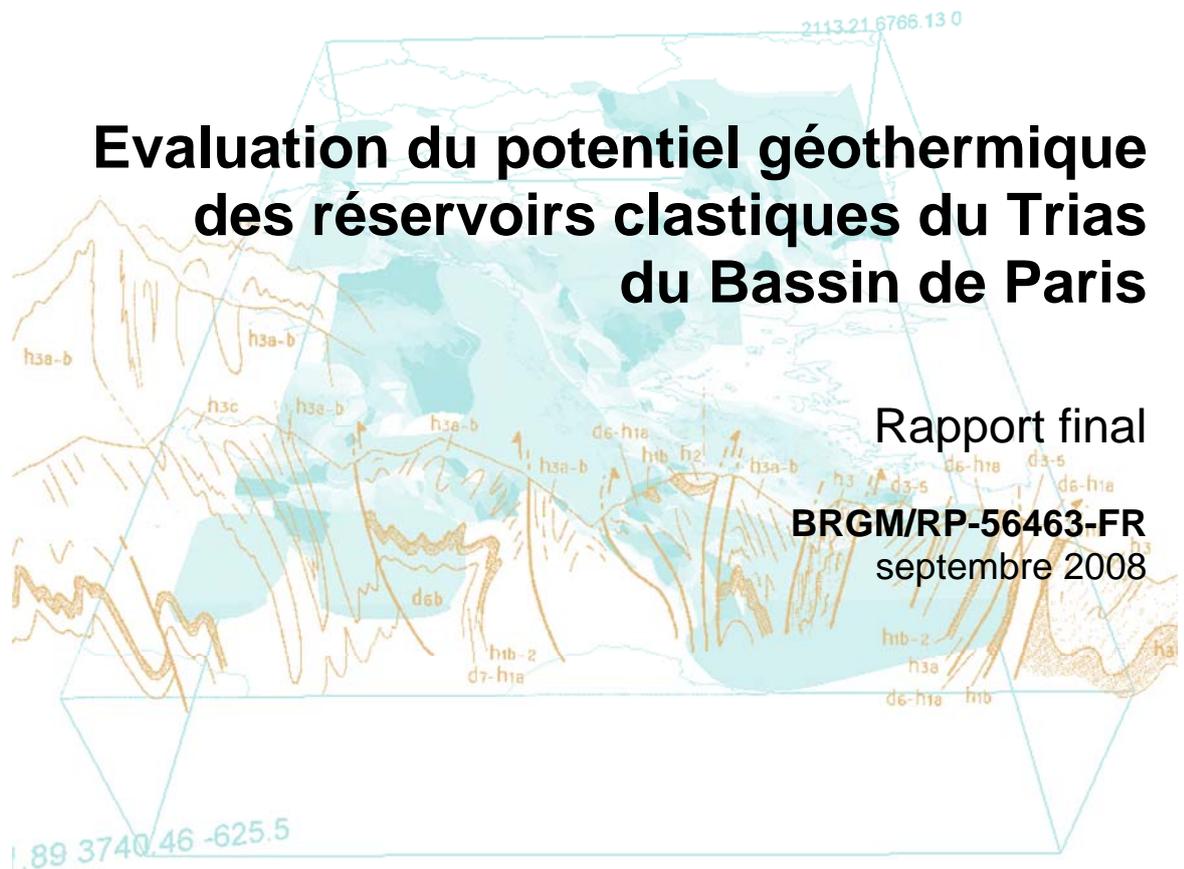




Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris

Rapport final

BRGM/RP-56463-FR
septembre 2008



Evaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris

Rapport final

BRGM/RP-56463-FR
septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Recherche ADEME-BRGM intitulé CLASTIQ (2006-2008)

V. Bouchot, A. Bialkowski, S. Lopez, A. Ossi,
avec la collaboration de
J.P.Chilès C. Garibaldi, C. Jorand

Vérificateur :

Nom : Alain DESPLAN

Date : 10 Septembre 2008

Signature :

Approbateur :

Nom : Fabrice BOISSIER

Date : 15 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 : Bassin de Paris, géothermie, Trias, réservoir gréseux, clastique, isopaque, isohypse, température, interpolation, variogramme, krigeage, potentiel géothermique,

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante : **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., 3 tab., 1 ann.

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

Synthèse

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, l'ADEME et le BRGM se mobilisent pour évaluer les potentialités des ressources énergétiques renouvelables présentes dans les parties les plus profondes du Bassin de Paris, non encore exploitées. En particulier, 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 à terme une alternative aux réservoirs carbonatés du Dogger. De fait, notre zone d'étude a été menée à l'échelle du Bassin de Paris, et avec une attention particulière sur la région Ile de France, où les besoins énergétiques sont majeurs.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet intitulé CLASTIQ, *CLAYed sandStone In Question* dont la convention n°05 05 C0079 a été signée le 20 décembre 2005 entre l'ADEME et le BRGM pour une durée de 27 mois. Cette durée a été prolongée de 6 mois par avenant signé le 4 décembre 2007 (N/ref. ADEME : 27/129), soit au total un projet de recherche d'une durée de 33 mois.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer quantitativement le potentiel géothermique des réservoirs clastiques profonds du Trias, à l'échelle du Bassin de Paris, à travers une caractérisation actualisée de la composition des formations argilo-gréseuses, de leur température et de leur géométrie. 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.

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 en région parisienne.

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 ;

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 lithostratigraphiques 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).

Le rapport est composé d'une première partie présentant la géologie du Trias du Bassin de Paris suivi d'une description détaillée des cinq réservoirs clastiques sélectionnés. La seconde partie décrit la méthodologie adoptée pour réaliser les cartes des isohypses, des isopaques et des températures pour chacun des réservoirs sélectionnés. Ces cartes sont les éléments de base au calcul du potentiel. La troisième partie décrit les paramètres géométriques (épaisseur et profondeur) et thermiques des cinq réservoirs, et *in fine* analyse leur potentiel géothermique respectif. En conclusion du rapport, des perspectives au projet sont proposées.

En comparant les estimations quantitatives des potentiels géothermiques des cinq réservoirs clastiques étudiés, 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 » ;
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 12,5%, perméabilité de 360 mD) mais très variable ;
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 ;
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.

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). 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 l'Île 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.

Potentiel des réservoirs	Zone centrale	Zone est
Grès de 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 récapitulatif des potentiels géothermiques (estimés en GJ/m²) dans les réservoirs étagés du Trias, situés sous la zone d'exploitation du Dogger en distinguant les zones centrale et orientale de la région Ile de France.

En focalisant notre attention sur la région Ile de France, siège de l'exploitation géothermique actuelle, 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 (Ile de France), 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 (cf. tableau ci-dessus). Situés dans la partie orientale de d'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 (voir tableau ci-dessus). 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 triasique, 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 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.

Pour conclure, dans la mesure où les paramètres pétrophysiques sont souvent très variables d'un site à l'autre au sein d'un même réservoir, il s'agirait, dans la suite du projet, de quantifier ces paramètres à l'échelle des cibles à fort potentiel géothermique retenues dans notre étude. Les paramètres de transmissivité, et donc de débits sont essentiels à une exploitation géothermique durable de l'aquifère.

Un programme de travail pour un projet CLASTIQ-2 est finalement esquissé.

Sommaire

1. introduction	11
1.1. PROBLEMATIQUE	11
1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE, DEMARCHE ADOPTEE ET DELIVRABLE	12
2. Géologie du Trias du Bassin de Paris et des réservoirs clastiques associés ..	15
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE	15
2.2. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES RESERVOIRS CLASTIQUES DU TRIAS	19
2.2.1. Sélection des réservoirs clastiques du Trias	19
2.2.2. Rappel sémantique adapté aux sédiments clastiques	22
2.2.3. Les « Grès de Donnemarie »	25
2.2.4. Les « Grès de Sainte Colombe-Voulzie »	28
2.2.5. Les « Grès de Chaunoy ».....	29
2.2.6. Les « Grès de Boissy »	31
2.2.7. Les « Grès du Rhétien marin ».....	32
2.2.8. Evaluation du potentiel géothermique dans les années 80	33
3. Démarche méthodologique	37
3.1. LES ETAPES METHODOLOGIQUES.....	37
3.2. ETAPE 1- CONCEPTION ET CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES « RESERVOIRS CLASTIQUES ».....	37
3.2.1. Sélection des forages pétroliers utiles.....	37
3.2.2. Sources de données.....	38
3.2.3. Conception de la base de données « Réservoirs clastiques».....	40
3.3. ETAPE 2 - METHODE D'ELABORATION DES CARTES DES ISOHYPSES ET ISOPAQUES DES RESERVOIRS CLASTIQUES	41
3.4. ETAPE 3 - CALCUL DES TEMPERATURES DES RESERVOIRS.....	42
3.5. ETAPE 4 - METHODE DE CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	46
3.5.1. Définition de la ressource géothermale	46
3.5.2. Calcul de la ressource de base, chaleur en place	46
3.5.3. Calcul de la chaleur exploitable (= potentiel géothermique).....	48

3.5.4. Potentiel du Trias clastique du Bassin de Paris	49
4. Géométrie, température et potentiel géothermique des réservoirs clastiques	51
4.1. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE DONNEMARIE	52
4.1.1. Géométrie et température du réservoir	52
4.1.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)	53
4.2. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE SAINTE COLOMBE-VOULZIE	58
4.2.1. Géométrie et température du réservoir	58
4.2.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)	58
4.3. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE CHAUNOY	63
4.3.1. Géométrie et température du réservoir	63
4.3.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)	63
4.4. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE BOISSY	69
4.4.1. Géométrie et température du réservoir	69
4.4.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)	69
4.5. RESERVOIR CLASTIQUE DU RHETIEN MARIN	75
4.5.1. Géométrie et température du réservoir	75
4.5.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)	75
4.6. DISCUSSION : POTENTIEL DES RESERVOIRS DU TRIAS	81
5. Conclusions et perspectives.....	87
5.1. CONCLUSIONS	87
5.2. PERSPECTIVES AU VOLET « BASSIN DE PARIS » DE CLASTIQ.....	87
6. Bibliographie	91

Liste des illustrations et annexe

Figure 1 : Carte de localisation des failles majeures au toit du Trias du Bassin de Paris (BRGM)	16
Figure 2 : Carte d'extension et d'épaisseur des réservoirs du Trias (modifié d'après Housse et Maget, 1976).....	18
<i>Figure 3 : Log litho-stratigraphique synthétique des réservoirs du Bassin de Paris.....</i>	<i>20</i>
Figure 4 : Coupe lithostratigraphique schématique du Trias du Bassin de Paris (modifié de Delmas et al., 2002, Pl. 47).....	21
<i>Figure 5 : Hiérarchie des hétérogénéités dans un réservoir fluviatile (d'après Weber, 1986). Les corps gréseux sont représentés en jaune et les dépôts argileux en vert.</i>	<i>24</i>
Figure 6 : Coupes synthétiques des réservoirs du Trias du Bassin de Paris (modifié de Mégnien et al., 1980)	26
Figure 7 : Position des forages pétroliers recoupant le Trias, sur un fond géologique du Bassin de Paris (extrait de la carte géologique de la France au 1/1000.000).	38
Figure 8 : Exemple de corps du log fondamental de forage géré par le BEPH.....	39
<i>Figure 9 : Extrait de la base de données avec ses rubriques et un exemple d'informations compilées.....</i>	<i>40</i>
Figure 10 : Histogramme des résidus par rapport à la température moyenne (T_{res})	42
Figure 11 : Comparaison entre variogramme expérimental et variogramme théorique dans le plan horizontal	44
Figure 12 : Comparaison entre variogramme expérimental et variogramme théorique dans le plan vertical	44
Figure 13 : Validation croisée des données.....	45
Figure 14 : Carte de localisation des doublets géothermiques en cours d'exploitation dans le Dogger du Bassin de Paris (source BRGM)	52
Figure 15 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès de Donnemarie (modifiée d'après Delmas et al., 2002)	54
Figure 16 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Donnemarie (partie ouest du bassin), (modifiée d'après Delmas et al., 2002)	55
Figure 17 : Carte des températures au toit des Grès de Donnemarie.....	56
Figure 18 : Carte du potentiel géothermique des Grès de Donnemarie, souligné par des isopotentiels à un pas de 3 GJ/m ²	57
Figure 19 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès de Sainte Colombe-Voulzie (modifiée d'après Delmas et al., 2002)	59
Figure 20 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Sainte Colombe-Voulzie (modifiée d'après Delmas et al., 2002)	60
Figure 21 : Carte des températures au toit des Grès de Sainte Colombe-Voulzie.....	61
Figure 22 : carte du potentiel géothermique des Grès de Sainte Colombe-Voulzie, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m ²	62

Figure 23 : Carte des isohypses du toit des Grès de Chaunoy (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	65
Figure 24 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Chaunoy (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	66
Figure 25 : Carte des températures au toit des Grès de Chaunoy	67
Figure 26 : Carte du potentiel géothermique des Grès de Chaunoy souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GMJ/m ²	68
Figure 27 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès de Boissy (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	71
Figure 28 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Boissy (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	72
Figure 29 : Carte des températures au toit des Grès de Boissy	73
Figure 30 : Carte du potentiel géothermique des Grès de Boissy, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m ²	74
Figure 31 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès du Rhétien marin (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	76
Figure 32 : Carte des isopaques du réservoir des Grès du Rhétien marin (modifiée d'après Delmas et al., 2002).....	77
Figure 33 : Carte des températures au toit des Grès du Rhétien marin	78
Figure 34 : Carte du potentiel géothermique des Grès du Rhétien marin, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m ²	79
Figure 35 : 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).....	84
Figure 36 : 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/m ² (en rouge).	84
Figure 37 : Carte du potentiel géothermique (chaleur exploitable) des Grès de Donnemarie, situés sous le Dogger exploité (région Ile de France). Il s'agit d'un zoom de la figure 18.	85
Figure 38 : 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 35.	85
Tableau 1 : Caractéristiques principales des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris et de leurs couvertures associées, collectées dans la littérature (synthèse bibliographique).	
Tableau 2 : Valeurs retenues pour les paramètres physiques de la formule (2)	
Tableau 3 - Récapitulatif des potentiels géothermiques (estimés en GJ/m ²), dans les réservoirs du Trias situés sous la zone d'exploitation du Dogger.....	
Annexe 1 : Conception de la base de données « Réservoirs clastiques » du Trias du Bassin de Paris.....	

1. introduction

1.1. PROBLEMATIQUE

L'exploitation des réservoirs géothermiques du territoire métropolitain est principalement concentrée dans les grands bassins sédimentaires post-paléozoïques (Aquitaine, Ile de France). 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.

Cependant, 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, l'ADEME et le BRGM se mobilisent pour évaluer les potentialités des ressources énergétiques renouvelables présentes dans les parties les plus profondes de notre sous-sol mais non encore exploitées. En particulier, au cas où les ressources géothermales de type Dogger deviendraient insuffisantes à l'horizon 2020, il faut être en mesure de caractériser les réservoirs profonds clastiques et d'évaluer leur potentiel géothermique afin de déterminer si les réservoirs clastiques du Trias peuvent être à terme une alternative aux réservoirs carbonatés du Dogger. De fait, notre zone d'étude sera menée à l'échelle du Bassin de Paris, et avec une attention particulière sur la région Ile de France, où les besoins énergétiques sont majeurs.

En complément de cette évaluation du potentiel géothermique du Trias du Bassin de Paris, un bilan sur les problèmes de réinjection dans les aquifères argilo-gréseux fait l'objet d'un second rapport (Lopez et Millot, 2008). En effet, si sur l'aspect ressource, les caractéristiques du sous-sol semblent prometteuses, en revanche, en ce qui concerne les opérations de géothermie passées, un certain nombre de déconvenues est apparu en termes de ré-injection et a remis en cause leur exploitation (e.g. cas de Melleray). Ce second rapport fera des recommandations pour pallier ces difficultés.

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet intitulé CLASTIQ, *CLAYed sandStone In Question* dont la convention n°05 05 C0079 a été signée le 20 décembre 2005 entre l'ADEME et le BRGM pour une durée de 27 mois. Cette durée a été prolongée de 6 mois par avenant signé le 4 décembre 2007 (N/ref. ADEME : 27/129), soit au total un projet de recherche d'une durée de 33 mois.

1.2. OBJECTIF DE L'ETUDE, DEMARCHE ADOPTEE ET DELIVRABLE

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer quantitativement le potentiel géothermique des réservoirs clastiques profonds du Trias, à l'échelle du Bassin de Paris, à travers une caractérisation actualisée de la composition des formations argilo-gréseuses, de leur température et de leur géométrie.

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.

Les dernières estimations du potentiel datant des années 80 (Housse et Maget, 1976 ; Haenel, 1989), il était important d'actualiser les connaissances afin d'évaluer le potentiel du Trias par réservoir élémentaire, et pas seulement de façon globale, à l'échelle du Trias, comme dans le passé.

A noter que la région Ile de France, en tant que zone d'exploitation géothermique du Dogger, requiert une attention particulière compte tenu des enjeux énergétiques.

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

Etape 1 - Sélection de 5 réservoirs clastiques profonds. Ces réservoirs argilo-gréseux sont localisés dans le Trias, dans les parties profondes du Bassin de Paris, et pour certains d'entre eux sous les zones actuellement exploitées du Dogger en région parisienne.

Etape 2 - Compilation des données publiques extraites des logs de forages pétroliers, forages géothermiques (5 sites) 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.

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.

Le présent rapport, délivrable destiné aux deux co-financeurs du projet CLASTIQ (ADEME et BRGM), est composé de trois grandes parties :

- la première partie présente la géologie du Trias du Bassin de Paris suivie d'une description détaillée des cinq réservoirs clastiques sélectionnés ;
- la seconde partie décrit la méthodologie adoptée pour réaliser les cartes de profondeur (isohypse), d'épaisseur (isopaque) et de température pour chacun des réservoirs clastiques sélectionnés ;
- la troisième et dernière partie décrit les paramètres géométriques (épaisseur et profondeur) et thermiques des cinq réservoirs, et *in fine* analyse leur potentiel géothermique respectif.

En conclusion, des perspectives au volet Bassin de Paris du projet CLASTIQ sont proposées.

2. Géologie du Trias du Bassin de Paris et des réservoirs clastiques associés

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE

Le Bassin de Paris occupe une large moitié nord de la France. Il est délimité par quatre massifs de socle cadomien/hercynien : les Ardennes au nord-est, les Vosges à l'est, le Massif armoricain à l'ouest et le Massif central au sud.

Il s'agit d'un vaste bassin intracontinental, c'est-à-dire une zone stable installée au centre d'un socle ancien, d'environ 500 km de diamètre. Il constitue une vaste dépression, dont le remplissage sédimentaire s'est réalisé en plusieurs phases, les zones de dépôts ayant varié au cours des temps géologiques, de même que la courbure du bassin, sous l'effet de la subsidence (poids des sédiments) et de la tectonique. La sédimentation dans le Bassin de Paris commence réellement au Trias, de manière globalement régulière mais marquée cependant par des variations latérales de faciès importantes (Megien *et al.*, 1980).

Concernant la structuration du bassin, les massifs montagneux et les faisceaux majeurs de failles profondes délimitent les seuils sédimentaires suivants (fig. 1) :

- le bloc armoricain est situé entre le Massif armoricain et le Massif central, et limité à l'est par le faisceau Seine-Sennely,
- le bloc bourguignon est situé entre le Massif central et les Vosges, et limité à l'ouest par le faisceau failles de Perreuse-Auxerre / St Martin-de-Bossenay et au nord par le faisceau Bray-Vittel,
- le bloc central est situé entre les deux blocs précédents, et limité au nord par le faisceau Bray-Vittel, à l'ouest par le faisceau Seine-Sennely et à l'est par le faisceau Sillon houiller-St Martin de Bossenay,
- le bloc ardennais est limité au sud par le faisceau Bray-Vittel et au nord par les Ardennes.

Ces blocs présentent des styles tectoniques différents, caractérisés individuellement par des directions de failles homogènes. Pendant le Trias, le Bassin de Paris est dans une phase tectonique en distension, en continuité avec la tectonique du Permien supérieur.

La nature et la structure du soubassement du bassin sont complexes. Il est composé principalement de roches volcaniques ou métamorphiques paléozoïques. Les bassins d'effondrement permien, dont le remplissage provient de l'érosion de la chaîne

hercynienne, constituent des bassins résiduels subsidents, à la faveur de grands accidents majeurs. Parmi les différents faciès permien que l'on peut rencontrer, on trouve les dépôts détritiques du Permo-Trias, qui se composent de conglomérats mal classés. Ce faciès n'est pas clairement différencié en forage vis-à-vis des premiers sédiments triasiques au sens strict.

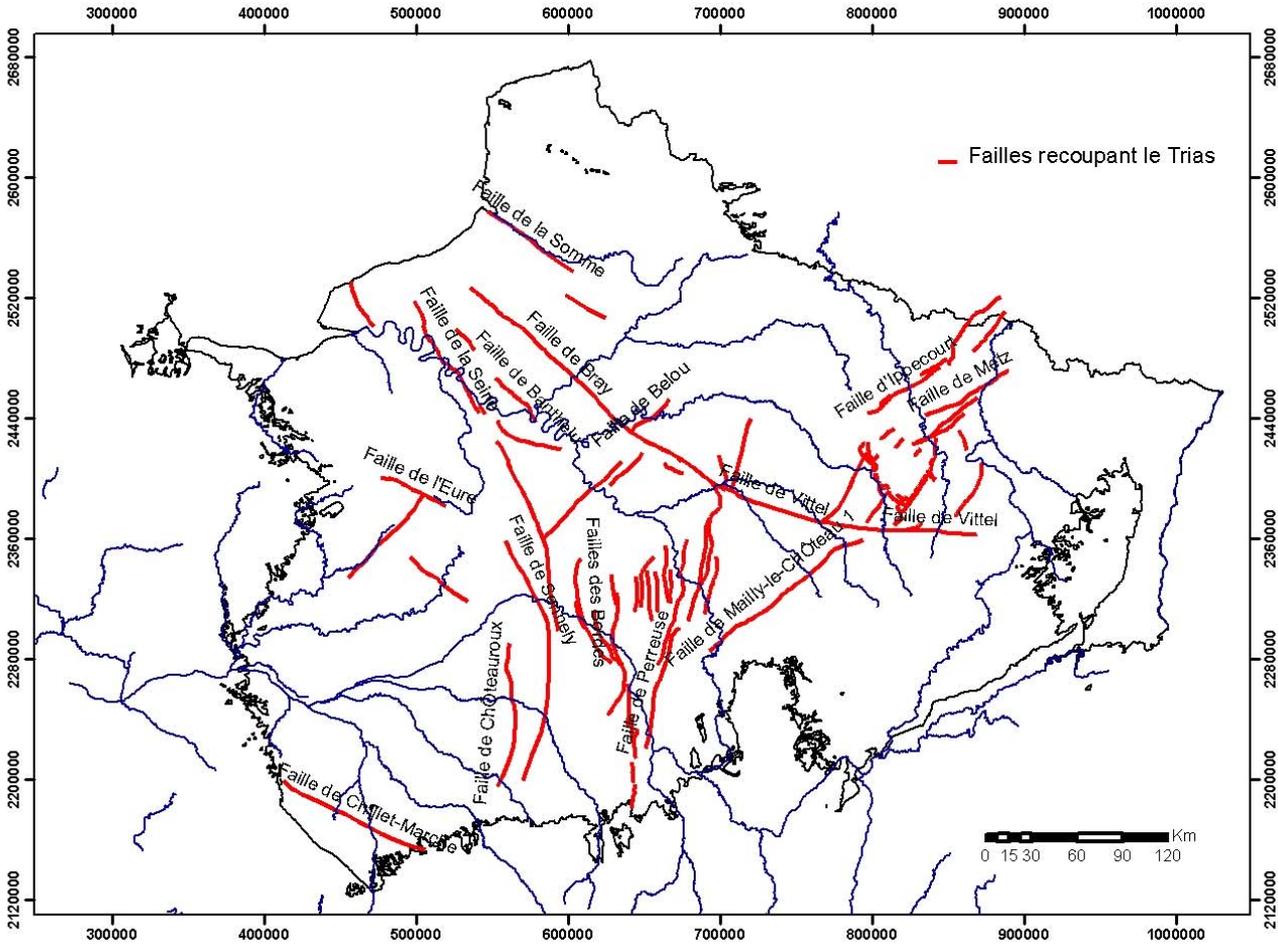


Figure 1 : Carte de localisation des failles majeures au toit du Trias du Bassin de Paris (BRGM)

La sédimentation, dans ce qui deviendra le Bassin de Paris, commence réellement à partir du Trias. Au remplissage variable des petits bassins de piedmont le long de grands accidents au Permien, succède au Trias une phase de sédimentation continentale, organisée d'ouest en est sur le bassin parisien, en direction de la mer germanique, installée essentiellement sur l'Allemagne actuelle.

Les premiers dépôts du Trias, appelés également « prisme gréseux inférieur » (Figure 2), sont des dépôts détritiques essentiellement continentaux, à tendance dolomitique, présents sur la partie orientale du Bassin de Paris. Ces dépôts sont issus de l'érosion des massifs hercyniens lors de la formation du bassin, en connexion avec la mer germanique, transgressive vers l'ouest. Ils correspondent aux Grès du Buntsandstein, constitués de dépôts fluviaux (grès) et de dépôts de plaine alluviale (argiles, marnes), localisés dans un large chenal orienté du Morvan vers la Lorraine.

Au cours du Trias moyen (Muschelkalk), ces dépôts sont recouverts par des grès fluvio-deltaïques dans la partie occidentale du bassin (Grès de Donnemarie), dont les équivalents latéraux en Lorraine correspondent à des dépôts calcaires, synonymes du maximum transgressif de la mer germanique en direction de l'ouest.

Pendant tout le Keuper, une période de sédimentation fluvio-lagunaire à tendance évaporitique succède aux dépôts fluviaux. Le domaine de sédimentation détritique s'étend selon un axe NNE-SSW, de la Champagne au Morvan, et constitue le corps fluvial inférieur (Keuper inférieur et moyen) et le corps fluvial supérieur (Keuper supérieur ; Figure 2).

Au Rhétien, un bras de mer transgressif se développe progressivement à partir de l'est (Lorraine) vers le SW entraînant des dépôts diachrones argilo-gréseux marins littoraux, à intercalations croissantes d'argiles. A ces dépôts marins correspondent latéralement, à l'ouest et au sud du bassin seulement, les dépôts continentaux des Grès de Boissy. Au sommet du Rhétien, les Argiles de Levallois, continentales, marquent la régression globale sur le Bassin de Paris et la fin de la sédimentation triasique.

Au Lias, sous l'effet du rifting de la Téthys, le bassin est marqué par la subsidence et la mer envahit la dépression de dépôts argilo-calcaires sur plusieurs centaines de mètres.

