



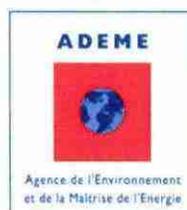
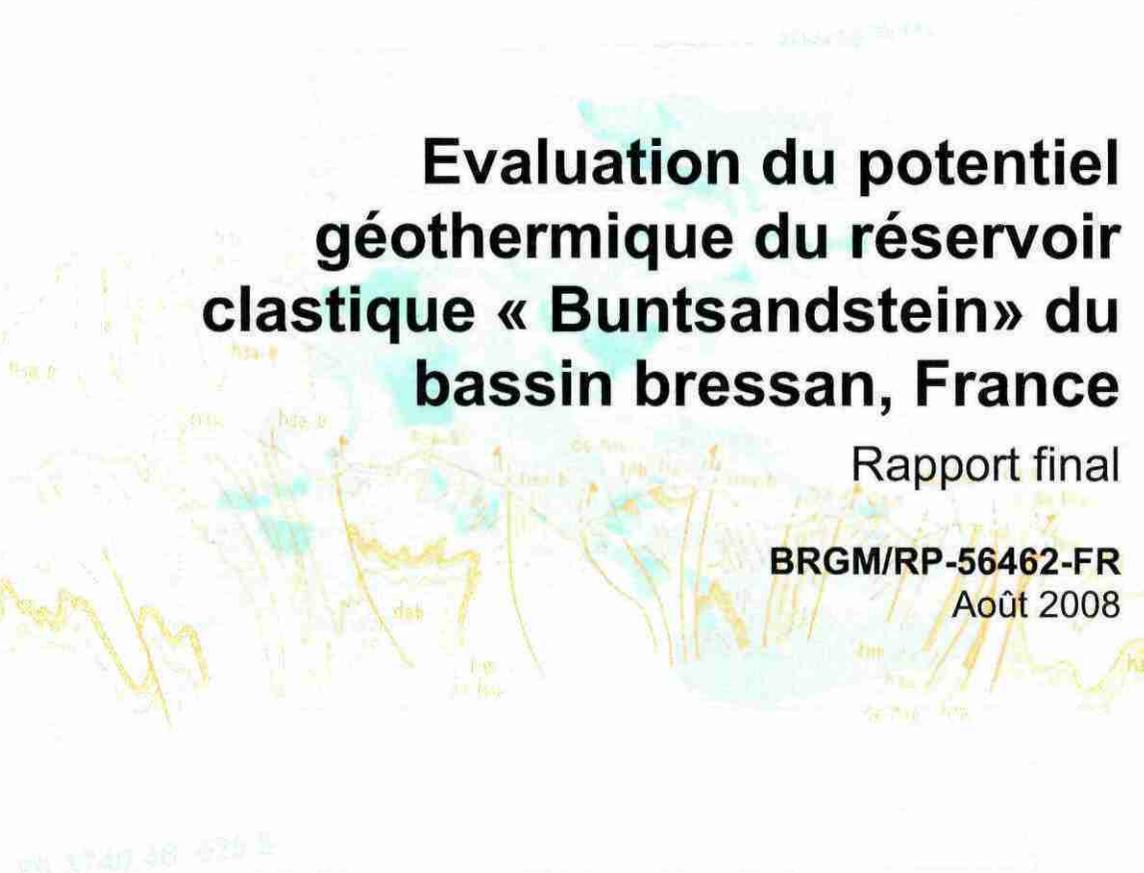
Document public

Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein » du bassin bressan, France

Rapport final

BRGM/RP-56462-FR

Août 2008





Evaluation du potentiel géothermique du réservoir clastique « Buntsandstein » du bassin bressan, France

Rapport final

BRGM/RP-56462-FR
Août 2008

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

C. Jorand, V. Bouchot

Vérificateur :

Nom : Chrystel DEZAYES

Date : 18 Juillet 2008

Signature :

Approbateur :

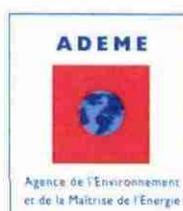
Nom : Fabrice BOISSIER

Date : 31 Août 2008

Signature :

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

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



Mots clés : Géothermie, Bresse, bassin bressan, potentiel géothermique, forages pétroliers, Interpolation

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

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

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

Synthèse

L'engouement actuel pour les énergies renouvelables nous amène à réfléchir sur le développement de la géothermie pour la production d'énergie dans d'autres réservoirs que celui du Dogger du bassin de Paris, et dans d'autres bassins sédimentaires français comme celui de la Bresse. Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet R&D CLASTIQ (2006-2008) sur l'évaluation des ressources géothermiques des réservoirs clastiques en France. Le projet CLASTIQ est cofinancé par l'ADEME et le BRGM (convention n°05 05 C0079 signée le 20 décembre 2005).

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

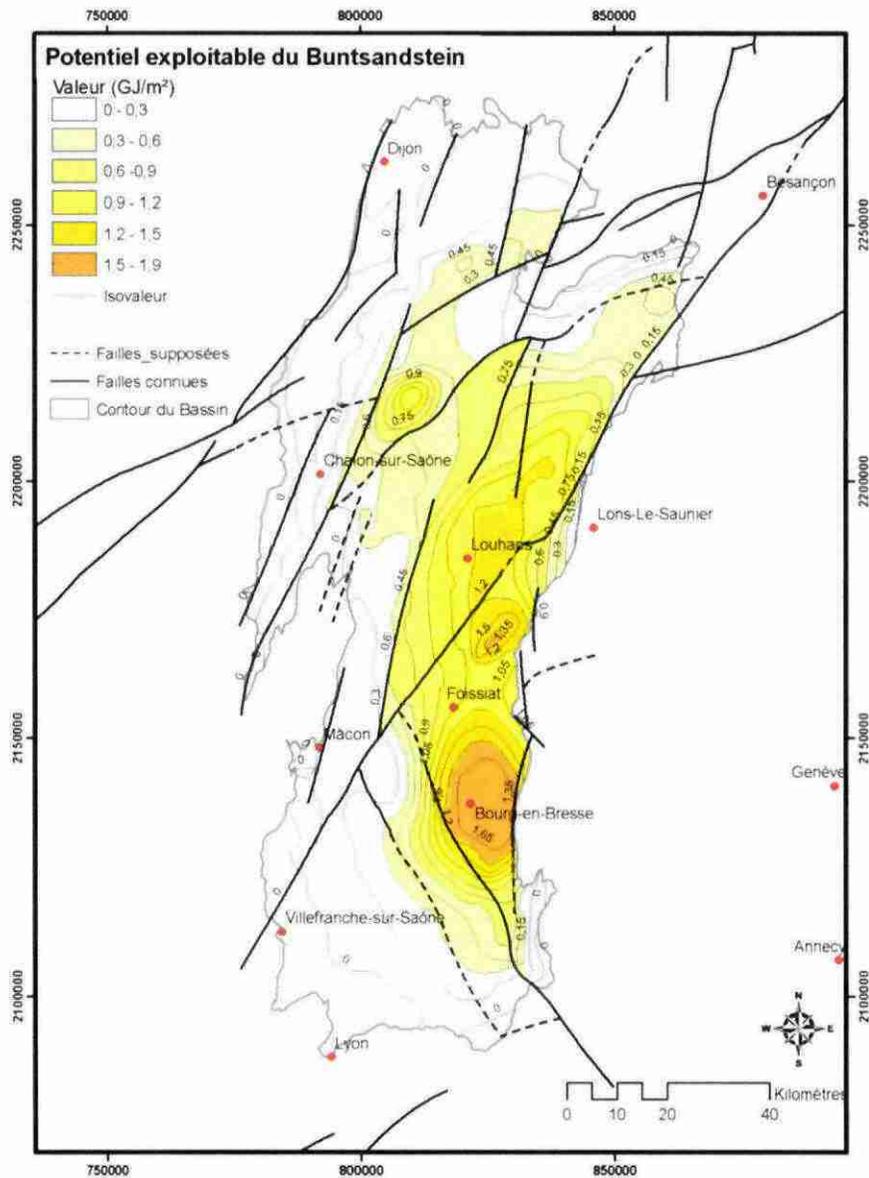
L'objectif de cette étude est donc d'évaluer le potentiel géothermique des formations clastiques¹, à dominante gréseuse, du Buntsandstein, à l'échelle du bassin Bressan, à partir de sources de données disponibles dans le domaine public (cartes, données de forages pétroliers,..) et académiques (synthèses géologique des années 1980, travaux de recherches récents). Pour se faire, une compilation des données publiques existantes (carte de profondeur, carte thermique, ...) a été complétée par des données géométriques réinterprétées à partir de logs de forages pétroliers. L'ensemble des données a ensuite été numérisé et interpolé afin d'élaborer des cartes intermédiaires d'épaisseur, de profondeur et de température du Buntsandstein. Enfin, ces cartes ont été combinées pour calculer la quantité de chaleur en place et le potentiel géothermique.

Cette évaluation du potentiel géothermique à l'échelle du bassin Bressan nous permet de mettre en avant deux principales zones d'intérêt : l'axe Louhans – Foissiat – Bourg en Bresse et la zone située au nord-est de Chalon-sur-Saône, qui coïncident avec les zones à la fois les plus profondes du bassin, les plus épaisses en grès du Buntsandstein et offrant un gradient anormalement élevé. Les réservoirs potentiels sont caractérisés par des températures comprises entre 100 et 140°C, à des profondeurs entre 2000 et 3000 m et des épaisseurs de 30 et 50 m. Compte tenu de ces épaisseurs réduites, les valeurs de la chaleur exploitable atteignent à peine 2 GJ/m², alors les valeurs obtenues dans le Buntsandstein alsacien sont de l'ordre de

¹ Selon les connaissances litho-stratigraphiques du bassin Bressan, les formations gréseuses du Tertiaire (Eocène, Oligocène) sont composées essentiellement de marnes renfermant parfois des lentilles gréseuses. Ces formations marneuses sont *a priori* défavorables à la géothermie.

15-30 GJ/m² (Dezayes *et al.*, 2007). Seules de fortes valeurs de perméabilité du Buntsandstein permettraient à ces zones favorables de constituer un réservoir géothermique.

Enfin, compte tenu des valeurs relativement faibles du potentiel géothermique de l'axe Louhans – Foissiat – Bourg-en-Bresse, il est recommandé d'affiner l'estimation du potentiel géothermique de cette zone d'intérêt, en considérant l'ensemble de ses réservoirs potentiels, étagés, qu'ils soient clastiques (Tertiaire, Buntsandstein) ou carbonatés (Jurassique).



