



Rapport d'expertise :

Évaluation des ressources géothermales dans le Buntsandstein et le Permo-carbonifère sous le site de Bure et sa région

BRGM/RP-63598-FR
Juillet, 2014

Cadre de l'expertise :

Appuis aux administrations Appuis à la police de l'eau Autre

Date de réalisation de l'expertise : Juillet 2014

Localisation géographique du sujet de l'expertise : site de Bure, département de la Meuse, France

Auteurs BRGM : V. Bouchot, D. Bonijoly
avec la collaboration de L. Beccaletto,
S. Grataloup, S. Lopez, L. Vaute.

Demandeur : Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) du Laboratoire de Bure

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Ce rapport est le produit d'une expertise institutionnelle qui engage la responsabilité civile du BRGM.

Ce document a été vérifié et approuvé par :

Vérificateur :	Date : 27 août 2014
Nom : I. Czernichowski	
Approbateur :	Date : 17 septembre 2014
Nom : J-C. Guillaneau	

Mots-clés : Expertise – Géothermie basse à moyenne température – Trias - Buntsandstein - Permo-carbonifère - Transmissivité - Site de Bure - Forage EST433 - ANDRA - Meuse - Haute-Marne - Lorraine

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

V. Bouchot et D. Bonijoly, et coll. (2014) – Évaluation des ressources géothermales dans le Buntsandstein et le Permo-carbonifère sous le site de Bure et sa région. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-63598-FR. 50 p., 13 fig., 7 tabl., 2 ann.

© BRGM, 2014, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Sommaire

1. Objectifs de l'étude	5
2. Historique de l'évaluation de la ressource géothermale du Trias inférieur dans la partie est du Bassin parisien et autour de Bure	7
2.1. INTRODUCTION.....	7
2.2. RÉSUMÉS DES ÉVALUATIONS RÉALISÉES ENTRE 1976 ET 2008.....	7
2.3. CONCLUSION DE L'HISTORIQUE	16
3. Chronologie et enseignements du forage EST433 de Bure.....	17
4. Évaluation par le BRGM de la ressource géothermale du Buntsandstein et du Permo-carbonifère sous Bure et sa région	23
4.1. EXISTE-T-IL UNE RESSOURCE GÉOTHERMALE BASSE TEMPÉRATURE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR DANS LE BUNTSANDSTEIN SOUS BURE ET SA RÉGION ?	26
4.1.1 Nature, épaisseur et profondeur du Buntsandstein sous Bure	26
4.1.2 Température du Buntsandstein sous Bure.....	26
4.1.3 Salinité du Buntsandstein sous Bure.....	27
4.1.4 Porosité, perméabilité et transmissivité du Buntsandstein sous Bure.....	27
4.1.5 Extension géographique du Buntsandstein.....	29
4.2. EXISTE-T-IL UNE RESSOURCE GÉOTHERMALE DE MOYENNE TEMPÉRATURE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS LE PERMO-CARBONIFÈRE SOUS BURE ET SA RÉGION ?	30
4.2.1 Introduction.....	30
4.2.2 Connaissance géologique du bassin permo-carbonifère sarro-lorrain.....	30
4.2.3 Apport de la pétrophysique des formations permo-carbonifères et évaluation de la ressource.....	31
5. Conclusions de l'expertise BRGM.....	35

Liste des annexes

Annexe 1 - Cartes de localisation des forages existants dans la région de Bure s.l. et dans le secteur de Bure s.s.

Annexe 2 - Grès du Trias Inférieur (GTI) à l'est du Bassin parisien : connaissances géologiques et hydrodynamiques

Liste des tableaux

Tableau 1 - Estimation des propriétés réservoir du Buntsandstein pour les principales villes de la région suivant une coupe E-W : Saint-Dizier, Bar-le duc, Saint-Mihiel / Commercy, réalisées à partir de forages pétroliers voisins	12
Tableau 2 - Log de forage EST433 de la partie Trias (lithologie, diagraphie) avec position des slug-tests (Landrein et al., 2013) et tableau-résultat des deux slug-tests (ANDRA)	20
Tableau 3 - Paramètres physico-minéralogiques et mesures de perméabilité obtenues sur 7 échantillons de carottes (forage EST433) avec calcul de la transmissivité pour 25 m de carottes. Comparaison avec la transmissivité obtenue lors des slug-tests	21
Tableau 4 - Caractéristiques des réservoirs géothermiques du Trias clastiques en Europe et en France ; comparaison avec le réservoir du Dogger du Bassin parisien	25
Tableau 5 - Comparaison entre les paramètres pétrophysiques, mesurés et calculés, du Buntsandstein au niveau du forage EST433	25
Tableau 6 - Synthèse des données hydrodynamiques disponibles pour les ouvrages les plus profonds du réservoir des GTI à partir de 3 forages d'exploitation (Toul, commune d'Avril « Source Pérotin » et Amnéville pour thermalisme) et 3 sondages pétroliers (Montplonne-MOP2, Saint-Joseph-SJO1 et Ancerville-AN 1)	48
Tableau 7 - Synthèse des données hydrodynamiques disponibles pour les 3 ouvrages profonds exploitant le réservoir des GTI pour un usage de géothermie basse température.	49

Liste des Figures

Figure 1 - Localisation géographique du site de Bure (point A)	5
Figure 2 - Estimation de la ressource géothermale du Trias inférieur dans la partie est du Bassin parisien selon Housse et Maget (1976) à partir des épaisseurs et transmissivités (modifié Housse et Maget, 1976).....	9
Figure 3-A - Inventaire des ressources géothermales en Champagne- Ardenne tous réservoirs confondus avec position du site de Vert Bois près de St-Dizier (Maget et Rambaud, 1980). Position du site de Bure.....	10
Figure 4 - Carte des températures du Trias inférieur à l'échelle de la Lorraine selon Allemoz (1983).	13
Figure 5 - Carte de l'utilisation potentielle du Trias inférieur à l'échelle de la Lorraine selon Allemoz (1983).....	13
Figure 6 - Modélisation géométrique 2,5D du Trias inférieur de l'ensemble de la Lorraine suivant une coupe E-W de 160 km de long (complété Bourgine <i>et al.</i> 2007).....	14
Figure 7 - Carte du potentiel géothermique, souligné par des isopotentiels à un pas de 3 GJ/m ² , des grès de Donnemarie situés dans la partie occidentale du Bassin parisien et des grès du Buntsandstein dans sa partie orientale (Lorraine), avec position du site de Bure (étoile orange) (modifié Bouchot <i>et al.</i> , 2008).....	15
Figure 8 - Partie triasique du log de forage EST433 de Bure, permettant de visualiser les deux passes carottées du Buntsandstein et leurs relations avec la porosité (totale et connectée) ainsi que le conglomérat de fin de forage (K2-21 - 1999m). Concernant la carotte K2-20 lire « Couches intermédiaires » et non pas « Grès vosgiens » comme indiqué sur la figure.....	19
Figure 9 - Carte du bassin permocarbonifère sarro-lorrain (synthèse IFP; Delmas <i>et al.</i> , 2002).	32
Figure 10 - Coupe du Bassin permocarbonifère sarro-lorrain (synthèse IFP; Delmas <i>et al.</i> , 2002). La coupe correspond au trait de coupe 1 de la figure 9, située bien à l'est de Bure.	33
Figure 11 - Extension et épaisseur du Trias inférieur (modifiée d'après Ph. Maget in Mégrien <i>et al.</i> , 1980). Position du site de Bure (étoile bleue).	45
Figure 12 - Carte hydrogéologique du réservoir des grès du Trias inférieur en Lorraine (Vaute <i>et al.</i> , 2007). Position du site de Bure (étoile bleue).	47

1. Objectifs de l'étude

En Meuse, sur la commune de Bure (Figure 1), l'ANDRA mène des recherches sur la faisabilité d'un stockage géologique de déchets nucléaires dans les couches argileuses du Callovo-Oxfordien. Un laboratoire souterrain, creusé à partir de l'année 2000, avait pour but de qualifier la couche argileuse vis-à-vis de la sûreté à long terme et de vérifier les capacités de confinement de la roche. Depuis 2006, l'ANDRA s'est engagée dans la préparation de la phase de conception et d'implantation du futur Centre Industriel de stockage GÉologique dénommé CIGEO.

À l'aplomb de ce site, situé dans l'est du Bassin parisien, il existe différentes couches géologiques dont les plus profondes, sous le Callovo-Oxfordien, seraient susceptibles de renfermer une ressource géothermale (Trias, Permo-carbonifère ?). C'est sur l'existence de cette ressource que se focalise le débat public dans le cadre du Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) du laboratoire de Bure (cf. les comptes rendus des débats publics organisés en 2013 par la Commission Nationale du Débat Public). Le Président du CLIS du laboratoire de Bure a donc souhaité, par courrier daté du 17 janvier 2014, que le BRGM puisse présenter l'état des connaissances sur le sujet.

L'évaluation de la ressource géothermale analysée dans ce rapport, devrait être présentée aux membres du CLIS de Bure à l'automne 2014. Elle établit un état des connaissances et des incertitudes sur les ressources géothermales situées dans le Buntsandstein (Trias inférieur) et le Permo-carbonifère sous-jacent, au droit du site de Bure (Figure 1) et dans sa région (partie est du Bassin parisien).

Ces connaissances résultent des travaux d'exploration pétrolière réalisés dans les années 60 à 80 dans la région de Bure (Annexe 1), des informations acquises par l'ANDRA à l'issue de la réalisation du forage EST433 et de plusieurs opérations géothermiques (exploration et exploitation) réalisées depuis 30 ans dans le Trias en France et en Europe.

Le lecteur, qui souhaiterait des informations complémentaires sur les caractéristiques géologiques et hydrodynamiques du Buntsandstein du Bassin parisien, se reportera à l'annexe 2 de ce rapport.

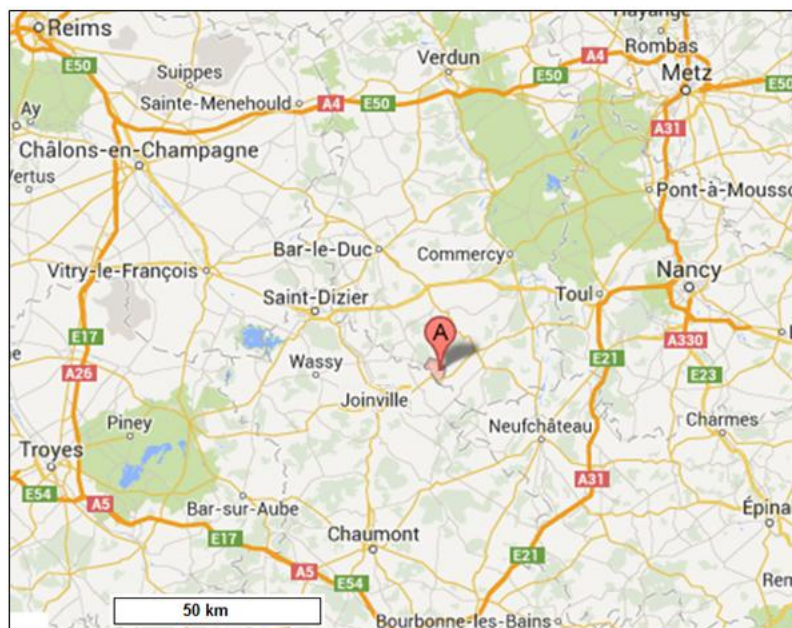


Figure 1 - Localisation géographique du site de Bure (point A).

2. Historique de l'évaluation de la ressource géothermale du Trias inférieur dans la partie est du Bassin parisien et autour de Bure

2.1. INTRODUCTION

Entre 1976 et 2008, les ressources géothermales du Trias inférieur du Bassin parisien ont été évaluées, notamment dans sa partie orientale où est développé le Buntsandstein. Ces évaluations sont basées essentiellement sur les connaissances apportées par les forages pétroliers (Annexe 1), à savoir la lithologie des formations forées, leur géométrie (profondeur, épaisseur), leur température et leurs paramètres pétrophysiques, tels que la perméabilité et la transmissivité (perméabilité x épaisseur utile), obtenus sur carottes de forage et/ou à partir de tests hydrauliques.

On résumera successivement dans ce chapitre les évaluations de la ressource réalisées par Housse et Maget en 1976, Maget et Rambaud en 1979, Maget et Rambaud, 1980, Desplan et *al.* en 1981, Allemoz en 1983, puis par Bourguine et *al.* en 2007 et Bouchot et *al.* en 2008.

En revanche, en l'absence d'évaluation régionale de la ressource géothermique des formations du Permien et du Carbonifère situées sous la partie orientale du Bassin parisien, un historique tel que réalisé pour le Trias, n'a pas lieu d'être pour le Permo-carbonifère.

2.2. RÉSUMÉS DES ÉVALUATIONS RÉALISÉES ENTRE 1976 ET 2008

En 1976, B. Housse et Ph. Maget ont évalué la ressource géothermale du Trias du Bassin parisien en estimant son épaisseur, sa profondeur, sa température, sa salinité et sa transmissivité, dans le cadre d'une action concertée entre le BRGM et le groupe Elf-Aquitaine. Ces auteurs identifient, au sein de la série sédimentaire du Trias, deux niveaux réservoirs majeurs situés dans deux parties du Bassin parisien : l'aquifère des grès du Buntsandstein à l'est (en grande partie les Grès du Trias Inférieur ou GTI, Annexe 2) qui s'étendent des Vosges jusqu'aux environs de Saint-Dizier, et les grès du Keuper (Trias supérieur) à l'ouest qui s'étendent de Soissons à Châteauroux.

D'après la cartographie du Trias inférieur (Figure 2) et les valeurs de transmissivité obtenues en forage (sur courbe de remontée en pression - test DST pour la plupart), la région de Bure se situe dans l'emprise d'un lobe gréseux (figure 2) proche de l'extrémité occidentale du réservoir du Trias inférieur, et présenterait des transmissivités très variables allant de 60 D.m (forage de Saint-Mihiel) à 0,6 D.m (forage à l'est de Saint-Dizier, vers Bazincourt). D'après d'autres cartes du rapport de Housse et Maget, on estime que, sous Bure, le Trias inférieur (Buntsandstein) présente une épaisseur d'environ 150m, des températures estimées à 60 °C pour une profondeur de plus de 1200m et une salinité de l'ordre de 50 g/l.

En 1979, Ph. Maget et D. Rambaud ont réalisé une étude régionale sur les possibilités géothermiques de la région Champagne - Ardenne, à la demande de la Direction Régionale de l'Équipement. Cette étude présente des cartes d'évaluation des ressources géothermales notamment du Trias (Figure 3), réalisées à partir de températures et perméabilités mesurées sur carottes de forages pétroliers. Ces auteurs montrent que le Trias inférieur (Buntsandstein) est présent au sud de Saint-Dizier (Figures 3-A et 3-B) : Bure se situerait dans un secteur à bonne productivité et une température comprise entre 50 et 60 °C. Les grès du Buntsandstein sont encore épais de 200 m entre Joinville au sud et Saint-Dizier au nord, avec des perméabilités estimées autour de 15-20 mD.

Les auteurs concluent leur étude du Trias en précisant que :

Le réservoir du Trias présente les caractéristiques les plus intéressantes au Sud de la Région, autour d'un axe passant par Joinville - Bar s/ Seine, les conditions optimales étant du côté oriental. Sur le plan géothermie, c'est la bordure septentrionale de cet axe qui présente le plus d'intérêt, étant la plus profonde et la plus chaude.

Ce réservoir est cependant mal défini : la complexité structurale de la région rend la position du réservoir difficile à préciser et la productivité de l'aquifère ne peut être évaluée qu'à partir de données incomplètes.

Cette étude régionale a débouché en particulier sur l'étude du site de « Vert-Bois » près de Saint-Dizier (Maget et Rambaud, 1980) détaillé ci-après.

En 1980, Ph. Maget et D. Rambaud ont réalisé une étude hydrogéologique destinée à l'implantation d'un forage géothermique dans la région de Saint-Dizier. Cette étude a été réalisée dans le cadre d'un contrat avec la Société Nationale pour l'Application de la géothermie (Géochaleur), à la demande de la Direction de l'équipement et du Comité Géothermie, et fait suite à l'inventaire régional des ressources géothermales.

Ainsi, dans la suite de l'inventaire des ressources de la région Champagne-Ardenne (Maget et Rambaud, 1979), cinq sites ont été identifiés comme favorables (Maget et Rambaud, 1980) parmi lesquels l'un d'entre eux était localisé au lieu-dit « Vert-Bois » près de Saint-Dizier dans le Trias inférieur (Figure 3-A). Pour ce site, les auteurs ont proposé un programme de forage, notamment à partir des forages pétroliers environnants, comprenant un log géologique prévisionnel et des paramètres hydrogéologiques attendus (porosité, perméabilité) ; ils notent que la ressource géothermale se situe dans les grès du Trias inférieur (Figure 3), à la terminaison occidentale du réservoir du Trias lorrain. Sur le log prévisionnel, les grès seraient recoupés entre 1 720 et 1 820 m (100 +/- 50 m d'épaisseur) après quoi le socle schisteux serait pénétré (à partir de 1 820 m). La salinité, très élevée, est estimée à près de 250 g/l (Na Cl). La température serait d'environ 72 °C (estimation à partir du forage des Quatre-Bras situé à 15 km au nord de St-Dizier, Annexe 1) et les débits maximaux possibles sont évalués entre 50 et 150 m³/h. Cette estimation du débit est basée sur une valeur de perméabilité résultant d'une extrapolation des données pétrolières. A ce propos, les auteurs précisent que :

. Perméabilité

Les seules mesures de test existantes indiquent des perméabilités extrêmement faibles (forages de Ancerville, Trois-Fontaines 101) qui ne sont pas compatibles avec les porosités mesurées ni avec les résultats connus plus à l'est. A l'inverse, le forage des Quatre-Bras a donné d'excellents résultats en essai de type pétrolier, mais malheureusement que sur le plan qualitatif.

La perméabilité indiquée ici relève donc plus de l'hypothèse en tenant compte de l'expérience acquise dans d'autres régions (Lorraine sud d'Orléans).