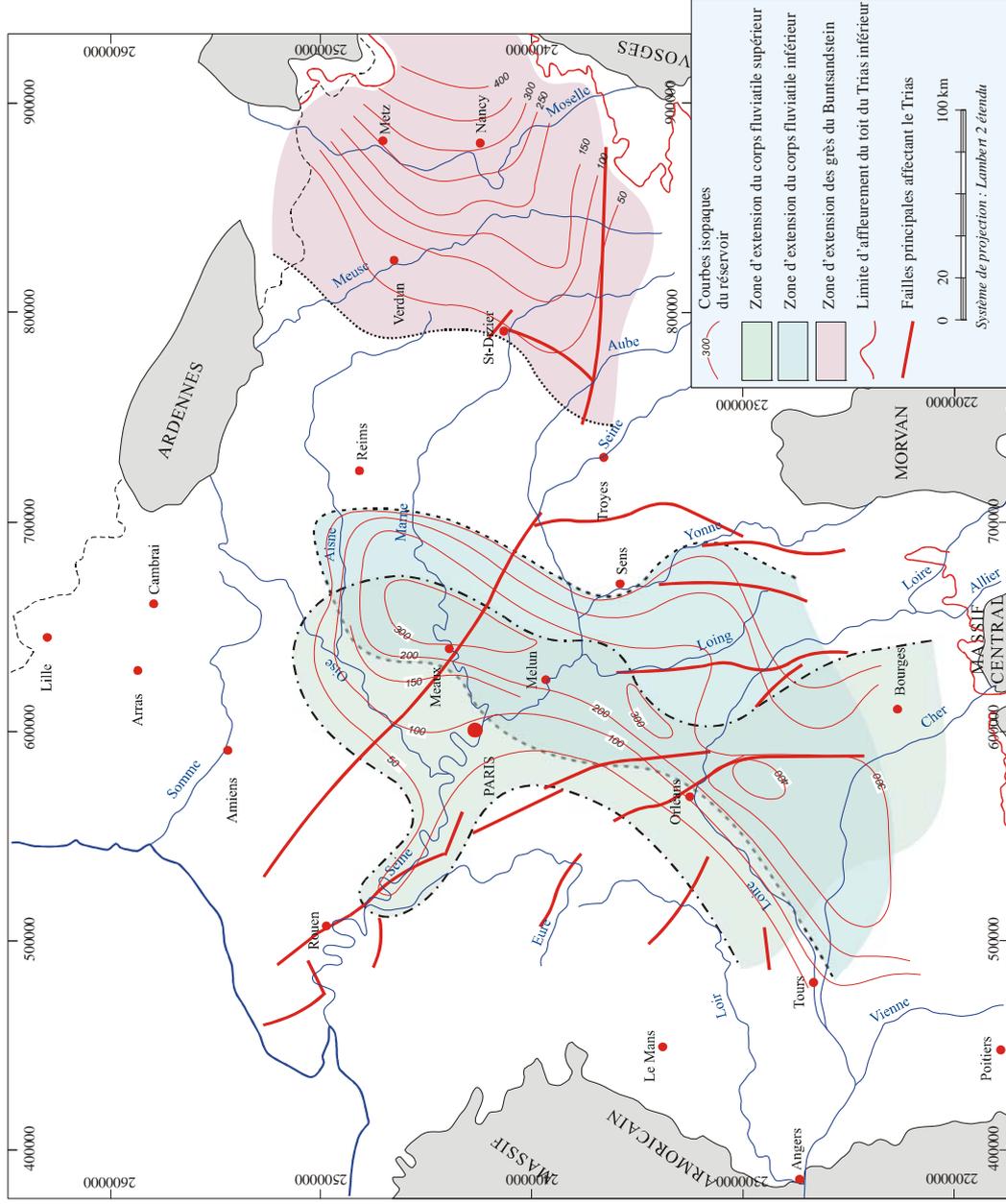


Figure 2 : Carte d'extension et d'épaisseur des réservoirs du Trias (modifié d'après Housse et Maget, 1976)

2.2. ETAT DES CONNAISSANCES SUR LES RESERVOIRS CLASTIQUES DU TRIAS

La synthèse bibliographique, qui suit, a été réalisée à partir i) des données publiques extraites des logs de forages pétroliers et des rares forages géothermiques recoupant le Trias du Bassin de Paris (§-3.2 et ann. 1), et ii) des quatre principaux documents publics suivants :

- *Potentiel géothermique du bassin parisien*, Housse B. et Maget Ph., 1976 ;
- *Potentiel géothermique du Bassin de Paris*, Cautru J-P. et Maget P. 1989, In Haenel R. (1989) – Atlas of geothermal resources in the European Community, Austria and Switzerland. International Seminar on the Results of EC Geothermal Energy Research and Demonstration, vol. 4, p.31, pl. 51 et 52 ;
- *Synthèse géologique du Bassin de Paris*, sous la direction de Claude Mégnien, Mémoire du BRGM N°101, 102 et 103, 1980 ;
- *Paris Basin, Pétroleum Potential*, Institut Français du Pétrole, Rapport régional d'évaluation pétrolière, Delmas J., Houel P. et Vially R., 2002.

Un récapitulatif des caractéristiques principales des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris et de leurs couvertures associées, collectées lors de cette synthèse bibliographique, est présenté dans le tableau 1 (en fin du chapitre 2). Préalable à cette synthèse, cinq réservoirs clastiques du Trias ont été sélectionnés.

2.2.1. Sélection des réservoirs clastiques du Trias

Les réservoirs du Trias du Bassin de Paris correspondent à deux grands ensembles majoritairement gréseux (fig. 2) : i) à l'est du bassin, centrés sur la région de la Lorraine, les grès du Trias inférieur (Buntsandstein) ; ii) dans la partie occidentale du bassin, à l'ouest d'une ligne Reims - Sens – Nevers, les grès du Trias supérieur (Keuper) dits aussi « prisme gréseux », qui se compose du « corps fluviatile inférieur » et du « corps fluviatile supérieur ».

Cinq formations clastiques du Trias, susceptibles de constituer des réservoirs géothermiques, ont été sélectionnées dans la partie occidentale du bassin (figs. Figure 3, Figure 4) :

- Les Grès continentaux de Boissy (Keuper supérieur, Rhétien),
- Les Grès du Rhétien marin (Keuper supérieur, Rhétien),
- Les Grès de Chaunoy (Keuper moyen et supérieur, Rhétien),
- Les Grès de Sainte-Colombe-Voulzie (Keuper moyen, Carnien),
- Les Grès de Donnemarie (Muschelkalk et Keuper inférieur, Anisien à Carnien).

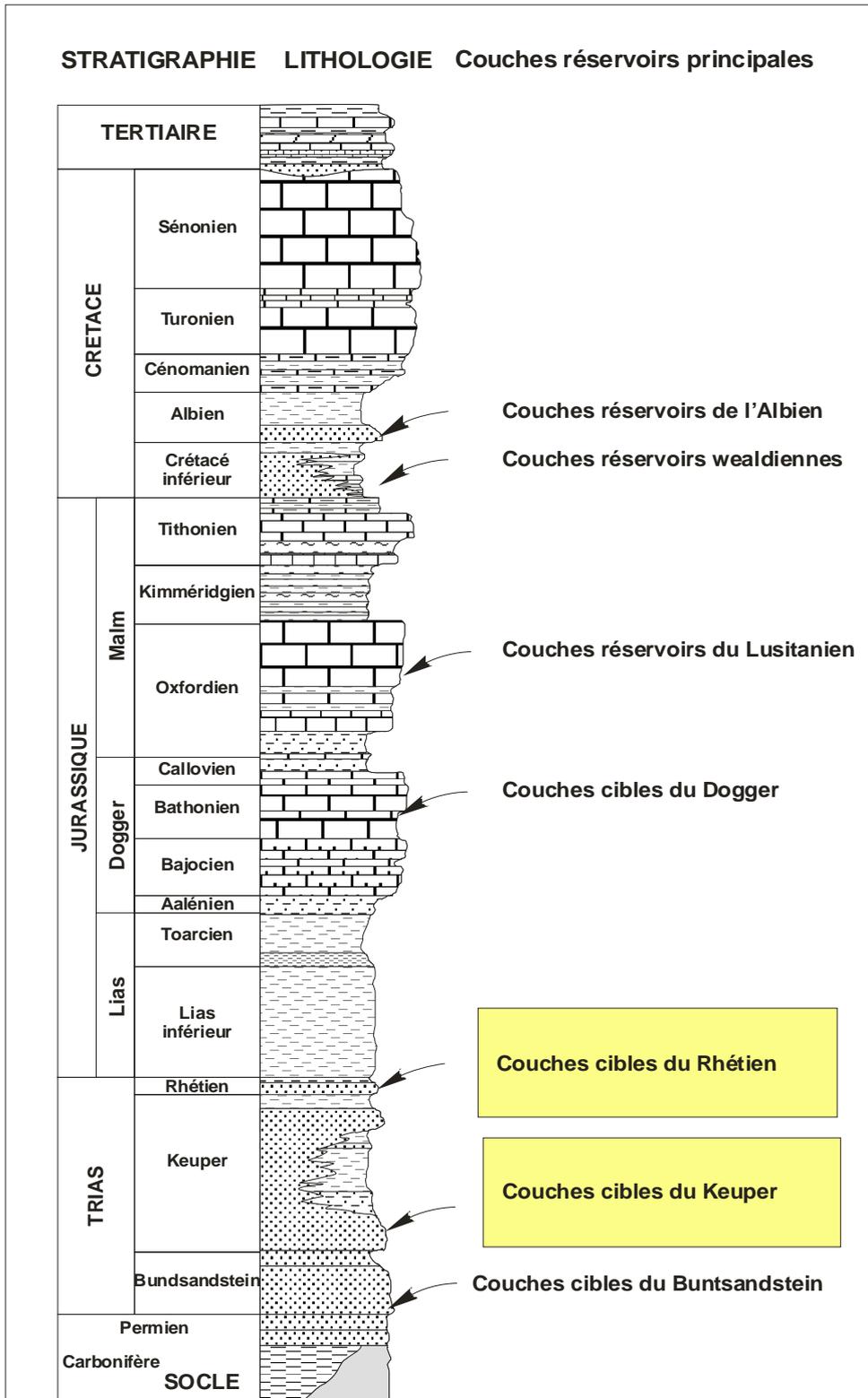


Figure 3 : Log litho-stratigraphique synthétique des réservoirs du Bassin de Paris

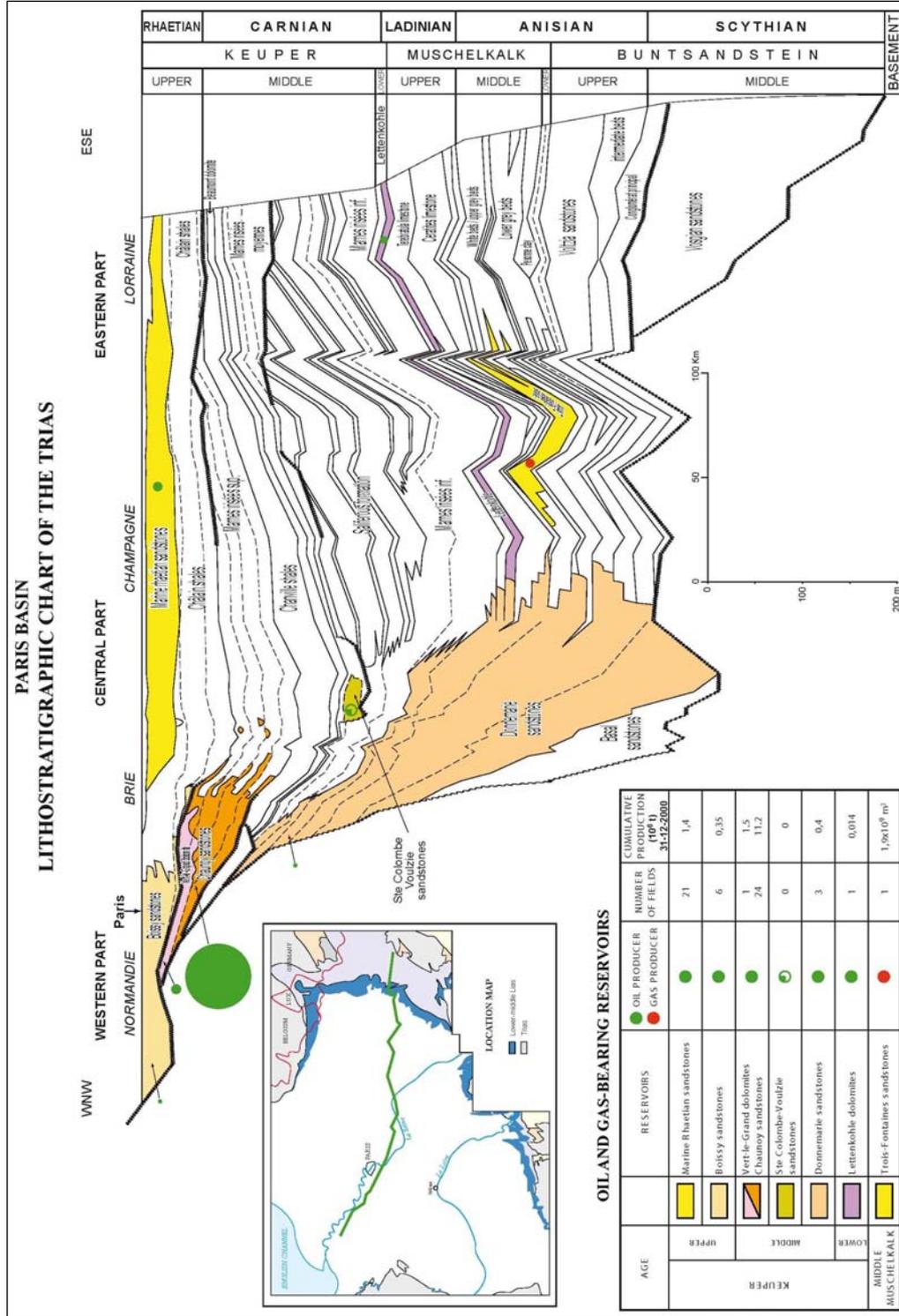


Figure 4 : Coupe lithostratigraphique schématique du Trias du Bassin de Paris (modifié de Delmas et al., 2002, Pl. 47)

A noter que le Buntsandstein (Trias inférieur, fig. 3), localisé en Lorraine n'a pas été sélectionné en tant que tel. En effet, son épaisseur diminue progressivement d'est en ouest, c'est-à-dire entre i) Lunéville (350 m @ ~30°C) où les grès sont subaffleurements et ii) Saint-Dizier où le Buntsandstein se biseaute (épaisseur < 30 m) alors que sa profondeur n'atteint que très localement 1500 m pour des températures inférieures à 70°C (région comprise entre Saint-Dizier et Verdun) (Housse et Maget, 1976). Cette évolution inverse de la profondeur par rapport à l'épaisseur du Buntsandstein est défavorable à la géothermie moyenne température.

L'extrémité occidentale du réservoir Buntsandstein (région de Bar-le-Duc), la plus profonde, est cependant abordée, en parallèle de l'estimation du réservoir de Donnemarie qui constitue un réservoir clastique atteignant le Trias inférieur dans la partie centrale du Bassin de Paris (§-4.1.2)¹.

Enfin, on signale que le potentiel géothermique du Buntsandstein a été étudié dans le cadre du projet CLASTIQ, à l'échelle des bassins rhénan (Dezayes *et al.*, 2007) et bressan (Jorand et Bouchot, 2008), qui sont situés dans la prolongation géologique orientale du Buntsandstein du Bassin de Paris.

2.2.2. Rappel sémantique adapté aux sédiments clastiques

En pré-requis à cette étude, un rappel sémantique précise la notion de formation clastique et de réservoir.

Une formation clastique est une formation sédimentaire d'origine détritique. Les formations argilo-gréseuses du Trias du Bassin de Paris sont des séries clastiques qui présentent de propriétés pétrophysiques qui en font de bons réservoirs potentiels.

Une roche réservoir est une roche présentant des propriétés pétrophysiques (porosité et perméabilité) et permettant de stocker et de faire circuler un fluide. Par extension on désigne par réservoir pétrolier ou géothermique une formation qui présente de manière globale ces propriétés et qui est composée pour une part significative de roches réservoir. Cette formation est alors délimitée par des niveaux beaucoup moins perméables qui empêchent le fluide stocké de s'échapper.

On entend par « formation », les terrains possédant des caractères communs et constituant un ensemble qu'il est possible de distinguer. Dans le cas de terrains limités par des couches imperméables et présentant des propriétés de porosité et de perméabilité, susceptibles de contenir des fluides.

¹ Le Buntsandstein constitue cependant un réservoir intéressant pour des températures avoisinant les 30°C dans la région de Nancy-Metz, où il est exploité pour une utilisation en eau potable, loisir (piscine) ou industrielle.

Sur l'aspect purement lithologique (c'est-à-dire la nature de la roche), la formation clastique, argilo-gréseuse, se compose d'une alternance de couches gréseuses (majoritaire) et de couches argileuses intercalées. On parlera par extension du « réservoir des Grès de Chaunoy » pour désigner l'ensemble des bancs gréseux et argileux (cf. §-2.2.5) de cette formation litho-stratigraphique Trias supérieur (Keuper moyen et supérieur, Rhétien).

De manière générale, les séries sédimentaires argilo-gréseuses sont caractérisées par une grande variabilité spatiale des faciès. Du point de vue de l'exploitation pétrolière ou géothermique de ces séries, cette variabilité de faciès se traduit par la variabilité des propriétés pétrophysiques qui y sont associées. Ces hétérogénéités se retrouvent à différentes échelles, du corps sédimentaire hectométrique à l'hétérogénéité de sa composition granulaire interne, infra-millimétrique (fig. 5).

En général les corps sableux se déposent en alternance avec des bancs argileux et sont plus ou moins connectés entre eux, il est donc rare de trouver des couches épaisses, propres et continues de réservoir sans argile, comme c'est en revanche le cas en milieu carbonaté (par exemple dans le Dogger du Bassin de Paris).

Sur les bases d'une synthèse bibliographique, les prochains paragraphes décrivent les formations argilo-gréseuses du Trias du Bassin de Paris, susceptibles de constituer des réservoirs géothermiques². Dans cette étude, le réservoir clastique est défini à partir de paramètres lithologiques (alternance de faciès lithologiques argilo-gréseux) et de marqueurs stratigraphiques, permettant de faire des corrélations litho-stratigraphiques à l'échelle du Bassin de Paris.

² Dans le cas d'une étude détaillée de réservoir, qui n'est pas l'objet de ce rapport, il reviendra au géologue d'étudier les matériaux dans leurs moindres détails, de proposer un scénario pour leur genèse, leur mode de mise en place et de délimiter leur répartition dans l'espace. C'est à lui que l'on demandera, à l'échelle microscopique, la nature et l'agencement des constituants minéralogiques en présence dans le réservoir avec des détails sur les pores ménagés entre les grains; et à l'échelle macroscopique il devra dire la forme et la continuité des bancs et inter-bancs (Cautru, 1984). Toutefois, en pre-requis, il sera primordial d'identifier quelles sont les échelles d'observation les plus pertinentes pour une exploitation géothermique, tant en terme de production que de réinjection.

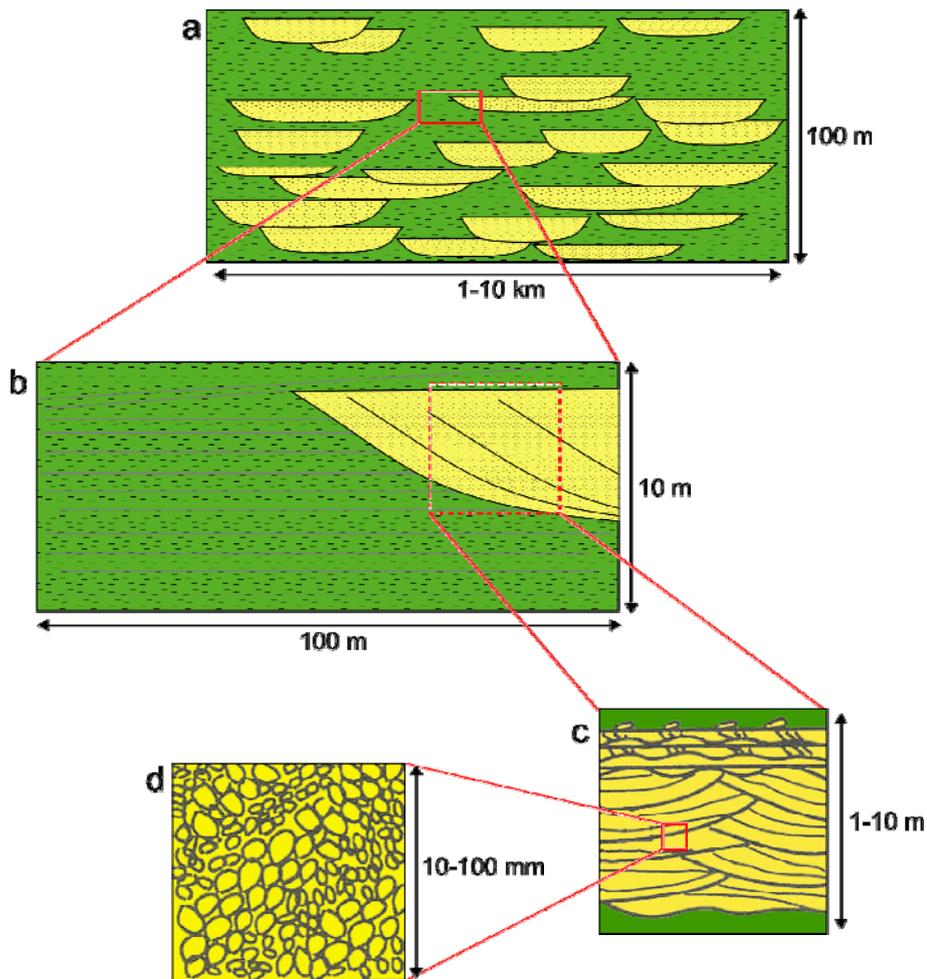


Figure 5 : Hiérarchie des hétérogénéités dans un réservoir fluviatile (d'après Weber, 1986). Les corps gréseux sont représentés en jaune et les dépôts argileux en vert.

2.2.3. Les « Grès de Donnemarie »

a) *Limites géographiques et origine des dépôts*

La formation des « Grès de Donnemarie » se localise dans la zone centrale du bassin, sur les secteurs allant de Soissons au nord, à Châteauroux au Sud, de Paris à l'ouest à Sézanne à l'est (régions de la Sologne, Est de la Beauce, une partie de la Brie et de la Champagne). Son extension est limitée vers l'est par la faille de Saint-Martin-de-Bossenay (fig. 1).

L'axe fluvial majeur s'étend du sud-ouest (Touraine) vers le nord-est (Lorraine) sur 100 à 150 km de large et environ 300 km de long. Les grès se sont déposés en onlap³ vers l'ouest sur la bordure armoricaine. La topographie plus élevée sur la bordure ouest du bassin favorise le développement de dépôts anastomosés, qui évoluent vers l'est en chenaux en tresse en environnement de plaine côtière, ce qui entraîne l'intercalation d'argiles anhydritiques entre ces dépôts. Le passage latéral de faciès vers l'est aux Marnes Irisées Inférieures et à la Formation salifère s'effectue selon une limite nord-sud Sézanne-Tonnerre.

L'érosion des massifs hercyniens entraîne l'arrivée d'une grande quantité de dépôts détritiques qui comblent progressivement le bassin. Ces apports massifs donnent naissance à deux grands corps fluviaux successifs (figs. 2, 4 et 6) :

- les Grès de Donnemarie constituent le « corps fluvial inférieur » typiques des dépôts de piedmont (Anisien à Ladinien, ou encore selon la classification germanique, du Muschelkalk au Lettenkohle) ;
- les Grès de Sainte-Colombe-Voulzie et les Grès de Chaunoy composent « le corps fluvial supérieur », lui-même décomposé en deux sous-bassins selon les aires paléogéographiques de dépôts, centrées principalement au sud de la Loire et à l'est de Paris.

La géométrie des deux corps fluviaux, inférieur et supérieur, est illustrée sur la coupe synthétique W-E du Bassin de Paris (fig. Figure 6).

Les Grès de Donnemarie sont, quant à eux, subdivisés en trois sous-ensembles. Les Grès de Donnemarie inférieurs sont composés de dépôts fluviaux conglomératiques. Les Grès de Donnemarie médians se composent de dépôts fluviaux en tresse principalement, représentés par des grès rouges de granulométrie moyenne à grossière, à ciment anhydritique et intercalations d'argiles anhydritiques. Enfin, les Grès de Donnemarie supérieurs sont également caractérisés par des dépôts fluviaux en tresse, présentant une certaine rythmicité, et des grès fins à moyens.

³ Onlap c'est-à-dire en aggradation, où les couches les plus récentes débordent les plus anciennes, en montant une pente.

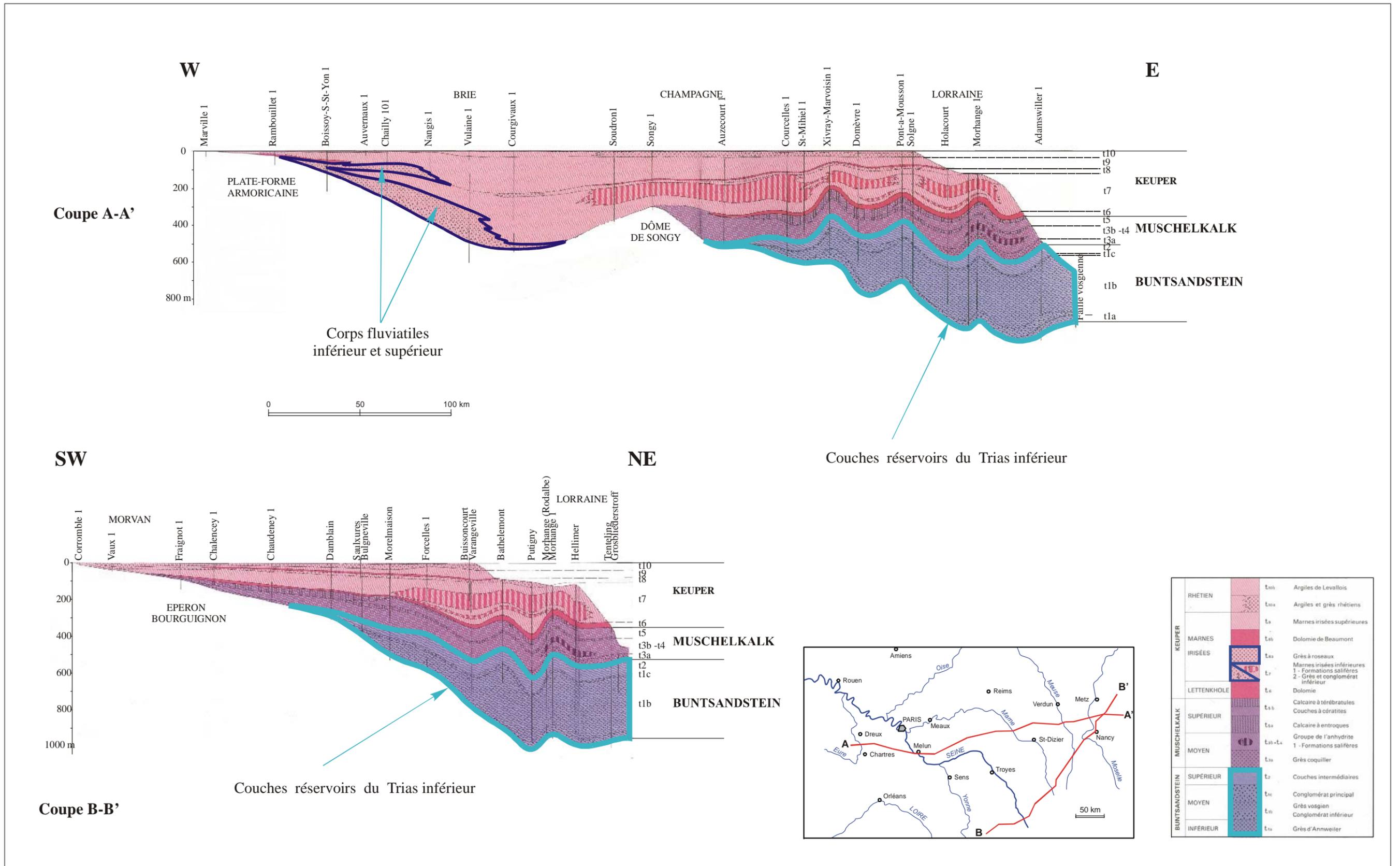


Figure 6 : Coupes synthétiques des réservoirs du Trias du Bassin de Paris (modifié de Mégnien et al., 1980)

b) Description lithologique, stratigraphique et pétrophysique

Les Grès de Donnemarie sont principalement représentés par des dépôts gréseux en tresse, d'origine fluviatile, mis en place dans un contexte évaporitique. Les grès évoluent vers des dépôts fins à moyens vers le sommet de la série. La granulométrie des dépôts décroît d'ouest en est et du sud au nord. Ils présentent des intercalations d'argiles bioturbées, à nodules de dolomie et d'anhydrite (contexte de dépôt côtier et évaporitique).

D'un point de vue lithologique :

- les Grès de Donnemarie inférieurs sont des dépôts grésos-conglomératiques, pouvant comporter à la base des galets centimétriques de quartz. Très peu de forages pétroliers atteignent ce niveau, qui est donc assez mal connu dans l'ensemble ;
- les Grès de Donnemarie médians se composent de grès rouges déposés dans des chenaux en tresse, les grains sont moyens à grossiers, légèrement feldspathiques, à ciment anhydritique et liant argileux. Ils sont organisés en bancs métriques à plurimétriques, avec des intercalations d'argiles rouges sablo-silteuses à anhydrite (dépôt en contexte côtier et évaporitique) ;
- les Grès de Donnemarie supérieurs se composent de six bancs de grès fins à moyens, localement conglomératiques, de 1 à 4 m d'épaisseur, comportant des intercalations d'argiles bariolées (environnement côtier). Un certain nombre de forages pétroliers atteignent uniquement la partie supérieure des grès de Donnemarie, cette partie du réservoir est donc la mieux connue.

Les propriétés pétrophysiques (porosité, perméabilité principalement) des grès de Donnemarie sont plutôt médiocres, sauf exception au niveau des Grès de Donnemarie supérieurs. La diagenèse est forte et s'exprime via la cimentation anhydritique. La granulométrie décroît d'ouest en est, et vers le bas de la série. Parallèlement, les qualités pétrophysiques, contrôlées par le degré de cimentation, décroissent aussi vers le bas de la série et vers l'est.

Compte tenu des données disponibles à ce jour, aucune valeur relative aux propriétés pétrophysiques n'est disponible concernant les Grès de Donnemarie inférieurs.

Les Grès de Donnemarie médians ont une porosité moyenne de 4 %, avec un maximum à 12 % (mesures issues des tests de forage). La perméabilité est en général inférieure à 4,4 mD. En moyenne, les qualités pétrophysiques des Grès de Donnemarie médians sont moins bonnes que celles des Grès de Donnemarie supérieurs.