Carte du potentiel géothermique de la formation gréseuse du Buntsandstein du bassin Bressan

Sommaire

1. Introduction	7
2. Géologie du bassin Bressan et de son réservoir Buntsandstein	9
2.1. GEOLOGIE DU BASSIN BRESSAN	9
2.2. GEOLOGIE DU RESERVOIR « BUNTSANDSTEIN »	16
3. Géométrie et température du Buntsandstein	17
3.1. METHODOLOGIE D'ELABORATION DES CARTES D'EPaisseur , DE PROFONDEUR ET DE TEMPERATURE DU BUNTSANDSTEIN	17
3.1.1.Méthodologie « Cartes de profondeur du Buntsandstein »	17
3.1.2.Méthodologie « Carte d'épaisseur du Buntsandstein »	18
3.1.3.Méthodologie « Cartes des températures »	19
3.2. ANALYSE DES CARTES	19
3.2.1.Profondeur du socle (isohypse du toit du Permien).....	19
3.2.2.Epaisseur, extension et volume du Buntsandstein.....	19
3.2.3.Gradient thermique et température de la base du Buntsandstein	20
4. Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Buntsandstein »	25
4.1. METHODE DE CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE	25
4.2. POTENTIEL DU RESERVOIR « BUNTSANDSTEIN »	26
5. Conclusions et recommandations	31
6. Bibliographie	33

Liste des illustrations

Figure 1: Carte de localisation du bassin Bressan (en rouge) dans le système de rifts cénozoïques ouest-européens.	10
Figure 2: Carte géologique du bassin Bressan (périmètre géographique délimité par le trait rouge). D'après la carte géologique de la France à l'échelle 1/500 000 (Debrand-Passard et al., 1984).....	11
Figure 3 : Paléoenvironnement de dépôt au Scythien (Trias Inférieur) et future position supposée du bassin Bressan (en rouge) (d'après Bourquin et al., 2006).	12
Figure 4 : Succession lithologique du bassin Bressan et localisation des Grés du Buntsandstein à la base de la pile (cible de l'étude). Cette illustration est extraite de l'étude de Jauffret et Legrand, 2008, cofinancée par l' Agence de l'Eau RM&C et le BRGM (à paraître).	13
Figure 5 : Coupe lithostratigraphique du Trias (d'après Debrand-Passard et al., 1984). Variations latérales de puissance et de faciès dans le domaine septentrional. Les profondeurs sont données par rapport au sol, le toit du Rhétien (= toit du Trias) est ramené à l'horizontal. Une localisation précise des profils A et B par rapport aux limites géographiques du bassin Bressan est présentée sur la figure 6.	14
Figure 6 : Localisation des forages recoupant le Trias et pris en compte dans cette étude afin de déterminer l'épaisseur et l'extension du Buntsandstein. La couleur des points correspond à la lithologie atteinte en pied de forage. Les profils A et B sont ceux de la figure 4.	15
Figure 7 : Carte des isohypses du toit du Permien du bassin Bressan (hors partie du bassin masqué par le Jura à l'est).	21
Figure 8 : Carte d'épaisseur des grés du Buntsandstein du bassin Bressan, réalisée à partir de l'interpolation des données de 17 forages pétroliers, avec leur position.	22
Figure 9 : Carte des isogradients thermiques du bassin Bressan (hors partie du bassin masqué par le Jura à l'est).	23
Figure 10 : Carte des températures évaluées à la base du Buntsandstein (= toit du Permien).	24
Figure 11 : Carte de la quantité de chaleur en place (Q) présente en GJ par m ² dans la formation gréseuse du Buntsandstein du bassin Bressan.	28
Figure 12 : Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) en GJ par m ² dans la formation gréseuse du Buntsandstein du bassin Bressan.	29
Figure 13 : Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) en GJ par m ² dans la formation gréseuse du Buntsandstein et isohypses du toit du Permien du bassin Bressan.....	30
Tableau 1 : Caractéristiques géologiques et pétrophysiques du réservoir Buntsandstein du bassin Bressan	
Tableau 2 : Paramètres de calcul de la quantité de chaleur contenue dans un volume de roche de type grés.	

1. Introduction

L'engouement actuel pour les énergies renouvelables nous amène à réfléchir sur le développement de la géothermie pour la production d'énergie dans d'autres réservoirs que celui du Dogger du bassin de Paris, et dans d'autres bassins sédimentaires français comme celui de la Bresse.

Le bassin Bressan appartient au système de rifts cénozoïques ouest-européen qui présentent des gradients thermiques anormalement élevés compte-tenu de leur contexte géodynamique de formation (remontée du Moho). A ce titre, il constitue un fossé d'effondrement (graben), étroit et profond, qui offre des températures dépassant les 100°C à des profondeurs entre 2000 et 3000 m. La ressource potentielle est plus précisément située dans les formations clastiques², à dominante gréseuse, du Buntsandstein (Trias inférieur).

Le Buntsandstein constitue un réservoir géothermal potentiel pour la production de chaleur et/ou d'électricité qui reste à évaluer, sachant que la dernière synthèse géologique date des années 80 (Debrand-Passard *et al.*, 1984).

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

Pour atteindre notre objectif, la démarche adoptée a été la suivante :

- dans un premier temps, les données publiques existantes à savoir i) les cartes de profondeurs du socle, d'épaisseur du Trias et les coupes litho-stratigraphiques extraites de la synthèse de Debrand-Passard *et al.* (1984), et ii) la carte du gradient thermique réalisée par Gable (1986) ont été compilées. Ces données ont ensuite été complétées : i) par des données sur l'épaisseur du Buntsandstein extraites des logs de forages pétroliers, effectués entre 1957 et 1968 et ii) par des données thermiques, extraites des mêmes forages pétroliers et corrigées par Bonté *et al.* (2008) dans le cadre du projet CLASTIQ ;
- dans un deuxième temps, ces données ont été numérisées et interpolées afin d'élaborer des cartes d'épaisseur, de profondeur et de température de la formation

² Selon les connaissances litho-stratigraphiques du bassin Bressan, les formations gréseuses du Tertiaire (Eocène, Oligocène) sont composées essentiellement de marnes refermant parfois des lentilles gréseuses éocènes. Ces formations marneuses sont *a priori* défavorables à la géothermie.

gréseuse du Buntsandstein. Ces cartes sont indispensables au calcul de la quantité de chaleur en place et du potentiel géothermique (chaleur exploitable).

Cette étude s'inscrit dans le cadre du projet scientifique CLASTIQ (2006-2008) sur l'évaluation des ressources géothermiques des réservoirs clastiques en France. Le projet CLASTIQ est cofinancé par l'ADEME et le BRGM (convention n°05 05 C0079 signée le 20 décembre 2005).

2. Géologie du bassin Bressan et de son réservoir Buntsandstein

Le bassin Bressan, aussi dénommé fossé de la Saône, est une dépression tectonique tertiaire, développée sur un substratum de sédiments secondaires (Permien à Crétacé), reposant sur un socle métamorphique varisque.

Orienté nord-sud, ce bassin est situé entre le Jura à l'est, et les reliefs bordiers du Massif central à l'ouest. Large de 60 km dans sa partie nord et de 45 km (à l'affleurement) dans sa zone moyenne et son secteur sud, il s'allonge sur 190 km, depuis Dijon au nord, jusqu'à la rive droite de l'Ain qui constitue sa limite méridionale (Figures 1 et 2).

2.1. GEOLOGIE DU BASSIN BRESSAN

Le bassin ou fossé Bressan appartient au système des rifts subméridiens, tel que le graben du Rhin, qui se développe en Europe de l'ouest dès la fin de l'Eocène (Figures 1 et 2). Il prolonge le graben du Rhin après un décalage vers l'ouest de 150 km le long de la faille de transfert Rhin-Saône qui borde le bassin au nord (Laubscher, 1970). La bordure ouest est représentée par des failles N20°E à N50°E. Les structures orientées N50°E sont parallèles aux structures varisques du Massif central (Rocher *et al.*, 2003). La partie est du bassin est chevauchée par la chaîne du Jura.

La structure actuelle du bassin est relativement mal documentée du fait de la présence d'une couche de sédiments Néogène qui recouvre toutes les structures anciennes.

Le socle, d'âge Dévonien à Permien, sur lequel reposent les formations du Buntsandstein (réservoir potentiel étudié), est affecté par trois principales familles de failles qui, par ordre d'importance, sont d'orientation NE-SW, NNE-SSW et NW-SE. Ces directions sont aussi présentes dans le graben du Rhin situé au nord-est du bassin Bressan. Des seuils tectoniques profonds à savoir l'axe Sennecy-la Serre et le seuil de Cormoz, sont totalement ennoyés par la sédimentation d'âge Oligo-Miocène et structurent le bassin en une succession de horsts et de grabens globalement allongés suivant la direction NE-SW (Rat, 1978 ; Bergerat *et al.*, 1990). La profondeur maximale du toit du socle (à savoir le toit du Permien) est de l'ordre de 3200 mètres au centre-est du bassin et dans sa partie central nord-ouest alors qu'il affleure quasiment à l'ouest du bassin (Laubscher, 1970).

A partir du **Trias inférieur (240 Ma)**, à la suite d'affaissement tectonique, le golfe germanique, venant de Bavière, ennoie peu à peu la Bresse et le Bas-Dauphiné (Figure 3) (Dubois et Umbach, 1974). Du continent vers la mer se succèdent des grès (cônes alluviaux et dépôts en tresse), des argilites gréseuses (plaines d'inondation)

puis des argilites sulfatées (Figure 4). Dans les bassins profonds, les saumures les plus denses se concentrent et du sel gemme précipite (Durand, 1978). Au niveau régional, à l'aplomb de la Bresse, le Trias présente des épaisseurs réduites par rapport à celles du Jura. L'épaisseur totale du Trias est de 386 m au centre du bassin (forage Bresse-Nord-101) et elle diminue fortement vers le nord-ouest, vers le sud et vers l'ouest. Cette réduction affecte tous les niveaux, mais particulièrement les plus anciens, tels que les faciès gréseux du Buntsandstein (Figure 5) (Debrand-Passard et al., 1984).

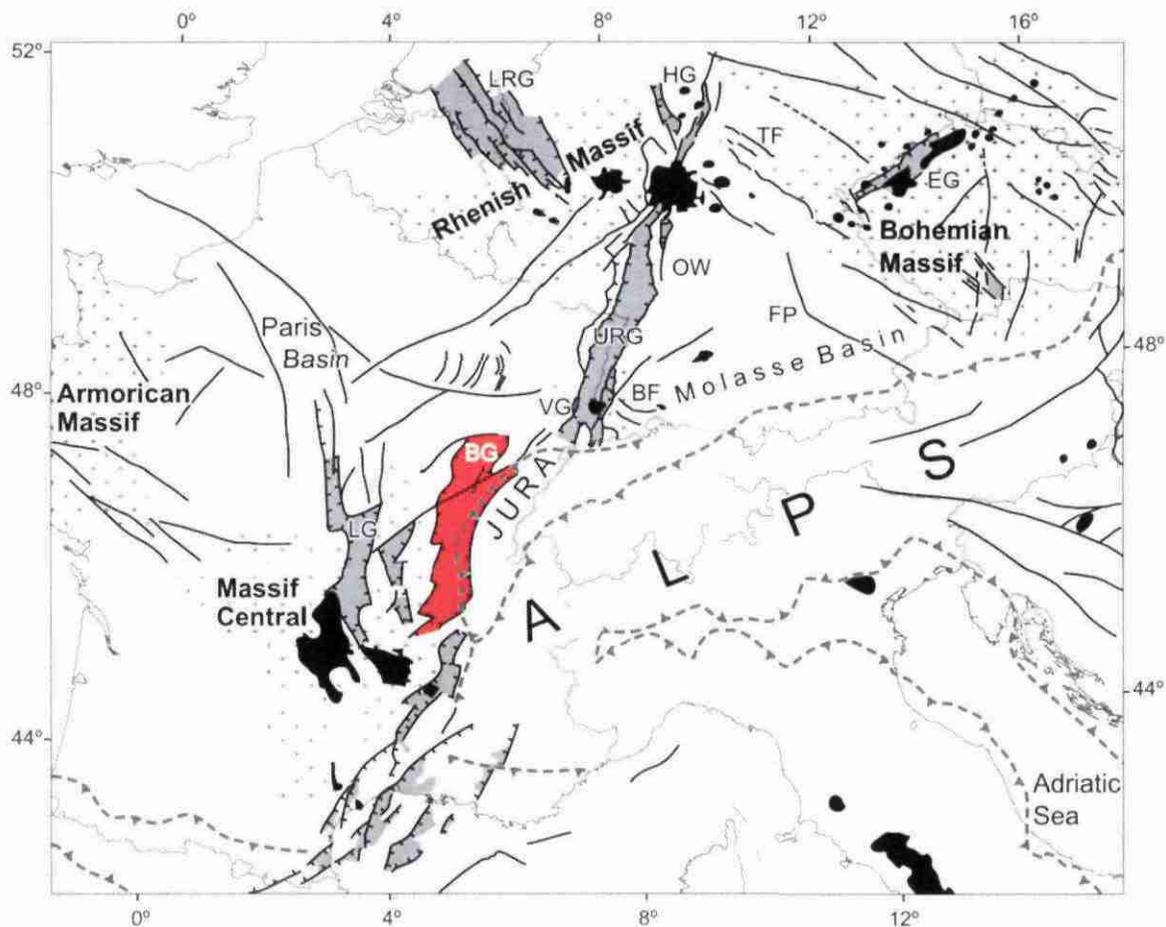


Figure 1: Carte de localisation du bassin Bressan (en rouge) dans le système de rifts cénozoïques ouest-européens.

Légende : systèmes de failles (lignes noires), bassins sédimentaires syn-rift (gris clair), massifs hercyniens (croix) et provinces volcaniques (en noir). Ligne en tirets : front de déformation alpin. BF : Forêt Noire (Black Forest), BG: bassin Bressan (Bresse Graben), EG: Graben d'Eger (Eger Graben), FP: Plateforme franconienne (Franconian Platform), HG: Grabens de Hesse (Hessian Graben), LG: Graben de Limagne (Limagne Graben), LRG: Graben Nord du Rhin (Lower Rhine Graben), URG: Fossé Rhénan (Upper Rhine Graben), OG: Odenwald, VG: Vosges (d'après Dézes et al., 2004).

