

Projet CLASTIQ : CLAYed sandSTone In Question

Rapport final

BRGM/RP-56626-FR
septembre 2008



Projet CLASTIQ : CLayed sandSTone In Question

Rapport final

BRGM/RP-56626-FR
septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre du projet CLASTIQ
entre l'ADEME et le BRGM (2006-2008)

V. Bouchot

avec la collaboration de

**C. Dezayes, S. Lopez, R. Millot, A. Bialkowski, Ph. Calcagno,
B. Sanjuan, C. Jorand, A. Ossi, G. Courrioux, A. Genter, C. Garibaldi,
D. Bonté, L. Guillou-Frottier, I. Thinon, B. Tourlière, M. Brach, J.Y. Hervé,
C. Innocent, Ph. Négrel, G. Delobelle (du BRGM)
et C. Baujard, T. Kohl (de GEOWATT)**

Vérificateur :

Nom : Bernard SANJUAN

Date : 15 septembre 2008

Signature: 

Approbateur :

Nom : Fabrice BOISSIER

Date : 19 septembre 2008

Signature: 

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : géothermie basse à moyenne température, bassin sédimentaire, réservoir clastique, formation argilo-gréseuse, Trias, Tertiaire, territoire métropolitain, Bassin de Paris, Fossé rhénan, Bassin bressan, Fossé de Limagne, projet CLASTIQ, ADEME.

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

Bouchot V. et collaborateurs (2008). Projet CLASTIQ : CLAYed sandSTone In Question. Rapport final BRGM/RP-56626-FR, 68 p., 15 fig., 3 tabl.

© BRGM, 2008, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.

Synthèse

Le projet scientifique **CLASTIQ**, comme **CLAYed sandSTone In Question**, réalisé par le BRGM, s'est déroulé sur une durée de totale de 33 mois entre décembre 2005 et septembre 2008. L'ADEME et le BRGM ont souhaité mettre en place un programme de recherche sur les ressources géothermales de type basse à moyenne température, des réservoirs clastiques profonds, en France métropolitaine, via la convention n°0505C0079 signée le 20 décembre 2005. Le projet CLASTIQ est doté d'un budget de 692 k€, cofinancé par le BRGM et l'ADEME, comme précisé dans l'avenant n°1 à la convention, signé le 14 décembre 2006.

Dans le contexte actuel d'une forte demande en énergie combinée à une volonté politique de diminuer les émissions de gaz à effet de serre générées par les combustibles fossiles, la découverte de nouvelles ressources géothermiques en France est un enjeu de première importance.

A ce titre, les réservoirs argilo-gréseux du Trias (e.g. Alsace, Bassin de Paris) et du Tertiaire (e.g. Limagne) constituent une cible privilégiée car ils sont localisés au droit de grands secteurs urbanisés consommateurs d'énergie. En outre, du point de vue géologique, ces formations argilo-gréseuses constituent des réservoirs favorables pour une exploitation géothermique de type basse à moyenne température car elles se composent de sédiments réputés aquifères (composante gréseuse), qui, entre 2000 et 3000 m de profondeur, peuvent contenir des fluides portés à des températures comprises entre 80 et 150°C.

En ce qui concerne les opérations de géothermie passées dans les réservoirs clastiques du Bassin de Paris, un certain nombre de déconvenues est apparu et a remis en cause leur exploitation. En particulier, la mise en évidence de sérieux problèmes de réinjection des fluides géothermaux a stoppé les opérations de démonstration comme celle de Melleray près d'Orléans. Cependant, dans plusieurs pays européens, ces formations clastiques sont exploitées pour la géothermie depuis une vingtaine d'années, certaines des principales difficultés ayant été surmontées.

Deux grands objectifs sont assignés au projet de recherche CLASTIQ.

Objectif 1 – Evaluation de la ressource géothermique des réservoirs argilo-gréseux profonds du territoire métropolitain, en se plaçant dans une perspective énergétique de production de chaleur et si possible de production d'électricité. Il s'agit d'une géothermie de type basse à moyenne température dans les bassins sédimentaires.

Objectif 2 – Faire le bilan sur les problèmes de réinjection dans les aquifères argilo-gréseux sur la base de réussites en Europe comme d'échecs en France. À la lumière de cette synthèse, la transposition au contexte français passe par la recommandation

de solutions techniques en termes de complétion de puits et de solutions permettant d'améliorer la productivité ou l'injectivité des réservoirs argilo-gréseux.

Les réservoirs clastiques profonds du territoire métropolitain sont situés dans deux types d'environnement sédimentaires :

- les fossés sédimentaires appartiennent au système cénozoïque de rifts ouest-européens, s'étendant de la Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord. Compte tenu de leur contexte géodynamique, ils sont caractérisés par un fort gradient thermique ($\sim 55^{\circ}\text{C}/\text{km}$), paramètre essentiel pour la géothermie. Il s'agit de grabens, étroits et profonds, dont la sédimentation est fortement contrôlée par la fracturation. Ils contiennent des sédiments cénozoïques, parfois déposés sur un soubassement métamorphique, comme en Limagne d'Allier, ou sédimentaire mésozoïque, comme en Alsace et en Bresse. Les fossés étudiés dans le cadre du projet CLASTIQ sont le Fossé rhénan, le Bassin bressan et le Fossé de Limagne (fig. 1) ;
- les vastes et profondes dépressions sédimentaires sont constituées de sédiments d'âge mésozoïque à actuel. Compte tenu de leur position intracontinentale (versus rift) ces dépressions, tels que les Bassins parisien ou aquitain, sont caractérisés par un gradient thermique normal ($30^{\circ}/\text{km}$). Dans ce type, seul le Bassin de Paris a fait l'objet de notre étude.

Les estimations quantitatives du potentiel géothermique ont été menées à deux échelles :

- à l'échelle régionale des bassins en ce qui concerne le Bassin de Paris, le Fossé rhénan et le Bassin bressan ;
- à l'échelle de cibles plus petites, réputées favorables pour la géothermie de type basse à moyenne géothermie, à savoir le réservoir Buntsandstein de la région de Strasbourg-Obernai (Fossé rhénan), les réservoirs éocènes de la région de Clermont-Ferrand -Riom (Fossé de Limagne) et enfin les réservoirs triasiques, situés en région Ile de France, sous le Dogger exploité du Bassin de Paris.

Pour réaliser l'évaluation quantitative de la ressource géothermique des réservoirs argilo-gréseux profonds du territoire métropolitain, la méthode employée est basée sur la connaissance du volume et de la température des réservoirs clastiques. Elle aboutit à la production de cartes de potentiel géothermique.

Ces cartes ont l'avantage de proposer une hiérarchisation des cibles géothermiques potentielles au sein d'un même bassin. Cette première étape devra nécessairement déboucher sur des études de détail, à l'échelle des cibles les plus prometteuses, en prenant en compte les paramètres pétrophysiques de ces réservoirs.

Si on se risque à une comparaison entre les potentiels des réservoirs clastiques des différents bassins estimés, il apparaît la hiérarchie suivante, par ordre d'importance :

- le Buntsandstein du Fossé rhénan et le Tertiaire du Fossé de la Limagne (15 à 30 GJ/m^2),

- le Trias du Bassin de Paris dont les deux principaux réservoirs sont ceux de Donnemarie (jusqu'à 25 GJ/m²) et de Chaunoy (jusqu'à 7,7 GJ/m²),
- le Bassin bressan (jusqu'à 2 GJ/m²), dont les valeurs basses résultent essentiellement de l'épaisseur limitée du réservoir gréseux (30 à 50 m).

D'autre part, la réalisation d'un bilan exhaustif sur les problèmes de réinjection dans les formations argilo-gréseuses a permis de mieux cerner la phénoménologie complexe liée à la réinjection et de faire des recommandations techniques en termes de complétion de puits et d'amélioration de la productivité ou l'injectivité des réservoirs clastiques.

Pour la foration de formations argilo-gréseuses, on recommande notamment :

- la construction des ouvrages dans les plus grands diamètres économiquement envisageables,
- la mise en place de casings de soutènement du puits en acier de grade pétrolier,
- la mise en place de crépines inox de type « fil enroulé » (*wire-wrapped*), ayant un *slot* (ouvertures des crépines) aussi large que possible, tout en répondant à la granulométrie des formations,
- pas de massif de graviers, *sauf* nécessité par une très mauvaise tenue mécanique des formations (risques d'effondrement et de venue de sable),
- le chemisage total ou partiel du puits de production avec un tubing amovible en matériaux inaltérables, et pour un chemisage partiel un traitement anticorrosion préventif devra être envisagé,
- la mise en place de filtres en tête de puits,
- le chemisage total du puits de réinjection en matériaux inaltérables,
- l'utilisation de produits inhibiteurs dans l'intervalle casing-tubing,
- réaliser, dans le domaine du possible, le puits d'injection en déviation,
- utiliser lors de la foration du réservoir une boue dégradable.

Dans un souci de pragmatisme, les paramètres adaptés à la construction d'un doublet virtuel exploitant le Trias du Bassin de Paris sont proposés.

Perspectives. Dans la dynamique de ce projet CLASTIQ, un programme de travail est esquissé, qui doit servir de base de discussion avec l'ADEME pour un projet CLASTIQ-2.

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. ENJEU SOCIETAL ET PROBLEMATIQUE DU PROJET CLASTIQ	11
1.2. PRINCIPAUX OBJECTIFS DU PROJET CLASTIQ	12
1.3. LES BASSINS SEDIMENTAIRES RETENUS POUR L'ESTIMATION DES POTENTIELS GEOTHERMIQUES.....	13
1.4. PLAN DU RAPPORT FINAL.....	15
2. Potentiel géothermique du Buntsandstein du Bassin bressan	17
2.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	17
2.2. PERSPECTIVES «GEOTHERMIE DU BASSIN BRESSAN ».....	18
2.3. RAPPORT, COMMUNICATION A CONGRES ET PUBLICATION	20
3. Potentiel géothermique du Buntsandstein du Fossé rhénan	21
3.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	21
3.1.1. Approche régionale à l'échelle du Fossé rhénan	21
3.1.2. Etude détaillée du secteur Strasbourg-Obernai	22
3.2. PERSPECTIVES «GEOTHERMIE DU FOSSE RHENAN ».....	23
3.3. RAPPORT, COMMUNICATION A CONGRES ET PUBLICATION	26
4. Potentiel géothermique du Tertiaire clastique du Fossé de la Limagne	27
4.1. INTRODUCTION	27
4.2. GEOLOGIE DU FOSSE DE LA LIMAGNE ET DE SES RESERVOIRS CLASTIQUES	27
4.3. DEMARCHE METHODOLOGIQUE.....	30
4.3.1. Etape 1 - Maillage du modèle géologique	30
4.3.2. Etape 2 - Modélisation thermique 3D	31
4.3.3. Etape 3 - Calcul du potentiel géothermique	31
4.4. INTERPRETATION DES RESULTATS	34

4.5. PERSPECTIVES «GEOOTHERMIE DU FOSSE DE LA LIMAGNE »	38
4.6. RAPPORT, COMMUNICATIONS A CONGRES ET PUBLICATION	39
5. Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris.....	41
5.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	41
5.1.1.Objectif et méthodologie	41
5.1.2.Interprétation des résultats.....	42
5.2. PERSPECTIVES «GEOOTHERMIE DU TRIAS DU BASSIN DE PARIS ».....	51
5.3. RAPPORTS, COMMUNICATIONS A CONGRES ET PUBLICATION	54
6. Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir clastique.....	55
6.1. PROBLEMATIQUE REINJECTION : RETOUR D'EXPERIENCES ET RECOMMANDATION	55
6.1.1.Retour d'expériences en France et en Europe.....	55
6.1.2.Principales recommandations	56
6.2. APPORT DE LA GEOCHIMIE DES FLUIDES DU TRIAS DU BASSIN DE PARIS.....	58
6.3. PERSPECTIVES « PROBLEMATIQUE DE REINJECTION »	59
6.4. RAPPORTS ET COMMUNICATION A CONGRES	60
7. Conclusions.....	61
8. Bibliographie	63
8.1. REFERENCES PRODUITES PAR LE PROJET CLASTIQ.....	63
8.2. AUTRES REFERENCES CITEES DANS LE RAPPORT	65

Liste des figures

Figure 1 : Carte schématique des grands bassins sédimentaires du territoire métropolitain (en bleu) et position des bassins étudiés dans le cadre du projet CLASTIQ (en orangé).	14
Figure 2 : Evaluation du potentiel géothermique du Buntsanstein du Bassin bressan (Jorand et Bouchot, 2008), avec :	19
Figure 3 : Evaluation du potentiel géothermique du Buntsanstein à l'échelle du Fossé rhénan (Dezayes et al., 2007)	24
Figure 4 : Evaluation du potentiel géothermique de la zone d'étude située à l'est de Strasbourg. Cette évaluation est fondée sur un modèle 3D de la zone. Pour le calcul du potentiel, une température moyenne de 140°C a été retenue.....	25
Figure 5 : Localisation en surface de la zone modélisée en 3D (Dagallier, 2004) ayant fait l'objet de l'estimation du potentiel géothermique (cette étude) avec : A - Carte géologique du Fossé de la Limagne d'Allier et son environnement métamorphique (socle hercynien) et volcanique (Chaîne des Puys) ; B - Schéma structural de la zone modélisée en 3D (30 x 35 km ²) ; C - Carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur, montrant que le bassin de la Limagne est centrée sur une anomalie thermique.	28
Figure 6 : Colonne litho-stratigraphique du Fossé de Limagne, où sont localisés les trois réservoirs clastiques tertiaires, estimés pour leur potentiel géothermique (cette étude) : S1-DET (Lutétien), S2-DET (Bartonien)et S3-DET(Rupélien).	29
Figure 7 : A - Modèle 3D (Dagallier, 2004, Genter et al., 2004) de la zone étudiée ; B - Coupe litho-stratigraphique NW-SE du Fossé de la Limagne dont la trace est reportée sur la figure C . Cette coupe, issue du modèle géologique 3D (cf. légende de la figure 6), passe par la cible potentielle de Châtelguyon (cf. §. 4.4).....	29
Figure 8 : Vues du maillage éléments finis obtenues par adaptation du modèle géologique (Baujard et Kohl, 2007). (a) Vue 3D du socle et des failles, (b) Vue 3D du socle et des formations S1 à S4 (de bas en haut).	32
Figure 9 : Température calculée avec le modèle numérique et calcul du potentiel géothermique (Baujard et Kohl, 2007 modifié). (a) Distribution de la température en 3D dans le socle et les fractures, (b) Température extraite au toit de l'aquifère S1-DET ; (c) Potentiel géothermique (= chaleur exploitable Eut exprimée en MJ/m ²) calculé dans le réservoir inférieur S1-DET.....	32
Figure 10 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique d'âge éocène inférieur S1-DET (Baujard et Kohl, 2007 modifié).	35
Figure 11 : Evaluation quantitative du potentiel géothermique des trois réservoirs clastiques du Fossé de la Limagne. (Baujard et Kohl, 2007 modifié). Eut signifie Energie utilisable, exprimée en MJ/m ² (= chaleur exploitable)	37
Figure 12 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Grès de Donnemarie » à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al.,2008)	47
Figure 13 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Grès de Chaunoy » à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al.,2008)	48

Figure 14 : Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs suivants : « Grès de Sainte Colombe – Voulzie » (A), « Grès de Boissy » (B) et « Grès du Rhétien marin » (C), à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008) avec la position des réservoirs dans un log litho-stratigraphique du Trias (D). 49

Figure 15 : Evaluation du potentiel géothermique à l'échelle du Trias du Bassin de Paris 50

Liste des tableaux

Tableau 1 : Paramètres pétrophysiques mesurés sur les réservoirs clastiques tertiaires du Bassin de Limagne (Dagallier, 2004).....

Tableau 2 : Principales caractéristiques des réservoirs clastiques (surlignés en jaune) et de leurs couvertures de la pile lithostratigraphique du Trias du Bassin de Paris, collectées dans la littérature et les logs pétroliers.

Tableau 3 : Récapitulatif des potentiels géothermiques (estimés en GJ/m²) dans les réservoirs étagés du Trias, situés sous la zone d'exploitation du Dogger.

1. Introduction

Le projet scientifique **CLASTIQ**, comme **CLAYed sandSTone In Question**, réalisé par le BRGM, s'est déroulé sur une durée de totale de 33 mois entre décembre 2005 et septembre 2008. D'une durée initiale de 27 mois, le projet CLASTIQ a été prolongé de 6 mois au moyen de l'avenant n°2 à la convention.

L'ADEME et le BRGM ont souhaité mettre en place un programme de recherche sur les ressources géothermales de type basse à moyenne température, des réservoirs clastiques profonds, en France métropolitaine, via la convention n°0505C0079 signée le 20 décembre 2005.

Le projet CLASTIQ est doté d'un budget de 692 k€, cofinancé par le BRGM et l'ADEME, comme précisé dans l'avenant n°1 à la convention, signé le 14 décembre 2006.

Au BRGM, le projet de recherche CLASTIQ constitue un projet cible (PDR06 CDG 50), rattaché au projet cadre GTH R02 intitulé GEOTRES (Ressource géothermale).

Ce document constitue le rapport final du projet CLASTIQ.

1.1. ENJEU SOCIÉTAL ET PROBLÉMATIQUE DU PROJET CLASTIQ

Dans le contexte actuel d'une forte demande en énergie combinée à une volonté politique de diminuer les émissions de gaz à effet de serre générées par les combustibles fossiles, la découverte de nouvelles ressources géothermiques en France est un enjeu de première importance.

L'exploitation des réservoirs géothermiques du territoire métropolitain est principalement concentrée dans les grands bassins sédimentaires post-paléozoïques (Ile de France, Aquitaine). Le Bassin de Paris, en particulier, contient les réservoirs géothermiques du Dogger qui sont principalement exploités par doublet depuis les années 80. La production de chaleur géothermale à partir de la trentaine d'opérations géothermiques toujours en activité en Ile-de-France fait de ce bassin, le plus grand bassin géothermique basse énergie d'Europe occidentale. Il fournit de la chaleur à environ 140 000 équivalents logements de franciliens ce qui représente 130 000 tep économisées annuellement. Au cas où les ressources géothermales du Dogger deviendraient insuffisantes à l'horizon 2010, il faudra pouvoir être en mesure d'identifier des réservoirs alternatifs, plus profonds, notamment dans des formations clastiques.

Plus globalement, les réservoirs argilo-gréseux du Trias (e.g. Alsace, Bassin de Paris) et du Tertiaire (e.g. Limagne) constituent une cible privilégiée car ils sont localisés au droit de grands secteurs urbanisés consommateurs d'énergie. En outre, du point de vue géologique, ces formations argilo-gréseuses constituent des réservoirs favorables

pour une exploitation géothermique de type basse à moyenne température car elles se composent de sédiments réputés aquifères (composante gréseuse), qui, entre 2000 et 3000 m de profondeur, peuvent contenir des fluides portés à des températures comprises entre 80 et 150°C.

En revanche, l'agencement d'une formation clastique, composée d'une alternance de couches gréseuses (majoritaire) et de couches argileuses intercalées, est complexe. Cette complexité peut induire de fortes variations des paramètres pétrophysiques (perméabilité, porosité) d'un endroit à un autre du réservoir, qui rendent difficiles la prédiction du potentiel à l'échelle d'un doublet.

En ce qui concerne les opérations de géothermie passées dans les réservoirs clastiques du Bassin de Paris, un certain nombre de déconvenues est apparu et a remis en cause leur exploitation. En particulier, la mise en évidence de sérieux problèmes de réinjection des fluides géothermaux a stoppé les opérations de démonstration comme celle de Melleray, près d'Orléans. Cependant, dans plusieurs pays européens, ces formations clastiques sont exploitées pour la géothermie depuis une vingtaine d'années, certaines des principales difficultés ayant été surmontées. Dans le cas d'une ressource moyenne énergie, on pourra éventuellement envisager de la cogénération (chaleur et électricité), comme c'est déjà le cas, depuis plusieurs années, dans les réservoirs gréseux du Trias supérieur de Neustadt-Glewe, en Poméranie (Allemagne).

1.2. PRINCIPAUX OBJECTIFS DU PROJET CLASTIQ

Deux grands objectifs sont assignés au projet de recherche CLASTIQ.

Objectif 1 – Evaluation de la ressource géothermique des réservoirs argilo-gréseux profonds du territoire métropolitain, en se plaçant dans une perspective énergétique de production de chaleur et si possible de production d'électricité. Il s'agit d'une géothermie de type basse à moyenne température dans les bassins sédimentaires.

L'évaluation du potentiel géothermique nécessite une actualisation de la connaissance des réservoirs clastiques, sachant que les dernières estimations datent des années 80 (Haenel, 1989). Du point de vue générique, cette évaluation actualisée nécessite de maîtriser : i) la description géologique et pétrophysique des réservoirs clastiques, ii) la géométrie des réservoirs : profondeur, épaisseur, température, iii) le calcul du potentiel géothermal, fondé sur des paramètres de volumes (épaisseur et extension) et de températures des réservoirs¹.

¹ Pour en savoir plus sur la méthode de calcul adoptée pour l'estimation quantitative du potentiel géothermique de réservoirs clastiques, le lecteur se reportera aux rapports techniques du projet CLASTIQ décrivant la méthode et notamment Dezayes *et al.* (2006), sur le Fossé rhénan, et Bouchot *et al.* (2008), sur le Bassin de Paris.

En termes d'informations utilisées pour atteindre ce premier objectif, et en fonction des bassins étudiés, nous avons :

- réalisé un état de l'art à partir des publications parues notamment, depuis les années 80,
- valorisé des cartographies de réservoirs pétroliers, issues notamment d'atlas de l'IFP,
- collecté et analysé les données géométriques, thermiques et pétrophysiques de nombreux forages pétroliers et géothermiques (e.g. Bassin bressan et Bassin de Paris),
- retraité des profils sismiques (Fossé rhénan) ;
- intégré ou réalisé des modèles géologiques 3D de réservoirs (Fossé de la Limagne, Fossé rhénan),

Objectif 2 – Faire le bilan sur les problèmes de réinjection dans les aquifères argilo-gréseux sur la base de réussites en Europe comme d'échecs en France. À la lumière de cette synthèse, la transposition au contexte français passe par la recommandation de solutions techniques en termes de complétion de puits et de solutions permettant d'améliorer la productivité ou l'injectivité des réservoirs argilo-gréseux.

Cette étude aborde ainsi : i) l'évaluation des causes liées aux difficultés de réinjecter (phénoménologie), ii) la géochimie des fluides extraits de réservoirs triasiques et leur contribution dans la réinjection, et iii) un ensemble de recommandations techniques.

La question de la réinjection dans les réservoirs argilo-gréseux est indépendante de l'âge des formations. Par conséquent, en termes d'informations utilisées pour atteindre ce deuxième objectif, nous avons : 1) réalisé une synthèse bibliographique des expériences françaises (Bassin de Paris) et européennes de réinjection ; 2) effectué un échantillonnage de fluides géothermiques, extraits de réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris où des exploitations pétrolières ou d'eau potable sont en cours.

1.3. LES BASSINS SEDIMENTAIRES RETENUS POUR L'ESTIMATION DES POTENTIELS GEOTHERMIQUES

Les réservoirs clastiques profonds du territoire métropolitain sont situés dans deux types d'environnement sédimentaire, à savoir i) d'étroits fossés de type rift et ii) de vastes bassins intracontinentaux (fig. 1).