Pour les Grès de Donnemarie supérieurs, la porosité moyenne calculée s'élève à 6 % avec un maximum pouvant atteindre 18 %. Les valeurs de perméabilité sont faibles (< 10 mD) mais peuvent atteindre jusque 1 D localement. Le réservoir « **Grès de**

Donnemarie supérieurs » présente donc les meilleures qualités pétrophysiques de la formation Grès de Donnemarie dans son ensemble.

Globalement, la salinité augmente de l'ouest vers l'est. Les valeurs relevées sont globalement de 100 g/l autour de Paris jusque 300 g/l à l'est de Provins. Pour les Grès de Donnemarie supérieurs, on recense 17 valeurs dans les rapports de fin de sondages, allant de 0,28 à 180 g/l.

La teneur en argiles (proportion d'intercalations argileuses par rapport à la totalité de l'épaisseur du réservoir argilo-gréseux) est comprise entre 10 et 20 %, sur l'ensemble du réservoir.

Les Marnes Irisées Inférieures constituent une épaisse couverture de 250 m au-dessus des Grès de Donnemarie. Le passage latéral de faciès s'effectue selon une ligne nord-sud Sézanne-Tonnerre. Il s'agit de marnes à anhydrite, déposées sur la partie est du bassin, migrant vers l'ouest en dépôts de types sebkhas (dépôts côtiers évaporitiques) appelés « formation salifère ». Cette formation est érodée plus à l'ouest où elle est remplacée par les Grès de Sainte Colombe-Voulzie ou par les Grès de Chaunoy.

2.2.4. Les « Grès de Sainte Colombe-Voulzie »

a) Limites géographiques et origine des dépôts

La formation des « Grès de Sainte Colombe-Voulzie » a une extension géographique limitée. Elle est localisée dans une étroite gouttière dissymétrique d'orientation NNE-SSW, d'environ 120 km de long, de 20 km de large au sud-ouest (environs de Provins, Nogent/Marne) et de 30 km au nord-est (environs d'Epernay).

Les Grès de Sainte Colombe-Voulzie, localisés en Brie, ont pour équivalent latéral sur l'extrémité est du bassin en Lorraine, les Grès à Roseaux et les Marnes Irisées Moyennes (« couches à Esthéries »).

La base du corps fluviatile supérieur correspond à des dépôts fluviatiles de système anastomosé, composés de grès à intercalations argileuses, en contexte lacustre ou deltaïque.

b) Description lithologique, stratigraphique et pétrophysique

Ce réservoir repose sur les Marnes Irisées Moyennes dont les dépôts se prolongent également sur la partie est du bassin. Peu d'informations sont disponibles sur ces Marnes. Elles se sont déposées sur une surface d'incision régionale dans un environnement continental de type lacustre ou saumâtre (vasière), ce qui se traduit par des dépôts de marnes et d'argiles gris-verdâtres à noires, souvent feuilletées, à intercalations de dolomie et de bancs gréseux.

Les Grès de Sainte Colombe-Voulzie sont des dépôts de chenaux anastomosés, composés de grès riches en feldspaths potassiques (issus de l'érosion des massifs hercyniens) à ciment d'argile et d'anhydrite, à intercalations d'argiles silteuses et pyriteuses (milieu de dépôt réducteur) à débris végétaux.

Une dizaine de valeurs de porosité de matrice sont recensées sur les rapports de fin de sondage (RFS) disponibles et donnent une plage de données de 2 à 25 %, la gamme des moyennes réalisées sur les mesures se situant entre 9,4 % et 14,4 %.

La perméabilité est très variable, comprise entre 0,01 et 500 mD. Cependant, dans l'ensemble, ce réservoir présente une **perméabilité faible**.

Il n'y a pas d'information disponible sur la teneur en argiles dans les rapports de fin de sondage.

Les cartes d'iso-salinité disponibles (Housse et Maget, 1976) se rapportant au corps fluviatile du Trias supérieur, qui regroupe les réservoirs des Grès de Sainte-Colombe-Voulzie, des Grès de Chaunoy, des Grès de Boissy et des Grès du Rhétien marin, donnent des valeurs comprises, d'ouest en est, entre 50 et 200 g/l. Suite à l'analyse des rapports de fin de sondage, trois valeurs de salinité ont été relevées : 312 g/l de 2881 à 2890 m (Courgivaux 1) et 160 g/l de 2751,5 à 2759 m et de 2776 à 2781 m (Leudon), c'est-à-dire pour des puits localisés entre Sézanne et Melun et enfin 26,6 g/l de 1171 à 1458 m (Blancafort 1) pour la région au nord-ouest de Salbris.

Les grès de Sainte Colombe-Voulzie présentent donc des propriétés pétrophysiques médiocres.

La couverture sédimentaire rencontrée au toit des Grès de Sainte Colombe-Voulzie se compose de la formation de la Dolomie de Beaumont (environ 5 m d'épaisseur moyenne) et de la formation des Argiles de Chanville (environ 15 m), l'ensemble constituant la base des Marnes Irisées Supérieures. Il s'agit dans l'ensemble d'argiles à anhydrite et bancs de dolomie, à intercalations de bancs d'anhydrite, caractéristiques des environnements lacustres et de plaine côtière, marquant la transgression marine en provenance de l'est (mer germanique).

2.2.5. Les « Grès de Chaunoy »

a) Limites géographiques et origine des dépôts

La formation des « Grès de Chaunoy » se localise dans l'extrémité occidentale du Bassin de Paris, dans un secteur défini à l'est et au nord-est de Melun.

Cette formation est située au sein du corps fluviatile supérieur du Keuper (d'âge norien plus précisément), précédemment décrit. Latéralement, au-delà d'une ligne Melun-Argenteuil, les Grès de Chaunoy se poursuivent vers l'est vers les Marnes Irisées Supérieures. L'aire de répartition géographique de ce réservoir est translatée vers

l'ouest dans la région d'Orléans-Tours (Sologne).

Sur le plan structural, le réservoir de Chaunoy ⁴ représente un anticlinal faillé de direction NE-SW, d'une largeur moyenne de 100 km environ, fermé le long de la faille majeure de Perreuse d'orientation SSW-NNE (fig. 1).

b) Description lithologique, stratigraphique et pétrophysique

Le réservoir des Grès de Chaunoy se compose d'une alternance de bancs gréseux et d'interbancs argileux, d'épaisseur métrique à pluri-métrique (1-5 m), à ciment de dolomie et parfois d'anhydrite. Un banc de dolomie (dolocrète) appartenant à la formation de la Dolomie de Vert-le-Grand constitue un banc repère important qui coiffe le réservoir de Chaunoy et marque la transition vers le réservoir Rhétien sus-jacent.

Ces dépôts représentent un environnement de type cône alluvial constitué de petits chenaux fluviaux en tresse et de dépôts lacustres. Bien présents sur la partie ouest du bassin, ils évoluent progressivement à l'est et dans la partie centrale vers des dépôts lacustres ou de plaine côtière, avec des marnes à anhydrite (« Marnes Irisées Supérieures »).

De manière plus générale, les dépôts fluviaux en tresse des Grès de Chaunoy se sont déposés lors d'une remontée du niveau de base et ont été inondés au sommet par des argiles dolomitiques de plaine côtière (Dolomie de Vert-le-Grand et Argiles de Châlain). Cette discontinuité marque un événement majeur lié à la rupture de la Pangée et enregistre un basculement du bassin vers l'ouest-nord-ouest.

Classiquement, dans le secteur sud-ouest du Bassin de Paris, en Sologne, ces dépôts d'âge triasique sont attribués au réservoir des « Grès de Chaunoy », défini à l'origine dans le centre du bassin. Ils représentent dans ce secteur environ 100 à 180 m d'épaisseur (Delmas *et al.*, 2002 ; Guillocheau *et al.*, 2000). Les travaux de Merzeraud (1992) et plus récemment, Hamon et Merzeraud (2005), ont montré que seuls les 40 m de dépôts argilo-gréseux présents à la base des 180 m de dépôts gréseux en Sologne sont corrélés aux « Grès de Chaunoy » sens strict dans le centre du Bassin de Paris. Le reste de la série est corrélé au Rhétien et à l'Héttangien (base du Lias, Jurassique inférieur). On considère dans cette étude l'ensemble de la série argilo-gréseuse du réservoir de Chaunoy (« Grès de Chaunoy » sens large). En Sologne, ce sont donc les grès du Norien, du Rhétien et de la base du Lias qui sont représentés.

La porosité (tests sur carottes ou résultats de diagraphies, relevés sur les RFS) est en moyenne de 12,5 % et peut atteindre au maximum 22 %. Les rapports de fin de

⁴ A titre d'information, le champ pétrolier de Chaunoy en Seine-et-Marne est le plus important de France avec 25 % de la production d'huile du bassin parisien (plus de 10 millions de tonnes d'huiles produites depuis 1983) pour une surface productive de 53 km² et représente 74 % du volume du réservoir des « Grès de Chaunoy ».

sondage relevés dans le cadre de cette étude représentent 120 valeurs de porosité sur un ensemble de 335 puits recensés, des valeurs fluctuant entre 0,1 et 29,6 %.

Concernant les valeurs recensées pour la perméabilité, celles-ci sont moins bien renseignées avec seulement 27 valeurs sur 335 puits pétroliers, mais également fortement variables, de 0 à 2518 mD, la moyenne globale, dont la signification est limitée, se situant autour de 360 mD.

La seule valeur rencontrée du degré d'argilosité fait état d'une teneur de 21 % (puits de Conquillie 1) par rapport à la totalité de l'épaisseur du réservoir argilo-gréseux.

2.2.6. Les « Grès de Boissy »

a) Limites géographiques et origine des dépôts

La formation des « Grès de Boissy » est présente à l'ouest et au sud du Bassin de Paris. Sa répartition géographique s'effectue selon plusieurs zones :

- une gouttière orientée NW-SE, centrée sur Compiègne, au nord de Paris ;
- les secteurs couvrant les régions d'Orléans-Châteauroux et Tours-Bourges, jusqu'à Paris et la région à l'est de Paris.
- une gouttière orientée NW-SE de Paris jusqu'à Rouen, reprenant la direction majeure de la faille de la Seine (fig. 1).

Ces dépôts gréseux, associés aux argiles vertes riches en pyrite de la formation des Argiles de Levallois, annoncent la régression globale de la mer germanique sur l'ensemble du Bassin de Paris.

b) Description lithologique, stratigraphique et pétrophysique

Les dépôts des Grès de Boissy, d'âge rhétien (Keuper supérieur), sont des dépôts continentaux, caractérisés par des chenaux gréseux isolés, intercalés de dépôts argileux de plaine d'inondation. De manière générale, cette formation est peu renseignée dans la littérature compte tenu de la faible extension géographique de ces dépôts et du nombre réduit de puits la traversant (15 puits recensés au total).

La partie supérieure des Grès de Boissy à l'ouest du bassin et la partie sommitale des Argiles de Châlain à l'est sont latéralement corrélées aux dépôts gréseux du Rhétien marin.

La porosité moyenne, établie à partir de 7 valeurs de porosité relevée dans les rapports de fin de sondage, est d'environ 13,5 %.

Pour la perméabilité, les mesures relevées font état d'un large éventail de valeurs, de 0,33 à 2113 mD, les moyennes réalisées sur les valeurs minimales et maximales donnent 21 et 874 mD.

Aucune valeur d'argilosité n'a été enregistrée dans les rapports de fin de sondage.

Concernant les teneurs en salinité, deux mesures seulement ont été relevées : 60 et 75 g/l.

2.2.7. Les « Grès du Rhétien marin »

a) Limites géographiques et origine des dépôts

Comme son nom l'indique, la formation des « Grès du Rhétien marin » est composée de sédiments clastiques d'origine marine. Recouvrant la partie est du Bassin de Paris, jusqu'à la Brie et la Champagne, les apports en provenance du Luxembourg se traduisent par les dépôts gréseux marins, empruntant un bras de mer transgressif depuis le NE vers le SW.

Les dépôts du Rhétien représentent des faciès ayant suivi une évolution diachrone :

- depuis des dépôts dolomitiques côtiers de type sebka avec des passées sableuses, représentés par les « Marnes Irisées Supérieures »,
- vers des dépôts d'environnement marin fermé c'est-à-dire des grès littoraux, parfois fluviaux-deltaïques, représentés par les « Grès du Rhétien marin ».

L'intercalation des passées argileuses des « Argiles de Levallois » sus-jacentes (Keuper sup., Rhétien) est donc croissante du nord-est vers le sud-est.

b) Description lithologique, stratigraphique et pétrophysique

La base du Rhétien est difficile à déterminer avec certitude. Si celle-ci n'est pas marneuse, le contact en forage peut être marqué par le passage des grès aux argiles rouges à gypse et anhydrite (Argiles de Châlain).

Les Grès du Rhétien marin sont des dépôts marins internes, littoraux, parfois fluviaux-deltaïques, composés de bancs de grès fins à moyens, gris et bioturbés à intercalations d'argiles silteuses noires, à cimentation locale de dolomie ou de silice.

Les formations qui constituent la couverture du réservoir Rhétien marin sont les suivantes. Au toit du réservoir, les Argiles de Levallois ont une faible épaisseur (3-7 m) mais ont parfois été utilisées comme matériaux d'étanchéité. Au-dessus, les marnes hettangiennes (Lias, Jurassique inférieur) constituent une couverture argileuse d'épaisseur conséquente, de 300-400 m.

Les valeurs de porosité relevées dans les rapports de fin de sondage (105 valeurs) sont assez nombreuses par comparaison aux autres réservoirs. Les valeurs constatées s'étendent de 0,1 à 29 %. La moyenne calculée sur les valeurs minimales est de 7 % et la moyenne calculée sur les valeurs maximales est de 13,8 %.

Les valeurs de perméabilité mesurée (69 mesures disponibles dans les rapports de fin de sondage) montrent des valeurs comprises entre de 0,1 à 2500 mD, la moyenne se situant autour de 92 mD.

Le degré d'argilosité n'est pas renseigné quantitativement dans les sondages. D'après la distribution des faciès, on constate un enrichissement en argiles du nord-est vers le sud-ouest, en parallèle de la diminution de l'épaisseur des grès. Les intercalations d'argilites en Lorraine préfigurent l'arrivée des Argiles de Levallois.

La salinité n'a pas été renseignée dans les rapports de fin de sondages disponibles. Les seules données sont compilées dans la synthèse de Housse et Maget (1976). Des cartes d'iso-salinité renseignent le corps fluviatile du Trias supérieur. Cet ensemble sédimentaire regroupe cependant plusieurs réservoirs (Grès de Sainte-Colombe-Voulzie, Grès de Chaunoy, Grès de Boissy et Grès du Rhétien marin), ce qui ne permet pas d'isoler un réservoir en particulier. D'après ces cartes, la salinité est croissante d'ouest en est de 50 à 200 g/l.

2.2.8. Evaluation du potentiel géothermique dans les années 80

L'évaluation du potentiel géothermique du Trias du Bassin de Paris a été réalisée par Housse et Maget en 1976 puis par Cautru et Maget en 1989, dans le cadre d'une évaluation globale effectuée sur l'ensemble de la colonne stratigraphique du Bassin de Paris.

Dans le rapport Housse et Maget (1976), les auteurs caractérisent les réservoirs du Trias en fonction de leur âge - Rhétien, Trias moyen et supérieur, Trias inférieur – et de leur répartition spatiale -partie orientale du bassin (Lorraine) *versus* partie centre-ouest du bassin et conclue par une analyse qualitative de leur potentiel géothermique.

Dans leur atlas (Haenel, 1989), Cautru et Maget ont effectué une évaluation qualitative du potentiel de l'ensemble du Trias du Bassin de Paris en distinguant les parties ouest et est du bassin (se reporter à la figure 36, située en fin de rapport).

Les conclusions des deux rapports sont complémentaires :

- les ensembles détritiques du Trias moyen et du Trias supérieur constituent des réservoirs hétérogènes, dont les paramètres pétrophysiques sont généralement mal connus. Les zones les plus favorables forment un axe NNE-SSW allant de Vierzon au sud à la confluence Aisne-Oise au nord en passant à l'Est d'Orléans dont les valeurs de potentiel sont comprises entre 2,5 et 15 GJ/m² (se reporter à la figure 36, située en fin de rapport) ;

- le Trias inférieur (Buntsandstein), situé à l'est (Lorraine), forme un excellent réservoir géothermique superficiel dont les qualités diminuent au fur et à mesure qu'il s'enfonce vers le centre du bassin. Le long de la Moselle, les caractéristiques du réservoir sont très bonnes et la salinité réduite ; mais la température de l'ordre de 30°C limite l'utilisation géothermique de l'eau. Les caractéristiques du réservoir sont probablement suffisantes jusqu'à la Meuse où les températures de l'eau atteignent 50°C, mais l'eau est déjà très salée. Les valeurs de potentiel obtenues par Cautru et Maget, comprise entre 1 et 2,5 GJ/m², diminuent en allant vers l'ouest du bassin (se reporter à la figure 36, située en fin de rapport).

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/Marne) et de 30 km au NE (environs d'Épernay)	Sainte 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	A 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 Armoricaïn 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	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	A l'Ouest de la faille de Saint-Martin-de-Bossenay	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

Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris

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 (à 2455 m) g/l	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 m (Courgivaux 1) ; 160 g/l de 2751,5 à 2781 m (Leudon) ; 26,6g/l (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). La salinité augmente de l'Est vers l'Ouest	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 1 : Pile lithostratigraphique du Trias du Bassin de Paris avec les caractéristiques principales des réservoirs clastiques (surlignés en jaune) et de leurs couvertures associées, collectées dans la littérature.

3. Démarche méthodologique

3.1. LES ETAPES METHODOLOGIQUES

L'évaluation du potentiel géothermique des réservoirs argilo-gréseux du Bassin de Paris nécessite quatre étapes méthodologiques successives :

Etape 1 – Conception et constitution de la base de données « réservoirs » composées de paramètres géométriques, thermique et pétrophysiques (porosité, perméabilité, ...) des réservoirs clastiques étudiés. L'objectif de cette étape est de structurer la compilation des données publiques extraites des logs de forages pétroliers ;

Etape 2 – Méthode d'élaboration des cartes de profondeur (isohypse) et d'épaisseur (isopaque) des réservoirs clastiques, à partir des cartes existantes de l'IFP (Delmas *et al.*, 2002) et des connaissances litho-stratigraphiques du Trias (étape 1);

Etape 3 – Méthode de calcul des températures des réservoirs clastiques sélectionnés, à partir de l'interpolation 3D des données thermiques de fond de forages pétroliers et de forages géothermiques ;

Etape 4 – Méthode de calcul de l'évaluation du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) de chacun des réservoirs clastiques sélectionnés via la combinaison des données géométriques (étape 2) et thermiques (étape 3).

3.2. ETAPE 1- CONCEPTION ET CONSTITUTION DE LA BASE DE DONNEES « RESERVOIRS CLASTIQUES »

La zone d'étude couvre l'ensemble du Bassin de Paris, dans lequel nous disposons de 3679 forages réalisés par l'industrie pétrolière, gérés par le Bureau Exploration-Production des Hydrocarbures⁵ (BEPH).

3.2.1. Sélection des forages pétroliers utiles

Parmi les 3679 forages, la première phase a consisté à sélectionner les puits ayant atteint ou dépassé le toit du Trias. Une seconde phase a consisté à ne retenir que les forages disposant d'un log fondamental et d'un rapport de fin de sondage. C'est en

⁵ Le BEPH est un organisme public sous tutelle du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement Durables. Il garantit une mise à jour exhaustive de la banque de données pétrolières du sous-sol français.

effet ces documents qui rassemblent, en théorie, les informations utiles concernant notamment les paramètres pétrophysiques (porosité, perméabilité, ...) des formations clastiques du Trias (voir aussi le chapitre §.2.2). Ainsi, 617 forages (fig. 7) ont été sélectionnés pour constituer la base de données « réservoirs clastiques du Bassin de Paris ».

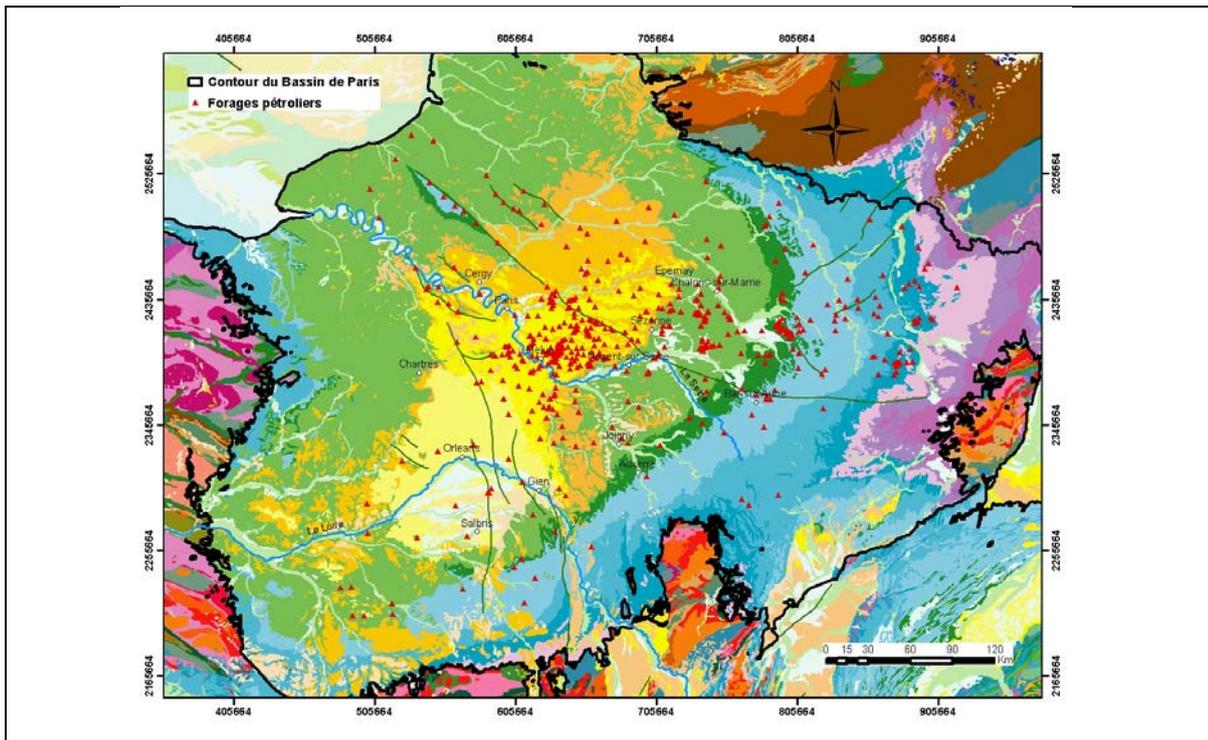


Figure 7 : Position des forages pétroliers recoupant le Trias, sur un fond géologique du Bassin de Paris (extrait de la carte géologique de la France au 1/1000.000).

3.2.2. Sources de données

Les données composant la base en question sont issues de deux principales sources d'information : les logs fondamentaux et les rapports de fin de sondages (RFS).

Les logs fondamentaux sont des documents initialement créés sous forme papier lors de la phase d'exploration-production des champs pétroliers puis scannés. Le corps du log fondamental (fig. 8) recense des informations concernant les formations géologiques rencontrées telles que les étages géologiques traversés, le nom des différentes formations reconnues, leur description lithologique et les profondeurs du toit et du mur associées, les logs des diagraphies effectuées, les niveaux carottés. Des informations sur la porosité et la perméabilité de certains niveaux forés sont éventuellement disponibles. Les informations issues de mesures directes sur la formation traversée sont peu nombreuses et en majorité discontinues au sein d'une même formation géologique. Le bas du log contient des informations telles que les

comptes rendus de déviation du puits, la légende ainsi que des informations sur les différentes opérations (diagraphies, tests, et essais).

Les rapports de fin de sondage contiennent toutes les informations relatives aux opérations de forages depuis les objectifs jusqu'aux résultats obtenus. Les auteurs justifient dans ce rapport les choix faits en termes de positions des forages, de méthodes et d'outils. Tous les tests, essais et mesures en laboratoires y sont décrits. Ce document constitue la source de toutes les informations pétrophysiques et hydrodynamiques contenues dans la base de données. Toutefois, les forages ayant été réalisés pour l'exploration pétrolière, il convient de noter que les informations acquises concernent généralement les formations à fort potentiel pétrolier. Certaines formations ciblées dans le cadre du présent projet sont peu renseignées car elles ne constituent pas des cibles majeures pour les pétroliers, c'est le cas par exemple des « Grès de Boissy ».

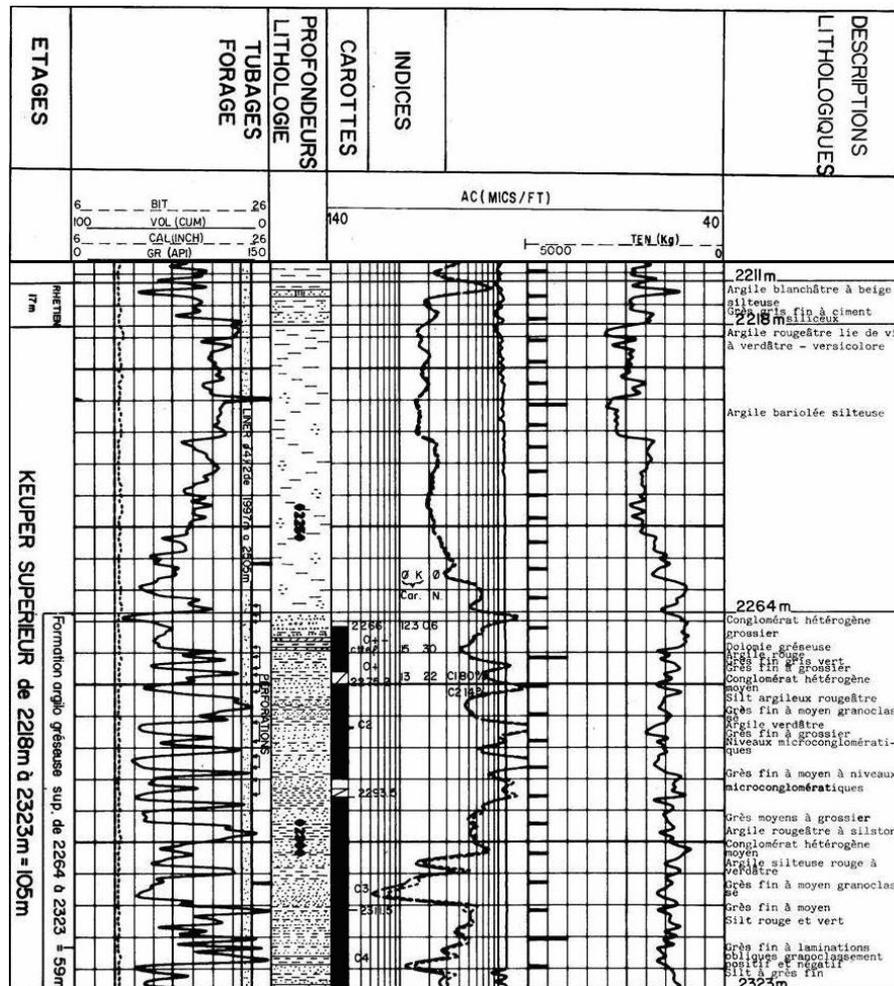


Figure 8 : Exemple de corps du log fondamental de forage géré par le BEPH

3.2.3. Conception de la base de données « Réservoirs clastiques »

Afin de structurer les données utiles à la caractérisation des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris, une base de données a été créée (Ossi, 2008, fig. 9).

Au total, la base de données « Réservoirs clastiques » contient 617 forages.

Les champs composant cette base sont détaillés dans l'annexe 1.

N° Archivage numérique	BRGM_IND	X	Y	Nom puits	Profondeur totale forée	Porosité quantitative	Perméabilité	nature fluide (débit, perte)	Caractéristiques Fluides (salinité)	productivité émissivité/transmissivité	z toit Trias	z mur Trias	z toit Chaunoy	z mur Chaunoy	épaisseur chaunoy
14-1002-		683363.76	2412346.00	Coergivaux 1	3186.6				à (2881,6-2890,3m eau salée 312g/l)		2642	3180	2757	2791	34
14-1116-	02223\0003	627515.24	2350554.45	CHATEAU LONDON	2664.3				à (2881,6-2890,3m eau salée 312g/l)						120
14-1499-	03293\0001	648202.03	2330213.01	CHATEAUJUREN ARD	1975.8				à (2175,30-2199,60 m) 49,7g/l		2126.53	2664.3	2135	2255	80
14-1539-		563000.00	2287839.39	VILLEBOURGEON	1536.38				Grès 1940-1971 Grès 1940-1975m 4,7mD		1767.5	1975.8	1830	1910	#VALEUR
14-1641-	04305\0001	539658.98	2265047.00	CONTRES	2625						1497	1936.4	1511	NI	#VALEUR
14-1880-	04605\0001	539658.98	2265047.00	CONTRES	2625				eau dans le tr eau dans le tria de 1118,5-1152m		1106	2625	1118	NI	#VALEUR
14-2087	01824\0035	580607.99	2439575.94	ACHERES	1958.8				1894,5-1923,4 à 1894,5-1923,4 à 1923,4m IP=		1904	1958.8	1906	1955	49
14-2570-	02571\0004	590477.82	2394902.54	Bolisy covec Saint Yon	2086.8				à 1925-1951,6r à 1925-1951,6m chaunoy (eau s		1876.2	1981.3	1930	1981.3	51.3
14-2718-	04324\0005	636737.88	2289939.00	OUZOUER SUR TREZEE	1870.5				à (1695,04-172 muschelkalk 16 muschelkalk 18		1650	1870.5	1700	1755	55
14-2718-		550536.39	2326597.99	Saint Sigismond 1	1301.2						1221	1285	1221	1285	20

Figure 9 : Extrait de la base de données avec ses rubriques et un exemple d'informations compilées.