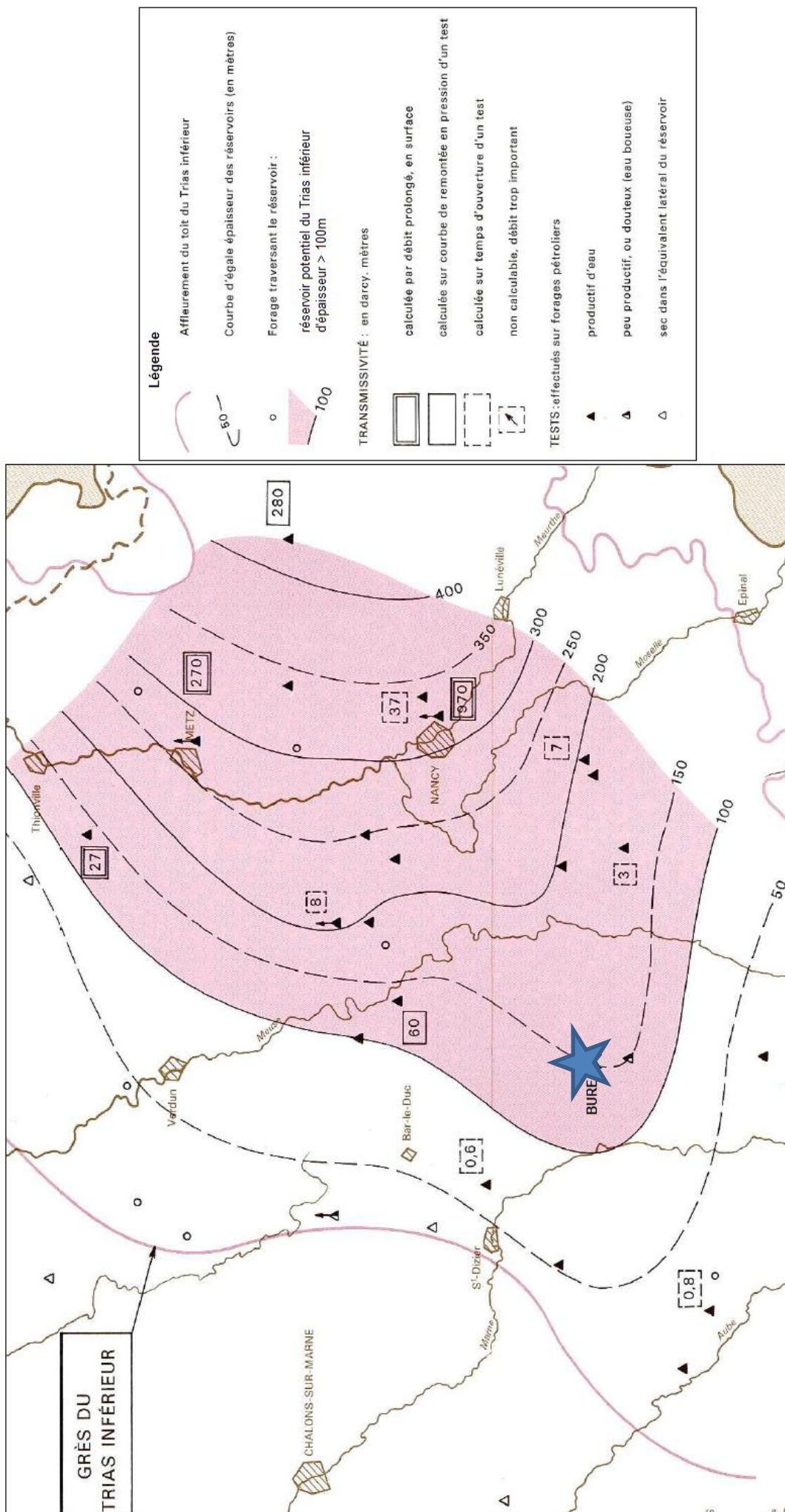


Figure 2 - Estimation de la ressource géothermale du Trias inférieur dans la partie est du Bassin parisien selon Housse et Maget (1976) à partir des épaisseurs et transmissivités (modifié Housse et Maget, 1976).

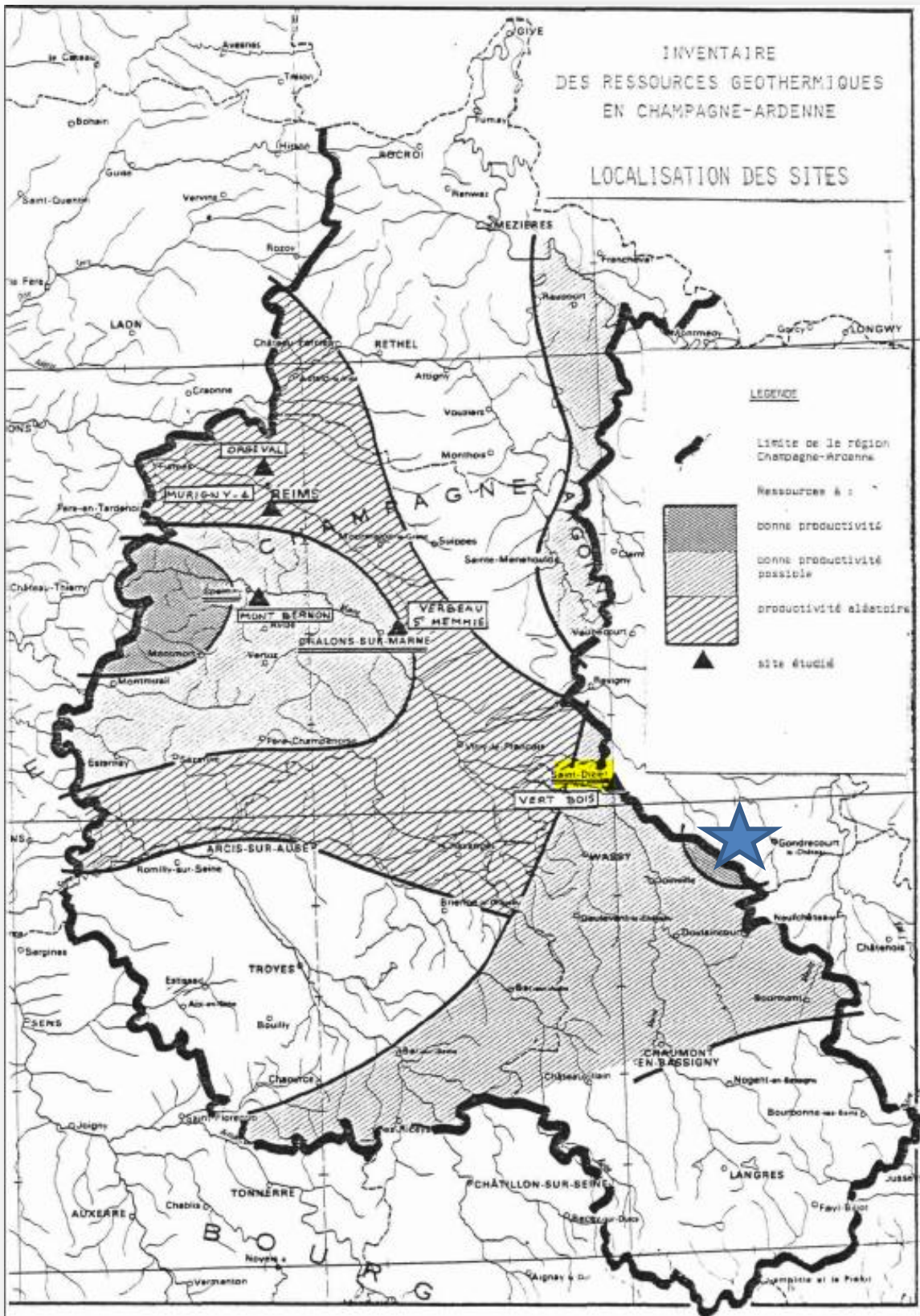


Figure 3-A - Inventaire des ressources géothermales en Champagne- Ardenne tous réservoirs confondus avec position du site de Vert Bois près de St-Dizier (Maget et Rambaud, 1980). Position du site de Bure ★

Ressources géothermales sous Bure et sa région

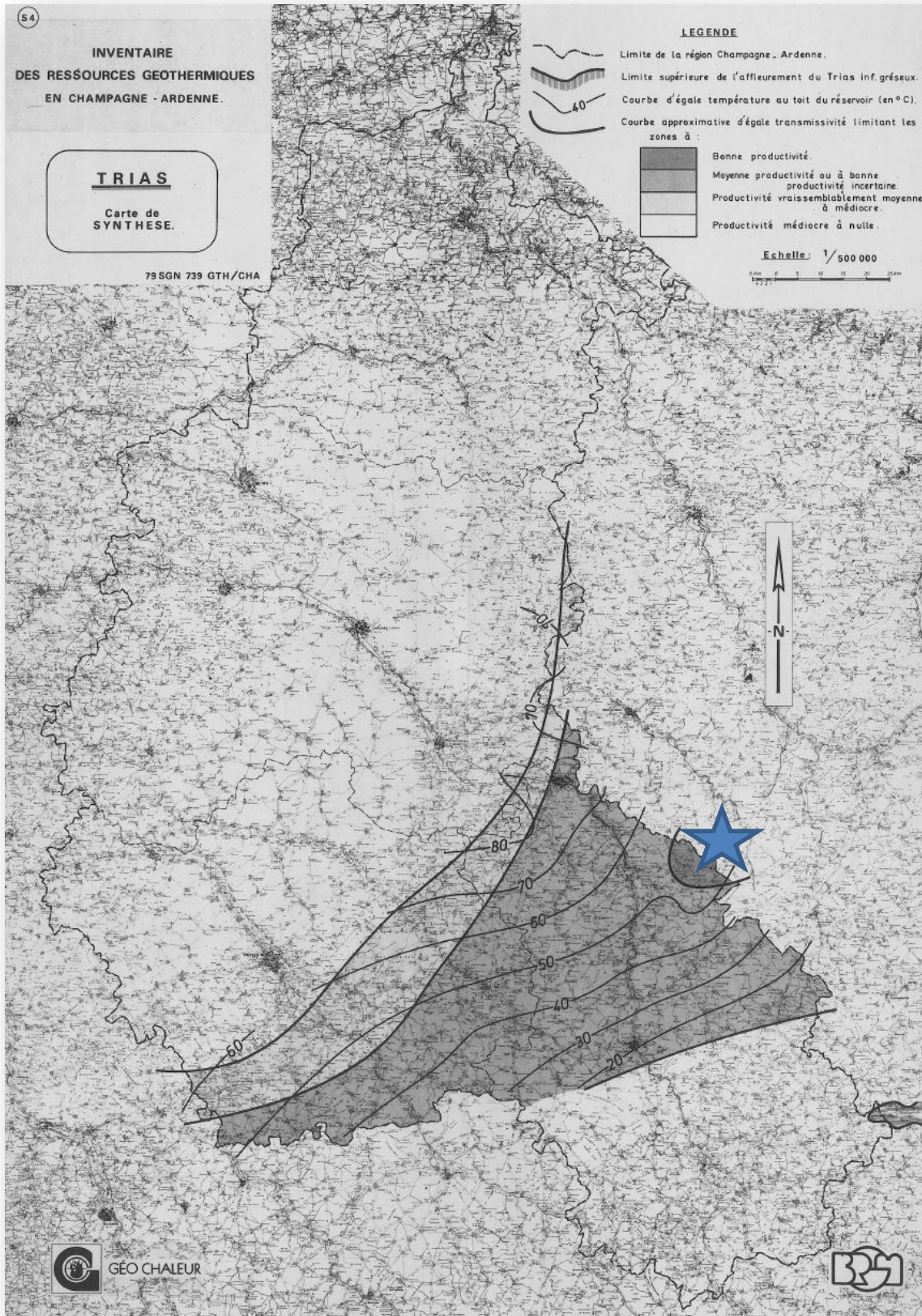


Figure 3-B – Cartographie du réservoir du Trias inférieur en Champagne-Ardenne, à partir des paramètres température et transmissivité (Maget et Rambaud, 1979). Position du site de Bure ★

En 1981, Desplan et *al.* ont publié un rapport intitulé « les possibilités de réalisations géothermiques dans le département de la Meuse », mené en partenariat entre le BRGM et les sociétés Géochaleur et Compagnie Général de Chauffe.

L'identification de sites favorables au développement de la géothermie basse température (pour la production de chaleur) repose d'une part sur l'évaluation de la ressource géothermale d'après les forages pétroliers existants (Tableau 1) et d'autre part sur l'estimation des besoins énergétiques dans trois villes meusiennes à savoir Bar-le-Duc, Commercy et Verdun et également de sites près de St-Mihiel (serres de Maizey) et à Étain-Rouvres.

Du point de vue de la ressource géothermale, les auteurs signalent que d'après les forages d'exploration pétrolière d'Auzécourt et de Trois Fontaines, situés à l'ouest d'un axe subméridien Verdun - Bar-le-Duc - Saint-Dizier (Figure 2, Annexe 1), le Trias inférieur est essentiellement argileux (absence d'aquifère) et donc rédhibitoire pour la géothermie. Le passage entre ces faciès argileux et des grès francs du Buntsandstein s'effectue progressivement d'ouest en est. D'après les prévisions des auteurs (Tableau 1), les grès du Trias sont présents à Bar-le-Duc sur environ 70m d'épaisseur (*a priori* en l'absence du Buntsandstein inférieur) et sur 150 m à Commercy (en présence du Buntsandstein inférieur et supérieur).

Globalement, l'estimation des caractéristiques du réservoir triasique pour les principales villes de la région - Saint-Dizier, Bar-le-Duc, Commercy / Saint-Mihiel - souligne une favorabilité accrue d'ouest en est, avec un pic d'intérêt à Commercy, ville située à 35 km au nord de Bure (Tableau 1) dont les propriétés-réservoir estimées sont les suivantes : épaisseur des grès (150m), faible salinité (30 g/l), bon débit (200 m³/h).

	Site de Vert Bois (St-Dizier)	Site de Ville Haute (Bar-le-Duc)	Site de Maizey (Saint-Mihiel)	Site de Commercy
Forage ou prévision	prévision	prévision BRGM	prévision	prévision
Lithologie dominante du Trias inférieur	Grès du Buntsandstein sup.	Grès du Buntsandstein sup. (seul ?)	Grès du Buntsandstein sup. seul	Grès du Buntsandstein sup. et inf.
Toit du Buntsandstein (en m)	1720	1700	1250 m ?	1300
Epaisseur (en m) et (hauteur utile)	100 (50 m de hauteur utile)	70 m (30 m de hauteur utile)	120 (60 m de hauteur utile)	150 (75 m de hauteur utile)
Température au toit (en °C)	72	70	54-58	55
Salinité (en g/l)	250	150	35-45 ?	30
Débit maximal (en m³/h)	50 à 150	65	?	200
Porosité (en %)	15 %	?	?	?
Perméabilité en forage à proximité (en mD)	100 à 300 mD	100 mD (d'après les forages de quatre-bras et de Courcelles)	300-400 mD (340 mD : Grès bigarrés et 860 mD : Grès vosgiens)	
référence	Maget et Rambaud, 1979, 1980	Desplan et <i>al.</i> 1981	Desplan et <i>al.</i> 1982	Desplan et <i>al.</i> 1981

Tableau 1 - Estimation des propriétés réservoir du Buntsandstein pour les principales villes de la région suivant une coupe E-W : Saint-Dizier, Bar-le duc, Saint-Mihiel / Commercy, réalisées à partir de forages pétroliers voisins (données extraites de Desplan et *al.*, 1981 et de Maget et Rambaud, 1979, 1980).

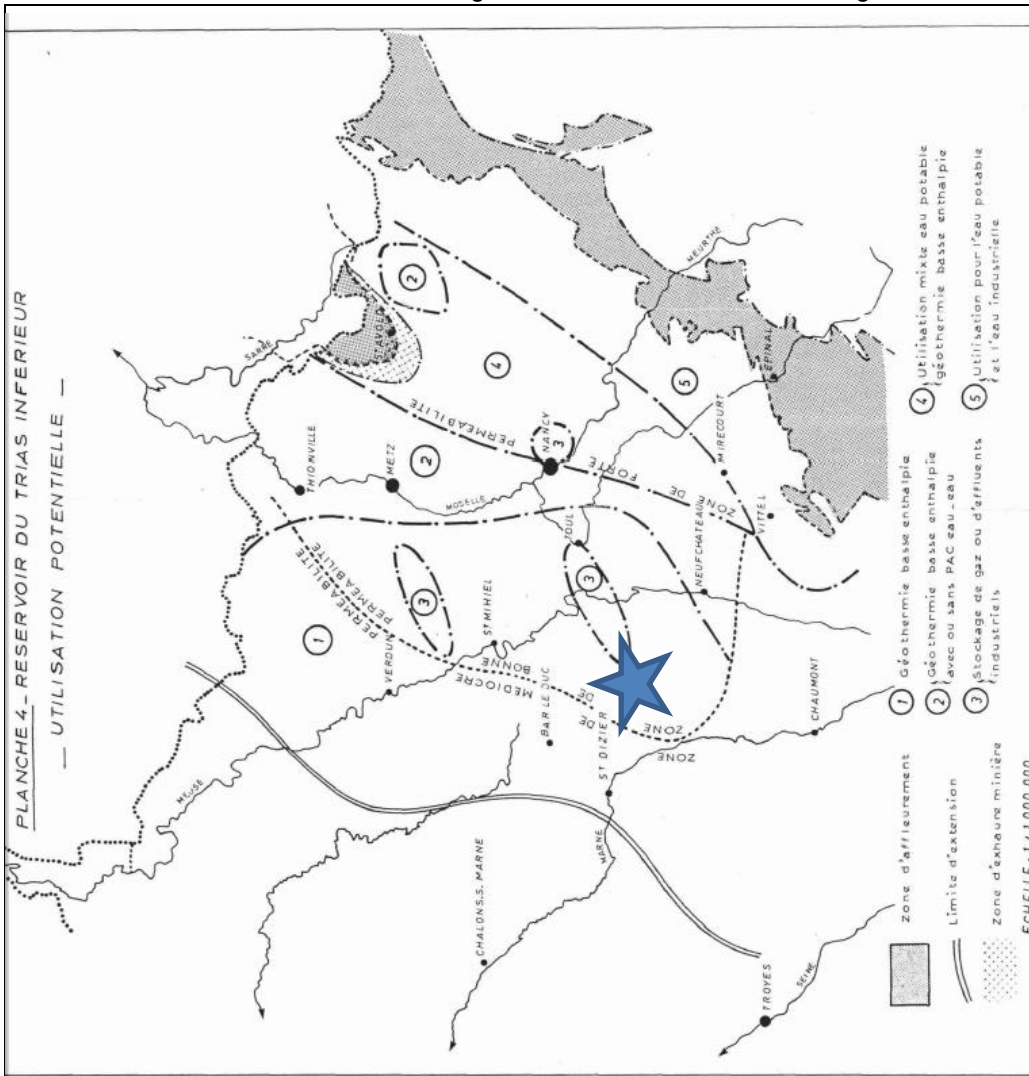


Figure 5 Position du site de Bure

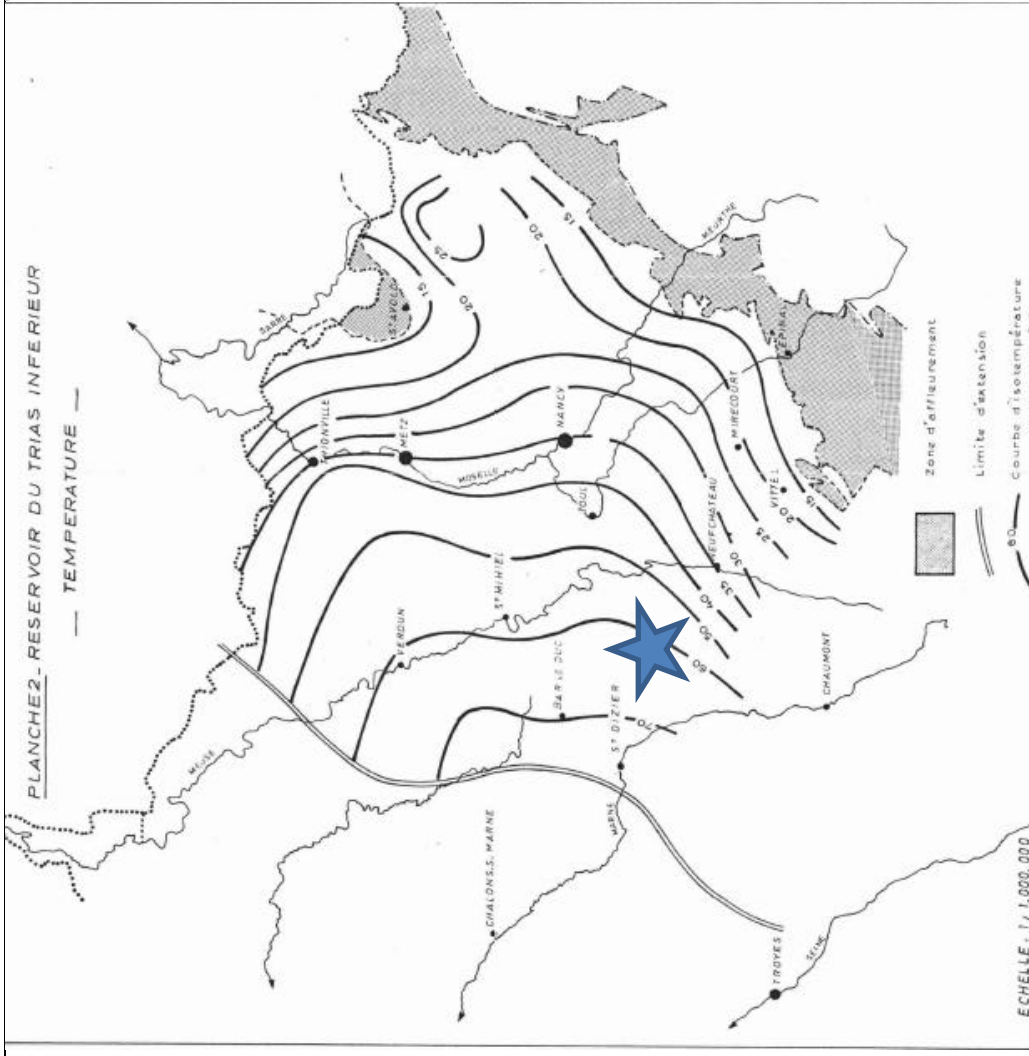


Figure 4 Position du site de Bure

Figure 4 - Carte des températures du Trias inférieur à l'échelle de la Lorraine selon Allemoz (1983).