Les fossés sédimentaires appartiennent au système cénozoïque de rifts ouest-européens, s'étendant de la Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord. Compte tenu de leur contexte géodynamique en rift, marqué par un moho proche de la surface (< 24 km en alsace), ces fossés sont caractérisés par un fort gradient thermique (~55°C/km),

paramètre essentiel en géothermie. Il s'agit de grabens, étroits et profonds, dont la sédimentation est fortement contrôlée par la fracturation. Ils contiennent des sédiments cénozoïques, parfois déposés sur un soubassement métamorphique, comme en Limagne d'Allier, ou sédimentaire mésozoïque, comme en Alsace et en Bresse. Les fossés étudiés dans le cadre du projet CLASTIQ sont le Fossé rhénan, le Bassin bressan et le Fossé de Limagne (fig. 1).

Les vastes et profondes dépressions sédimentaires sont constituées de sédiments d'âge mésozoïque à actuel. Compte tenu de leur position intracontinentale (versus rift) ces dépressions, tels les Bassins parisien ou aquitain, sont caractérisés par un gradient thermique normal (30°C/km). Parmi ce type de bassins, seul celui de Paris a fait l'objet de notre étude (fig. 1).

En termes d'âge des sédiments, les réservoirs clastiques, profonds, donc susceptibles d'avoir un intérêt géothermique, sont principalement triasiques et plus rarement tertiaires (comme dans certains fossés). Les réservoirs étudiés dans le cadre du projet CLASTIQ ont été les réservoirs triasiques du Bassin de Paris, le Buntsandstein du Fossé Rhénan et du Bassin bressan, et les réservoirs tertiaires du Fossé de Limagne.

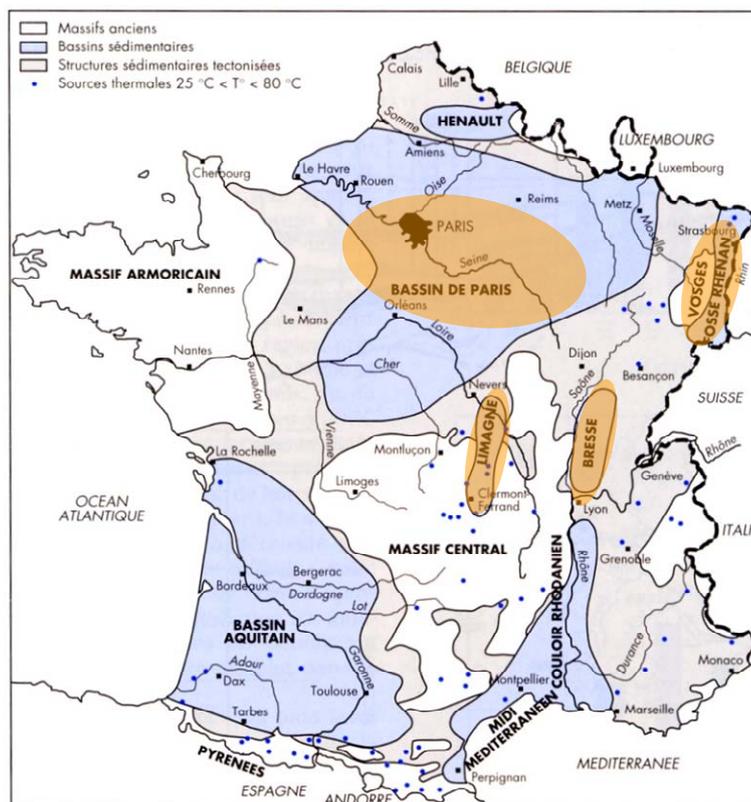


Figure 1 : Carte schématique des grands bassins sédimentaires du territoire métropolitain (en bleu) et position des bassins étudiés dans le cadre du projet CLASTIQ (en orange).

Les estimations quantitatives du potentiel géothermique ont été menées à deux échelles : i) à l'échelle régionale des bassins en ce qui concerne le Bassin de Paris, le Fossé rhénan et le Bassin bressan , et ii) à l'échelle de cibles plus petites, réputées favorables pour la géothermie basse à moyenne géothermie, à savoir le réservoir Buntsandstein de la région de Strasbourg-Obernai (Fossé rhénan), les réservoirs éocènes de la région de Clermont-Ferrand-Riom (Fossé de Limagne) et enfin les réservoirs triasiques, situés en région Ile de France, sous le Dogger exploité du Bassin de Paris.

1.4. PLAN DU RAPPORT FINAL

Ce rapport final du projet CLASTIQ rassemble les principaux résultats et conclusions présentés dans les six rapports techniques réalisés dans le cadre du projet, entre 2006 et 2008. Pour connaître le détail de chacune de ces études, le lecteur voudra bien se reporter aux rapports suivants :

- Genter A., avec la collaboration de Dezayes C., Guillou-Frottier L., Thinon I., Courrioux G., 2007. Projet CLASTIQ : **CLAYed sandstone In Question - Rapport d'avancement**. BRGM/RP-55379-FR, 71 p.
- Dezayes C. avec la collaboration de Thinon I., Courrioux G., Tourlière B., Genter A., 2007. Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le **Fossé rhénan**. Rapport final. BRGM/RP-55729-FR, 72 p.
- Jorand C, Bouchot V. 2008. Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein» **du Bassin bressan**, France. Rapport BRGM, RP-56462-FR, 34 p.
- Baujard, C., Kohl, T., 2007. **Limagne** Température Simulation and Resource Analysis, rapport technique réalisé à la demande du BRGM par GEOWATT AG dans le cadre du projet CLASTIQ, 40 p.
- Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A., avec la collaboration de Chilès J.P., Garibaldi C., Jorand C., 2008. Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du **Bassin de Paris**. Rapport final BRGM - RP-56463-FR, 92 p.
- Lopez S. et Millot R. avec la collaboration de Brach M., Hervé J.-Y., Innocent C., Négrel Ph., Sanjuan B., 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, 196 p.

Le corps du rapport final du projet CLASTIQ est composé de cinq chapitres :

- les cinq premiers chapitres du rapport traiteront successivement de l'évaluation quantitative du potentiel géothermique des réservoirs clastiques 1) du Buntsandstein du Bassin bressan, 2) du Buntsandstein du Fossé rhéna, 3) du Tertiaire du Fossé de la Limagne et 4) du Trias du Bassin de Paris.
- le sixième chapitre abordera la question cruciale de la réinjection des fluides géothermiques dans le Trias du Bassin de Paris, en faisant des recommandations techniques.

Chacun de ces chapitres comporte un volet prospectif, avec l'intention d'esquisser les axes de recherche d'un projet CLASTIQ2.

2. Potentiel géothermique du Buntsandstein du Bassin bressan

Ce chapitre constitue la synthèse du rapport technique de Jorand et Bouchot (2008).

2.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

Le Bassin bressan constitue un fossé d'effondrement, étroit et profond, qui offre des températures dépassant les 100°C à des profondeurs comprises entre 2000 et 3000 m. La ressource potentielle est plus précisément située dans les formations clastiques, à dominante gréseuse, du Buntsandstein, formation du Trias inférieur. Compte tenu de ces caractéristiques, le Buntsandstein du bassin bressan pourrait constituer un réservoir géothermal pour la production de chaleur et d'électricité.

En revanche, les formations gréseuses du Tertiaire sont, d'une part composées de marnes renfermant parfois des lentilles gréseuses, et d'autre part, localisées à des profondeurs généralement faibles (< 900 m), à l'exception de la région de Bourg en Bresse où l'isohypse de la base du tertiaire dépasse les 1000 m. Par conséquent, notre étude a été ciblée, à ce stade, sur le réservoir triasique plus prometteur.

L'objectif de l'étude est, donc, d'évaluer le potentiel géothermique des formations clastiques, à dominante gréseuse, du Buntsandstein, à l'échelle du Bassin bressan, à partir de sources de données disponibles dans le domaine public (cartes, données de forages pétroliers,..) et académiques (synthèses géologiques des années 1980, travaux de recherches récents).

Pour se faire, une compilation des données publiques existantes (carte de profondeur, carte thermique, ...) a été complétée par des paramètres géométriques réinterprétés à partir de logs de forages pétroliers. L'ensemble des données a ensuite été numérisé et interpolé afin d'élaborer des cartes intermédiaires d'épaisseur, de profondeur et de température du Buntsandstein. Malgré le nombre réduit de forages pétroliers, les cartes d'interpolation des épaisseurs, profondeurs et températures du réservoir réalisées sont géologiquement cohérentes à l'échelle du fossé.

Enfin, les cartes des épaisseurs et des températures du Buntsandstein ont été combinées pour calculer la quantité de chaleur en place et *in fine* le potentiel géothermique (= chaleur exploitable) à l'échelle du Bassin Bressan.

En termes de résultats (fig. 2), la zone à potentiel géothermique maximal coïncide avec les parties à la fois les plus profondes du bassin, les plus épaisses du réservoir Buntsandstein et offrant un gradient anormalement élevé. Néanmoins, du fait de la faible épaisseur de la formation étudiée (50 m maximum), les valeurs du potentiel (= chaleur exploitable) ne dépassent pas 2 GJ/m².

Ces résultats sont à considérer avec précaution, là où il existe des incertitudes sur les épaisseurs des couches et sur la profondeur du toit du Permien du fait du faible nombre de puits atteignant le substratum (17). Des incertitudes existent également au niveau des valeurs des gradients qui ont été calculés à partir de méthodes différentes.

La zone la moins défavorable du bassin dessine un croissant submérien, jalonnant la bordure orientale du bassin (périmètre géographique) suivant un axe Louhans – Foissiat – Bourg en Bresse (fig. 2D). Au sein de ce croissant, deux pics sont localisés à l'aplomb de Bourg-en-Bresse (~1,9 GJ/m²) et au nord-est de Foissiat. Ce réservoir potentiel présente les caractéristiques suivantes : températures comprises entre 100 et 140°C, à des profondeurs entre 2000 et 3200 m et pour des épaisseurs comprises entre 30 et 50 m. Si la qualité géothermique du réservoir était avérée, les températures atteintes permettraient la production d'électricité par cycle binaire.

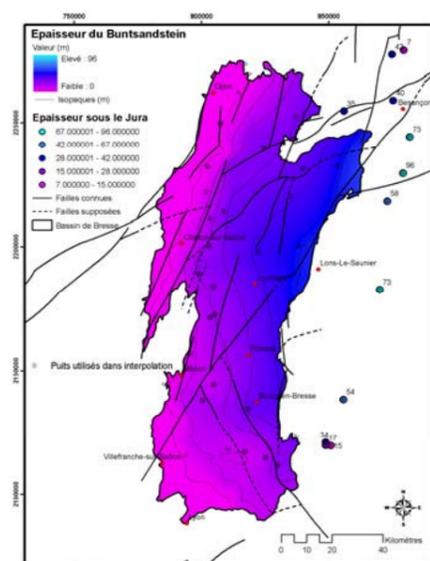
Si on compare les potentiels géothermiques du Buntsandstein des bassins bressan (cette étude) et rhénan (Dezayes *et al.*, 2007), le potentiel du bassin bressan apparaît beaucoup moins élevé (fig. 13) car les épaisseurs du Buntsandstein bressan (< 50 m) sont très faibles comparées à celles du Buntsandstein rhénan (500-600 m, selon Dezayes *et al.*, 2007). *In fine*, les valeurs de la chaleur exploitable du Buntsandstein bressan atteignent à peine 2 GJ/m² (fig. 2D), alors que celles obtenues dans le Buntsandstein alsacien sont comprises entre 15 et 30 GJ/m². A titre indicatif, les valeurs de potentiel obtenues dans le Dogger exploité du Bassin parisien sont comprises entre 2,5 et 7 GJ/m² (Haenel, 1989).

2.2. PERSPECTIVES «GEOthermie du Bassin Bressan »

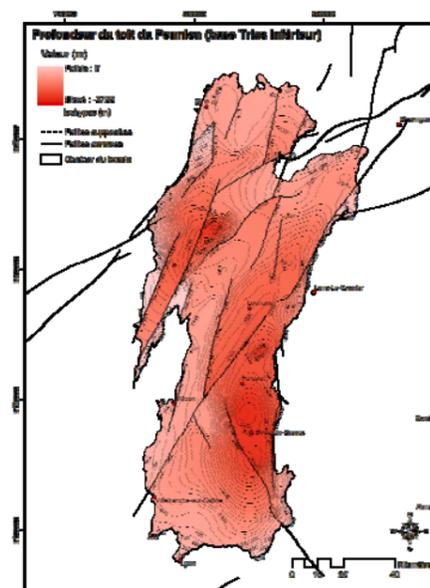
En l'absence de données pétrophysiques fiables (perméabilité, porosité) concernant le réservoir clastique potentiel, il est délicat de déterminer si l'épaisseur de 30 à 50 m de réservoir gréseux est suffisante ou non pour obtenir des débits corrects. En effet, seules de bonnes valeurs de perméabilité du Buntsandstein permettraient à ces cibles de constituer un réservoir géothermique.

Cependant, si l'on considère que l'épaisseur de la zone d'intérêt géothermique n'est pas rédhibitoire pour une exploitation géothermique, il s'agira dans l'avenir de focaliser notre attention sur l'axe Louhans – Foissiat – Bourg-en-Bresse.

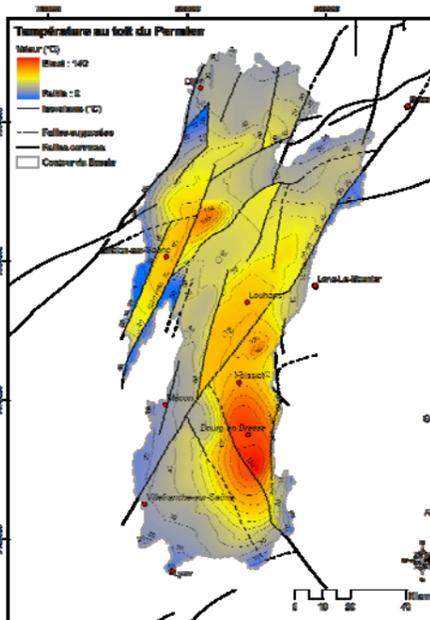
Parce que le Bassin bressan est un fossé d'effondrement à la structuration complexe en horst et graben, le changement d'échelle imposera de modéliser finement la géologie de cette zone d'intérêt afin d'en extraire une géométrie réaliste des réservoirs géothermiques. Pour ce faire, une analyse combinée des forages pétroliers et de profils sismiques permettra notamment de mieux cerner les variations d'épaisseur du réservoir. En outre, les incertitudes existant au niveau des valeurs des gradients calculés à partir de méthodes différentes devront être levées via l'acquisition de nouvelles mesures. Outre la géométrie des réservoirs, l'acquisition de données pétrophysiques de type perméabilité, porosité sera un élément indispensable à une fine évaluation du potentiel de la zone.



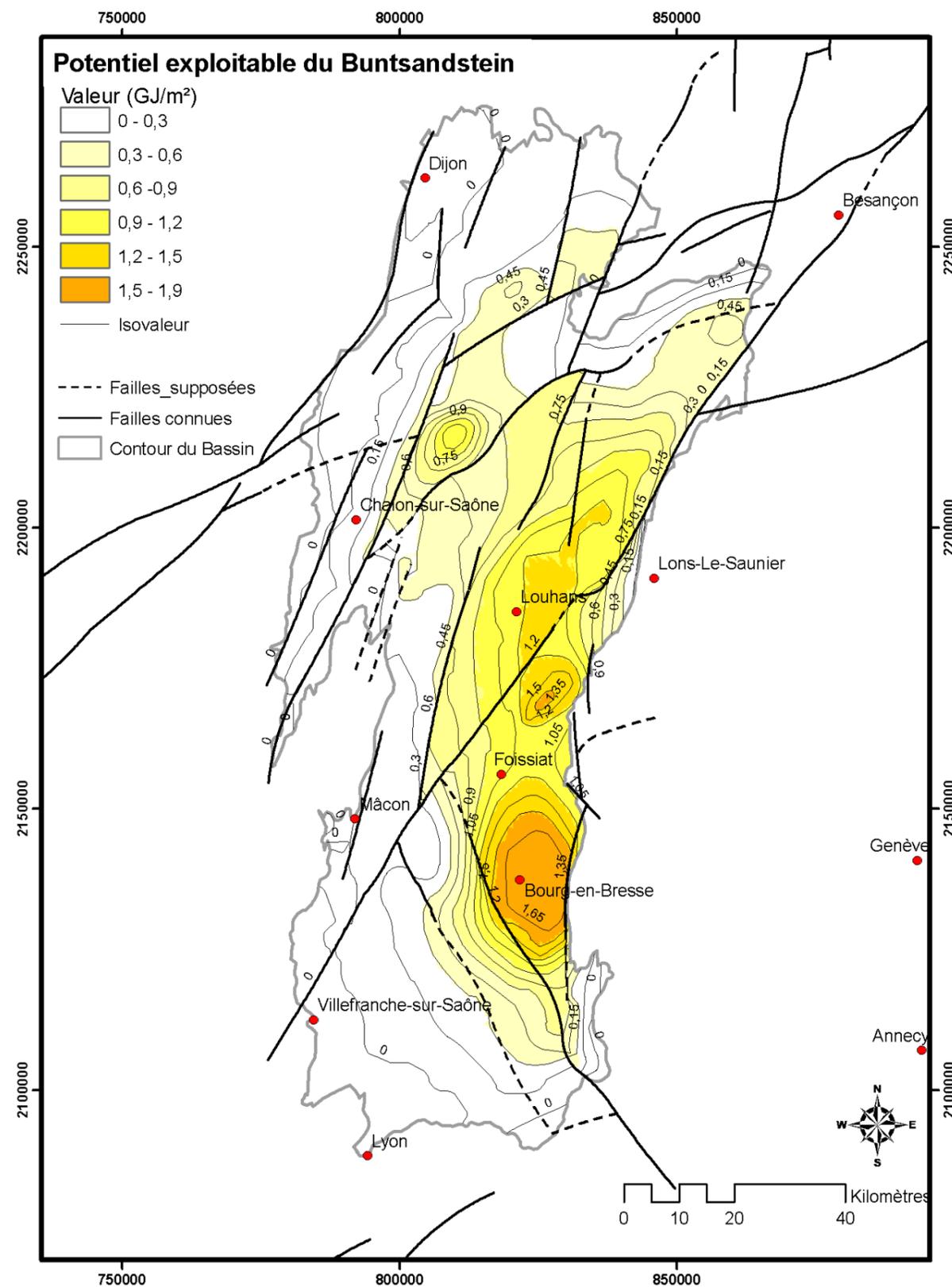
A



B



C



D

Figure 2 : Evaluation du potentiel géothermique du Buntsandstein du Bassin bressan (Jorand et Bouchot, 2008), avec :

A - Carte d'épaisseur des grès du Buntsandstein du Bassin bressan, réalisée à partir de l'interpolation des données de 17 forages pétroliers.

B - Carte des isohypses du toit du Permien du bassin bressan (hors partie du bassin masqué par le Jura à l'est).

C - Carte des températures évaluées à la base du Buntsandstein (= toit du Permien).

D - Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) en GJ / m² dans la formation gréseuse du Buntsandstein du Bassin bressan.

Compte tenu des valeurs modeste du potentiel, plutôt que de focaliser notre attention exclusivement sur les réservoirs clastiques du Trias de l'axe Louhans – Foissiat – Bourg-en-Bresse, on recommande d'affiner l'estimation du potentiel géothermique de la zone d'intérêt en considérant l'ensemble des réservoirs potentiels, susceptibles d'être localisés :

- dans la partie inférieure du Tertiaire (Eocène), si les lentilles gréseuses s'avèrent suffisamment épaisses (base du Tertiaire située à environ 1900 m / 75 °C près de Bourg-en-Bresse),
- dans les calcaires du Dogger (> 100 m d'épaisseur / vers 2500 m de profondeur / > 90°C),
- dans les grès du Buntsandstein (30 à 50 m d'épaisseur / 2000 à 3000 m de profondeur / 100 à 140°C, cette étude).

2.3. RAPPORT, COMMUNICATION A CONGRES ET PUBLICATION

Cette étude, réalisée en 2008, a fait l'objet d'un rapport technique du BRGM destiné à l'ADEME :

Jorand C, Bouchot V., 2008. Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein» du Bassin bressan, France. Rapport BRGM, RP-56462-FR, 34 p.

3. Potentiel géothermique du Buntsandstein du Fossé rhénan

Ce chapitre constitue la synthèse du rapport technique de Dezayes *et al.* (2007).

3.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

L'estimation du potentiel géothermique du Buntsandstein a été réalisée dans un premier temps à l'échelle du Fossé rhénan, puis dans un deuxième temps, en focalisant notre attention sur une zone thermiquement favorable, située à l'est de Strasbourg où les besoins énergétiques sont importants.

3.1.1. Approche régionale à l'échelle du Fossé rhénan

Le Graben du Rhin supérieur ou Fossé rhénan supérieur est un fossé d'effondrement, généré au Tertiaire, qui s'étend sur plus de 300 km de longueur, de Bâle, au sud, à Mayence et Francfort, au nord. Il fait partie du Système de Rifts Ouest-européens s'étendant de la Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord sur une distance de plus de 1 000 km, qui est caractérisé par des gradients thermiques anormalement élevés. Le Fossé rhénan représente le segment central le plus prononcé entre le Bassin bressan, au sud (cf.§.2), et le Graben du Rhin inférieur, au nord.

Le Fossé rhénan supérieur présente un remplissage sédimentaire tertiaire et quaternaire avec peu de volcanisme. Ce remplissage recouvre des sédiments jurassiques et du Trias germanique, voire du Permien, l'ensemble reposant sur un socle paléozoïque.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés au potentiel géothermique profond du Fossé rhénan supérieur pour la production de chaleur, voire d'électricité, si la température est suffisante.

La ressource est située dans les formations argilo-gréseuses constituées par le Trias germanique, et particulièrement sa formation de base du Buntsandstein, reconnue dans le passé par forages, où les températures sont souvent supérieures à 100 °C pour des profondeurs comprises entre 1 et 2 km (forages de Soultz, Rittershoffen, Cronenbourg). Le Buntsandstein est composé essentiellement de grès continentaux roses et de conglomérats fluviatiles et estuariens marquant une transgression. Ces dépôts détritiques peuvent atteindre 500 m d'épaisseur. Ce réservoir clastique du Buntsandstein a été la cible de notre travail.

Afin d'identifier les secteurs favorables pour l'exploration et l'exploitation de la ressource géothermique du réservoir du Buntsandstein, nous avons réalisé des cartes d'interpolation des caractéristiques principales de cet aquifère (profondeur, épaisseur, température, ...) sur toute la partie méridionale du Fossé rhénan supérieur comprenant

la plaine d'Alsace, en France, et la plaine badoise, en Allemagne. Les données interpolées proviennent de cartes déjà interprétées dans le cadre de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan Supérieur (Munck *et al.*, 1979). La réalisation des cartes d'épaisseur et de température au toit du Buntsandstein nous a permis de faire une carte du potentiel géothermique de la région (fig. 3).

Il apparaît clairement que la partie nord de la zone d'étude, au-delà d'Erstein, constitue une zone favorable du point de vue de la ressource géothermique avec, dans une moindre mesure qui serait à préciser, les environs de Sélestat. Dans ces régions, le toit du Buntsandstein se situe aux alentours de 2 000 m de profondeur avec une température d'environ 150 °C et une épaisseur de près de 600 m.