3.3. ETAPE 2 - METHODE D'ELABORATION DES CARTES DES ISOHYPSES ET ISOPAQUES DES RESERVOIRS CLASTIQUES

Carte des isopaques des réservoirs.

A des fins d'inventaire des réserves pétrolières, un travail conséquent de l'IFP a conduit à proposer un découpage stratigraphique du Trias du bassin de Paris (Delmas *et al.*, 2002). En particulier, ce découpage identifie les formations argilo-gréseuses des « Grès continentaux de Boissy », des « Grès marins du Rhétien », des « Grès de Chaunoy » et des « Grès de Sainte Colombe-Voulzie ». Nous avons donc utilisé le découpage stratigraphique en question et les cartes isopaques en découlant. Les quatre cartes isopaques papiers ont été digitalisées et mises en cohérence avec les données disponibles au BRGM.

La carte isopaque de la partie inférieure du Trias a été réalisée en soustrayant les cartes isopaques sus-jacentes à la carte isopaque totale du Trias (tab.1). On obtient ainsi l'isopaque d'un ensemble dont la majeure partie est constituée, dans les parties ouest et centrale du Bassin, de la formation argilo-gréseuse des « Grès de Donnemarie » (Muschelkalk et Keuper inférieur, Anisien à Carnien). Par extension et par abus nous appelons formation des « Grès de Donnemarie » cet ensemble dont la carte isopaque n'existait pas. Elle englobe également le soubassement mal connu des « Grès de Donnemarie », nommés « grès de base » par Delmas *et al.* (2002), et dans la partie est du Bassin de Paris, les Grès du Buntsandstein de Lorraine.

Carte des isohypses du toit des réservoirs.

Pour réaliser la carte des isohypses du toit de chacun des cinq formations identifiées, nous avons utilisé comme référentiel la carte des isohypses du toit du Trias réalisée par le BRGM. Cette carte a été mise en cohérence avec la base de données des forages et la carte géologique 1/50 000 harmonisée. Le toit de chaque formation a ensuite été obtenu en soustrayant à la carte des isohypses du toit du Trias la carte de l'épaisseur cumulée des formations sus-jacentes. Cette opération a été effectuée pour les cinq ensembles à savoir : formation des « Grès continentaux de Boissy », formation des « Grès marins du Rhétien », formation des « Grès de Chaunoy », formation des « Grès de Sainte Colombe-Voulzie » et formation des « Grès de Donnemarie » s.l.

Il existe des formations imperméables entre les cinq réservoirs dont l'épaisseur n'a pas été prise en compte (données manquantes, cf. tabl.1). Etant donné la démarche adoptée, leur épaisseur est donc attribuée *in fine* à l'ensemble basal que nous appelons formation des « Grès de Donnemarie ». En dehors de la formation sommitale des « Grès marins du Rhétien » la valeur des isohypses du toit des autres formations est donc sur-estimée, tout comme l'isopaque de la partie basale. Cette approximation conduit de fait à une estimation légèrement pessimiste du potentiel géothermique des formations des « Grès continentaux de Boissy », des « Grès de Chaunoy » et des « Grès de Sainte Colombe-Voulzie ». Suivant le même raisonnement, le potentiel géothermique de la formation des « Grès de Donnemarie » est légèrement surestimé.

Cependant, au vu des incertitudes sur les températures ($\pm 5^\circ\text{C}$) en profondeur (cf. étape 3 ci-après) nous postulons que ces approximations n'affectent pas significativement les résultats obtenus. Les cartes résultats sont présentées et interprétées dans le chapitre §-4.

3.4. ETAPE 3 - CALCUL DES TEMPERATURES DES RESERVOIRS

Les données de bases utilisées pour le calcul des températures des réservoirs sont :

- les températures de fond de trou obtenues à la fin de la foration (forages pétroliers). Ces données ont été corrigées des effets de boue dans le cadre du projet CLASTIQ. La méthodologie adoptée pour cette correction a été détaillée dans le premier rapport d'avancement du projet CLASTIQ (Genter *et al.*, 2007) et dans Bonté (2007) et Bonté *et al.* (2008) ;
- les températures au toit du réservoir du Dogger, avant mise en service des doublets géothermiques, lorsque cette valeur était disponible (données BRGM).

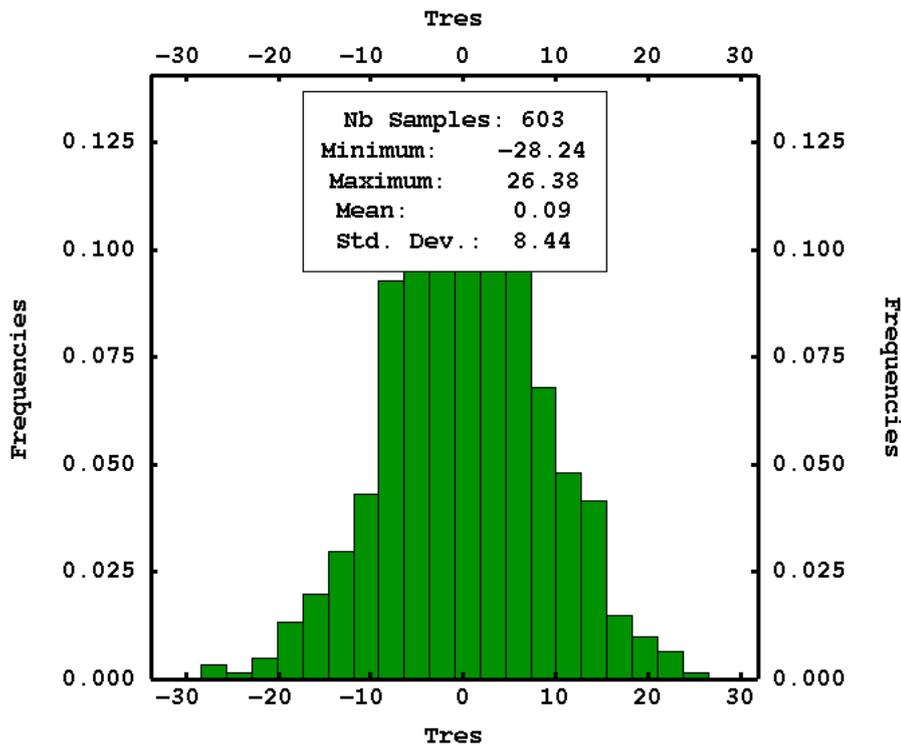


Figure 10 : Histogramme des résidus par rapport à la température moyenne (T_{res})

Une régression linéaire de la température en fonction de la profondeur a ensuite effectuée sur l'ensemble de ces données afin d'extraire une dérive du première ordre. Cette opération a permis de repérer une donnée correspondant à une erreur de mesure qui a été exclue.

Un nouveau calcul pour l'ensemble du Bassin de Paris a conduit à un gradient géothermique de **3,42°C/100m pour une température en surface de 11,38°C**.

Cela conduit à la formule :

$$T_{moy} = 0,0342d + 11,38 \quad \text{avec } T \text{ la température en } ^\circ\text{C} \text{ et } d \text{ la profondeur en mètres.}$$

L'étude géostatistique du résidu par rapport à cette dérive, $T_{res} = T - T_{moy}$, a ensuite été réalisée avec l'outil *Isatis*. Nous disposons de 603 valeurs de résidus étalées entre -28°C et 26°C. Leur distribution est proche de celle d'une gaussienne (cf. histogramme de la figure 10).

L'analyse variographique de ce résidu a conduit à caractériser sa variabilité par un modèle de variogramme qui est la somme : i) d'un effet pépité de 23°C et ii) d'un variogramme cubique anisotrope, de portée horizontale 30 km (fig. 11), de portée verticale 1 km (fig. 12) et de palier 40°C². La validation croisée effectuée montre une faible erreur réduite ce qui est tout à fait satisfaisant (fig. 13).

On peut ensuite estimer par krigeage la valeur de ce résidu pour chaque point de l'espace de coordonnées (x, y, z) , avec z son altitude. Connaissant, grâce à des MNT de l'IGN, la topographie au point de coordonnées géographiques (x, y) , on en déduit sa profondeur et la valeur de la dérive. On peut ainsi proposer une estimation de la dérive en chaque point de l'espace.

Disposant de cartes numériques des isohypses du toit des formations lithostratigraphiques étudiées (cf. § 3.3) on peut donc estimer la température sur chacune de ces surfaces. Pour interpréter ces cartes, on devra toutefois garder à l'esprit que l'effet de pépité choisi conduit à considérer que les données de températures disponibles présentent un *bruit blanc* (caractère « aléatoire pur ») de $\pm 5^\circ\text{C}$.

Les cartes de températures pour chacun des cinq réservoirs (isohypses du toit) sont présentées dans le chapitre §-4.

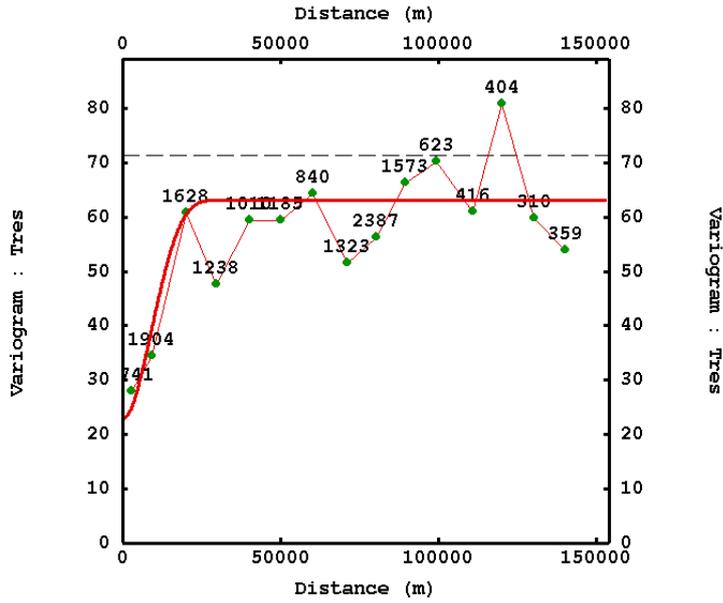


Figure 11 : Comparaison entre variogramme expérimental et variogramme théorique dans le plan horizontal

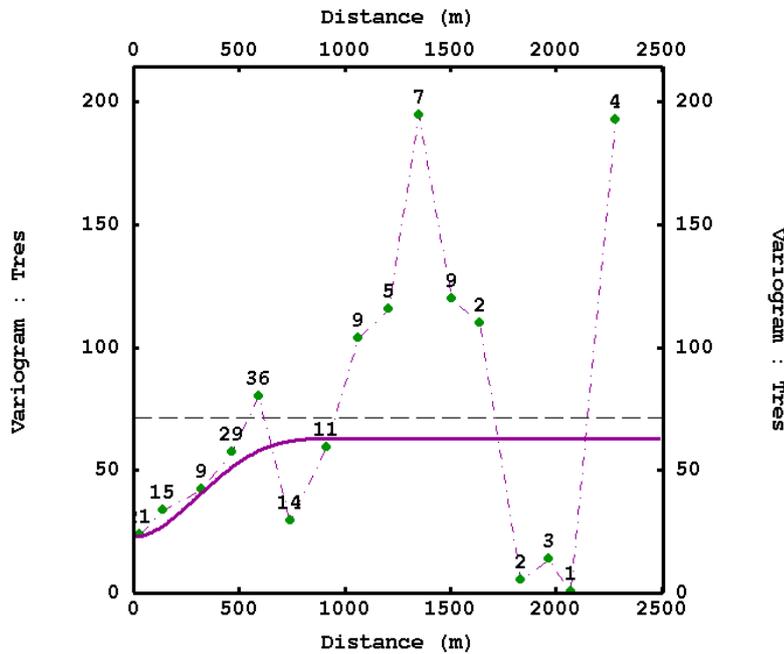


Figure 12 : Comparaison entre variogramme expérimental et variogramme théorique dans le plan vertical

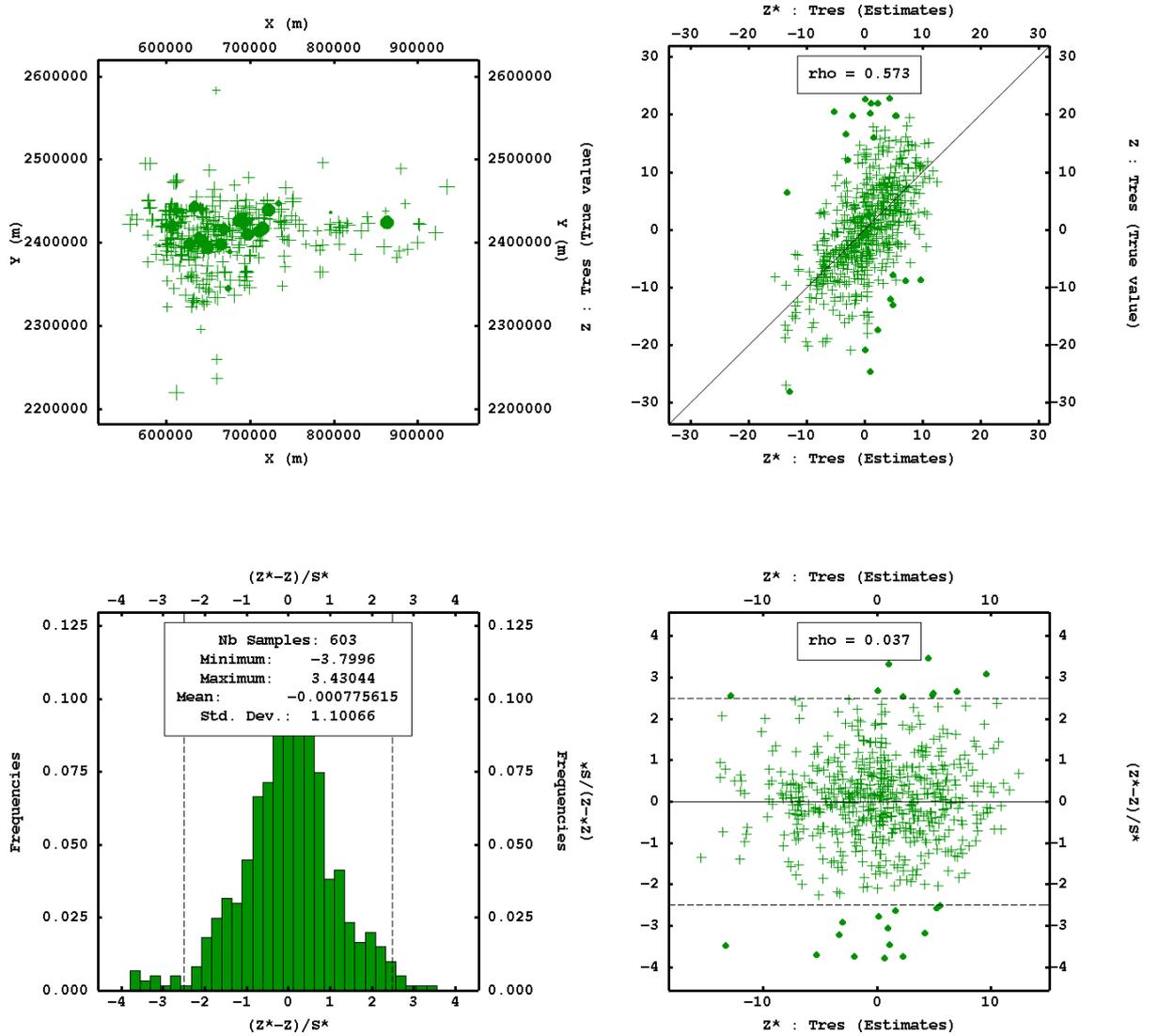


Figure 13 : Validation croisée des données

3.5. ETAPE 4 - METHODE DE CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

3.5.1. Définition de la ressource géothermale

La ressource géothermale est définie comme étant « la part de l'énergie géothermique accessible qui peut être extraite du sous-sol, économiquement, et légalement, à un moment donné »⁶ (Hurter et Haenel, 2002). Elle est donc susceptible d'évoluer avec le temps.

Afin d'estimer cette ressource, on doit d'abord évaluer la quantité de chaleur disponible dans le sous-sol. La valeur obtenue constitue la ressource de base. Seule une partie de cette ressource pourra être ensuite extraite de la roche et du fluide qu'elle contient. Cette part récupérable dépend des caractéristiques du réservoir et de la technologie d'extraction utilisée. Enfin, suivant l'énergie que représente cette part récupérable, son exploitation sera décidée suivant des raisons économiques, environnementales, légales, sociétales, nécessairement conjoncturelles.

3.5.2. Calcul de la ressource de base, chaleur en place

Le principal modèle utilisé pour quantifier la ressource géothermale dans le cadre des « Atlas des Ressources Géothermales en Europe » de la Commission Européenne (Hurter et Haenel, 2002; Hurter et Schellschmidt, 2003) repose sur les travaux de Muffler et Cataldi (1978). La ressource de base est estimée de manière volumique en calculant la chaleur maximum extractible d'un volume de roche dont la porosité est remplie avec de l'eau. Cette évaluation ne tient pas compte des caractéristiques de la roche : porosité matricielle, de fracture, hétérogénéités sédimentaires...

L'extraction de la chaleur se fera *via* l'utilisation d'un fluide caloporteur qui passera d'une température initiale, T_i , à une température finale, T_f . Ce fluide étant la plupart du temps le fluide présent dans le réservoir on peut estimer la ressource de base en considérant que T_i constitue la température de la roche réservoir avant exploitation et T_f la température ambiante en surface. La ressource de base E_{base} d'un volume V est donc donnée par la formule :

$$E_{base} = \iiint_V [\omega \rho_f c_f + (1 - \omega) \rho_r c_r] (T_i - T_f) dV$$

⁶ Selon Muffler et Cataldi (1978) : « That part of the resource base which is shallow enough to be tapped by production drilling is termed the « accessible resource base », and it in turn is divided into "useful" and "residual" components. The useful component (i.e. the thermal energy that could reasonably be extracted at costs competitive with other forms of energy at some specified future time) is termed the "geothermal resource". This in turn is divided into "economic" and "subeconomic" components, based on conditions existing at the time of assessment. »

Avec : ω la porosité de la roche, ρ_f et ρ_r les masses volumiques respectives du fluide et de la roche, et c_f et c_r les capacités thermiques massiques respectives du fluide et de la roche.

L'ensemble de ces paramètres physiques varie avec la température et la pression dans le réservoir. Ils dépendent donc du point considéré⁷. On les considérera uniformes en première approche.

La ressource géothermale étant exploitée à partir de la surface, on préfère définir une ressource surfacique correspondant à la quantité d'énergie disponible à la verticale d'un point de coordonnées géographiques (x, y) . De plus, seul un sous-ensemble des formations géologiques du sous-sol est exploité à la verticale de ce point. On nommera cette partie le réservoir géothermique. En conséquence, on considère la chaleur disponible entre le mur et le toit de ce réservoir, situés aux altitudes respectives z_{mur} et z_{toit} . Avec ces restrictions, on obtient la ressource de base surfacique disponible dans le réservoir⁸ :

$$Q_{base}(x, y) = [\omega\rho_f c_f + (1-\omega)\rho_r c_r] \int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_f) dz$$

La porosité ω est un paramètre dont la valeur moyenne, et encore plus la distribution, sont généralement très mal connus. En première approximation, on raisonnera en considérant que l'intégralité du réservoir est occupée par de la roche⁹.

⁷ Ils sont également susceptibles d'être modifiés par l'extraction de la chaleur mais on évalue ici la « chaleur en place ».

⁸ Si on sous-estime la température à l'intérieur du réservoir, en considérant qu'elle est uniforme, égale à la température du toit ; on retrouve la formule (2) de Hurter et Haenel (2002) :

$$\frac{H_0}{A} = Q_{base}(x, y) = [\omega\rho_f c_f + (1-\omega)\rho_r c_r] (T_{toit} - T_f) (z_{toit} - z_{mur})$$

⁹ Si on considère la capacité thermique de l'eau pure à 80°C, $c_f = 4,20 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ et sa masse volumique, $\rho_f = 972 \text{ kg.m}^{-3}$ (Lide, 2005), et si on prend une roche de capacité thermique massique $c_r = 0,710 \text{ kJ.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$, de masse volumique $\rho_r = 2,20.10^3 \text{ kg.m}^{-3}$, en prenant une porosité $\omega = 0,1$, le fait de négliger la présence du fluide, entraîne une sous-estimation de la quantité de chaleur de $1 - \frac{\rho_r c_r}{\omega\rho_f c_f + (1-\omega)\rho_r c_r} = 13,9\%$. Cet effet important est du au fait que la capacité thermique massique de l'eau est cinq fois plus importante que celle de la roche (cf. également les travaux de Schärli et Rybach (2001))

En considérant uniquement la capacité thermique massique de la roche constante, il vient alors :

$$Q_{base}(x, y) = \rho_r c_r \int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_f) dz$$

Lorsque l'on sous-estime la température à l'intérieur du réservoir, considérant qu'elle est uniforme, égale à la température du toit, on peut estimer l'erreur effectuée en considérant que le gradient géothermique dans le réservoir, noté a , est constant soit :

$$T_i = T_{toit} - a(z - z_{toit})$$

On obtient alors une erreur de l'ordre de :

$$\frac{\int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_f) dz - \Delta T \Delta z}{\int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_f) dz} = \frac{\Delta T \Delta z + \frac{a}{2} (\Delta z)^2 - \Delta T \Delta z}{\Delta T \Delta z + \frac{a}{2} (\Delta z)^2} = \frac{1}{1 + \frac{2}{a} \frac{\Delta T}{\Delta z}}$$

Où l'on a noté : $\Delta T = T_i - T_f$ et $\Delta z = z_{toit} - z_{mur}$ l'épaisseur du réservoir.

Avec un gradient géothermique moyen, $a = 0,03^\circ C.m^{-1}$, une épaisseur de réservoir de l'ordre de 100 m et une différence de température, $\Delta T = 80^\circ C$, on obtient une erreur de l'ordre de 2%. Cette erreur est très faible, et bien inférieure à l'erreur effectuée en négligeant la présence de fluide, qui elle est supérieure à 10%.

3.5.3. Calcul de la chaleur exploitable (= potentiel géothermique)

Comme mentionné précédemment seule une partie de la chaleur en place, constituant la ressource de base, est exploitable. La partie récupérable, permettant de définir la ressource économique dépend à la fois des caractéristiques de l'aquifère (architecture sédimentaire et structurale, nature de la roche, paramètres pétrophysiques...) ¹⁰ et de la technologie utilisée (doublet, puits unique avec rejet en surface, « *five-spot pattern* », EGS,...).

Dans le cas d'un doublet, le fluide géothermique est réinjecté après extraction de ses calories. On supposera donc que la température finale du fluide est celle de la roche et

¹⁰ A notre connaissance, l'étude de l'impact de ces caractéristiques sur les coefficients de récupération de la chaleur en place ne fait l'objet d'aucune étude systématique. Il est probable que suivant ces caractéristiques, la percée thermique, pour une exploitation par doublet par exemple, ne se produise pas au même moment et modifie par conséquent le coefficient de récupération.

que l'on a $T_f = T_{inj}$ avec T_{inj} la température du fluide injecté. La chaleur maximum récupérable de cette manière est donc donnée, sous forme surfacique par :

$$Q_{base}(x, y) = \rho_r c_r \int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_{inj}) dz$$

Ensuite, Gringarten (1978) montre que la part récupérable de cette chaleur en place peut varier de 0,01% pour un puits isolé exploitant un réservoir ré-alimenté à une certaine distance sur les bordures du bassin, à 75% lorsque l'exploitation de la nappe se fait grâce à un réseau de doublets implanté dans les conditions optimales. Dans le cadre d'un doublet unique le coefficient de récupération est estimé à $R_{doublet} = \frac{1}{3}$. Cette estimation est réalisée à partir du ratio entre l'étendue de la bulle froide avant arrêt de l'exploitation et l'emprise d'un doublet en surface (Lavigne, 1978). On obtient alors la formule donnant *in fine* le potentiel géothermique correspondant à la chaleur récupérable avec une exploitation par doublet :

$$Q_{base}(x, y) = R_{doublet} \rho_r c_r \int_{z_{mur}}^{z_{toit}} (T_i - T_{inj}) dz \quad (1)$$

3.5.4. Potentiel du Trias clastique du Bassin de Paris

Pour l'évaluation du potentiel des formations argilo-gréseuses du Trias du bassin parisien, la formule (1) a été discrétisée en réalisant une grille stratigraphique de chaque formation réservoir à partir des isohypses de son toit et de son mur. La résolution horizontale des grilles stratigraphiques est prise égale à 250 m. On donne ensuite à cette grille stratigraphique un nombre de couche tel que l'épaisseur de chaque couche ne dépasse pas 50 m. Une formation d'épaisseur maximale 132 m aura ainsi trois couches. L'épaisseur de chaque couche est ensuite calculée *au prorata* de l'épaisseur de la formation. Ainsi les trois couches de la grille précédente auront chacune 44 m d'épaisseur au point où la formation atteint son épaisseur maximale.

La température est ensuite calculée pour chacune des surfaces délimitant les couches par krigeage à partir des points de données disponibles, en utilisant les données et le modèle présentés précédemment.

On obtient ainsi une approximation discrète de la formule (1) qui s'écrit :

$$Q_{base}^{i,j} = R_{doublet} \rho_r c_r \left[\sum_{k=1}^n \frac{T^{i,j,k-1} + T^{i,j,k}}{2} (z^{i,j,k} - z^{i,j,k-1}) - T_{inj} (z_{toit} - z_{mur}) \right] \quad (2)$$

Avec :

- n le nombre de couches de la grille.
- $Q^{i,j}$ la chaleur récupérable au point d'indices i et j de la carte construite, de coordonnées $(x_0 + i\Delta, y_0 + j\Delta)$, la grille ayant comme origine (x_0, y_0) et comme résolution spatiale Δ .
- $T^{i,j,k}$ la température au toit de la couche k et $T^{i,j,k-1}$ la température au mur de la couche k au point d'indices i et j .
- $z^{i,j,k}$ l'altitude du toit de la couche k et $z^{i,j,k-1}$ l'altitude du mur de la couche k au point d'indices i et j

Les valeurs des paramètres physiques retenues pour le calcul¹¹ sont récapitulées dans le tableau 2.

paramètres	description	valeur
ρ	masse volumique de la roche	2.200 kg.m^{-3}
c_r	capacité thermique massique	$710 \text{ J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
T_{inj}	température de réinjection	25°C

Tableau 2 : Valeurs retenues pour les paramètres physiques de la formule (2)

¹¹ A noter que l'on a adopté une démarche de calcul du potentiel géothermique identique pour l'ensemble des formations géologiques étudiées dans le projet CLASTIQ. La méthodologie utilisée pour déterminer le potentiel géothermique est décrite dans le paragraphe «Méthode de calcul de la ressource disponible » du rapport de Dezayes *et al.* (2007) concernant l'estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan.

4. Géométrie, température et potentiel géothermique des réservoirs clastiques

Dans ce chapitre, les cinq réservoirs clastiques sélectionnés et leur potentiel géothermique respectif sont décrits, successivement en allant de la base au sommet du Trias :

- le réservoir de Donnemarie (Muschelkalk et Keuper inférieur, Anisien à Carnien),
- le réservoir de Sainte-Colombe-Voulzie (Keuper moyen, Carnien),
- le réservoir de Chaunoy (Keuper moyen et supérieur, Rhétien),
- le réservoir de Boissy (Keuper supérieur, Rhétien),
- le réservoir du Rhétien marin (Keuper supérieur, Rhétien).

Ainsi, chaque réservoir clastique est caractérisé en termes d'épaisseur, de profondeur, de température et de potentiel géothermique, à partir des cartes suivantes, élaborées conformément à la méthodologie décrite au chapitre §-3.

A titre **d'avertissement**, on précise au lecteur que :

- la carte des isopaques indique l'épaisseur du réservoir clastique étudié, la zone grise correspondant à la zone de Trias située hors du réservoir en question ;
- la carte des isohypses indique la position du toit du réservoir clastique ainsi que celle de son équivalent litho-stratigraphique située hors du réservoir en question ;
- la carte des températures indique les températures du toit du réservoir clastique étudié ainsi que les températures de son équivalent litho-stratigraphique située hors du réservoir en question ;
- la carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) indique les valeurs du potentiel du réservoir clastique étudié, la zone grise correspondant à la zone de Trias située hors du réservoir en question.