Figure 5 - Carte de l'utilisation potentielle du Trias inférieur à l'échelle de la Lorraine selon Allemoz (1983).

En 1983, M. Allemoz fait un état des connaissances concernant les aquifères profonds de la Lorraine sur les plans i) lithologique, structural et leur extension, ii) hydrogéologique, iii) hydrogéochimique et iv) utilisation actuelle et potentielle des eaux de ces aquifères. Cette étude a été menée par le BRGM (service géologique régional de Lorraine), en lien avec le Commissariat à l'Énergie Atomique (CEA) et l'Agence Nationale pour la gestion des Déchets Radioactifs (ANDRA).

L'auteur publie notamment deux planches (n° 2 et n° 4) : l'une concerne les isothermes du Trias inférieur (Figure 4) et l'utilisation potentielle du Trias inférieur (Figure 5) en précisant son extension géographique. Les données utilisées semblent être en grande partie reprises des documents de Housse et Maget (1976). D'après ces cartes, le Trias inférieur dans la région de Bure se situe dans la zone de transition entre une zone de bonne perméabilité à l'est (intégrant Bure) et une zone de perméabilité médiocre à l'ouest, pour une température avoisinant les 60 °C. Dans son rapport, l'auteur conclut que :

Du point de vue géothermique (géothermie basse enthalpie), le réservoir est encore peu sollicité bien que les possibilités soient réelles. A noter cependant que les zones à température élevée (supérieure à 60 °C) correspondent à un réservoir de médiocre perméabilité (planches 2 et 4).

En 2007, le BRGM (Bourgine et al.) a publié l'atlas des ressources géothermales de très basse température (pour un usage de type pompe à chaleur PAC) sur les aquifères superficiels lorrains. Cette étude a été réalisée par le BRGM à la demande de l'Agence Régionale de l'Environnement en Lorraine, représentant l'ADEME, le Conseil Régional de Lorraine et Électricité de France. Concernant notre propos, une coupe E-W montre que le toit du Buntsandstein s'approfondit rapidement vers l'ouest, pour atteindre 1 700 m de profondeur à sa terminaison occidentale (Figure 6) vers Bar-le-Duc et St-Dizier.

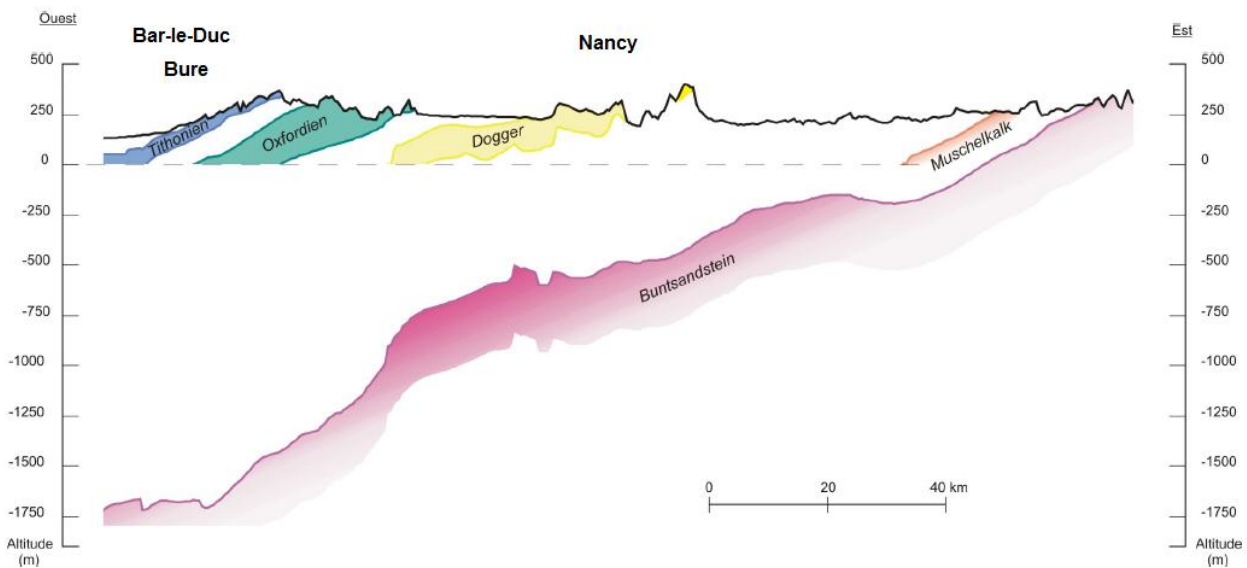


Figure 6 - Modélisation géométrique 2,5D du Trias inférieur de l'ensemble de la Lorraine suivant une coupe E-W de 160 km de long (complété Bourgine et al. 2007).

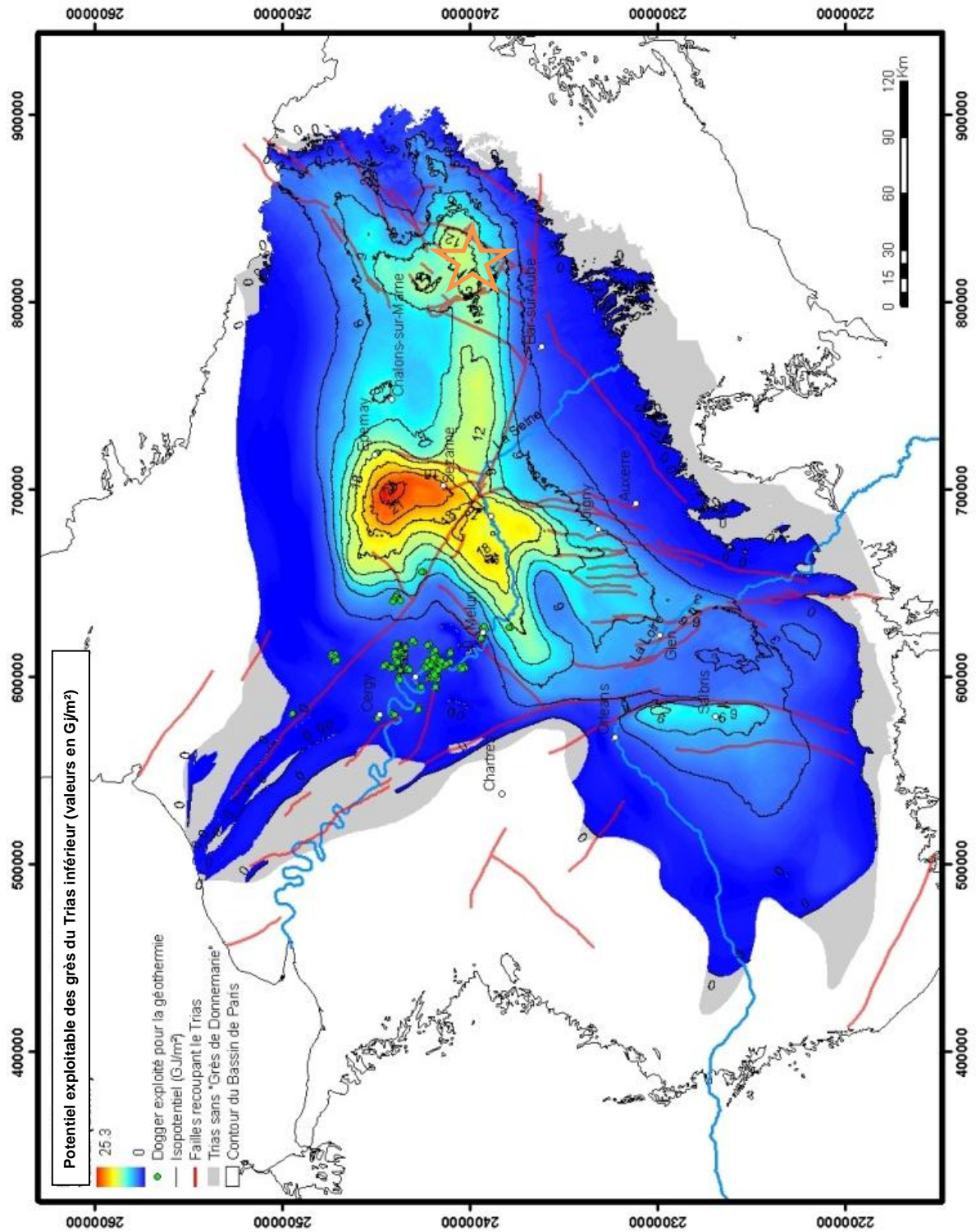


Figure 7 - Carte du potentiel géothermique, souligné par des isopotentiels à un pas de 3 GJ/m², des grès de Donnemarie situés dans la partie occidentale du Bassin parisien et des grès du Buntsandstein dans sa partie orientale (Lorraine), avec position du site de Bure (étoile orange) (modifié Bouchot et al., 2008).

En 2008, une évaluation de la ressource géothermale des formations clastiques du Trias a été réalisée à l'échelle du Bassin parisien, par le BRGM, dans le cadre du projet CLASTIQ, cofinancé par l'ADEME et le BRGM (Bouchot *et al.*, 2008).

L'évaluation de la ressource géothermale, via la chaleur exploitable, est le résultat d'un calcul prenant en compte deux principaux paramètres (Figure 7) à savoir l'épaisseur des formations du Trias inférieur et leur température (qui est dépendante de la profondeur). En revanche, à ce stade de l'étude, les paramètres pétrophysiques de perméabilité, transmissivité n'ont pas été pris en compte dans l'évaluation.

Concernant les grès du Buntsandstein de Lorraine, Bouchot *et al.* (2008) indiquent que :

- « *Le Trias inférieur (Buntsandstein), situé à l'est (Lorraine), forme un excellent réservoir géothermique superficiel dont les qualités diminuent au fur et à mesure qu'il s'enfoncé vers le centre du bassin. Le long de la Moselle, les caractéristiques du réservoir sont très bonnes et la salinité réduite ; mais la température de l'ordre de 30 °C limite l'utilisation géothermique de l'eau. Les caractéristiques du réservoir sont probablement suffisantes jusqu'à la Meuse où les températures de l'eau atteignent 50 °C, mais l'eau est déjà très salée.* » (page 34).
- Comme le montre la figure 7, « *seule la région de Saint-Dizier – Bar-le-Duc présente un potentiel géothermique estimé à ~ 10 GJ/m² en raison d'un réservoir épais d'environ 350-400 m, à 60-70 °C, situé vers 1 500 m de profondeur. Cette cible mériterait d'être étudiée de près, sachant cependant que les paramètres pétrophysiques y sont réputés médiocres (Haenel, 1989).* » (page 53).

2.3. CONCLUSION DE L'HISTORIQUE

En conclusion de cet historique, les évaluations de la ressource géothermique du Buntsandstein réalisées dans le passé suggèrent que la zone de Bure est dans une zone de transition entre bonne transmissivité à l'est et mauvaise transmissivité à l'ouest, au sein d'un grand aquifère qui se développe dans tout l'est du Bassin parisien depuis les contreforts des Vosges jusqu'en Champagne (cf. détails en annexe 2). Par manque de données de forage de qualité (test de puits de longue durée), il est délicat de prédire la productivité de cette formation argilo-gréseuse dans cette zone de transition. Et ce d'autant plus que les variations latérales de faciès du réservoir clastique sont certainement déterminantes dans cette zone, pouvant conduire à une forte variabilité des résultats d'un site à un autre, avec notamment une productivité accrue en allant de St-Dizier à Commercy.

D'après l'évaluation cartographique de la ressource faite par Housse et Maget (1976), qui constitue au final l'évaluation régionale la plus approfondie compte tenu des données disponibles, le Buntsandstein sous Bure présenterait une épaisseur d'environ 150m, des températures estimées à 60 °C vers 1 200 m et une salinité faible de l'ordre de 50 g/l. Fort du forage EST433 réalisé sous Bure ultérieurement, on sait aujourd'hui que l'épaisseur du Buntsandstein dépasse 126 m (cohérente avec l'évaluation de 1976), que sa température est supérieure à 66 °C (car le Trias est plus profond que prévu, vers 1 800 m) et que la salinité est très élevée pour atteindre 180 g/l.

3. Chronologie et enseignements du forage EST433 de Bure

L'objectif de ce chapitre 3 est de préciser les étapes successives ayant conduit à la conception et à la foration du forage EST433 sous Bure puis à l'acquisition de paramètres pétrophysiques permettant de mieux caractériser le Buntsandstein (Trias inférieur) recoupé par ce forage (position géographique du forage en Annexe 1). Cette chronologie a été établie après avoir consulté la documentation disponible sur le forage EST433 et interviewé Patrick Lebon de l'ANDRA en janvier 2014, en tant que Directeur R&D :

- depuis le début du projet, 13 forages ont été réalisés sur le site de Bure afin de reconnaître la zone de transposition et aider au choix d'un site pour le stockage industriel de déchets nucléaires de Haute Activité et Vie Longue (HA-MAVL). Ces forages ont recoupé pour la plupart les argilites du Callovo-Oxfordien (~ 500m de profondeur) mais aucun n'avait jusque-là investigué le Buntsandstein (Annexe 1) ;
- en 2003-2004, le Comité Local d'Information et de Suivi (CLIS) de Bure demande à l'ANDRA de poursuivre un de ces forages afin de déterminer si le Trias sous-jacent présente un intérêt exceptionnel en termes de ressources souterraines de type géothermique ;
- en 2008, l'Autorité de Sûreté Nucléaire publie un nouveau « Guide de Sûreté », en remplacement de la RFS (Règle Fondamentale de Sûreté, 1991), qui précise dans son annexe que « *le site devra être choisi de façon à éviter des zones pouvant présenter un caractère exceptionnel en termes de ressources souterraines* » ;
- parmi les 13 forages réalisés, le forage EST433 est finalement sélectionné pour approfondissement dans le but d'évaluer une éventuelle ressource géothermale dans le Buntsandstein (Figure 8). Lors de la phase de conception de l'ouvrage, l'ANDRA a sollicité le groupement de recherche GDR-FORPRO¹ afin de valoriser scientifiquement ce forage, conçu comme un forage d'exploration et de recherche. Comme d'autres organismes, le BRGM a proposé des thématiques de recherche², dont seule la thématique « Microbiologie et biogéochimie du sous-sol » a été retenue, faisant au final l'objet d'une thèse. Les projets proposés par le BRGM concernant la thématique « Potentiel des réservoirs profonds » n'ont pas été sélectionnés, le comité de sélection ayant privilégié les groupements de recherche composés de plusieurs organismes.

En juin 2008, l'approfondissement du forage EST433 est alors réalisé, en petit diamètre de 15,2 cm et en destructif avec production de *cuttings* et prélèvement de trois passes carottées de 19 m cumulés dans le Buntsandstein. Une déviation significative a été enregistrée en trajectométrie dans la partie profonde, entre 1 200 et 2 001 m. Le forage est rentré dans le Buntsandstein à 1875 m de profondeur (MD³), a recoupé les « Grès à Voltzia » suivi des « Couches intermédiaires » puis a buté sur un épais conglomérat grossier, très cimenté, qui

¹ FORPRO comme FORMations géologiques PROfondes. Groupement de Recherche, associant au CNRS l'Andra, le BRGM et l'INSU, et consacré aux études sur la géologie, la géochimie, la mécanique et la géophysique des sites étudiés pour le stockage des déchets radioactifs.

² Trois thématiques de recherche ont été proposées par le BRGM : 1. La connaissance et la modélisation du bassin de Paris, 2. La reconnaissance des qualités/potentiels des réservoirs profonds et 3. Microbiologie et biogéochimie du sous-sol (sélectionné)

³ Dans ce rapport, les profondeurs indiquées du forage EST433 sont des « profondeurs » forées, noté MD (comme *Measured Depth*) qui correspondent à la longueur mesurée le long du forage depuis la référence en surface.

n'a pu être recoupé que partiellement (fin du forage à 2 001 m de profondeur MD soit 126 m de Trias foré) ;

- ce problème technique a empêché d'une part d'atteindre la base du Trias et ainsi de déterminer son épaisseur totale, et d'autre part d'identifier la nature des formations anté-mésozoïques. À 2 001 m de profondeur MD, le conglomérat grossier a été interprété comme étant le « Conglomérat principal » (= intermédiaire) de la série du Buntsandstein, sous lequel se développe la dernière séquence dite du « Grès vosgien » avant d'atteindre le conglomérat de base (première unité du Trias inférieur) (cf. Annexe 2). Le « Grès vosgien », qui n'a pu être foré, devrait se développer sur une puissance de quelques dizaines de mètres selon l'interprétation proposée par l'ANDRA, qui repose sur l'expertise de Sylvie Bourquin (Directrice de Recherche à l'université de Rennes), spécialiste du Trias du Bassin parisien ;
- après la phase de foration, un jeu de diagraphies a été réalisé permettant notamment de calculer la porosité du Buntsandstein en continue entre 1 875 m et 2 001 m de profondeur (MD) soit sur 126 m forés, avec calcul d'une porosité connectée (en bleu, Figure 8) par l'outil CMR - (Combinable Magnetic Resonance). Cette porosité connectée (ou libre) selon la CMR (CMFF) est comprise entre 10 et 15 % pour les « Grès à Voltzia » et entre 5 et 10 % pour les « Couches intermédiaires » (Figure 8) ;
- ensuite, des tests hydrauliques étaient prévus dans le Buntsandstein : une première phase en trou nu, en boue, de type *slug-test* entre obturateurs (méthode habituelle en forage de reconnaissance), puis une seconde phase de pompage après pose de la crépine et nettoyage :
 - les deux *slug-tests* hydrauliques ont été réalisés dans des chambres de 25 m de hauteur, et ont permis de calculer des transmissivités élevées de l'ordre de $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le test n° 1 et de $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le test n° 2 (Tableau 2),
 - afin de combiner les multiples objectifs scientifiques, l'ANDRA avait accepté, avant de poser la crépine, de descendre une sonde de l'IPGP (F. Cornet) afin de caractériser l'état de contrainte *in situ* notamment sous la formation salifère du Keuper. Cette sonde est restée coincée à 1 927 m et n'a pu être récupérée. La partie inférieure du forage (entre 1 927 et 2 001 m MD) n'était de fait plus accessible, empêchant de réaliser un test de pompage dans les « couches intermédiaires » (Tableau 2). D'autre part, le nettoyage à l'eau claire, avant la réalisation du test de pompage, a dû être abandonné car il risquait de mettre en danger la stabilité du puits. Les crépines ont alors été posées au-dessus de l'outil coincé (au-dessus de 1 925m). Ainsi, un seul test de pompage entre obturateurs, le puits étant en boue, a été effectué entre 1 875-1 920 m (dans les « Grès à Voltzia »), et a permis de récupérer 35 m^3 d'eau du réservoir triasique destinées à la réalisation d'analyses géochimiques. Lors de ce pompage, un pseudo-rabattement de 22 à 47m a été constaté, attribué à un effet de piston. Les valeurs de débit de 4-5 m^3/h obtenues ne sont pas représentatives du comportement de l'aquifère du fait des forts effets pariétaux résultant du colmatage par les boues de forage du réservoir ;
- un log de température a été réalisé un an après la foration, donc sans effet de boue susceptible de perturber la température mesurée. Une température fiable a été mesurée au toit du Buntsandstein : 66 °C (Landrein *et al.*, 2013) ;
- en 2013, parmi les carottes disponibles du Buntsandstein, des mesures de porosité (mercure) et de perméabilité radiales ont été effectuées sur sept échantillons par l'École de Géologie de Nancy à la demande de l'ANDRA (ANDRA, 2013) dans le but de comparer ces paramètres pétrophysiques aux transmissivités obtenues lors des deux *slug-tests*. Les mesures obtenues sur carottes (Tableau 3), montrent que :

- la porosité libre mesurée est comprise entre 2,8 et 4,8 % pour les « Couches intermédiaires » et entre 5,4 et 9,4 % pour le « Grès à Voltzia ». À noter que la porosité mesurée sur quelques carottes est plus faible que la porosité estimée par CMR (5-9 % versus 10-15 % pour le « Grès à Voltzia »),
- la perméabilité intrinsèque mesurée est comprise entre $1,8 \cdot 10^{-13}$ et $6 \cdot 10^{-14}$ m² pour les « Couches intermédiaires » et entre $2,2 \cdot 10^{-13}$ et $4 \cdot 10^{-13}$ m² pour le « Grès à Voltzia »,
- le taux d'argile est de l'ordre de 2-3 % pour la partie gréseuse du « Grès à Voltzia » et plus élevé (3 à 9 %) pour les « Couches intermédiaires ».

