de traitement du fluide préalablement à sa réinjection (rapport IMRG, 1986). Celui-ci comprenait une phase de dégazage, un refroidissement pour simuler l'échangeur de chaleur, l'injection d'un oxydant pour obtenir la floculation et l'agrégation des particules, une phase de décantation et de filtration visant à éliminer les particules les plus fines (< 1 µm) et l'injection d'un

¹⁸ La fraction inférieure à 2 µm correspond à la classe granulométrique des argiles.

réactif pour éliminer les éventuelles traces d'oxygène. Ce traitement s'est avéré très efficace mais difficile à mettre en œuvre en particulier dans un doublet géothermique. L'IMRG a donc proposé un traitement visant à éviter le dégazage (donc la production de microbulles) et l'entrée d'air (donc la corrosion), par pressurisation à l'azote des deux forages en cas d'arrêt de production et d'autre part en filtrant l'eau réinjectée (gravier filtrant, cartouches filtrantes jusqu'à 1 µm). Le développement bactérien, impossible à éliminer, peut parfois nécessiter un traitement anti-corrosion des deux puits (injecteur et producteur). Depuis les années 2000, la principale parade à la corrosion des *casings* (tubes en acier des forages) consiste en leur réhabilitation par l'utilisation de matériaux synthétiques résistants à la corrosion, tels la fibre de verre ou le PVC. De nombreux forages ont été ou seront reconditionnés ou réhabilités (rechemisage attendu pour 66 forages producteurs et injecteurs dans le Dogger du Bassin de Paris), ce qui permettra de prolonger sensiblement la durée de vie des *casings*.

Le cas de Melleray montre à quel point les caractéristiques de la formation argilo-gréseuse peuvent conditionner une exploitation géothermique BE fonctionnant en doublet. La grande variabilité de faciès (composition minéralogique, pétrophysique et géochimique) des formations argilo-gréseuses va en effet dicter, pour chaque site, le choix de l'équipement et du traitement avec des répercussions pas toujours prévisibles sur le coût du projet. Afin d'éviter la libération de particules fines dans le circuit par les niveaux les plus argileux, il est préférable de ne limiter la zone productrice qu'à l'horizon le plus poreux et perméable. Par ailleurs, l'impact de l'activité bactérienne et celui de la salinité des eaux doivent être maîtrisés et peuvent nécessiter l'utilisation de matériaux résistants à la corrosion. En conclusion, bien qu'il n'y ait pas d'impossibilité d'exploiter des formations argilo-gréseuses à des fins géothermiques, de telles exploitations présentent généralement des contraintes susceptibles de limiter fortement leur productivité et donc leur rentabilité.

4.4.2 EXPLOITATION PAR DOUBLET EN CONTEXTE ARGILO-GRESEUX EN EUROPE

Il existe également en Europe de l'Ouest (Seibt, 2003 ; Seibt *et al.*, 2005 ; Mahler, 2005), principalement en Allemagne, plusieurs exploitations géothermiques TBE à ME en formations argilo-gréseuses et fonctionnant en doublet parmi lesquelles :

1) **BE Waren (Allemagne)**, depuis 1985, qui est la première centrale géothermale en Allemagne. L'aquifère est constitué des grès de l'Hettangien localisés à 1470 m de profondeur. Cette formation produit une eau à 62°C et 158 g/L (salinité totale dominée par NaCl) au débit de 60 m³/h. L'eau est refroidie à une température comprise entre 20 et 40°C et est réinjectée dans le même réservoir.

