

# Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan

Rapport final

BRGM/RP-55729-FR  
août 2007

# Estimation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Trias dans le Fossé rhénan

Rapport final

**BRGM/RP-55729-FR**  
août 2007

Étude réalisée dans le cadre du projet  
de recherche ADEME-BRGM : CLASTIQ

**C. Dezayes**  
Avec la collaboration de  
**I. Thinon, G. Courrioux, B. Tourlière, A. Genter**

**Vérificateur :**

Nom : Philippe ELSASS

Date :

Signature :

**Approbateur :**

Nom : Fabrice BOISSIER

Date :

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, Alsace, Fossé rhénan, Potentiel géothermique, Modèle géologique, Forages, Interprétation sismique, Interpolation.

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

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

## Synthèse

L'engouement actuel pour le développement durable et les énergies renouvelables nous amène à réfléchir sur le développement de ce type de production d'énergie dans d'autres réservoirs que celui du Dogger du bassin de Paris, et dans d'autres régions de France.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés au potentiel géothermique profond du Fossé rhénan supérieur pour la production de chaleur, voire même d'électricité si la température est suffisante. La ressource serait alors située dans les formations argilo-gréseuses constituées par le Trias germanique, notamment sa formation de base du Buntsandstein, reconnu dans le passé par forages, où les températures sont souvent supérieures à 100 °C pour des profondeurs comprises entre 1 et 2 km (forages de Soultz, Rittershoffen, Cronenbourg). C'est ce réservoir clastique qui sera la cible de notre étude.

Celle-ci s'inscrit dans le cadre du programme de recherche 2007-2008 sur les ressources géothermiques des réservoirs clastiques en France (projet CLASTIQ) en collaboration avec l'ADEME.

Le but est de proposer une première estimation de la ressource du Fossé rhénan à partir de données disponibles dans le domaine public (cartes, données de forages...), mais également à partir du retraitement de sismique 2D ancienne, acquise dans les années 1970-1980 dans le cadre de la recherche pétrolière, afin de permettre l'interprétation détaillée d'un secteur limité du fossé en utilisant les techniques et outils modernes d'interprétation.

Le graben du Rhin supérieur ou Fossé rhénan supérieur est un fossé d'effondrement tertiaire très bien connu grâce aux nombreuses études liées à l'exploitation minière et pétrolière du siècle dernier (forages, études géophysiques...).

Ce graben fait partie du Système de Rifts Ouest-européens s'étendant de la Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord sur une distance de plus de 1 000 km. Il représente le segment central le plus prononcé entre le Fossé de la Bresse au sud et le Fossé du Rhin inférieur au nord.

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

Sous la couverture tertiaire liée à l'ouverture du graben, les terrains sédimentaires mésozoïques s'échelonnent du Permien au Jurassique moyen, de façon relativement continue du Buntsandstein inférieur au Bathonien. C'est dans ces formations que se trouve le réservoir géothermique du Buntsandstein. Il est composé essentiellement de

grès continentaux roses et de conglomérats fluviaux et estuariens marquant une transgression.

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 disponible 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.

Afin d'identifier les secteurs favorables pour l'exploration et l'exploitation de la ressource géothermique du réservoir du Buntsandstein, nous avons réalisé des cartes d'interpolation des caractéristiques principales de cet aquifère (profondeur, épaisseur, température, ...) sur toute la partie méridionale du Fossé rhénan supérieur comprenant la plaine d'Alsace en France et la plaine badoise en Allemagne. Les données interpolées proviennent de cartes déjà interprétées dans le cadre de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan Supérieur (Munck *et al.*, 1979). La réalisation des cartes d'épaisseur et de température au toit du Buntsandstein nous a permis de faire une carte du potentiel géothermique de la région.

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

L'estimation du potentiel géothermique exploitable aboutit ainsi à des valeurs comprises entre 15 et 30 GJ/m<sup>2</sup>, alors que par exemple, il n'est que de 7 GJ/m<sup>2</sup> au maximum pour le Dogger du Bassin de Paris et 15 GJ/m<sup>2</sup> pour le Trias. Sur la totalité de la zone d'étude qui couvre environ 7 150 km<sup>2</sup>, l'énergie géothermique exploitable est estimée autour de 10 500 GW.an<sub>th</sub> (330.10<sup>6</sup> TJ).

Au niveau du fossé, certains secteurs apparaissent plus favorables et leur potentialité mérite d'être approfondie. C'est le cas au sud-ouest de Strasbourg où nous avons fait une étude détaillée du secteur à partir de données anciennes afin d'avoir une meilleure connaissance du réservoir, mais également de valider la démarche pour pouvoir l'appliquer dans l'avenir à d'autres secteurs qui pourraient présenter des enjeux intéressants.

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

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

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

À partir des interprétations des lignes sismiques nouvellement retraitées, nous avons réalisé un modèle géologique 3D afin de pouvoir imager correctement la formation du Buntsandstein. L'analyse des coupes montre une différence de schéma structural entre la partie nord, montrant des demi-grabens et des blocs basculés, et la partie sud, montrant un large graben à l'ouest et une succession de failles normales à l'est. Cette différence peut s'expliquer par la présence à proximité de la « Zone de Transfert Sud » du graben du Rhin. La présence de cette structure profonde complique la corrélation des failles entre chaque profil. Ainsi, le modèle le plus probable fait apparaître un réseau de fractures normales NE-SW et la présence d'un sous-bassin dans la partie SW de la zone, qu'il serait intéressant de confirmer à partir de la réinterprétation de lignes sismiques présentes dans la zone d'étude. En effet, la forme des interfaces stratigraphiques dépend de l'interprétation géologique et conditionne fortement l'estimation du volume du réservoir et la valeur du potentiel géothermique. Dans notre cas, le volume de la formation du Buntsandstein impliqué est d'environ 300 km<sup>3</sup> pour une surface d'étude autour de 670 km<sup>2</sup>. Il semblerait cependant que la formation clastique considérée comprenne à sa base des grès permien du Rotliegendes qui sont difficilement différenciables en sismique. Le potentiel géothermique exploitable est alors d'environ 350 ± 15 GW.an<sub>th</sub> (11 ± 0.472 . 10<sup>6</sup> TJ).

La formation du Buntsandstein constitue ainsi un réservoir géothermique à potentiel intéressant. Il n'apparaît cependant pas comme un aquifère classique mais plutôt comme un réservoir clastique fracturé, ce qu'il faudra prendre en compte dans la manière de l'exploiter. Il est donc indispensable d'avoir une bonne connaissance de la géologie profonde d'un réservoir afin de déterminer sa forme, son extension, son potentiel géothermique, ainsi que la géométrie du réseau de fracture qui le découpe.

L'exploration approfondie de ce type de réservoir profond demande des moyens d'investigation importants. C'est le cas, par exemple, dans le cadre des futurs projets d'exploration outre-Rhin ayant pour cible le Trias fracturé où les investigations vont de l'évaluation des données publiques à l'acquisition de sismique 2D et 3D, en passant à des études géologiques de terrain (Haimberger, 2007).



## Sommaire

<b>1. Introduction</b> .....	11
<b>2. Géologie du Fossé rhénan supérieur</b> .....	13
<b>3. Méthode de calcul de la ressource disponible</b> .....	23
<b>4. Évaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Fossé rhénan</b> .....	25
4.1. INTRODUCTION .....	25
4.2. INTERPOLATION DES DONNÉES ANCIENNES.....	25
4.3. RESSOURCES DU BUNTSANDSTEIN DANS LE FOSSÉ RHÉNAN .....	34
4.4. CONCLUSIONS.....	35
<b>5. Étude détaillée d'une zone à fort potentiel géothermique</b> .....	37
5.1. INTRODUCTION .....	37
5.2. LOCALISATION DE LA ZONE ET DONNÉES DISPONIBLES .....	39
5.3. TEMPÉRATURES ET DÉBITS.....	42
5.4. STRUCTURES GÉOLOGIQUES.....	48
5.4.1. Logs géologiques des forages .....	48
5.4.2. Analyse des coupes sismiques .....	51
5.4.3. Coupes géologiques et modèles 3D .....	52
5.5. RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE DU BUNTSANDSTEIN.....	59
5.6. CONCLUSIONS.....	62
<b>6. Conclusions générales</b> .....	63
<b>7. Remerciements</b> .....	67
<b>8. Bibliographie</b> .....	69

## Liste des figures

Figure 1 – Carte de situation et schéma structural de la partie méridionale du Fossé rhénan supérieur..	12
Figure 2 – Carte géologique simplifiée du Fossé rhénan et localisation des coupes ECORS-DEKORP.	14
Figure 3 – Série stratigraphique du Mésozoïque (von Eller, 1984).	15
Figure 4 – Schéma chrono-stratigraphique des formations cénozoïques du Fossé rhénan supérieur (Roussé, 2006). Correspondance avec le Sannoisien du bassin de Paris.	17
Figure 5 – Coupes interprétatives du programme DEKORP-ECORS respectivement profil nord en haut et profil sud en bas (Brun <i>et al.</i> , 1992). Localisation en Figure 2.	18
Figure 6 – Localisation de la zone de transfert nord (Derer <i>et al.</i> , 2003) et sud (Mauthe <i>et al.</i> , 1993).	19
Figure 7 – Localisation des épacentres des séismes (base de données RéNaSS) et des stations GPS (Rozsa <i>et al.</i> , 2005).	21
Figure 8 – Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein extraite de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan supérieur (Munck <i>et al.</i> , 1979).	26
Figure 9 – Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein.	28
Figure 10 – Carte de la profondeur de la base du Trias.	29
Figure 11 – Carte des épaisseurs du Buntsandstein.	30
Figure 12 – Carte des températures au toit du Buntsandstein.	31
Figure 13 – Carte de la quantité de chaleur (Q) présente par m <sup>2</sup> dans la formation du Buntsandstein.	32
Figure 14 – Carte du potentiel géothermique exploitable par m <sup>2</sup> du Buntsandstein.	33
Figure 15 – Carte des températures extrapolées à 1 500 m d'après les données de GGA-Hannover (Genter <i>et al.</i> , 2004) et localisation de la zone d'étude.	38
Figure 16 – Localisation de la zone d'étude (cadre noir) sur la carte géologique au million du BRGM.	39
Figure 17 – Positionnement des profils sismiques (lignes rouges) et des forages (cercle orange) étudiés.	41
Figure 18 – Valeurs de températures corrigées mesurées dans les forages et gradients géothermiques déduits.	44
Figure 19 – Valeurs de débit dans les anciens puits pétroliers de la zone.	46
Figure 20 – Salinité des fluides dans les anciens puits pétroliers de la zone.	47
Figure 21 – Logs géologiques simplifiés dans les différents forages positionnés en carte par rapport aux profils sismiques.	49
Figure 22 – Coupes projetées des forages.	50
Figure 23 – Sections sismiques migrées brute (à gauche) et interprétée (à droite).	51