Dans la suite de ce rapport, les diverses données pétrophysiques, mesurées ou calculées, acquises par l'ANDRA sur le Buntsandstein du forage EST433 vont être analysées, comparées, critiquées le cas échéant, dans le but d'évaluer la ressource géothermale du Buntsandstein sous Bure.

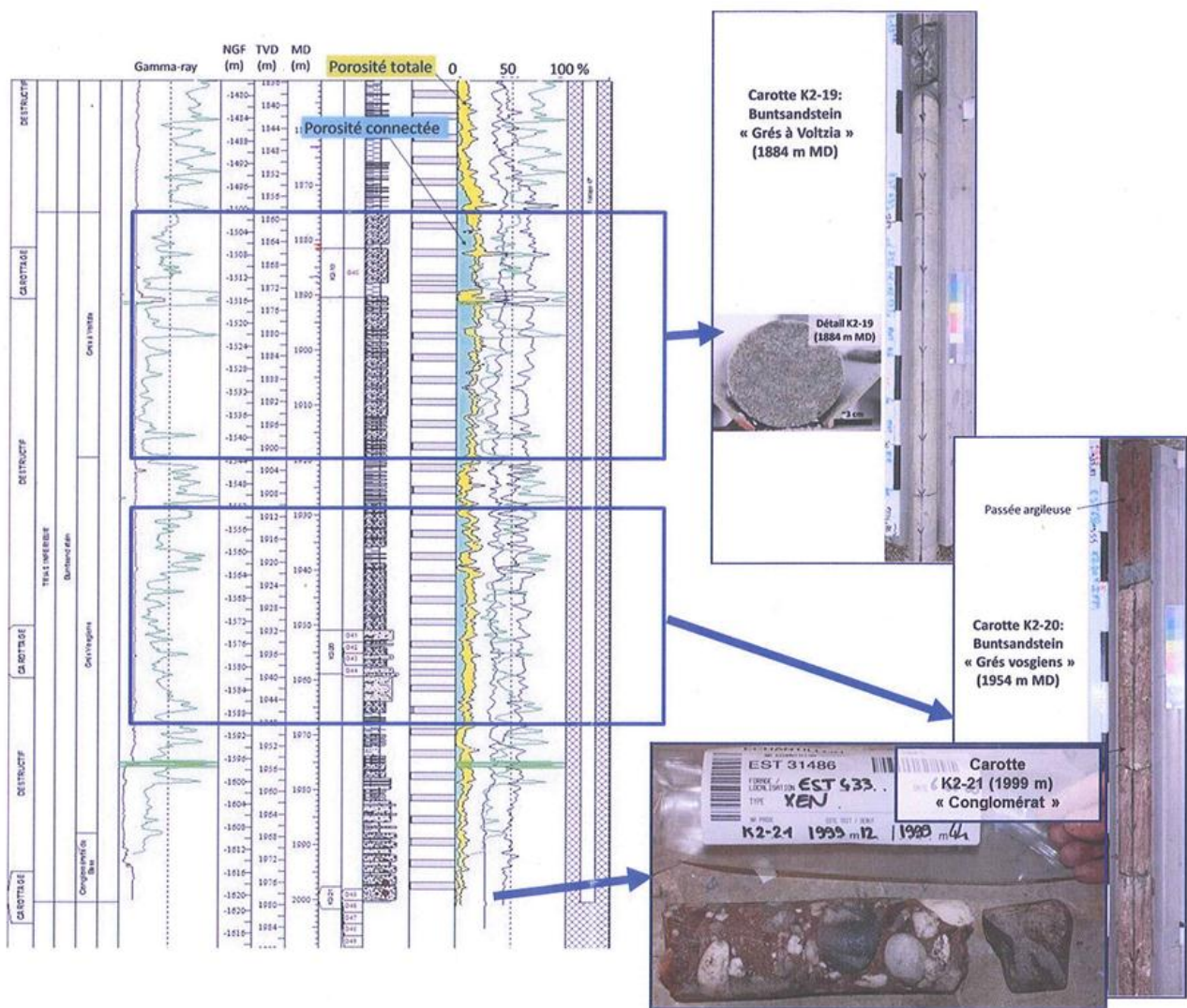
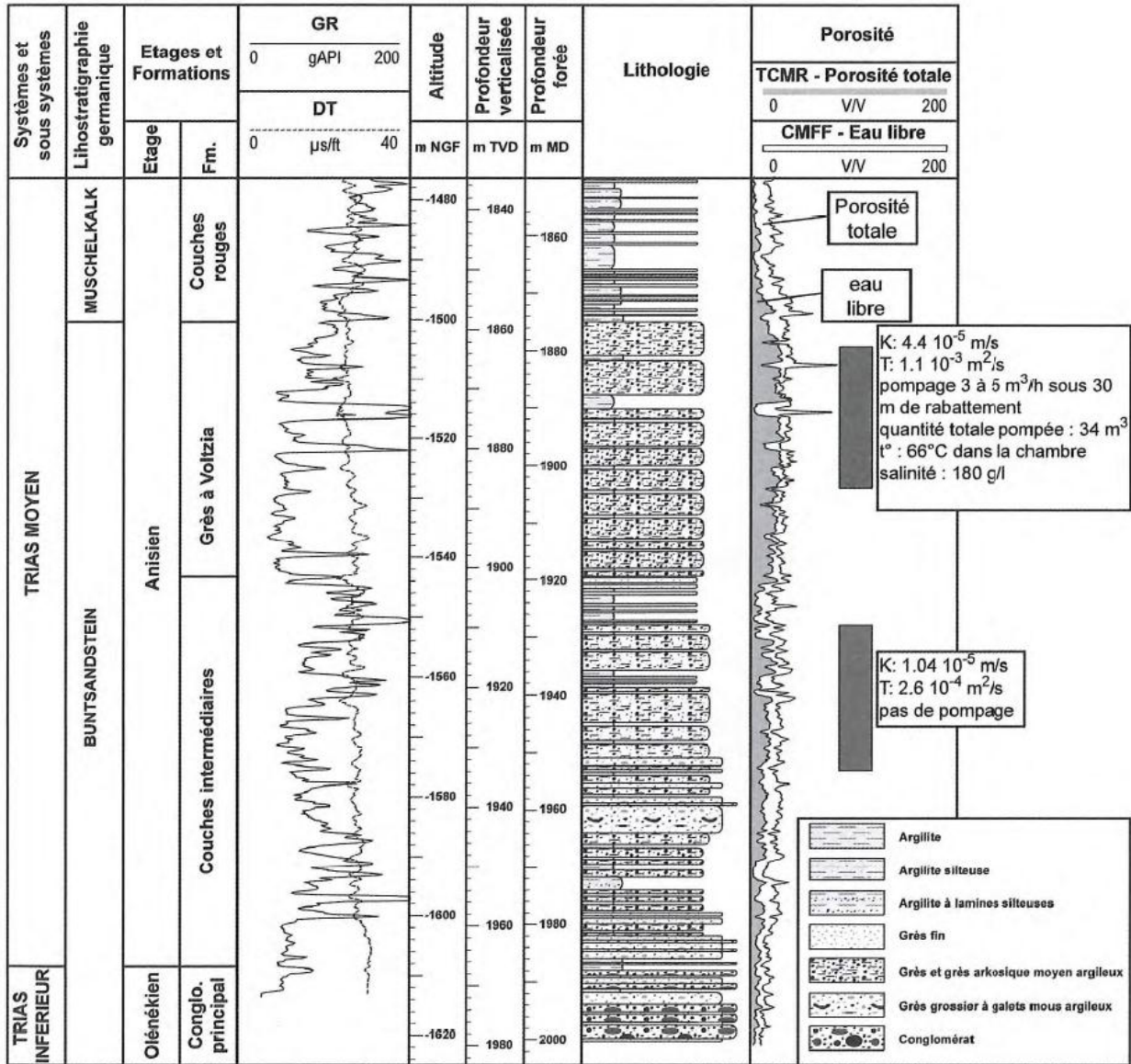


Figure 8 - Partie triasique du log de forage EST433 de Bure, permettant de visualiser les deux passes carottées du Buntsandstein et leurs relations avec la porosité (totale et connectée) ainsi que le conglomérat de fin de forage (K2-21 - 1999m). Concernant la carotte K2-20 lire « Couches intermédiaires » et non pas « Grès vosgiens » comme indiqué sur la figure.

Ressources géothermales sous Bure et sa région



Borehole EST433-Triassic			
Ground Surface Elevation	358.28 m asl		
Diameter	152.4 mm (6.0 in)		
Total Depth	2001.0 m bgl		
Test Interval	T1 ¹	T2 ¹	T3
Depth to Top of Interval (m bgl)	1927.60	1878.65	1785.60
Depth to Bottom of Interval (m bgl)	1952.59	1903.64	1810.49
Length of Test Interval (m)	24.99	24.99	24.99
Flow Model / Skin	Composite Positive	Composite/ Positive	
Hydraulic Conductivity: K (m/s) (95% confidence limit)	1.04E-05 (9.5E-06, 1.06E-05)	4.43E-05 (4.42E-05, 4.44E-05)	
Specific Storage: Ss (1/m) (95% confidence limit)	1.3E-06 (3.0E-07, 3.0E-06)	8.80E-06 (2.34E-06, 2.42E-05)	
Transmissivity: T (m ² /s) (95% confidence limit)	2.60E-04 (2.38E-04, 2.65E-04)	1.11E-03 (1.10E-03, 1.11E-03)	
Storativity: S (-) (95% confidence limit)	3.25E-05 (7.5E-06, 9.0E-05)	2.20E-04 (5.85E-05, 6.05E-04)	
Formation Pressure: P (kPa) (95% confidence limit)	17750.0 ²	17244.93 (17244.93, 17244.94)	
Hydraulic Head: H (m asl)	214.7	214.0	
¹ Estimated parameter values and uncertainty range based on GLUE approach from the perturbation analysis			
² based on the stabilized pressure at the end of RWS3			

Tableau 2 - Log de forage EST433 de la partie Trias (lithologie, diagraphe) avec position des slug-tests (Landrein et al., 2013) et tableau-résultat des deux slug-tests (ANDRA).

Formation carottée	7 éch	N° Échant	Côte début (m)	Hauteur carotte (cm)	Perméabilité intrinsèque (m ²)	Conductivité hydraulique équivalente (m/s)	Transmissivité calculée pour 25 m de carotte (m ² /s)	Porosité libre (%)	Porosité piégée (%)	Porosité totale (%)	Argile (%)	Lithologie	Transmissivité obtenue lors du <i>slug-test</i> (sur 25 m)
« Grès à Voltzia »	1	EST34841	1882,6	22	$3,94. 10^{-13}$	$6,97. 10^{-6}$	$1,74. 10^{-4}$	5,4	15,1	20,5	3	grès	Test n°2 - $T = 1,1. 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s} *$ entre 1879 et 1904 m
	2	EST34777	1886,3	61	$2,20. 10^{-13}$	$3,89. 10^{-6}$	$9,74. 10^{-5}$	9,4	11,4	20,8	2	grès	
	3	EST34781	1888,3	85	$1,28. 10^{-18}$	$2,27. 10^{-11}$	$5,66. 10^{-10}$	2,6	3,5	6,1	> 50	argilite	
« Couches intermédiaires »	4	EST34783	1951,0	31	$5,99. 10^{-14}$	$1,06. 10^{-6}$	$2,65. 10^{-5}$	2,8	9,5	12,3	7	grès	Test n°1 - $2,6. 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s} *$ entre 1929 et 1954m
	5	EST31625	1952,2	10	$1,86. 10^{-13}$	$3,29. 10^{-6}$	$8,23. 10^{-5}$	3,5	7,9	11,4	3	grès	
	6	EST32007	1956,5	16	$5,57. 10^{-14}$	$9,86. 10^{-7}$	$2,46. 10^{-5}$	3,9	13,1	17,0	5	grès	
	7	EST31731	1958,2	21	$2,39. 10^{-13}$	$4,23. 10^{-6}$	$1,06. 10^{-4}$	4,8	12,8	17,6	9	grès	

* Tableau d'équivalence	transmissivité en m ² /s	transmissivité en m ³ /s	transmissivité en D.m
« Grès à Voltzia »	$1,1. 10^{-3}$	$6,22. 10^{-11}$	64,1
« Couches intermédiaires »	$2,6. 10^{-4}$	$1,47. 10^{-11}$	15,1

Tableau 3 - Paramètres physico-minéralogiques et mesures de perméabilité obtenues sur 7 échantillons de carottes (forage EST433) avec calcul de la transmissivité pour 25 m de carottes. Comparaison avec la transmissivité obtenue lors des slug-tests.

4. Évaluation par le BRGM de la ressource géothermale du Buntsandstein et du Permo-carbonifère sous Bure et sa région

La question posée au BRGM est la suivante : y a-t-il une ressource géothermale sous la formation du Callovo-Oxfordien à Bure ; si oui, peut-on caractériser la ressource de type basse température dans le Buntsandstein (< 100 °C) pour une production de chaleur ou de type moyenne température (> 120 °C) dans le Permo-carbonifère pour une production d'électricité ?

L'évaluation de la ressource géothermale repose sur un ensemble de paramètres géométriques (épaisseur des formations utiles, extension de l'aquifère), géochimiques (salinité) et pétrophysiques (température, perméabilité, transmissivité). Cette ressource doit nécessairement être mise en adéquation avec les besoins en surface si l'objectif est de produire de la chaleur (potentiel géothermique = adéquation être « ressource en profondeur » et « besoin en surface »).

Pour répondre à la question relative au Buntsandstein, nous savons en prérequis que les caractéristiques des formations triasiques autour de Bure (dans un rayon de 50 km) sont très incertaines (autre le forage EST433), en l'absence de forages géothermiques. Quelques forages pétroliers nous informent mais avec une incertitude élevée sur les propriétés-réservoir.

Fort de ce constat, notre évaluation de la ressource repose :

- sur les études préalables mentionnées dans le chapitre 2 « Historique » ;
- sur les paramètres (mesurés ou calculés) acquis par l'ANDRA sur le forage EST433, qui pour certains montrent des incohérences en fonction de la méthode adoptée (par ex. : mesure de porosité sur carottes *versus* estimation de la porosité par méthode diagraphique CMR) ;
- sur la comparaison d'opérations géothermiques en réservoirs argilo-gréseux ayant été réalisées dans le Trias du Bassin parisien (Région Île-de-France, Centre, Lorraine) et également d'autres bassins européens (Tableau 4).

Pour cette analyse comparative, il est en effet important de sortir du territoire national dans la mesure où le Trias profond du Bassin parisien a « mauvaise réputation » compte tenu des échecs à Melleray (sud-Orléans) ou à l'ouest de Paris (Cergy, Achères) il y a plus de 30 ans, sachant qu'à l'époque les conditions n'étaient pas nécessairement réunies pour une exploration ou une exploitation optimales (ex. forage sans massif filtrant pour Melleray, choix de sites en périphérie du réservoir gréseux pour Cergy et Achères).

Pour autant, à faible profondeur, les grès du Buntsandstein du Bassin parisien sont exploités en Lorraine, notamment pour des usages de thermalisme et le chauffage de piscine, compte tenu de très bonnes propriétés réservoirs (Tableau 4 et Annexe 2).

En Europe, plusieurs opérations fonctionnent, certaines depuis plus de 20 ans, dans des villes au Danemark (Thisted, Copenhagen), au Royaume Uni (Southampton) ou en Allemagne (Neustadt-Glewe, Neubrandenburg) et ce, après avoir remédié aux difficultés (baisse d'injectivité, risque de colmatage et de corrosion, ...), engendrées par une exploitation en réservoir profond (forte salinité) et argilo-gréseux (présence de fines argileuses, risque d'éboulement par entraînement de sable en cas de grès peu consolidés).

Ressources géothermales sous Bure et sa région

Caractéristique	Thisted (Danemark)	Neubrandenbourg (Allemagne)	Copenhagen (Danemark)	Southampton (Royaume Uni)	Neustadt-Glewe (Allemagne)	Dogger (France)
âge du réservoir argilo-gréseux	Trias supérieur	Trias supérieur	Trias inférieur	Trias inférieur	Trias supérieur	Dogger carbonaté
profondeur du réservoir	1 250 m	1 250 m	2 600 m	1 730 m	2 200 m	1 500-2 000 m
température	46 °C	53 °C	73 °C	75 °C	98 °C	55 – 85 °C
perméabilité	?	?	250 m.D	?	0,5 à 1 D	~2 D (moyenne) (0,2 à 7 D)
transmissivité	70 à 110 D.m	?	12 D.m (well test)	5 à 20 D.m	100 D.m	38 D.m (moy) (3 à 113 D.m)
débit	150 puis 200 m ³ /h	100 m ³ /h	235 m ³ /h	?	120 m ³ /h	100 à 300 m ³ /h
salinité	163 g/l	133 g/l	19 %	125 g/l	227 g/l	6,4 à 35 g/l, (20 g/l moy.)
Commentaire (sites en cours exploitation pour production de chaleur)	Exploité depuis 1984 (7 MWt)	Exploité depuis 1989 (15 MWt)	Exploité depuis 2005 (14 MWt)	Exploité depuis 1990	Exploité depuis 1995	Exploité depuis 1980 (230 MWt)
référence	Hansen, 2011 Mahler et al., 2013	Zenke et al., 2000	Hansen, 2011 Mahler et al., 2013	DECC, 2013	Seibt et al., 2005	Lopez et al. 2010, 2012

Caractéristique	Melleray (France)	Achères (France)	Cergy (France)	Lorraine (thermalisme et chauffage piscine)	Lorraine (tous usages)	Bure (France)	
âge du réservoir argilo-gréseux	Trias moyen	Trias moyen	Trias moyen	Buntsandstein	Buntsandstein	Grès à Voltzia (Bunts.)	Couches intermédiaires (Bunts.)
profondeur du réservoir	1 420 m	1 930 m	1 927 m	437 à 900 m (profondeur des ouvrages)	100 à 1 100 m (profondeur des ouvrages)	1 900 m	1 940 m
température	73 °C	78 °C	77 °C	22 à 35 °C	< 49 °C	66 °C	Plus de 66 °C
perméabilité	320 -560 mD	746-1080mD	260- 720 mD	150-5350 mD 0,2-6,9.10 ⁻⁵ m/s	1800 mD 1,8.10 ⁻⁵ m/s en moyenne	4,4. 10 ⁻⁵ m/s	1,04. 10 ⁻⁵ m/s
transmissivité	11 à 15 D.m	10,8 à 11.2 D.m	3.3- 8.9 D.m	16-600 D.m 0,4-8,3.10 ⁻³ m ² /s	220 D.m 2,2.10 ⁻³ m ² /s en moyenne	64 D.m	15 D.m
débit	140 m ³ /h	?	~70 m ³ /h	?	30 à 150 m ³ /h	inconnu	inconnu
salinité	38 g/l			< 5 g/l (résidu sec 105 °C)	<250 mg/l à 49 g/l	180 g/l	?
commentaire	Exploration avec bonne productivité mais problème d'injectivité. Abandon.	Exploration avec bonne productivité mais mauvaise injectivité. Abandon.	Exploration avec mauvaise productivité. Abandon.	Bonne à excellente productivité (perméabilité de fracture) Exploitation en cours.	Excellente productivité. Exploitation en cours.	Bonne transmissivité comparée au Dogger	Transmissivité correcte comparée au Dogger
références	Lopez et Millot, 2008	Lopez et Millot, 2008	Lopez et Millot, 2008	Babot et al., 1982	Babot et al., 1982	Landrein et al., 2013	Landrein et al., 2013

Tableau 4 - Caractéristiques des réservoirs géothermiques du Trias clastiques en Europe et en France ; comparaison avec le réservoir du Dogger du Bassin parisien.