L'estimation du potentiel géothermique exploitable aboutit ainsi à des valeurs comprises entre 15 et 30 GJ/m² (fig. 3D) alors que, par exemple, il n'est que de 7 GJ/m², au maximum, pour le Dogger du Bassin de Paris, et de 1,9 GJ/m², au maximum, pour le Buntsandstein du Bassin bressan (Jorand et Bouchot, 2008 ; fig. 2D). Sur la totalité de la zone d'étude qui couvre environ 7 150 km², l'énergie géothermique exploitable est estimée autour de 10 500 GW.an_{th} (330.10⁶ TJ).

3.1.2. Etude détaillée du secteur Strasbourg-Obernai

Au niveau du Fossé, certains secteurs apparaissent plus favorables et leur potentialité mérite d'être approfondie. C'est le cas au sud-ouest de Strasbourg où nous avons fait une étude détaillée du secteur à partir de données anciennes et de retraitement de profils sismiques afin d'avoir une meilleure connaissance du réservoir, mais également de valider la démarche pour pouvoir l'appliquer dans l'avenir à d'autres secteurs qui pourraient présenter des enjeux intéressants. Cette zone s'étend entre Strasbourg, au NE, et Obernai, au SW, au niveau de la bordure ouest du Fossé rhénan supérieur, et au nord du seuil d'Erstein (fig. 4).

Sur ce secteur d'environ 30 km sur 30, entre Strasbourg, au nord-est, et Obernai, au sud-ouest, nous avons rassemblé les données de forages provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) et fait retraiter par des techniques modernes certaines lignes sismiques provenant de la prospection pétrolière faite dans les années 1970-1980.

Les données des 13 forages nous ont, d'une part, permis de recalibrer la sismique en profondeur, et d'autre part, nous ont fourni des renseignements concernant les caractéristiques hydrauliques du réservoir. Ainsi, la température du réservoir est en moyenne autour de 100 °C entre 1 600 et 1 800 m de profondeur, ce qui est suffisant pour une production de chaleur, voire même d'électricité, grâce aux cycles de transformation binaire tels qu'utilisés à Unterhaching en Allemagne.

Les débits obtenus dans les forages ne sont pas très importants, mais il apparaît que la production de l'aquifère est liée au réseau de fractures qui pourrait être stimulé hydrauliquement ou chimiquement. Une bonne connaissance de la géométrie du réseau de fractures et de ses caractéristiques de remplissage est donc indispensable pour une meilleure exploitation du réservoir.

À partir des interprétations des lignes sismiques nouvellement retraitées, nous avons réalisé un modèle géologique 3D afin de pouvoir imager correctement la formation du Buntsandstein. L'analyse des coupes montre une différence de schéma structural entre la partie nord, indiquant l'existence de demi-grabens et de blocs basculés, et la partie sud, constituée d'un large graben, à l'ouest, et une succession de failles normales, à l'est. Cette différence peut s'expliquer par la présence du Graben du Rhin, à proximité de la « Zone de Transfert Sud ». La présence de cette structure profonde complique la corrélation des failles entre chaque profil.

Ainsi, le modèle le plus probable fait apparaître un réseau de fractures normales NE-SW et la présence d'un sous-bassin dans la partie SW de la zone, qu'il serait intéressant de confirmer à partir de la réinterprétation de lignes sismiques présentes dans la zone d'étude. En effet, la forme des interfaces stratigraphiques dépend de l'interprétation géologique et conditionne fortement l'estimation du volume du réservoir et la valeur du potentiel géothermique.

Dans notre cas, le volume de la formation du Buntsandstein impliqué est d'environ 300 km^3 pour une surface d'étude autour de 670 km^2 (fig. 4). Il semblerait, cependant, que la formation clastique considérée comprenne à sa base des grès permians du Rotliegendes qui sont difficilement différenciables en sismique. Le potentiel géothermique exploitable est alors d'environ $350 \pm 15 \text{ GW.an}_{\text{th}}$ ($11 \pm 0,472 \cdot 10^6 \text{ TJ}$) (fig. 4)

3.2. PERSPECTIVES «GÉOTHERMIE DU FOSSE RHENAN »

Cette étude montre que la formation clastique du Buntsandstein du Fossé rhénan peut être une cible future de la prospection géothermique en termes de production de chaleur et même, à terme, d'électricité. Cependant, ce réservoir ne doit pas être considéré comme un aquifère classique, assimilé à un milieu poreux, mais comme un réservoir clastique fracturé. Cette nouvelle cible implique d'avoir une bonne connaissance du sous-sol afin d'optimiser au mieux l'exploration puis l'exploitation des réservoirs.

A cet égard, une thèse de l'Université de Strasbourg, cofinancée par l'ADEME et le BRGM, intitulée « Potentiel géothermique des grès du Buntsandstein dans la vallée du Rhin » a débuté en octobre 2008 (S. Haffen). Elle a pour but de caractériser la géométrie des réservoirs clastiques, la variabilité des faciès lithologiques du Trias et des paramètres pétrophysiques associés, en fonction des processus sédimentaires, diagénétiques, tectoniques, via l'acquisition de données de terrain.

D'autre part, l'exploration approfondie de ce type de réservoir profond demande des moyens d'investigation importants. Pour les zones à fort potentiel géothermique, de nouvelles acquisitions de sismique 2D et 3D pourront apporter des éléments importants afin d'imager en détail ces réservoirs profonds. En effet, la sismique pétrolière des années 70-80 était optimisée pour la couverture tertiaire comprenant les niveaux producteurs et malgré de nouveaux traitements adéquats, les interfaces profondes du Trias sont difficiles à distinguer.

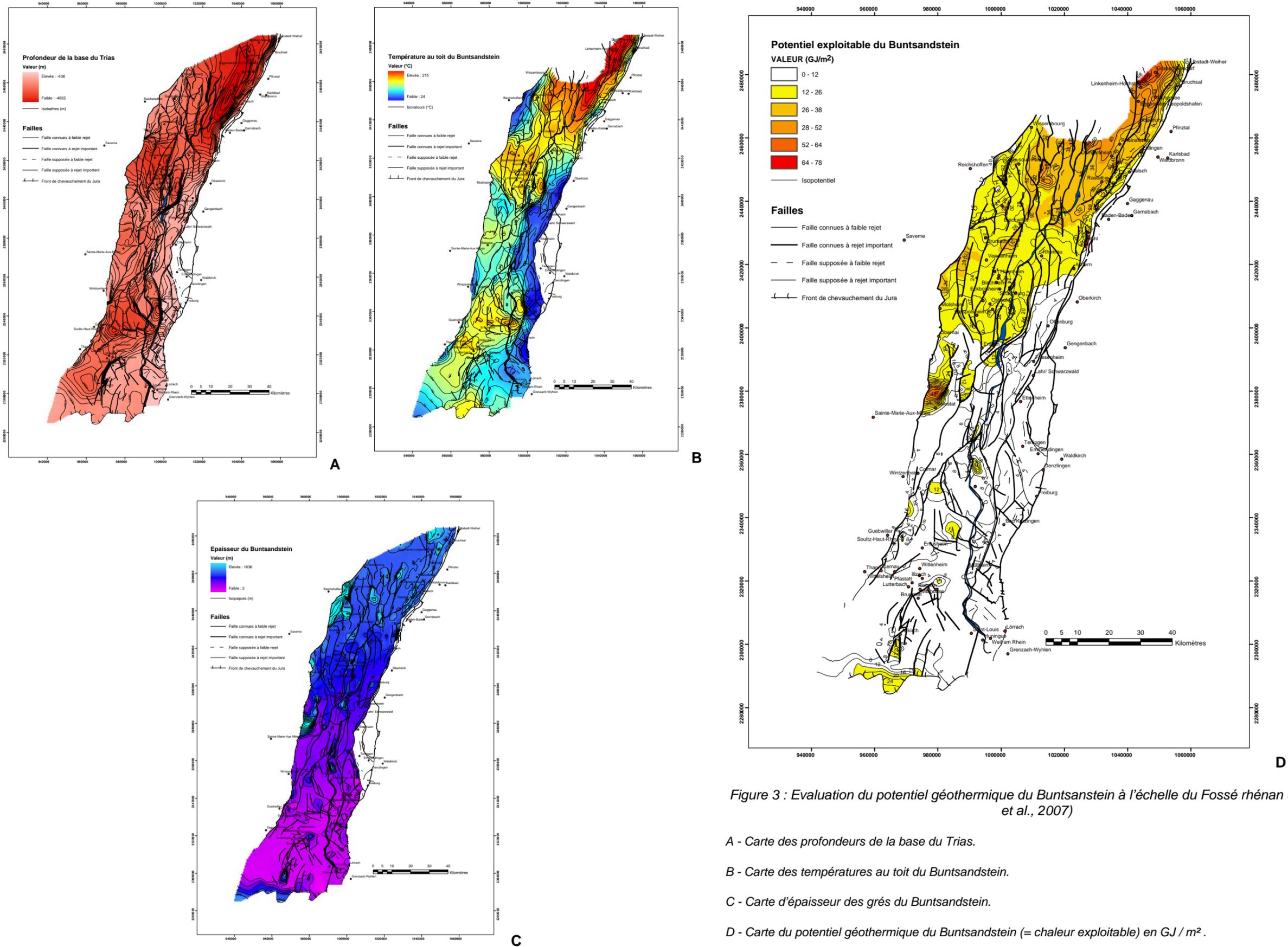


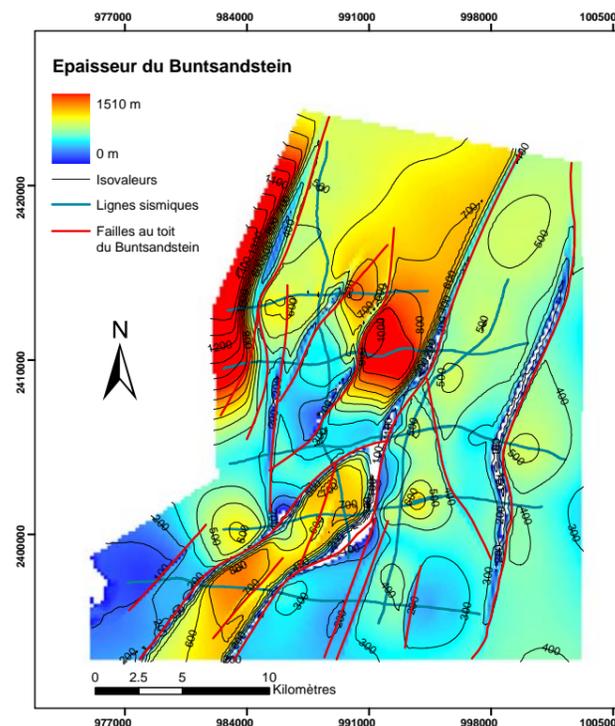
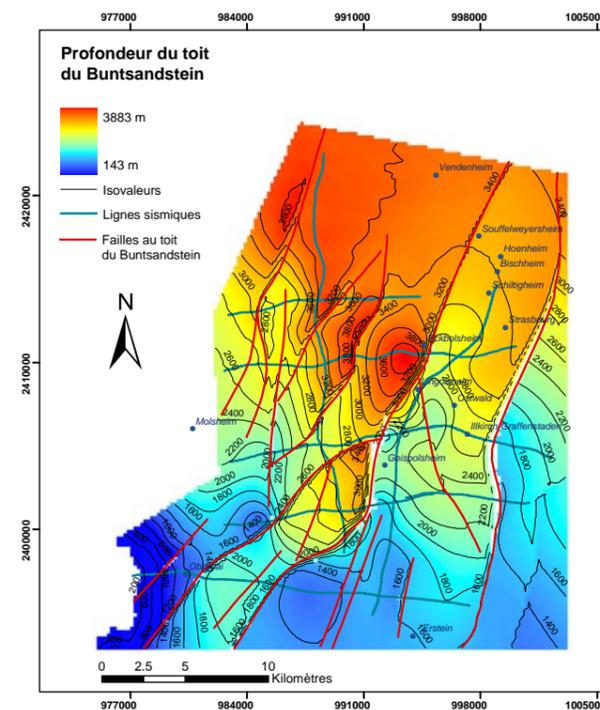
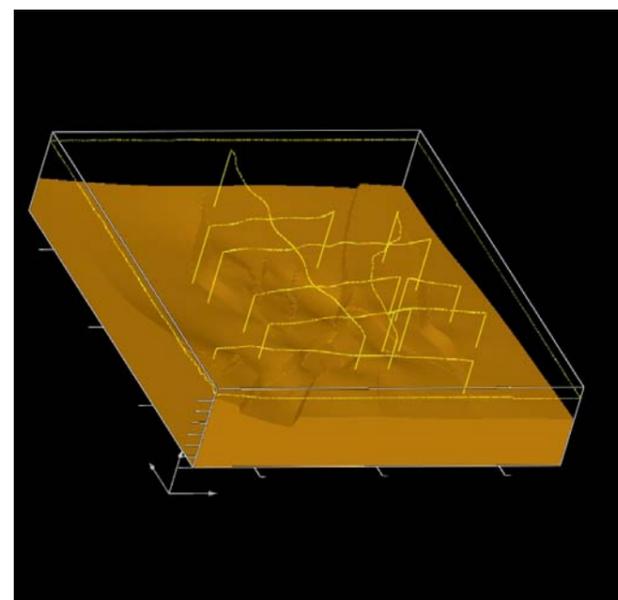
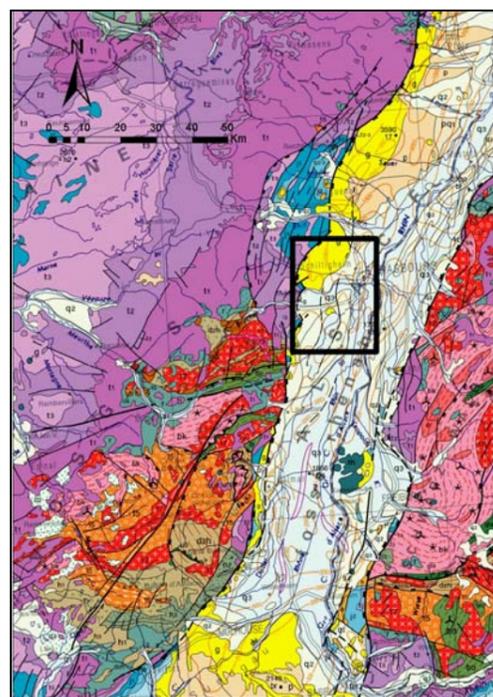
Figure 3 : Evaluation du potentiel géothermique du Buntsandstein à l'échelle du Fossé rhénan (Dezayes et al., 2007)

A - Carte des profondeurs de la base du Trias.

B - Carte des températures au toit du Buntsandstein.

C - Carte d'épaisseur des grès du Buntsandstein.

D - Carte du potentiel géothermique du Buntsandstein (= chaleur exploitable) en GJ / m².



A – Localisation de la zone d'étude (cadre noir) sur la carte géologique au million du BRGM.

B – Vue vers le NE du modèle 3D montrant un sous-bassin intra-graben de direction NE-SW.

C – Profondeur du toit du Buntsandstein à partir du modèle géologique 3D (figure A).

D – Épaisseur du Buntsandstein à partir du modèle géologique. Les isopaques apparaissent très perturbées en raison de la présence de failles à fort rejet.

	Modèle avec sous-bassin	Modèle avec distorsion
Volume	302 km ³	275 km ³
Q	1 346 GW.an _{th}	1 224 GW.an _{th}
Chaleur exploitable	370 GW.an _{th}	337 GW.an _{th}

E – Résultat des calculs de potentiel géothermique (= chaleur exploitable) pour les deux modèles géologiques considérés. Le modèle avec sous-bassins est considéré être le plus plausible.

Figure 4 : Evaluation du potentiel géothermique de la zone d'étude située à l'est de Strasbourg. Cette évaluation est fondée sur un modèle 3D de la zone. Pour le calcul du potentiel, une température moyenne de 140°C a été retenue.

Ce type de travaux est prévu, par exemple, en Allemagne, dans le nord du Fossé rhénan supérieur, où des campagnes d'acquisition sismique sont programmées depuis fin 2007 par des opérateurs privés sur une surface de 60 km² pour la sismique 3D et 50 km² pour la sismique 2D sur 5 secteurs au niveau des zones de transfert (Haimberger, 2007).

Compte tenu de ces développements potentiels outre-Rhin, cette étude fondée, en grande partie, sur des données et des synthèses anciennes a montré ses limites. Pour le futur, un effort de mise à jour sur la connaissance de la structure de ces réservoirs fracturés est nécessaire. Cet effort s'appuierait sur une réinterprétation systématique des profils sismiques anciens, complétée localement par de nouvelles acquisitions dans les zones à enjeu peu documentées.

3.3. RAPPORT, COMMUNICATION A CONGRES ET PUBLICATION

Cette étude, réalisée en 2007, a fait l'objet d'un rapport technique du BRGM destiné à l'ADEME. Ce travail a été valorisé en 2008 à travers 5 communications à congrès et une publication internationale en cours de rédaction :

Rapport technique :

Dezayes C. avec la collaboration de Thinon I., Courrioux G., Tourlière B., Genter A., 2007. Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan. Rapport final. BRGM/RP-55729-FR, 72 p.

Communications à congrès et résumés étendus :

Dezayes C., Genter A., Tourlière B., 2008. Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. 22ème RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.

Dezayes C., Genter A., Thinon I., Courrioux G., 2008. Structures géologiques et estimation du potentiel géothermique : l'exemple du Trias clastique du Fossé rhénan. 22ème RST- 21-24 Avril 2008, Nancy, France.

Dezayes C., Genter A., Thinon I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Assessment of geothermal potential of clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. 3rd International conference & exhibition on ecological vehicles & renewable energies (EVER), 27-30 Mars 2008, Monte-Carlo, Monaco.

Dezayes C., Genter A., Tourlière B., 2008. Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. ENGINE Final Conference, 12-15 February 2008, Vinius, Lithuania.

Dezayes C., Genter A., Thinon I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Geothermal potential assessment of clastic reservoirs (Upper Rhine Graben, France). 32rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008, 17 p.

Publication :

Dezayes C., Genter A., Thinon I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Geothermal structures and assessment of the geothermal potential of the triassic clastic reservoir in the Upper Rhine Graben, France – *A soumettre à Geothermics.*

4. Potentiel géothermique du Tertiaire clastique du Fossé de la Limagne

4.1. INTRODUCTION

Le Fossé tertiaire de la Limagne est composé de réservoirs clastiques potentiellement exploitables pour une géothermie de type basse à moyenne température. Dans le passé, ce fossé a fait l'objet d'études successives dans le cadre du projet COPGEN (Genter *et al.*, 2003 ; 2004 ; 2005), cofinancé par l'ADEME.

En 2004, un modèle 3D du socle et du bassin Tertiaire de Limagne d'Allier a été construit (Dagallier, 2004 ; Genter *et al.*, 2004) avec le GeoModeller, logiciel de modélisation géologique tridimensionnelle développé au BRGM. Le secteur modélisé a été retenu comme prioritaire pour la géothermie parce qu'il correspond aux parties les plus chaudes (avec 90°C, à 1500 m de profondeur) du Fossé de Limagne (Genter *et al.*, 2003 ; 2004), et inclut notamment la ville de Clermont-Ferrand, où les besoins énergétiques sont importants.

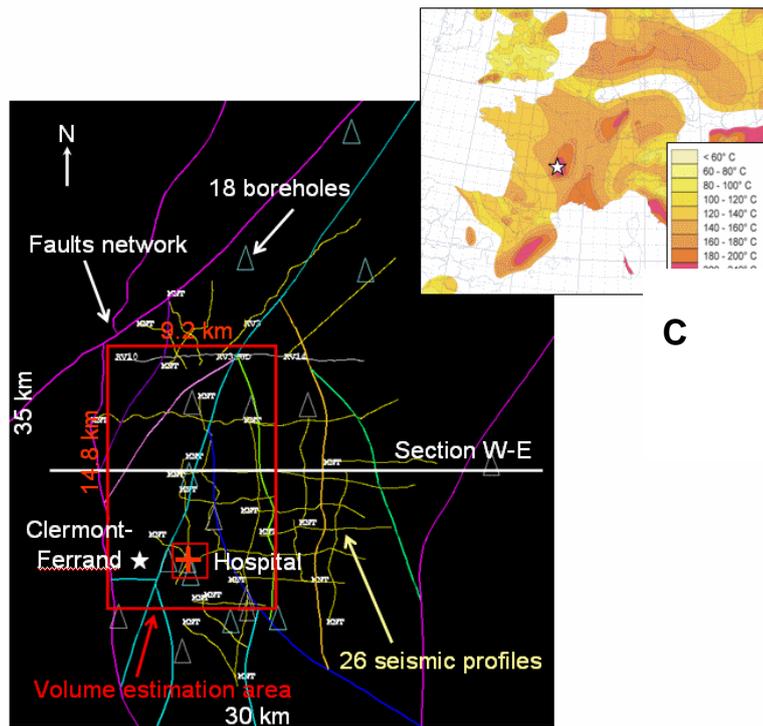
Aujourd'hui, dans le cadre du projet CLASTIQ, le modèle géologique a servi de base à l'estimation du potentiel géothermique du secteur en question.

Ce chapitre résume la procédure de cette étude et les résultats obtenus par le bureau GEOWATT AG (Zurich, Suisse), mandaté par le BRGM. L'étude a fait l'objet d'un rapport détaillé en anglais, disponible au BRGM (Baujard et Kohl, 2007). *In fine*, des perspectives sont proposées.

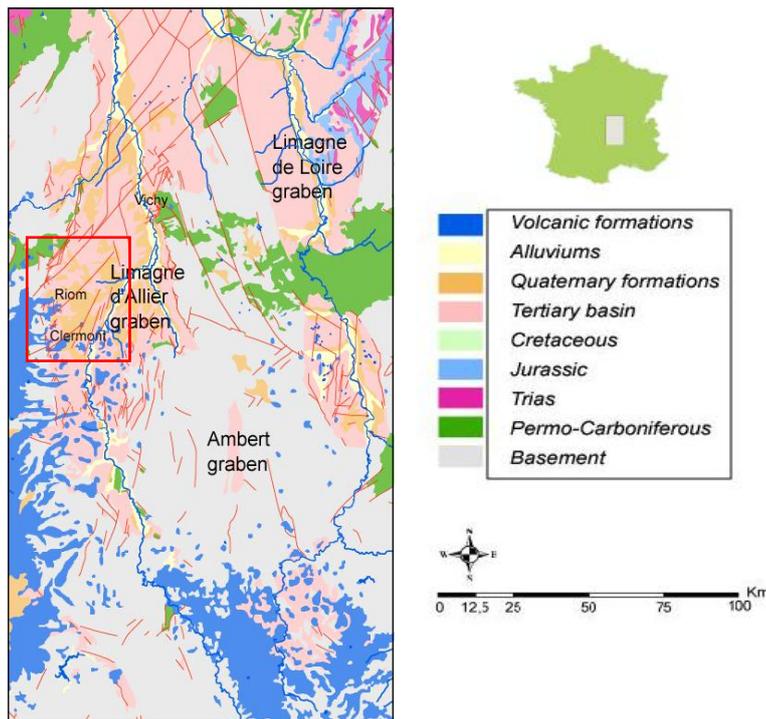
4.2. GEOLOGIE DU FOSSE DE LA LIMAGNE ET DE SES RESERVOIRS CLASTIQUES

Le Fossé de la Limagne (d'Allier) constitue un des trois principaux grabens de la partie nord du Massif central (Genter *et al.*, 2003). Ces grabens, d'âge tertiaire, appartiennent au rift ouest-européen initié à l'Éocène et mis en place à l'Oligocène durant la phase d'extension, qui affecte la plateforme ouest-européenne en avant de la chaîne alpine. Contrairement aux structures très localisées et linéaires du type fossé rhénan, de nombreux grabens de taille et d'orientations variées (NNE-SSW à NE-SW, NW-SE), s'individualisent dans le Massif central.