2) **BE-ME Neustadt-Glewe (Allemagne)**, depuis 1995, qui est le projet le plus abouti d'Allemagne. Il consiste à puiser dans les grès du Rhétien (Trias supérieur) une eau à 100°C et 220 g/L entre 2200-2300 m. La formation possède une porosité de 20 à 22 % et une perméabilité de 0,5 à 1 D (soit 0,5 à 1,0·10⁻⁵ m/s) au débit maximal de 110 m³/h en exploitation (injection et production). Le débit de réinjection, initialement de 85 m³/h, a pu être restauré à 110 m³/h après une acidification légère de la formation. Par ailleurs, une pressurisation d'azote du circuit permet d'éviter toute entrée d'air et limite ainsi la corrosion et la précipitation d'oxy-hydroxydes de fer. Le projet a été financé pour moitié par l'état Allemand. Depuis 1995, la centrale géothermale permet de chauffer au moyen d'un échangeur et d'une pompe à chaleur optionnelle jusqu'à 1300 équivalent-logements ainsi qu'une vingtaine de commerces.

3) **BE Thisted (Danemark)**, qui fonctionne par doublet au débit d'exploitation de 150 m³/h à 45°C pour une profondeur de 1250 m dans les niveaux du Trias supérieur (porosité de 28 %). Les deux puits ont été équipés d'un massif filtrant réalisé avec un gravier calibré (*gravel pack*) pour développer le forage et faciliter la réinjection. Le design de la boucle géothermale évite toute entrée d'air par pressurisation d'azote et l'eau réinjectée est filtrée jusqu'à 1 µm. La faible température ne permet pas une utilisation par simple échange, mais a nécessité l'installation de deux pompes à chaleur dont l'une est alimentée par une usine d'incinération alors que le projet initial prévoyait une température de 100°C et un fonctionnement par simple échangeur. Ce projet a montré une très bonne performance technique mais une moins bonne performance économique du fait de la faible demande en chaleur.

4) **BE Neubrandenburg (Allemagne)** depuis 1990, puisant et réinjectant une eau possédant une salinité comprise entre 113 et 133 g/L, au débit maximum de 100 m³/h, à une température comprise entre 50 et 54°C, dans des horizons gréseux situés entre 1150 et 1250 m.

5) **ME-HE Groß Schönebeck (Allemagne)** puisant et réinjectant une saumure (salinité non communiquée), au débit maximum de 50 m³/h, à une température de 140°C, dans des horizons gréseux et une série volcanique du Permien inférieur (Rotliegend) situés vers 4300 m. Le réservoir a été développé après stimulation hydraulique des fractures de la zone volcanique.

6) **TBE Berlin (Allemagne)** depuis 2001, qui est une installation puisant une eau à une température de 19°C et une salinité de 29 g/L dans un aquifère gréseux situé à 300 m et servant à alimenter le Parlement allemand.

Tous ces projets fonctionnent sur le principe de deux circuits d'eau : le premier entre puits producteur et injecteur avec ou sans traitement (chimique, filtration...) selon le fluide et le réservoir et le second qui croise le premier via des échangeurs de chaleur, celle-ci étant alors transférée jusqu'aux consommateurs. A noter que certains projets peuvent être *pro parte* soutenus financièrement par les états (cas de Neustadt-Glewe et Berlin en Allemagne notamment) et que d'autres réutilisent au départ d'anciens forages pétroliers ou gaziers profonds (e.g. Groß Schönebeck).

4.4.3 CONCLUSIONS SUR LE RETOUR D'EXPERIENCE DE L'EXPLOITATION PAR DOUBLET EN CONTEXTE ARGILO-GRESEUX

Tous les projets européens montrent que l'exploitation géothermique TBE, BE et ME par doublet est possible en formation argilo-gréseuse. Mais ils montrent aussi leur limite, soit en termes de débit d'exploitation, soit en termes de température, en comparaison des exploitations dans les formations carbonatées, d'une part du Dogger du Bassin de Paris (température moyenne de 70°C pour un débit artésien moyen de 175 m³/h et des débits de production pouvant dépasser les 300 m³/h, Rojas *et al.*, 1989), d'autre part du Malm de l'Est du Bassin Molassique d'Allemagne (à Unterhaching en particulier la température moyenne est de 78°C et le débit pompé maximum de 540 m³/h ; Schellschmidt *et al.*, 2010). En effet, ce qui caractérise ces formations carbonatées est leur aptitude à y réinjecter l'eau produite, au même débit que celui pompé et sans difficulté particulière.