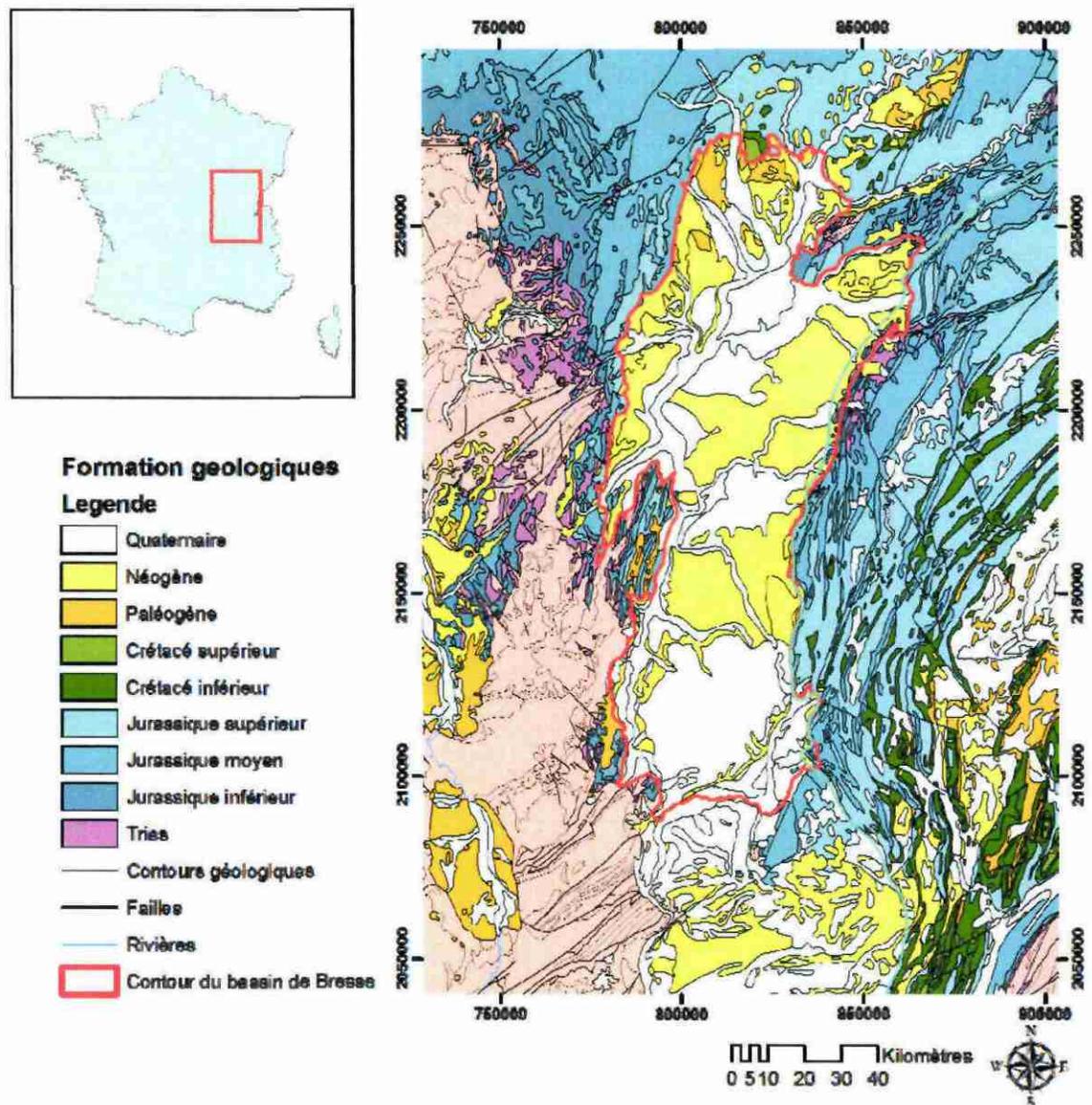


Figure 2: Carte géologique du bassin Bressan (périmètre géographique délimité par le trait rouge). D'après la carte géologique de la France à l'échelle 1/500 000 (Debrand-Passard et al., 1984).

Au cours du **Trias moyen et supérieur**, la transgression marine s'étend vers l'ouest et la mer s'approfondit. Les sédiments deviennent moins détritiques au profit de carbonates. Cette tendance s'accroît au Jurassique et la couverture sédimentaire **Mésozoïque** se déposent alors sur des blocs basculés de grès permo-triasiques (Gélard, 1978 ; Rocher et al., 2003). A l'**Eocène moyen**, le graben commence à subsider, l'épaisseur de sédiments tertiaires peut alors atteindre plus de 2000 m. *In fine*, seuls les dépôts syn- à post-néogènes affleurent dans le fossé (Figure 2).

En termes de champs de contraintes, quatre phases de structuration, correspondant au « cycle tectonique alpin », sont identifiées au Cénozoïque (Gélard, 1978 ; Bergerat, 1987 ; Blès, 1991) :

- la compression N-S dite « pyrénéenne » a atteint son apogée à la fin de l'Eocène ;
- un régime extensif E-W à NW-SE a siégé à partir de l'Eocène moyen jusqu'à l'Oligocène ; cette phase de distension est à l'origine de la formation du rift ouest européen, qui a produit l'alignement des fossés d'effondrement (fossés rhénan, Limagnes, Bresse, Valence, Nîmes, Alès, Camargue, Manosque....) recoupant à l'emporte-pièce toutes les structures antérieures ;
- un régime compressif, approximativement E-W, apparaît au Miocène tardif (WNW dans la partie nord du graben) ;
- depuis le Pliocène, le champ de contrainte extensif est orienté E-W à NE-SW.

Au total l'extension crustale a été estimée à moins de 2 km (Bergerat, 1991).

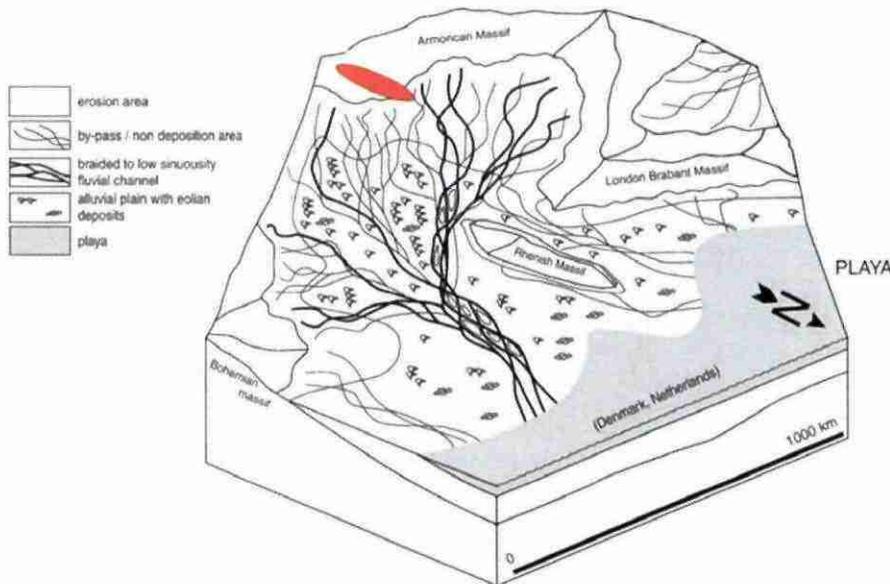


Figure 3 : Paléoenvironnement de dépôt au Scythien (Trias Inférieur) et future position supposée du bassin Bressan (en rouge) (d'après Bourquin et al., 2006).

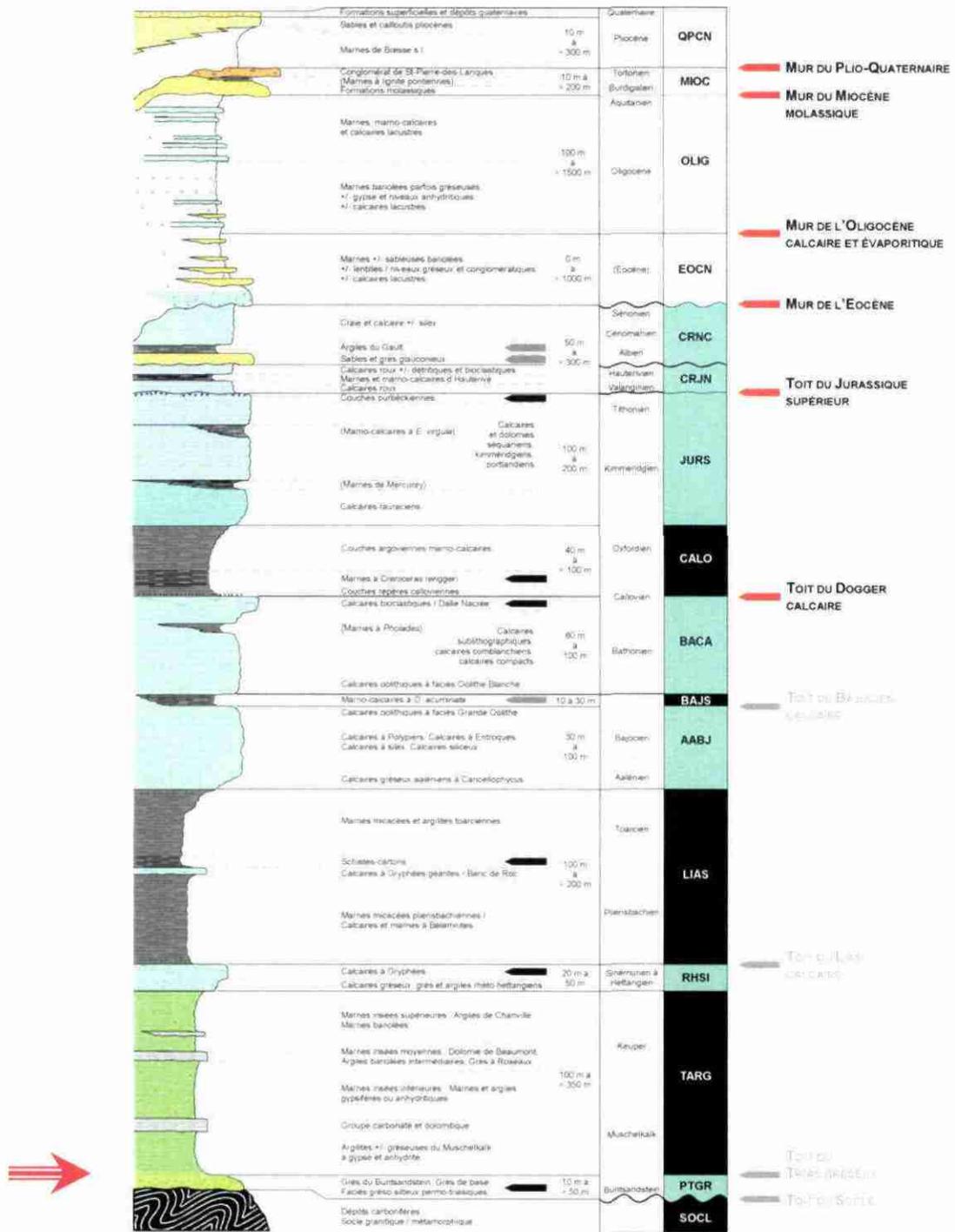


Figure 4 : Succession lithologique du bassin Bressan et localisation des Grés du Buntsandstein à la base de la pile (cible de l'étude). Cette illustration est extraite de l'étude de Jauffret et Legrand, 2008, cofinancée par l'Agence de l'Eau RM&C et le BRGM (à paraître).