Figure 24 – Coupes géologiques interprétées à partir des profils sismiques et dessinées dans le Géomodeleur. ....	54
Figure 25 – Interprétation sismique de la coupe 75AC02 en temps (en haut) et importation (en bas) dans le Geomodeller des interfaces lithologiques converties en profondeur .....	55
Figure 26 – Exemple d’interpolation de certains interfaces stratigraphiques et des failles sur la coupe 75AC02. ....	56
Figure 27 – Vue vers le NE du modèle 3D montrant une distorsion de l’interface du toit du socle au niveau d’une faille, dans le coin SW, à fort rejet qui s’amortit très rapidement.....	57
Figure 28 – Vue vers le NE du modèle 3D montrant un sous-bassin intra-graben de direction NE-SW.....	57
Figure 29 – Projection en surface des failles modélisées (cf. Figure 28) atteignant le Tertiaire.....	58
Figure 30 – Vue en 3D du réseau de failles du modèle présenté en Figure 28.....	58
Figure 31 – Profondeur du toit du Buntsandstein à partir du modèle géologique 3D présenté Figure 28. ....	59
Figure 32 – Épaisseur du Buntsandstein à partir du modèle géologique 3D présenté Figure 28.. ....	60

## Liste des tableaux

Tableau 1 – Paramètres de calcul de la quantité de chaleur contenue dans un volume de roche de type grès.....	23
Tableau 2 – Paramètres de calcul de la quantité de chaleur présente dans le Buntsandstein du Fossé rhénan.....	27
Tableau 3 – Caractéristiques des lignes sismiques utilisées dans cette étude. ....	40
Tableau 4 – Caractéristiques des forages étudiés.....	41
Tableau 5 – Données thermiques et de débitmétrie dans les puits de la zone étudiée.....	43
Tableau 6 – Paramètres utilisés pour les calculs de potentiel géothermique dans la zone d’étude. ....	61
Tableau 7 – Résultat des calculs de potentiel géothermique pour les deux modèles géologiques considérés.....	61



# 1. Introduction

**E**n France, la production de chaleur géothermale est essentiellement concentrée dans le bassin de Paris, où une trentaine de doublets exploitent le réservoir carbonaté du Dogger depuis les années 1980. Ainsi, 140 000 équivalents logements de la région parisienne sont chauffés par géothermie, ce qui représente 130 000 Tep économisées par an.

L'engouement actuel pour le développement durable et les énergies renouvelables nous amène à réfléchir sur le développement de ce type de production d'énergie dans d'autres réservoirs, même plus profonds que ceux du Dogger, et dans d'autres régions de France.

Dans ce cadre, nous nous sommes intéressés au potentiel géothermique profond du Fossé rhénan supérieur pour la production de chaleur, voire même d'électricité si la température est suffisante. La ressource serait alors située dans les formations argilo-gréseuses constituées par le Trias germanique, reconnue dans le passé par forages, où les températures sont souvent supérieures à 100 °C à moins de 2 km de profondeur (forages de Soultz, Rittershoffen, Cronenbourg).

Cette étude s'inscrit dans le cadre du programme de recherche 2007-2008 sur les ressources géothermiques des réservoirs clastiques en France (projet CLASTIQ, CLAYed sandSTone In Question) en collaboration avec l'ADEME (convention n°05-05-C0079 du 20-12-2005).

Le but de cette étude est de faire une première estimation de la ressource du Fossé rhénan à partir de données disponibles dans le domaine public (cartes, données de forages...), mais également à partir du retraitement de sismique 2D ancienne, acquise dans les années 1970-1980 dans le cadre de la recherche pétrolière, afin de permettre l'interprétation détaillée d'un secteur limité du fossé.

Le présent rapport fait une présentation succincte de la géologie du Fossé rhénan supérieur et de la méthode de calcul utilisée pour estimer la ressource géothermale disponible. L'évaluation du potentiel du réservoir du Buntsandstein a été réalisée, dans un premier temps, sur la partie méridionale du fossé à partir des anciennes cartes de la synthèse géothermique du Fossé rhénan supérieur publiée en 1979 dans le cadre d'un projet européen (Munck *et al.*, 1979). Dans un second temps, nous nous sommes intéressés à un secteur présentant une anomalie thermique, situé entre Strasbourg et Obernai (Figure 1), le long de la bordure ouest du fossé. Dans ce secteur, 140 km de profils sismiques anciens ont été retraités par des techniques modernes et ré-interprétés dans l'optique de faire un modèle 3D du Buntsandstein, d'en estimer le potentiel géothermique et la qualité du réservoir à partir des données de forages disponibles.

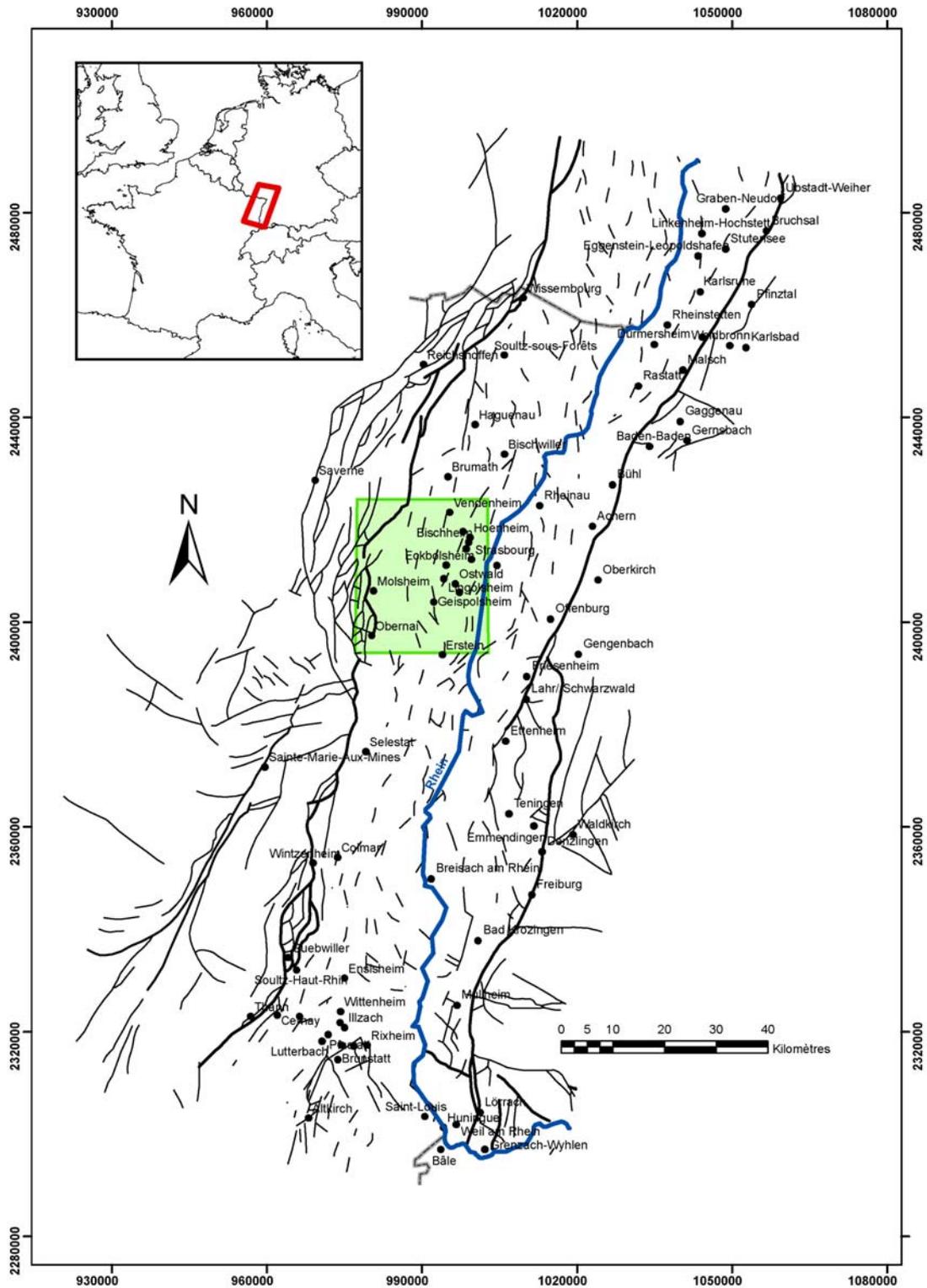


Figure 1 – Carte de situation et schéma structural de la partie méridionale du Fossé rhénan supérieur. Le cadre vert représente l'implantation de la zone d'étude détaillée.

## 2. Géologie du Fossé rhénan supérieur

Le graben du Rhin supérieur ou Fossé rhénan supérieur est un fossé d'effondrement tertiaire qui s'étend sur plus de 300 km de longueur de Bâle au sud à Mayence et Francfort au nord. Il est très bien documenté grâce aux nombreuses études liées à l'exploitation minière et pétrolière du siècle dernier (forages, études géophysiques...).

Sa partie méridionale correspond en France à la plaine d'Alsace, entre Huningue et Wissembourg, en Allemagne à la plaine de Bade de Weil-am-Rhein à Karlsruhe, et à son extrême sud à la région de Bâle en Suisse (Figure 1).

Ce graben fait partie du Système de Rifts Ouest-européens s'étendant de la Méditerranée jusqu'à la Mer du Nord sur une distance de plus de 1 000 km. Il représente le segment central le plus prononcé entre le fossé de la Bresse au sud et le Graben du Rhin inférieur au nord.

Le Fossé rhénan supérieur est formé de 3 segments limités par des failles bordières d'orientation N15°E au nord et au sud, et N30-35°E dans sa partie médiane (Figure 2). Il est entouré par deux massifs cristallins : à l'ouest, le massif des Vosges et à l'est le massif de la Forêt Noire. Entre ces massifs et la plaine du Rhin, il existe des champs de fractures (Figure 2), qui sont des bandes de terrains s'affaissant progressivement en marches d'escalier. Le plus étendu correspond au champ de fractures de Saverne situé le long de la bordure ouest du fossé dans la partie nord de l'Alsace entre Woerth et Obernai.

Au nord, le fossé est limité par la faille hercynienne du Massif schisteux rhénan et au sud par le front du Jura et la faille de transfert Rhin-Saône. Cette faille permet de faire le lien avec l'extension des fossés de la Bresse et de la Limagne (Bergerat, 1985).

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

Ce socle est formé de vastes complexes gneissiques et de granites recoupés par des accidents hercyniens d'orientation N70°-80°E (failles de Lalaye-Lubine et de Baden-Baden) relayés par des accidents N35°E dans la partie centrale du fossé entre Colmar et Baden-Baden, qui sont à rattacher à la famille d'accidents comprenant la faille de Sainte-Marie-aux-Mines dans les Vosges (Figure 2).