C'est le cas du bassin de Limagne d'Allier qui correspond à un fossé d'effondrement, orienté N-S à NNE entre le plateau des Dômes à l'ouest et les monts de la Madeleine et du Forez à l'est (fig. 5). Il est limité et découpé par un réseau important de failles orientées N-S, NNE-SSW et NE-SW. Les horsts, qui bordent le bassin sont constitués, d'une part, d'entités métamorphiques et magmatiques appartenant au socle hercynien du Massif central, et d'autre part, d'édifices volcaniques d'âge tertiaire à quaternaire, comprenant notamment les appareils de la chaîne des Puys, située au sein du plateau des Dômes.



B



A

Figure 5 : Localisation en surface de la zone modélisée en 3D (Dagallier, 2004) ayant fait l'objet de l'estimation du potentiel géothermique (cette étude) avec : **A** - Carte géologique du Fossé de la Limagne d'Allier et son environnement métamorphique (socle hercynien) et volcanique (Chaîne des Puys) ; **B** - Schéma structural de la zone modélisée en 3D (30 x 35 km²) ; **C** - Carte des températures extrapolées à 5 km de profondeur, montrant que le bassin de la Limagne est centrée sur une anomalie thermique.

Epoch	Age	Lithology	Formation Name
Oligocene	Chattian	Marl and limestone	S4 (Erod)
		Marl and sand	S4-MIXT (Onlap)
		Sand and conglomerate	S4-DET (Onlap)
	Rupelian	Marl and limestone	S3 (Erod)
		Marl and sand	S3-MIXT (Onlap)
		Sand and conglomerate	S3-DET (Onlap)
Eocene	Priabonian Bartonian	Marl and limestone	S2 (Erod)
		Marl and sand	S2-MIXT (Onlap)
		Sand and conglomerate	S2-DET (Onlap)
	Lutetian	Marl and limestone	S1 (Erod)
		Marl and sand	S1-MIXT (Onlap)
		Sand and conglomerate	S1-DET (Onlap)
< Cenozoic		MTER (Basement) (Onlap)	

^ ^ Evaporites - - - Erosion event

Figure 6 : Colonne litho-stratigraphique du Fossé de Limagne, où sont localisés les trois réservoirs clastiques tertiaires, estimés pour leur potentiel géothermique (cette étude) : S1-DET (Lutétien), S2-DET (Bartonien) et S3-DET (Rupélien).

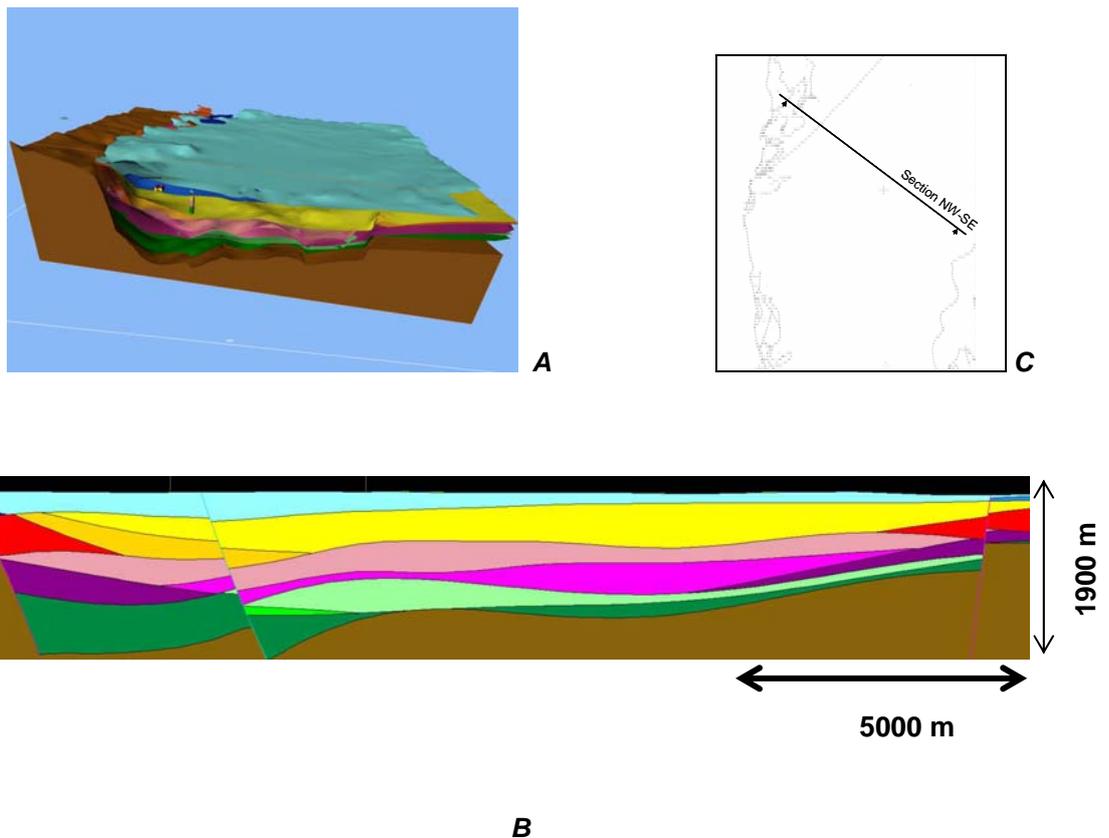


Figure 7 : **A** - Modèle 3D (Dagallier, 2004, Genter et al., 2004) de la zone étudiée ; **B** - Coupe litho-stratigraphique NW-SE du Fossé de la Limagne dont la trace est reportée sur la figure **C**. Cette coupe, issue du modèle géologique 3D (cf. légende de la figure 6), passe par la cible potentielle de Châtelguyon (cf. §. 4.4).

Le socle varisque constitue, en outre, le soubassement de la Limagne. Le bassin tertiaire est constitué de quatre séquences sédimentaires successives (S1 à S4), d'âge éocène et oligocène. Chaque séquence est composée, de bas en haut, de sédiments détritiques conglomératiques et arkosiques (DET), puis de marnes et grès, (MIXT) et enfin, de marnes et calcaires (figs. 6 et 7B). Les terrains clastiques arkosiques constituent les réservoirs géothermiques potentiels. Des pointements volcaniques d'âge oligocène terminal et miocène moyen, localisés plus au sud, recoupent ces séries sédimentaires (fig. 5).

4.3. DEMARCHE METHODOLOGIQUE

On présente, ici, la méthodologie adoptée pour aboutir à l'estimation quantitative du potentiel géothermique du secteur de Clermont-Ferrand – Riom.

Cette démarche s'appuie sur le modèle géologique 3D réalisé par Dagallier (2004) (fig. 7A). La zone modélisée en 3D est définie, en surface, par un rectangle de 30 km d'est en ouest, et de 35 km du nord au sud (fig. 5), jusqu'à une profondeur de 5 km. Ce modèle intègre les failles et les formations sédimentaires post-paléozoïques, qui reposent sur le socle tardi-varisque.

Après avoir simulé en 3D la température dans le Bassin de la Limagne en se calant sur la géométrie proposée par ce modèle géologique, une estimation de la chaleur exploitable est réalisée.

4.3.1. Etape 1 - Maillage du modèle géologique

Dans un premier temps, le modèle géologique a été maillé en trois dimensions. La discrétisation se fait en utilisant des prismes et des hexaèdres (pour les éléments 3D) et avec des triangles et des parallélépipèdes (pour les éléments en 2D). Ce maillage éléments finis a été réalisé en utilisant les maillages Winfra et Orion, tous deux développés par GEOWATT AG.

Le résultat est un maillage non structuré de plus de 100'000 éléments. Le socle et une suite de 4 unités sédimentaires (définies par le toit de S1, le toit de S2, le toit de S3 et la topographie) ont été pris en compte (fig. 6).

Les failles sont maillées en 2D. La plupart des failles présentes dans le modèle géologique sont également prises en compte dans le maillage ; elles sont supposées verticales, sauf pour deux d'entre elles. Ces deux failles ont été maillées manuellement afin de respecter au mieux leur pendage (fig. 8)

4.3.2. Etape 2 - Modélisation thermique 3D

Un modèle thermique diffusif tridimensionnel est alors réalisé (négligeant ainsi l'influence des circulations d'eau sur la température). Deux conditions aux limites sont utilisées. La première est une condition de type Dirichlet, à la surface (température imposée à 10°C). La seconde est de type Neumann, à la base un modèle (flux thermique imposé, 105 mW·m⁻² après calibration). Les autres conditions limites sont de type flux nul.

Les calculs sont effectués en régime permanent, négligeant les effets de changement climatique passés ou d'éventuels effets transitoires dans les sédiments. Les calculs sont effectués avec le code FRACTure (Kohl et Hopkirk, 1995), qui permet de résoudre les équations de transfert de chaleur et d'écoulement dans un maillage non structuré.

Les meilleurs résultats obtenus avec les données thermiques de puits (Genter *et al.*, 2003) ont été obtenus avec des valeurs réalistes de conductivité thermique (entre 2 W·m⁻¹·K⁻¹ et 3 W·m⁻¹·K⁻¹). Ces valeurs sont très proches de ce qui a été dérivé de l'analyse d'échantillons (Dagallier, 2004 ; Genter *et al.*, 2004 et tabl. 1). Les températures sont alors calculées dans le modèle numérique en 3D, puis extraites au toit des aquifères qui représentent potentiellement des cibles pour une exploitation géothermique (fig. 9).

4.3.3. Etape 3 - Calcul du potentiel géothermique

L'énergie géothermique totale disponible est calculée et cartographiée pour chaque réservoir géothermique potentiel S1-DET, S2-DET et S3-DET (figs. 6, 7 et 9), avec les paramètres suivants² :

- épaisseur et extension de l'aquifère, dérivées du modèle géologique,
- distribution en température dérivée du modèle numérique.

Cette énergie totale disponible n'est pas entièrement exploitable. Le potentiel géothermique est alors défini par la quantité d'énergie récupérable du réservoir. Le facteur de recouvrement est défini comme le ratio entre l'énergie récupérable et l'énergie disponible. Dans cette étude, un facteur de 33 % est supposé afin de calculer le potentiel géothermique de chaque aquifère. En effet, ce facteur varie en réalité en fonction de la porosité et de la conductivité hydraulique de l'aquifère, mais des travaux précédemment effectués dans ce domaine (Jung *et al.*, 2002) ont montré qu'une valeur de 33 % peut être considérée comme réaliste pour un réservoir poreux (alors qu'il tend vers 5% pour un réservoir fracturé).

Le potentiel géothermique a été calculé pour chaque réservoir clastique tertiaire, à savoir S1-DET, S2-DET et S3-DET (figs. 10 et 11)

² A noter que l'ensemble des paramètres de calcul retenus pour l'évaluation du Fossé de Limagne sont les mêmes que ceux utilisés pour l'évaluation du potentiel des autres bassins sédimentaires français (Dezayes *et al.*, 2007 ; Jorand et Bouchot, 2008 ; Bouchot *et al.*, 2008)

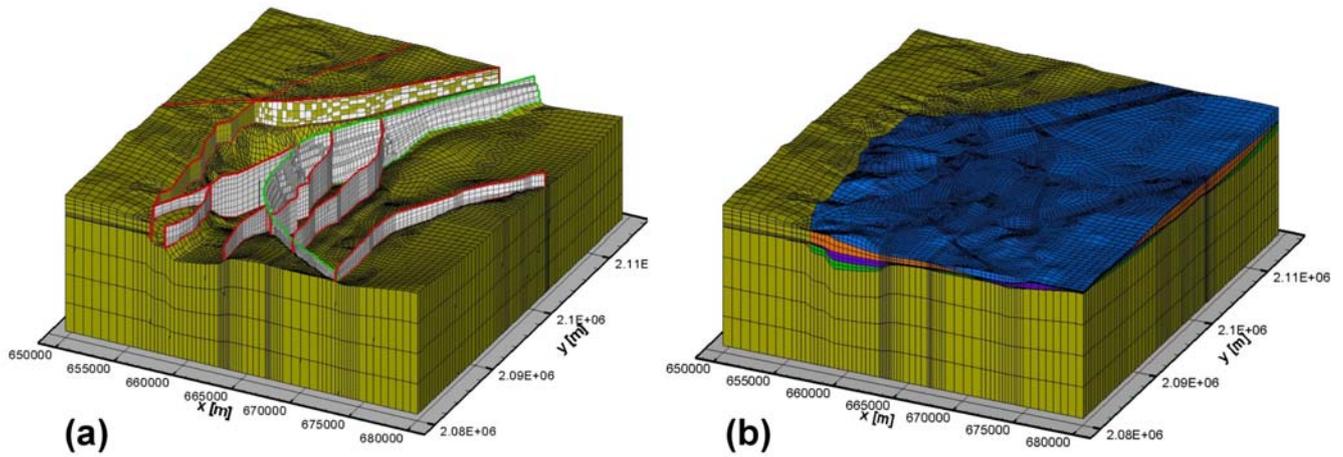


Figure 8 : Vues du maillage éléments finis obtenues par adaptation du modèle géologique (Baujard et Kohl, 2007). (a) Vue 3D du socle et des failles, (b) Vue 3D du socle et des formations S1 à S4 (de bas en haut).

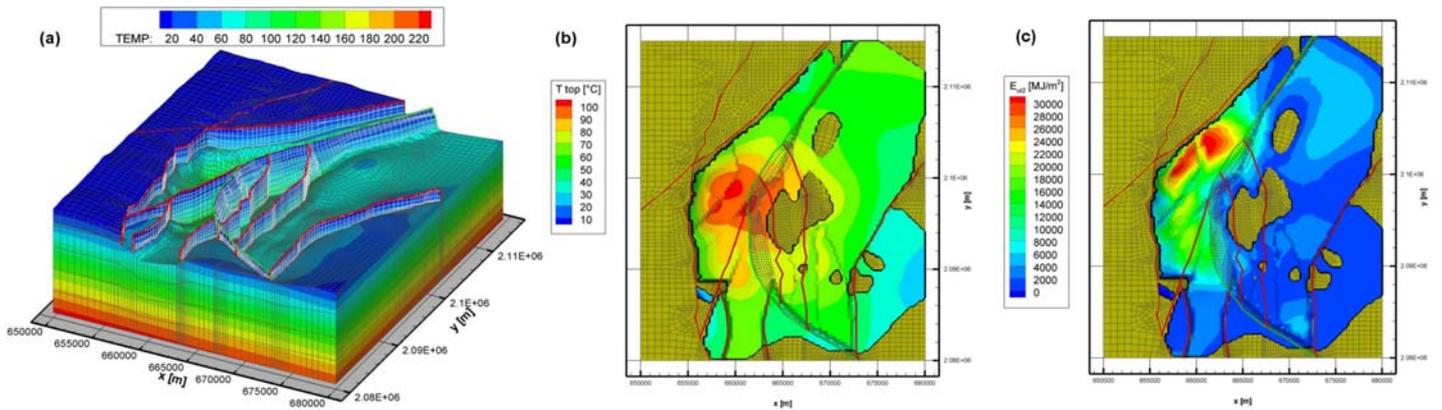


Figure 9 : Température calculée avec le modèle numérique et calcul du potentiel géothermique (Baujard et Kohl, 2007 modifié). (a) Distribution de la température en 3D dans le socle et les fractures, (b) Température extraite au toit de l'aquifère S1-DET ; (c) Potentiel géothermique (= chaleur exploitable E_{ut} exprimée en MJ/m^2) calculé dans le réservoir inférieur S1-DET.

Formation	Permeability (mD)	Porosity (%)	Density (bulk) (kg/m ³)
S4	0.61	31	1.84
	0.46	41	1.48
Mean values for S4	0.53	36	1.66
S3	0.07	28	1.94
	0.38	27	1.89
	0.20	30	1.87
	0.06	30	1.82
	/	10	2.04 (*)
Mean values for S3	0.07 AND 0.30 (**)	29	1.88
S3DET	0.02	16	2.22
	0.15	5	2.47
	/	7	2.44
	635	22	2.05
	1130	20	2.09
Mean values for S3DET 900 AND 0.08 (**)	14	2.25	
S2	0.31	10	2.43
	/	16	2.31
	0.66	21	2.17
	5.8	34	1.80 (*)
	0.43	31	1.86 (*)
	0.09	24	2.05
	0.69	27	1.93
	0.02	20	2.23
S2MIX	0.04	22	2.06
	0.02	11	2.40
	0.10	15	2.31
	0.10	15	2.30
Mean values for S2+S2MIX 0.06 AND 0.55 (**)	18	2.21	
Formation	Permeability (mD)	Porosity (%)	Density (bulk) (kg/m³)
S2DET	0.45	10	2.41
S1DET	0.08	10	2.34
S1MIX	0.02	15	2.29

Tableau 1 - Paramètres pétrophysiques mesurés sur les réservoirs clastiques tertiaires du Bassin de Limagne (Dagallier, 2004 ; Genter et al., 2004).

(*) Échantillons exclus du calcul de moyenne.

4.4. INTERPRETATION DES RESULTATS

Cette étude met clairement en évidence le fait que le réservoir lutétien S1-DET, situé à la base du bassin, constitue la cible la plus intéressante en vue d'une exploitation géothermique (fig. 10).

A l'échelle du secteur évalué, qui couvre une aire de 1050 km², la bordure ouest et nord-ouest du fossé offre le potentiel géothermique le plus prometteur avec des valeurs comprises entre 10 et 30 GJ/m², ce qui correspond aux ordres de grandeur du potentiel du Buntsandstein de la partie nord du Fossé rhénan (Dezayes *et al.*, 2007). Le réservoir lutétien y est à la fois le plus profond (jusqu'à - 1200 m d'altitude), le plus chaud (jusqu'à 100°C) et le plus épais (jusqu'à 1000 m) du secteur étudié. A noter que le pic de température (et de profondeur maximale du réservoir) est légèrement décalé vers le sud par rapport aux épaisseurs maximales du réservoir (fig. 10).

Dans le détail, la cible la plus favorable du réservoir S1-DET (20 à 30 GJ/m²), orientée NE-SW, se situe à l'aplomb de la ville de Châtelguyon. Cette zone se caractérise par une épaisseur du réservoir comprise entre 700 et 1000 m, pour une température comprise entre 70 et 100°C, à une profondeur de 1000 à 1500 m (figs. 7B, 10D et 10E).

En allant vers le sud de cette cible, le potentiel décroît progressivement compte tenu d'une diminution de l'épaisseur du réservoir et de sa profondeur mais demeure élevé (> 10 GJ/m²). En revanche, à l'extrême sud de la zone étudiée, l'agglomération de Clermont-Ferrand se situe à l'aplomb d'une partie du réservoir S1-DET caractérisé par un potentiel inférieur à 4 GJ/m².

A propos des deux autres réservoirs clastiques (S2-DET et S3-DET, fig. 11), bien que les potentiels géothermiques décroissent en remontant dans la pile lithologique, celui du réservoir S2-DET demeure élevé (5 à 15 GJ/m²) avec un pic, à l'est de Volvic, alors que le réservoir supérieur (S3-DET) affiche un potentiel inférieur à 5 GJ/m².

Par ailleurs, il apparaît que l'aquifère lutétien S1-DET est, localement connecté spatialement à l'aquifère sus-jacent S2-DET, ce qui confère au réservoir S1-S2-DET une épaisseur cumulée considérable (~1200 m, fig. 7B) et prometteuse pour la géothermie. A cet égard, les aquifères S2-DET (0,45 mD en moyenne) et surtout S3-DET (jusqu'à 1130 mD) montrent de meilleures perméabilités que celles du réservoir S1-DET (0,08 mD en moyenne, tabl. 1).

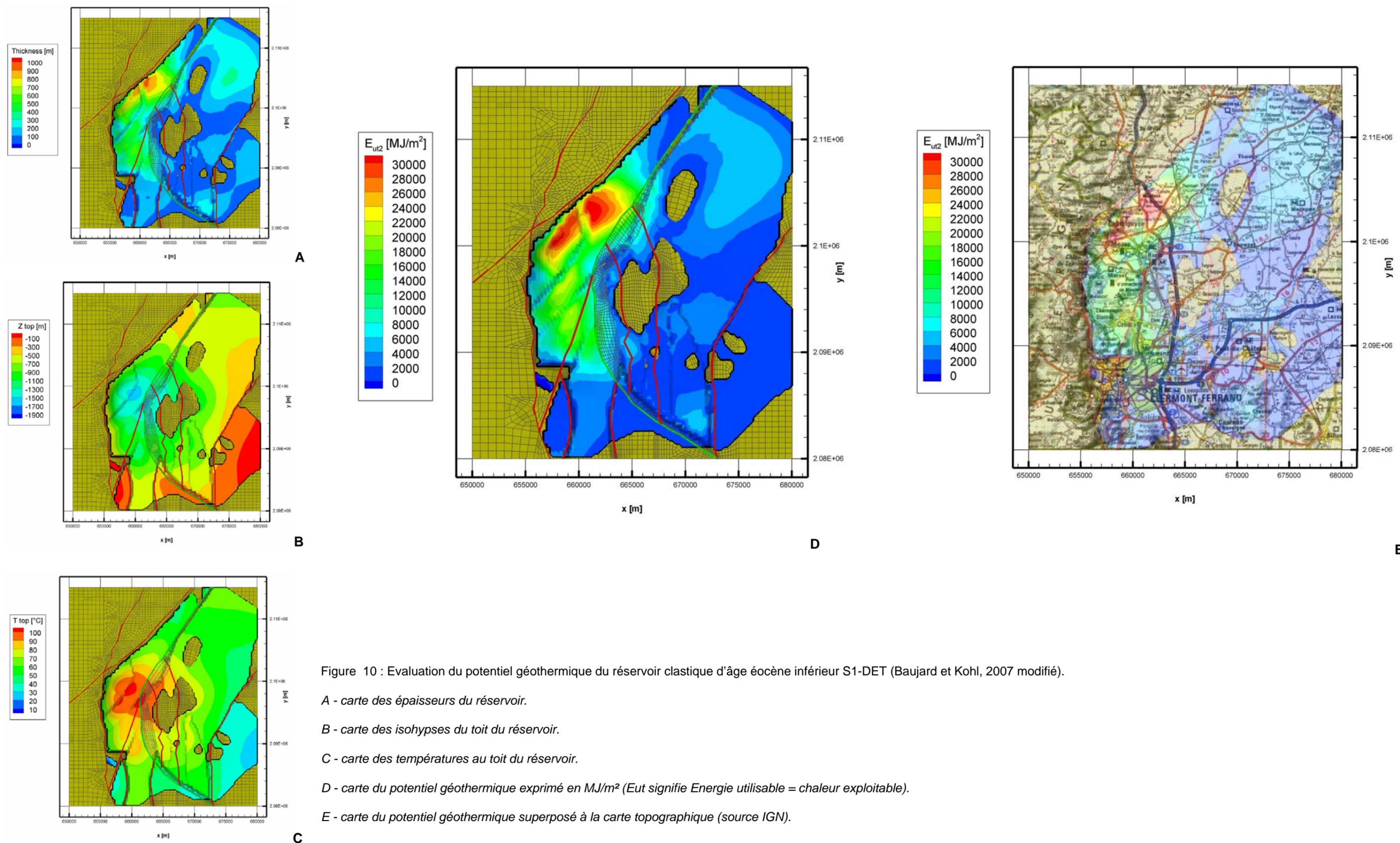


Figure 10 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique d'âge éocène inférieur S1-DET (Baujard et Kohl, 2007 modifié).