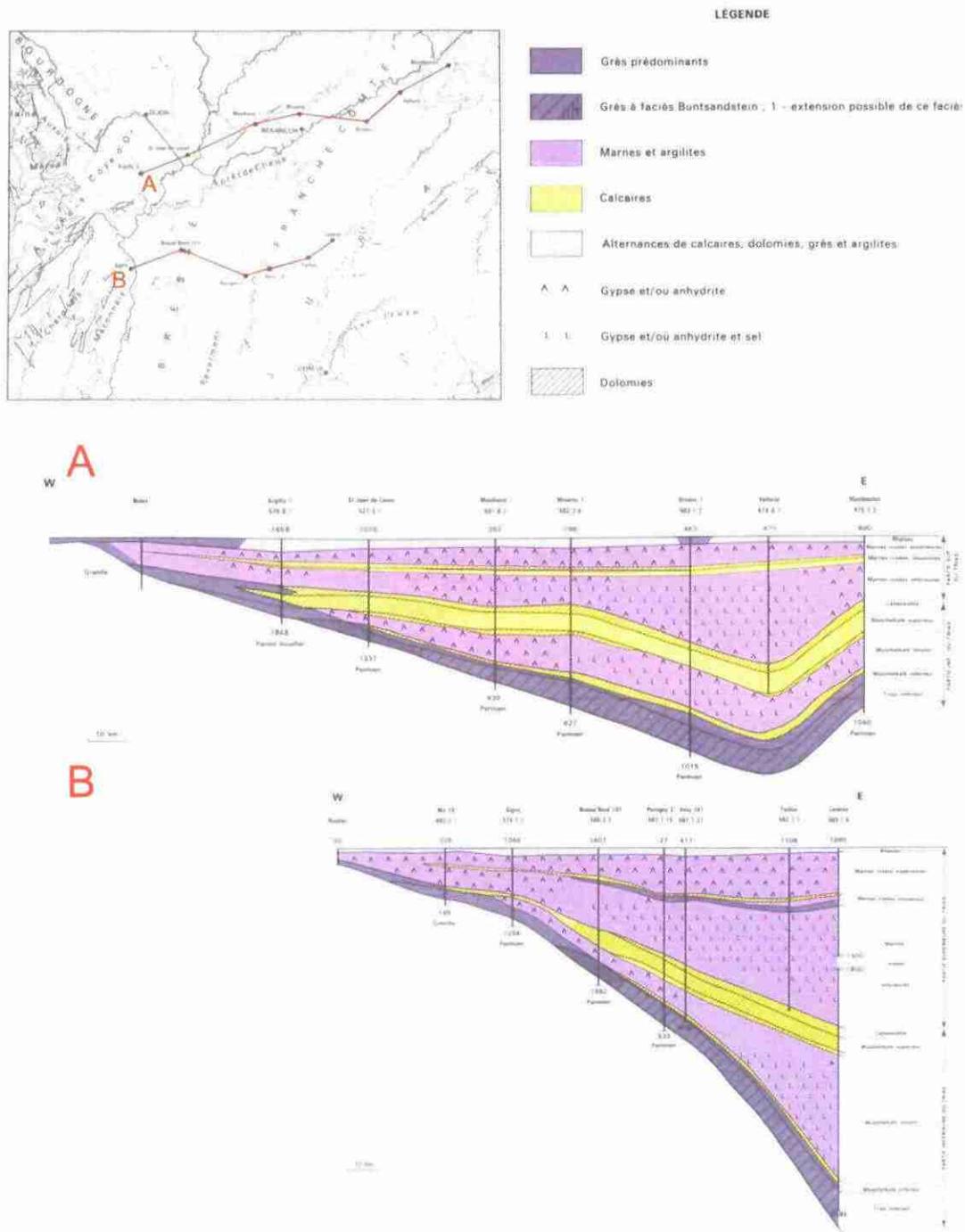


Figure 5 : Coupe lithostratigraphique du Trias (d'après Debrand-Passard et al., 1984). Variations latérales de puissance et de faciès dans le domaine septentrional. Les profondeurs sont données par rapport au sol, le toit du Rhétien (= toit du Trias) est ramené à l'horizontal. Une localisation précise des profils A et B par rapport aux limites géographiques du bassin Bressan est présentée sur la figure 6.

Localisation des puits profonds étudiés

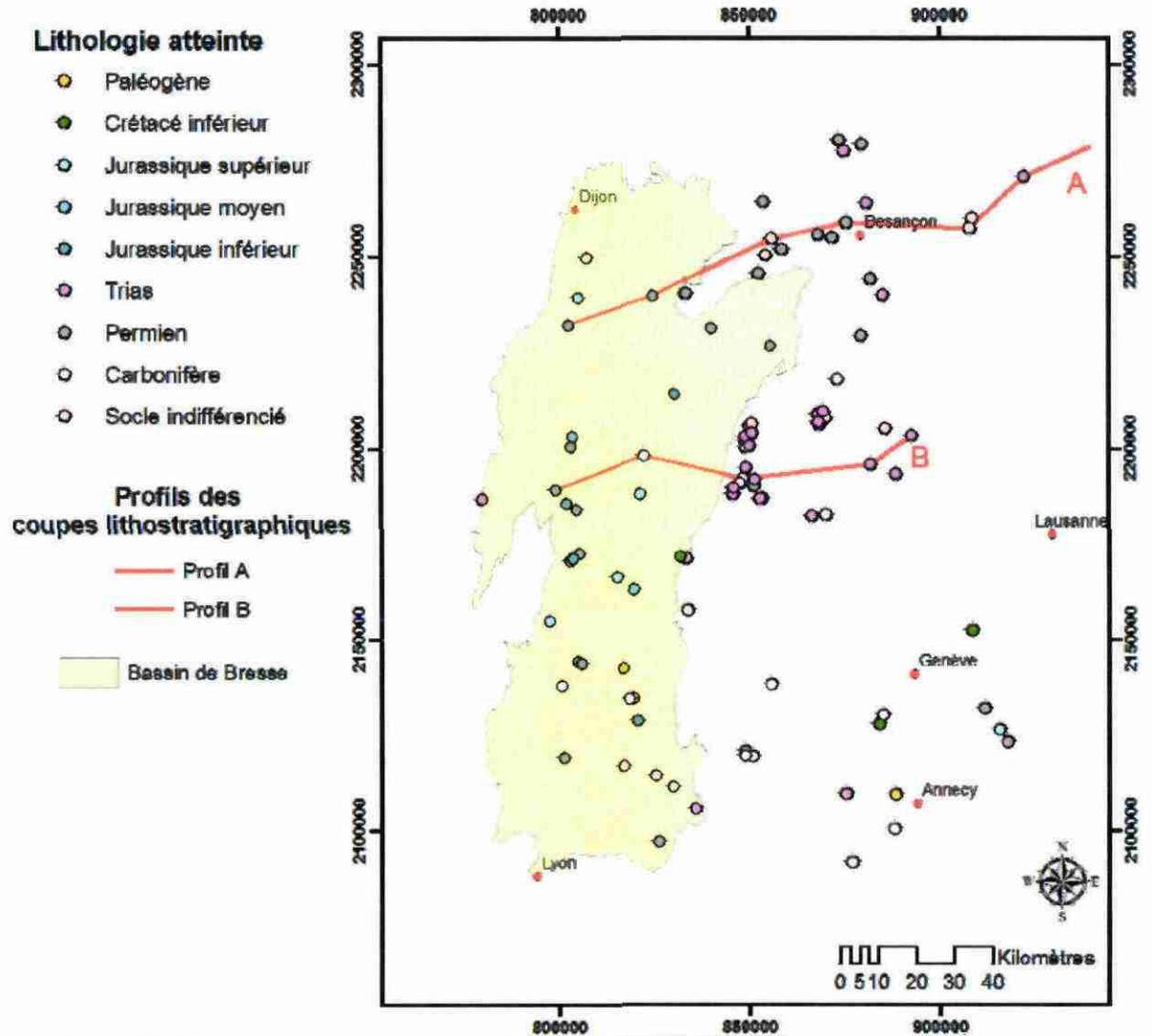


Figure 6 : Localisation des forages recoupant le Trias et pris en compte dans cette étude afin de déterminer l'épaisseur et l'extension du Buntsandstein. La couleur des points correspond à la lithologie atteinte en pied de forage. Les profils A et B sont ceux de la figure 4.

2.2. GEOLOGIE DU RESERVOIR « BUNTSANDSTEIN »

Le réservoir géothermique potentiel est composé de grès du Buntsandstein. Ces grès sont transgressifs sur le socle érodé (principalement d'âge permien), soit directement soit par l'intermédiaire de fines couches d'argilites vertes. Le Buntsandstein, réputé d'épaisseur inférieure à 50m, débute par des grès feldspathiques grossiers (typique du faciès Buntsandstein), devenant plus ou moins lités, et se poursuit par des grès fins à moyens et se termine par des argilites silteuses en plaquettes (Figure 4). Les grès du Buntsandstein, sont surmontés par une épaisse série argileuse triasique (~400m) contenant quelques niveaux carbonatés (Figure 4).

Selon Debrand-Passard *et al.* (1984), l'épaisseur des grès du Trias inférieur (appelé « grés de base » par ces auteurs) se réduit fortement vers l'ouest, pour disparaître complètement avant la limite occidentale du bassin (Figure 5). Dans l'étude de Bergerat *et al.*, (1990), les caractéristiques lithologiques, pétrophysiques, structurales des réservoirs gréseux potentiels profonds triasiques ont été obtenues à partir des profils sismiques scientifiques à grande échelle (ECORS) et calés grâce à des forages pétroliers profonds le long du transect.

En outre, notre étude a consisté à ré-interpréter la trentaine de logs des forages pétroliers profonds qui recoupent le Trias ou atteignent le socle (Figure 6). Ces données ré-interprétées permettent d'étendre géographiquement la connaissance des épaisseurs du Buntsandstein, en dehors des profils sismiques du bassin Bressan. Obtenues à partir des logs de forages, les mesures de porosité et perméabilité sont trop peu nombreuses (3 données sur 51 forages) pour être représentatives (Tableau1).

Nom du réservoir	Réservoir clastique du Buntsandstein
Sédimentologie	Origine deltaïque caractérisée par des réseaux en tresse, induisant un réservoir présentant de rapides variations d'épaisseur.
Géométrie	<i>Epaisseur</i> : en moyenne de 15 à 20 mètres, dépasse rarement 40m. <i>Profondeur</i> : 3200 m max. au centre-est du bassin
Température	Mesurées dans les forages (BHT) : > 100°C à 3000m
Porosité	Moyenne : 9.7 %
Perméabilité	Moyenne : 0.05 mD
Salinité	53 à 160 g/l

Tableau 1 : Caractéristiques géologiques et pétrophysiques du réservoir Buntsandstein du bassin Bressan (données bibliographiques)

3. Géométrie et température du Buntsandstein

Afin d'évaluer le potentiel du bassin Bressan et d'identifier les secteurs favorables à l'exploration de la ressource géothermique du réservoir du Buntsandstein, nous avons réalisé en pré-requis des cartes d'interpolation des caractéristiques géométriques (profondeur, épaisseur) et thermiques de cet aquifère, à l'échelle du bassin Bressan.

3.1. METHODOLOGIE D'ELABORATION DES CARTES D'ÉPAISSEUR , DE PROFONDEUR ET DE TEMPERATURE DU BUNTSANDSTEIN

Avertissement : du fait de l'augmentation de l'épaisseur de la pile lithologique au niveau du Jura (impliquant une grande profondeur de forage à cet endroit), toutes les interpolations ont été effectuées en prenant le front du Jura comme limite est du bassin.

3.1.1. Méthodologie « Cartes de profondeur du Buntsandstein »

La carte d'isohypse des profondeurs du socle du bassin Bressan, correspondant au toit du Permien, et la carte structurale des failles majeures qui recoupent le Trias, ont été numérisées, à partir des cartes au 1/1 500 000 disponibles dans l'atlas de la synthèse géologique du sud-est de la France (Debrand-Passard *et al.*, 1984). Ces cartes « papier » résultent d'une compilation des données géologiques d'une vingtaine de logs litho-stratigraphiques de forages pétroliers. Au cours de notre étude, ces cartes ont pu être comparées et validées localement par des profils sismiques scientifiques publiés (ECORS, in Blanc *et al.* 1991 et Bergerat *et al.* 1990). A noter cependant que dans ces publications le réflecteur sismique profond le plus marqué est situé au toit du Trias et que le passage socle-couverture n'est pas mis en évidence.

Du fait de la faible épaisseur des argiles séparant localement le socle du Buntsandstein (<10m), la profondeur du socle est considérée dans cette étude comme représentant la profondeur du mur du Buntsandstein pour le calcul des températures.