	Paramètre mesuré	Qualité de la mesure	Paramètre calculé	Qualité du calcul
Porosité efficace	5 à 10 % (« Grès à Voltzia »), 3 à 5 % (« Couches intermédiaires »)	Bonne (mercure) mais possible sous-estimation classique sur carotte (problème de changement d'échelle)	10 à 15 % (« Grès à Voltzia »), < 10 % (« Couches intermédiaires »)	Diagraphie CMR, avec sous-estimation de la porosité <2 % et sur-estimation de la porosité libre du fait de zones cavées avec boue
Perméabilité	2 à 4. 10 ⁻¹³ m ² (2 éch. «Grès à Voltzia ») 10 ⁻¹³ m ² et 10 ⁻¹⁴ m ² (4 éch. « Couches intermédiaires »)	Mesures radiales sur carottes mais peu d'échantillons (6) compris entre 10 et 61 cm de longueur pour les grès		
Transmissivité	1,7 à 0,9.10 ⁻⁴ m ² /s (« Grès à Voltzia ») 1,06 10 ⁻⁴ à 8,2. 10 ⁻⁵ m ² /s (« Couches intermédiaires »)	Transmissivité grossière, estimée pour 25 m à partir de quelques mesures sur carottes ; possible sous-estimation liée au changement d'échelle	1.1.10 ⁻³ m ² /s = 64 D.m (« Grès à Voltzia ») 2.6. 10 ⁻⁴ m ² /s = 15 D.m («Couches intermédiaires »)	Essais de type <i>slug-test</i> , sur tranche de 25m, de courte durée mais considéré comme représentatif.
Débit	4-5 m ³ /h	Mauvaise qualité, du fait des effets pariétaux (boue, <i>cake</i>)		
Température	66°C au toit du Buntsandstein	Bonne qualité car mesure faite à l'équilibre, 1 an après la foration		

Tableau 5 - Comparaison entre les paramètres pétrophysiques, mesurés et calculés, du Buntsandstein au niveau du forage EST433.

4.1. EXISTE-T-IL UNE RESSOURCE GÉOTHERMALE BASSE TEMPÉRATURE POUR LA PRODUCTION DE CHALEUR DANS LE BUNTSANDSTEIN SOUS BURE ET SA RÉGION ?

4.1.1 Nature, épaisseur et profondeur du Buntsandstein sous Bure

Dans le forage EST433 (Tableau 2 et Tableau 3), du point de vue lithologique (Landrein *et al.*, 2013), le « Grès à Voltzia », comprend des grès assez peu cimentés, gris, fins et très peu argileux (~3 %) alors que les « Couches intermédiaires » sont constitués de grès rouges argileux, avec passées d'argile franche (3 à 9 % d'argile). La formation du « Grès à Voltzia » contient quelques intercalations d'argile verte micacée.

Au total, le Buntsandstein a été recoupé sur une épaisseur de 126 m entre 1 875 m et 2 001 m de profondeur (MD). Les unités aquifères reconnues sont au nombre de deux : une unité supérieure dénommée « Grès à Voltzia »⁴ comprise entre 1 875 m et 1 920 m (soit 45 m d'épaisseur) et une unité inférieure dénommée « Couches intermédiaires » comprise entre 1 929 et 1 968 m (soit 39 m d'épaisseur), pouvant correspondre à un aquifère bicouche de 84 m d'épaisseur cumulée (Figure 8) dont la hauteur utile (productrice) n'est pas déterminée dans le forage EST433. À titre de comparaison, l'épaisseur de la formation recoupée dans le forage EST433 (> 126 m) est équivalente à celle du Trias (Keuper), foré et producteur, en phase d'exploration à Achères (60 m dont 15 m de hauteur utile) et à Melleray (140 m dont 13 m de hauteur utile)⁵. Bien que la hauteur utile soit inconnue dans le forage EST433, on peut penser que le caractère « propre » du « Grès à Voltzia » (45 m au total) conduirait à une hauteur utile supérieure à une quinzaine de mètres.

À titre de comparaison, dans le forage de Germisay situé à 10 km au sud de Bure (Annexe 1), la succession « Grès à Voltzia » puis « Couches intermédiaires » atteint 85 m d'épaisseur alors que le conglomérat sous-jacent est de 72 m d'épaisseur (entre 1 357 m et 1 429 m de profondeur).

Concernant le conglomérat dans lequel le forage EST433 a été stoppé, on rappelle que l'avis de l'ANDRA repose sur l'expertise de Sylvie Bourquin (ex. Bourquin *et al.*, 2006, 2009), qui considère que le conglomérat partiellement recoupé vers 2 000 m MD correspond au Conglomérat principal et que la série du « Grès vosgien », non forée ne devrait pas dépasser quelques dizaines de mètres de puissance. Bien que l'avis de l'expert soit crédible, il n'en reste pas moins qu'une incertitude persiste sur l'épaisseur du « Grès vosgien » (voire son existence), tant que le contact Trias/Permien (formation anté-mésozoïque) n'aura pas été recoupé en forage. Cette information est d'autant plus capitale que l'expérience acquise en Lorraine montre que le « Grès vosgien » peut constituer un excellent aquifère (ex. Amnéville et Nancy, Tableau 2 et Annexe 2).

4.1.2 Température du Buntsandstein sous Bure

Le profil de température réalisé un an après la foration (donc sans effet de boue susceptible de perturber la température mesurée) fournit une température fiable au toit du Buntsandstein de 66 °C, et a permis de calculer un gradient géothermique moyen de l'ordre de 3 °C/100 m sous Bure et de 3,34 °C/100 m au niveau du Trias supérieur foré (Landrein *et al.* 2013).

La température de 66 °C est cohérente avec la modélisation thermique 3D faite par le BRGM dans le cadre du projet CLASTIQ (Bonté *et al.*, 2010). Une telle température se situe dans la fourchette des températures de fluide exploitées dans le Dogger comprise entre 57 et 84 °C en fonction de la profondeur du réservoir (1 600 à 1 800 m) et entre 46 et 98 °C dans le Trias exploité en Europe

⁴ Le voltzia est un conifère de la taille d'un arbuste à l'état fossile.

⁵ À titre de comparaison, la hauteur utile dans le Dogger peut varier entre 5 et 47 m avec une moyenne d'environ 20 m (Lopez *et al.*, 2010, 2012).

(Tableau 4). Cette gamme de température permet une exploitation géothermique par échange direct au travers d'échangeurs de chaleur (Bugarel et al., 2011).

4.1.3 Salinité du Buntsandstein sous Bure

Dans le forage EST433, l'eau de composition chlorurée sodique extraite de la partie supérieure du Buntsandstein (entre 1862 et 1887 m) présente une salinité de 180 g/l, constituée principalement de NaCl. La salinité de ces saumures est très élevée comparée à celle des eaux du Dogger du Bassin parisien comprise entre 6,5 et 35 g/l mais aussi des eaux du Trias (Keuper), échantillonnées à Melleray (35-38 g/l) ou à Achères (94 g/l).

En cas d'exploitation, une telle salinité - à NaCl dominant- peut générer des risques de corrosion liés à la présence de chlorure, des risques de colmatage (par précipitation), et des difficultés de réinjection (prévoir la filtration des saumures refroidies). À cet égard, malgré sa bonne productivité, le doublet réalisé à Achères dans le Trias a été abandonné (au profit du Dogger), car les teneurs en colloïdes riches en fer et en silice, résultant de la précipitation après refroidissement de la ressource (94 g/l), entraînaient une forte résistance à l'injection.

Pour autant, des saumures très salées sont exploitées dans le Trias argilo-gréseux de plusieurs opérations géothermiques en Europe, comme à Neustadt-Glewe (227 g/l) dans le nord de l'Allemagne ou à Thisted (163 g/l) au Danemark, qui fonctionnent depuis plus de 20 ans (Tableau 4). Pour ce faire, des dispositifs de prévention ont été mis en place : à titre d'exemple, un matériau hautement résistant contre la corrosion (e.g. titane) est utilisé au niveau de l'échangeur de chaleur tandis qu'un système de filtrage des fines est installé avant réinjection des saumures refroidies (Seibt et al. 2005, Mahler et al. 2013).

4.1.4 Porosité, perméabilité et transmissivité du Buntsandstein sous Bure

En comparant les valeurs mesurées et calculées de porosités, de perméabilités et de transmissivités des formations gréseuses du Buntsandstein, on constate des incohérences (Tableau 3 et Tableau 5) qui doivent être analysées et explicitées :

- les porosités mesurées sur deux carottes de « Grès à Voltzia » comprises entre 5 et 10 % sont très inférieures aux porosités calculées par CMR (10-15 % entre 1 875 et 1 920 m). À noter que selon Landrein et al. (2013), les porosités CMR sont à la fois i) sur-estimées car obtenues dans des zones cavées enrichies en boue et ii) sous-estimées (< 2 %) compte tenu du seuil retenu pour la mesure, inadapté au Trias ;
- les perméabilités mesurées sur carottes sont de l'ordre de 2 à 4.10^{-13} m² ($\sim 10^{-6}$ m/s) pour le « Grès à Voltzia » et comprise entre 2.10^{-13} et 6.10^{-14} m² (de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m/s) pour les « Couches intermédiaires » alors que les perméabilités estimées lors du *slug-test* hydraulique (conductivité hydraulique) sont de $4,43.10^{-5}$ m/s pour le « Grès à Voltzia » et de $1,04.10^{-5}$ m/s pour les « Couches intermédiaires » (Tableau 2). Ainsi, on constate un écart, d'un ordre de grandeur (facteur 10), entre ces deux types de perméabilités ;
- d'après les tests hydrauliques de type *slug-test* (Tableau 2)⁶, qui ne permettent d'estimer les propriétés hydrauliques de l'aquifère que dans le proche voisinage du puits, les transmissivités

⁶ Le test n°1 indique une transmissivité de $2,6.10^{-4}$ m²/s sur 25 m pour la partie haute (entre 1928 et 1953 m) de la formation des « Couches intermédiaires » reconnue entre 1928 et 1969 m (soit 41 m au total), alors que le test n°2 indique une transmissivité de $1,1.10^{-3}$ m²/s sur 25 m de la partie haute (entre 1879 et 1 904 m) de la formation du « Grès à Voltzia », reconnue entre 1875 et 1920 m (soit 45 m au total). Si on somme ces deux transmissivités (50m cumulés), la transmissivité totale s'élève à $1,36.10^{-3}$ m²/s, sachant qu'au total, la formation aquifère recoupée en forage (« Couches intermédiaires » et « Grès à Voltzia ») pourrait faire plus de 80 m d'épaisseur d'après les porosités estimées par CMR (*Combinable Magnetic Resonance*).

obtenues sont de $1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le « Grès à Voltzia » et de $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les « Couches intermédiaires » alors qu'un calcul, réalisé à partir des quelques perméabilités mesurées sur carottes, indique des valeurs de transmissivités (extrapolées sur 25 m, tableau 5) comprises entre $1,7 \cdot 10^{-4}$ et $0,97 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour le « Grès à Voltzia » et entre $1,06 \cdot 10^{-4}$ et $8,23 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$ pour les « Couches intermédiaires » (soit également un facteur 10).

Comment expliquer ces différences entre les valeurs de porosité et perméabilité mesurées (sur carottes) et « calculées » (test hydraulique ou diagraphie) ?

- les mesures sur carottes sont peu nombreuses, ce qui pose le problème de leur représentativité : i) 3 mesures pour le « Grès à Voltzia » dont une mesure réalisée dans une passée métrique imperméable ($> 50\%$ argile avec $k = 1,28 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$) et ii) 5 mesures pour les « Couches intermédiaires » dont seulement deux (1 951 et 1 952 m) ont été faites dans la zone de test hydraulique ;
- le changement d'échelle « carotte décimétrique *versus* test hydraulique décamétrique » montre fréquemment que les transmissivités calculées à partir des valeurs de perméabilité mesurées sur carotte sous-estiment la transmissivité mesurée lors d'un essai de puits. C'est un problème classique de changement d'échelle (*upscaling*) et de support de mesure ;
- dans la mesure où le « Grès à Voltzia » est constitué de grès assez peu cimentés⁷, gris, fins plus ou moins friables, on peut aussi émettre l'hypothèse que les carottes ont été réalisées dans des zones un peu plus consolidées (non friables) car cimentées et potentiellement moins perméables.

L'impossibilité d'avoir pu faire des tests de production dans les règles de l'art (pas de nettoyage à l'eau claire, pas de test de longue durée, pas de test d'injectivité,...) rend les interprétations délicates. À cet égard et pour cause de colmatage caractérisé, les valeurs de débit affiché de 4-5 m^3/h avec le rabattement indiqué ne sont pas fiables et donc inutilisables pour une estimation du débit et de son impact sur l'aquifère.

Pour autant, bien que le test hydraulique n'ait pas été réalisé dans des conditions optimales, les valeurs de perméabilité et de transmissivité obtenues ($1,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ pour 25 m de « Grès à Voltzia » sur une épaisseur totale de 45 m selon le CMR et de $2,6 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ pour 25 m de « Couches intermédiaires » pour une épaisseur totale de 39 m selon le CMR) sont considérées comme acceptables en termes d'ordre de grandeur et plus crédibles que les valeurs mesurées sur carottes (Tableau 5).

Ainsi, le « Grès à Voltzia » apparaît comme l'aquifère le plus favorable du Trias foré sous Bure, sachant que le calcul de la transmissivité : i) ne considère que 60 % des formations réputées aquifères forées (à savoir 50 m pris en compte sur 84 m) ; ii) n'intègre pas le « Grès vosgien » de puissance inconnue car non foré sous le « Conglomérat principal » et réputé aquifère en Lorraine.

À titre de comparaison avec des opérations géothermiques qui fonctionnent en France et en Europe (Tableau 4), on constate que :

- les transmissivités qui permettent de soutenir de manière économique des débits intéressants pour la géothermie profonde sont au moins de quelques D.m, généralement supérieures ou égales à 10 D.m ;

⁷ À titre de comparaison il est précisé dans le rapport de fin de forage de Lézerville (LZV1) situé au sud-est de Bure : dans le Buntsandstein recoupé entre 1 396 et 1 447 m MD (fin du forage), « les grès moyens à grossiers sont dans l'ensemble assez propres, peu cimentés et manifestement poreux et perméables ».

- les transmissivités du « Grès à Voltzia » ($1,1 \cdot 10^{-3}$ m²/s soit 64 D.m) et des « Couches intermédiaires » ($2,6 \cdot 10^{-4}$ m²/s soit 15 D.m) sont équivalentes à celles du Dogger, comprises entre 3 et 113 D.m avec une moyenne de 38 D.m (Lopez et *al.*, 2010). Elles sont en revanche inférieures à la moyenne des transmissivités obtenues en Lorraine (220 D.m).

En conclusion, à défaut de test de puits de longue durée qui aurait pu permettre de savoir si l'aquifère était capable de soutenir un débit géothermique de manière durable, on privilégiera les transmissivités hydrauliques estimées à partir de l'interprétation des deux essais de type *slug-test*. Ces tests permettent de mesurer la réponse de l'aquifère sur des temps courts et d'en déduire ses propriétés au voisinage du puits. Les transmissivités obtenues ainsi sont similaires à celles de l'aquifère du Dogger dont la chaleur géothermale est exploitée à des profondeurs (1 500-2 000 m) et des températures comparables (55-80 °C) pour alimenter plusieurs réseaux de chaleur dans la région parisienne depuis plus de 40 ans. L'extension spatiale des formations (voir ci-dessous) et la présence de niveaux perméables distribués de manière uniforme, laisse supposer que le stock de chaleur disponible est, là encore, similaire à celui de « l'aquifère du Dogger » en région parisienne et que son exploitation pourrait se faire de manière durable.

4.1.5 Extension géographique du Buntsandstein

Les nombreuses études réalisées depuis 1976 et dont l'historique a été rappelé dans le chapitre 2 montrent que le Buntsandstein est une formation continue régionalement, qui s'étend au nord de Bure vers Commercy et qui se termine à l'ouest de Saint-Dizier, en sachant que le site de Bure se positionne dans l'axe NE-SW du réseau fluvial principal du Trias (cf. Figure 10 de l'Annexe 2).

Ainsi, le site de Bure se situe à proximité de la limite occidentale de l'aquifère du Buntsandstein. La zone, dans laquelle l'eau de cet aquifère est portée à une température de 60-70 °C, est certainement très étendue, bien au-delà de Bure. En ce sens, si la formation est perméable au droit des centres urbains où sont concentrés les besoins (notamment Commercy), la ressource pourrait y être explorée pour production de chaleur, comme le projet en avait été fait dans les années 1980 (Desplan et *al.*, 1981). À l'époque le projet avait avorté suite aux difficultés de réinjection sur le site de Melleray. Aujourd'hui, de telles difficultés peuvent être levées comme le montrent les exploitations existantes en Europe (Tableau 4).

4.2. EXISTE-T-IL UNE RESSOURCE GÉOTHERMALE DE MOYENNE TEMPÉRATURE POUR LA PRODUCTION D'ÉLECTRICITÉ DANS LE PERMO-CARBONIFÈRE SOUS BURE ET SA RÉGION ?

4.2.1 Introduction

Dans la mesure où le forage EST433 s'est terminé à 2001m de profondeur dans un épais conglomérat du Trias inférieur, il n'a pas pu atteindre les niveaux permo-carbonifères sous-jacents, comme reconnu dans le forage de Germisay, situé à 10 km au sud du site de Bure. En conséquence, l'existence potentielle de réservoirs perméables qui pourraient être propices à la géothermie sous Bure, doit s'apprécier sur la base d'études antérieures synthétisées dans ce chapitre.

4.2.2 Connaissance géologique du bassin permo-carbonifère sarro-lorrain

L'existence de bassins permo-carbonifères sous la couverture sédimentaire mésozoïque du Bassin parisien est connue de longue date (synthèse de Lienhardt, 1961 ; BRGM, 1980 ; Mascle, 1990). Dans la région de Bure, ces séries permo-carbonifères constituent le prolongement occidental du bassin sarro-lorrain affleurant plus à l'est (Donsimoni, 1981). Ce sont donc plus des questions relatives à l'âge des séries, à leur épaisseur et perméabilité (donc à leur faciès) qui nous intéressent ici, plutôt qu'à l'existence même du bassin, connu de longue date (Figure 9).

En termes d'âge, l'écorché pré-mésozoïque des bassins permo-carbonifères produit par l'IFP (Delmas et al., 2002) indique la présence de séries permienes, stéphaniennes et westphaliennes au droit du site de Bure (Figure 9). En revanche et suite au retraitement et à la réinterprétation des campagnes de sismique réflexion couvrant le secteur de Bure en 1998, le référentiel géologique de site de l'ANDRA publié en 2001 conclut à l'absence de séries westphaliennes, seuls le Stéphanien et le Permien seraient présents.