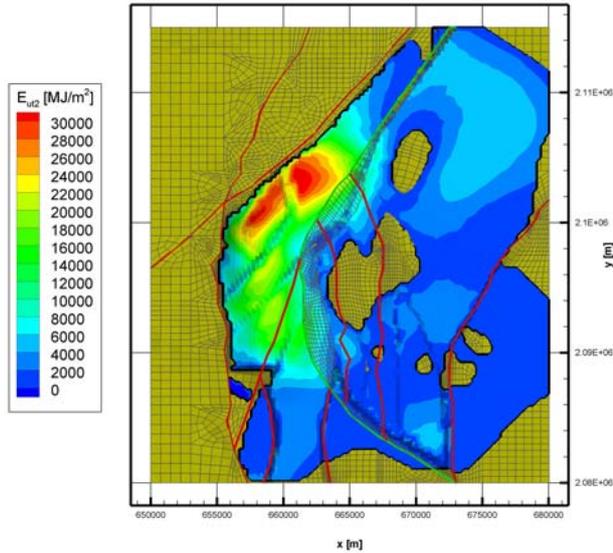
A - carte des épaisseurs du réservoir.

B - carte des isohypses du toit du réservoir.

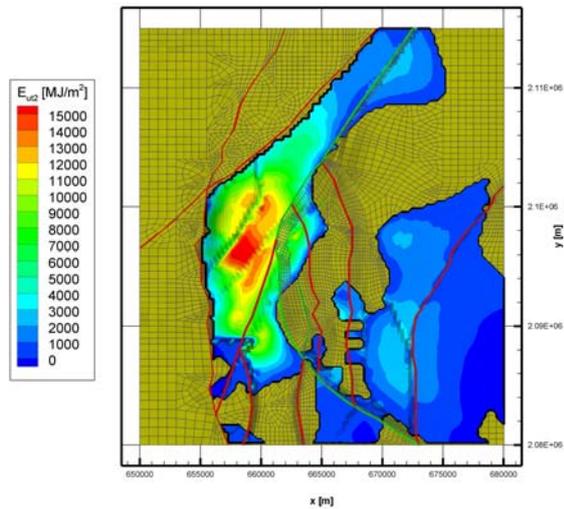
C - carte des températures au toit du réservoir.

D - carte du potentiel géothermique exprimé en MJ/m² (E_{ut} signifie Energie utilisable = chaleur exploitable).

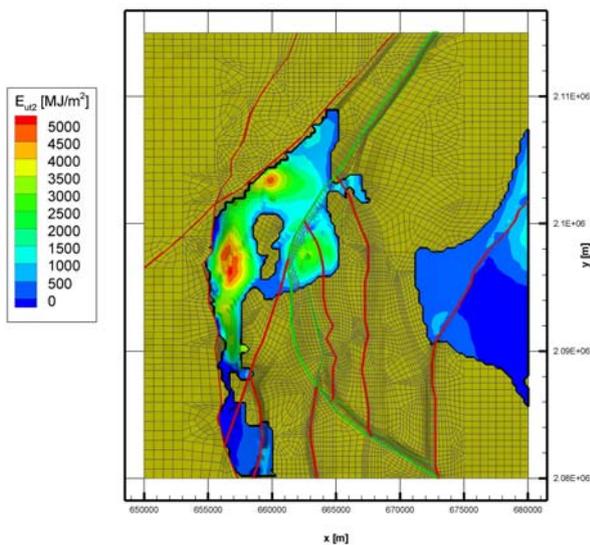
E - carte du potentiel géothermique superposé à la carte topographique (source IGN).



A - carte du potentiel géothermique du réservoir clastique S1-DET d'âge éocène inférieur.



B - carte du potentiel géothermique du réservoir clastique S2-DET d'âge éocène supérieur.



C - carte du potentiel géothermique du réservoir clastique S3-DET d'âge oligocène inférieur.

Figure 11 : Evaluation quantitative du potentiel géothermique des trois réservoirs clastiques du Fossé de la Limagne. (Baujard et Kohl, 2007 modifié). E_u signifie Energie utilisable, exprimée en MJ/m² (= chaleur exploitable)

4.5. PERSPECTIVES «GEOOTHERMIE DU FOSSE DE LA LIMAGNE »

Une approche intégrée, allant du modèle géologique jusqu'à la cartographie du potentiel calculé, a permis d'estimer le potentiel géothermique de la région étudiée.

En termes de réservoirs, les formations clastiques d'âge éocène (fig. 6) offrent des potentiels géothermiques prometteurs : jusqu'à 30 GJ/m² pour le S1-DET et jusqu'à 15 GJ/m² pour le S2-DET. On recommande notamment de focaliser l'attention sur la cible la plus favorable du réservoir S1-DET centrée sur la commune de Châtelguyon (20 à 30 GJ/m²) mais aussi plus globalement sur la partie occidentale du Fossé de Limagne (> 10 GJ/m²). En revanche, l'agglomération de Clermont-Ferrand apparaît dans une zone moins favorable à l'échelle du Fossé.

D'autre part, sachant que les mesures de perméabilité de matrice du réservoir S1-DET (Dagallier, 2004 ; tabl. 1) sont faibles (0,08 mD en moyenne) et que ce paramètre pétrophysique n'est pris en compte qu'indirectement dans le calcul du potentiel géothermique, il convient de relativiser l'estimation du potentiel calculé. Toutefois, la localisation de la zone potentielle, à proximité immédiate de failles bordières occidentales du Fossé, apparaît favorable à la géothermie. En effet, la fracturation du réservoir associée à ces failles bordières pourrait engendrer une perméabilité de fracture et de fait, augmenter considérablement la productivité du réservoir. Pour obtenir une estimation plus réaliste du potentiel du réservoir S1-DET, on recommande donc de prendre en compte les perméabilités matricielles et de fracture des réservoirs clastiques dans le calcul.

D'autre part, compte tenu du fait que les zones favorables des réservoirs S2-DET et S3-DET sont superposées, voire connectées (figs. 7 et 11) au S1-DET, et que ces réservoirs supérieurs offrent de meilleurs paramètres pétrophysiques que ceux du réservoir S1-DET, on recommande d'aborder la question du potentiel du fossé en termes de multi-réservoirs, en envisageant le cas échéant des forages qui recoupent les réservoirs S1, S2 et S3 DET sur une même verticale.

Enfin, une étude hydrogéologique serait nécessaire pour estimer le contexte hydraulique en profondeur. Celui-ci pourrait être, ensuite, pris en compte dans une simulation couplée thermique-hydraulique afin d'affiner les résultats du modèle thermique. Le code "FRACTure" (Kohl et Hopkirk, 1995), qui a été utilisé dans cette étude pour la simulation thermique, permet ce couplage. Pour ce faire, une collaboration avec GEOWATT AG est recommandée.

Pour conclure, il est important de signaler l'attribution d'un permis exclusif d'explorer (PER) d'une durée de 5 ans à la société GEOPETROL SA (Arrêté du 9 juillet 2008 paru au Journal Officiel). Ce PER s'appuie en grande partie sur les résultats des travaux de recherche du BRGM, cofinancés par L'ADEME depuis 2002, ayant permis une réactualisation du potentiel géothermique de la France (Projets COPGEN puis CLASTIQ). Pour mieux comprendre ces réservoirs profonds, on recommande, en conséquence, que des études scientifiques (terrain, forage, modélisation) puissent être associées aux futures campagnes d'exploration géothermique du Fossé.

4.6. RAPPORT, COMMUNICATIONS A CONGRES ET PUBLICATION

Cette étude, réalisée en 2007, a fait l'objet d'un rapport technique de GEOWATT AG et d'une synthèse présentée dans ce rapport final. Elle a été valorisée en 2008 à travers quatre communications à congrès et un résumé étendu.

Rapport technique :

Baujard, C., Kohl, T., 2007. Limagne Temperature Simulation and Resource Analysis, rapport technique GEOWATT AG, 40 p

Communications à congrès :

Baujard C., Kohl T., Calcagno P., Guillou-Frottier L., 2008. 3D Temperature numerical computation based on geological model to quantify geothermal energy in a reservoir: The Limagne case-study (French Massif Central). From Calcagno P. & Sliupa S. (eds.), Proceedings of the Engine Final Conference, 12-15 February 2008, Vilnius, Lithuania. ISBN 978-2-7159-2993-7. Orleans, BRGM Editions. Collection Actes/Proceedings. ISSN 1773-6161.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Kohl T., Courrioux G., Guillou-Frottier L., Genter A., 2008. The Limagne geothermal reservoir (France): from 3D geological model to potential assessment. 33rd International Geological Congress, 06-14 August, Oslo, Norway.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Guillou-Frottier, Genter A., Kohl T., Courrioux G., 2008. 3D Geological modelling and geothermal assessment of the Limagne basin (France). GeoMod2008 Firenze, 22-24 September.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Kohl T., Courrioux G., Guillou-Frottier L., Genter A., 2008. The Limagne geothermal reservoir (France): from 3D geological model to potential assessment. AGEG workshop, 05-06 August 2008, Adelaide, Australia.

Résumé étendu :

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Guillou-Frottier, Genter A., Kohl T., Courrioux G. (sous presse). 3D Geological modelling and geothermal assessment of the Limagne basin (France). Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata (volume 49, n. 2 supplement).

Publication :

A noter, enfin, qu'en termes de valorisation du projet COPGEN, un article a été publié à Applied Geochemistry.

Millot.R., Negrel.P., Petelet-Giraud.E., 2007. Multi-isotopic (Li, B, Sr, Nd) approach for geothermal reservoir characterization in the Limagne Basin (Massif Central, France). Applied Geochemistry, Vol. 22, issue 11, p. 2307-2325

5. Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris

Ce chapitre constitue la synthèse du rapport technique de Bouchot *et al.* (2008).

5.1. EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

5.1.1. Objectif et méthodologie

Compte tenu de son extension, le Bassin de Paris, de type intracontinental, constitue une cible privilégiée pour la géothermie de type basse à moyenne température, dont les réservoirs clastiques profonds sont situés dans le Trias.

L'objectif de cette étude est d'évaluer quantitativement le potentiel géothermique des formations argilo-gréseuses profondes du Trias, à l'échelle du Bassin de Paris, à travers une caractérisation actualisée des réservoirs clastiques, de leur géométrie et de leur température. Ces formations sont situées à des profondeurs où règnent des températures élevées (> 60°C) pouvant atteindre 125°C. Outre la production de chaleur, de telles températures pourraient permettre la production d'électricité par cycle binaire.

Au cas où les ressources géothermales de type Dogger deviendraient insuffisantes à l'horizon 2020, il faut être en mesure de déterminer si les réservoirs clastiques du Trias peuvent être une alternative aux réservoirs carbonatés du Dogger. De fait, une attention particulière a été portée sur la région Ile de France, où les besoins énergétiques sont majeurs.

Pour atteindre notre objectif, quatre étapes méthodologiques ont été menées successivement :

- Etape 1 - Sélection de 5 réservoirs clastiques profonds à estimer ; à savoir les formations des Grés de Donnemarie, de Sainte Colombe-Voulzie, de Chaunoy, de Boissy et du Rhétien marin. Ces réservoirs argilo-gréseux appartiennent au Trias du Bassin de Paris, et pour certains d'entre eux sont situés sous les zones actuellement exploitées du Dogger (région Ile de France) ;
- Etape 2 - Compilation des données publiques extraites des logs de forages pétroliers et des cartes de géométrie des réservoirs réalisées récemment par l'IFP (Delmas *et al.*, 2002) en vue de caractériser la géométrie et la température des cinq réservoirs sélectionnés. A cette occasion un état de l'art a notamment permis de faire une description des réservoirs clastiques du Trias, en détaillant leur contexte sédimentologique et leurs principaux paramètres pétrophysiques (tabl. 2) ;

- Etape 3 - Réalisation des cartes de profondeur (isohypse), d'épaisseur (isopaque) et de température pour chacun des réservoirs sélectionnés, à partir de cartes existantes de l'IFP (Delmas *et al.*, 2002), des connaissances litho-stratigraphiques du Trias et de l'interpolation des données de températures extraites des forages pétroliers et géothermiques ;
- Etape 4 - Evaluation quantitative du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) de chacun des réservoirs clastiques sélectionnés via la combinaison des données géométriques et thermiques, à l'échelle régionale et avec une attention particulière sous les zones d'exploitation géothermique du Dogger en région Ile de France. La dernière évaluation date des années 1980 (Haenel, 1989).

5.1.2. Interprétation des résultats

En comparant les évaluations quantitatives des potentiels géothermiques des cinq réservoirs clastiques étudiés (fig.s 12, 13, 14 et tabl. 2), on constate que les réservoirs les plus favorables sont par ordre d'importance :

1. Les Grès de Donnemarie (Muschelkalk et Keuper inférieur, Anisien à Carnien), avec un vaste potentiel atteignant 25 GJ/m² dans la région de Nogent-sur Seine - Sézanne – Epernay (Brie et Champagne), et ce, compte tenu d'une épaisseur remarquable du réservoir clastique comprise entre 250 et 450m. La partie supérieure du réservoir, la plus accessible, possède les meilleures propriétés pétrophysiques de l'ensemble du réservoir « Grès de Donnemarie » (fig. 12) ;
2. Les Grès de Chaunoy (Keuper moyen et supérieur, Rhétien), avec un potentiel maximal atteignant 7,7 GJ/m² dans la région de Château-Thierry, compte tenu d'une bonne corrélation entre épaisseur et profondeur du réservoir. Les propriétés pétrophysiques du réservoir y sont réputées correctes en moyenne (porosité de 12,5%, perméabilité de 360 mD) mais très variable (fig. 13) ;
3. Les Grès continentaux de Boissy (Keuper supérieur, Rhétien), dont le potentiel maximum atteint 4 GJ/m² dans la région située entre Compiègne et Epernay. Le potentiel est modeste mais apparaît intéressant dans la mesure où le réservoir de Boissy est grossièrement superposé à celui de Chaunoy, plus favorable. Les propriétés pétrophysiques du réservoir sont méconnues (fig. 14) ;
4. Les Grès de Sainte Colombe-Voulzie (Keuper moyen, Carnien), et les Grès du Rhétien marin (Keuper supérieur, Rhétien), dont les potentiels maximum avoisinent respectivement les 3 et 2 GJ/m² entre Brie et Champagne. Alors que le réservoir de Sainte Colombe-Voulzie possède des propriétés pétrophysique médiocres, celles du Rhétien marin sont réputées satisfaisantes mais le réservoir demeure très peu épais (fig. 14).

A l'échelle du bassin, quand on cumule, par addition, le potentiel des différents réservoirs triasiques étagés, on constate que la cible Brie-Champagne, centrées sur Sézanne et incluant les villes de Meaux, Epernay, Nogent-sur-Seine, offre le meilleur potentiel géothermique cumulé (35 GJ/m² au maximum, fig. 15). En effet, cette partie du Bassin de Paris correspond aux principales zones de dépôt-centre des sédiments clastiques où les profondeurs maximales sont comprises entre 2000 à 2850 m ; en outre, ces zones profondes sont souvent superposées (ou légèrement décalées par rapport) aux zones de sédimentation les plus épaisses. Au sud de la région Ile de France, la zone centrée sur Salbris et s'étendant à l'est d'Orléans constitue une cible secondaire dont le potentiel géothermique cumulé est compris entre 7 et 12 GJ/m² (fig. 15A).

En focalisant notre attention sur la région Ile de France, siège de l'exploitation géothermique actuelle (fig. 15C), on montre que :

- si on considère l'estimation du potentiel géothermique pour chacun des réservoirs clastiques du Trias situés sous la zone d'exploitation du Dogger, on constate que i) le potentiel varie d'un réservoir élémentaire à l'autre et ii) pour un même réservoir, ce potentiel augmente systématiquement en allant vers l'est et le sud-est (tabl. 3). Situés dans la partie orientale de l'Ile de France, les réservoirs triasiques les plus prometteurs sont ceux de Donnemarie (5 à 8 GJ/m²) et de Chaunoy (~4 GJ/m²), alors qu'entre Cergy et Chelles (zone centrale), le potentiel respectif des réservoirs présents (Chaunoy, Donnemarie et Boissy) est inférieur à 2 GJ/m², à l'exception de Chaunoy qui atteint localement 2,5 GJ/m². A titre de comparaison, Haenel, (1989) a estimé le potentiel du Dogger exploité entre 2,5 et 5 GJ/m².
- Si on additionne les potentiels de chacun des réservoirs élémentaires du Trias, situés sous la zone d'exploitation du Dogger, le potentiel cumulé varie entre 2 et 6 GJ/m² dans la zone centrale et atteint les 12 GJ/m² dans la région de Meaux et Coulommiers (tabl. 3). Cette zone orientale constitue en fait la couronne occidentale de la cible Brie-Champagne (12 à 35 GJ/m²). Ainsi, parmi les doublets existants, les sites de Meaux et de Coulommiers (et Melun dans une moindre mesure) apparaissent comme les réservoirs triasiques les plus favorables à une exploitation géothermale sous le Dogger de la région Ile de France.

Ce potentiel cumulé des réservoirs triasiques, intéressant à titre de comparaison avec les estimations faites par Haenel (1989), doit être considéré avec prudence car les réservoirs élémentaires (e.g. Boissy, Donnemarie, Chaunoy) du Trias ne sont pas connectés entre eux (tabl. 2) et de fait, le Trias ne peut pas être considéré comme un réservoir unique. En revanche, si l'exploitation de plusieurs réservoirs étagés est envisagée pour un même doublet, ce potentiel cumulé doit pouvoir être pris en compte.