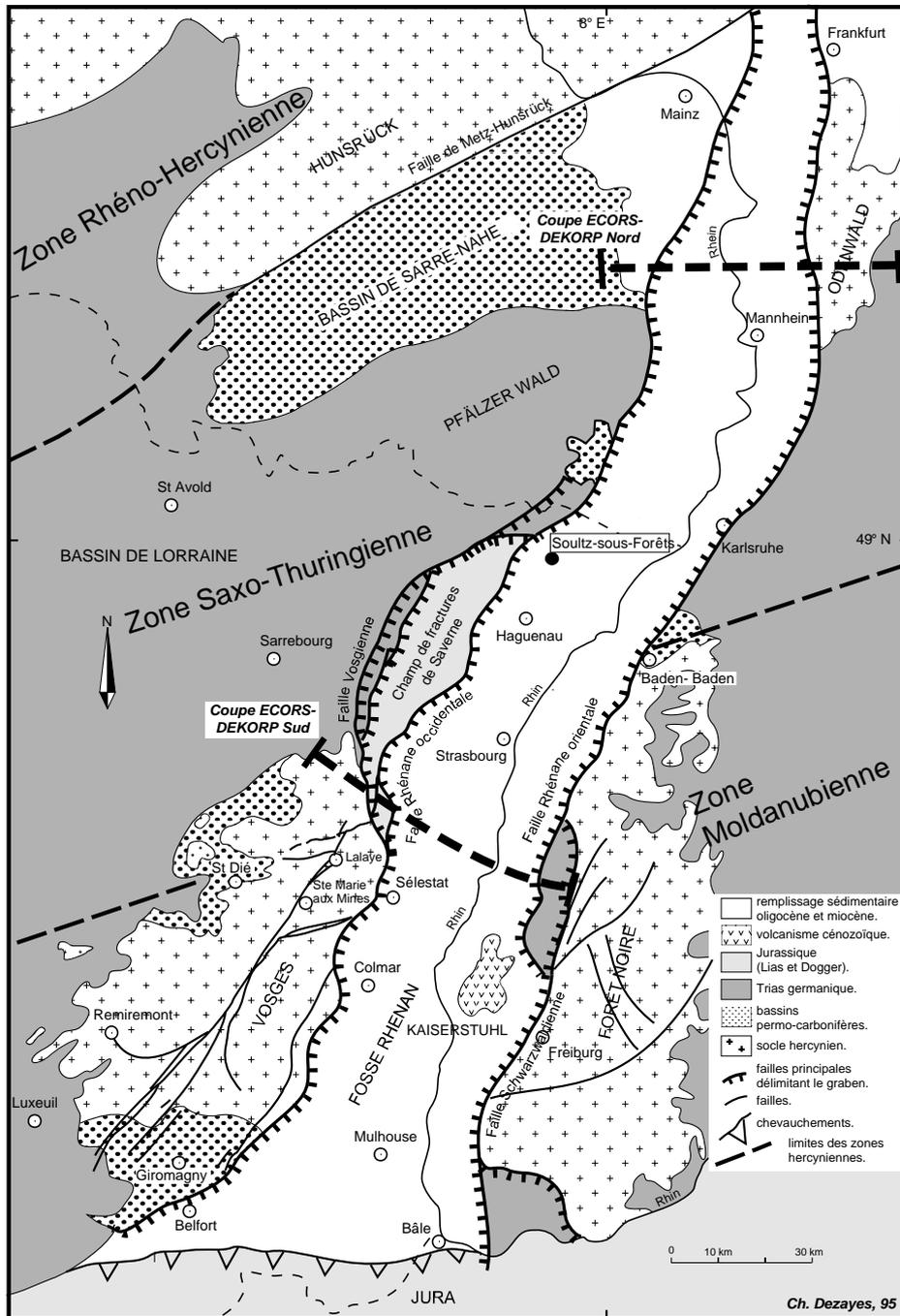


Figure 2 – Carte géologique simplifiée du Fossé rhénan et localisation des coupes ECORS-DEKORP.

Les terrains sédimentaires mésozoïques sus-jacents s'échelonnent du Permien au Jurassique moyen, de façon relativement continue du Buntsandstein inférieur au Bathonien (Figure 3). La sédimentation est relativement uniforme sur l'ensemble de la région et atteint 1 500 m d'épaisseur. C'est dans ces formations que se trouvent les principaux réservoirs géothermiques connus : calcaires du Malm, Grande Oolithe du Dogger, calcaires du Muschelkalk et grès du Buntsandstein (Munck *et al.*, 1979).

Dans la région, le Trias se caractérise par des faciès qualifiés de germaniques séparés en trois termes de la base au sommet (Figure 3) :

- le Buntsandstein (Trias inférieur) composé essentiellement de grès continentaux roses et de conglomérats fluviatiles et estuariens marquant une transgression. Ces dépôts détritiques peuvent atteindre 500 m d'épaisseur ;
- le Muschelkalk (Trias moyen) carbonaté et argileux avec des passés évaporitiques, marquant l'invasion marine. Les épaisseurs ne dépassent pas 250 m ;
- le Keuper (Trias supérieur) se caractérise par des dépôts lagunaires argileux et évaporitiques qui soulignent une transgression marine partielle. Les sédiments salifères peuvent atteindre 300 m d'épaisseur.

ÉTAGES ET SUBDIVISIONS		PRINCIPALES FORMATIONS FOSSILES CARACTÉRISTIQUES	ÉPAISSEURS		
JURASSIQUE MOYEN	Callovien	Complexe argilo-marneux à fossiles pyriteux : <i>Quenstedteroceras lamberti</i> Argiles marneuses et calcaires gréseux marno-pyriteux : <i>Kosmoceras ornatum</i> Marnes et calcaires marneux à colithes ferrugineuses : <i>Rhynchonella ancrops</i> Marnes grumeleuses et calcaires gréseux : <i>Macrocephalites macrocephalus</i>	10 – 45 m		
		sup.	Argile marneuse ou marnes micacées à ammonites pyriteuses	30 m	
		Bathonien moy.	Calcaire marneux à <i>Rhynchonella alemanica</i> Marnes et marno-calcaires à <i>Ostrea knorri</i>		
	inf.	Marnes et calcaires marneux ferrugineux à <i>Parkinsonia ferruginea</i>	85 – 150 m		
	Bajocien	sup.		<b>Grande Oolithe</b> , calcaire blanc oolithique, pauvre en fossiles : <i>Clypeus ploti</i> , <i>Echinobrius rengei</i> , <i>Parkinsonia parkinsoni</i> Lumachelle à <i>Ostrea acuminata</i>	
		moy.		Marnes et calcaires à <i>Teloceras blagdeni</i> , <i>Trigonia costata</i> , <i>Terebratula</i> Marnes à <i>Megateuthis giganteus</i> Calcaire colithique ferrugineux à <i>Stephanoceras humphriesianum</i>	
	inf.	Marnes ou calcaires à <i>Otoites sauzoi</i> Marnes et marno-calcaires à <i>Sonninia sowerbyi</i>	40 – 80 m		
	Aalénien	Zone à <i>Ludwigella concava</i> Grès micacé marneux ou marno-calcaire gréseux plus ou moins ferrugineux et plus ou moins oolithique = zone à <i>Ludwigia murchisonae</i> et <i>Pecten pumilus</i> Marnes à nodules : <i>Trigonia navis</i> , <i>Leloceras opalinum</i>			
	JURASSIQUE INFÉRIEUR	Toarcien	sup.	Argiles et marnes grises avec ou sans nodules calcaires : <i>Astarte voltzi</i> , <i>Turbo subduplicatus</i> Marnes grises à nodules calcaires : <i>Pleydella aalensis</i> , <i>Dumortiera pseudoradiosa</i>	20 – 80 m
			moy.	Marno-calcaires : <i>Lytoceras jurense</i> Marnes compactes ou feuilletées : <i>Hildoceras bifrons</i>	40 – 50 m
		inf.	Marnes bitumineuses papyracées (schistes-cartons) : <i>Harpoceras falcerum</i> <i>Posidonia branti</i>		
		Domérien	Calcaire gréseux ou marneux : <i>Pleuroceras spinatum</i> Marnes à <i>avoides</i> , à concrétions ferrugineuses et calcaires : <i>Amaltheus margaritatus</i>	20 – 30 m	
Carixien	Calcaire gris-bleu : <i>Productylloceras davoei</i> , <i>Belemnites clavatus</i> Marnes bleu sombre : <i>Zelleria numismalis</i> , <i>Plicatula spinosa</i>				
LIAS	Lotharingien	Calcaire creux : <i>Echloceras reticostatum</i> Argiles sableuses feuilletées à fossiles pyriteux rares : <i>Gryphaea obliqua</i>	10 – 45 m		
	Sinemurien s.s. + Hettangien	Marnes riches en <i>Belemnites acutus</i> , <i>Pentacrinus tuberculatus</i> Calcaires et marnes gris : <i>Amioceras semicostatum</i> , <i>Arietites bucklandi</i> <i>Gryphaea arcuata</i> , <i>Plagiostoma gigantea</i> , brachiopodes Calcaires et schistes bitumineux à <i>Schlotheimia angulata</i>	20 – 30 m		