D'après plusieurs forages pétroliers, les épaisseurs cumulées de la série permo-carbonifère sont de l'ordre de plusieurs milliers de mètres, les séries westphaliennes étant les plus puissantes. Le forage de Gironville (43 km au nord-est du site) a recoupé 4 509 m de sédiments westphaliens et les sédiments permienes ont été reconnus sur 1 328 m d'épaisseur au forage de Germisay, sans en atteindre la base (10 km au sud de Bure). D'autre part, la coupe produite par l'IFP en 2002 en accompagnement de l'écorché géologique, située 35 km à l'est du site (Figure 10), indique localement des épaisseurs d'environ 1 300 m pour le Permien, 1 800 m pour le Stéphanien, et 2 800m pour le Westphalien, soit près de 6 000 m de formations permo-carbonifères sous le Trias. À Bure s.s., le retraitement des anciens profils sismiques haute résolution acquis par l'ANDRA (Annexe 1) suggère des épaisseurs de 3 500 m de Permo-Stéphanien sous le Trias. En revanche, les formations riches en charbon d'âge Westphalien sont considérées, sur la base d'arguments paléogéographiques et géométriques, comme absents.

Sous le Trias, le Permien est constitué d'unités gréseuses et argilo-gréseuses (sédimentation continentale). Dans le forage de Germisay (n° 14-1113) proche de Bure, le Permien se compose de grès rougeâtres, localement gris-verdâtres, à grains grossier, localement conglomératiques, avec de minces intercalations d'argile indurée, légèrement dolomitique.

En général, le Stéphanien sous-jacent, qui repose en discordance angulaire sur le Westphalien, est composé de conglomérats fluviatiles à la base, puis d'alternances argilo-gréseuses déposés dans des environnements fluviolacustres.

Quand il est présent, le Westphalien sous-jacent est également constitué de sédiments grésos-conglomératiques à argileux, déposés dans des environnements fluviolacustres ; cet étage

renferme souvent du charbon (exploité dans le passé en Sarre et en Lorraine) soit une centaine de veines répertoriées sur environ 4 000 m de dépôts westphaliens dans le houiller lorrain.

4.2.3 Apport de la pétrophysique des formations permio-carbonifères et évaluation de la ressource

Les unités argilo-gréseuses du Permien sont souvent réputées peu à très peu perméables (*tight reservoir*). Par exemple, cette formation constitue en Lorraine du nord, l'imperméable sur lequel repose l'aquifère des grès du Trias inférieur. Si la transmissivité verticale de ces formations gréseuses permienues semble en général très faible, cela n'exclut pas la possibilité de trouver des zones perméables tels ceux recoupés dans le forage de Germisay 1 (n° 14-1113) situé en bordure du « fossé de Gondrecourt » (position en Annexe 1). Dans ce cas précis, l'influence des failles NE-SW de ce fossé, montrant un rejet vertical d'environ 40 m, et connectées à des failles NW-SE (faisceau de Poisson - Bressoncourt), mériterait d'être évalué afin de déterminer leur rôle sur les venues d'eau rencontrées en forage (matricielle versus de fracture).

Les travaux miniers du bassin de Merlebach, qui appartient au bassin sarro-lorrain (Figure 9) ont montré que le Carbonifère (Stéphanien et Westphalien) était peu perméable (« mine sèche ») et que les venues d'eau de la mine provenaient de failles qui mettaient en connexion les travaux miniers avec l'aquifère du Trias sus-jacent. À partir de valeurs de porosité et perméabilité mesurées sur forage recoupant le bassin minier, Nguyen-thé et Vaute (2005) ont indiqué que les formations gréso-conglomératiques (ex. Conglomérat de Merlebach, Grès de Sainte-Fontaine) appartiennent à la catégorie des formations imperméables : i) la moyenne des 102 données de porosité (faciès conglomératiques ou gréseux plus ou moins fins) est de 5,8 %, avec un écart type de 2,8 % ; ii) la moyenne des 11 données de perméabilité disponibles associées au même type de faciès n'est que de 9.10^{-10} m/s, avec un écart type de $5,8.10^{-10}$ m/s.

Cependant, ces auteurs pensent que ces valeurs de perméabilité acquises en forage ne rendent peut être pas compte de la perméabilité en grand des formations et qu'elles peuvent être de ce fait sous-estimées. De même, un forage pétrolier (Vaxy 1), réalisé en 2008 dans le Pays de Saulnois (partie du bassin entre Metz et Sarrebourg) a identifié un réservoir gréseux stéphanien, poreux et perméable⁸, qui semble indiquer l'existence de formations plus perméables qu'à Merlebach.

⁸ <http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/593.pdf>

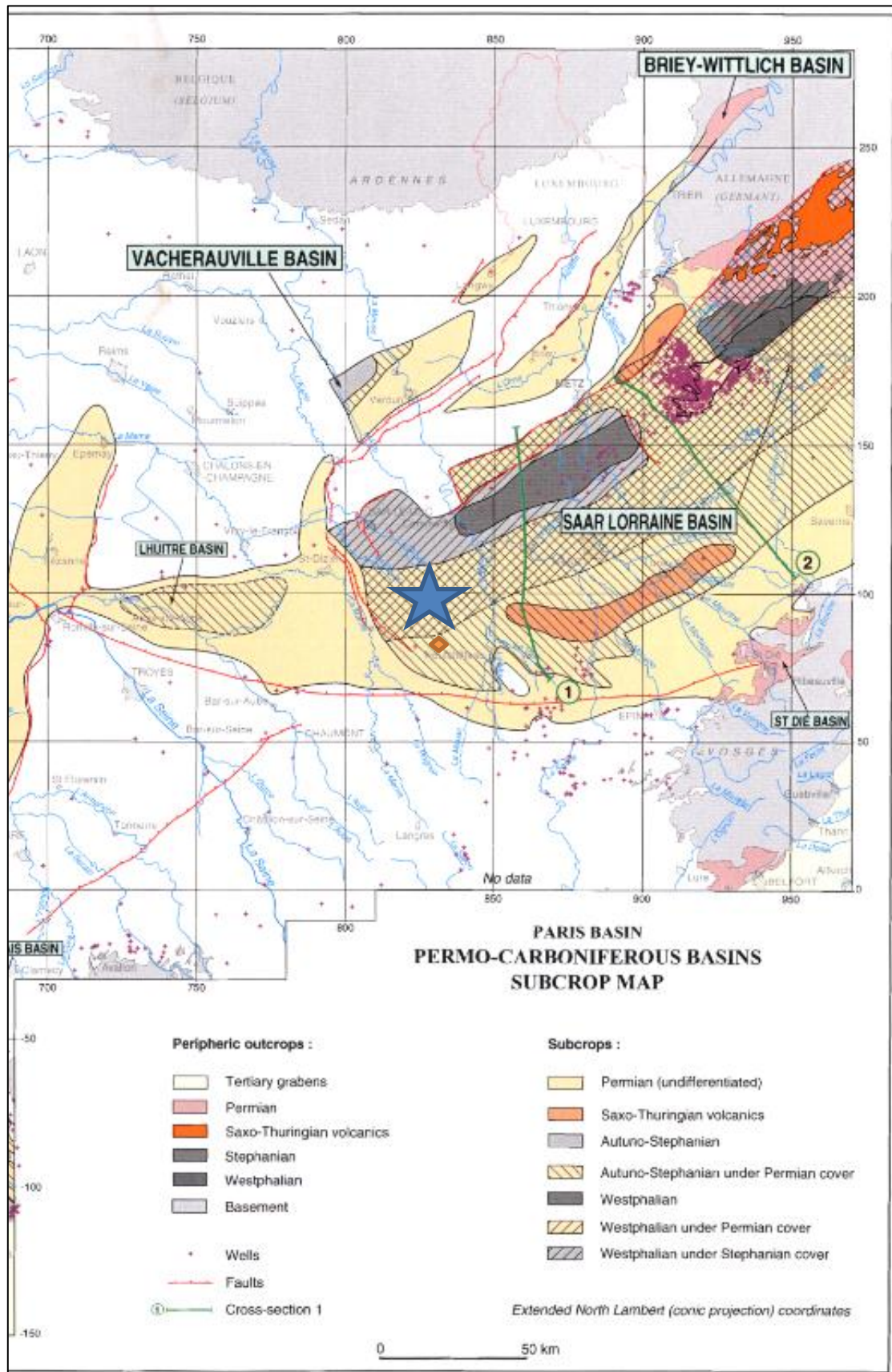


Figure 9 - Carte du bassin permo-carbonifère sarro-lorrain (synthèse IFP; Delmas et al., 2002).
Le site de Bure est représenté par une étoile bleue ; le forage de Germisay est marqué par un losange orange.

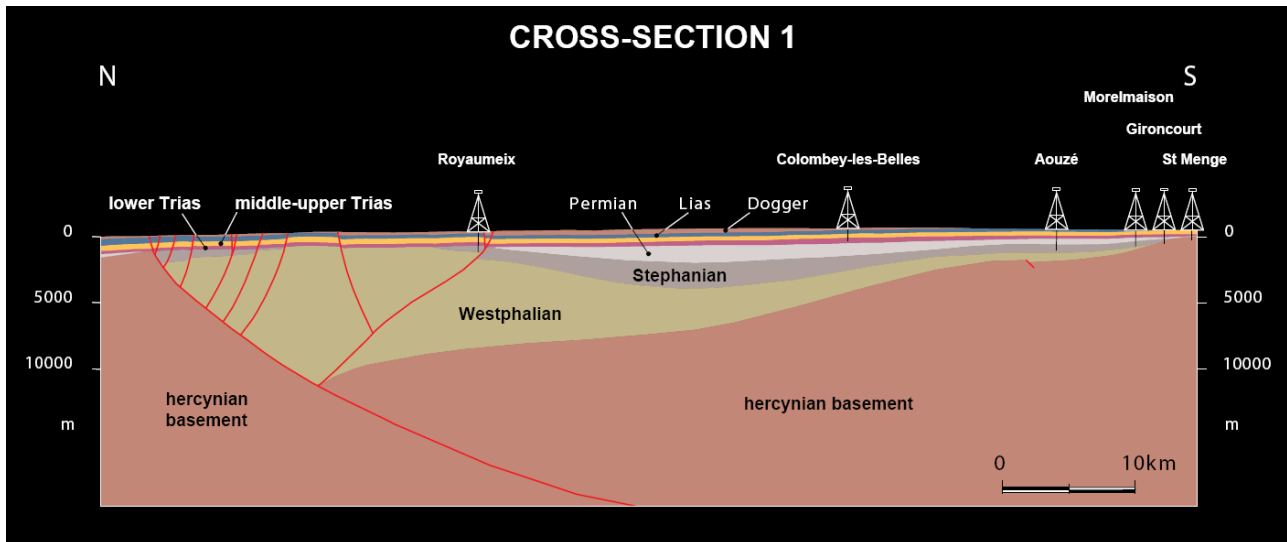


Figure 10 - Coupe du Bassin permio-carbonifère sarro-lorrain (synthèse IFP; Delmas et al., 2002). La coupe correspond au trait de coupe 1 de la figure 9, située bien à l'est de Bure.

En termes de ressource géothermale, la faible perméabilité du Permien (bien que localement, des niveaux réservoirs aient été reconnus) est *a priori* défavorable pour une production géothermique conventionnelle, exploitant une roche aquifère à bonne perméabilité matricielle. Seules les failles sont susceptibles d'être perméables, permettant notamment aux fluides du Trias de descendre dans les formations sous-jacentes. Quant aux formations carbonifères, d'après les mesures pétrophysiques acquises sur le bassin minier de Merlebach, elles montrent de faibles perméabilités (sur carottes), également défavorables pour la géothermie conventionnelle, mais qui méritent d'être confirmées en grand.

Globalement, l'épaisseur des séries permio-carbonifères dans la région de Bure pourraient atteindre plusieurs milliers de mètres sous le Trias. Si ces épaisseurs se confirment, on peut estimer qu'une température de 150 °C, favorable à la production d'électricité par cycle binaire, serait atteinte vers 4 600 m de profondeur, sous réserve que le gradient thermique, calculé dans les séries recoupées par le forage EST433, reste stable sous le Trias (30 °C/km).

Concernant ces formations chaudes et *a priori* peu perméables, une alternative à l'exploitation conventionnelle des aquifères profonds est le recours aux techniques de stimulation (hydraulique, chimique, thermique...) pour améliorer les propriétés hydrogéologiques des niveaux : l'ensemble de ces techniques caractérise les Systèmes Géothermiques Ouvragés (EGS – *Engineered Geothermal Systems*). Certaines des techniques de stimulation comme la stimulation chimique peu agressive, sont utilisées en routine pour « développer » les puits géothermiques du Dogger après foration. La combinaison de l'ensemble de ces techniques pour obtenir une augmentation conséquente (au moins un ordre de grandeur) de la transmissivité des formations qui n'auraient pas naturellement de bonnes propriétés aquifères reste cependant à définir au cas par cas et elle est aujourd'hui au stade de la démonstration industrielle en France sur le site pilote de Soultz.

5. Conclusions de l'expertise BRGM

D'après les différents arguments énoncés dans ce rapport d'expertise, les formations gréseuses du Buntsandstein, recoupées en forage (EST433) à Bure, contiennent une ressource géothermale de type basse température de l'ordre de 66 °C. La zone dans laquelle l'eau de cet aquifère est portée à cette température est certainement très étendue, bien au-delà de Bure. Cette ressource est caractérisée par une transmissivité équivalente à plus élevée que celle du Dogger carbonaté exploité en région parisienne comme le montrent deux essais de type *slug-test* réalisés dans le forage cité plus haut. De tels essais permettent d'estimer les propriétés hydrauliques de l'aquifère dans le proche voisinage du puits, mais ne permettent pas de savoir si l'aquifère est capable de soutenir un débit géothermique de manière durable.

Pour autant, l'extension régionale des formations clastiques et la présence de niveaux perméables distribués de manière uniforme, laissent supposer que le stock de chaleur disponible est similaire à celui de « l'aquifère du Dogger » en région parisienne et que son exploitation pourrait se faire de manière durable.

Si on compare cette ressource géothermale à celle exploitée dans la région parisienne (Dogger), on peut considérer cette ressource du Buntsandstein dans la région de Bure comme conventionnelle du point de vue de la profondeur des formations aquifères (autour de 1 900 m), de leur épaisseur (au moins 80 m de Buntsandstein reconnue en forage⁹), de leur transmissivité estimée (15 et 64 Dm) et de la température des saumures (66 °C au toit du Buntsandstein). En revanche, la ressource est atypique en termes de salinité (180 g/l, avec Na Cl dominant) et de lithologie (argilo-gréseux) comparée au même Dogger du Bassin parisien.

Ainsi, plus que la productivité durable de l'exploitation de l'aquifère, la question la plus cruciale est certainement celle de la réinjection des saumures refroidies dans le réservoir argilo-gréseux, car elle est réputée difficile dans le Trias du Bassin parisien (cas du Keuper de Melleray et de Cergy) mais pas rédhibitoire comme le prouvent les opérations fonctionnant depuis plusieurs dizaines d'années en Europe (Tableau 4).

Cela implique que des dispositifs de prévention adaptés soient conçus et mis en œuvre dès le stade de l'exploration (installation d'un massif filtrant), permettant ainsi d'éviter tout problème d'éboulement, de venue de sable, de corrosion, de colmatage, ou bien susceptible d'avoir une incidence sur l'injection et plus globalement la pérennité de l'exploitation de la ressource. Ce risque d'échec à la réinjection ne peut être évalué correctement à Bure, car aucun test d'injectivité sur les formations gréseuses du Buntsandstein n'a été réalisé sur le forage EST433.

En cas de difficulté avérée à réinjecter, une étude du BRGM réalisée dans le cadre du projet CLASTIQ-2 a montré que, sous certaines conditions (environnement lithologique) et sous réserve d'autorisation administrative, l'injection de saumures refroidies du Trias dans l'aquifère carbonaté du Dogger sus-jacent permettrait de pallier cet inconvénient (Castillo et al., 2012).

Comparées au Buntsandstein sus-jacent, les formations permo-carbonifères argilo-gréseuses pourraient être généralement peu perméables (en terme de matrice) et donc *a priori* peu favorables au développement de la géothermie conventionnelle. Pour autant, sans données complémentaires dédiées (forage géothermique notamment), il est impossible d'estimer, dans la région Bure, les transmissivités du Permo-carbonifère, dont les formations pourraient être particulièrement épaisses et localement fracturées.

⁹ On rappelle que la partie inférieure du Buntsandstein, composée des « Grès vosgiens », aquifères en Lorraine (sous Nancy), n'a pas été recoupée dans le forage EST433 et de fait n'a pu être prise en compte dans l'évaluation.

Compte tenu des températures susceptibles d'être atteintes à grande profondeur (estimées à 150 °C vers 4600 m), favorables à la production d'électricité par cycle binaire, les formations perméables de la région de Bure mériteraient d'être investiguées en termes de géothermie non conventionnelle (EGS) si les faibles perméabilités venaient à être confirmées et pour autant que la stimulation hydraulique, technique permettant de créer un échangeur efficace, puisse être mise en œuvre.