D'une manière générale, dans le cas d'une formation argilo-gréseuse, une des raisons de la limitation des débits d'exploitation vient le plus souvent du traitement à appliquer au fluide pour permettre sa réinjection. Ce fluide peut nécessiter d'être parfaitement propre, c'est-à-dire débarrassé de toutes particules fines issues de l'exploitation elle-même (par corrosion, dégazage, oxydation...) ou du milieu géologique (présence d'une proportion non négligeable de particules fines < 1 µm). Or, s'il est facile de se débarrasser des particules de taille

importante ($> 1 \mu\text{m}$), il est beaucoup plus délicat et onéreux de se débarrasser des particules plus fines. La limite actuelle appliquée en exploitation semble être le micron (cf. Thisted, Danemark), ce qui limite les débits de production, et plus encore ceux d'injection.

Par ailleurs, dans le cas d'une boucle géothermale fonctionnant en circuit fermé et sans traitement préalable de la saumure, le puits injecteur doit être maintenu en condition anoxique par un tampon d'azote situé en tête de puits injecteur afin d'éviter la précipitation d'oxy-hydroxydes de fer dans le réservoir (cas de Neustadt-Glewe).

Enfin, toutes ces exploitations TBE, BE et ME sont basées sur le principe d'une distribution de la chaleur vers un besoin, le plus souvent exprimé en équivalent-logements, qui n'existe pas actuellement pour le site de Meuse/Haute-Marne, même si cette situation peut évoluer dans l'avenir. Il faut noter que ce besoin ne peut être que très localisé autour du forage producteur. On estime en effet que le réseau de distribution ne doit pas aller au-delà d'un rayon de plus de 2 km autour du forage producteur afin de limiter les pertes de chaleur. Ainsi l'usage d'une ressource de type BE reste limité par un contexte d'urbanisme collectif (concentration d'immeubles, commerces, équipements collectifs : piscines, gymnases...), typique de celui rencontré en particulier en région parisienne. Une trentaine de doublets y fournissent en moyenne de la chaleur à 4600 ± 3000 équivalent-logements (par doublet) au débit de $261 \pm 88 \text{ m}^3/\text{h}$ (cf. www.geothermie-perspectives.fr), ce qui est très supérieur aux exploitations du reste de l'Europe.

5 ANALYSE DU RAPPORT GEOWATT

Comme suite aux questions posées par les parties prenantes à l'Andra sur la fiabilité des résultats et les conditions selon lesquelles se seraient déroulées les opérations du forage EST433, le CLIS de Bure¹⁹ a mandaté GEOWATT AG, société privée spécialisée en géothermie basée à Zürich (Suisse), pour émettre un avis indépendant sur le potentiel géothermique de la région de Bure. Sa mission consistait à émettre un avis critique sur le programme de forage de tests et de logging, à procéder à une revue des rapports de forage et d'opération, et, enfin à fournir un avis indépendant de l'Andra sur le potentiel géothermique de la région de Bure. La prestation de GEOWATT AG a été limitée, par le CLIS de Bure, aux opérations jugées significatives quant à l'évaluation du potentiel géothermique de l'aquifère du Trias, c'est-à-dire aux opérations qui ont concerné les 300 derniers mètres du forage EST433, et elle a donné lieu au rapport GEOWATT AG Resources (2013).

Il convient de rappeler que, selon l'Andra, dans l'Est du Bassin de Paris, seules les formations du Trias peuvent présenter un intérêt géothermique (Andra, 2005 in T.1, §8.1.4). C'est pourquoi l'Andra n'a évalué que le potentiel géothermique de l'aquifère du Trias. A la vue des résultats présentés dans la synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition mené en 2007-2008 (Andra, 2008 in §4.3.3), l'Andra considère que la ressource géothermique à l'échelle de la zone de transposition est faible (Andra, 2008 in §5.3).