Après avoir numérisé les isohypses du toit du Permien ces cartes ont servi de base pour l'interpolation de la profondeur du mur du Buntsandstein. Cette interpolation, prenant en compte recoupé 19 puits sélectionnés, a été réalisée par krigeage avec modèle de variogramme de type sphérique pour un pas de 4 km et des cellules de 250m (Figure 7). La prise en compte des failles du graben dans l'interpolation a considérablement complexifié le calcul. Cela a aussi rallongé le temps de préparation de la grille puisque la mise au point de celle-ci a demandé des interventions manuelles minutieuses indispensables et fréquentes afin d'obtenir un résultat le plus fidèle possible aux cartes de Debrand-Passard *et al.* (1984).

3.1.2. Méthodologie « Carte d'épaisseur du Buntsandstein »

La synthèse de Debrand-Passard *et al.* (1984) propose également : i) une carte d'épaisseur totale de la pile sédimentaire complète du Trias, allant du Buntsandstein au Rhétien (Figure 4), et ii) une proposition de limites d'extension du faciès Buntsandstein. Néanmoins, mis à part les deux coupes présentées sur la figure 5, ces données demeurent insuffisantes pour construire une carte des épaisseurs du réservoir et ont donc nécessité de ré-interpréter les logs forages pétroliers recoupant le Trias.

Ainsi, l'analyse des faciès lithologiques recoupés par les 28 forages pétroliers profonds effectués entre 1957 et 1968 et qui atteignent le socle permien (Figure 6), a permis d'accéder aux profondeurs du toit et du mur du Buntsandstein, et par conséquent aux isobathes. Pour ce faire, lors de l'analyse des logs lithographiques des puits pétroliers, la distinction entre les faciès de base du Muschelskalk inférieur et du Buntsandstein a parfois délicate. Nous avons alors retenu dans notre étude :

- les puits dont les logs lithographiques sont présents dans la banque de données du sous-sol (BSS), gérée au BRGM et/ou contiennent explicitement la notion de « Buntsandstein », et
- les puits où l'identification du faciès ne posait aucune ambiguïté.

Lorsque la description de l'étage Buntsandstein fait état de plusieurs faciès distincts, seule l'épaisseur des lithologies à majorité gréseuse a été considérée, c'est-à-dire les grès fins à moyens. Du fait de l'insuffisante densité de puits correspondant à ces critères au sein de la partie affleurante du bassin, l'étude a été élargie au Jura voisin qui chevauche la partie orientale du bassin. Les puits concernés retenus pour notre étude sont présentés sur la figure 6.

Une interpolation de l'épaisseur des faciès gréseux, recoupés dans les 17 puits sélectionnés, a été réalisée par krigeage avec modèle de variogramme de type sphérique pour un pas de 6 km et des cellules de 250 x 250m (Figure 8).

Il convient de noter que l'épaisseur ainsi interpolée est une épaisseur moyenne qui permet de donner une idée sur les tendances de variations de l'épaisseur des grès à grande échelle (> quelques kilomètres). En effet, l'épaisseur du Buntsandstein est sujette à des variations locales importantes à faible longueur d'onde, de quelques mètres à quelques centaines de mètres, du fait de son origine deltaïque, caractérisée par des réseaux en tresse (exemple : au nord-est et au sud-est de la carte de la figure 8). Le résultat de l'interpolation servira de support pour le calcul de l'évaluation de la chaleur en place dans le §-5 et ne doit en aucun cas être pris comme base définitive pour des projets de forage dans les zones éloignées des puits connus. En dernière remarque, les failles n'ont pas été prises en compte dans l'interpolation car certains blocs faillés sont dénués de forage.

3.1.3. Méthodologie « Cartes des températures »

Les cartes de températures et de gradient thermique, réalisées par Gable (1986), étaient jusqu'à récemment les informations disponibles les plus précises pour évaluer les caractéristiques thermiques du réservoir. Ces cartes utilisent, entre autres, des données de températures issues des forages pétroliers réalisés dans les années 1978-1986. Ces cartes ont été reconsidérées dans le cadre du projet CLASTIQ car l'auteur avait utilisé une correction statistique, qui a pour effet d'affecter la même correction dans une région donnée pour deux valeurs distinctes situées à une même profondeur. La prise en compte d'une telle correction peut entraîner des erreurs de plus de 10°C. Pour remédier à ce problème, les températures de fond de trou des forages pétroliers (BHT), ont été corrigées en prenant en compte les paramètres temporels de retour à l'équilibre thermique du forage c'est-à-dire le délai entre la fin de la circulation des boues de forage pétrolier et la mesure (Bonté *et al.*, 2008).

En conséquence, la carte des températures de la base du réservoir Buntsandstein est le résultat d'une interpolation par krigeage linéaire des données de températures corrigées. Il faut noter que les cartes obtenues nécessitent encore des améliorations qui devraient limiter la portée horizontale, et peut-être verticale, des températures autour des puits; néanmoins les tendances et les différences constatées par rapport au modèle précédent (Gable, 1986) ne devraient pas être significativement remises en cause. Dans le cadre de notre étude, lorsqu'une différence de plus de 0.5°C pour 100m a été constatée pour une même zone entre les gradients déduits par Bonté *et al.* (2008) et ceux proposés par Gable (1986), les gradients de Bonté *et al.* (2008) ont été adoptés, sinon ceux de Gable (1986) ont été conservés, de même dans les zones non interpolées par Bonté *et al.* (2008).

3.2. ANALYSE DES CARTES

3.2.1. Profondeur du socle (isohypse du toit du Permien)

Selon la carte des isohypses du toit du Permien (Figure 7), la profondeur maximale du toit du socle (soulignée par le Permien) est de l'ordre de 3200 m au centre-est du bassin et dans sa partie central nord-ouest alors qu'il affleure quasiment à l'ouest du bassin. Des profondeurs plus importantes sont connues à l'est sous le Jura mais n'ont pas été interpolées par manque de données.

3.2.2. Epaisseur, extension et volume du Buntsandstein.

D'après Debrand-Passard *et al.* (1984), l'épaisseur des grès du Buntsandstein est en moyenne de 15 à 20 m, et dépasse rarement les 40 m. Après interpolation, la figure 8 montre une augmentation progressive de l'épaisseur d'ouest (7-30m) en est (30-50 m), avec un maximum de 96 m sous le Jura.

La position de la limite ouest du faciès Buntsandstein est globalement cohérente avec celle proposée par Debrand-Passard *et al.* (1984), même si notre interprétation des forages existants la situe un peu plus à l'ouest. En revanche, la limite est du réservoir, située en dehors des limites géographiques du bassin Bressan (c'est-à-dire sous le Jura) est inconnue faute de forages profonds.

L'estimation totale du volume des grès du Buntsandstein, délimité géographiquement par le contour du bassin, donne une valeur de surface de 17 000 km² et un volume de l'ordre de 820 km³.

3.2.3. Gradient thermique et température de la base du Buntsandstein

Selon Gable et Vasseur (1991), le flux thermique moyen actuel est de 100 à 110mW/m² avec disparité locale à Louhans et au bord du Massif central.

Le gradient thermique moyen est de 3.9°C /100m, soit 0.6°C /100m plus chaud que le gradient moyen des bassins sédimentaires mais plus faible que celui du fossé Rhénan (en moyenne : 5,2 °C/100m, Dezayes *et al.*, 2007).

Sur la figure 9, on note deux secteurs où le gradient atteint 4.5°C/100m ; ils sont situés au sud de Bourg-en-Bresse (sud-est du bassin) et sur la bordure Est du bassin au sud de Chalon-sur-Saône à proximité du Massif central. En outre, au sud-est de Dijon, la partie septentrionale du bassin est relativement chaude et montre des gradients proches de 4.1°C/100m.

En tenant compte des valeurs locales des gradients (Figure 9) et des profondeurs évaluées du toit du socle permien, nous avons déterminé une valeur de température à la base du Trias (Figure 10), par extrapolation linéaire du gradient.

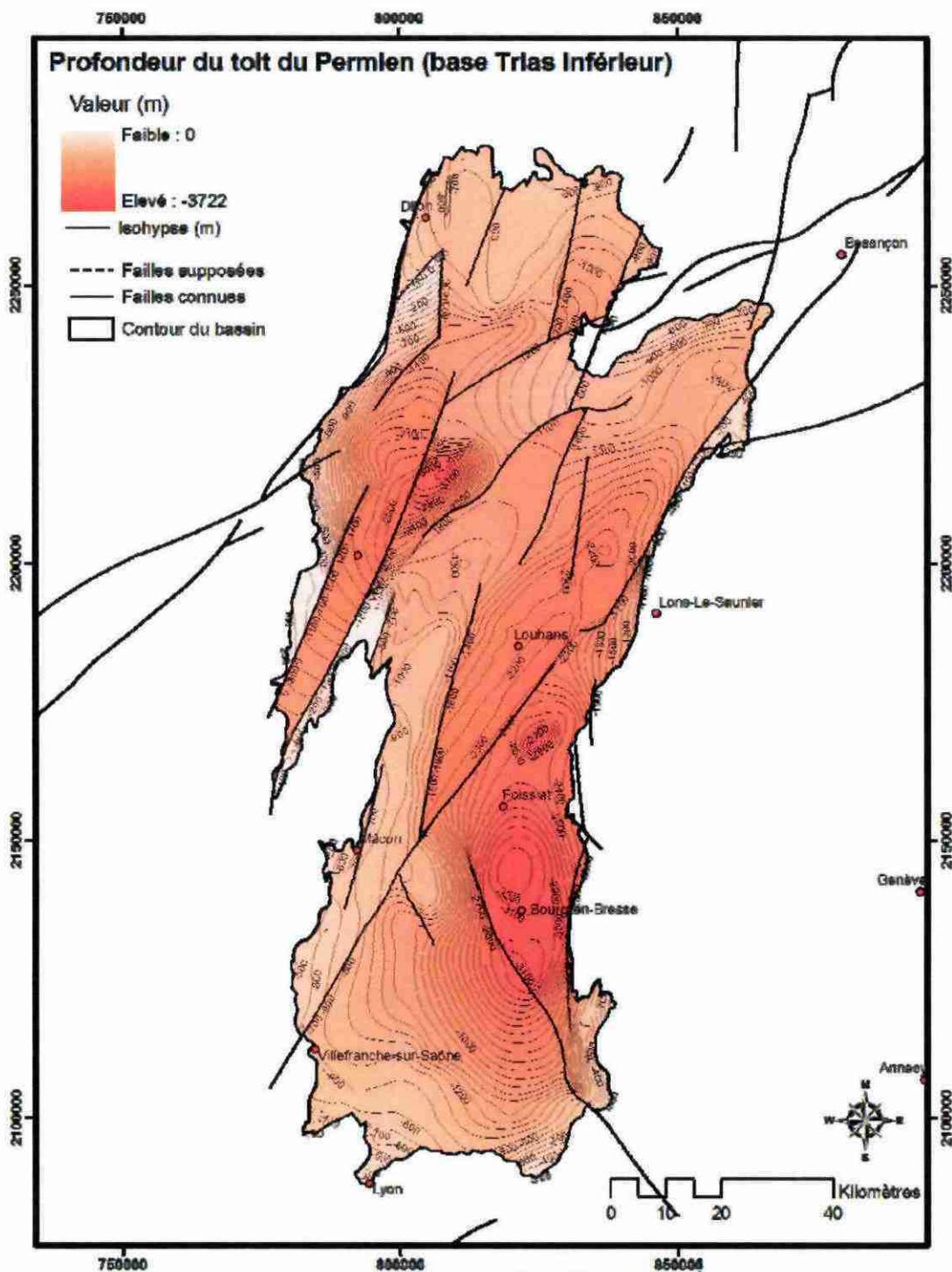


Figure 7 : Carte des isohypses du toit du Permien du bassin Bressan (hors partie du bassin masqué par le Jura à l'est).