ÉTAGES ET SUBDIVISIONS		PRINCIPALES FORMATIONS FOSSILES CARACTÉRISTIQUES	ÉPAISSEURS
TRIAS SUPÉRIEUR KEUPER	RHÉTIEN	Marnes rouges à grises Grès jaunes fins à ciment argileux ou calcaire Localement bone-bed	10 – 20 m
	supérieur	Marnes grises avec marnolites Marnes violettes Marnes irisées supérieures rouges et vertes avec anhydrite et gypse	20 – 50 m
	moyen	<b>Dolomie moyenne</b> = <b>Dolomie de Beaumont</b> , grise, en bancs ou plaquettes Marnes irisées moyennes très bariolées avec gypse <b>Grès à roseaux</b> micacé, rose : <i>Equisetites arenaceus</i> , <i>Pterophyllum jaegeri</i>	10 – 25 m affleure très rarement dans le Haut-Rhin
	inférieur	Marnes irisées inférieures grises à gypse interstratifié et pseudomorphoses de sel; fossiles très rares : <i>Estheria laxitexta</i>	60 – 85 m
TRIAS MOYEN MUSCHELKALK	LETTENKOHLE	<b>Dolomie-limite</b> massive (souvent absente) : <i>Myophoria goldfussi</i> , <i>M. intermedia</i> , <i>Lima striata</i> Marnes plus ou moins bariolées à lits charbonneux : <i>Equisetites</i> Dolomie et calcaire dolomitique : <i>Myophoria goldfussi</i> , <i>Lingula tenuissima</i>	15 – 30 m
	supérieur	<b>Couches à Cératites</b> , calcaires gris lités à grain fin, plus ou moins dolomitiques, et lits marneux : <i>Ceratites semiparvulus</i> (au sommet) <i>Ceratites nodosus</i> , <i>Terebratula</i> Localement bone-bed à débris osseux et dents de poissons <b>Calcaire à entroques</b> en bancs massifs : <i>Encrinurus lilliformis</i>	50 – 70 m
	moyen	Marnes bariolées localement gypsifères, dolomies, cargneules	30 – 75 m
TRIAS INFÉRIEUR BUNTSANDSTEIN	supérieur	Dolomie compacte et schistes grés-dolomitiques : <i>Myophoria orbicularis</i> Marnes dolomitiques alternant avec dolomies et calcaires; bancs à <i>Lingula tenuissima</i> , <i>Pentacrinus dubius</i> <b>Grès coquillier</b> , dolomitique et argileux, jaune-brun, micacé; nombreux fossiles : <i>Conostyris vulgaris</i> , <i>Hoernesia socialis</i> , <i>Lima striata</i> , <i>Myophoria vulgaris</i>	30 – 60 m
	supérieur	<b>Grès à Voltzia</b> , grès fin, micacé, rose ou beige, à intercalations argileuses, très fossilifère : <i>Voltzia heterophylla</i> , <i>Anomopteris mougeoti</i> , esthères ( <i>Isaura minuta</i> )	10 – 20 m
	moyen	<b>Couches intermédiaires</b> : bancs de grès micacés lie-de-vin et lentilles d'argile rouge peu fossilifère (restes végétaux, esthères) – sols fossiles (zones violettes)	30 – 70 m
TRIAS INFÉRIEUR BUNTSANDSTEIN	moyen	<b>Conglomérat principal</b> ou Poudingue de Ste-Odlie	20 m
	inférieur	<b>Grès voglien</b> , grès arkosique rose, assez grossier, rares fossiles (pistes et terriers d'organismes), galets (quartz et quartzite). L'épaisseur augmente du S au N	20 – 450 m
inférieur	<b>Grès d'Annweiler</b> : grès argileux micacé, blanc à rouge vif avec traces d'activité biologique (terriers); développé uniquement dans la région au N de Niederbronn	80 – 100 m	

Figure 3 – Série stratigraphique du Mésozoïque (von Eller, 1984).

L'ensemble des séries jurassiques ne dépasse pas 500 m d'épaisseur et est caractérisé par une sédimentation marine (Figure 3). Au Lias, les sédiments sont à dominance argileuse et marneuse, alors qu'au Malm et au Dogger, la sédimentation est surtout carbonatée formant les aquifères du Malm et de la Grande Oolithe.

Les forages ayant atteint la base du Tertiaire montrent que les épaisseurs érodées sont plus importantes au nord de Karlsruhe qu'au sud, ce qui indique un basculement de la plate-forme vers le sud lors de son émergence. Ainsi, le Jurassique a pratiquement disparu au nord de Karlsruhe (Sittler, 1974).

L'effondrement du Fossé rhénan s'est produit au cours du Tertiaire entre la fin de l'Eocène et le Miocène (39-20 Ma ; Figure 4) par réactivation d'une zone de faille héritée de la tectonique varisque et en réponse à la collision Afrique-Europe qui permet la surrection des Alpes (Edel *et al.*, 2006). L'évolution du fossé diffère dans ses parties nord et sud, de part et d'autre du seuil d'Erstein qui forme la continuité de la zone tectonique hercynienne de Lalaye-Lubine (Villemin, 1986), ancienne limite entre les zones hercyniennes moldanubienne et saxo-thuringienne (Figure 2). Dans la partie sud du fossé, entre Strasbourg et Bâle, la subsidence se fait en plusieurs étapes (Villemin *et al.*, 1986) et les bordures du graben se soulèvent pour former les massifs des Vosges et ceux de la Forêt Noire. Dans la partie nord du fossé, la subsidence est régulière et homogène jusqu'au Miocène supérieur. Il en résulte une épaisseur du remplissage sédimentaire pratiquement deux fois plus importante au nord qu'au sud du fossé (Sittler, 1967).

La structure en surface du Fossé rhénan est caractérisée par une configuration légèrement sinueuse : sa partie nord montre une orientation N-S, son segment central est orienté N30°E et son segment sud N10°E (Figure 2). Les bordures du fossé sont contrôlées par deux types de grandes failles normales synthétiques : les failles externes et les failles internes qui encadrent des champs de fractures en forme de croissant dont le plus développé est celui de Saverne.

Le remplissage tertiaire du fossé montre une alternance de sédimentation lacustre et marine en relation avec la subsidence différentielle du graben (Figure 4 ; Sittler, 1965 ; Berger *et al.*, 2005 ; Roussé, 2006). Les dépôts syn-rift sont caractérisés par des séries salifères (au sud) et marneuses (au nord) datées du Latorfien et correspondant respectivement à la Série Salifère du bassin de Mulhouse et aux Couches de Pechelbronn. Cette formation caractéristique est souvent nommée Sannoisien dans les descriptions géologiques des forages par extension historique des faciès lacustres du bassin de Paris. Le toit de cette formation, qui correspond aux premiers dépôts marins francs que sont les Marnes à Foraminifères et les Schistes à Poisson (base de la transgression marine du Rupélien), apparaît comme un réflecteur de forte énergie sur les profils sismiques.



Les profils de sismique réflexion du programme DEKORP-ECORS ont montré une asymétrie des failles bordières majeures de part et d'autre de la zone de fracture varisque Lalaye-Lubine – Baden-Baden (Figure 5). Au nord, c'est la faille se développant le long du flanc est du rift qui contrôle l'effondrement du fossé, alors qu'au sud, c'est celle du flanc ouest (Brun *et al.*, 1992). Entre les deux se situe une zone de transfert se surimposant au seuil d'Erstein (Figure 6 ; Derer *et al.*, 2005).

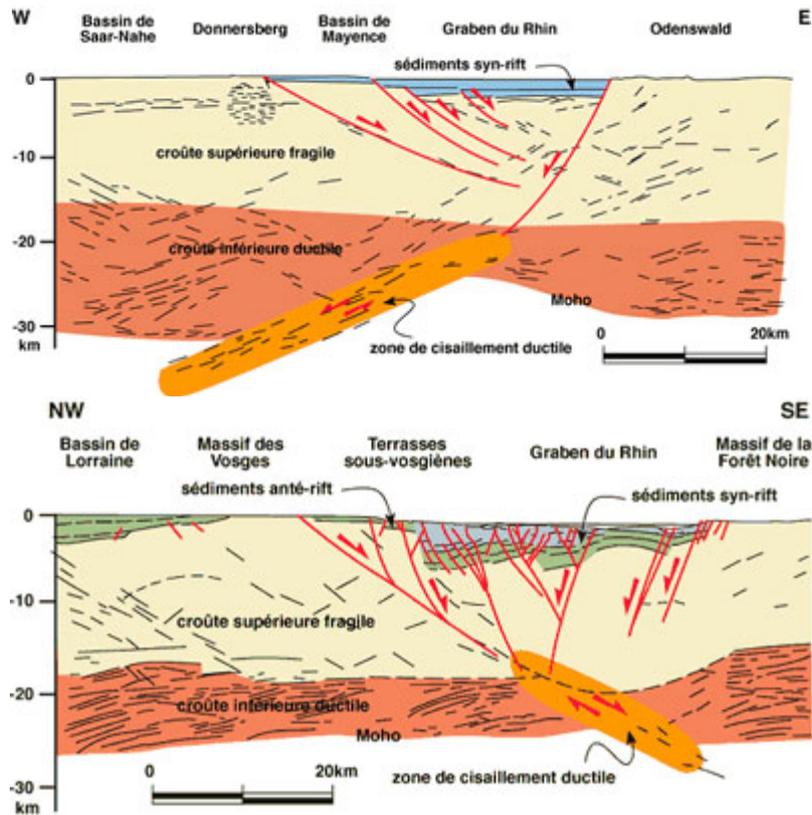


Figure 5 – Coupes interprétatives du programme DEKORP-ECORS respectivement profil nord en haut et profil sud en bas (Brun *et al.*, 1992). Localisation en Figure 2.

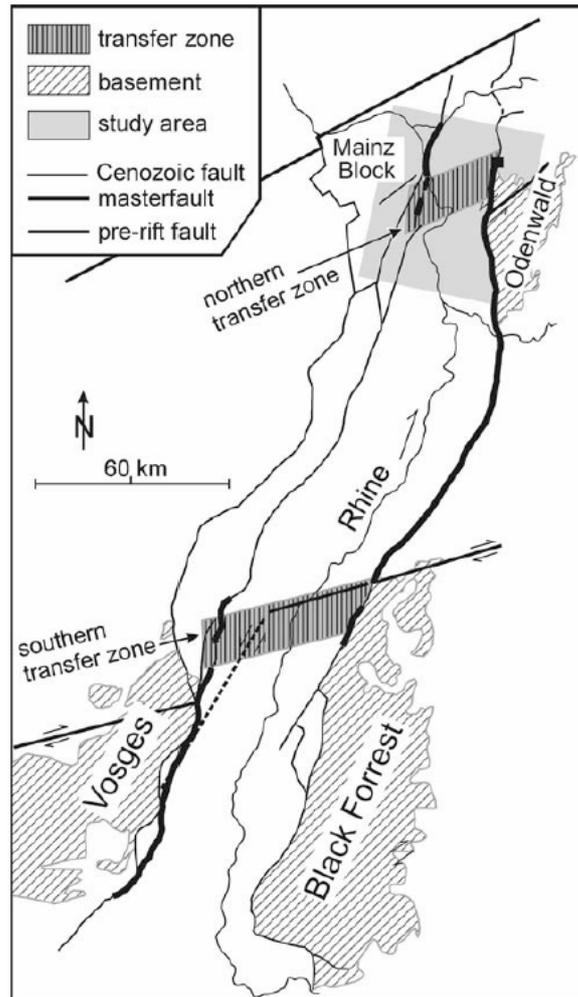


Figure 6 – Localisation de la zone de transfert nord (Derer et al., 2003) et sud (Mauthe et al., 1993). À noter le changement des failles majeures qui alternent d’une bordure à l’autre du fossé au niveau des zones de transfert (Derer et al., 2005).

Dans la partie interne du fossé, recouverte par les sédiments plio-quadernaires, un réseau de failles normales découpe le remplissage sédimentaire secondaire et tertiaire suivant une direction globalement N-S. Ces failles normales délimitent des blocs et forment différents types de structures distensives qui se retrouvent sur l’ensemble du rift. Il n’y a pas de différences majeures entre le style des structures des parties septentrionale et méridionale. Cependant, dans la partie sud, la tectonique salifère complique ces structures.