5.1 PROGRAMME DE TESTS ET DE LOGGING DU FORAGE EST433 ET REVUE DES RAPPORTS TECHNIQUES

Pour le forage EST433, les objectifs principaux des investigations étaient d'apporter des éléments pour le choix de localisation de Cigéo en complétant les connaissances sur les formations encaissantes de la couche hôte, et également sur les formations profondes du Lias et du Trias. Plus précisément, ces derniers objectifs étaient destinés à acquérir une meilleure compréhension du fonctionnement global du système hydrogéologique et des échanges verticaux entre les formations et à évaluer les ressources géothermiques potentielles sur la zone.

GEOWATT AG conclut à la très bonne adéquation entre le Cahier des Charges d'Exécution (CCE) et les prestations réalisées sur ces intervalles mais également à quelques différences significatives dues aux aléas du forage. En effet le test 3, prévu au Muschelkalk, n'a pu être réalisé en raison du colmatage de l'outil. Par ailleurs, les diagraphies de température s'arrêtent à une cote de 1862 m TVD (Figure 2), les 140 derniers mètres n'ayant pas pu être mesurés du fait du comblement du forage. Enfin, une seconde phase de tests était prévue avec des pompages de longue durée, des diagraphies géochimiques et un test d'injectivité. Cependant, le coincement d'une sonde à la base du Trias n'a pas permis de les réaliser. GEOWATT AG explique ces différences avec le CCE par la difficulté de concilier deux objectifs différents et suggère que seul un forage uniquement dédié à l'évaluation du potentiel géothermique aurait permis d'éviter ces écarts. L'IRSN adhère à cette remarque mais rappelle que l'ambition du programme était avant tout scientifique et correspondait en cela aux demandes des évaluateurs (ASN, IRSN, CNE).

Pour les 3 points soulevés par GEOWATT AG, l'IRSN considère que :

¹⁹ Les missions du Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) de Bure sont d'informer ses membres et les populations concernées sur les activités menées dans le laboratoire de recherche souterrain de Bure, exploité par l'Agence Nationale pour la gestion des déchets radioactifs (Andra).

- 1) Le test 3 prévu au Muschelkalk n'aurait sans doute pas permis de mettre en évidence une ressource significative. En effet, les diagraphies RMN n'ont permis d'y détecter qu'un seul horizon poreux sur une hauteur réduite (de l'ordre du mètre), sans commune mesure avec les résultats des tests 1 et 2 (cf. chapitre 3.2.1 et Figure 2).
- 2) L'absence de variation lithologique et donc minéralogique significative du Buntsandstein par rapport aux formations sus-jacentes laisse supposer une continuité du gradient géothermique vers le fond du forage. Par ailleurs, à l'instar de GEOWATT AG, l'IRSN considère que les diagraphies thermiques ont été réalisées à l'équilibre thermique et que le gradient géothermique moyen de 3°C/100 m est donc représentatif de la colonne sédimentaire traversée. L'arrêt des diagraphies à la côte de 1842 m TVD ne semble donc pas préjudiciable.
- 3) Seul le test d'injectivité aurait sans doute permis, comme le souligne GEOWATT AG, de mieux évaluer la productivité de la zone d'intérêt pour une ressource géothermique en termes de débit. L'Andra a tenté, sans succès (d'après une communication écrite du 21/10/2013), de « retrouver un accès au Buntsandstein » pour mettre en œuvre la seconde phase de tests.

Concernant l'évaluation par l'Andra des résultats de tests hydrauliques effectués sur ce forage, l'IRSN considère comme GEOWATT AG, que malgré les difficultés de mise en œuvre (colmatage partiel de la crépine de la pompe par la boue de forage), les tests ont été interprétés dans les règles de l'art avec l'utilisation des outils numériques les plus performants. GEOWATT AG précise que les valeurs de conductivité hydraulique (K) des tests 1 et 2, respectivement de $1,04 \cdot 10^{-5}$ et $4,43 \cdot 10^{-5}$ m/s, doivent être considérées comme indicatives et que les incertitudes ont sans doute été sous-estimées. L'IRSN constate que ces valeurs sont cohérentes avec les réponses diagraphiques RMN (type CMFF). Le volume d'eau important produit lors de l'essai 2 (35 m³) pourrait expliquer que l'incertitude relativement réduite proposée par l'Andra pour l'essai 2 ($4,43 \pm 0,02 \cdot 10^{-5}$ m/s) est crédible. En tout état de cause, l'IRSN considère enfin que ces valeurs de conductivité hydraulique restent largement dans le domaine exploitable.