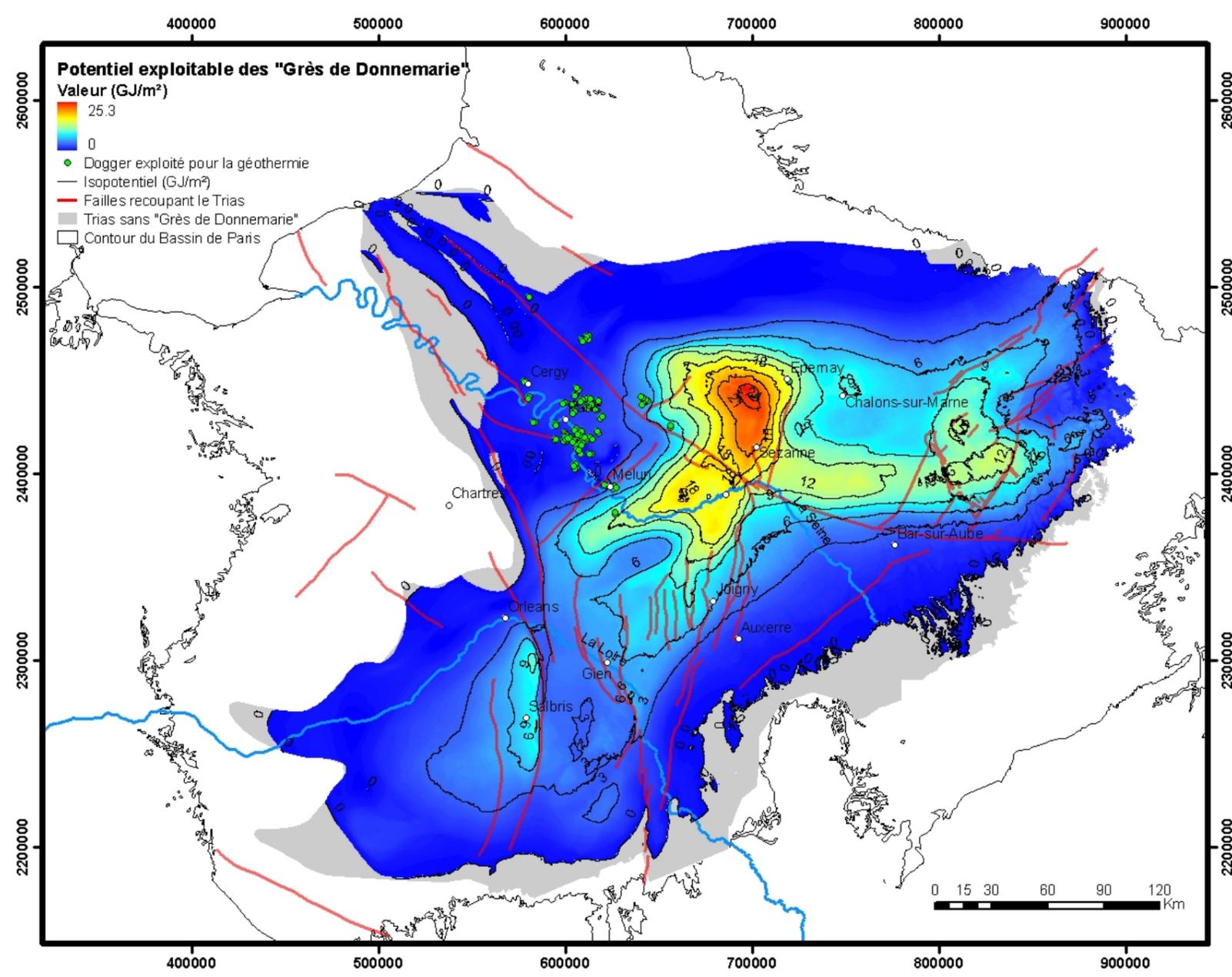
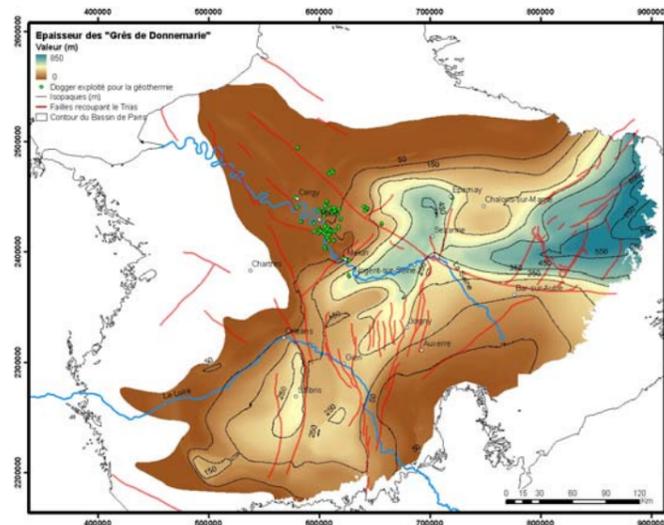
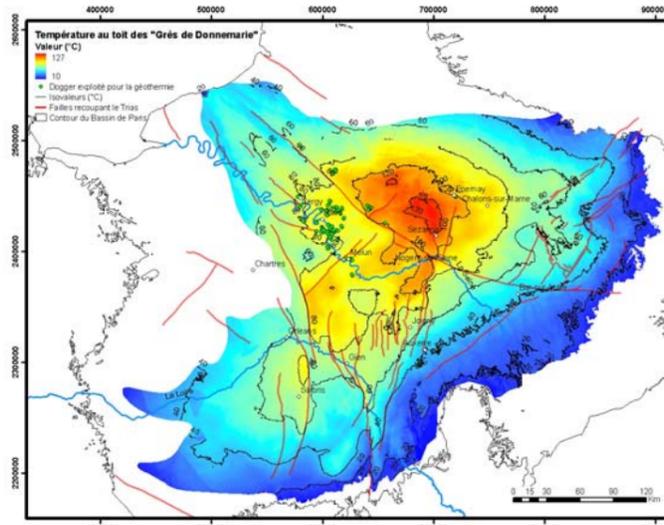
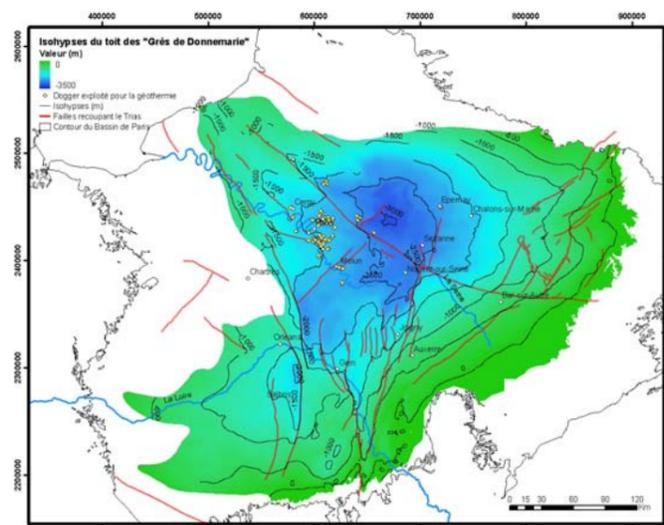
Formation	âge stratigraphique présumé	équivalent latéraux	extension géographique	milieu de dépôt et description sédimentologique
Couverture : Marnes du Lias	Héttangien (Lias, Jurassique)			marin ouvert, dépôts marins argilo-calcaires
Argiles de Levallois	Rhétien (Keuper sup.)		top du réservoir Rhétien marin. Marque la régression globale sur le bassin de Paris	continental, argiles vertes, pyriteuses, indurées
Grès du Rhétien marin	Rhétien (Keuper sup.)	Faciès diachrone, avec intercalation croissante, du NE vers le SW, des Argiles de Levallois	bras de mer transgressif (indiqué par les isopaques orientés selon des chenaux étroits) recouvrant la partie Est du Bassin de Paris, jusqu'à la Seine-et-Marne (Brie + Champagne). Il s'agit donc d'un faciès diachrone Apports provenant du Luxembourg	grès littoraux fins à moyens, à intercalations d'argiles silteuses noires, cimentation locale de dolomie ou de silice. Evolution diachrone des dépôts dolomitiques côtiers (Marnes Irisées Supérieures, M.I.S.) de type sebkha vers des dépôts d'environnement marin fermé
Grès de Boissy		Les Grès de Boissy et les Argiles de Châlain sont corrélés latéralement au Rhétien marin	Présents à l'Ouest et au Sud du bassin seulement : essentiellement les secteurs d'Orléans/Châteauroux, et Tours-Bourges, jusqu'à Paris et la région à l'Est de Paris, selon une gouttière NW/SE centrée sur Compiègne	continental. Chenaux gréseux isolés caractéristiques
Argiles de Châlain ou Marnes Irisées Supérieures	Keuper sup.	Marnes Irisées Supérieures	de Montereau à Château-Thierry jusqu'à la Lorraine, Elles s'enrichissent en argile du NE au SW	dépôts argileux de sebkhas côtières, marnes rouges à anhydrite et grès dolomitiques
Dolomie de Vert-le-Grand (partie supérieure du réservoir du Rhétien marin)				continental : dépôts fluviatiles dolomités et paléosol dolomitique (dolocrète) majeur constituant un banc repère très important qui coiffe le réservoir de Chaunoy.
Grès de Chaunoy "Corps fluviatile supérieur"	Keuper moyen Norien	Le passage latéral aux Marnes Irisées Supérieures (M.I.S.) se situe sur une ligne Melun-Argenteuil Les Grès de Chaunoy sont l'équivalent latéral à l'Ouest des M.I.S.	dépôt dans l'extrémité occidentale du Bassin de Paris, à l'Est et au NE de Melun Piège anticlinal faillé de direction NE-SW, d'une largeur moyenne de 100 km environ, fermé le long de la faille centrale d'orientation SSW-NNE	A l'Est et dans la partie centrale, dépôts marnes à anhydrite/ vers l'Ouest, dépôts fluviatiles en tresse et dépôts lacustres alternances argilo-gréseuses (1-5 m), à ciment de dolomie ou d'anhydrite
Argiles de Chanville ou M.I.S (base)		ou base des Marnes Irisées Supérieures (M.I.S.)		Dépôt lacustre ou de plaine côtière de type tidal-flat ("vasière") argiles rouges, blanches à la base, intercalées de bancs d'anhydrite
Dolomie de Beaumont	Carnien	ou base des Marnes Irisées Supérieures (M.I.S.)		Dépôt de plaine côtière de type tidal-flat ("vasière"), ou lacustre, marquant la transgression marine argile noire ou rouge, silteuse, micacée, anhydritique, à débris de plantes et concrétions de fer, surmontée par 1 m de dolomie
Grès de Sainte Colombe-Voulzie à l'Ouest / Grès à Roseaux à l'Est	Keuper moyen Carnien moyen	appelés Grès à Roseaux en Lorraine (fragments d'Equisétales) équivalent latéral des "Couches à Esthéries" (crustacés)	très faible extension géographique : étroite gouttière dissymétrique orientée NNE-SSO, d'environ 120 km de long et d'environ 20 km de large au SW (environs de Provins, Nogent/Seine) et de 30 km au NE (environs d'Épernay)	Ste Colombe : grès lacustres ou deltaïques, feldspathiques à ciment d'argile et d'anhydrite, à intercalations d'argiles silteuses et pyriteuses noires, à débris végétaux
Couches à Esthéries ou M.I.M.	Carnien	encore appelées Marnes Irisées Moyennes (M.I.M.), équivalent latéral des Grès de Sainte Colombe-Voulzie	à la base : surface d'incision régionale	Environnement lacustre ou saumâtre, vasière marnes et argiles gris-verdâtres à noires, souvent feuilletées, à intercalations de dolomie et de grès
Marnes Irisées Inférieures et/ou Formation salifère	Carnien	Formation salifère	Marnes à anhydrite à l'Est et Formation salifère à l'Ouest : migration vers l'Ouest des dépôts de sebkhas côtiers halitiques. Cette formation est érodée vers l'Ouest où elle est remplacée par les Grès de Ste Colombe ou les Grès de Chaunoy	dépôts continentaux de plaine côtière, laguno-lacustres et évaporitiques (anhydrite) sulfatée marnes versicolores à anhydrite massive rose à banche, associée à une formation salifère composée de 7 faisceaux de halite intercalés dans les argiles à Esthéries
Grès de Donnemarie ou "corps fluviatile inférieur" dont:				Milieu fluviatile (réseau en tresse), en contexte évaporitique. Apports clastiques proviennent du Massif Armoricain et du Massif Central
Grès de Donnemarie supérieurs	Anisien à Ladinien sup. (base du Keuper moyen)	Est du bassin : Lettenkhole Le passage latéral de faciès s'effectue au niveau d'une limite N/S Sézanne/Tonnerre	Zone centrale du bassin, de Soissons (au Nord) à Châteauroux (au Sud) et de Paris (à l'Ouest) à Sézanne (à l'Est). Couvre le Sologne, l'Est de la Beauce, une partie de la Brie et de la Champagne A l'Ouest de la faille de Saint-Martin-de-Bossenay	6 bancs de grès fins à moyens, localement conglomératiques, de 1 à 4 m d'épaisseur, avec des intercalations d'argiles bariolées
Grès de Donnemarie médians	Le toit est défini comme le premier banc de grès diachrone, de plus en plus récent d'Est en Ouest	Est du bassin : Muschelkalk		grès rouges, moyens à grossiers, légèrement feldspathiques, à ciment anhydritique et liant argileux, en bancs métriques à plurimétriques, à intercalations d'argiles rouges sablo-silteuses, anhydritiques. Chenaux en tresse
Grès de Donnemarie inférieurs		Est du bassin : Muschelkalk, Grès de 3 Fontaines. Remarque : les "Grès de base" correspondent aux Grès du Buntsandstein		grès roses, en bancs métriques, séparés par des niveaux fins (10-30 cm) d'argiles vertes lustrées, silteuses

Formation	épaisseur (m)	salinité	PHI matrice	K matrice
Couverture : Marnes du Lias	300-400			
Argiles de Levallois	3-7 (faible)			
Grès du Rhétien marin	Gamme : 11-38 m; moyenne = 30 m ; maximum 40 m épaisseur décroissante vers le SW : 12-15 m		RFS : 105 valeurs relevées. gamme : 0,1 -29 % moyenne min. = 7 % moyenne max = 13,8 % moyenne générale = 10,3 %	69 valeurs, gamme : 0 - 2500 mD moyenne des valeurs min. = 26,3 mD moyenne des valeurs max = 157 mD
Grès de Boissy	70-90 m dans les zones de dépôts-centres 30 m le long de la faille de la Seine	2 valeurs (mesurées) : 60 (à 2032 m) et 75 g/l (à 2455 m)	RFS : 15 puits recensés, 7 valeurs de Phi, de 1909 à 2465 m. gamme : 6-18,5 % moyenne = 13,5 %	gamme : 0,33 - 2113 mD moyenne des valeurs min = 21 mD moyenne des valeurs max = 874 mD
Argiles de Châlain ou Marnes Irisées Supérieures	moins de 50 m en moyenne		RFS : 2 valeurs relevées, Chailly en Bière 101, phi = 14,5 % et Vert-de-Grand 9D, phi = 15,5 %	Chailly en Bière 101, K = 30 mD Non renseigné pour Vert le Grand 9D
Dolomie de Vert-le-Grand (partie supérieure du réservoir du Rhétien marin)	29 m (épaisseur nette de dolomie = 18 m)		moyenne = 12,6 %	K moy = 15 - 200 mD (valeurs max dues à la fracturation)
Grès de Chaunoy "Corps fluviatile supérieur"	Décroit vers l'Est où s'intercalent de plus en plus les M.I.S., en alternances métriques à plurimétriques épaisseur totale = 0-68 m épaisseur utile = 0-25 m	RFS : 26 valeurs; de 0,23 à 190 g/l moyenne min = 66 g/l moyenne max = 71,4 g/l moyenne globale = 68,5 g/l	RFS : 335 puits dont 120 avec des valeurs, gamme : 0,1 - 29,6 % moyenne = 12,5 %	RFS : 27 valeurs de K sur 335 puits, gamme : 0-2518 mD moyenne des valeurs min = 112 mD moyenne des valeurs max = 601 mD
Argiles de Chanville ou M.I.S (base)	14-15 m			
Dolomie de Beaumont	4-5 m en moyenne ~ 10 m maxi.			
Grès de Sainte-Colombe- Voulzie à l'Ouest / Grès à Roseaux à l'Est	moyenne = 15 m ~ 40 m maxi.	312 g/l de 2881 à 2890 (Courgivaux 1) ; 160 g/l de 2751,5 à 2781 m (Leudon) ; 26,6g/l de (Blancafort 1)	RFS : 10 valeurs, gamme : 2-25 % moyenne min. = 9,4 %; moyenne max = 14,4 %; moyenne globale = 11,9 %	RFS, gamme : 0,01-500 mD moyenne des valeurs min = 147 mD moyenne des valeurs max = 148 mD
Couches à Esthéries ou M.I.M.				
Marnes Irisées Inférieures et/ou Formation salifère	250 m			
Grès de Donnemarie ou "corps fluviatile inférieur" dont:	réservoir multicouches de 100 à 300 m d'épaisseur	RFS : 17 valeurs, de 0,28 -180 g/l	RFS : 44 valeurs, gamme : 0-30 % moyenne min. = 8,5%; moyenne max. = 14 % ; moyenne globale = 11,2 %	RFS : 19 valeurs, gamme : 0,01-1356 mD moyenne min = 56,5 mD ; moyenne max. = 212,4mD ; moyenne globale = 134mD
Grès de Donnemarie supérieurs	14-34 m		Gamme : 1-18 %, moyenne 4-5 %	en général : < 10 mD mais localement jusqu'à 1 D pour les Grès de Donnemarie supérieurs, K = 1D
Grès de Donnemarie médians	6-28 m	60-200 g/l (4 mesures et 9 calculs). Augmentation E → W	moyenne = 4 % ; maxi = 12 %	Pour les Grès de Donnemarie médians : K < 4,4 mD
Grès de Donnemarie inférieurs	32-47 m		pas de valeurs disponibles	

Tableau 2 : Principales caractéristiques des réservoirs clastiques (surlignés en jaune) et de leurs couvertures de la pile lithostratigraphique du Trias du Bassin de Paris, collectées dans la littérature et les logs pétroliers.

Potentiel des réservoirs	Zone centrale	Zone est
Grès du Rhétien marin	0 (réservoir absent)	< 1
Grès de Boissy	< 2	~ 2
Grès de Chaunoy	< 2,5	~ 4
Grès de Sainte Colombe-Voulzie	0 (réservoir absent)	0 (réservoir absent)
Grès de Donnemarie	< 2	5 à 8
Potentiel du Trias	Zone Centrale	Zone est
Total cumulé Trias	2 (Cergy) à 6 (Melun)	~12

Tableau 3 - Récapitulatif des potentiels géothermiques (estimés en GJ/m²) dans les réservoirs étagés du Trias, situés sous la zone d'exploitation du Dogger.



A

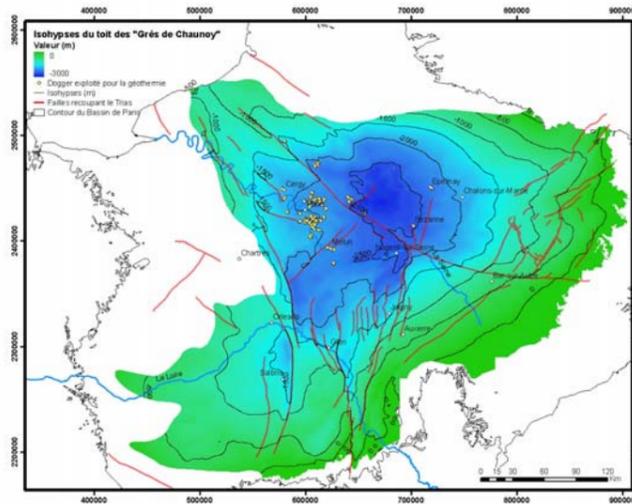
B

C

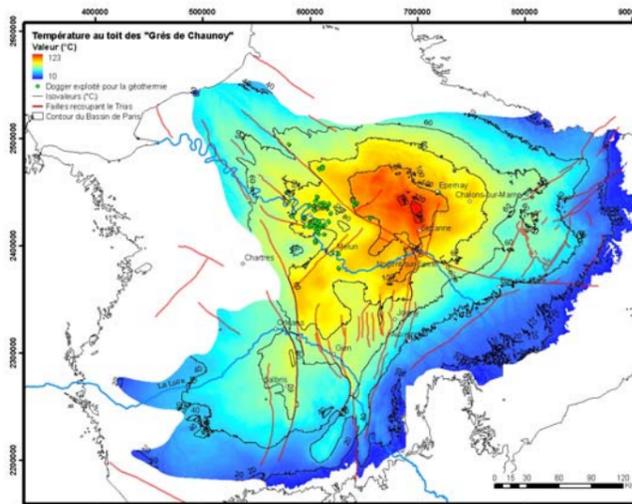
D

Figure 12 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Grès de Donnemarie » à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al.,2008)

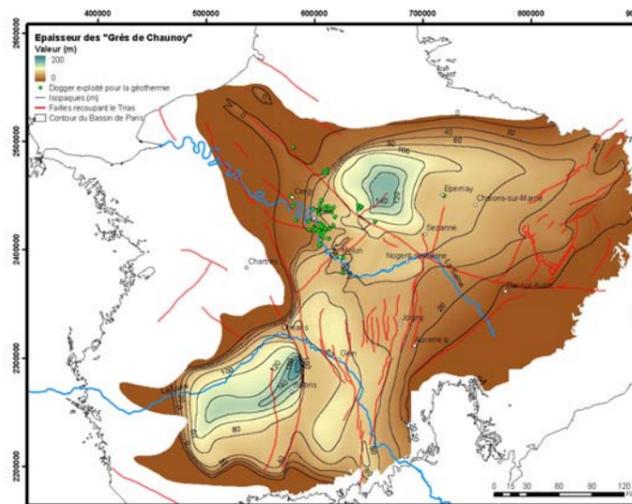
- A - Carte des isohypses du toit du réservoir « Grès de Donnemarie ».
- B - Carte des températures au toit du réservoir « Grès de Donnemarie ».
- C - Carte des épaisseurs du réservoir « Grès de Donnemarie ».
- D - Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable en GJ / m²) du réservoir « Grès de Donnemarie ».



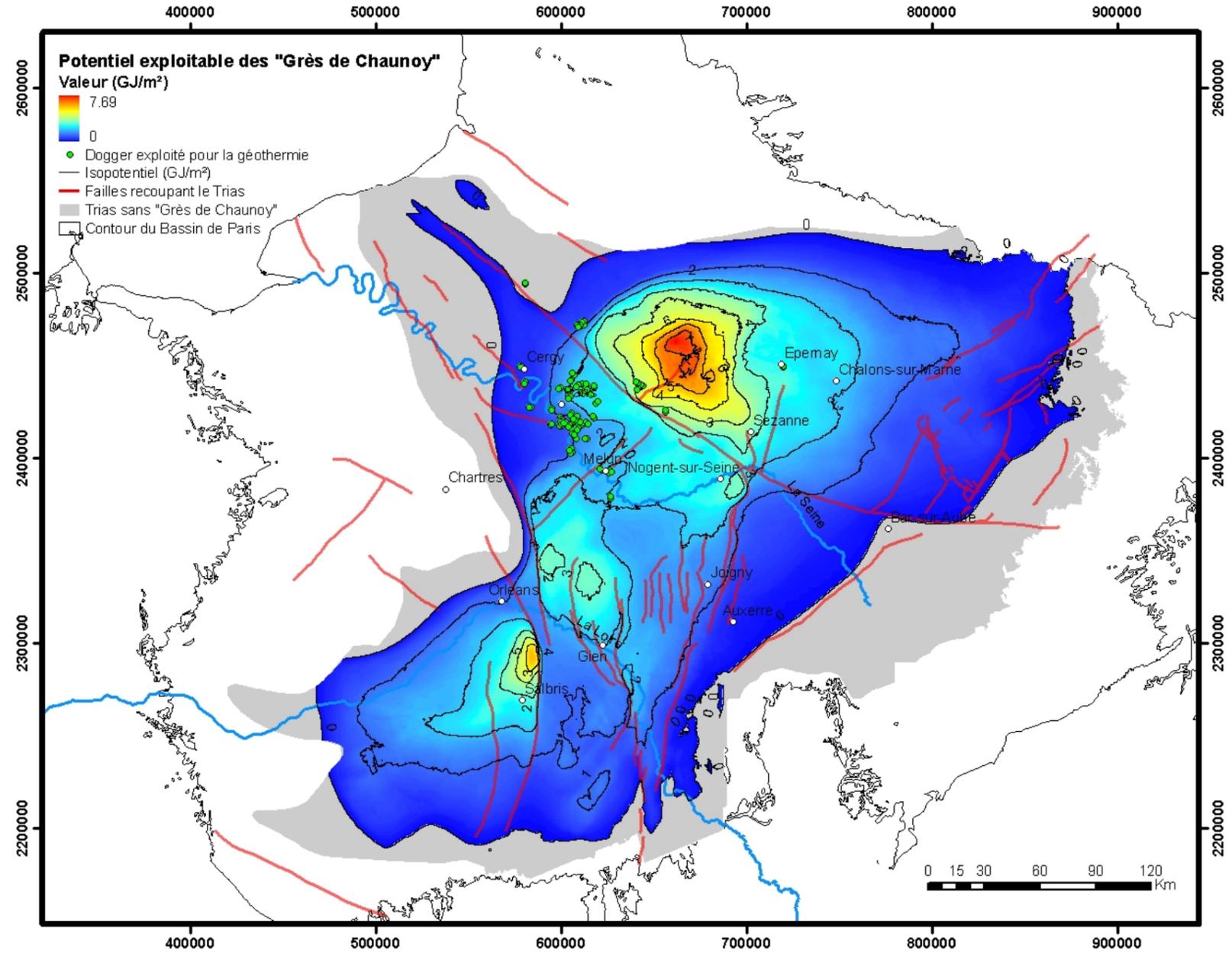
A



B



C



D

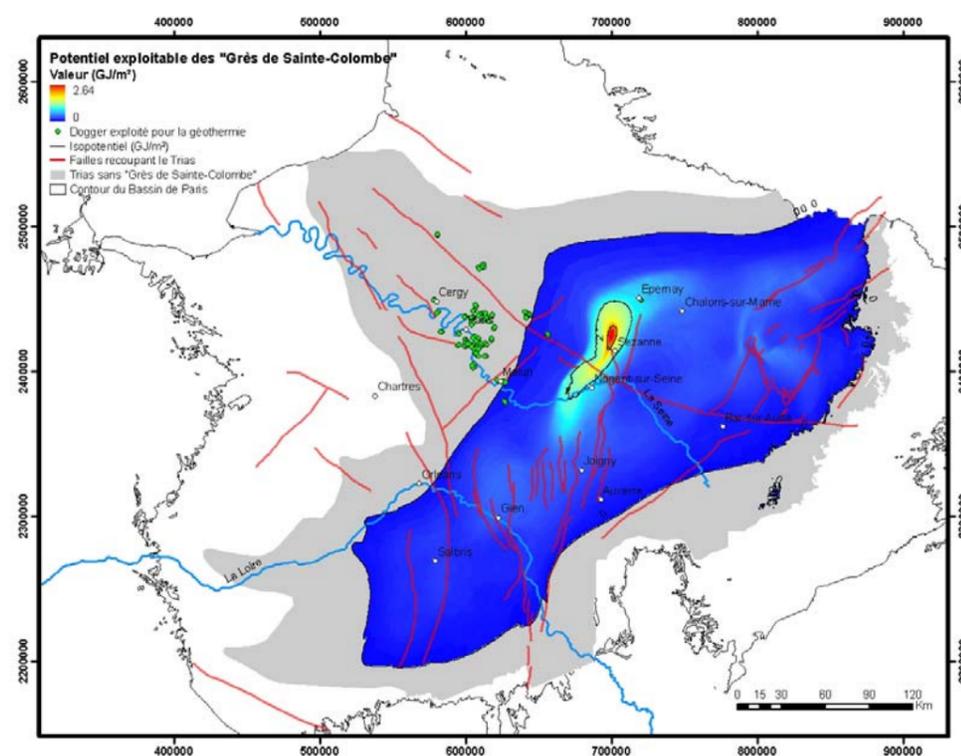
Figure 13 : Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Grès de Chaunoy » à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008)

A - Carte des isohypses du toit du réservoir « Grès de Chaunoy ».