Compte tenu des enjeux énergétiques liés à l'exploitation géothermique du Dogger, on précisera pour chacun des réservoirs le potentiel des formations clastiques du Trias situées sous le Dogger actuellement exploité (fig. 14).

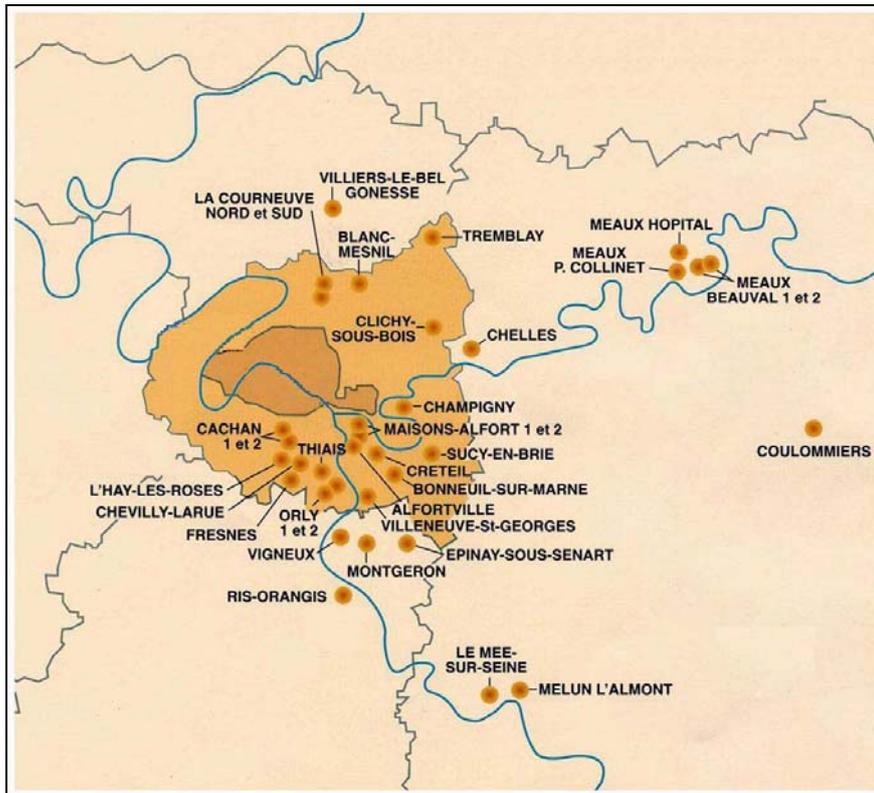


Figure 14 : Carte de localisation des doublets géothermiques en cours d'exploitation dans le Dogger du Bassin de Paris (source BRGM)

4.1. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE DONNEMARIE

4.1.1. Géométrie et température du réservoir

La profondeur du toit des Grès de Donnemarie varie de 3000 m à 1000 m du nord au sud (fig. Figure 15). Les dépôts sont les plus profonds à l'est de la région Ile de France, dans un rayon de moins de 100 km. La principale zone de dépôts, centrée sur la Brie et la Champagne, atteint la profondeur maximale de 3225 m pour des températures maximales de 127 °C (fig. 17). Le toit des Grès de Donnemarie est en revanche moins profond en bordure occidentale de la faille de Sennely sous la Sologne (fig.1), où la profondeur maximale atteint 1500 à 2000 m à des températures d'environ 80°C.

Sur le secteur d'Épernay à Nogent-sur-Seine, orienté NE-SW, l'épaisseur totale du réservoir est supérieure à 200 m et peut atteindre jusqu'à 450 m, alors qu'en Sologne ainsi qu'entre Gien et Joigny, cette épaisseur est en moyenne de 200 m (fig. Figure 16). Les fortes épaisseurs rencontrées sur l'est du Bassin de Paris ne représentent pas les Grès de Donnemarie (Muschelkalk et Keuper inférieur) mais leur quasi-équivalent latéral, les Grès du Buntsandstein.

La géométrie du réservoir traduit les principales zones de dépôts de cette période, où

un axe fluvial majeur drainait le bassin, du sud-ouest (Touraine) vers le nord-est (Lorraine).

4.1.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)

Les Grès de Donnemarie constituent un réservoir multi-couches, parmi les plus épais du Trias (jusqu'à 450 m).

Sa partie supérieure possède les meilleures propriétés pétrophysiques de l'ensemble du réservoir : une porosité moyenne calculée de 6 % avec un maximum pouvant atteindre 18 % et des valeurs de perméabilité, généralement faibles (< 10 mD) mais pouvant atteindre jusqu'à 1 D localement¹². En s'approfondissant dans le réservoir, une forte cimentation par l'anhydrite due à la diagenèse, entraîne une dégradation importante des propriétés pétrophysiques du réservoir. Ainsi, les qualités du réservoir diminuent vers le bas de la série et vers l'est du bassin.

Compte tenu d'une forte corrélation positive entre la profondeur, la température du réservoir et son épaisseur, la zone de Nogent-sur Seine - Sézanne – Epernay (Brie et Champagne) constitue un bon réservoir dont l'estimation du potentiel géothermique est comprise entre 15 et 25,3 GJ/m² (fig. 18). Dans cette zone-cible, la profondeur du toit du réservoir est située entre 2500 et 3000 m, pour une température de 100 à 120°C et une épaisseur remarquable comprise entre 250 et 450 m. Comme précisé ci-dessus, la partie supérieure du réservoir est plus favorable en termes de porosité-perméabilité, pour une exploitation géothermique (avec un accès facilité au réservoir).

Quand au réservoir de Donnemarie situé sous la zone d'exploitation du Dogger (fig. 18), on différencie deux secteurs en fonction de son potentiel. D'une part, la couronne située en bordure orientale de l'Île de France (villes de Melun, Meaux, Coulommiers et Sézanne) montre un potentiel très favorable compris entre 5 à 9 GJ/m², c'est à dire supérieur au potentiel du Dogger exploité (2,5 à 5 GJ/m² selon Haenel, 1989). En revanche, la partie centrale de l'Île de France présente un potentiel inférieur à 2 GJ/m², en raison de l'épaisseur réduite du réservoir (< 50 m @ 80-90°C).

Concernant les Grès du Buntsandstein de Lorraine, seule la région de Saint-Dizier – Bar-le-Duc présente un potentiel géothermique estimé à ~ 10 GJ/m² en raison d'un réservoir épais d'environ 350-400 m, à 60-70°C, situé vers 1500 m de profondeur (fig.18). Cette cible mériterait d'être étudiée de près, sachant cependant que les paramètres pétrophysiques y sont réputés médiocres (Haenel, 1989).

¹² Notons que les quelques forages pétroliers répertoriés (17 au total) ne traversent pas l'ensemble du réservoir et s'arrêtent pour la plupart dans la partie supérieure des Grès de Donnemarie. De plus, ils ne disposent pas systématiquement des renseignements nécessaires à l'évaluation du potentiel géothermique.

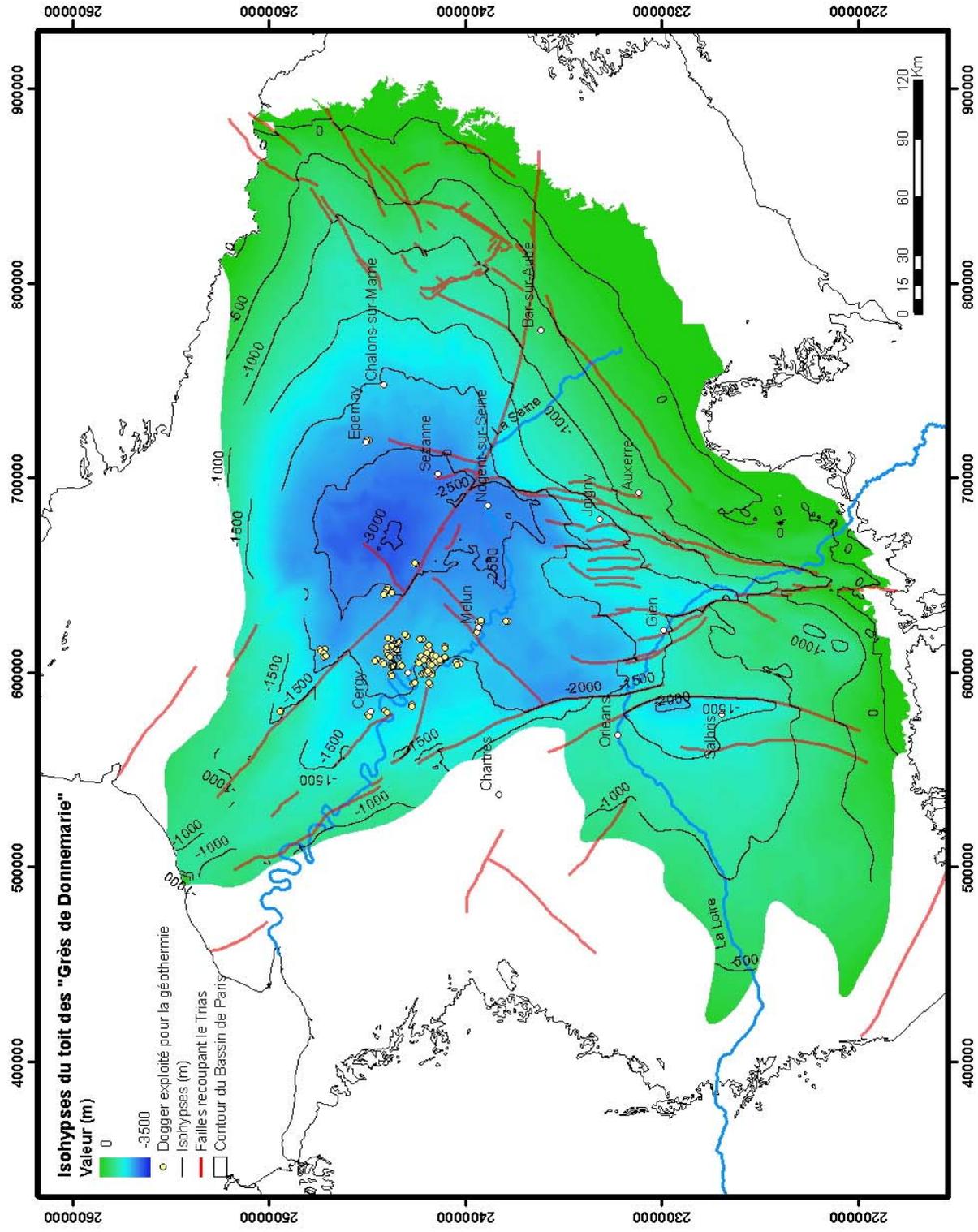


Figure 15 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès de Donnemarie (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

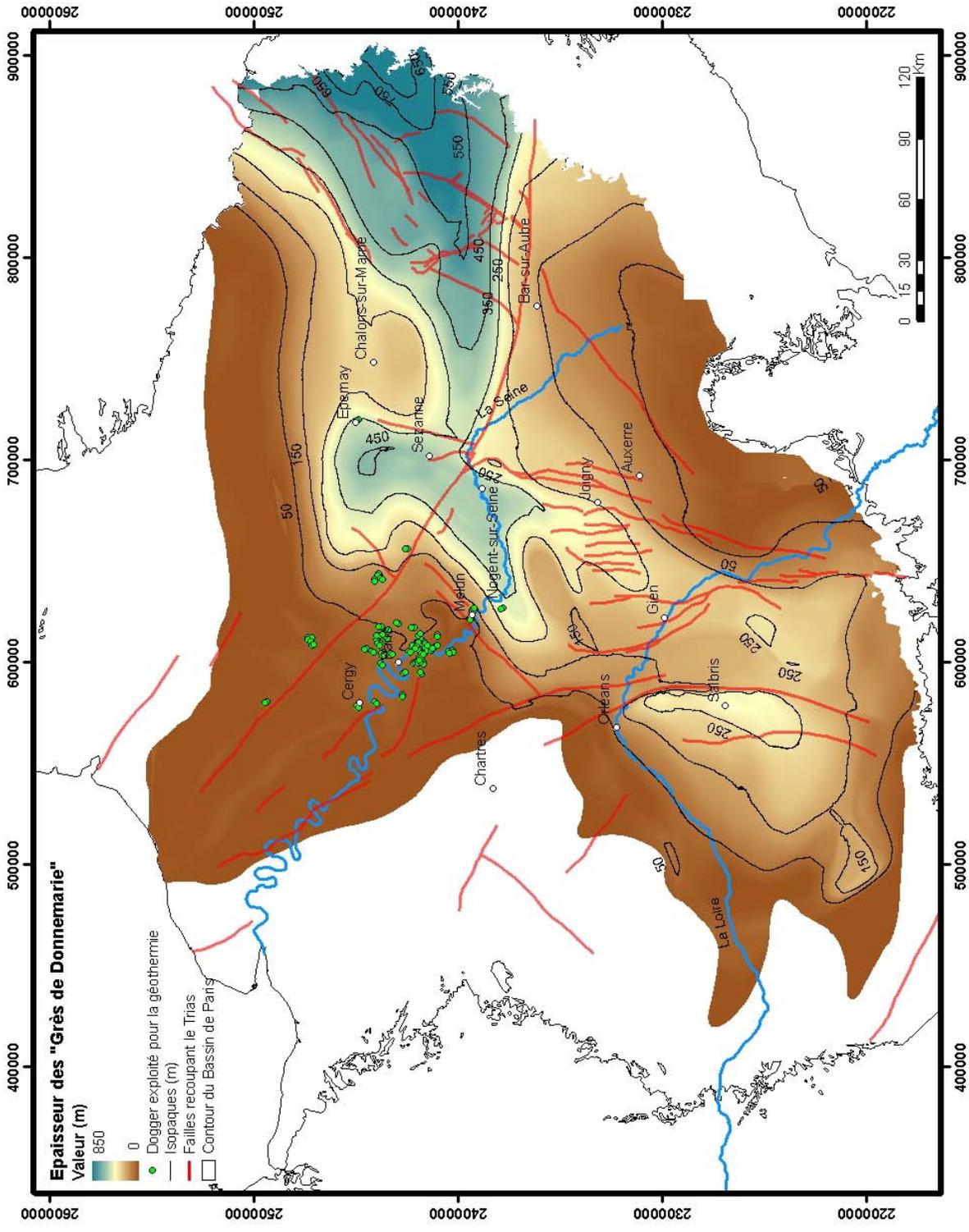


Figure 16 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Donnemarie (partie ouest du bassin), (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

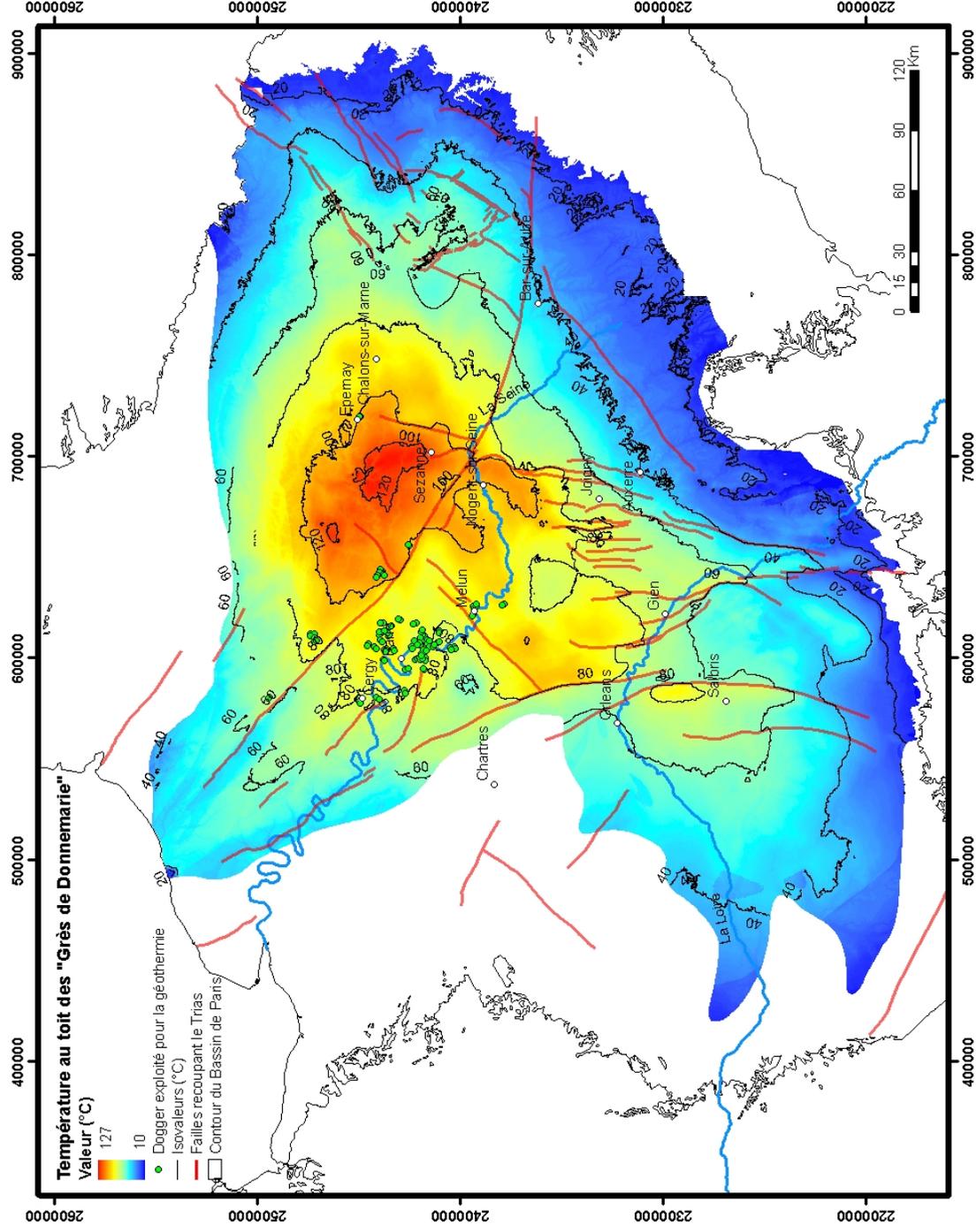


Figure 17 : Carte des températures au toit des Grès de Donnemarie

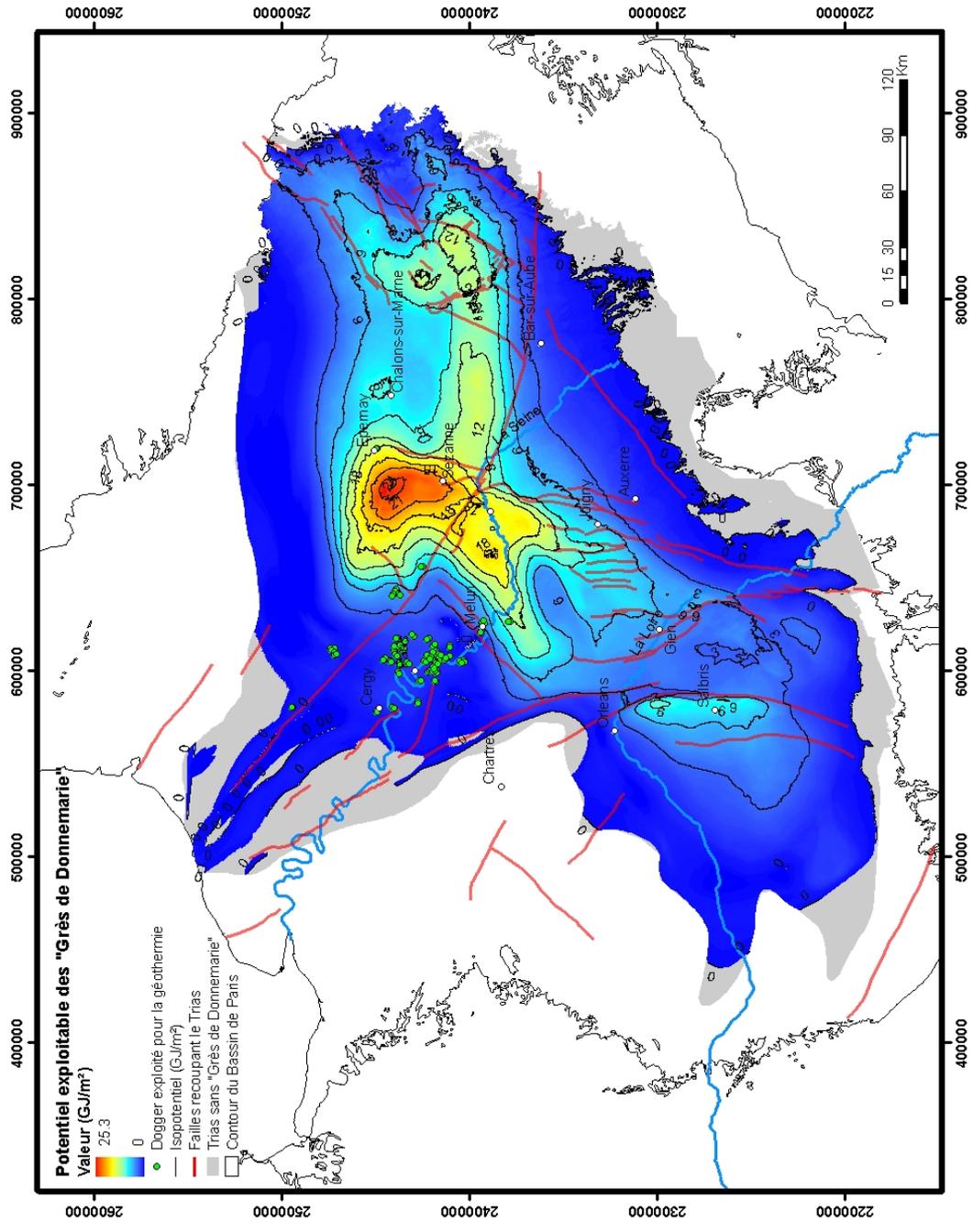


Figure 18 : Carte du potentiel géothermique des Grès de Donnemarie, souligné par des isopotentiels à un pas de 3 GJ/m²

4.2. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE SAINTE COLOMBE-VOULZIE

4.2.1. Géométrie et température du réservoir

La profondeur du toit des Grès de Sainte Colombe-Voulzie est globalement calquée sur celle du toit des Grès de Donnemarie sous-jacents, dont ils ont hérité la structuration générale. La zone de dépôt-centre principale occupe la région Champagne, où la profondeur varie entre 2000 et 3000 m (fig. Figure 19) et la température y atteint les 120°C (fig. 21).

Une autre zone profonde atteint 1500-2000 m entre Orléans et Salbris, à l'ouest de la faille de Sennely (fig. 1) avec des températures moins élevées de l'ordre de 80°C.

Ce réservoir présente une faible épaisseur de sédiments clastiques (fig. Figure 20), en moyenne d'une vingtaine de mètres. La puissance maximale de ces dépôts est essentiellement localisée selon un axe NE-SW entre Epernay, Sézanne et Nogent-sur-Seine.¹³

Sur la figure 20, le réservoir gréseux situé sur l'est du Bassin de Paris (Lorraine) représente les Grès à Roseaux, équivalent latéral des Grès de Sainte Colombe-Voulzie. Compte tenu de sa très faible épaisseur (~10 m) ce réservoir n'a pas été étudié.

4.2.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)

Les Grès de Sainte Colombe-Voulzie constituent un aquitard aux propriétés pétrophysiques médiocres. En outre, compte tenu de leur faible épaisseur à l'échelle du bassin (une vingtaine de mètres en moyenne), le potentiel géothermique de cette formation clastique est très faible (fig. 22). Seul l'axe NE-SW reliant Sézanne et Nogent-sur-Seine montre un potentiel géothermique de ~2 GJ/m² avec un pic immédiatement au nord de Sézanne (2,6 GJ/m²). Cette anomalie résulte de l'épaisseur exceptionnelle de ce réservoir (~50 m) à cet endroit et de sa température remarquable de 120°C, à une profondeur d'environ 2600 m.

A noter que sous la zone d'exploitation actuelle du Dogger (figs. 20 et 22), les grès de Sainte Colombe-Voulzie sont absents.

¹³ Le puits de référence de Sainte Colombe-Voulzie 1 recoupe cette formation sur 25 m

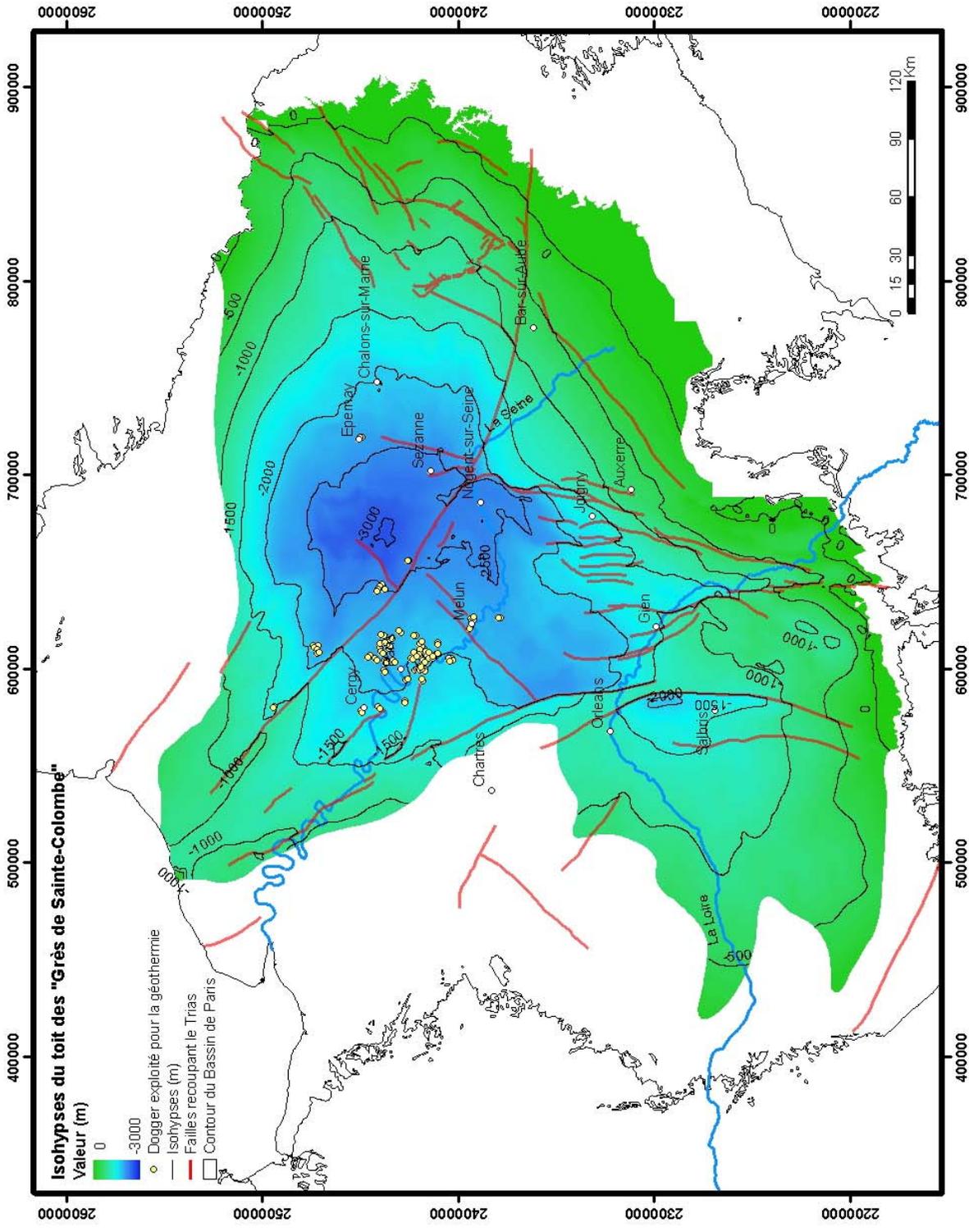


Figure 19 : Carte des isohypses du toit du réservoir des Grès de Sainte-Colombe-Vouzize (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