5.2 POSITION DE L'IRSN SUR L'AVIS DE GEOWATT AG CONCERNANT LE POTENTIEL GEOTHERMIQUE DU TRIAS EN MEUSE/Haute-MARNE

GEOWATT AG évalue le potentiel du Trias sur la base de 3 critères : profondeur, température et transmissivité.

- 1) Concernant la profondeur, GEOWATT AG indique que la profondeur de 2000 m ne pose pas de difficulté particulière pour une exploitation géothermique, citant pour cela le projet de St Gall en Suisse (forage à 4500 m de profondeur). L'IRSN, qui souscrit à cette analyse, constate cependant que suite au séisme de magnitude 3,5 qui s'est produit en juillet 2013 durant les opérations de réinjection, l'exploitation par doublet du projet géothermique de Saint Gall est remise en question (le doublet pourrait être abandonné au profit d'une solution restant encore non définie actuellement).
- 2) Pour ce qui est de la température, qui pourrait atteindre 70°C vers 2000 m de profondeur, elle serait compatible avec une exploitation directe de la chaleur par géothermie de type basse énergie. L'IRSN souscrit également à cette analyse.
- 3) Enfin, en ce qui concerne la transmissivité (T), GEOWATT AG considère que les valeurs obtenues pour les 2 zones testées au Buntsandstein sont dans la gamme de celles de l'aquifère du Dogger du Bassin de Paris et que la moyenne des intervalles de production du Dogger géothermique (18 ± 8 m) est comparable à la hauteur testée par l'Andra (25 m) lors des tests 1 et 2, en particulier. L'IRSN arrive aux mêmes conclusions. GEOWATT AG considère aussi comme pessimiste l'hypothèse selon laquelle seules les 2 zones testées sur 25 m de

hauteur seraient transmissives. GEOWATT AG suggère plutôt la possibilité de combiner les intervalles transmissifs, y compris ceux d'autres horizons non testés, pour améliorer la transmissivité globale de la ressource. L'IRSN n'adhère pas complètement à cette conclusion car la sollicitation d'horizons poreux moins transmissifs pourrait aussi conduire à une plus forte libération de particules fines et donc générer des coûts supplémentaires en termes d'équipements hydrauliques complexes (forages avec dispositifs à crépines multiples, systèmes de filtration à 1 µm...).

Pour ce qui concerne la productivité (débit d'exploitation) du Trias, GEOWATT AG suggère également qu'elle est certainement meilleure que 5 m³/h. Cette assertion est la conséquence d'une formulation erronée de l'Andra qui indiquait en 2008 (Andra, 2008, §4.3.3, p. 109) que « ... *la production mesurée en test dans EST433 (5 m³/h) est nettement inférieure à la gamme des débits des exploitations géothermiques (150 à 400 m³/h)* ». Dans sa réponse aux associations sur les critiques formulées sur le sujet de l'évaluation de la ressource géothermique, l'Andra reconnaît que cette phrase « *constitue un raccourci qui pouvait porter à confusion* » (Andra, 2013). L'IRSN rappelle que ce débit de 5 m³/h, utilisé lors des tests, était le débit limite de la pompe et ne pouvait en aucun cas représenter le débit de production qui, pour l'IRSN, devrait se situer dans une gamme similaire à celle d'une exploitation représentative du Dogger géothermique.