Références bibliographiques

- Allemmoz M.** (1983) - Stockage de déchets radioactifs en formations géologiques. Région Lorraine. Confirmation des caractéristiques favorables. 1ere phase, 1ere partie. Caractéristiques des aquifères profonds. Rapport BRGM/83-SGN-908-LOR.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/83-SGN-908-LOR.pdf>
- ANDRA collectif** (2001) - Référentiel géologique du site de Meuse/Haute-Marne. Tome 2. Les connaissances à l'échelle régionale. A RP ADS 99-005.
- ANDRA** (2013) - Mesures de perméabilité sur échantillons. Ouvrage EST433 01/08/2013 par GEORESSOPURCES- ENCG. Rapport C.RP.OENG.13. 0132.A, 16p.
- Babot Y., Maiaux C., Ricour J.** (1982) – Le réservoir des grès du Permo-Trias en Lorraine. Utilisation actuelle et perspectives de valorisations. *T.S.M. L'eau*, Vol. 77, N°3, mars 1982, pp. 133-140.
- Babot Y., Mangold C., Simler L.** (1972) – Etude hydrogéologique de la nappe aquifère des grès infratriasiques dans le nord-est de la France. Rapport BRGM n° 72 SGN 047 GAL, 63 p.
- Bonté D., Guillou-Frottier L., Garibaldi C., Bourguine B., Lopez S., Bouchot V.** (2010) - Subsurface temperature maps in French sedimentary basins: new data compilation and interpolation. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 181, 4, pp.377-390.
- Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A.** (2008) - Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris. Rapport final BRGM - RP-56463-FR, 92 p.
<http://infoterre.brgm.fr/rapports/RP-56463-FR.pdf>
- Bourguine B., Denis L., Filhine-Tresarrieu, Monnot P., Nguyen-Thé D., Robelin C.** (2007) - Atlas du potentiel géothermique des aquifères lorrains. Rapport BRGM/RP-54987-FR, 83 p.
- Bourquin S., Péron 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.
- Bourquin S., Guillocheau F., Péron S.** (2009) - Braided rivers within an arid alluvial plain (example from the Lower Triassic, western German Basin): recognition criteria and expression of stratigraphic cycles. *Sedimentology*, 56, pp 2235-2264.
- Bugarel F. Lasne E., Tournayes D.** (2011) - De nouvelles perspectives pour l'exploitation des ressources géothermales. *Geosciences* n° 13, 8 p.
http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/66/24/80/PDF/06-Bugarel-Lasne-Tournaye_a_BD.pdf
- BRGM collectif** (1980). Synthèse géologique du bassin de Paris, Mémoires du BRGM n°101 et 102.
- Castillo C., Kervéan C., Thiéry D. et collaborateurs** (2012) - Impact géochimique de l'injection des saumures triasiques dans le Dogger carbonaté (bassin de Paris, France) (projet CLASTIQ-2). Rapport BRGM/RP-61122 -FR, 46 p.
- Comité de Bassin Rhin-Meuse** (1996) – Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux. Document principal et annexes adoptés par le comité de Bassin le 2 juillet 1996, arrêtés par le Préfet le 15 novembre 1996 : document principal, cartographie et annexes, glossaire, guide juridique et références, guide pour gérer l'eau.
- DECC** (2013) - Deep Geothermal Review Study. Final Report. Department of Energy & Climate Change (DECC). October 2013

- Delmas J., Houel P., Vially R.** (2002) - Paris Basin - Petroleum potential, Rapport régional d'évaluation pétrolière, IFP.
- Desplan A., Lejeune J.M., Maiaix C.** (1981) - Les possibilités de réalisations géothermiques dans le département de la Meuse- Inventaire. Rapport BRGM 81 SGN 408 LOR, 60 p. 4 ann.
- Donsimoni M.** (1981) — Le bassin houiller lorrain. *Mémoire du BRGM* n°117, 100 p.
- Guillocheau F., Péron S., Bourquin S., Dagallier G., Robin C.** (2002) - Les sédiments fluviatiles (facies Buntsandstein) du Trias inférieur et moyen de l'est du bassin de Paris. Vol 39, n° 3, p. 5-12.
- 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, 74 p.
- Hansen L.T.** (2011) - Absorption heat pump and chiller combined with a geothermal well, Thisted, Denmark. Diaporama 15th of March 2011 <http://www.koudeenwarmte.nl/files/1300642141hansen.pdf>
- Housse B., Maget Ph.** (1976) - Potentiel géothermique du bassin parisien. Action concertée entre le BRGM et le groupe ELF-Aquitaine, *Edition BRGM*, 125 p.
- Landrein P., Vignerot G., Delay J., Lebon P., Pagel M.** (2013) - Lithologie, Hydrodynamique et thermicité dans le système sédimentaire multicouche recoupé par les forages Andra de Montiers-sur-Saulx (Meuse). *Bulletin de la Société Géologique de France*, t.184, n°6, pp. 519-543.
- Lienhardt M.** (1961). - Etude stratigraphique, pétrographique et structurale du socle anté permien du bassin de Paris. - *Annales de la Société Géologique du Nord*, 81, Part 3, 233-241.
- Lopez, S., Hamm, V., Le Brun, M., Schaper, L., Boissier, F., Cotiche, C., & Giuglaris, E.** (2010). Geothermics 40 years of Dogger aquifer management in Ile-de-France, Paris Basin , France. *Geothermics*, 39(4), 339–356.
- Lopez, S., Millot, R.** (2008). Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux : retour d'expériences et apport de l'étude des fluides du Trias du Bassin de Paris. Rapport BRGM RP-56630-FR, 197p.
- Lopez S., Hamm V., Goyeneche O.** (2012) - Optimal and sustainable use of the Dogger aquifer geothermal resource: long-term management and new technologies. *Proceedings of SIMS 2012, the 53rd Scandinavian Simulation and Modelling Society Conference Reykjavik, Iceland*, 4–6 October 2012, 17 p.
- Maget P., Rambaud D.** (1979) - Possibilités géothermiques de la région Champagne-Ardenne, Partie I. Rapport BRGM 79-SGN-739-GTH-CHA, 37p.
- Maget P., Rambaud D.** (1980) - Possibilité géothermiques de la région Champagne-Ardenne, partie II- Etude de sites. Rapport BRGM 80-SGN-649-GTH-CHA.
- Mahler A., Røgen B., Ditlefsen C., Nielsen L.H., Pedersen T.V.** (2013) - Geothermal Energy Use, Country Update for Denmark European Geothermal Congress 2013 Pisa, Italy, 3-7 June 2013, 12 p.
- Mascle A** (1990). Géologie pétrolière des bassins permien français. Comparaison avec les bassins permien du nord de l'Europe", *Chron. Rech. Min.* n°499, 69-86.
- Mégnyen C., Mégnyen F., Debrand-Passard S.** (1980) - Synthèse géologique du bassin de Paris, stratigraphie et paléogéographie (n°101, N°ISBN 2715950055, 466 p), atlas (n°102, N°ISBN 2715950063), lexique des noms de formation (n°103, N°ISBN 2715950071, 467 p). Mémoires du BRGM.
- Nguyen-thé D., Vaute L.** (2005) - Eléments d'hydrogéologie sur la zone de Vernejoul - Saint Avold - Hombourg. Rapport BRGM/RP-53858-FR, 35 p.
- Noël Y.** (1997) – Modèle de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine, Phase 1 - Acquisition des données. Rapport BRGM R 39228, 62 p.

Seibt P., Kabus F., Peer H. (2005) - "The Neustadt-Glewe Geothermal Power Plant - Practical Experience in the ReInjection of Cooled Thermal Waters into Sandstone Aquifers," *Proceedings, World Geothermal Congress 2005, Turkey, International Geothermal Association.*

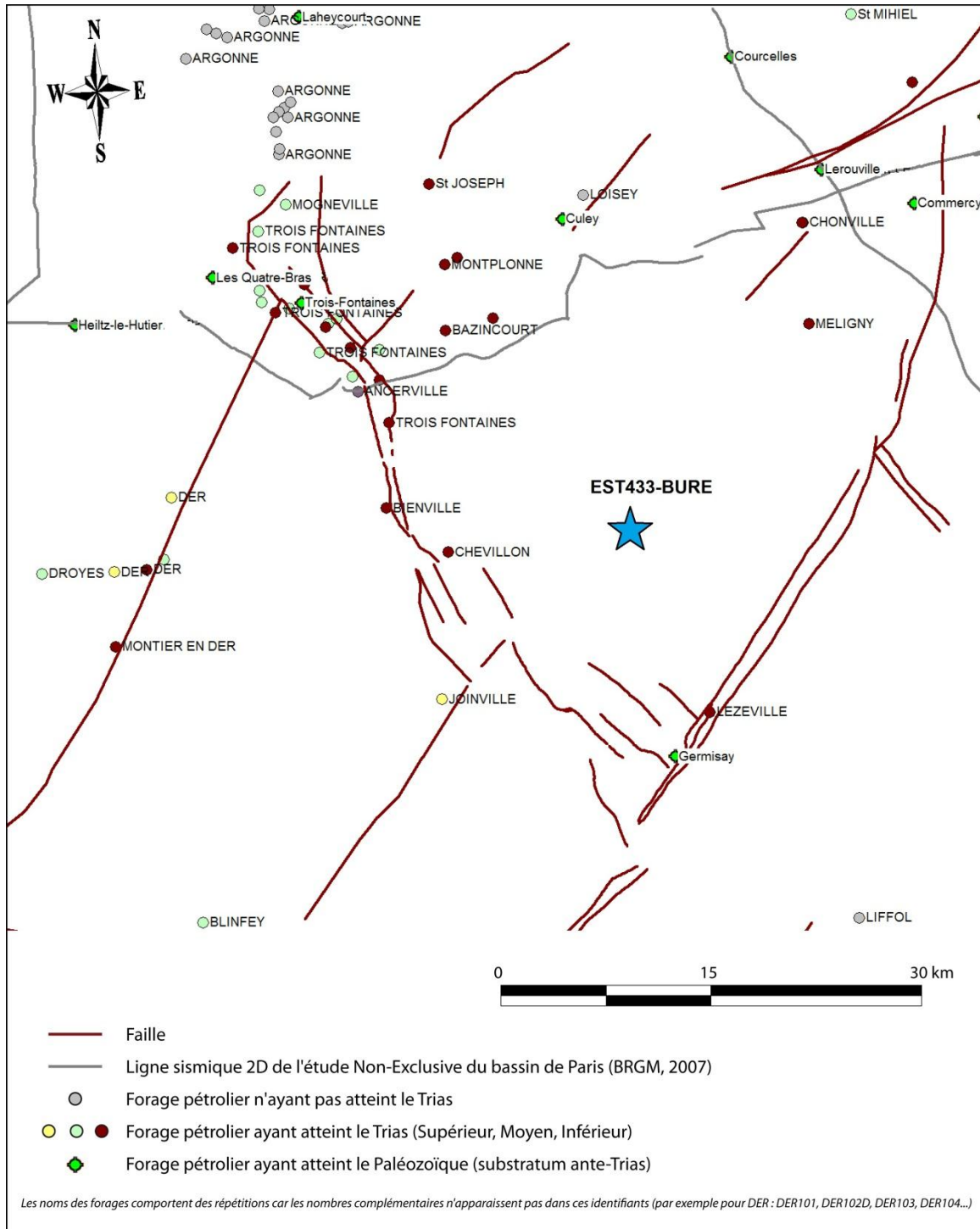
Vaute L. (2003) - Révision du modèle hydrogéologique de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur en Lorraine. Rapport BRGM/RP-51355-FR, 59p.

Vaute L., Gigleux S., Nguyen-Thé D. (2007) – Eaux souterraines du département des Vosges : caractérisation des principales ressources exploitables et révision du modèle de gestion de la nappe des grès du Trias inférieur. Rapport BRGM/RP-55653-FR, 145 p.

Zenke J., Seibt P., Kabus F. (2000)- Increase of the efficiency of the Neubrandenburg geothermal heating plant through surplus heat storage in summer. *Proceedings World Geothermal Congress 2000, Kyushu - Tohoku, Japan, May 28 - June 10, 2000*

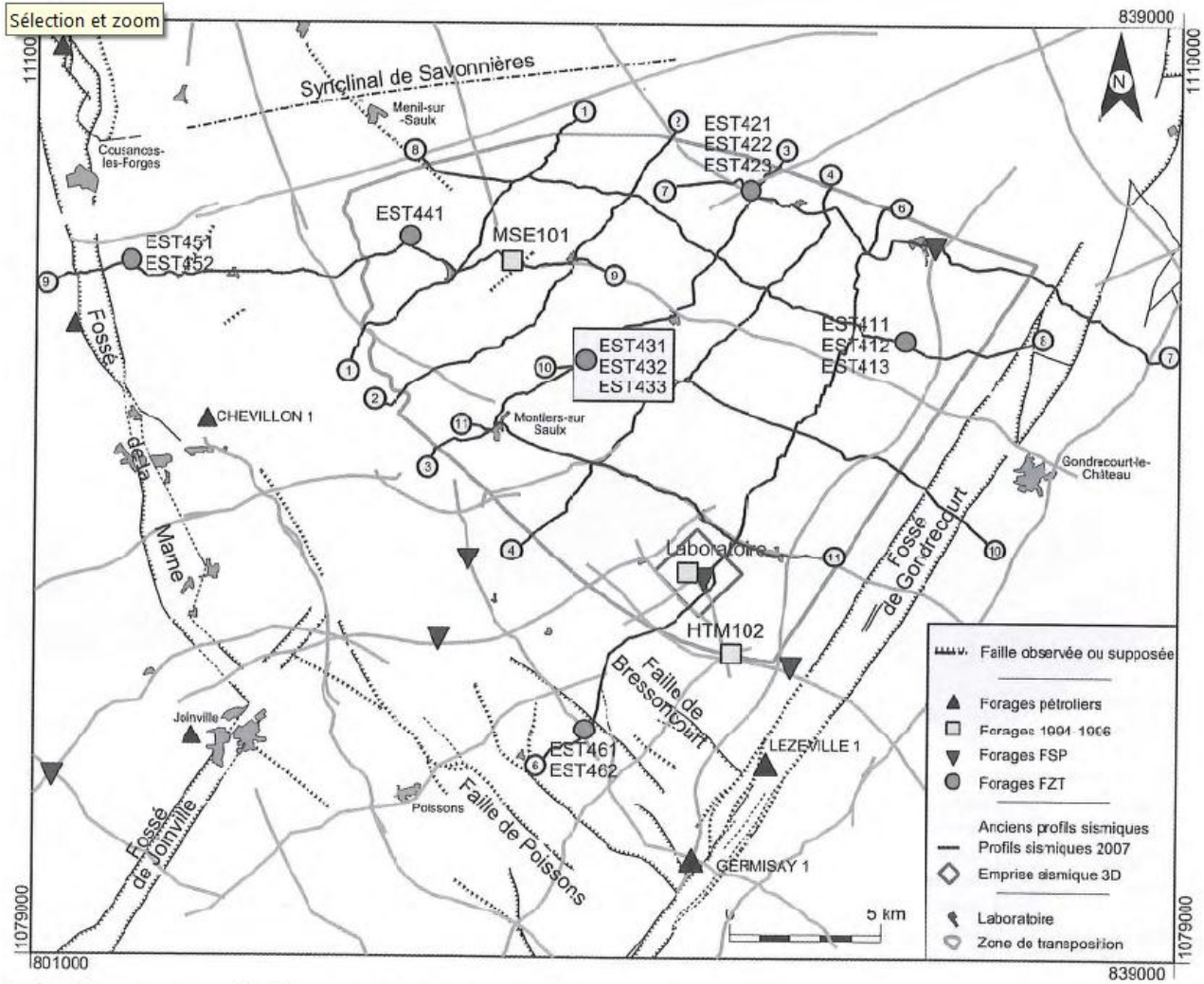
Annexe 1

Cartes de localisation des forages existants dans la région de Bure s.l. et dans le secteur de Bure s.s.



Carte de localisation des forages dans la région de Bure s.l.

Ressources géothermales sous Bure et sa région



Carte de localisation des campagnes sismiques et des forages (dont EST433) sur le secteur de Bure s.s.
 (Figure extraite de Landrein et al., 2013).

Annexe 2

Grès du Trias Inférieur (GTI) à l'est du Bassin parisien : connaissances géologiques et hydrodynamiques

A- GÉOLOGIE DES GRÈS DU TRIAS INFÉRIEUR

La paléogéographie du Trias inférieur du Bassin parisien est bien différente de celle qui s'installe au Trias supérieur et qui perdurera durant le reste du Mésozoïque. Du Scythien au Carnien inférieur (-251 à -225 Ma environ), la sédimentation s'organise au sein du bassin germanique dont l'aire de subsidence maximale est orientée WNW-ESE et s'étend de Hambourg à Cracovie (Guillocheau et *al.*, 2002). La partie orientale du Bassin parisien constitue alors l'extrémité méridionale d'un axe subsidant secondaire développé de la Lorraine à Hanovre qui est relié à l'axe de subsidence principal. Au sein de cet axe subsidant secondaire s'écoule un réseau fluvial orienté SW-NE qui est le siège de la sédimentation principalement gréseuse du Trias inférieur de l'est de la France.

Les formations gréseuses du Buntsandstein et du Muschelkalk inférieur de l'est de la France ¹⁰ constitue un aquifère communément appelé « Grès du Trias Inférieur » (GTI). Quand elle est complète, cette entité est constituée de bas en haut par le dépôt successif des formations suivantes (Mégny et *al.*, 1980 ; Guillocheau et *al.*, 2002) :

- le « **Grès vosgien** », composés de grès plus ou moins conglomératiques et marqués à leur base par le « **Conglomérat inférieur** », et de 100 à 300m d'épaisseur ;
- le « **Conglomérat principal** » (ou intermédiaire), de 15 à 20m d'épaisseur, délimité au sommet par la Zone limite violette, qui est composée de 2 m d'argiles silto-sableuses à nodules dolomitiques;
- les « **Couches intermédiaires** » (30 à 80m d'épaisseur), constituées de grès localement conglomératiques et de niveaux argileux intercalés ;
- le « **Grès à Voltzia** » (20 à 40m d'épaisseur), composé de deux membres : le Grès à meules à la base et le Grès argileux au sommet. Ces membres sont constitués de sables fins lenticulaires et de niveaux argileux de plus en plus fréquents vers le sommet ;
- le « **Grès coquilliers** » daté du Muschelkalk inférieur, d'une épaisseur de l'ordre de 10m, constitué d'alternances de grès silteux ou argileux avec des niveaux de grès dolomitique à dolomies gréseuses.

On entend par Buntsandstein, les formations allant du « Grès vosgien » au « Grès à Voltzia ».

Reposant sur des formations de socle non sédimentaire ou sur les dépôts argilo-gréseux du Permien, les GTI s'organisent globalement selon une structure monoclinale plongeant vers l'ouest et le centre du Bassin parisien à partir de leurs zones d'affleurement à l'est (Figures 11).

¹⁰ Le Trias (-251 à -200 Ma.) est constitué de sept étages stratigraphiques (temporels) : l'Indusien et l'Onékien (Trias inférieur ou Scythien), l'Anisien et le Ladinien (Trias moyen), le Carnien, le Norien et le Rhétien (Trias supérieur). Les termes « Buntsandstein », « Muschelkalk » et « Keuper » correspondent à la terminologie particulière utilisée pour identifier les unités lithostratigraphiques correspondant aux faciès continentaux déposés en périphérie de la mer germanique.

Les GTI sont largement exploités en Lorraine pour leur ressource en eau potable dans les zones d'affleurement ou sous faible recouvrement, et de ce fait relativement bien connus dans la partie orientale. En revanche, dans les zones plus profondes et occidentales, ils restent mal connus. Les seules données pouvant fournir des informations relativement précises sur les caractéristiques des GTI sont les forages pétroliers profonds.

Les travaux les plus détaillés à partir des données de forage ont été conduits par Géosciences Rennes (l'Observatoire des Sciences de l'Univers de Rennes, Université de Rennes ; en particulier : Bourquin et *al.*, 2006 ; Bourquin et *al.*, 2009). Basés notamment sur la méthode d'interprétation en stratigraphie séquentielle des dépôts, appliquée à près de 580 forages, ils constituent les informations les plus complètes sur la connaissance des conditions de dépôt, de l'extension, de la géométrie, des épaisseurs et des faciès des GTI sur l'ensemble de leur étendue.

En termes de paléogéographie, deux phases peuvent être distinguées au sein du Trias inférieur (Bourquin et *al.*, 2006) :

- la première, au Scythien, est caractérisée par des dépôts fluviaux de réseau en tresse, avec très peu d'influences marines (« Grès vosgiens » et « Conglomérat principal ») ;
- la seconde phase (Anisien), est dominée par des dépôts de plaine alluviale, l'influence marine devenant de plus en plus forte (« Couches intermédiaires », « Grès à Voltzia » et « Grès coquilliers »).

Les formations du Trias inférieur se déposent de manière diachrone ¹¹ et en *onlap* ¹² sur leur substratum. Leur limite d'extension occidentale (épaisseur nulle) est proche de Saint-Dizier et Chaumont comme le montre la Figure 2. L'épaisseur globale de l'aquifère décroît globalement de l'est vers l'ouest et le sud. D'après un modèle géologique construit pour une modélisation hydrogéologique des GTI (Vaute, 2003), elle est de plus de 500 m dans les Vosges du nord, de 200 m vers Toul et Epinal, et de 100 m vers Bar-le-Duc et Vittel, puis se biseaute vers l'ouest et le sud-ouest.

Le détail des épaisseurs de chaque formation n'est pas disponible mais les dépôts les plus anciens sont absents des parties occidentales de la zone d'extension (Bourquin et *al.*, 2006 ; Mégnien et *al.*, 1980) : les sédiments des GTI se déposent en effet chronologiquement d'abord dans la partie orientale de la zone délimitée sur la Figure 10, puis leur limite d'extension migre vers l'ouest jusqu'à atteindre la limite globale de la Figure 10 pour les dépôts les plus récents de la série.

Ainsi, à proximité du site de Bure, d'après les données bibliographiques et les données de forages pétroliers profonds voisins, l'épaisseur totale des GTI serait inférieure à 150 m et ne comprendrait qu'une faible épaisseur, voire la lacune totale du Grès vosgien. Stoppé par un conglomérat très dur, le forage EST433 (Bure) indique une épaisseur minimale des GTI d'environ 120 m (Landrein et *al.*, 2013).