Ces différents types de structures se répartissent transversalement au fossé de manière non aléatoire. Schématiquement, de la bordure au centre du graben se développent (Sittler, 1974 ; Figure 5) :

- des structures en « rollover » qui s’observent localement au voisinage des failles bordières ;

- des structures en « horst et graben » dans certains secteurs du fossé où la vergence des failles change fréquemment et où le basculement des couches est très faible ;
- des blocs basculés limités par des failles normales contraires à rejets compensateurs. Ce sont les structures les plus fréquentes dans le fossé. Le regard de ces failles est pratiquement toujours périphérique et le basculement des couches se fait vers le centre du bassin. La taille moyenne des blocs est de l'ordre du kilomètre en largeur et de la dizaine de kilomètres en longueur, le basculement n'excédant jamais 10° (Villemin, 1986) ;
- des blocs basculés limités par des failles normales conformes à rejets ajoutés. Ces structures sont fréquentes au centre du fossé, mais également au voisinage immédiat des failles bordières. Dans ce cas, ce sont des séries de failles très serrées qui délimitent des bandes étroites de terrain. On observe fréquemment, le long du flanc ouest, des blocs apparemment basculés vers le centre du fossé, qui correspondent à un décollement pré-rift de la couverture jurassique sur le Keuper (Maurin et Nivière, 2000).

L'étude géologique du graben du Rhin souligne les oppositions entre les deux parties nord et sud du graben situées de part et d'autre du seuil d'Erstein proche de notre zone d'étude :

- opposition morphologique avec un changement de la dissymétrie du remplissage, de la direction du rift et des limites latérales (champs de fractures au nord, grande faille bordière au sud) ;
- opposition dans la quantité de subsidence (deux fois plus forte au nord qu'au sud) ;
- opposition dans les faciès (plus marins au nord, plus conglomératiques et saumâtres au sud).

Actuellement, l'activité néotectonique du Fossé rhénan est marquée par une activité sismique modérée mais régulière, plus intense dans la partie au sud de Strasbourg qu'au nord (Bonjer, 1997 ; Lopes Cadozo *et al.*, 2005 ; Figure 7). La sismicité historique montre qu'il peut se produire de fortes secousses telles que le séisme destructeur de Bâle en 1356 avec une magnitude de 6.5, ou plus récemment celui de Sierentz en 1980 avec une magnitude de 4.9. Les épicentres des séismes sont distribués à l'intérieur et sur les flancs du graben au niveau des failles bordières (Figure 7). Les mécanismes au foyer montrent un régime de contrainte décrochant avec une direction de  $\sigma_H$  NW-SE. Ce régime de contrainte est engendré par la collision alpine qui réactive les structures NNE-SSW en cisaillement senestre (Bonjer, 1997). Au sud, les déplacements sont clairement liés à la collision alpine avec des vitesses de convergence vers le nord de 3 mm/an entre 1992 et 2002 (Rozsa *et al.*, 2005 ; Tesauro *et al.*, 2005). Au nord, il existe des déplacements vers le sud avec des vitesses plus faibles de 0.5 à 1 mm/an (Rozsa *et al.*, 2005). Des mouvements verticaux ascendants ayant une vitesse de 1 mm/an ont également été observés dans le sud du fossé due à l'action du champ de contrainte actuel, mais également à l'ascension de rides salifères orientées NW-SE (Liaghat *et al.*, 1998).

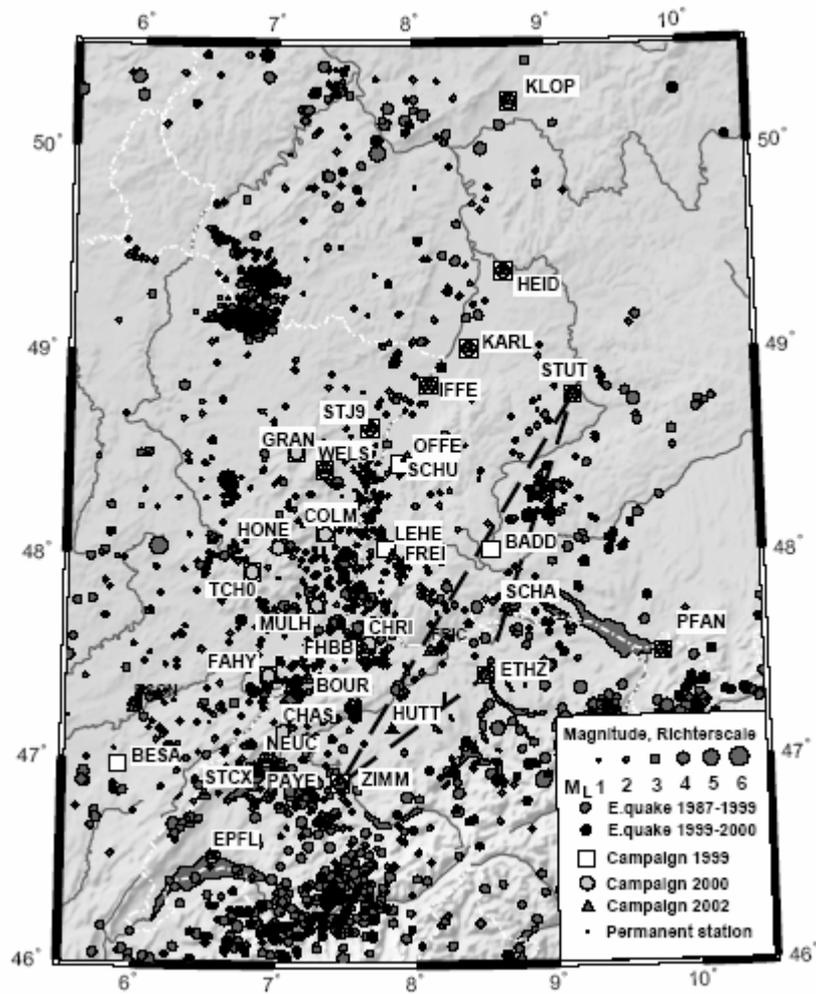


Figure 7 – Localisation des épicentres des séismes (base de données RéNaSS) et des stations GPS (Rozsa et al., 2005). MULH : Mulhouse, COLM : Colmar, FREI : Freiburg, KARL : Karlsruhe.



### 3. Méthode de calcul de la ressource disponible

La ressource géothermale est définie comme étant « ... la part de la ressource accessible qui peut être extraite écologiquement 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'estimation de la ressource géothermale est basée sur la chaleur contenue dans un volume de réservoir poreux dont l'énergie géothermale est supposée être exploitée par doublet. Le potentiel géothermique calculée 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 estimations 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 (1) avec les paramètres détaillés dans le Tableau 1 :

$$Q = \rho C_p V (T_i - T_f) \text{ en Joule} \tag{1}$$

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

Tableau 1 – Paramètres de calcul de la quantité de chaleur contenue dans un volume de roche de type grès.

Les grandeurs  $\rho$  et  $C_p$  sont dépendantes de la nature de la roche et peuvent varier régionalement avec la profondeur. Des valeurs moyennes simplificatrices ont été prises pour ces grandeurs. 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 (2) (Lavigne, 1978) :

$$R_T = (T_i - T_R) / (T_i - T_f) \quad (2)$$

Il dépend de la température de réinjection ( $T_R$ ) recommandée à 25 °C par un groupe d'expert de la Communauté Européenne (Hurter et Schellschmidt, 2003).

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

$$R_F = 0.33$$

Nous obtenons alors une quantité de chaleur exploitable déterminée par (3) :

$$Q_{\text{expl}} = 0.33 \cdot [(T_i - T_R) / (T_i - T_f)] \cdot \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_i - T_f) \text{ en Joule} \quad (3)$$

Il existe plusieurs unités d'énergie thermique, dont le Joule qui fait partie du Système International (SI). Rappelons quelques facteurs de conversion entre les principales unités d'énergie thermique :

$$1 \text{ J} = 0.239 \text{ cal}$$

$$= 3.17 \cdot 10^{-17} \text{ GW.an}_{\text{th}} \text{ (th pour thermique)}$$

$$= 2.4 \cdot 10^{-11} \text{ TEP (Tonne Equivalent Pétrole)}$$

Les valeurs en Joule sont généralement très fortes et l'on utilise alors plutôt le giga-joule (GJ) ou le tera-joule (TJ) :

$$1 \text{ GJ} = 10^9 \text{ J}$$

$$1 \text{ TJ} = 10^{12} \text{ J}$$

Dans le cas d'une production d'électricité, les techniques de conversion actuelles ont besoin d'un fluide géothermal dont la température est au minimum de 100 °C. La quantité d'énergie électrique pouvant être produite dépend du rendement du cycle de conversion choisi ou facteur de gain, qui est compris entre 10 et 15 %.

## 4. Évaluation du potentiel géothermique des réservoirs clastiques du Fossé rhénan

### 4.1. INTRODUCTION

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

### 4.2. INTERPOLATION DES DONNÉES ANCIENNES

Les cartes réalisées pour cette étude ne comportent aucune donnée originale, mais ont fait l'objet de traitements nouveaux avec des méthodes d'interpolation numérique récentes. Elles sont basées sur les cartes de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan Supérieur (Munck *et al.*, 1979) publiées en 1979 pour la Commission des Communautés Européennes dans le cadre de l'inventaire des ressources géothermiques naturelles des pays membres de l'Union en 1975. Cette étude a permis la compilation et la synthèse de toutes les données disponibles à l'époque pour les deux régions limitrophes, concernant les quatre formations aquifères présentant des caractères favorables pour une exploitation géothermique, à savoir : le Rauracien-Séquanien (Jurassique supérieur), la Grande Oolithe (sommet du Bajocien, Jurassique moyen), le Muschelkalk supérieur (Trias moyen) et la Buntsandstein (Trias inférieur). La géométrie de ces aquifères a été établie à partir des logs fondamentaux de nombreux forages, des résultats de campagnes géophysiques, des cartes et publications géologiques. Des cartes de température et de salinité des fluides dans ces aquifères sont également présentes et établies à partir des mesures effectuées dans les forages et pour le captage d'eaux thermales. Toutes les cartes sont présentées à l'échelle du 1/250 000 (Figure 8).

Pour notre étude, nous nous sommes intéressés aux cartes concernant le Buntsandstein. Ainsi, les cartes de la profondeur du toit du Buntsandstein et de la base du Trias, ainsi que la carte des températures au toit du Buntsandstein ont été digitalisées et géoréférencées en Lambert II. Les courbes de niveau résultantes du toit du Buntsandstein et du mur du Trias ont ensuite été discrétisées avec un pas de 200 m afin de récupérer des données ponctuelles qui serviront à la nouvelle interpolation.