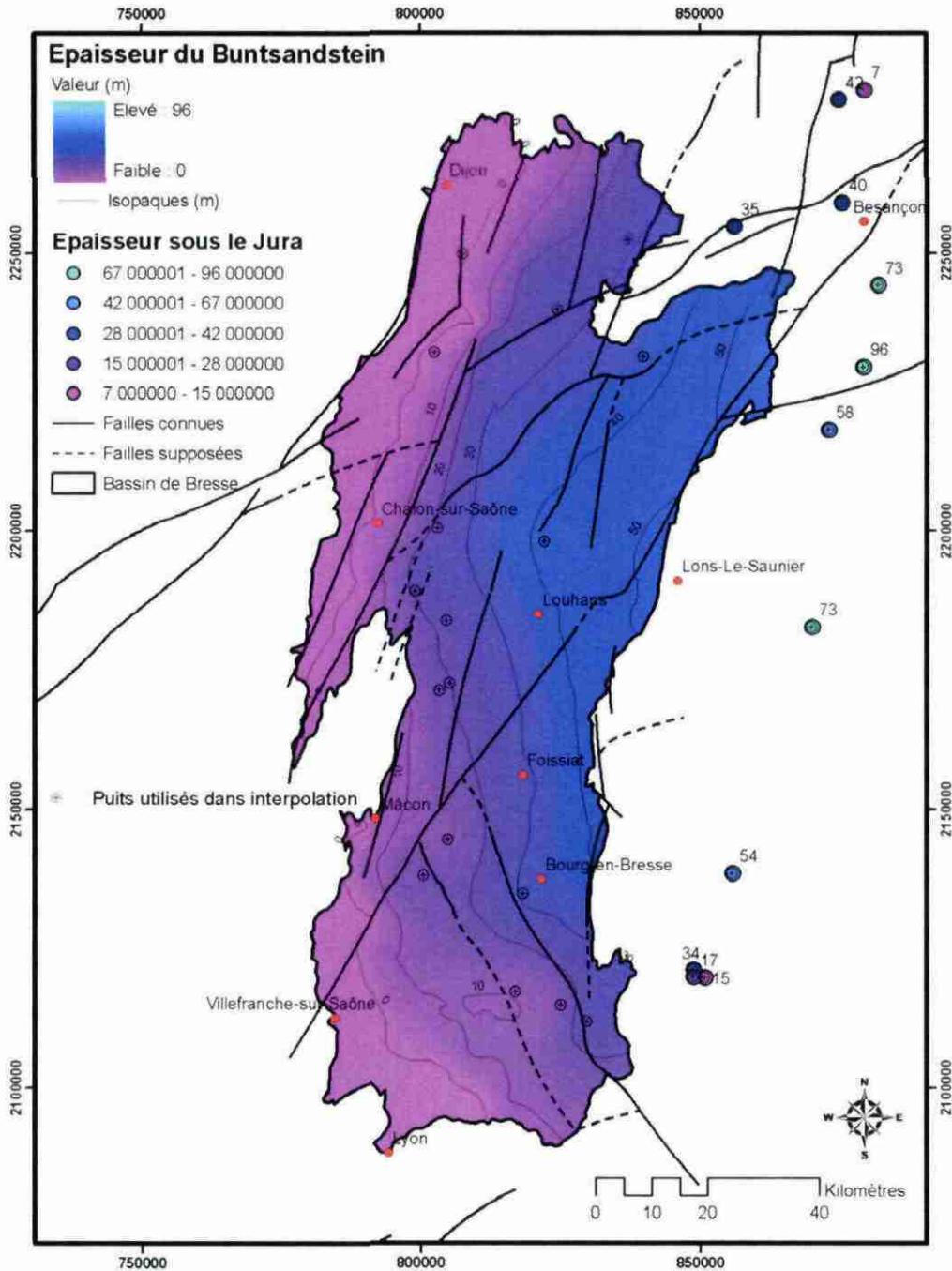


Figure 8 : Carte d'épaisseur des grès du Buntsandstein du bassin Bressan, réalisée à partir de l'interpolation des données de 17 forages pétroliers, avec leur position.

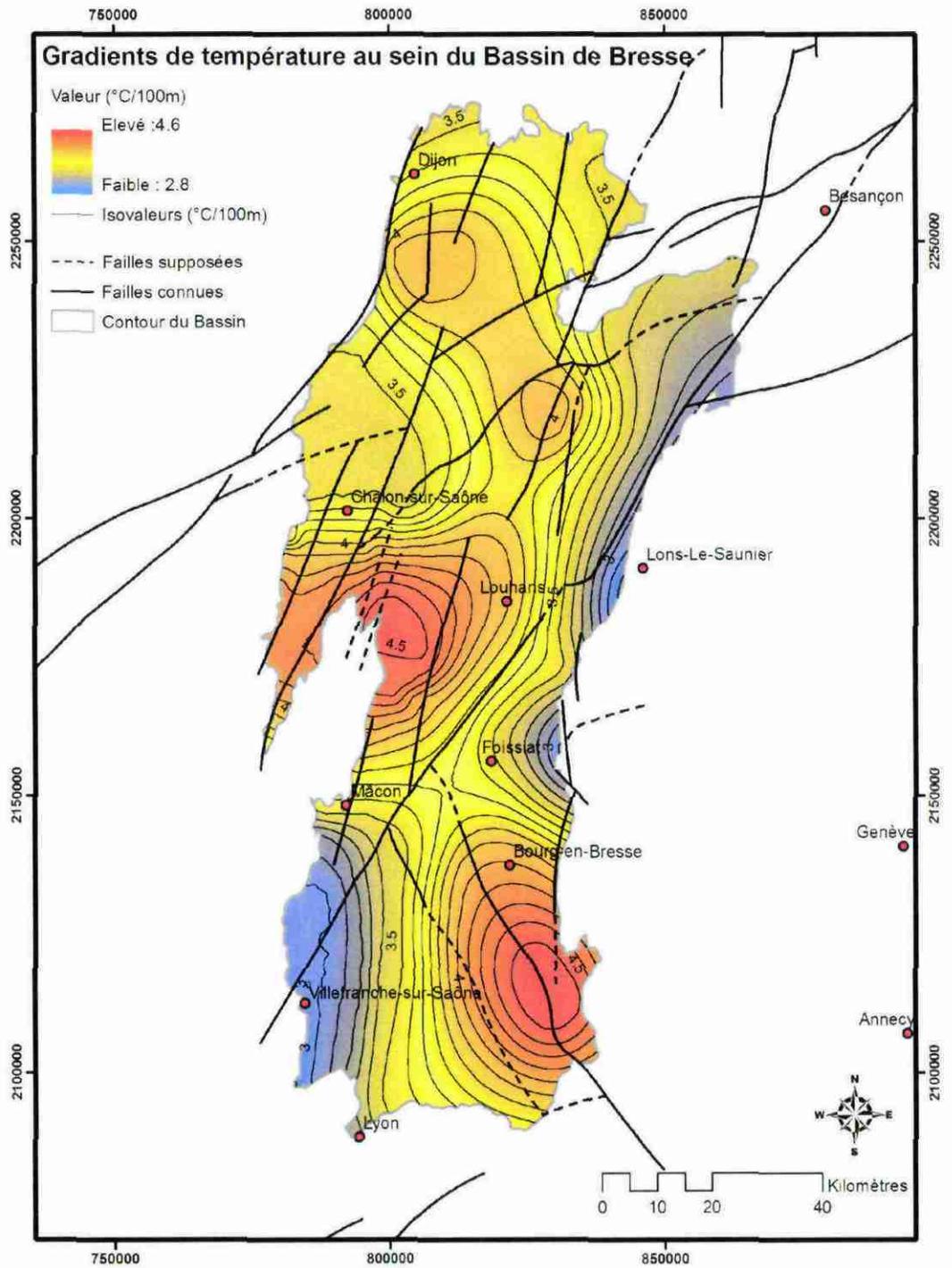


Figure 9 : Carte des isogradients thermiques du bassin bressan (hors partie du bassin masqué par le Jura à l'est).

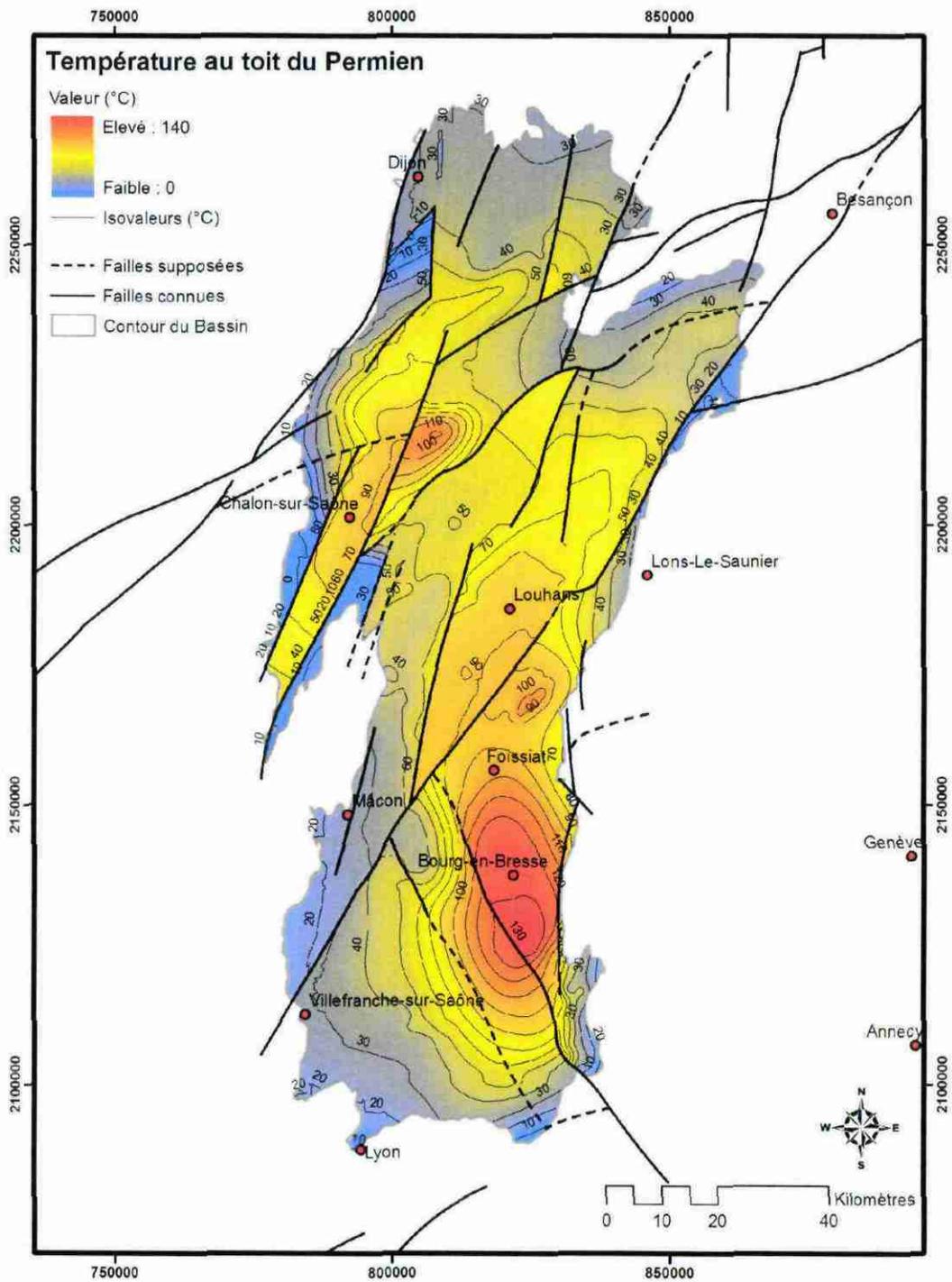


Figure 10 : Carte des températures évaluées à la base du Buntsandstein (= toit du Permien).

4. Evaluation du potentiel géothermique du réservoir « Buntsandstein »

4.1. METHODE DE CALCUL DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE ³

La ressource géothermale est définie comme étant « la part de la ressource accessible qui peut être extraite économiquement et légalement à un moment spécifique dans le futur » (Muffler et Cataldi, 1978). Afin de qualifier cette ressource, nous devons définir la quantité de chaleur disponible dans la roche constituant le réservoir géothermique et les caractéristiques de ce réservoir en termes d'extraction de la chaleur. Le principal modèle utilisé pour qualifier la ressource géothermale dans le cadre des Atlas of Geothermal Resources de la Commission Européenne provient des travaux de Muffler et Cataldi (1978).