Concernant la problématique de la réinjection, GEOWATT AG n'aborde que peu les difficultés techniques liées à la réinjection d'une saumure dans les formations argilo-gréseuses. Sur la base d'exemples français et internationaux de doublets géothermiques Basse Energie implantés dans des formations argilo-gréseuses, l'IRSN constate que ces difficultés conduisent le plus souvent à limiter le débit d'exploitation de la boucle géothermale, très souvent sensiblement inférieur au débit de production. Ces difficultés de réinjection ne sont pas rencontrées dans les formations carbonatées (e.g. Dogger du Bassin de Paris et Malm du Bassin Molassique du sud de l'Allemagne).

En conclusion, les positions de GEOWATT AG et de l'IRSN sont globalement concordantes sur les trois critères d'évaluation de la ressource géothermique retenus par le cabinet suisse (profondeur, température, transmissivité). En revanche, les éventuelles difficultés rencontrées à la réinjection ne sont pas vraiment abordées par le cabinet suisse alors que l'IRSN estime que ce point aurait nécessité une analyse plus détaillée.

6 CONCLUSIONS ET AVIS DE L'IRSN SUR LE POTENTIEL GÉOTHERMIQUE DE MEUSE/Haute-MARNE

A partir des données de la littérature, des nouvelles données acquises par l'Andra via le forage EST433 et du rapport d'expertise GEOWATT AG, L'IRSN estime que le secteur de Meuse/Haute-Marne présente bien une ressource géothermique de type Basse Energie²⁰, localisée dans les grès du Trias inférieur. La formation du Permien, plus profonde, pourrait également présenter un potentiel géothermique de type Moyenne à Haute Energie, ce qui reste toutefois à démontrer.

Cependant, la ressource géothermique du secteur de Meuse/Haute-Marne ne présente pas de caractère exceptionnel. En effet, elle ne présente pas d'intérêt particulier par rapport à d'autres formations ou zones qui possèdent un potentiel géothermique mieux démontré et des conditions d'exploitation plus aisées, comme la formation du Dogger du centre du Bassin parisien, ni un gradient géothermique élevé, comme dans le pourtour du Massif Central ou du fossé Rhénan.

S'agissant de l'exploitation de ces ressources, l'IRSN note par ailleurs que l'aquifère du Trias inférieur possède une salinité près de cinq fois celle de l'eau de mer, ce qui rend nécessaire la réinjection de l'eau prélevée dans cette même formation. Or, le retour d'expérience au niveau national et international montre qu'en dépit de récentes évolutions techniques, la réinjection dans les formations argilo-gréseuses soulève des difficultés qui conduisent généralement à limiter le débit d'exploitation. Les doublets qui fonctionnent à ce jour dans ce type de formation sont souvent limités en débit par les propriétés intrinsèques du réservoir (présence de particules fines, milieu réducteur sensible à l'oxydation, dégazage potentiel en phase d'exploitation, précipitation de phases néoformées dans la boucle, corrosion des installations...).

Ainsi, pour les raisons qui viennent d'être exposées, la rentabilité, voire la faisabilité d'une exploitation géothermique dans le Trias ou dans le Permien sont incertaines dans le contexte technico-économique du moment. Cependant, compte-tenu des périodes de temps considérées pour une installation de stockage géologique des déchets, l'hypothèse d'une intrusion par forage, en vue de reconnaître ou d'exploiter la ressource géothermique potentielle ou un autre type de ressource, ne peut pas être exclue, en particulier si la mémoire du stockage est perdue. Aussi, au titre de la démonstration de sûreté du projet d'installation de stockage géologique, l'IRSN estime que l'hypothèse d'une telle intrusion doit être prise en compte.