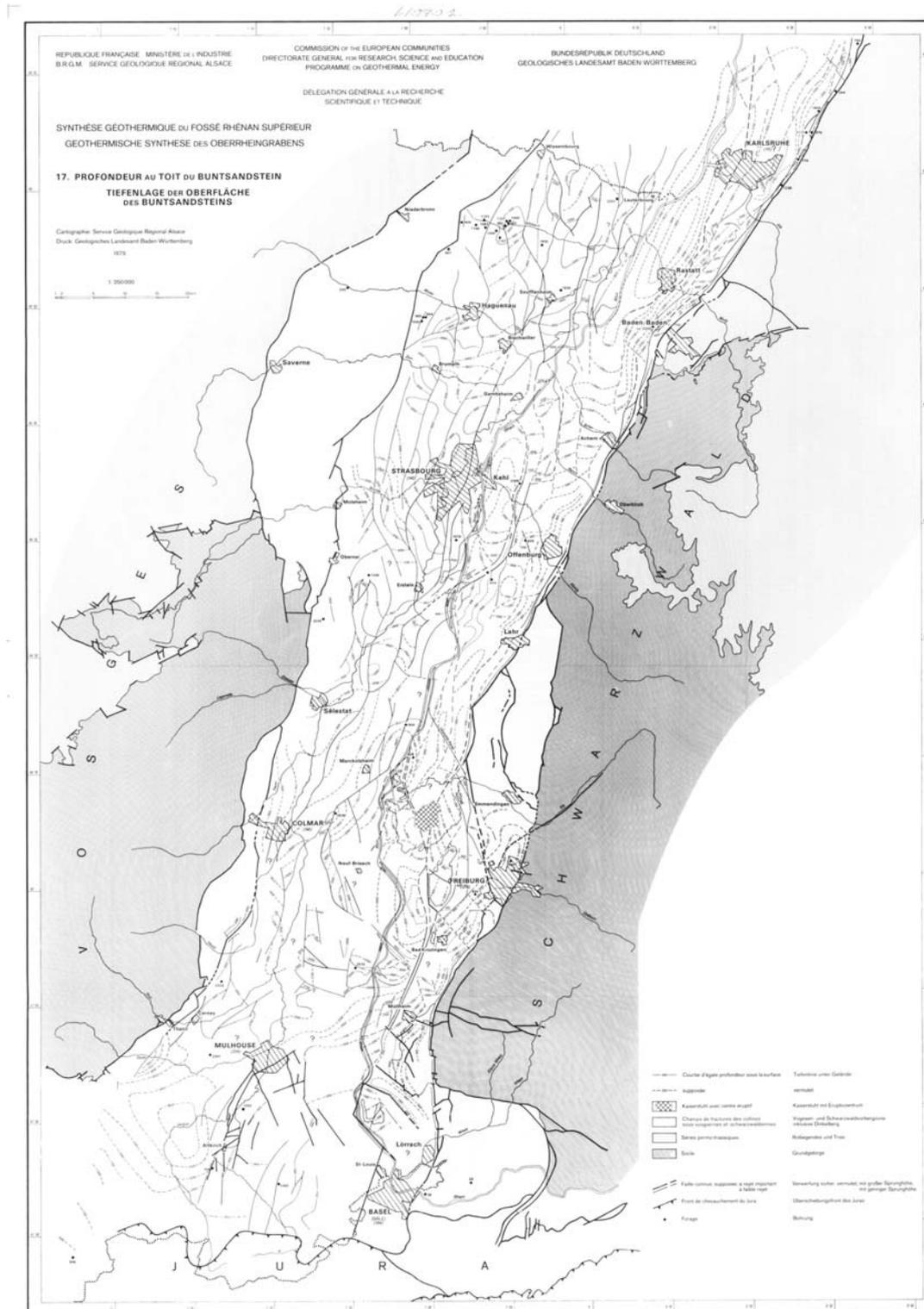


Figure 8 – Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein extraite de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan supérieur (Munck et al., 1979).

Afin de prendre en compte les failles dans l'interpolation des interfaces stratigraphiques, nous avons fait une nouvelle digitalisation de leur tracé d'après la carte du toit du Buntsandstein afin d'obtenir un réseau de taille raisonnable pour les calculs. Ainsi, nous n'avons conservé des données de départ que les failles de dimension suffisante et montrant un rejet à l'échelle de la carte. Ce réseau de failles résultant reste significatif puisqu'il prend en compte 90 % des failles représentées sur la carte initiale. Par simplification, ces failles ont été supposées verticales et continues en profondeur dans la couche du Buntsandstein afin d'utiliser la même cartographie du réseau pour les interpolations du toit et du mur de la formation.

L'interpolation des données de profondeur du toit et du mur du Buntsandstein s'est donc faite en tenant compte de l'influence des failles par une méthode de krigeage avec variogramme linéaire sans dérive au pas de 500 m. Il en résulte une grille carrée de valeur avec un pas de 500 m (Figure 9).

La carte des épaisseurs du Buntsandstein doit être déduite par soustraction des grilles représentant la profondeur du toit et du mur du Buntsandstein. Cependant, il apparaît des incompatibilités (épaisseurs nulles ou négatives) dues aux imprécisions des cartes à l'échelle du fossé. Nous avons dû avoir recours à la carte de l'épaisseur du Buntsandstein (Munck *et al.*, 1979) pour corriger ces valeurs et calculer une carte du mur du Trias cohérente (Figure 10). Par soustraction des deux grilles de profondeur des interfaces, nous obtenons une carte de l'épaisseur des grès du Buntsandstein incluant probablement une partie du Permien clastique (Figure 11).

La température au toit du réservoir n'a pas posé de problème de calcul. Les courbes digitalisées ont été discrétisées avec une maille de 200 m. Les données résultantes ont été interpolées par krigeage au pas de 500 m (Figure 12).

Enfin, à partir de la combinaison de toutes ces cartes, nous avons réalisé une carte du potentiel géothermique du fossé en se basant sur les formules de Muffler et Cataldi (1978, cf. §3). La température de l'aquifère et son épaisseur pour le calcul du volume sont considérées comme variables pour chacune des mailles de 500 x 500 m de la carte. Il en résulte une quantité de chaleur (Q, Figure 13) en place par m<sup>2</sup> calculée à partir des paramètres présentés en Tableau 2 et un potentiel exploitable (Q<sub>expl</sub>) (Figure 14).

Paramètres	Description	Unité	Valeur
$\rho$	Densité de la roche	Kg/m <sup>3</sup>	2 200
C <sub>p</sub>	Capacité calorifique	J/Kg.K	710
V	Volume (surface S x épaisseur h)	m <sup>3</sup>	250 000 x variable
T <sub>i</sub>	Température initiale moyenne de l'aquifère	°C	Variable
T <sub>f</sub>	Température finale ou température en surface	°C	10
T <sub>R</sub>	Température de réinjection	°C	25

Tableau 2 – Paramètres de calcul de la quantité de chaleur présente dans le Buntsandstein du Fossé rhénan.

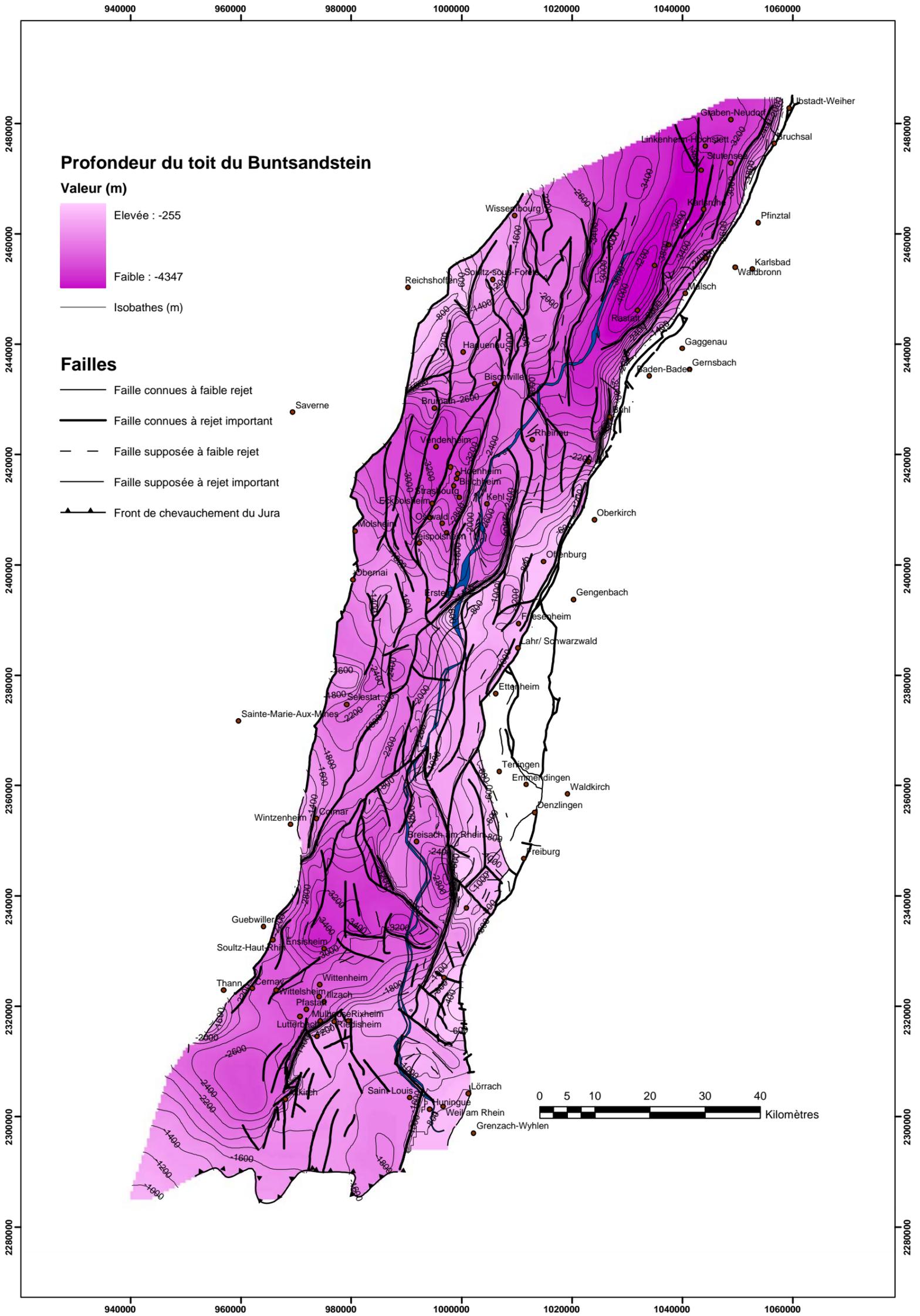


Figure 9 – Carte de la profondeur du toit du Buntsandstein.