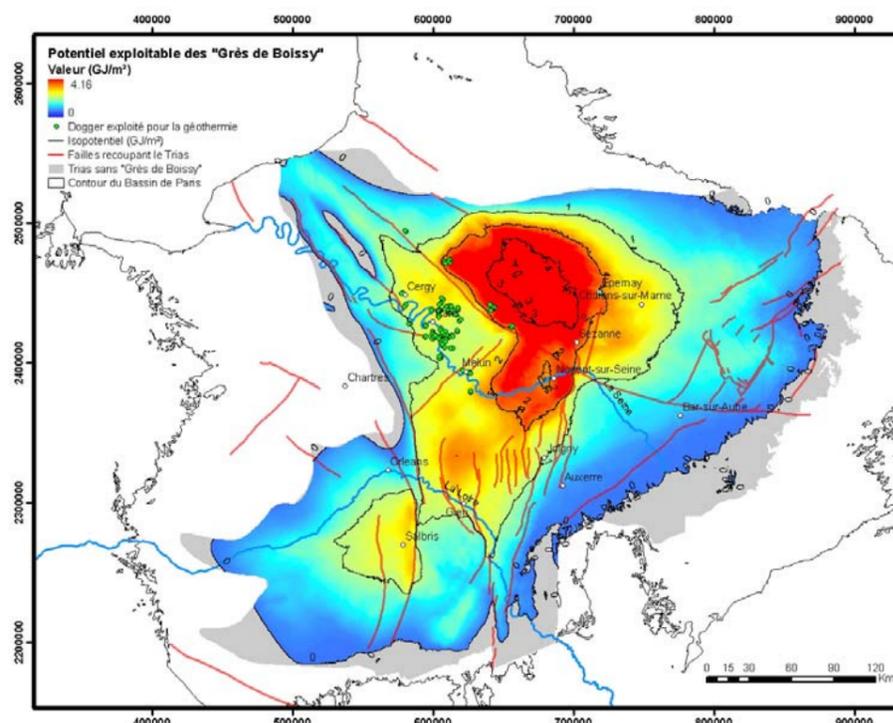
B - Carte des températures au toit du réservoir « Grès de Chaunoy ».

C - Carte des épaisseurs du réservoir « Grès de Chaunoy ».

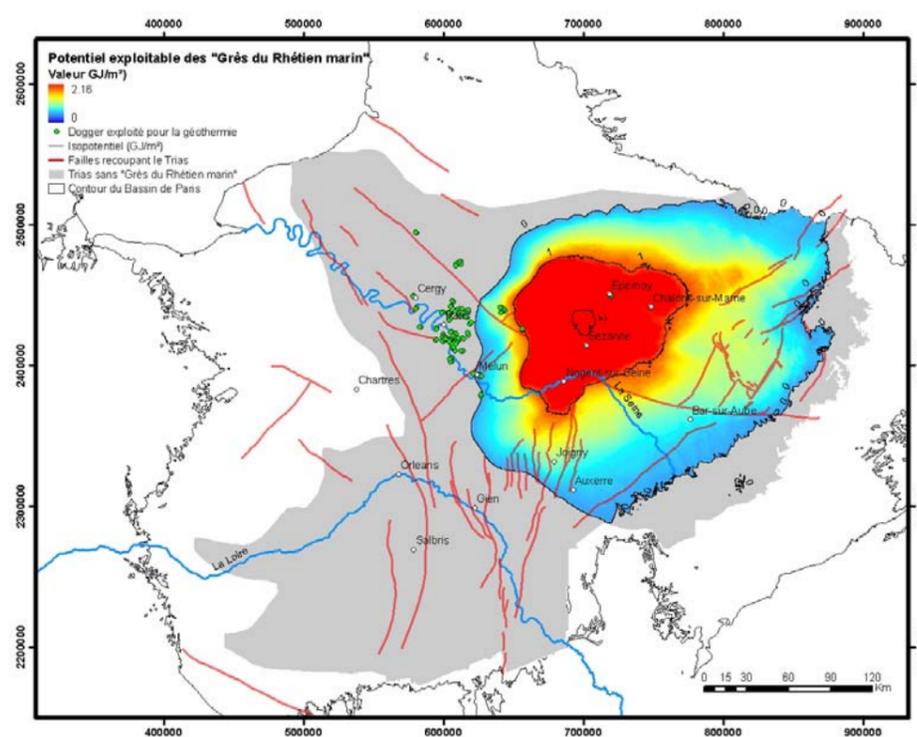
D - Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable en GJ / m²) du réservoir « Grès de Chaunoy ».



A



B

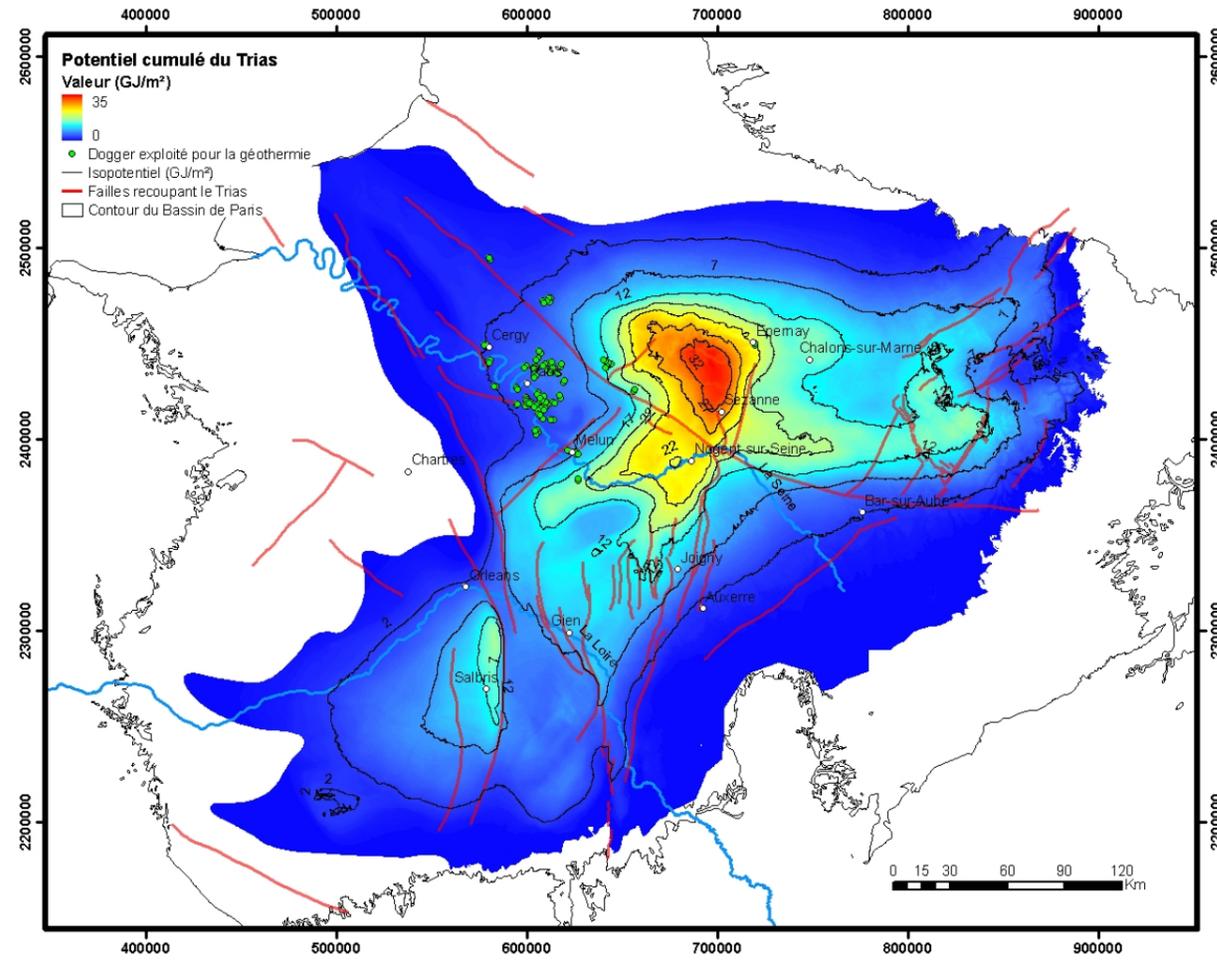


C

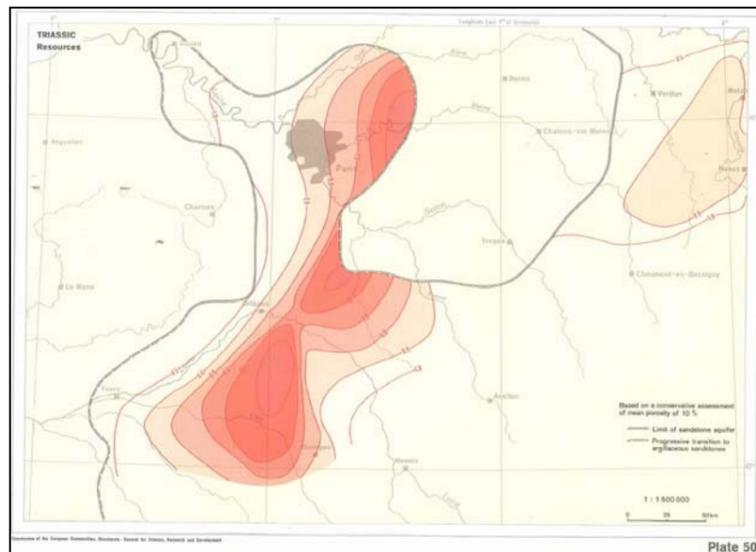
RESERVOIRS		
Age		Formation géologique
KEUPER	SUP	Grès du Rhétien marin
		Grès de Boissy
	MOYEN	Dolomie de Vert-le-Grand Grès de Chaunoy
		Grès de Ste-Colombe-Voulzie
		Grès de Donnemarie
	INF	Dolomie de la Lettenkohle
MUSCHELKALK		Grès de Trois-Fontaines

D

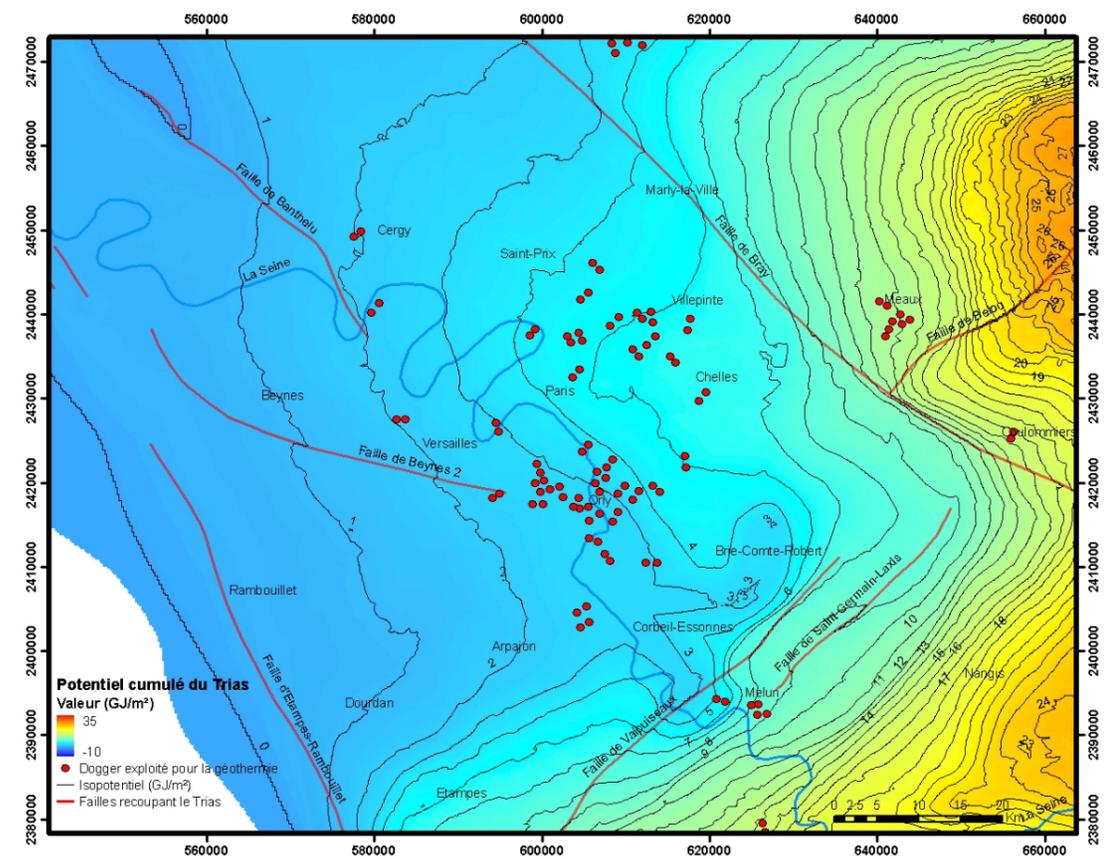
Figure 14 : Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs suivants : « Grès de Sainte Colombe – Voulzie » (A), « Grès de Boissy » (B) et « Grès du Rhétien marin » (C), à l'échelle du Bassin de Paris (Bouchot et al., 2008) avec la position des réservoirs dans un log litho-stratigraphique du Trias (D).



A



B



C

Figure 15 : Evaluation du potentiel géothermique à l'échelle du Trias du Bassin de Paris

A - Carte du potentiel géothermique obtenue par cumul des potentiels de chacun des cinq réservoirs clastiques triasiques, à l'échelle du Bassin de Paris (cette étude).

B - Carte du potentiel géothermique du Trias, à l'échelle du Bassin de Paris, réalisée par Cautru et Maget (in Haenel, 1989). Les valeurs maximales atteignent 15 GJ/m² (en rouge).

C - Carte du potentiel géothermique cumulé des réservoirs clastiques du Trias, situés sous le Dogger actuellement exploité en Ile de France. A noter l'évolution des isopotentiels en allant vers l'Est. Il s'agit d'un zoom de la figure B.

5.2. PERSPECTIVES «GEOOTHERMIE DU TRIAS DU BASSIN DE PARIS »

L'étude présentée dans ce rapport fait la démonstration d'un potentiel géothermique de certaines parties du Trias du Bassin de Paris. Elle insiste également sur la variabilité des paramètres pétrophysiques caractéristiques intrinsèques des formations argilo-gréseuses (tabl. 3). Le comportement de ces paramètres, à l'échelle des cibles proposées, est un passage obligé si on veut prédire correctement la productivité et l'injectivité des futurs réservoirs.

En conséquence, il s'agirait de déterminer les paramètres multi-sources d'un réservoir géothermique clastique profond (2000 à 3000 m), de l'échelle régionale (10 à 100 km) à celle du puits (10-100 m) en passant par l'échelle du doublet (~1 km), concernant une ressource géothermale moyenne température (90-125°C) capable d'être réinjectée.

Trois axes de recherches, formulés sous forme de trois questions, sont proposés en fonction de l'échelle de travail.

1- Comment réduire l'incertitude géologique avant le stade de forage (à l'échelle régionale) ?

Pour se faire, il conviendrait de :

- affiner le calcul du potentiel d'un réservoir en prenant en compte le paramètre perméabilité des roches et températures des fluides ;
- définir l'enveloppe d'un réservoir clastique sachant que la répartition des corps gréseux unitaires est très variable d'un point à l'autre (forte incidence sur le calcul de la chaleur en place *versus* chaleur exploitable) ;
- déterminer les facteurs contrôlant les variations du gradient thermiques dans le Bassin de Paris (anomalie favorables pour la prospection) ;
- étudier l'interface socle-trias en tant que réservoir potentiel ;
- réaliser à partir des données du projet CLASTIQ, un modèle géométrique 3D des réservoirs clastiques du Trias (jusqu'à 5 réservoirs étagés).

Ce travail déboucherait sur l'élaboration d'un modèle d'exploration régionale de réservoirs clastiques.

2- Vers l'exploitation durable d'un réservoir géothermique clastique (à l'échelle du doublet) ?

Pour ce faire, il conviendrait de :

- déterminer le rôle des hétérogénéités sédimentaires (figures sédimentaires, cimentation liée à la diagenèse car réservoir profond, répartition argile/grés, densité des lamines argileuses) sur les paramètres physiques (transmissivité, perméabilité, température, porosité, emmagasinement, conductivité hydraulique) ;
- déterminer le rôle des hétérogénéités structurales (macrofracture et microfissuration) sur ces paramètres. Comment gérer le problème *d'upscaling* (changement d'échelle) de ces paramètres (échelle du puits à celle de la carotte) inhérent à la structuration interne des réservoirs ?
- cerner le comportement de la bulle froide en environnement clastique et de déterminer la distance idéale entre les deux puits d'un même doublet pour un réservoir clastique ? Préciser le rôle des fluides ?

Ce travail déboucherait sur l'élaboration : i) d'un modèle 3D d'hétérogénéités sédimentaires et tectoniques du réservoir clastique à l'échelle d'un doublet (5 x 5 km² x 2 km vertical) en fonction de l'environnement clastique ; ii) d'un modèle de simulation d'écoulement à l'échelle d'un doublet en production en fonction de l'environnement clastique (cf. §. 6.3.).

3. Quelles sont les conditions optimales pour une réinjection (à l'échelle du puits) ?

Dans la continuité de la synthèse bibliographique sur la problématique « réinjection », réalisée dans le cadre du projet CLASTIQ (Lopez et Millot, 2008), et pour répondre à la question 3, il conviendra de poursuivre la démarche en :

- déterminant comment éviter la mise en circulation des fines argileuses (seuil de pressions optimales) ;
- déterminant les types de réservoir clastique (facteurs géologiques) et/ou quel type de fonctionnement de la boucle (facteurs anthropiques) peuvent engendrer le phénomène de venue de sable (*sanding*).

Ce travail déboucherait sur l'élaboration d'un modèle de comportement des fines et des venues de sable à l'échelle des puits de production et de réinjection.

En termes de méthodologie, plusieurs approches méthodologiques sont envisageables :

- *Analogie « carotte/diagraphie »*. L'opération de forage prévue par ADP sur Orly dans les prochains mois constitue une première occasion dont il conviendrait d'étudier avec soin si elle présente une opportunité pour réaliser un approfondissement au Trias. Compte tenu des délais de l'opération, cette décision devrait être prise à très brève échéance. L'intérêt de l'étude de forage est d'avoir accès à des données directes (log carotte) et indirectes (diagraphie, test hydro.) des réservoirs les plus prometteurs à savoir les Grès de Donnemarie et les Grès de Chaunoy. Ces données doivent permettre d'étudier *in situ* la structuration interne d'une formation clastique à l'échelle d'un puits, de caractériser ses paramètres pétrophysiques et d'aborder la question de changement d'échelle (*upscaling*, perméabilité à l'échelle de la carotte *versus* test hydro à l'échelle du puits). En complément, l'accès à des carottes et diagraphies d'anciens forages pétroliers du Bassin de Paris demeure possible.
- *Analogie « terrain »*. Concernant l'étude d'un réservoir « analogue » en surface, plusieurs terrains de jeux sont possibles en France (Bassin du Sud-est, Alsace, ...) ou en Espagne. Il s'agira de sélectionner un environnement clastique de référence. Ce type d'étude de terrain doit permettre de visualiser en 3D la structuration interne du réservoir, ses hétérogénéités sédimentologiques, le degré de fracturation et ainsi de déterminer la part des facteurs lithologiques, diagénétiques et structuraux sur la forte variabilité des paramètres pétrophysiques en domaine clastique.
- *Approche conceptuelle*. La simulation d'écoulement à l'échelle d'un doublet en production pourrait être réalisée à partir d'environ cinq modèles sédimentologiques différents, qui soient plus ou moins influencés par la fracturation. L'élaboration de tels modèles conceptuels doit permettre d'identifier les spécificités des différents environnements géologiques. En complément, des modèles numériques visant à comprendre le phénomène de venues de sable à l'échelle des puits de pompage et de ré-injection est envisageable.

Ce programme préliminaire est présenté comme base de discussion d'un projet CLASTIQ 2- volet Bassin de Paris avec l'ADEME.

5.3. RAPPORTS, COMMUNICATIONS A CONGRES ET PUBLICATION

Cette étude, réalisée en 2007 et 2008, a fait l'objet d'un rapport d'avancement du projet CLASTIQ (Genter *et al.*, 2007), d'un rapport technique du BRGM destinés à l'ADEME, de deux rapports de mastère 2 et d'une communication à congrès.

Rapports techniques :

Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A., avec la collaboration de Chilès J.P., Garibaldi C., Jorand C. (2008) - Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris. Rapport final BRGM - RP-56463-FR, 92 p., 40 fig.

Genter A., avec la collaboration de Dezayes C., Guillou-Frottier L., Thinon I., Courrioux G. (2007) - Projet CLASTIQ : CLAYed sandstone In Question - Rapport d'avancement. BRGM/RP-55379-FR, 71 p.

Rapports de stage en Mastère 2 :

Bonté D., 2007. Les températures profondes dans les bassins sédimentaires en France : Identification des anomalies. BRGM/GTH – Université de Montpellier 2 Rapport de stage de mastère 2 "Réservoirs Géologiques", 50 p.

Ossi A. P., 2008. Caractérisation du potentiel des réservoirs argilo-gréseux du Trias du Bassin de Paris : exemple du réservoir clastique de Chaunoy. Rapport de stage de mastère 2 BGAE, Université de Montpellier, 47 p.

Communications à congrès :

Bonté. D., Guillou-Frottier.L., Garibaldi. C., Bourguine.B., Bouchot.V., 2008. Nouvelles cartographies des températures des bassins sédimentaires français, in RST 2008 - 22ème Réunion des Sciences de la Terre (RST) 2008 - Nancy - France 21-24/04/2008.

La valorisation de cette étude est envisagée à travers la publication d'un article de synthèse en 2009.

6. Problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir clastique

La problématique de réinjection des fluides géothermiques dans un réservoir argilo-gréseux a été abordé via i) une synthèse bibliographique à partir des expériences françaises et européennes visant à identifier les phénomènes liés à la réinjection, leurs mécanismes et les recommandations techniques préalables à l'exploitation géothermique et ii) une étude géochimique des fluides du Trias du Bassin de Paris, échantillonnés dans le cadre de ce projet dont le rôle dans le processus de réinjection sera précisé..

Ce chapitre constitue la synthèse du rapport technique de Lopez et Millot (2008).

6.1. PROBLEMATIQUE REINJECTION : RETOUR D'EXPERIENCES ET RECOMMANDATION

6.1.1. Retour d'expériences en France et en Europe

L'expérience pétrolière cinquantenaire et l'expérience plus récente de la réinjection de saumures géothermiques à basse enthalpie dans des réservoirs clastiques, en France et en Europe, est riche d'enseignement. Elles indiquent notamment que l'indice d'injectivité apparent évolue avec le temps à cause de phénomènes physico-chimiques se produisant au niveau de la formation réservoir, mais aussi, à cause d'autres phénomènes ayant lieu dans le puits injecteur. La réussite de la réinjection des saumures refroidies conditionne l'ensemble des opérations. Son échec peut mettre un terme prématuré à la vie de l'exploitation. Une réussite partielle peut limiter l'exploitation de la ressource. La compréhension des phénomènes physiques contrôlant l'évolution temporelle de l'indice d'injectivité est donc primordiale, le but étant une réinjection à un coût énergétique faible et stable dans le temps.