S'agissant de la possibilité d'exploiter une ressource géothermique à proximité d'une installation de stockage souterrain de déchets radioactifs, deux aspects doivent être considérés. Le premier concerne l'éventualité d'une contamination de l'exploitation géothermique et les risques associés pour l'environnement et la population. Le second concerne la possible privation de l'accès à la ressource du fait de la présence du stockage à son aplomb. Concernant le risque de contamination radioactive d'une exploitation géothermique, l'IRSN n'a pas connaissance d'études spécifiques réalisées à ce jour sur ce sujet. Mais, ainsi qu'évoqué plus haut, dès lors que la présence d'une ressource naturelle est avérée ou supposée à l'aplomb ou à proximité d'une installation de stockage géologique, l'Institut estime que l'impact de l'exploitation de cette ressource sur la sûreté du stockage doit être évalué par l'exploitant potentiel du stockage. Concernant l'accès à la ressource, dans le cas particulier de Cigéo, l'IRSN a estimé qu'en cas d'instauration d'une servitude interdisant l'exploitation de la ressource géothermique du

²⁰ Conclusions données dans la Fiche Géothermie du Débat Public - Projet Cigéo (IRSN, 2013).

Trias dans le périmètre du stockage, ce qui est une hypothèse probable, l'accès à seulement 1 à 2 pourcents de cette ressource serait obéré. En outre, sur le plan strictement technique, les méthodes de forage directionnel développées par l'industrie pétrolière devraient pouvoir permettre une exploitation de la totalité de la ressource géothermique (y compris à l'aplomb du site) à l'aide de forages déviés contournant l'installation souterraine. En conclusion, Il ne parait pas impossible que la population puisse tirer bénéfice de cette ressource malgré la présence d'un stockage sous réserve toutefois de démontrer que le risque de contamination radioactive de l'exploitation géothermique est négligeable.

7 REFERENCES

- Andra, 2005. Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne (5 Tomes) A.RP.ADS.99.005.B.
- Andra, 2008. Synthèse du programme de reconnaissance de la zone de transposition 2007-2008, Centre de Meuse/Haute-Marne, Rapport Andra n°D.RP.ALS.08.1356.
- Andra, 2013. Réponse de l'Andra aux critiques des associations sur la ressource géothermique dans la zone d'étude de Cigéo. Note C.NSY.ACOC.0003.
- ASN (2008). Guide de sûreté relatif de déchets radioactifs en formation géologique profonde. http://www.asn.fr/index.php/content/download/26511/159256/file/guide_RFSIII_2_fv1_2_.pdf.
- Beccaleto L., Hanot F., Serrano O., Marc S. (2011) Overview of the subsurface structural pattern of the Paris Basin (France): Insights from the reprocessing and interpretation of regional seismic lines. *Marine and Petroleum Geology* 28, 861-879.
- Bensenouci F., Michelot J.L., Matray J.M., Savoye S., Tremosa J., Gaboreau S. (2011) 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, in press*.
- 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, pp. 187-211.
- BRGM (1980a) Synthèse géologique du Bassin de Paris, Mémoire du BRGM n° 101, 102.
- BRGM (1980b) Possibilités géothermique de la région « Champagne-Ardenne » - II Etude hydrogéologique de sites. Société Nationale pour l'Application de la Géothermie / GEOCHALEUR. Rapport BRGM /SGN n° 80 SGN 649 GTH/CHA, 54p., septembre 1980.
- BRGM (1983a) Potentiel géothermique « basse température » en France. Service public géothermie. Rapport BRGM 83 SGN 375 SPG.
- BRGM (1983b) Forage géothermique de Melleray GMY2 Essais de contrôle des caractéristiques du puits d'injection réalisés en Mai et Juin 1982. Rapport BRGM, 83 SGN 76 GTH.
- Fontes J.Ch., Matray J.M. (1993) Geochemistry and origin of formation brines from the Paris basin. Part 2: Saline solutions associated with oil fields. *Chemical Geology* 109, 1-4: 177-200.
- GEOWATT AG Resources (2013) Revue du déroulement des opérations de forage géothermique au Trias réalisé par l'Andra, avis critique et seconde opinion sur l'évaluation du potentiel géothermique. Rapport D1320/01.
- Haenel R. (1989) Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. *In* : International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research and Demonstration, vol. 4, 74p., 110pl.
- Housse B., Maget P. (1976) Potentiel géothermique du bassin parisien. Ed. BRGM. A.C. DGRST/BRGM/ELF Aquitaine, contrat 74.7.0990.
- IMRG Rapports annuels de 1985 à 1992.
- IRSN (2003) Etat des connaissances sur la présence de ressources géothermiques dans le sous-sol du site de l'Est. Rapport DPRE/SERGD 03-12 bis.
- IRSN (2005) Avis de l'Institut de Radioprotection et de Sûreté Nucléaire sur le Dossier 2005 Argile. Rapport DSU n° 106. http://www.irsn.fr/FR/expertise/rapports_expertise/Documents/surete/IRSN_rapport_2005_argile.pdf.