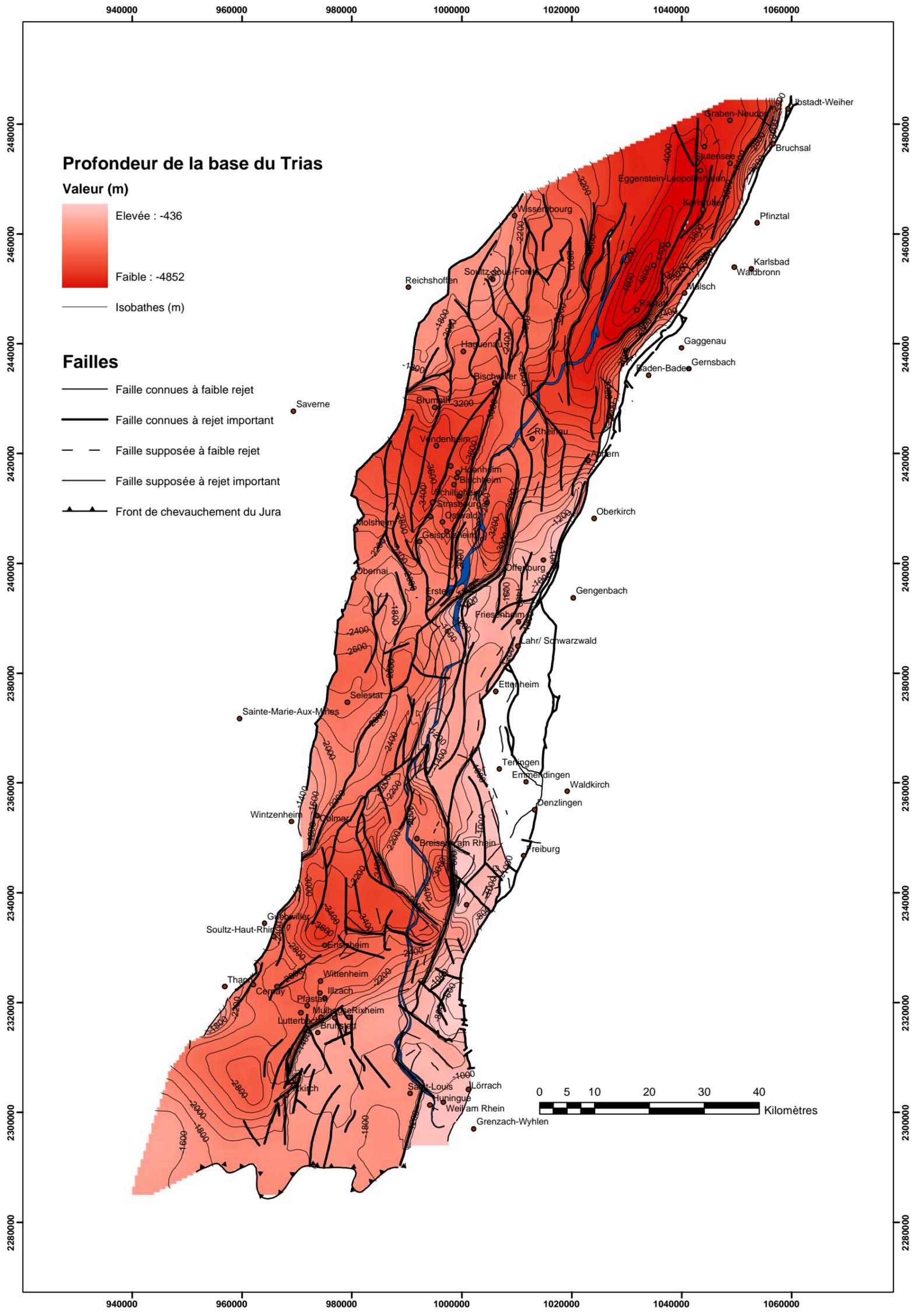


Figure 10 – Carte de la profondeur de la base du Trias.

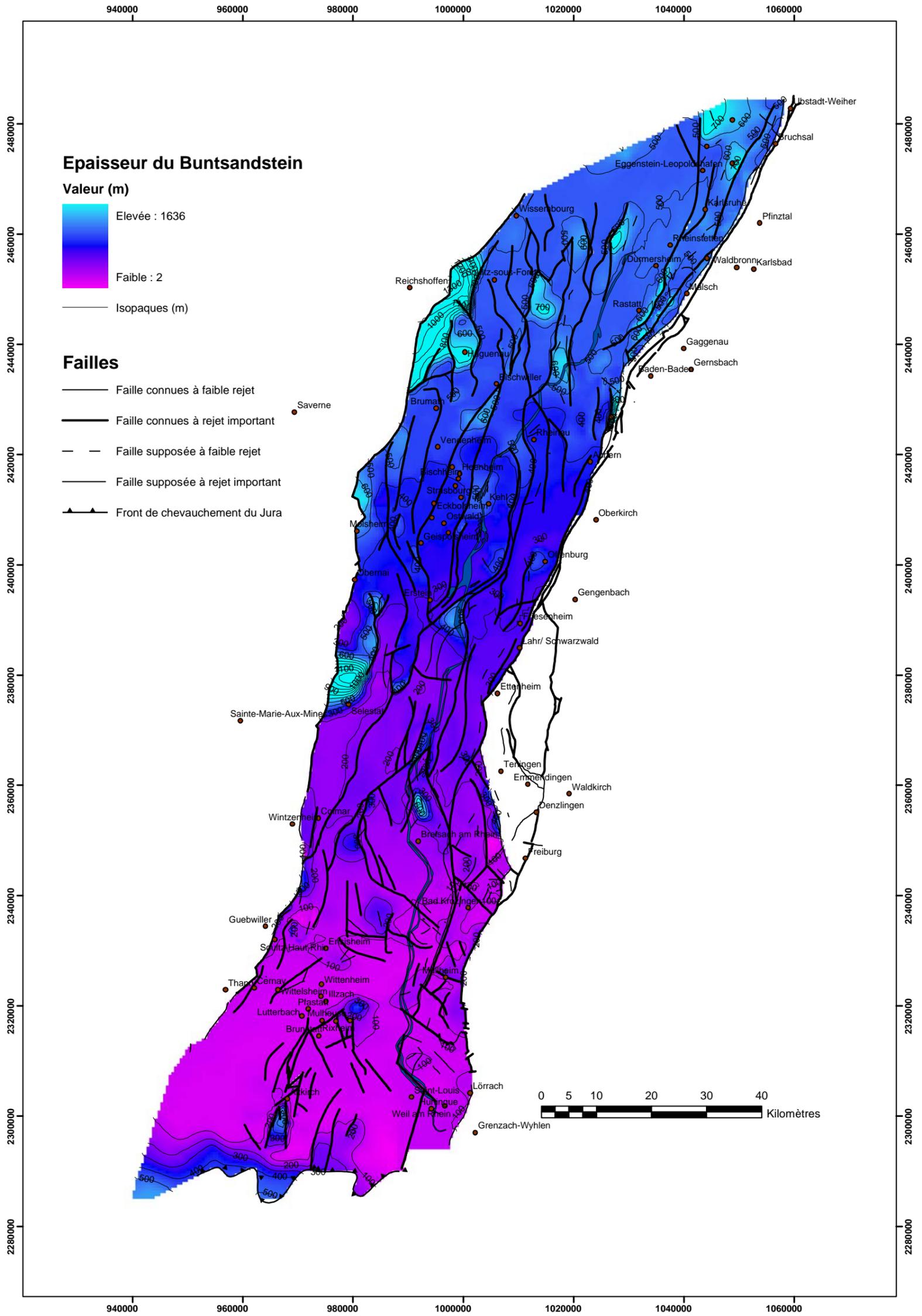


Figure 11 – Carte des épaisseurs du Buntsandstein.

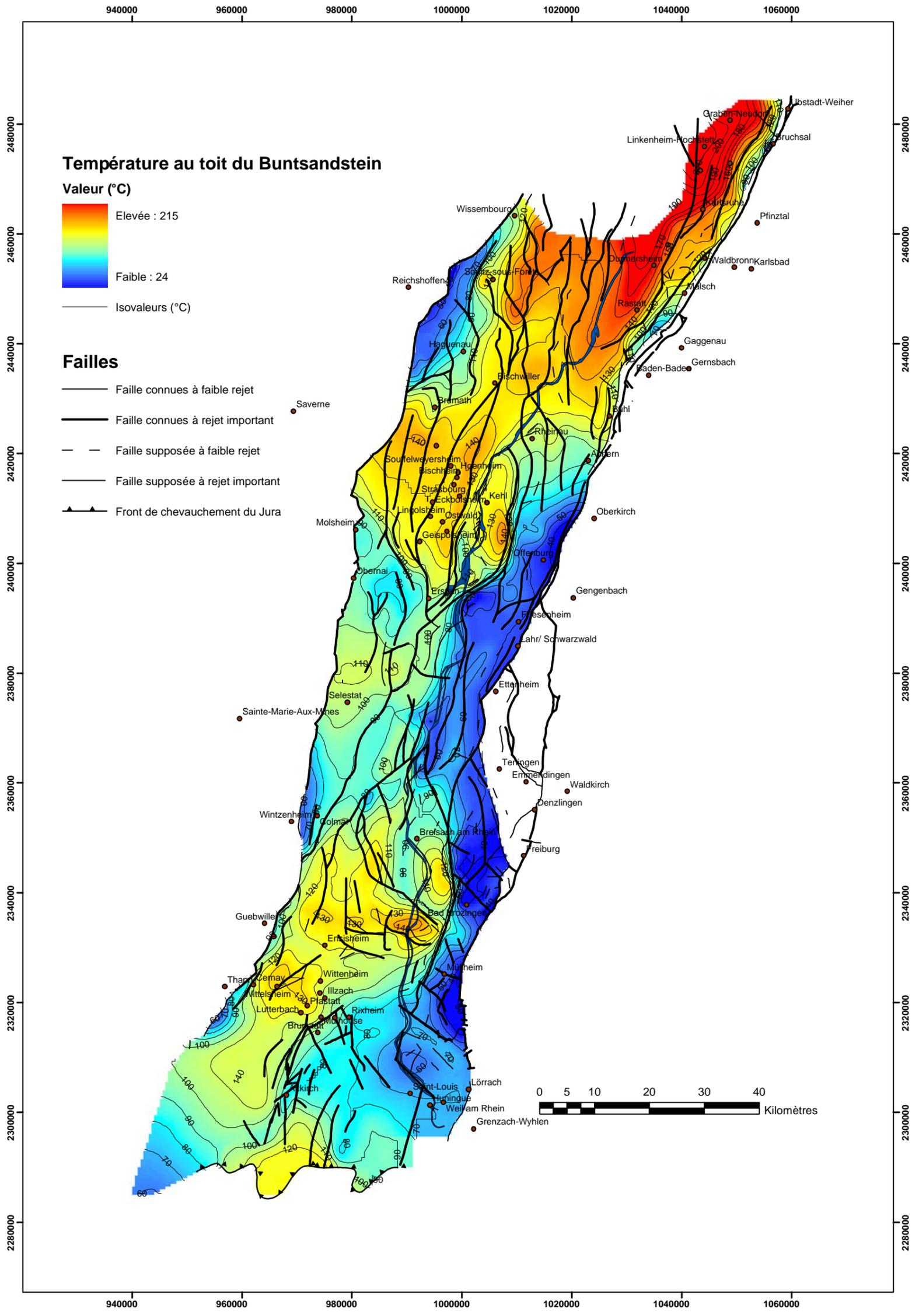


Figure 1 – Carte des températures au toit du Buntsandstein.