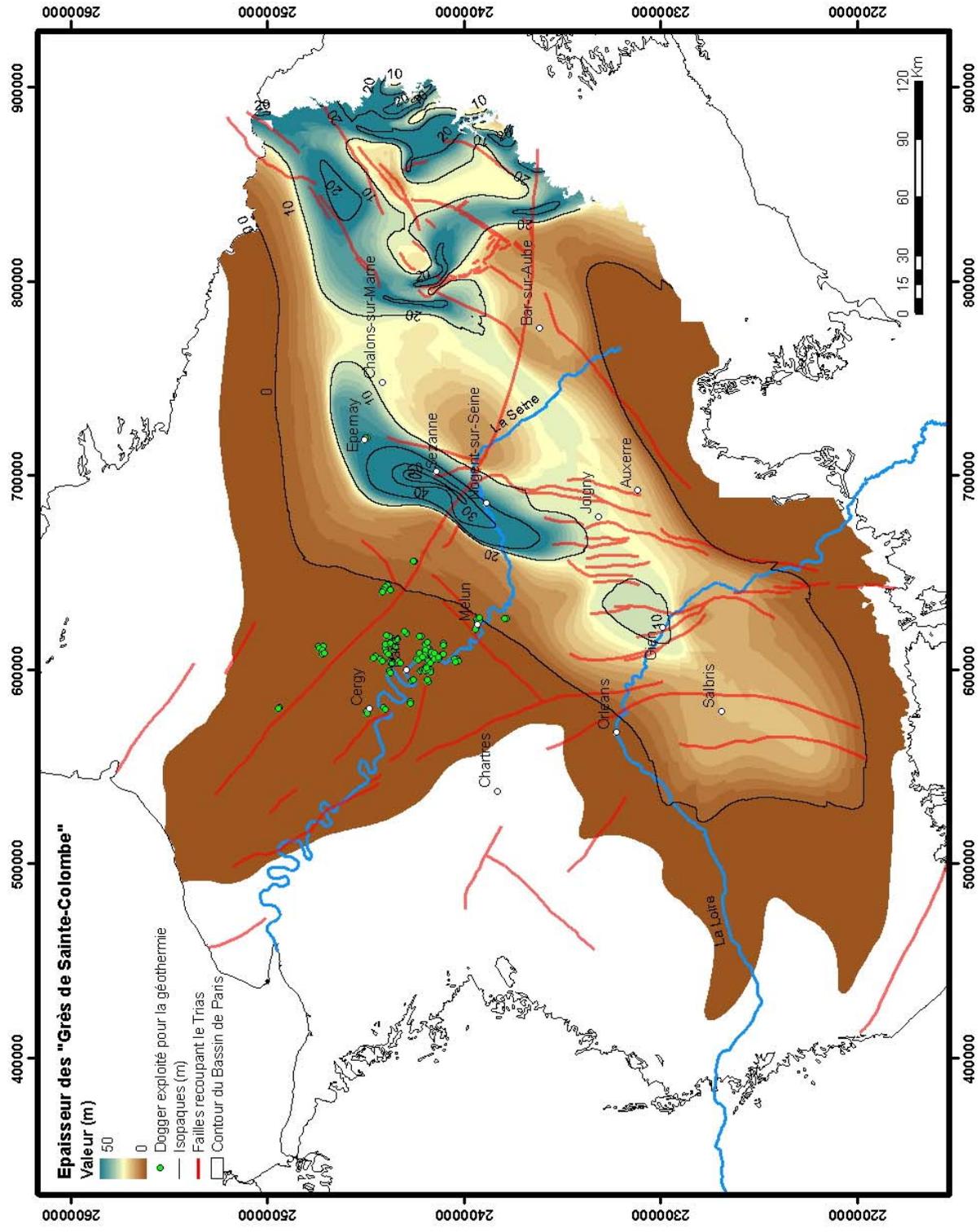


Figure 20 : Carte des isothermes du réservoir des Grès de Sainte-Colombe-Voulzie (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

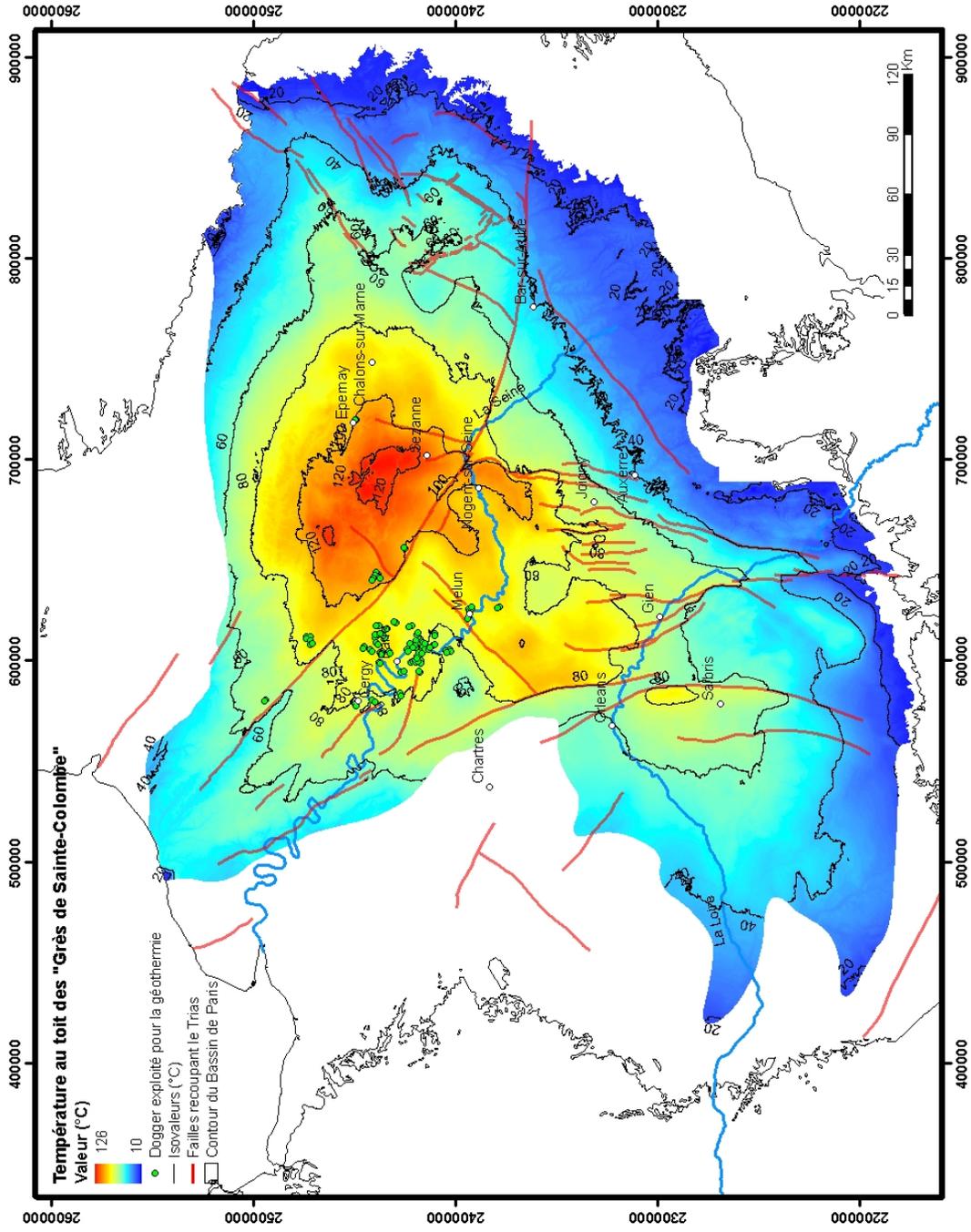


Figure 21 : Carte des températures au toit des Grès de Sainte-Colombe-Vouzize

Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris

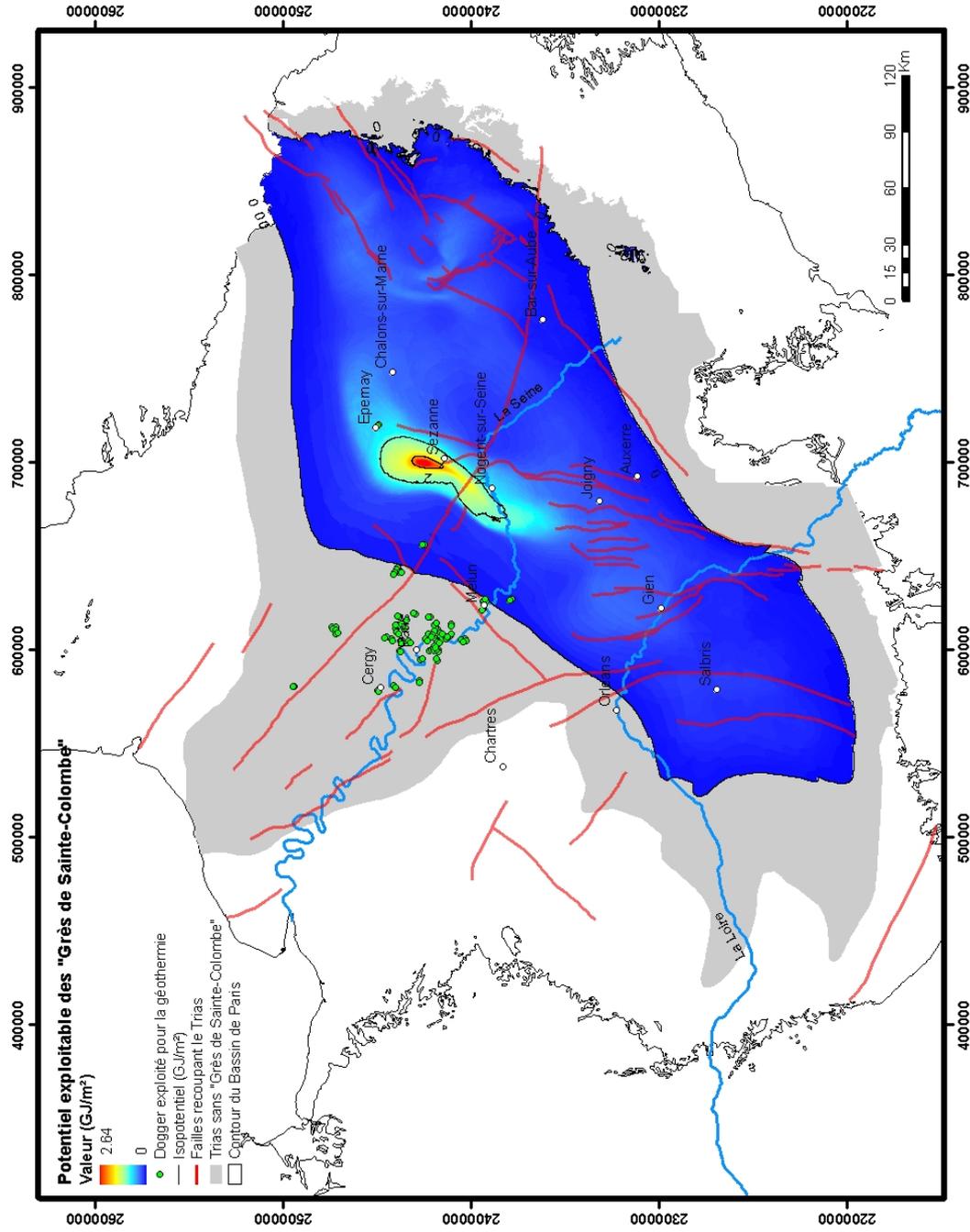


Figure 22 : carte du potentiel géothermique des Grès de Sainte-Colombe-Voulzie, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m²

4.3. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE CHAUNOY

4.3.1. Géométrie et température du réservoir

La carte des isohypses des Grès de Chaunoy (fig. 23) met en évidence deux zones de dépôts-centres :

- le secteur majeur occupe la partie centrale de la Seine-et-Marne et de la Champagne, où les dépôts sont les plus profonds, entre 2000 m et 2900 m pour des valeurs de températures (fig. 25) du toit du réservoir comprises entre 80° et 123°C. Ce dépôt-centre est contrôlé par la faille majeure NW-SE de Bray – Malnoue –Vittel (fig. 1) ;
- le secteur mineur, situé au niveau de la Sologne, au sud d'Orléans, est contrôlé par la faille subméridienne de Sennely (fig. 1), où le toit des Grès de Chaunoy atteint la profondeur de 1500 m, pour des températures comprises entre 60 et 80°C.

Les zones les plus épaisses du réservoir suivent globalement les zones de dépôts-centres bien que légèrement décalées vers le nord-ouest (fig. 24). Elles se situent :

- principalement au nord-est de la région parisienne avec des épaisseurs moyennes de 100 m environ, et des valeurs maximales atteignant 140 m immédiatement à l'est-nord-est de Meaux, zone exploitée pour le Dogger (e.g. Meaux-Hôpital) ;
- au sud-ouest d'Orléans avec des épaisseurs moyennes de 100 m, et une épaisseur maximale atteignant 180 m, et le long d'un couloir sub-méridien à l'est d'Orléans, qui est caractérisé par une épaisseur moyenne de 80 m.

Du fait de l'intercalation croissante vers l'est des Marnes Irisées Supérieures, l'épaisseur du réservoir gréseux décroît vers l'est.

4.3.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)

Le réservoir des Grès de Chaunoy constitue une cible intéressante dans le cadre des opérations en géothermie compte tenu de ses paramètres pétrophysiques : la porosité moyenne est plutôt satisfaisante (autour de 13 %), la perméabilité, autour de 350 mD avec des pics à 2D, constitue un critère positif, bien que la cimentation dolomitique et parfois anhydritique induise des variations locales importantes.

Le potentiel géothermique du réservoir de Chaunoy atteint 7 GJ/m² au niveau des zones de dépôts-centres, qui s'alignent suivant une structure antiforme NE-SW. A l'échelle du Bassin de Paris, les zones potentielles supérieures à 2 GJ/m², dessinent un axe allant de Salbris à Château-Thierry en passant à l'est d'Orléans (fig. 26).

Par ordre de priorité, les cibles géothermiques du réservoir de Chaunoy sont les suivantes (fig. 26) :

- située au nord-est de la faille de Bray-Vittel (fig. 1), la cible prioritaire est définie entre Meaux (3 GJ/m²) et Château-Thierry (5 à 7 GJ/m²) avec un potentiel maximal atteignant 7,7 GJ/m². Elle se caractérise par un réservoir clastique épais (100 à 140m), profond (2500 à 3000 m) et chaud (100-120°C). A noter que les doublets géothermiques de Meaux et de Coulommiers sont situés à la bordure de cette cible avec des valeurs non négligeables du potentiel des Grès de Chaunoy autour de 3 GJ/m² (fig. 26) ;
- deux cibles secondaires sont en région Centre :
 - La première cible, contrôlée par la faille de Sennely (fig. 1), est située immédiatement au nord de Salbris. Elle offre un potentiel intéressant compris entre 3 et 5 GJ/m², et caractérise un réservoir moyennement profond (1500 m) et épais (140-180m), offrant une température équivalente à celle du Dogger exploité (70-80°C). A noter que le doublet géothermique de Melleray a été réalisé à l'extrémité nord de cette cible vers 1440 m de profondeur pour une épaisseur de réservoir d'environ 170 m et une température de 73°C.
 - La seconde cible, est située à l'est d'Orléans, au delà de la faille subméridienne d'Etampes – Rambouillet (fig. 1) qui constitue la limite occidentale de cette cible. Elle présente un potentiel compris entre 2 et 3 GJ/m² compte tenu d'épaisseur plus faible du réservoir à savoir 80 m de sédiments, situés à une profondeur d'environ 2000 m et à une température de 80°C.

Quant au potentiel géothermique des Grès de Chaunoy situés sous la zone exploitée du Dogger entre La Courneuve et Clichy (fig. 26), il est compris entre 1 et 2 GJ/m². Il apparaît faible comparé au potentiel du Dogger exploité (2,5 à 5 GJ/m² selon Haenel, 1989). L'épaisseur du réservoir y est en effet modeste (60 m d'épaisseur à environ 90°C et 2000 m de profondeur), sachant toutefois que les paramètres pétrophysiques des Grès de Chaunoy sont réputés satisfaisants (cf. ci-dessus).

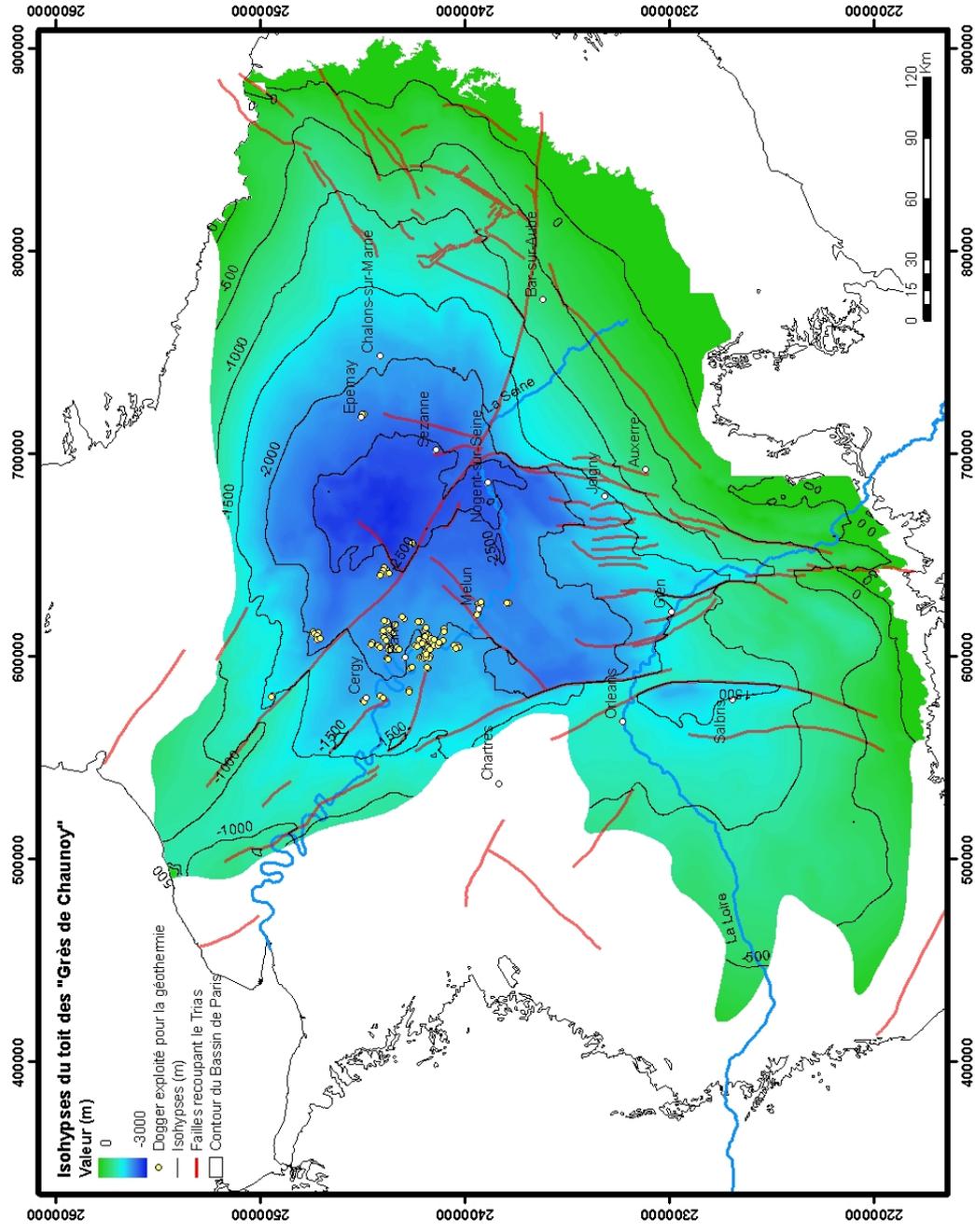


Figure 23 : Carte des isohypses du toit des Grès de Chaunoy (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

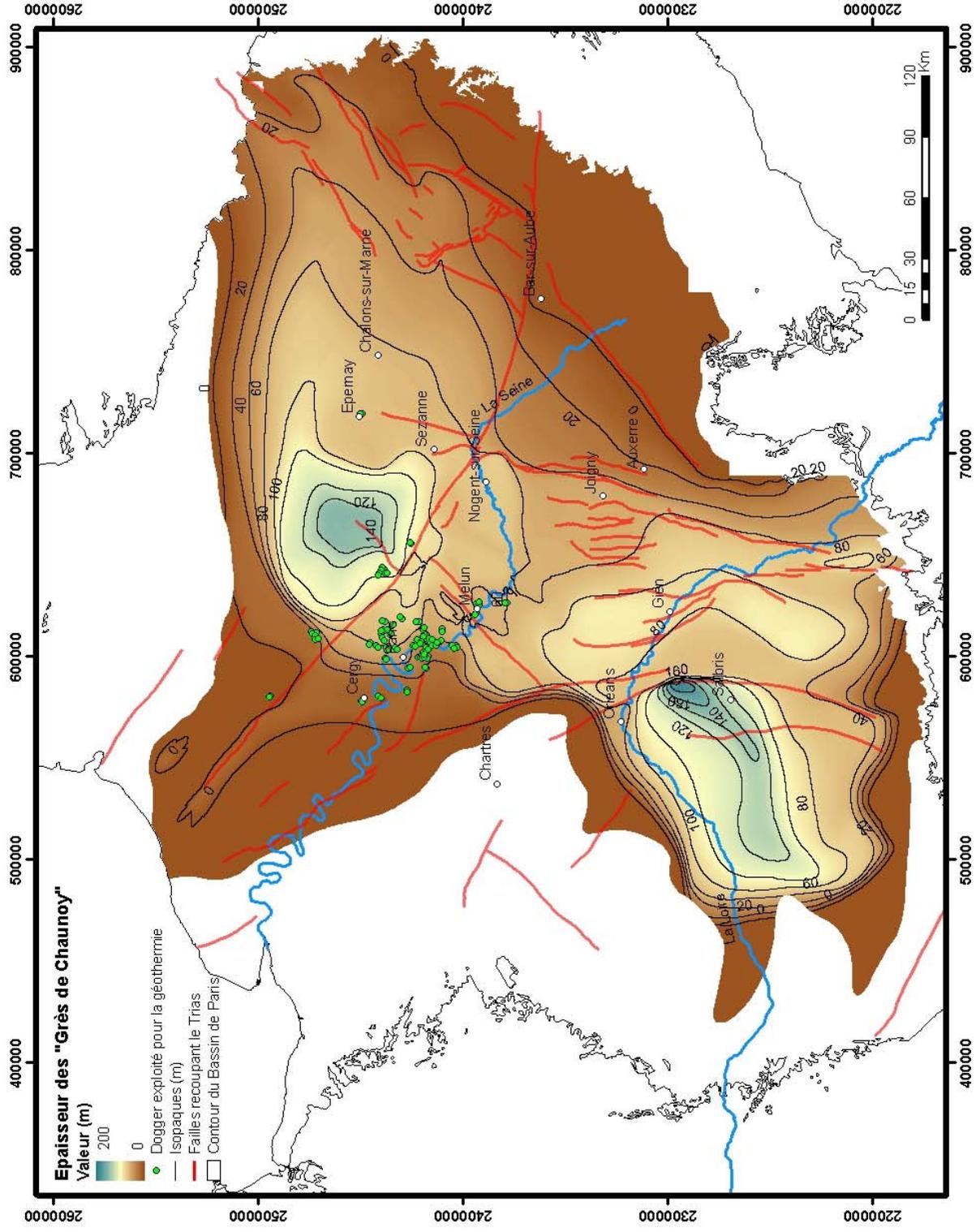


Figure 24 : Carte des isopaques du réservoir des Grès de Chaunoy (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

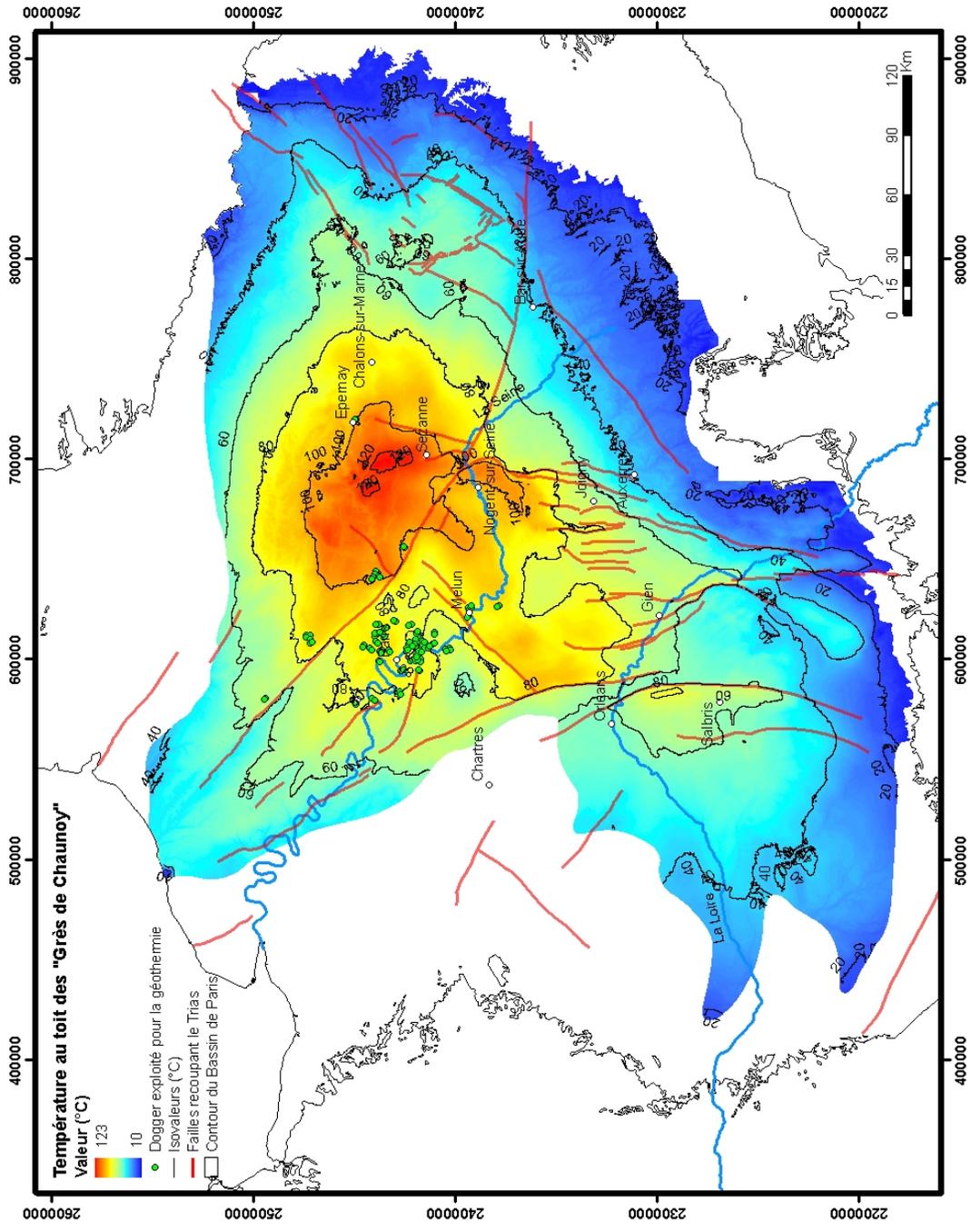


Figure 25 : Carte des températures au toit des Grès de Chaunoy

4.4. LE RESERVOIR CLASTIQUE DE BOISSY

4.4.1. Géométrie et température du réservoir

Une lecture rapide des cartes des isohypses du toit des Grès de Chaunoy (fig. 23) et des Grès de Boissy (fig. 27) pourrait laisser croire que les cartes se superposent. Or, les similitudes constatées sont simplement dues au fait que ces deux formations sont superposées et que la formation des Grès de Boissy est peu épaisse (0-100 m), ce qui contraste peu par rapport aux ordres de grandeurs des isohypses (0-3000 m).

A l'échelle du Bassin de Paris, le réservoir de Boissy est structuré en trois secteurs (figs. 27, 28 et 29), décrits par ordre d'intérêt :

- au centre-est du Bassin, une aire de dépôt majeur est comprise entre Compiègne et Epernay au nord et s'étend vers le sud (en passant par Nogent-sur-Seine) jusqu'à l'est d'Orléans. La profondeur du toit des Grès de Boissy y est maximale (2500 à 2900 m) au nord de la faille de Bray-Malnoue-Vittel entre Meaux et Sézanne (fig. 1), avec des températures comprises entre 100 et 120°C au toit du réservoir. En revanche, à l'est d'Orléans, le toit du réservoir est moins profond (environ 1500 m), et les températures y atteignent 80°C. Quand aux épaisseurs des dépôts, elles varient fortement, entre 80 m dans la région de Compiègne - Soisson à seulement 40 m en allant vers le sud (Gien) ;
- au sud-ouest, la gouttière subméridienne située entre Orléans et Salbris correspond à une structure profonde ; le toit du réservoir se situe à environ 1500 m de profondeur et la température atteint très ponctuellement 80°C. Les dépôts clastiques de Boissy se répartissent principalement selon un axe NW-SE, centré sur Salbris ; ils ont une épaisseur comprise entre 40 et 60 m ;
- au nord-ouest du Bassin de Paris, une aire de dépôt est localisée le long de la faille de la Seine (fig. 1), le long d'une gouttière d'orientation NW-SE. La profondeur du toit du réservoir est comprise entre 1000 et 1500 m, les températures ne dépassent pas les 60-70°C et les épaisseurs du réservoir sont limitées (20 à 40 m).

4.4.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)

A l'image du réservoir des Grès de Sainte-Colombe-Voulzie, le réservoir des Grès de Boissy offre peu de données recensées dans les rapports de fin de sondages pour caractériser précisément les propriétés pétrophysiques des dépôts gréseux. La porosité moyenne, établie à partir de 7 valeurs de porosité, est relativement satisfaisante (13,5 %). Une acquisition de données complémentaires est nécessaire.

A l'échelle du Bassin de Paris, le potentiel géothermique n'atteint que 4 GJ/m² (fig. 30), une valeur modeste comparée au potentiel d'autres réservoirs.