- IRSN (2013) Débat Public - Projet Cigéo. Potentiel géothermique du site de Meuse/Haute-Marne. http://www.irs.fr/dechets/cigeo/Documents/Fiches-thematiques/IRSN_Debat-Public-Cigeo_Fiche-Geothermie.pdf.
- Landrein P., Vigneron G., Delay J., Lebon P., Pagel M. (2013) Lithostratigraphie, hydrodynamisme et thermicité dans le système sédimentaire multicouche recoupé par les forages Andra de Montiers-sur-Saulx (Meuse). *Bull. Soc. géol. Fr.*, 184, 6, 519-544.
- Le Carlier C., Royer J.J., Flores L. (1993) Convective heat transfer at the Soultz-sous-Forêts geothermal site - Implication for oil potential. 5th Conference and Technical Exhibition, Stavanger, Norway.
- Mahler A. (2005) Geothermal plant in Thisted with adsorption heat pump and 10 years operation without corrosion or reinjection problems in sandstone for 15% saline water. <http://www.geothermal-energy.org/pdf/IGAstandard/WGC/1995/3-mahler.pdf>.
- Millot R., Guerrot C., Innocent C., Négrel Ph., Sanjuan B. (2011) Chemical, multi-isotopic (Li-B-Sr-U-H-O) and thermal characterization of Triassic formation waters from the Paris Basin. *Chem. Geol.* 283, 226-241.
- Ploquin F. (2011) Argiles, traceurs de paléoconditions diagénétiques et hydrothermales. Recherche des évidences minéralogiques et géochimiques de l'hydrothermalisme dans les formations diagénétiques argileuses, gréseuses et carbonatées du Trias du Bassin parisien. Thèse soutenue le 9 décembre 2011 à l'Université de Poitiers.
- Rojas J., Giot D., Le Nindre Y.M., Criaud A., Fouillac C., Brach M., Menjot A., Martin J.C., Lambert M., Chiles J.P., Fouillac A.M., Pauwels H. (1989) Caractérisation et modélisation du réservoir géothermique du Dogger, Bassin Parisien, France. Rapport final IRG SGN 89 - Contrat EN 3G-0046-F (CD).
- Rosener M. (2007) Etude pétrophysique et modélisation des effets des transferts thermiques entre roche et fluide dans le contexte géothermique de Soultz-sous-Forêts. Thèse de l'Université Louis Pasteur de Strasbourg.
- Schellschmidt R., Sanner B., Pester S., Schulz R. (2010) Geothermal Energy Use in Germany. Proceedings World Geothermal Congress 2010, Bali, Indonesia, 25-29 April 2010.
- Seibt P. (2003) Reinjection of thermal waters into sandstone reservoirs in the North German Basin International Geothermal Conference, Reykjavík, Sept. 2003 Session #9.
- Seibt P., Kabus F., Hoth P. (2005) The Neustadt-Glewe Geothermal Power Plant - Practical Experience in the Reinjection of Cooled Thermal Waters in to Sandstone Aquifers. Proceedings World Geothermal Congress 2005. Antalya, Turkey, 24-29 April 2005.
- SEMHACH (2012) Journal d'information n°3 du premier réseau géothermique francilien - Chevilly Larue - L'Haÿ-les-Roses - Villejuif.
- Vuataz F.D., Fouyillac C., Detoc S., Brach M. (1988) Chemistry of the low temperature geothermal reservoir: the Triassic sandstone aquifer at Melleray, France. 13th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford, USA, January 1988.