L'évaluation de la ressource géothermale est fondée sur la chaleur contenue dans un volume de réservoir poreux dont l'énergie géothermale est supposée être exploitée par doublet. Le potentiel géothermique calculé représente une valeur théorique c'est-à-dire la valeur maximale d'énergie disponible dans le sous-sol. Il s'agit d'une valeur initiale qui sert de base pour toutes les autres évaluations sur le potentiel du sous-sol (potentiel technique, potentiel économique). L'énergie ou la chaleur contenue dans un réservoir dépend essentiellement de sa température et de son volume, c'est-à-dire de l'épaisseur du réservoir. Cette énergie correspond à la chaleur extraite du réservoir pour faire refroidir le volume de roche de sa température initiale à une température finale, correspondant à la fin de l'exploitation du doublet. Cette énergie Q est donnée par la formule :

$$Q = \rho C_p V (T_i - T_f) \text{ en Joule,}$$

dont les paramètres sont détaillés dans le tableau 2.

Cependant, seule une partie de cette chaleur peut être extraite. Cette fraction est représentée par le facteur de récupération (R), constitué d'un facteur de forme (R_F) et d'un facteur de température (R_T). Dans le cas d'un système de doublet, où le fluide est extrait par un forage de production et réinjecté dans la même couche par un forage d'injection, le facteur de température est défini par la formule $R_T = (T_i - T_R) / (T_i - T_f)$ (Lavigne, 1978), qui dépend notamment de la température de réinjection (T_R) recommandée à 25 °C par un groupe d'expert de la Communauté Européenne (Hurter

³ Ce paragraphe traitant de « la méthode de calcul du potentiel géothermique » est extrait du rapport de Dezayes *et al.*, 2007 concernant l'estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan. Pour en savoir plus, le lecteur se reportera à ce rapport.

et Schellschmidt, 2003). Le facteur de forme est déterminé de façon empirique (Lavigne, 1978). Pour un aquifère, R_F est égal à 0.33 (Hurter et Schellschmidt, 2003).

Nous obtenons alors une quantité de chaleur exploitable déterminée par la formule :

$$Q_{\text{expl}} = 0.33 \cdot [(T_i - T_R) / (T_i - T_f)] \cdot \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_i - T_f) \text{ en Joule.}$$

Paramètres	Description	Unité	Valeur
ρ	Densité de la roche	Kg/m ³	2 200
C_p	Capacité calorifique	J/Kg.K	710
V	Volume (surface x épaisseur)	m ³	Variable
T_i	Température initiale de l'aquifère	°C	Variable
T_f	Température finale ou température en surface	°C	10

Tableau 2 : Paramètres de calcul de la quantité de chaleur contenue dans un volume de roche de type grés.

4.2. POTENTIEL DU RESERVOIR « BUNTSANDSTEIN »

Ayant évalué la température au toit du Permien (Figure 10), il a été possible de calculer la quantité de chaleur en place (Figure 11) ainsi que le potentiel géothermique du bassin Bressan (= chaleur exploitable, Figures 12 et 13) grâce aux formules expliquées au paragraphe § 4.1.

Au regard de cette étude (Figure 13), les zones, où le potentiel géothermique est le plus élevé, coïncident avec les zones à la fois les plus profondes du bassin (Figure 7), les plus épaisses de Buntsandstein (Figure 8) et offrant un gradient anormalement élevé (Figure 9). Néanmoins, du fait de la faible épaisseur de la formation étudiée (Figure 8), les valeurs du potentiel géothermique (chaleur exploitable) ne dépassent pas 2 GJ/m².

Nous pouvons identifier deux secteurs (Figure 12) :

- La zone la moins défavorable dessine un croissant subméridien, jalonnant la bordure orientale du bassin (périmètre géographique) suivant un axe Louhans – Foissiat – Bourg en Bresse. Au sein de ce croissant, deux pics sont localisés à l'aplomb de Bourg-en-Bresse (~1.8 GJ/m²) et au nord-est de Foissiat⁴ ;
- Bien que plus réduite, une seconde zone est située dans la partie nord-ouest du bassin, plus précisément au nord-est de Chalon-sur-Saône.

Ces cibles potentielles dans le Buntsandstein ont les caractéristiques suivantes : températures comprises 100°C et 140°C, profondeurs entre 2000 et 3000 m et épaisseurs comprises entre 30 et 50 m. En revanche, alors que les gradients sont localement anormalement élevés (Figure 9), la partie occidentale du bassin apparaît très peu favorable à l'exploitation géothermale du Buntsandstein car peu profond et très peu épais dans le secteur (Figures 8 et 13).

Ces résultats sont à considérer avec précaution car :

- d'une part, la température considérée pour l'évaluation du potentiel du Buntsandstein est celle de la base du réservoir (= toit du Permien) ; elle correspond à la température la plus profonde, donc *a priori* la plus élevée du réservoir ;
- d'autre part, il existe des incertitudes sur les épaisseurs des couches et sur la profondeur du toit du Permien du fait du faible nombre de puits atteignant le substratum. Des incertitudes existent également au niveau des valeurs des gradients qui ont été calculés à partir de méthodes différentes.

Enfin, si on compare les potentiels géothermiques du Buntsandstein des bassins Bressan (cette étude) et Rhénan (Dezayes *et al.*, 2007), le potentiel du bassin Bressan apparaît beaucoup moins élevé (Figure 13) compte tenu de l'épaisseur inférieur à 50 m du réservoir gréseux. En effet, les valeurs de la chaleur exploitable du Buntsandstein bressan atteignent à peine 2 GJ/m² (Figures 12 et 13), alors que celles obtenues dans le Buntsandstein alsacien sont comprises entre 15 et 30 GJ/m². Enfin, les valeurs obtenues dans le Dogger exploité du Bassin de Paris sont au maximum de 7 GJ/m² (Haenel, 1989), c'est-à-dire 3 fois plus élevés que les valeurs du bassin Bressan.

⁴ A titre d'information, on notera que dans les années 80, un seul forage géothermique a été réalisé dans le bassin Bressan. Ce forage profond - dénommé G-Bg01 - a été réalisé en 1981 par le BRGM au Nord de l'agglomération de Bourg en Bresse dans le but de recouper les calcaires et dolomies du Jurassique supérieur entre 2083 et 2255 m (fin du forage). Les aptitudes aquifères du Jurassique supérieur et du Crétacé se sont révélées décevantes en termes de débit : 26,5 m³/h (100 m³/h espérés), alors que la température de fond de trou en fin de test s'élevait à 84,3°C (non corrigée). Cet insuccès a entraîné l'arrêt du forage. L'idée de rechercher un complément de débit dans le Dogger fut alors abandonnée (Barthélémy *et al.*, 1981). Ce forage n'a donc pas, non plus, recoupé le Buntsandstein.

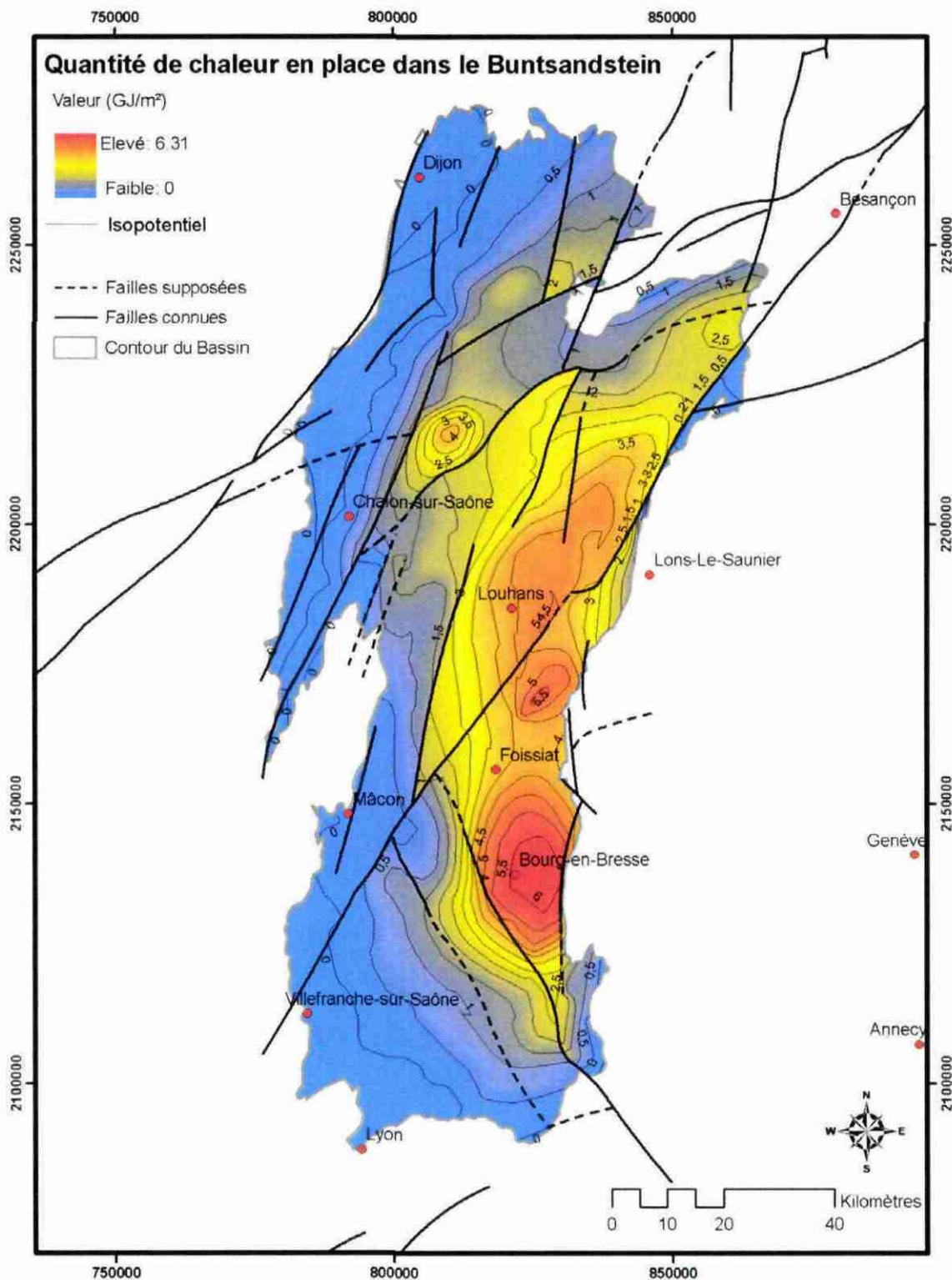


Figure 11 : Carte de la quantité de chaleur en place (Q) présente en GJ par m² dans la formation gréseuse du Buntsandstein du bassin Bressan.