La phénoménologie liée au problème de réinjection dans les réservoirs argilo-gréseux est complexe, car les phénomènes, rentrant en jeu, peuvent être de nature thermique, hydrodynamique, mécanique, chimique, bactérien et/ou liés au transport particulaire (argile) et aux microbulles. L'ensemble de ces phénomènes est décrit en détail dans le rapport technique de Lopez et Millot (2008).

En ce qui concerne les informations concernant les opérations géothermiques européennes captant des réservoirs argilo-gréseux, elles montrent que les succès sont mieux documentés que les échecs alors que ces échecs sont riches d'enseignements, comme a pu le montrer l'expérience française de Melleray. Les opérations réussies sont, généralement, caractérisées par une transmissivité élevée, supérieure à 100 D.m, qui permet certainement d'éviter les problèmes sérieux d'injection. Les formations sont le plus souvent peu argileuses, et apparaissent plutôt compactes. Quelques problèmes ont toutefois été résolus et des solutions préventives proposées.

6.1.2. Principales recommandations

Les retours d'expérience de la réinjection de saumures dans des réservoirs clastiques montrent que les projets géothermiques, où l'on prévoit la réinjection de saumures refroidies dans des formations clastiques, doivent être planifiés soigneusement. Une méthodologie et une technologie adaptées permettraient d'éviter pratiquement tous les problèmes de réinjection.

La réalisation d'ouvrages profonds, généralement au-delà de 500 m de profondeur, et éventuellement déviés, implique l'utilisation de technologies et de matériel pétrolier. Il s'agira, donc, d'adapter la conception et les équipements des ouvrages aux spécificités de la géothermie.

Pour la foration de formations argilo-gréseuses, on recommande :

- la construction des ouvrages dans les plus grands diamètres économiquement envisageables ;
- la mise en place de casings de soutènement du puits en acier de grade pétrolier ;
- la mise en place de crépines inox de type « fil enroulé » (*wire-wrapped*), ayant un *slot* (ouvertures des crépines) aussi large que possible, tout en répondant à la granulométrie des formations ;
- pas de massif de graviers, **sauf** nécessité par une très mauvaise tenue mécanique des formations (risques d'effondrement, de venues de sable) ;
- le chemisage total ou partiel du puits de production avec un tubing amovible en matériaux inaltérables, et pour un chemisage partiel un traitement anticorrosion préventif devra être envisagé ;
- la mise en place de filtres en tête de puits ;
- le chemisage total du puits de réinjection en matériaux inaltérables ;
- l'utilisation de produits inhibiteurs dans l'intervalle casing-tubing ;
- réaliser, dans le domaine du possible, le puits d'injection en déviation ;
- utiliser lors de la foration du réservoir une boue dégradable.

Pour être pragmatique, les paramètres de construction d'un doublet virtuel exploitant le Trias du Bassin parisien sont proposés, au niveau des puits de production et d'injection.

Pour le puits de production, les opérations suivantes sont recommandées :

- foration :
 - 0-100 m : forage en 24 (ou 26"). Mise en place d'un tubage acier 18"5/8 (ou 20") permettant d'isoler les formations superficielles (quaternaire ou tertiaires) éventuellement exploitées ;
 - 100-600 m : forage en 17"1/2. Mise en place d'un tubage acier 13"3/8 assurant la protection de l'Albien. Ce tubage servira également à protéger la zone de *build-up* en cas de forage dévié. Il accueillera également la future chambre de pompage ;
 - 600-1700 m : forage en 12"1/4. Mise en place d'un tubage acier 9"5/8 au toit du Trias ;
 - 1700-1900 m : forage en 8"½ dans le réservoir. Mise en place de crépines inox 6"5/8.
- mise en eau du puits ;
- essais de production/injection ;
- stimulations éventuelles ;
- mise en place d'une complétion d'exploitation en fibre de verre constituée : d'une chambre de pompage sur 300 m (tubing 229.9 / 196.6 mm) et d'un tubing de production 176/150.6 mm jusqu'en tête des crépines ;
- traitement de l'annulaire avec un produit inhibiteur.

De même, pour le puits d'injection, les opérations suivantes sont recommandées :

- foration :
 - 0-100 m : forage en 24 (ou 26"). Mise en place d'un tubage acier 18"5/8 (ou 20") permettant d'isoler les formations superficielles (quaternaire ou tertiaires) éventuellement exploitées ;
 - 100-600 m : forage en 17"1/2. Mise en place d'un tubage acier 13"3/8 assurant la protection de l'Albien. Ce tubage servira également à protéger la zone de build-up en cas de forage dévié ;
 - 600-1700 m : forage en 12"1/4. Mise en place d'un tubage acier 9"5/8 au toit du Trias ;
 - 1700-1900 m : forage en 8"½ dans le réservoir. Mise en place de crépines inox 6"5/8.

- mise en eau du puits ;
- essais de production/injection ;
- stimulations éventuelles.

6.2. APPORT DE LA GEOCHIMIE DES FLUIDES DU TRIAS DU BASSIN DE PARIS

Différents processus peuvent s'opposer à l'injection de saumures géothermiques refroidies dans des séries argilo-gréseuses. Parmi les nombreux phénomènes physiques généraux responsables de pertes d'injectivité (viscosité de la bulle froide, fronts diagénétiques...), les déséquilibres chimiques entre le fluide injecté et la formation réservoir peuvent conduire à des précipitations et obstruer la porosité.

Les données analytiques disponibles sur les fluides des formations triasiques du Bassin de Paris étant rares et incomplètes, un échantillonnage a été réalisé pour cette étude. Quatre points de prélèvements ont été sélectionnés dans la partie centrale du Bassin de Paris à différentes profondeurs : champs de Chaunoy, Champotran et La Torche (réservoirs de Chaunoy et Donnemarie) et deux points de prélèvements l'ont été en bordure du Bassin à Châteauroux (réservoir de Donnemarie) et Santenay (Réservoir du Buntsandstein).

Les résultats montrent que :

- les eaux profondes minéralisées des forages de Chaunoy et de Champotran présentent de fortes salinités avec des compositions chimiques et isotopiques très comparables quelque soit le réservoir. En revanche, l'eau du forage de La Torche possède une salinité beaucoup plus élevée avec des caractéristiques isotopiques sensiblement différentes ;
- les géothermomètres chimiques appliqués à ces fluides donnent des valeurs de températures qui se situent entre 85 et 95°C, qui sont cohérentes avec les températures recueillies en forages pétroliers (Bouchot *et al.*, 2008) ;
- les fluides situés en bordure du bassin ont des compositions chimiques très nettement différentes. Ces eaux nettement moins minéralisées (Santenay et Châteauroux) sont plus superficielles et présentent des températures plus froides autour de 45 à 50°C (proximité des zones de recharge) ;
- l'étude du rapport d'activité ($^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$) des eaux en fonction de la distance par rapport à la zone de recharge permet en première approximation de déterminer une vitesse moyenne d'écoulement d'environ 0.25 mètre par an, ce qui correspond à un « âge » d'environ 1 Ma pour les eaux des champs de Chaunoy, Champotran et la Torche.

L'étude de la composition chimique de ces eaux montre que dans l'ensemble les risques de précipitation de minéraux, au cours d'une éventuelle réinjection de ces fluides, à plus faible température, semblent être très réduits. Dans la mesure où ces eaux constituent plutôt un milieu réducteur, il est conseillé d'éviter un contact direct avec l'atmosphère afin d'empêcher d'éventuelles précipitations d'oxy-hydroxydes de fer, au cours de la réinjection dans le sous-sol.

Si les risques de dépôts sont limités, en revanche, les problèmes de corrosion dus aux fortes concentrations de chlorure de ces eaux peuvent, toutefois, être importants. Par conséquent, il est recommandé de rester vigilant sur ce point sensible.

Enfin, les données concernant les isotopes du bore, du néodyme et du lithium, sont nouvelles et pourront servir de référence pour une étude ultérieure. Cela permettrait notamment une meilleure compréhension des interactions eau-roche dans le Trias et une caractérisation plus précise des éventuels échanges entre les réservoirs du Dogger et du Trias.

6.3. PERSPECTIVES « PROBLEMATIQUE DE REINJECTION »

Pour aboutir à des méthodes opérationnelles d'accompagnement d'une opération géothermique dans des formations argilo-gréseuses, différents points doivent faire l'objet d'une recherche approfondie. Deux points principaux sont ciblés et décrits ci-dessous.

1) Productivité et injectivité des formations détritiques. Il s'agit d'identifier quelle est l'échelle d'hétérogénéité sédimentaire pertinente pour la faisabilité d'une opération géothermique (part de la perméabilité matricielle et rôle de la fracturation dans le contrôle des propriétés réservoirs de ces formations). La réalisation de modèles numériques d'hétérogénéités sédimentaires (modélisation stratigraphique ou géostatistique), caractéristiques des différents environnements, peut être utilisée en parallèle à des études de terrain.

La simulation d'opérations géothermiques sur ces blocs permettrait :

- d'aborder le problème d'homogénéisation des propriétés réservoirs et de déterminer un volume élémentaire représentatif,
- de définir un seuil de transmissivité acceptable (50 Dm ?) pour la réalisation d'une opération,
- de préciser le contrôle des objets géologiques sur l'anisotropie des paramètres comme la transmissivité et leur importance dans la connexion entre les différentes unités réservoirs.

On pourra, ainsi, étudier l'implantation idéale d'un puits d'injection (angle de déviation, orientation idéale par rapport aux structures géologiques...).

2) Etude géomécanique. Celle-ci permettrait de déterminer les conditions de déstabilisation d'une formation argilo-gréseuse au cours d'une exploitation géothermique de celle-ci. Elle pourrait aussi préciser les conditions d'initiation de la fracturation thermique permettant de pallier efficacement les problèmes de colmatage en définissant le comportement des grès soumis au choc thermique d'une saumure refroidie (perte de cohésion, relâchement de grains ou fissuration...).

Ces propositions, concernant la problématique réinjection, sont complémentaires des perspectives proposées dans le chapitre précédent (§-5.2) et contribuent, ainsi, à l'élaboration d'un projet CLASTIQ-2.

6.4. RAPPORTS ET COMMUNICATION A CONGRES

Cette étude, réalisée en 2007 et 2008, a fait l'objet d'un rapport technique du BRGM destiné à l'ADEME, d'un rapport de mastère 2 et d'un résumé étendu.

Rapport technique :

Lopez S., Millot R. avec la collaboration de Brach M., Hervé J.-Y., Innocent C., Négrel Ph., Sanjuan B., 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, 196 p.

Rapport de stage de mastère 2 :

Boyer T., 2007. Estimation du potentiel géothermique dans les réservoirs Triasiques argilo-gréseux du Bassin de Paris. Univ. Montpellier 2/BRGM Rapport de Mastère 2 Recherche.

Communication à congrès :

Innocent C., Négrel P., 2008. Constraining the residence time of groundwaters using short-lived U isotopes: the Trias aquifer (Paris Basin, France) and the Mid-Eocene aquifer (Aquitainian Basin, France). 2nd European Groundwater conference; Paris; 13-15 novembre 2008

La valorisation de cette étude est envisagée à travers la publication d'un article de synthèse en 2009.

7. Conclusions

Les principaux résultats du projet CLASTIQ consistent en une évaluation quantitative de la ressource géothermique des réservoirs argilo-gréseux profonds du territoire métropolitain, en se plaçant dans une perspective énergétique de production de chaleur et, si possible, de production d'électricité. Ces réservoirs sont localisés dans les bassins sédimentaires suivants : Bassin de Paris, Fossé rhénois, Bassin bressan et Fossé de la Limagne.

La méthode d'évaluation employée, basée sur la connaissance du volume et de la température des réservoirs clastiques, a abouti à la production de cartes de potentiel géothermique. Ces cartes ont l'avantage de proposer une hiérarchisation des cibles géothermiques potentielles au sein d'un même bassin. Cette première étape devra, nécessairement, déboucher sur des études de détail, à l'échelle des cibles les plus prometteuses, en prenant en compte les paramètres pétrophysiques de ces réservoirs.

Si on se risque à une comparaison entre les potentiels estimés des réservoirs clastiques des différents bassins, il apparaît la hiérarchie suivante, par ordre d'importance :

- le Buntsandstein du Fossé rhénois (partie nord) et le Tertiaire du Fossé de la Limagne (15 à 30 GJ/m²),
- le Trias du Bassin de Paris dont les deux principaux réservoirs sont ceux de Donnemarie (jusqu'à 25 GJ/m²) et de Chaunoy (jusqu'à 7,7 GJ/m²),
- et enfin le Bassin bressan (jusqu'à 2 GJ/m²), dont les valeurs basses résultent essentiellement de l'épaisseur limitée du réservoir gréseux (30 à 50 m).

D'autre part, la réalisation d'un bilan exhaustif sur les problèmes de réinjection dans les aquifères argilo-gréseux a permis de mieux cerner sa phénoménologie complexe et de faire des recommandations techniques en termes de complétion de puits et de solutions permettant d'améliorer la productivité ou l'injectivité des réservoirs argilo-gréseux.

Dans la dynamique de ce projet CLASTIQ, un programme de travail, qui servira de base de discussion avec l'ADEME pour un projet CLASTIQ-2, est esquissé.

Ce projet visera à permettre le développement massif de projets opérationnels sur des réservoirs clastiques. Pour cela, on envisage trois principaux objectifs scientifiques, répondant à des problématiques adaptées à l'échelle de travail :

- Objectif 1 à l'échelle régionale - Améliorer la connaissance géologique et géothermique des réservoirs profonds dans les zones urbanisées et à fort potentiel

géothermique (Bassin de Paris, Bassin rhénan, Fossé de la Limagne) pour réduire l'incertitude géologique avant l'implantation des forages.

- Objectif 2 à l'échelle du doublet - Paramétrer un réservoir clastique à l'échelle du doublet géothermique pour prédire une exploitation durable des futurs réservoirs.
- Objectif 3 à l'échelle du puits - Maîtriser la phénoménologie liée à la réinjection et à la production des saumures géothermales autour des puits pour optimiser le fonctionnement de la boucle géothermique.

Le projet CLASTIQ-2 pourrait s'appuyer sur des travaux d'accompagnement scientifiques réalisés à l'occasion des prochains forages profonds en environnement clastique (prolongation d'un forage au Dogger pour ADP Orly, projet Roquette en Alsace, futurs forages d'exploration en Limagne, etc.).

8. Bibliographie

8.1. REFERENCES PRODUITES PAR LE PROJET CLASTIQ

Baujard C., Kohl T., Calcagno P., Guillou-Frottier L., 2008. 3D Temperature numerical computation based on geological model to quantify geothermal energy in a reservoir: The Limagne case-study (French Massif Central). From Calcagno P. & Sliupa S. (eds.), *Proceedings of the Engine Final Conference*, 12-15 February 2008, Vilnius, Lithuania. ISBN 978-2-7159-2993-7. Orleans, BRGM Editions.

Baujard, C., Kohl, T., 2007. Limagne Température Simulation and Resource Analysis, rapport technique réalisé à la demande du BRGM par GEOWATT dans le cadre du projet CLASTIQ, *rapport technique GEOWATT AG*, 40 p

Bonté D., 2007. Les températures profondes dans les bassins sédimentaires en France : Identification des anomalies. BRGM/GTH – Université de Montpellier 2 *Rapport de stage de Master 2 "Réservoirs Géologiques"*, 50 p.

Bonté.D., Guillou-Frottier.L., Garibaldi. C., Bourguine.B., Bouchot.V., 2008. Nouvelles cartographies des températures des bassins sédimentaires français, in RST 2008 - 22ème Réunion des Sciences de la Terre (RST) 2008 - Nancy - France 21-24/04/2008.

Bouchot V., Bialkowski A., Lopez S., Ossi A., avec la collaboration de Chilès J.P., Garibaldi C., Jorand C., 2008 - Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris. *Rapport final BRGM - RP-56463-FR*, 92 p.

Boyer T., 2007. Estimation du potentiel géothermique dans les réservoirs Triasiques argilo-gréseux du Bassin de Paris. Univ. Montpellier 2/BRGM *Rapport de Mastère 2 Recherche*, 50 p.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Guillou-Frottier, Genter A., Kohl T., Courrioux G., 2008. 3D Geological modelling and geothermal assessment of the Limagne basin (France). *GeoMod2008 Firenze*, 22-24 September.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Guillou-Frottier, Genter A., Kohl T., Courrioux G. (sous presse). 3D Geological modelling and geothermal assessment of the Limagne basin (France). *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata*, vol. 49, n. 2 supplement.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Kohl T., Courrioux G., Guillou-Frottier L., Genter A., 2008. The Limagne geothermal reservoir (France): from 3D geological

model to potential assessment. *33rd International Geological Congress*, 06-14 August, Oslo, Norway.

Calcagno P., Baujard C., Dagallier A., Kohl T., Courrioux G., Guillou-Frottier L., Genter A., 2008. The Limagne geothermal reservoir (France): from 3D geological model to potential assessment. *AGEG workshop*, 05-06 August 2008, Adelaide, Australia.

Dezayes C. avec la collaboration de Thion I., Courrioux G., Tourlière B., Genter A., 2007. Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan. *Rapport final. BRGM/RP-55729-FR*, 72 p.

Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., 2008. Structures géologiques et estimation du potentiel géothermique : l'exemple du Trias clastique du Fossé rhénan. *22ème RST- 21-24 Avril 2008*, Nancy, France.

Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Geothermal potential assessment of clastic reservoirs (Upper Rhine Graben, France). *32rd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*. Stanford University, Stanford, California, January 28-30, 2008, 17 p.

Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Geothermal structures and assessment of the geothermal potential of the triassic clastiq reservoir in the Upper Rhine Graben, France – A soumettre à *Geothermics*.

Dezayes C., Genter A., Thion I., Courrioux G., Tourlière B., 2008. Assessment of geothermal potential of clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. *3rd International conference & exhibition on ecological vehicles & renewable energies (EVER)*, 27-30 Mars 2008, Monte-Carlo, Monaco.

Dezayes C., Genter A., Tourlière B., 2008. Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. *ENGINE Final Conference*, 12-15 February 2008, Vinius, Lithuania.

Dezayes C., Genter A., Tourlière B., 2008. Triassic geothermal Clastic reservoirs in the Upper Rhine Graben. *22ème RST- 21-24 Avril 2008*, Nancy, France.

Genter A., avec la collaboration de Dezayes C., Guillou-Frottier L., Thion I., Courrioux G. 2007. Projet CLASTIQ : CLAYed sandstone In Question - *Rapport d'avancement. BRGM/RP-55379-FR*, 71 p.

Innocent C., Négrel P., 2008. Constraining the residence time of groundwaters using short-lived U isotopes: the Trias aquifer (Paris Basin, France) and the Mid-Eocene aquifer (Aquitainian Basin, France). *2nd European Groundwater conference*; Paris; 13-15 novembre 2008

Jorand C., Bouchot V., 2008 - Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein » du Bassin bressan, France. *Rapport BRGM/ RP-56462-FR*, 34 p.

Lopez S. et Millot R. avec la collaboration de Brach M., Hervé J.-Y., Innocent C., Négrel Ph., Sanjuan B., 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*, 196 p.

Millot.R., Negrel.P., Petelet-Giraud.E., 2007. Multi-isotopic (Li, B, Sr, Nd) approach for geothermal reservoir characterization in the Limagne Basin (Massif Central, France). *Applied Geochemistry*, Vol. 22, issue 11, p. 2307-2325

Ossi A. P., 2008. Caractérisation du potentiel des réservoirs argilo-gréseux du Trias du Bassin de Paris : exemple du réservoir clastique de Chaunoy. *Rapport de stage de Master 2 BGAE*, Université de Montpellier, 47 p.

8.2. AUTRES REFERENCES CITEES DANS LE RAPPORT

Baujard, C., Kohl, T., 2007. Limagne Temperature Simulation and Resource Analysis, *rapport technique GEOWATT AG*, 40 p.

Calcagno, P., Chilès, J.P., Courrioux, G., Guillen, A., 2008. Geological modelling from field data and geological knowledge, Part I – Modelling method coupling 3D potential-field interpolation and geological rules. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, in press.

Cermak E., Haenel R., Zui V. (eds.) 1992. Geothermal Atlas of Europe, H. Haack. *Verlagsges. mbH., Gotha, Germany.*

Dagallier, A., 2004. Assessment of Geothermal Energy Potential of the Tertiary Limagne Basin (France), *Technical University of Denmark.*

Delmas J., Houel P., Vially R. (2002) - Paris Basin, Petroleum Potential, Institut Français du Pétrole, *Rapport régional d'évaluation pétrolière du Bassin de Paris* (en anglais), 106 pl., 13 tabl.

Genter A. avec la collaboration de Giot D., Lieutenant N., Nehlig P., Rocher Ph., Roig J.Y., Chevremont Ph., Guillou-Frottier L., Martelet G., Bitri A., Perrin J., Serrano O., Courtois N., Vigouroux Ph., Négrel Ph., Serra H., Petelet-Giraud E. 2003. Méthodologie de l'inventaire géothermique des Limagnes : projet COPGEN. Compilation des données. *Rapport intermédiaire BRGM/RP-52644-FR*, 122 p.

Genter A., avec la collaboration de Giot D., Bertin C., Bitri A., Calcagno Ph., Courrioux G., Dagallier A., Giraud-Petelet E., Goyeneche O., Martelet G., Millot R., Négrel Ph., Rocher Ph., Serra H., Serrano O., Vairon J. 2004. Méthodologie

d'inventaire du potentiel géothermique basse et moyenne énergies en Limagne. *Rapport final COPGEN. BRGM/RP-53463-FR*, 105 p..

Genter, A. et collaborateurs 2005. Low to Medium Temperature Geothermal Resources in the Limagne Basin (France), *World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey.

Gringarten, A., 1979. Reservoir Lifetime and Heat Recovery Factor in Geothermal Aquifers used for Urban Heating. *Pageoph*, Vol. 117, Birkhäuser Verlag, Basel.

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. 110 pl.

Haimberger R., 2007. New aspects of geologic-geothermal exploration in the Upper Rhine Graben. *European Geothermal Congress*, 30 May-1 June 2007, Unterhaching, Germany Hurtig

Jung R., Röhling S., Ochmann N., Rogge S., Schellschmidt R., Schulz R., Thielemann T., 2002. Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland", 2002, *Rapport interne BGR*.

Kohl, T., Hopkirk, R.J., 1995. "FRACTure" a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock. *Geothermics*, 24(3): 345-359.

Munck F., Walgenwitz F., Maget P., Sauer K, Tietze R., 1979. Synthèse géothermique du Fossé rhénan Supérieur. Commission of the European Communities. BRGM Service Géologique Régional d'Alsace – *Geologisches Landesamt Baden-Württemberg*.

Signorelli, S., Kohl, T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz - Gebiet des nördlichen Schweizer Mittellandes, *Schweizerische Geophysikalische Kommission*.



Centre scientifique et technique
Département Géothermie GTH
3, avenue Claude-Guillemin

BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34