En priorité, il apparaît que l'aire de dépôt, limitée au sud-ouest par la faille d'Etampes-Rambouillet (fig. 1) et comprise entre Compiègne, Epernay, Melun et Nogent-sur-Seine, présente un potentiel géothermique entre 2 et 4 GJ/m² (fig. 30). Ce potentiel, résulte d'une corrélation positive entre la profondeur du réservoir de Boissy (2500 à 2900 m), sa température (100 à 120°C) et son épaisseur (~ 80m).

A signaler que les doublets d'exploitation du Dogger situés à Meaux, Coulommiers et Creil (fermé) sont situés en bordure de cette cible potentielle (2 GJ/m²), le long de la faille de Bray-Malnoue-Vittel (fig. 1). De fait la formation clastique de Boissy pourrait éventuellement constituer un réservoir alternatif au Dogger dans ces villes.

En revanche, sous la zone d'exploitation du Dogger située autour de Paris, le potentiel apparaît très faible (~1,5 GJ/m²), en raison principalement de l'épaisseur modeste du réservoir (20 à 40 m @ ~ 90°C).

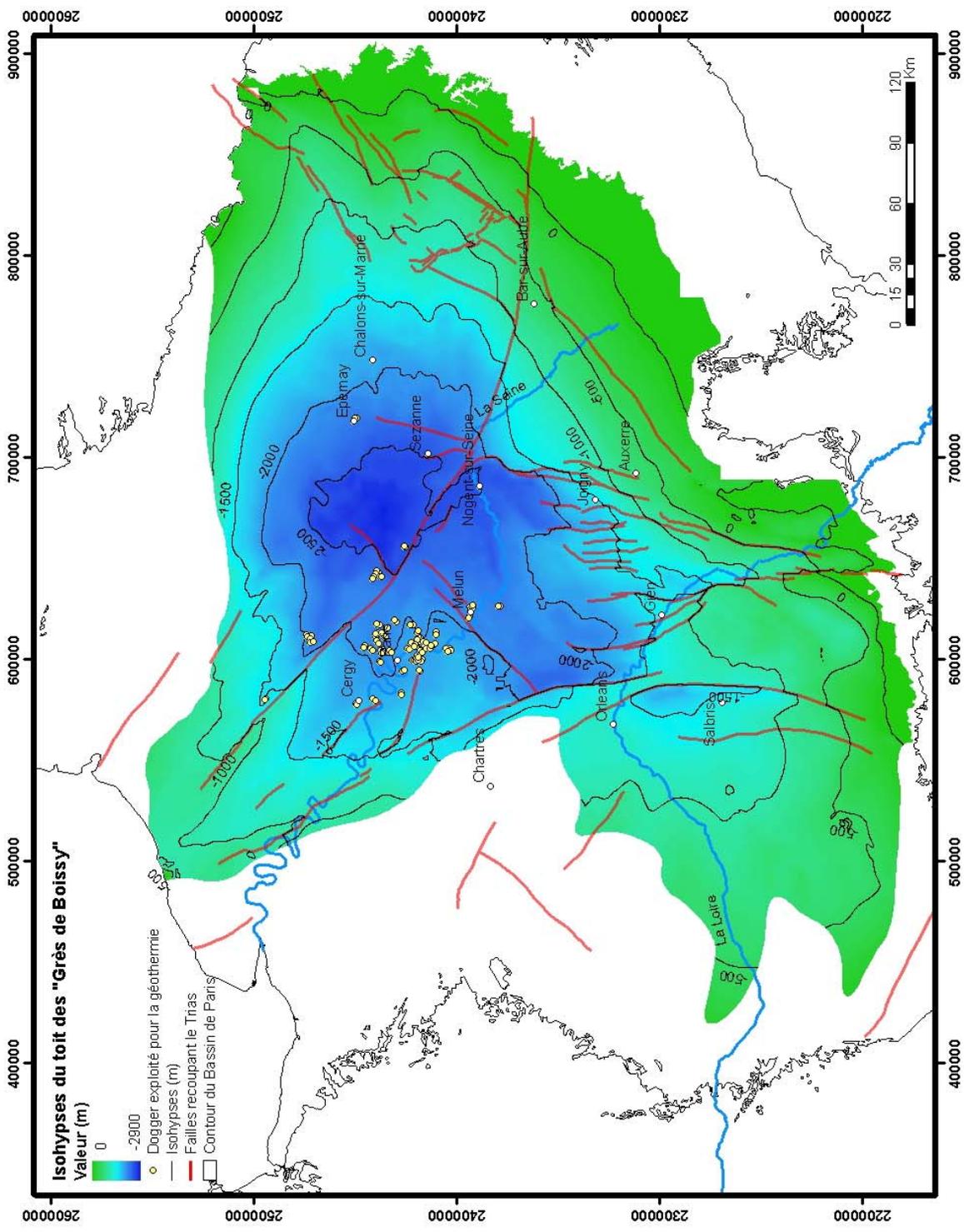


Figure 27 : Carte des isohyèses du toit du réservoir des Grès de Boissy (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

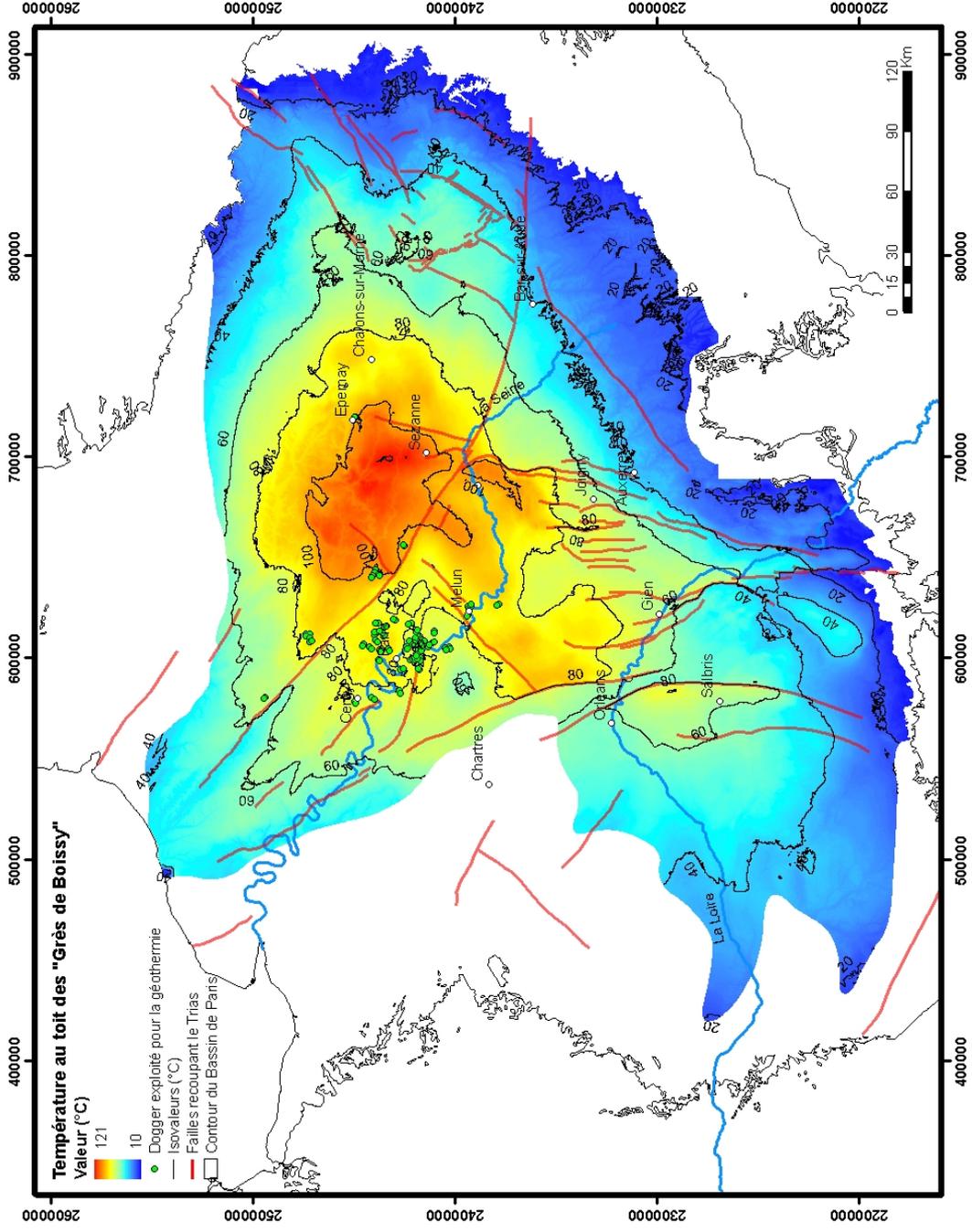


Figure 29 : Carte des températures au toit des Grès de Boissy

Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris

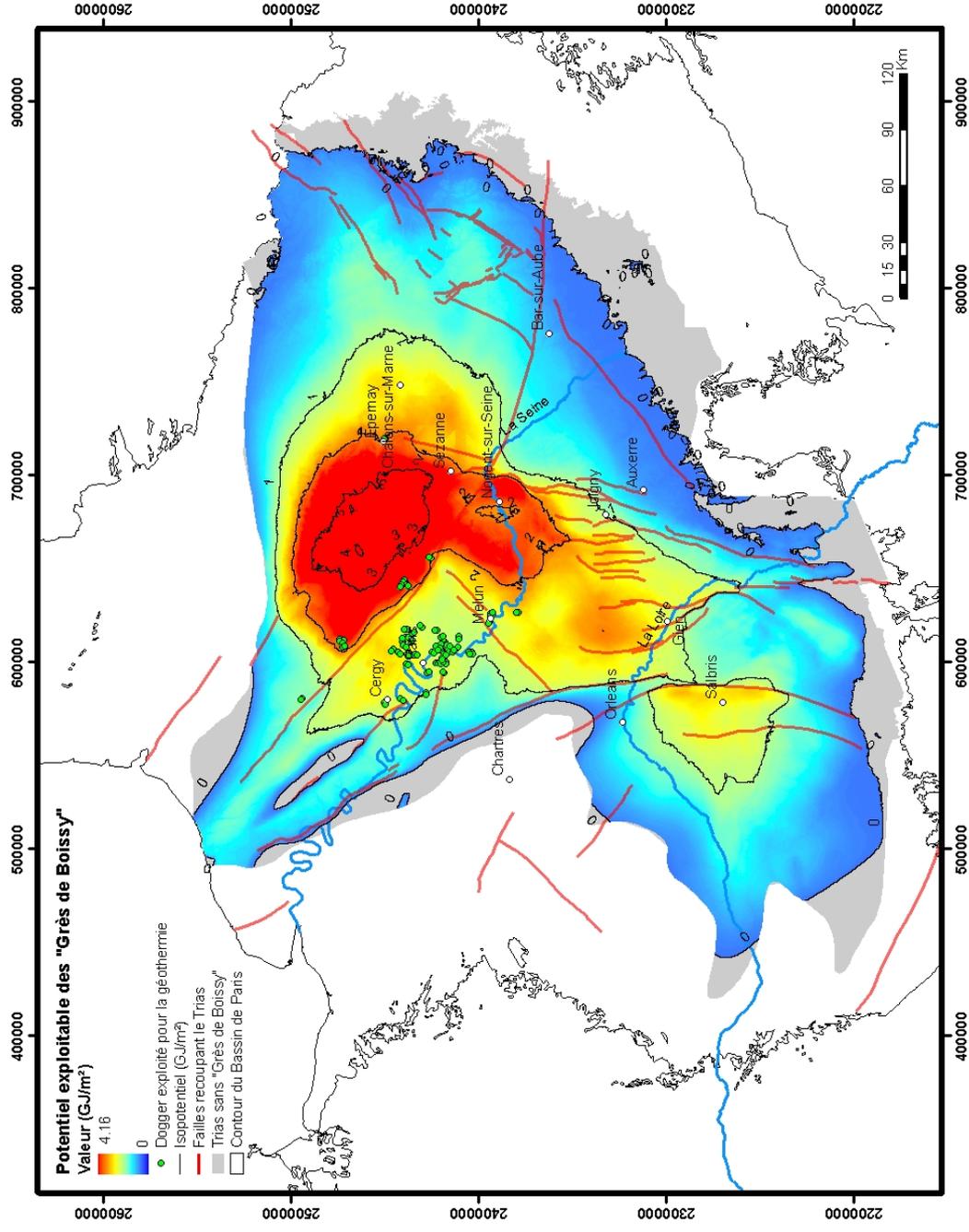


Figure 30 : Carte du potentiel géothermique des Grès de Boissy, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m²

4.5. RESERVOIR CLASTIQUE DU RHETIEN MARIN

4.5.1. Géométrie et température du réservoir

La principale zone de dépôt-centre des Grès du Rhétien marin est située sur la Brie, la Champagne et le nord de la Bourgogne, où les profondeurs maximales sont comprises entre 2000 à 2850 m (fig. 31). Le tronçon sud de l'isohypse du toit du réservoir à 2500 m jalonne la faille majeure de Bray – Malnoue - Vittel (fig. 1). Quant aux températures du toit du réservoir, elles sont comprises entre 100 et 120°C dans les zones les plus profondes de dépôt-centre (fig. 33).

Au delà, la profondeur du toit du Rhétien marin décroît progressivement vers l'est et le sud-est, c'est-à-dire vers les bordures du bassin. Il en est de même des températures qui sont inférieures à 100°C.

En termes d'isopaque (fig. 32), il apparaît que la zone où les dépôts sont les plus épais est légèrement décalée vers l'est par rapport à la zone de profondeur maximale du réservoir (fig. 31) : elle atteint ainsi 40 m d'épaisseur sur la Champagne, entre Sézanne et Epernay. L'épaisseur moyenne des dépôts décroît progressivement en allant vers le sud-ouest, le sud-est et l'est (< 30 m). Cette distribution correspond au mode de dépôt de ces sédiments (succession de bras de mer transgressif en provenance du Luxembourg et de l'Allemagne), marqué par une intercalation croissante en argiles à l'est du bassin (Argiles de Levallois).

4.5.2. Evaluation du potentiel du réservoir (chaleur exploitable)

Les Grès du Rhétien marin constituent un réservoir multi-couches pour lequel les propriétés pétrophysiques sont satisfaisantes : la porosité moyenne est comprise entre 7 % (valeurs minimales) et 13,8 % (valeurs maximales) et la perméabilité moyenne est proche de 100 mD, pouvant dépasser 1 D. En liaison avec la transgression, les dépôts sont de plus en plus argileux vers l'est du bassin, conduisant à une dégradation probable des propriétés pétrophysiques.

Compte tenu du léger décalage spatial existant entre la zone d'épaisseur maximale des Grès du Rhétien marin et sa zone de profondeur maximale, le potentiel géothermique atteint seulement les 2 GJ/m², immédiatement au nord de la ville de Sézanne (fig. 34). Cette zone, d'extension limitée, se caractérise par des dépôts clastiques de 40 m d'épaisseur, profonds de 2500 m et dont la température avoisine les 110°C.

A noter que sous la zone d'exploitation actuelle du Dogger, les Grès du Rhétien marin sont absents, à l'exception des doublets de Meaux et surtout de Coulommiers situés à l'est de l'Île de France, où le potentiel du réservoir atteint seulement 1 GJ/m² (fig. 34).

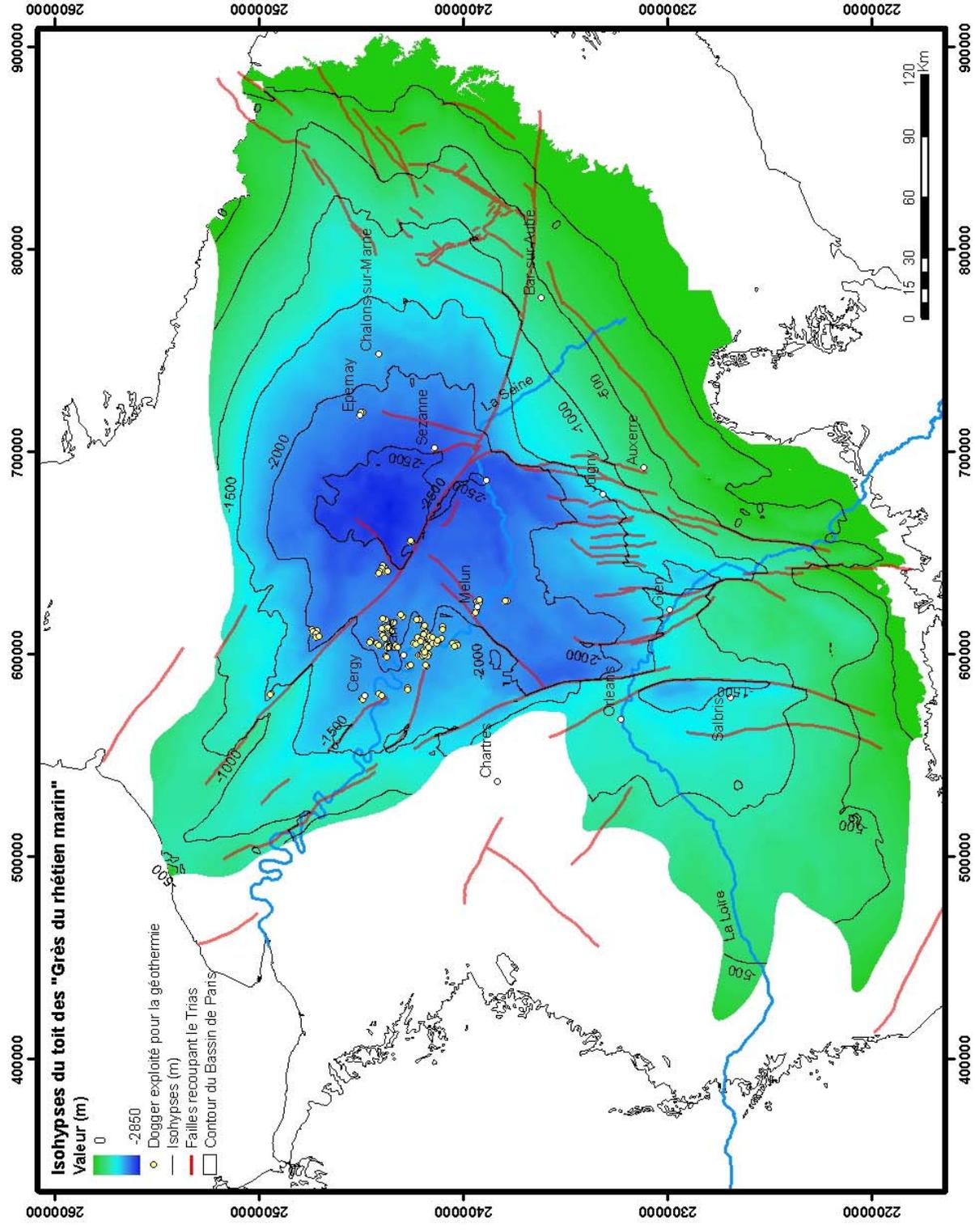


Figure 31 : Carte des isothermes du toit du réservoir des Grès du Rhétien marin (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

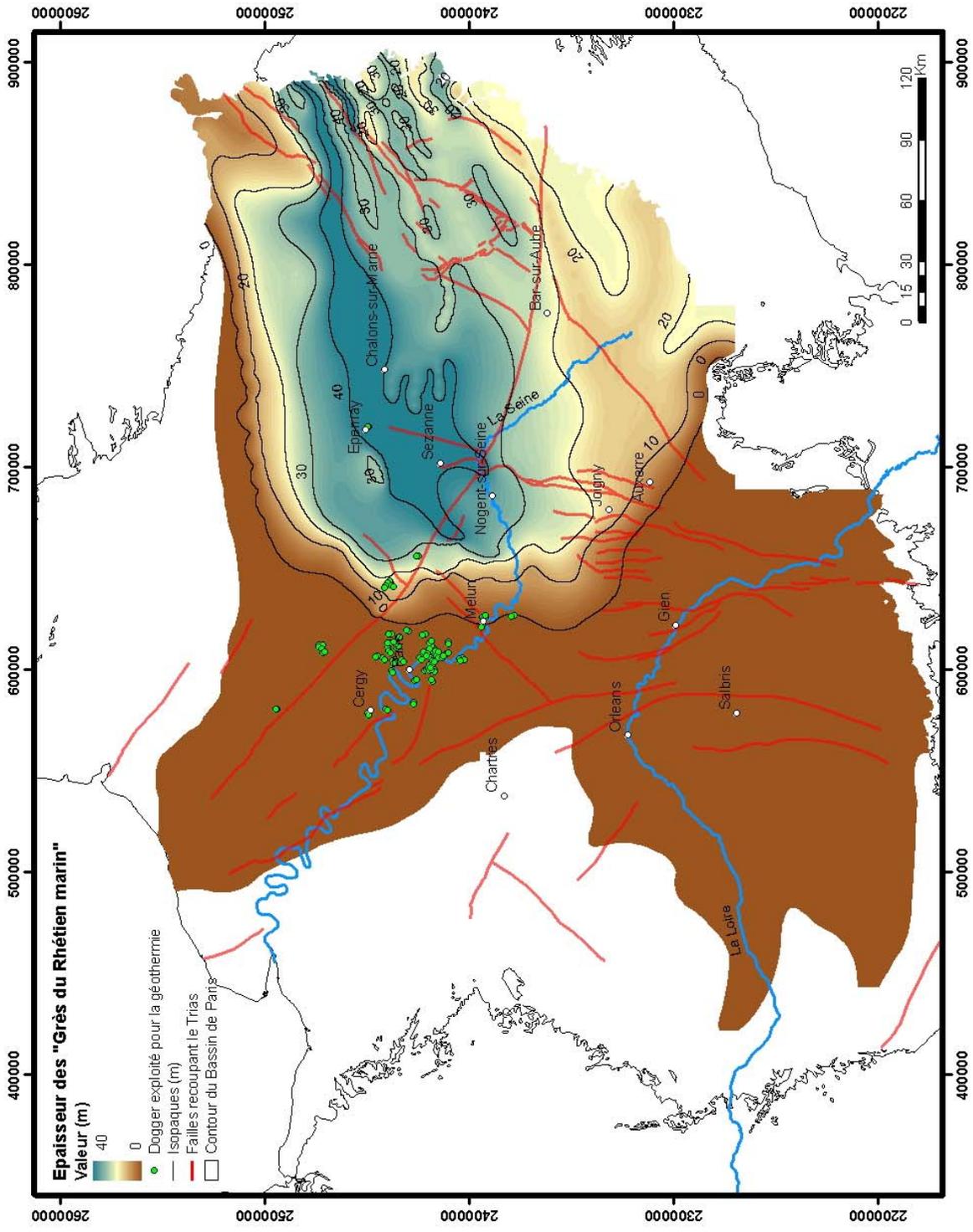


Figure 32 : Carte des isopaques du réservoir des Grès du Rhétien marin (modifiée d'après Delmas et al., 2002)

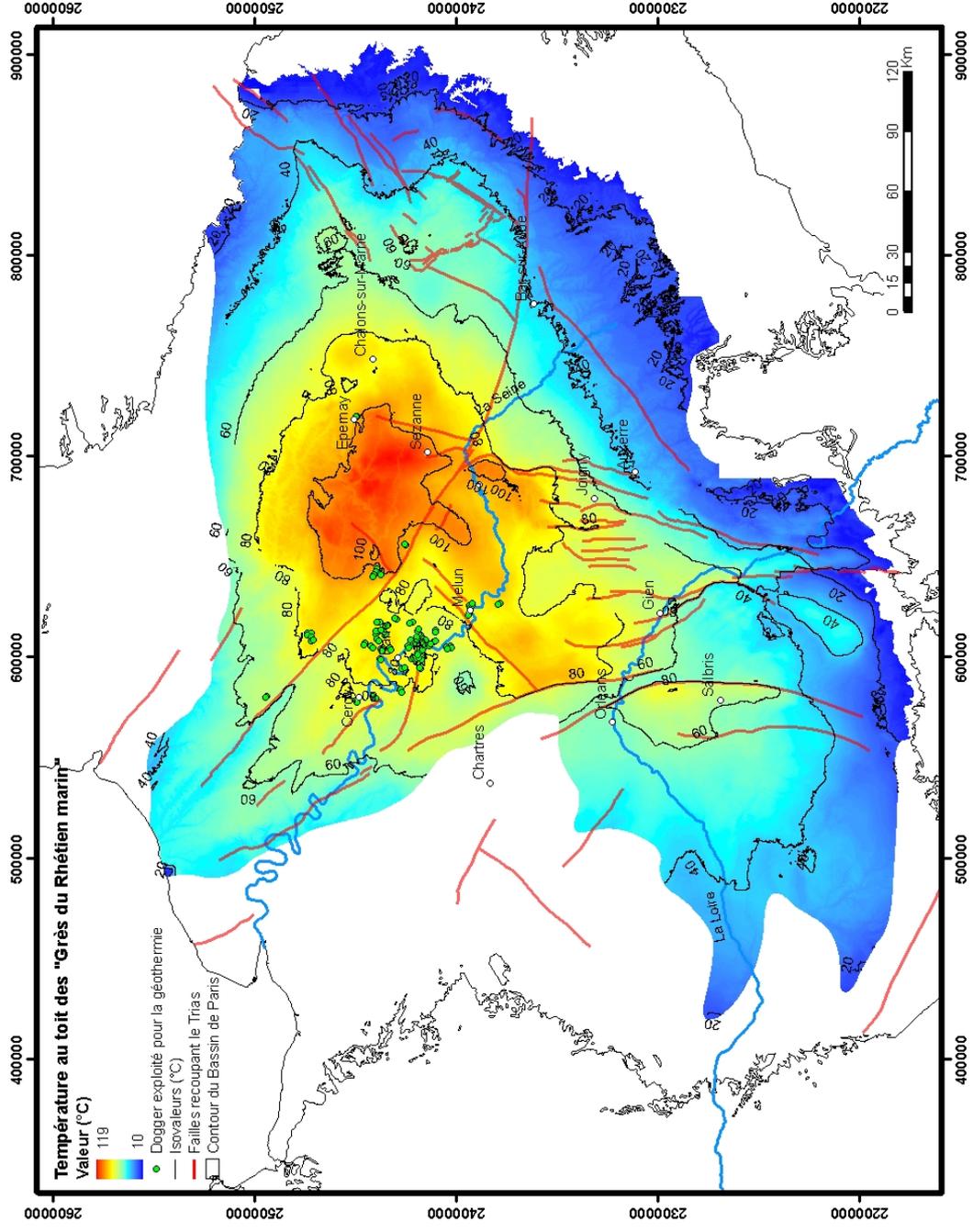


Figure 33 : Carte des températures au toit des Grès du Rhétien marin

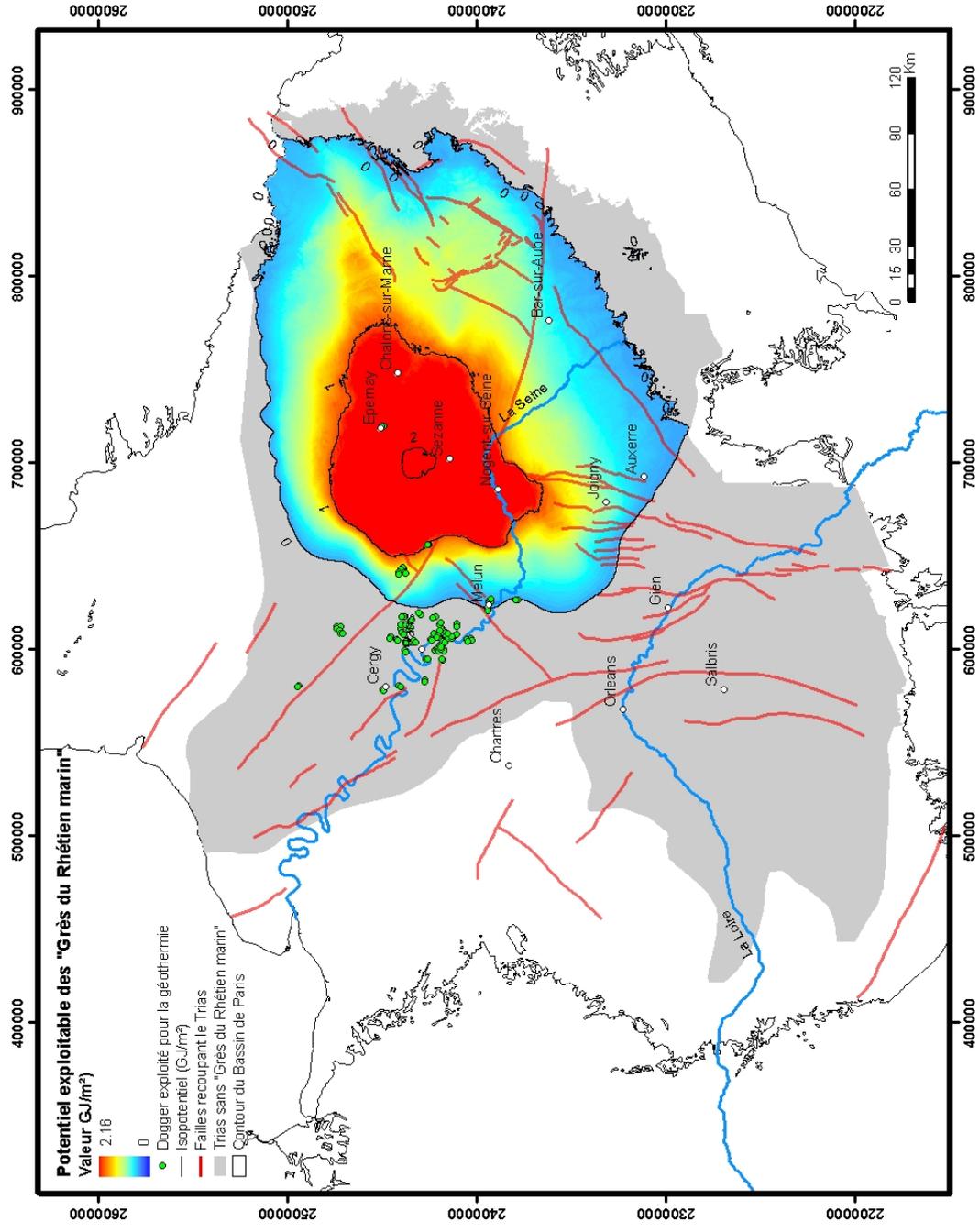


Figure 34 : Carte du potentiel géothermique des Grès du Rhézien marin, souligné par des isopotentiels à un pas de 1 GJ/m²

4.6. DISCUSSION : POTENTIEL DES RESERVOIRS DU TRIAS

Potentiel géothermique du Trias à l'échelle du Bassin de Paris

En comparant les estimations quantitatives des potentiels géothermiques des cinq réservoirs clastiques étudiés (figs. 18, 22, 26, 30 et 34 ; tab.3), on constate que les réservoirs les plus favorables sont par ordre d'importance :

- 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 » ;
- Les Grès de Chaunoy (Keuper moyen et supérieur, Rhétien), avec un potentiel maximal atteignant 7,7 GJ/m² dans la région de Château-Thierry et ce compte tenu de bonne corrélation entre épaisseur et profondeur du réservoir. Les propriétés pétrophysiques du réservoir y sont réputées correctes en moyenne (porosité 12,5%, perméabilité de 360 mD) mais très variables ;
- Les Grès continentaux de Boissy (Keuper supérieur, Rhétien), dont le potentiel maximum atteint 4 GJ/m² dans la région entre Compiègne et Epernay. Le potentiel est modeste mais apparait 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 ;
- Les Grès de Sainte Colombe-Voulzie (Keuper moyen, Carnien), et les Grès du Rhétien marin (Keuper supérieur, Rhétien), dont les potentiels maximum avoisinent respectivement 3 et 2 GJ/m² entre Brie et Champagne. Alors que le réservoir de Sainte Colombe-Voulzie possède des propriétés pétrophysiques médiocres, celles du Rhétien marin sont réputées satisfaisantes mais le réservoir demeure très peu épais.