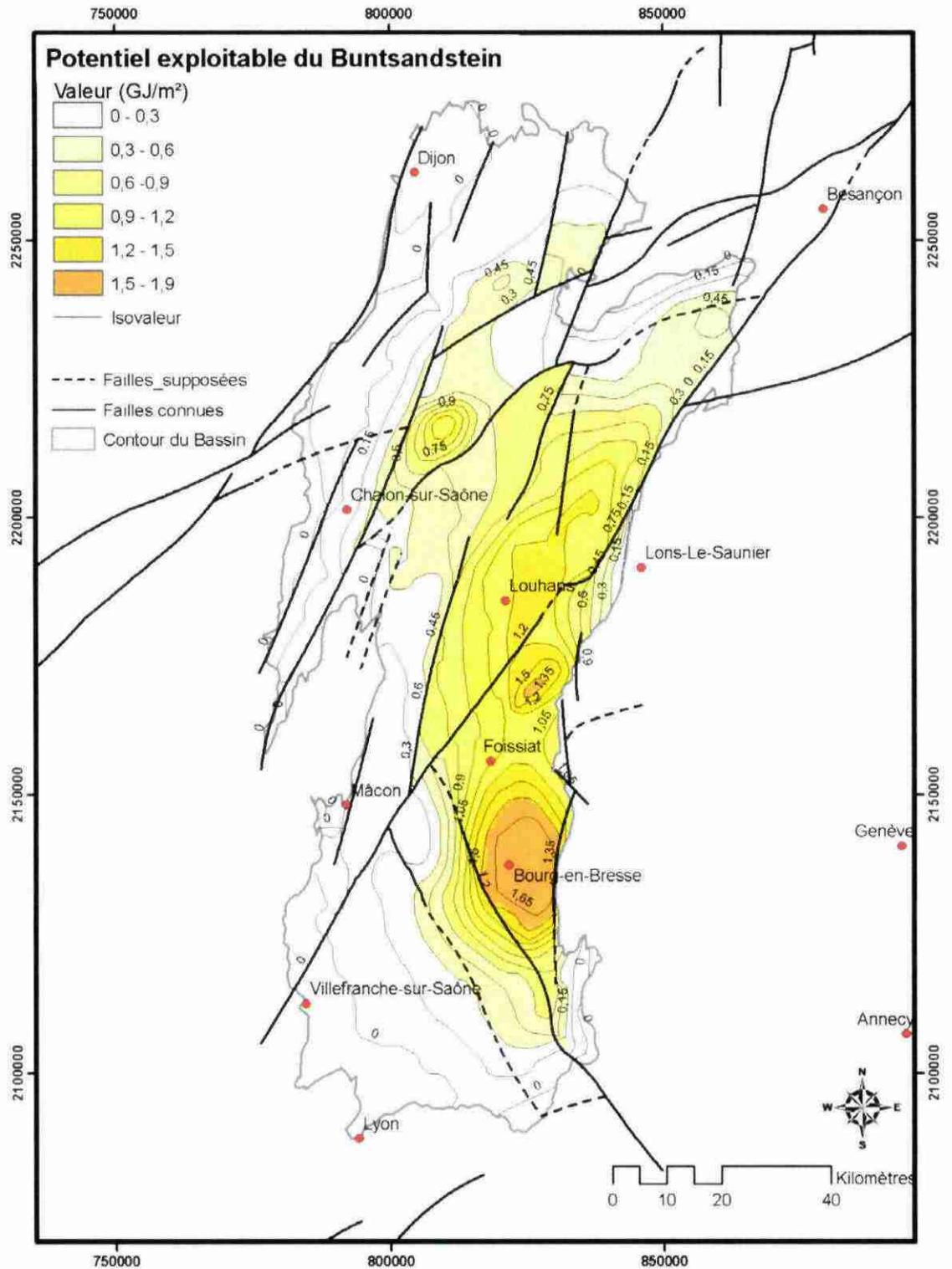


Figure 12 : Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) en GJ par m² dans la formation gréseuse du Buntsandstein du bassin Bressan.

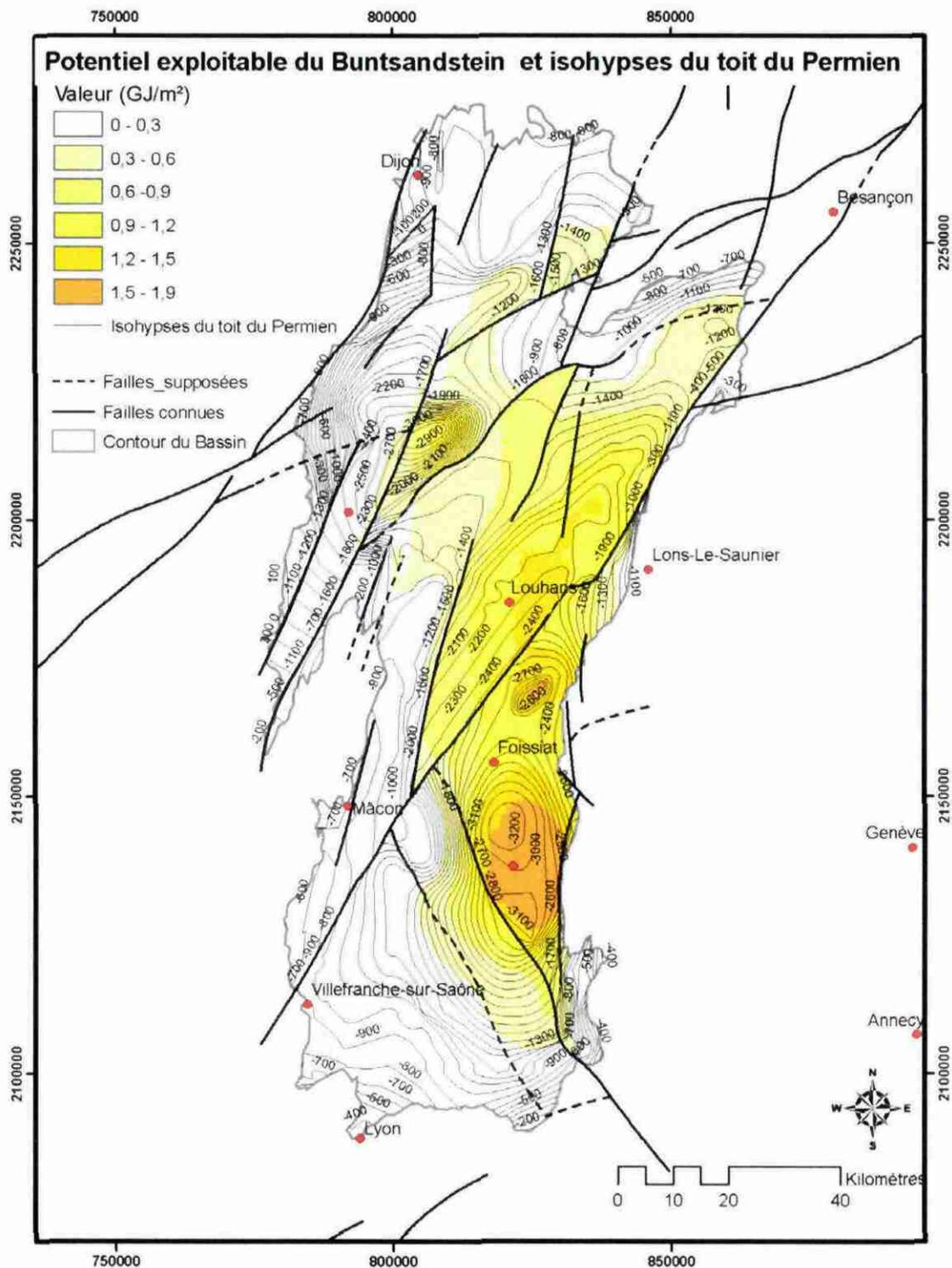


Figure 13 : Carte du potentiel géothermique (= chaleur exploitable) en GJ par m² dans la formation gréseuse du Buntsandstein et isohypses du toit du Permien du bassin Bressan

5. Conclusions et recommandations

Principaux résultats - Une évaluation du potentiel géothermique du « Buntsandstein » à l'échelle du bassin Bressan a été réalisée, principalement à partir des données de forages pétroliers, en prenant en compte trois types de paramètres :

- la géométrie du réservoir,
- sa température,
- et la fracturation affectant la formation aquifère.

Malgré le nombre réduit de forages, les cartes d'interpolation des épaisseurs, profondeurs et températures du réservoir réalisées sont géologiquement cohérentes à l'échelle du fossé.

Il s'avère que les formations gréseuses du Buntsandstein les plus épaisses (30 à 50m) coïncident avec les zones les plus profondes du bassin et offrant un gradient anormalement élevé (Figure 9). Ainsi, la cible la moins défavorable du bassin Bressan dessine un croissant subméridien, jalonnant la bordure orientale du bassin (périmètre géographique) suivant un axe Louhans – Foissiat – Bourg en Bresse. Une seconde zone, d'extension plus réduite, est située au nord-est de Chalon-sur-Saône.

Ces réservoirs potentiels ont les caractéristiques suivantes : températures comprises entre 100 et 140°C, à des profondeurs entre 2000 et 3000 m et pour des épaisseurs comprises entre 30 et 50 m. Ces épaisseurs sont très faibles comparées à celles du Buntsandstein du fossé Rhénan (500-600m, selon Dezayes *et al.*, 2007).

Compte tenu de ces épaisseurs réduites, les valeurs de la chaleur exploitable atteignent à peine 2 GJ/m² (Figure 12), alors que les valeurs obtenues dans le Buntsandstein en Alsace sont de 15-30 GJ/m² selon Dezayes *et al.* (2007). En outre, les valeurs obtenues dans le Trias du Bassin de Paris sont d'environ 15 GJ/m² (Haenel, 1989).

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

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

Parce que le bassin Bressan est un fossé d'effondrement à la structuration complexe en horst et graben, le changement d'échelle imposera de modéliser finement la

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

Enfin plutôt que de focaliser notre attention exclusivement sur les réservoirs clastiques du Trias de l'axe Louhans – Foissiat – Bourg-en-Bresse, dont les valeurs de potentiel obtenues sont relativement faibles, on recommande d'affiner l'estimation du potentiel géothermique de la zone d'intérêt en considérant l'ensemble de ces réservoirs potentiels, qui sont susceptibles d'être localisés :

- dans la partie inférieure du Tertiaire, si les lentilles gréseuses éocènes s'avèrent suffisamment épaisses (Base du Tertiaire à environ 1900 m / 75 °C estimée);
- dans les calcaires du Dogger (>100 m d'épaisseur / vers 2500 m de profondeur / >90°C),
- dans les grés du Buntsandstein (30 à 50 m d'épaisseur / 2000 à 3000m de profondeur / 100 à 140°C, cette étude).

6. Bibliographie

Barthélémy Y., Rapon G., Bonnet M. (1981) – Présentation des tests de fin du sondage de Bourg-en Bresse G.Bg.1. *Rapport BRGM* - 81 SG 757 RHA, 14 p.

Bergerat F., Mugnier J., Guellec S. (1990) - Extensional tectonics and subsidence of the Bresse basin: an interpretation from Ecors data. *Mémoire de la Société Géologique de France*, 156, p. 145-156.

Blanc G., Doligez B., Lajat D., Mascle A. (1991) - Evaluation du potentiel pétrolier des formations paléozoïques de la Bresse et de la bordure jurassienne, *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162, p. 409-422.

Bonté D., Guillou-Frottier L., Garibaldi C., Bourguine 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.

Bourquin S., Peron S., Durand M. (2006) - Lower Triassic sequence stratigraphy of the western part of the Germanic Basin (west of Black Forest): Fluvial system evolution through time and space. *Sedimentary Geology*, 186, p. 187-211.

Debrand-Passard S., Courbouleix S., Lienhardt M. J. (1984) - Synthèse géologique de Sud-Est de la France. *Mémoires BRGM*, 125, 615 p.

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

Dèzes P., Schmid S. M., Ziegler P. A. (2004) - Evolution of the European Cenozoic Rift System: Interaction of the alpine and pyrenean orogens with their foreland lithosphere. *Tectonophysics*, 389, p. 1-33.

Dubois P., Umbach P. (1974) - A propos du Trias de deux bassins sédimentaires français: le Bassin de Paris et le Bassin du Sud-Est. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 7, p. 798-707.

Durand M. (1978) - Paléocourants et reconstitution paléogéographique: L'exemple du Buntsandstein des Vosges méridionales (Trias inférieur et continental). *Science de la Terre*, 4, p. 301-390.

Gable R. (1978) - Acquisition et rassemblement de données géothermiques disponibles en France. *Rapport BRGM* - 78 SGN 284GTH.

Jauffret D., Legrand C. avec la collaboration de **Coueffé R., Tourlière B.** (2008) – Etude des ressources en eau profonde du fossé de la Saône en Bourgogne et Franche-Comté. *Rapport BRGM* - RP-56538-FR (à paraître).

Gable R., Vasseur G. (1991) - Mesures et interprétations géothermiques sur trois sites GPF. *Bulletin de la Société Géologique de France*, 162, n°5, p. 907-912.

Gélard J.P. (1978) - La fracturation de la Bourgogne méridionale, essai d'interprétation et implications tectoniques régionales. *Revue de Géologie Dynamique et de Géographie Physique*, 2, p. 5-28.

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 (edited by Louwrier K., Staroste E., Garnish J.D., Karkoulas V.). Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, 482-489.

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

Laubscher H. (1970) - Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens. In : Grundsätzliches zur Tektonik des Rheingrabens, p.79-87.

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

Rat P. (1978) - Les phases tectoniques au Tertiaire dans le nord du fossé Bressan et ses marges bourguignonnes en regard des systèmes d'érosion et de sédimentation. *Comptes Rendus Académie Des Sciences, Série I*, 5, p. 213-214.

Rocher M., Chevalier F., Petit C. et al. (2003) - Tectonics of the Northern Bresse region (France) during the Alpine cycle. *Geodinamica Acta*, 16, p. 131-147.



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

Service Géothermie GTH

3, avenue Claude-Guillemin

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