¹¹ De manière diachrone, signifie qu'une même formation présente des âges de dépôts différents selon la zone géographique

¹² On désigne par « *onlap* » la relation géométrique existante entre des unités sédimentaires plus jeunes déposés en biseau sur une surface ancienne inclinée.

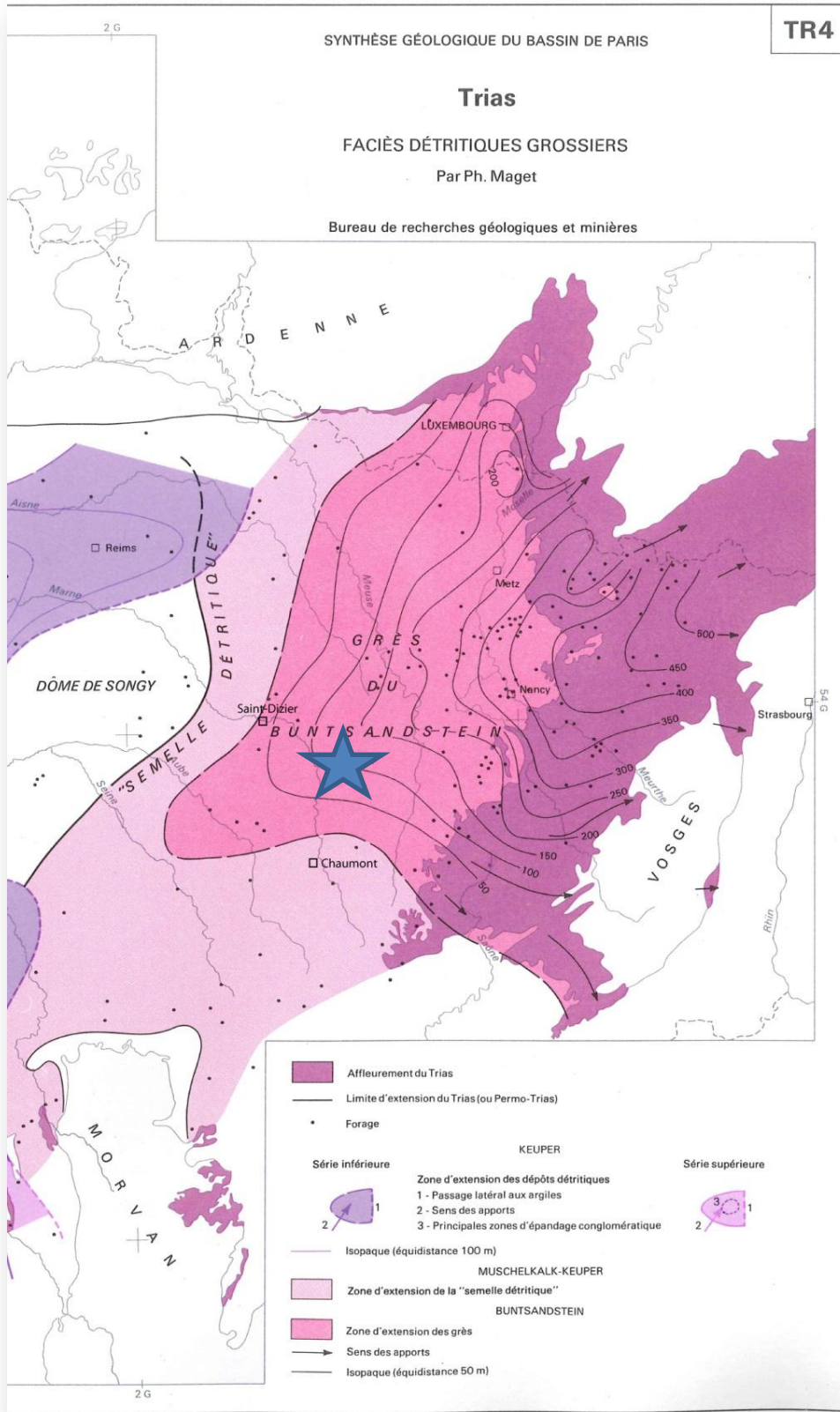


Figure 11 - Extension et épaisseur du Trias inférieur (modifiée d'après Ph. Maget in Mégnien et al., 1980). Position du site de Bure (étoile bleue).

B- CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU RESERVOIR DES GTI de l'EST DU BASSIN PARISIEN, SUPERFICIEL ET EXPLOITE

Le volume d'eau contenu dans le réservoir des grès du Trias inférieur en Lorraine (Figure 11) est évalué à 30 milliards de m³ en affleurement (Comité de Bassin Rhin-Meuse, 1996), et à 500 milliards de m³ sous couverture, dont 150 milliards de m³ d'eau douce sont exploitables pour l'eau potable, le reste étant trop minéralisé. En effet la minéralisation de l'eau augmente à mesure que l'on s'éloigne des affleurements et que l'on s'enfonce en profondeur. Sous couverture, on observe des teneurs en NaCl de 10 g/l à Toul, 200 g/l vers Bar-le-Duc et 300 g/l vers Saint-Dizier. La ligne d'iso-concentration à 1 g/l est orientée sensiblement nord-sud selon un axe « ouest du bassin houiller – Metz – Nancy – Vittel ».

L'écoulement général de la nappe s'effectue du sud vers le nord (des Vosges vers la Sarre) et du sud-ouest vers le nord-est (de la Meuse vers le nord de la Moselle). Le gradient piézométrique varie fortement : il est de l'ordre de 2.10^{-2} à 5.10^{-3} dans la partie libre, suivant le drainage des rivières ou en fonction de l'exhaure, et de l'ordre de 3.10^{-4} à 1.10^{-3} en partie captive.

L'aquifère des grès du Trias inférieur constitue un grand réservoir du fait, d'une part, de son extension et de son épaisseur et, d'autre part, de sa perméabilité de milieu poreux et de sa fracturation. La perméabilité des grès dans la masse est faible, mais elle est renforcée par les fissures : ainsi, en Lorraine, la productivité d'un forage dépend essentiellement du degré de fissuration des grès. La productivité des forages est le plus souvent dans la gamme de 30 à 150 m³/h. Leur profondeur est le plus souvent de 20 à 200 m en affleurement, et de 300 à 600 m en nappe captive.

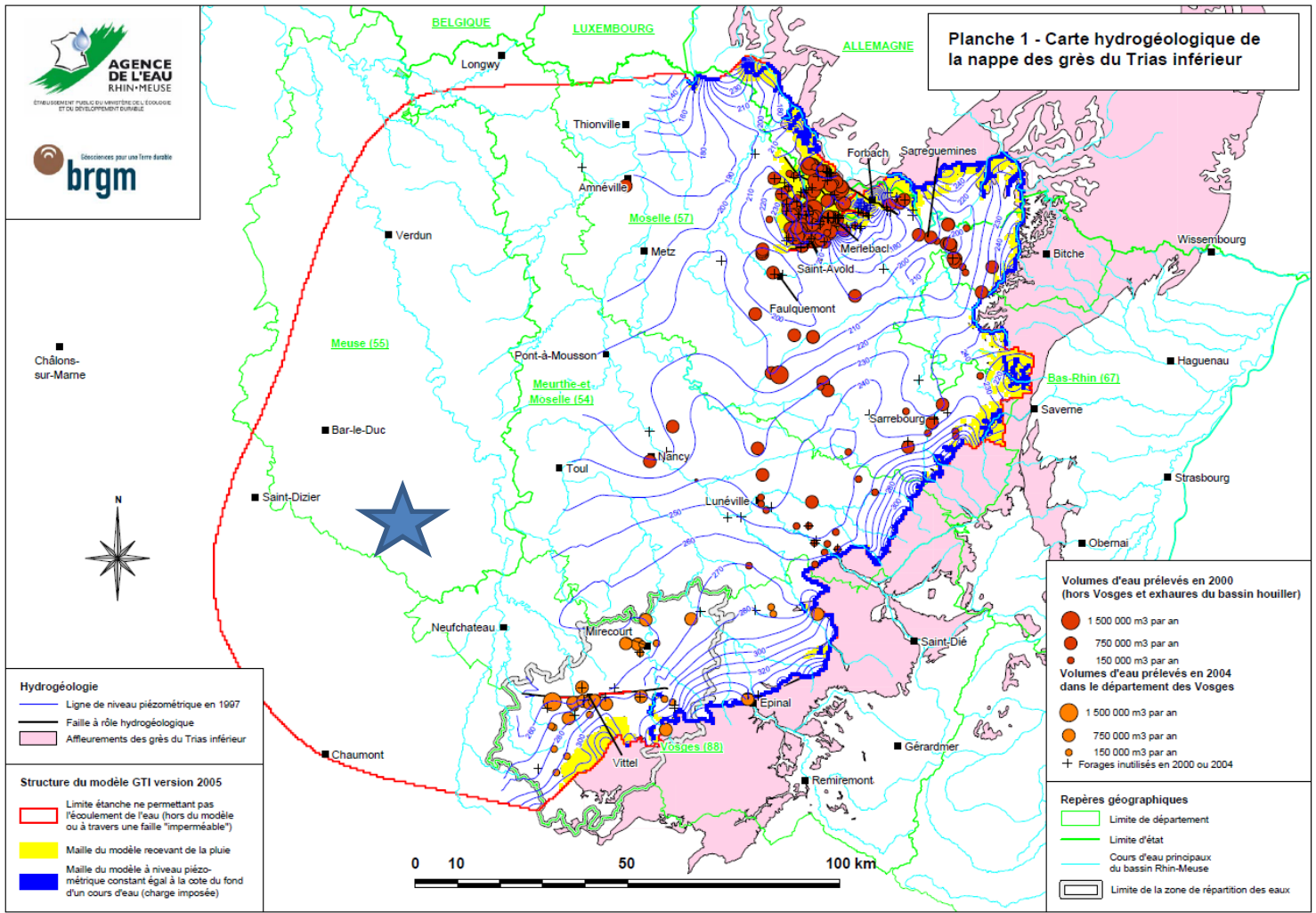
Dans le cadre de la réalisation d'un modèle hydrodynamique régional de la nappe des GTI, une étude des paramètres hydrodynamiques du réservoir a été réalisée en 1997 (Noël, 1997), grâce au dépouillement des données disponibles dans différentes études et dans la banque de données du sous-sol du BRGM. La perméabilité moyenne du réservoir, calculée d'après les essais de pompage, est de $2,7.10^{-5}$ m/s pour l'ensemble des 319 mesures disponibles, avec le détail suivant:

- $4,3.10^{-5}$ m/s pour les forages situés en partie libre vosgienne (40 mesures) ;
- $3,3.10^{-5}$ m/s pour les forages situés en partie libre dans le Bassin Houiller (123 mesures) ;
- $1,8.10^{-5}$ m/s pour les forages situés en partie captive (156 mesures).

Ces statistiques ne portent que sur la partie exploitée de la nappe des GTI, à l'est de la ligne d'iso-concentration à 1g/l.

Selon Babot et *al.* (1972), il apparaît que le plus souvent, les 50 à 100 premiers mètres du « Grès vosgien » (jusqu'à 300m d'épaisseur possible) situés immédiatement sous le « Conglomérat principal » sont plus perméables que les strates inférieures, avec de fortes venues d'eau juste sous le conglomérat. Néanmoins, le « Grès vosgien inférieur », bien que moins perméable, n'en est pas moins aquifère et participe de l'ensemble de la nappe des GTI. Les grès bigarrés supérieurs (« Grès à Voltzia » et « Couches intermédiaires ») sont, quant à eux, très rarement exploités seuls et une estimation de leur perméabilité est de ce fait difficile.

Les données de coefficient d'emménagement issues d'essais de pompage sont beaucoup plus rares : on dispose de seulement 6 mesures pour la nappe des GTI sous couverture, dont 5 dans la région de Vittel-Contrexéville (1.10^{-4} à $1,6.10^{-4}$; moyenne de $1,5.10^{-4}$), et une à Tomblaine (près de Nancy, forage de 708 m de profondeur ; $0,9.10^{-4}$). On retiendra donc un ordre de grandeur de 1.10^{-4} pour ce paramètre.



Rapport BRGM/RP-55653-FR - Annexe 2

Planche 1

Figure 12 - Carte hydrogéologique du réservoir des grès du Trias inférieur en Lorraine (Vaute et al., 2007). Position du site de Bure (étoile bleue).

C- CARACTERISTIQUES HYDRODYNAMIQUES DU RESERVOIR DES GTI DE LA PARTIE PROFONDE, NON EXPLOITEE, DE L'EST DU BASSIN PARISIEN

La base de données construite pour la modélisation du réservoir des GTI a été complétée en 2013 par l'exploitation de mesures de perméabilité intrinsèque réalisées sur des carottes de 17 forages pétroliers profonds. Il s'agissait de calculer au moins un ordre de grandeur de la perméabilité dans la partie ouest profonde de la nappe, qui comporte très peu de mesures, et aucune mesure déduite d'un essai de pompage à une profondeur supérieure à 1 250 m.

Pour un même sondage pétrolier, les perméabilités intrinsèques (k en millidarcy) des différentes carottes prélevées à différentes profondeurs ont été moyennées par une loi de composition arithmétique en considérant un écoulement perpendiculaire à l'axe de la carotte (c'est-à-dire un écoulement de l'eau parallèle au toit de la couche) :

$$k_{moyen} = \frac{\sum \text{Epaisseur}_i \cdot k_i}{\sum \text{Epaisseur}_i}$$

La valeur moyenne de k ainsi calculée pour chaque forage a ensuite été convertie en perméabilité à l'eau des hydrogéologues (K en m/s) :

$$K_{moyen} = \frac{k_{moyen} \cdot \rho \cdot g}{\mu} \quad \text{avec} \quad \begin{array}{l} \rho = \text{masse volumique du fluide} \\ g = \text{accélération de la pesanteur} \\ \mu = \text{viscosité dynamique} \end{array}$$

La viscosité dynamique μ dépend de la température et de la masse volumique du fluide (donc aussi de sa salinité). Pour simplifier le calcul, μ a été pris constant et égal à 0,466 centipoises, ce qui correspond à la viscosité dynamique d'une eau douce à 60 °C. Il est à noter que la perméabilité K pour l'eau douce est doublée lorsque la température évolue de 20 à 60 °C, alors que l'influence de la masse volumique est faible sur le calcul de K (la salinité de l'eau a donc été négligée).

Ainsi, les mesures sur carottes de 17 forages pétroliers profonds de la partie ouest de la nappe ont été traitées : les perméabilités à l'eau moyennes par ouvrage varient de $2 \cdot 10^{-9}$ m/s (0,1 mD) à $3 \cdot 10^{-5}$ m/s (1 450 mD) pour une moyenne de $4,2 \cdot 10^{-6}$ m/s (201 mD). Ces valeurs sont à prendre avec précaution, car elles peuvent ne pas être caractéristiques du comportement de l'aquifère pris dans son ensemble, surtout pour les sondages dans lesquels l'épaisseur totale de carotte testée est faible (cette épaisseur varie selon les sondages de 4 à 87 m).

On peut toutefois tenter une comparaison avec les forages d'exploitation profonds disposant de perméabilités déduites d'essais de pompages, en prenant les précautions suivantes : on retient pour la comparaison les forages d'exploitation de profondeur supérieure à 900 m (3 forages), et les sondages pétroliers de profondeur supérieure à 900 m dont la tranche totale de carotte testée est supérieure à 60 m (3 sondages). Cette coupure de 900 m de profondeur permet d'identifier parmi les forages d'exploitation les rares forages les plus profonds et les plus proches de la zone d'intérêt, et le seuil de 60 m pour la tranche de carotte testée permet de retenir des sondages pétroliers dont les mesures sont plus représentatives du comportement global de l'aquifère.

Les résultats figurent dans le Tableau 6. On peut constater que la perméabilité moyenne des 3 forages d'exploitation sélectionnés ($0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s) est du même ordre de grandeur que celle des 3 sondages pétroliers retenus ($0,1 \cdot 10^{-5}$ m/s).

	Profondeur des ouvrages	Profondeur moyenne du sommet des tranches carottées	Longueur totale moyenne des carottes	Moyenne des perméabilités	Minimum des perméabilités	Maximum des perméabilités	Nombre d'ouvrages
	m	m	m	10^{-5} m/s	10^{-5} m/s	10^{-5} m/s	
Forages d'exploitation en nappe captive	1085 (900 à 1254)			0.3	0.1	0.6	3
Sondages pétroliers		1732 (1708 à 1761)	78 (62 à 87)	0.1	0.03	0.2	3

Tableau 6 - Synthèse des données hydrodynamiques disponibles pour les ouvrages les plus profonds du réservoir des GTI à partir de 3 forages d'exploitation (Toul, commune d'Avril « Source Pérotin » et Amnéville pour thermalisme) et 3 sondages pétroliers (Montplonne-MOP2, Saint-Joseph-SJO1 et Ancerville-AN 1).

D- EXPLOITATION GEOTHERMIQUE BASSE TEMPERATURE DU RESERVOIR DES GTI POUR LE THERMALISME ET LE CHAUFFAGE DE PISCINES

Le réservoir des GTI sous couverture en Lorraine est concerné par 3 gîtes géothermiques à basse température, dont le fluide géothermal extrait provient de la nappe des grès du Trias inférieur (Babot *et al.*, 1982) :

- Nancy-Thermal exploite depuis 1908 des forages profonds (855 m) pour l'alimentation d'une piscine thermique à partir d'une ressource à 35 °C minéralisée à 5 g/l de résidu sec,
- le centre de loisirs d'Amnéville exploite depuis 1979 un forage d'une profondeur de 900 m pour le fonctionnement d'établissements d'hydrothérapie,
- la piscine municipale de Lunéville est chauffée depuis 1980 par le biais d'un forage de 437 m de profondeur captant le réservoir des GTI, l'eau pompée à 22 °C étant élevée à 28 °C à l'aide d'une pompe à chaleur eau-eau.

Ces 3 forages profonds exploitent le « Grès vosgien » seul (Amnéville et Nancy) ou l'ensemble « Grès vosgien » et « Grès bigarrés » (Lunéville). Les caractéristiques connues de ces ouvrages sont indiquées dans le tableau 7. La perméabilité déduite d'un essai de pompage pour le forage de Lunéville ($0,3 \cdot 10^{-5}$ m/s) est du même ordre de grandeur que la moyenne des perméabilités pour les 3 forages profonds étudiés au paragraphe précédent (dont fait partie le forage d'Amnéville).

Seul l'ouvrage profond de Nancy-Thermal (855 m) se distingue par sa perméabilité nettement plus élevée ($6,9 \cdot 10^{-5}$ m/s). Ce forage se situe au centre d'une zone de perméabilité plus élevée qu'ailleurs, en raison de facteurs sédimentaires et tectoniques favorables (les forages sont crépinés pour éviter les entraînements de sable et les éboulements, et le secteur de la faille de Nancy est bien fracturé) (Babot *et al.*, 1972).

Commune et département	Unités	Caractéristiques des ouvrages		
		AMNEVILLE - 57	NANCY - 54	LUNEVILLE - 54
Usage		Thermalisme	Thermalisme	Chauffage piscine
Niveau Capté		Grès Vosgien	Grès Vosgien	Grès Vosgien + Grès Bigarré
Indice BSS		01381X0243	02305X0063	02691X0040
Date de création de l'ouvrage		1979	1908	1980
Transmissivité	m ² /s	0.43	8.3	
Perméabilité	10 ⁻⁵ m/s	0.2	6.9	0.3
Profondeur du forage	m	900	855	437
Epaisseur captée Grès Bigarrés	m	0	0	73
Epaisseur captée Grès Vosgiens	m	101	113	63
Epaisseur captée totale	m	101	113	136
Température	°C	30 à 35	35	22

Tableau 7 - Synthèse des données hydrodynamiques disponibles pour les 3 ouvrages profonds exploitant le réservoir des GTI pour un usage de géothermie basse température.



Centre scientifique et technique
Direction des Géoressources DGR
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34