A l'échelle du bassin, quand on cumule, par addition, le potentiel des différents réservoirs triasiques étagés (fig. 35), on constate que la cible Brie-Champagne, centrées sur la ville de Sézanne et incluant les villes de Meaux, Epernay, Nogent-sur-Seine, offre le meilleur potentiel géothermique cumulé (jusqu'à 35 GJ/m²). 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) aux zones de sédimentation les plus épaisses. Au sud de l'Île de France, la zone centrée sur Salbris et étendue à l'est d'Orléans constitue une cible secondaire dont le potentiel cumulé est compris entre 7 et 12 GJ/m².

Comparée à la carte du potentiel géothermique réalisée par Cautru et Maget (Haenel, 1989), on note que les valeurs de potentiel estimées en 1989 et 2008 (notre étude) sont tout à fait similaires que ce soit en région Ile de France ou région Centre avec des potentiels cumulés compris entre 2,5 et 15 GJ/m² (figs. 35 et 36). La principale

différence réside dans le fait qu'en 1989, le potentiel n'a pas été estimé en région Champagne car, pour Cautru et Maget, le Trias, dans sa globalité, constitue un réservoir trop argileux, ce qui ne ressort pas de notre description détaillée des réservoirs (chapitre §.2.2) au point d'éliminer le secteur.

Potentiel des réservoirs étagés sous le Dogger exploité	Zone centrale	Zone est	Illustration
Grès de Rhétien marin	0 (réservoir absent)	< 1	Figure 34
Grès de Boissy	< 2	~ 2	Figure 30
Grès de Chaunoy	< 2,5	~ 4	Figure 26
Grès de Sainte Colombe-Vouzie	0 (réservoir absent)	0 (réservoir absent)	Figure 22
Grès de Donnemarie	< 2	5 à 8	Figure 18
Potentiel du Trias sous le Dogger exploité	Zone Centrale	Zone est	Illustration
Total cumulé Trias	2 (Cergy) à 6 (Melun)	~12	Figure 37

Tableau 3 - Récapitulatif des potentiels géothermiques (estimés en GJ/m²) dans les réservoirs étagés du Trias, situés sous la zone d'exploitation du Dogger (en distinguant les zones centrale et est de la région Ile de France).

Potentiel géothermique du Trias sous la zone d'exploitation du Dogger

Si on considère l'estimation géothermique pour chacun des réservoirs clastiques du Trias situés sous la zone d'exploitation du Dogger, on constate que i) le potentiel varie en fonction du réservoir élémentaire estimé et ii) pour un même réservoir, ce potentiel augmente systématiquement en allant vers l'est et le sud-est (tab. 3). Situés dans la partie orientale de d'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 (fig. 36, tab. 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 du Trias, 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 (tab.1) 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.

Pour conclure, dans la mesure où les paramètres pétrophysiques sont souvent très variables d'un site à l'autre au sein d'un même réservoir, il s'agira, dans une deuxième étape, de quantifier ces paramètres à l'échelle des cibles à fort potentiel géothermique retenues dans notre étude. Les paramètres de transmissivité, débits sont essentiels à une exploitation géothermique durable de l'aquifère.

Potentiel géothermique du Trias clastique du Bassin de Paris

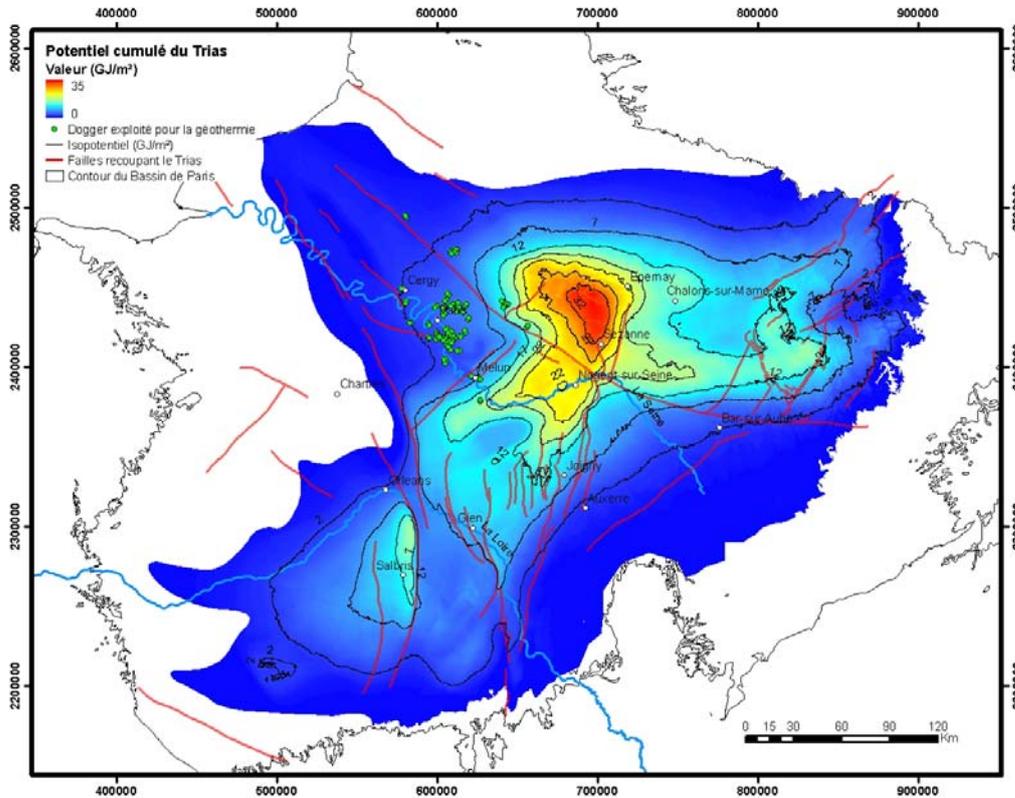


Figure 35 : Carte du potentiel géothermique, obtenue par cumul des potentiels de chacun des cinq réservoirs clastiques triasiques, à l'échelle du Bassin de Paris (cette étude)

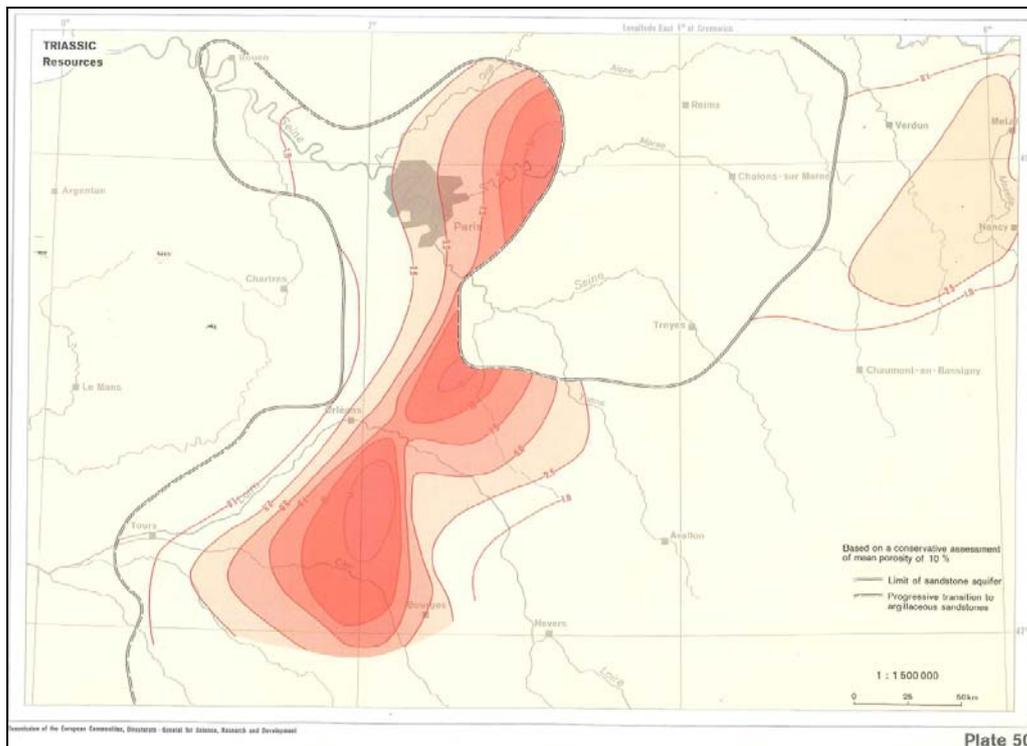


Figure 36 : Carte du potentiel géothermique du Trias, à l'échelle du Bassin de Paris, réalisée par Castru et Maget (in Haenel, 1989). Les valeurs maximales atteignent 15 GJ/m² (en rouge).

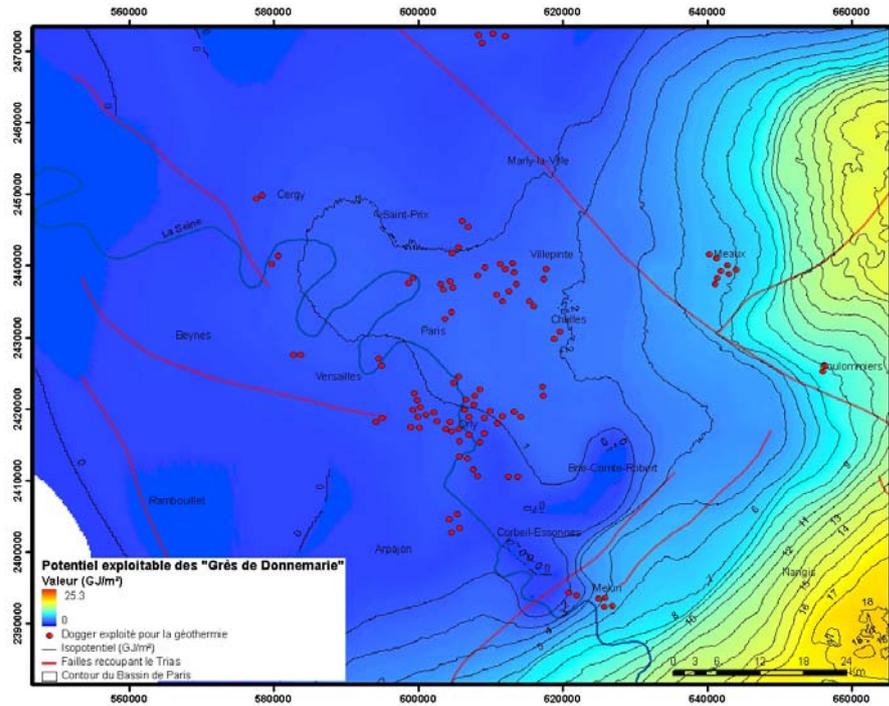


Figure 37 : Carte du potentiel géothermique (chaleur exploitable) des Grès de Donnemarie, situés sous le Dogger exploité (région Ile de France). Il s'agit d'un zoom de la figure 18.

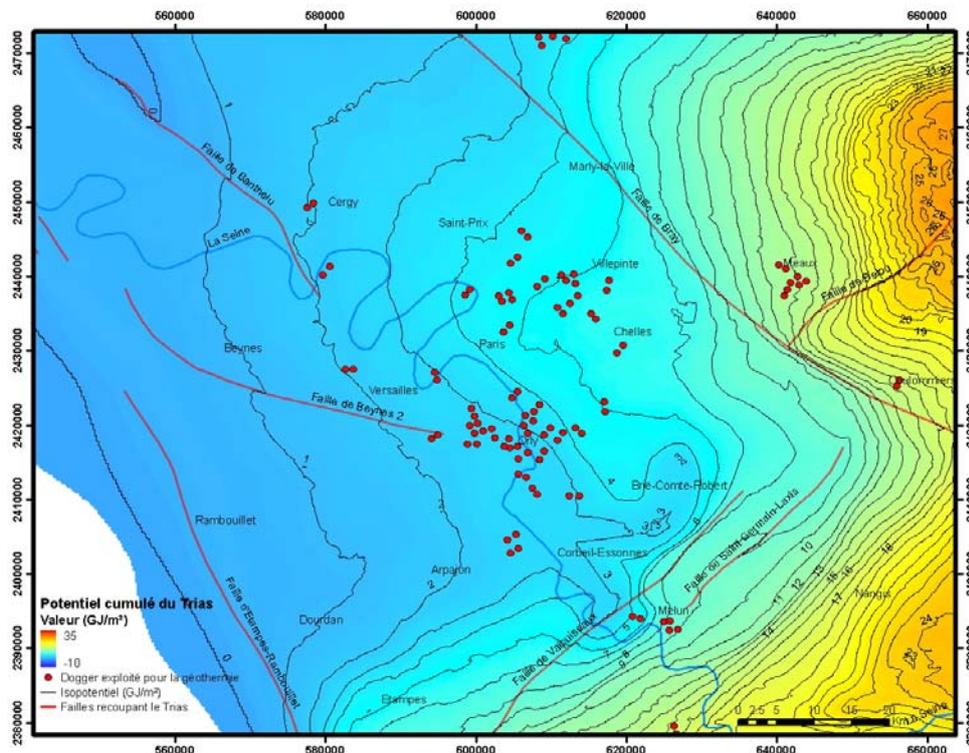


Figure 38 : Carte du potentiel géothermique cumulé des réservoirs clastiques du Trias, situés sous le Dogger actuellement exploité en Ile de France. A noter l'évolution des isopotentiels en allant vers l'Est. Il s'agit d'un zoom de la figure 35.

5. Conclusions et perspectives

5.1. CONCLUSIONS

Le potentiel du Trias du Bassin de Paris a été estimé à l'échelle du bassin de Paris pour chacun des cinq réservoirs clastiques sélectionnés. En comparant les estimations quantitatives des potentiels, on constate que les réservoirs les plus favorables sont par ordre d'importance :

- 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) ;
- Les Grès de Chaunoy (Keuper moyen et supérieur, Rhétien), avec un potentiel maximal atteignant 7,7 GJ/m² dans la région de Château-Thierry ;
- Les Grès continentaux de Boissy (Keuper supérieur, Rhétien), dont le potentiel maximum atteint 4 GJ/m² dans la région entre Compiègne et Epernay.
- 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.

Les températures susceptibles d'être exploitées sont comprises entre 80 et 125°C ; outre la production de chaleur, de telles températures pourraient permettre la production d'électricité par cycle binaire. Il s'avère que certaines cibles favorables, localisées notamment en Brie-Champagne, sont en partie hors des bassins de consommateurs de chaleurs potentiels. En revanche, une exploitation d'électricité aurait l'avantage, outre la production d'énergie, d'exploiter des réservoirs situés à l'aplomb de secteurs peu dense en habitant.

5.2. PERSPECTIVES AU VOLET « BASSIN DE PARIS » DE CLASTIQ

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. 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 ré-injectée.

Trois thèmes de recherches, formulés comme 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 répondre à cette question, il conviendrait de :

- Affiner 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) ;
- Réaliser à partir des données de CLASTIQ1, un modèle géométrique 3D, fiable, des réservoirs clastiques du Trias (jusqu'à 5 réservoirs étagés) à l'aplomb de la région Ile de France et des cibles géothermiques potentielles ;
- Déterminer les facteurs contrôlant les variations du gradient thermiques dans le Bassin de Paris (anomalie favorables pour la prospection).

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

2- Vers la production 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, températures, K, porosité, emmagasinement, conductivité hydraulique) ;
- Déterminer le rôle des hétérogénéités structurales (macrofracture et microfissuration) sur ces paramètres. Comment gérer le problème d'upscaling 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. Déterminer la distance idéale entre les deux puits d'un même doublet pour un réservoir clastique ? Rôle des fluides ?

Ce travail déboucherait sur l'élaboration :

- d'un modèle d'hétérogénéités sédimentaires et tectoniques du réservoir clastique à l'échelle d'un doublet (5x5 km² x 1 km vertical ?) en fonction de l'environnement clastique ;
- d'un modèle de simulation d'écoulement à l'échelle d'un doublet en production en fonction de l'environnement clastique.

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

Dans la continuité de la synthèse bibliographique sur la problématique « ré-injection », réalisée dans le cadre de 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 anthropique) peuvent engendrer le phénomène de venues de sable (*sanding*), etc.

Ce travail déboucherait sur l'élaboration d'un modèle de comportement des fines et de venue de sable à l'échelle des puits de production et de ré-injection

En termes de méthodologie, il conviendra de déterminer le ou les types d'approche adaptée aux problématiques scientifiques définies ci-dessus : « approche par analogie géologique », et/ou « approche numérique conceptuelle ».

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 (Alsace, Bassin du Sud-est) ou 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 venue 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.

6. Bibliographie

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., Bourguin B., Bouchot V. (2008) - Nouvelles cartographies des températures des bassins sédimentaires français. *Résumé et poster à la Réunion des sciences de la Terre (RST 2008), Nancy, 21-24/04.*

Cautru J.P. (1984) - Une approche exhaustive des difficultés rencontrées pour la réinjection dans les formations argilo-gréseuses du Trias. La réinjection dans les réservoirs argilo gréseux. Aspect géologique du problème. *Géothermie Actualités*, 4, p. 28-28

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.

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 BRGM - RP-55729-FR*, 72 p

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.

Gringarten A.C. (1978) - Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for urban heating. *Pure and Applied Geophysics*, 117, 1, p. 297-308

Guillocheau F., Robin C., Allemand P., Bourquin S., Brault N. et al. (2000) – Meso-Cenozoic geodynamic evolution of the Paris Basin : 3D stratigraphic constraints. *Geodinamica Acta*, 13, p. 189-246

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.

Hamon Y., Merzeraud G. (2005) – Nouvelles données sur le Trias de Sologne (Chémery, sud-ouest du bassin de Paris) : stratigraphie et environnements de dépôts. *Géologie de la France*, p. 3-22

Housse B., Maget Ph. (1976) - Potentiel géothermique du bassin parisien. Action concertée entre le BRGM et le groupe ELF-Aquitaine, *Edition BRGM*, 125 p.

Hurter S., Haenel R. (2002) - Atlas of Geothermal Resources in Europe. *Office for Official Publications of the European Communities*

Hurter S., Schellschmidt R. (2003) - Atlas of geothermal resources in Europe. *Geothermics*, 32, 4-6, p. 779-787

Jorand C., Bouchot V. (2008) - Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein » du bassin Bressan, France. *Rapport BRGM, RP-56462-FR*, 35 p.

Lavigne J. (1978) - Les ressources géothermiques françaises, possibilités de mise en valeur. *Annales des Mines*, Avril, p. 57-72

Lopez S., Millot R., avec la collaboration de Brach M., Hervé J.Y., Innocent C., Négrel Ph. et 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 (Projet CLASTIQ). *Rapport BRGM/RP-56630-FR*, 196 p.

Mégnien C. et collaborateurs Courel, L., Durand, M., Maget, P., Maiaux, C., Ménillet, F., Pareyn, C. (1980) - Synthèse géologique du Bassin de Paris, *Mémoire du BRGM* N°101, 102 et 103.

Merzeraud G. (1992) – Géométrie et signification géodynamique des sequences de dépôts en domaine continental et marin restreint : exemple du Lias inférieur du Sud-Ouest du bassin de Paris (applications aux potentialités de stockage de gaz naturel en nappes aquifères). *Thèse de Doctorat*, Université de Strasbourg, 164 p.

Muffler P., Cataldi R. (1978) - Methods for regional assessment of geothermal resources. *Geothermics*, 7, 2-4, p. 53-89

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.

Schärli U., Rybach L. (2001) - Determination of specific heat capacity on rock fragments. *Geothermics*, 30, 1, p. 93-110

Weber K. (1986) - Reservoir characterization. *Academic Press*.

Annexe 1

Conception de la base de données « Réservoirs clastiques » du Trias du Bassin de Paris

Afin de structurer les données utiles à la caractérisation géométriques des réservoirs clastiques du Trias du Bassin de Paris, une base de données a été créée (Ossi, 2008). Chaque champ y renseigne une information précise concernant la géométrie (profondeurs du toit et du mur, épaisseurs) et les paramètres pétrophysiques (porosité, perméabilité...) des formations clastiques triasiques, recoupées par les 617 forages pétroliers sélectionnés.

Dans la base de données, les champs sont répartis par sous – ensembles.

➤ **L'archivage des forages**

- Le champ « N° Archivage numérique » permet de classer les forages selon leurs numéros d'archivages du BEPH (bureau exploration-production des hydrocarbures).
- Le champ « BRGM_IND » regroupe des codes spécifiques au BRGM, appelés indices BSS (banque du sous-sol). Les codes BSS permettent d'archiver les dossiers de forages présents au BRGM. Chaque indice est constitué de 10 caractères (Fig.5) : les quatre premiers chiffres de l'indice désignent le numéro BRGM de la carte géologique au 1/50000^e sur laquelle le forage est situé. Les deux caractères suivants, - un chiffre, - suivi d'un « X » - indiquent le huitième de la carte géologique où est localisé le forage. Les quatre derniers chiffres correspondent à une numérotation chronologique des dossiers par ordre d'entrée dans la banque du sous-sol.

➤ **La localisation des forages**

- Les champs « X » et « Y » indiquent les coordonnées de chaque puits dans le système Lambert 2.
- Le champ « commune » indique le nom de la commune où a été implanté le forage.
- Le champ « nom puits » donne le nom du forage. Ce nom correspond généralement à celui du quartier, de la ville où a été implanté le puits. Il peut se terminer par un numéro caractéristique lorsque plusieurs forages ont été effectués dans la même ville. Par exemple « Cergy 2 » est le deuxième puits foré à Cergy.

➤ **Les paramètres géométriques et litho-stratigraphiques**

- Le champ « Z sol » donne l'altitude à la surface du sol au lieu du forage.
- Le champ « niveau atteint » permet d'indiquer l'étage géologique où s'est arrêté le forage.
- Le champ « profondeur totale forée » indique la profondeur de chaque puits.

- Le champ « épaisseur forée dans le Trias » indique les profondeurs du toit et du mur du Trias lorsque celui-ci a été entièrement traversé par le forage. Si le forage s'est arrêté dans le Trias on indique la profondeur finale du puits.
- Le champ « facies (lithologique) » indique les variétés de faciès lithologiques rencontrés.
- Le champ « formation lithologique reconnue dans le Trias et épaisseur verticale » indique le nom de toutes les formations géologiques cibles reconnues pendant le forage. Il s'agit également d'identifier la profondeur du toit et la profondeur du mur du réservoir potentiel. Cependant, cette caractérisation par l'opérateur du forage n'est pas toujours systématique. En l'absence de marqueur stratigraphique dans les logs, il n'a pas été possible de reconstituer précisément le découpage litho-stratigraphique, comme a pu le faire l'IFP dans sa récente synthèse du Bassin de Paris (Delmas *et al.*, 2002) mais plutôt de déterminer l'emprise des « ensemble à dominante gréseuse » fondée sur la description lithologique du forage.
- Pour chacun des corps reconnus dans le Trias, un champ unique renseigne chacun des paramètres suivants : profondeur du toit, profondeur du mur et épaisseur de la formation lithologique. Pour les puits où la formation n'est pas rencontrée ou n'est pas identifiée, la valeur zéro indique les profondeurs du toit et du mur du réservoir. L'indication « NI » est figurée lorsque les profondeurs ne sont pas identifiées.

➤ **Les propriétés pétrophysiques**

- Le champ « porosité quantitative » indique la valeur de la porosité de matrice, mesurée par diagraphie (densité neutron), directement dans le puits de forage, sur la formation géologique rencontrée. Ces valeurs peuvent éventuellement provenir de mesures réalisées sur plugs ou sur carottes. Pour chaque valeur de porosité relevée, la profondeur associée à la mesure est également notée ainsi que l'information relative à la formation géologique rencontrée.
- Le problème ici concerne principalement les unités de mesure, car dans les rapports de fin de sondages il n'est pas toujours spécifié si la mesure est exprimée en pourcentage (%) ou sous la forme d'une fraction. Il convient donc d'être vigilant pour le relevé de ce type d'information.
- La perméabilité est exprimée en milli-Darcy (mD). Les rapports de fin de sondages précisent si les valeurs ont été obtenues à l'issue de mesures sur plugs ou sur carottes. A l'image des informations associées aux mesures de porosités, la perméabilité est également associée à une formation géologique et une profondeur précise.
- La température (cf. paragraphe suivant) est mesurée grâce au BHT (Bottom Hole Temperature = température mesurée en fond de puits). Elle est généralement donnée pour un intervalle de profondeur. Lors de la construction de la base de données seuls les intervalles de profondeurs correspondant aux réservoirs ciblés ont été retenus.

- Les mesures de pressions sont réalisées lors des tests de production. Le champ « pression » renseigne sur l'existence ou l'absence de mesures.

➤ **Les paramètres hydrauliques**

- Le champ « nature du fluide (débit, perte) » contient les informations suivantes : i) nature des fluides recueillis lors des tests de production ou rencontrés lors du forage. Par exemple, le fluide recueilli peut être de l'eau salée, de l'eau douce, un mélange eau-huile, etc. ; ii) débit de production ; iii) formation géologique concernée ; et iv) intervalle de profondeur sur lequel le test a été réalisé. A noter que l'information « perte de boue » n'est que très rarement mentionnée pour les formations ciblées.
- Le champ « caractéristique fluide (salinité) » regroupe toutes les informations concernant la salinité des fluides mentionnés dans le champ ci-dessus. La salinité est exprimée en grammes par litres (g/l).
- Le champ « productivité / injectivité / transmissivité ». L'indice de production des formations mises en production ou testées. Cet indice s'exprime en mètres cubes par jour par kilogramme par centimètre carré ($m^3/j/kg/cm^2$). L'indice d'injectivité, exprimé en litres par minutes à une certaine pression (l/mn à x bar), est précisé si des essais d'injections de fluides ont été réalisés. Enfin, la transmissivité des aquifères en milli-Darcy mètres (mD.m) est calculée à partir des courbes de remonté en pression. Sur les 617 forages étudiés, seulement 11 puits ont fourni cette information.
- Le champ « commentaires (SW, VSh) » donne la teneur en eau et le taux d'argilosité des formations en pourcentage (%). Parfois, ce champ indique également si les formations traversées sont aquifères ou compactes.

Au total, la base de données « Réservoirs » clastiques du Trias du Bassin de Paris contient de informations sur 617 forages.



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

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