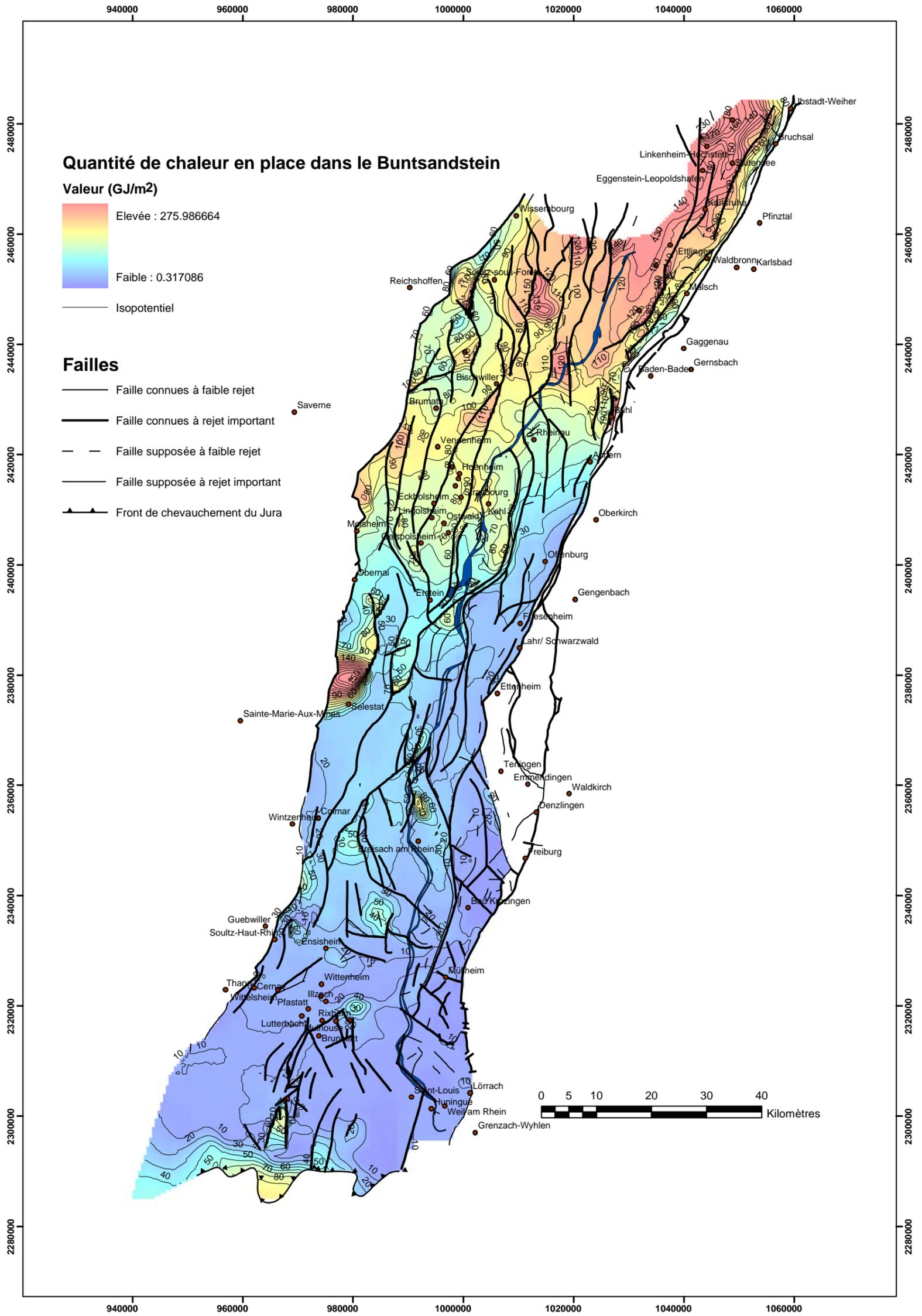


Figure 13 - Carte de la quantité de chaleur (Q) présente par m<sup>2</sup> dans la formation du Buntsandstein.

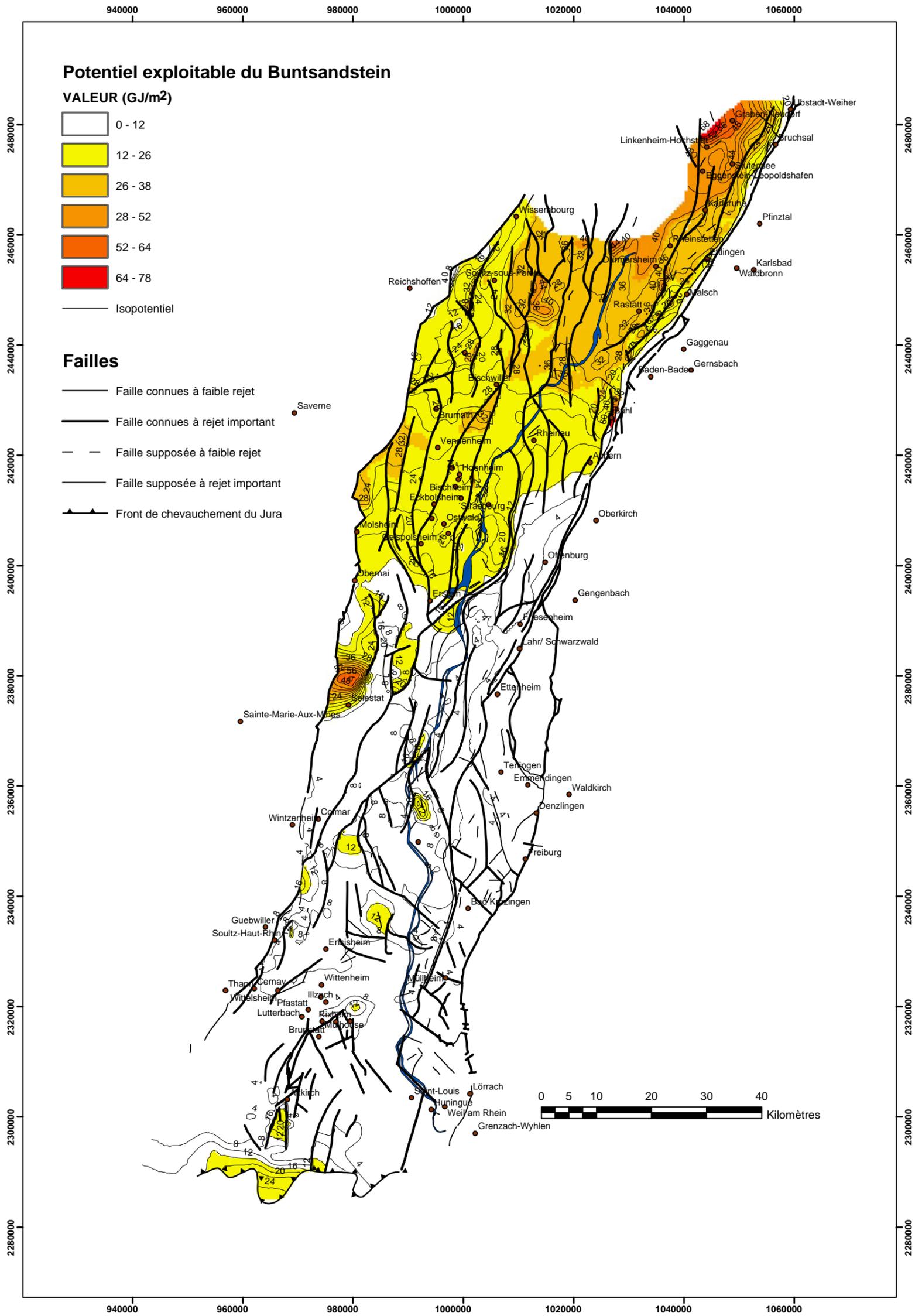


Figure 14 – Carte du potentiel géothermique exploitable par m<sup>2</sup> du Buntsandstein.

### 4.3. RESSOURCES DU BUNTSANDSTEIN DANS LE FOSSÉ RHÉNAN

La formation des grès du Buntsandstein existe sous tout le Fossé rhénan, bien qu'elle ait été, comme les formations qui la recouvrent, érodée au Crétacé. Dans l'ensemble, c'est une formation homogène, bien connue à l'affleurement et exploitée en carrière (cf. §2).

La profondeur de son sommet augmente du sud vers le nord, où elle passe respectivement de 2 000 m à plus de 3 000 m de profondeur (Figure 9). Le toit du Buntsandstein peut même atteindre 4 000 m dans le fossé de Rastatt au NE. Le long de la bordure est du graben, le toit remonte vers 400-600 m alors qu'il se situe à plus de 1 000 m le long de la bordure ouest, exception faite de la région de Reichshoffen au NW, où il n'atteint que 600-800 m. De manière générale, au sud de Strasbourg, la profondeur est plus importante à l'ouest qu'à l'est, ceci de part et d'autre d'une série de failles longitudinales sub-parallèles au Rhin.

Le mur du Trias suit une tendance similaire avec une profondeur plus faible au sud, autour de 2 000 m, qu'au nord, où il atteint plus de 3 000 m de profondeur, voire même 4 800 m dans la fosse de Rastatt (Figure 10).

L'épaisseur de la formation augmente également du sud vers le nord (Figure 11). Au sud, les épaisseurs sont faibles, inférieures à 100 m. Au centre du fossé, entre les latitudes de Colmar et Strasbourg, les épaisseurs varient entre 200 m et 300 m, alors qu'au nord de Strasbourg, elles atteignent 500-600 m. Il apparaît un certain nombre de sous-bassins dont l'épaisseur de sédiments clastiques peut dépasser 1 000 m. Cependant, il faut faire attention à la précision des cartes du toit et du mur de la formation qui nous ont servi au calcul de cette carte d'épaisseur et qui proviennent d'interpolation manuelle de données de forages.

La température est globalement de 100 °C au toit de la formation (Figure 12). Elle est naturellement plus faible au sud où le toit est moins profond. Au nord de Strasbourg, la température est d'environ 150 °C et atteint 200 °C à l'extrême NE du fossé, côté allemand, à des profondeurs de 3 500 m à 4 000 m.

Les cartes de potentiel géothermique sont la combinaison des cartes de température et d'épaisseur du Buntsandstein (Figure 13 et Figure 14). Au sud d'Erstein, la région apparaît comme peu favorable à l'exploitation du Buntsandstein pour la géothermie. Au nord, les calculs donnent des valeurs plus intéressantes et des bassins s'individualisent où il serait intéressant de cibler des études.

Il faut également remarquer la région de Sélestat où il semble exister un très fort potentiel géothermique. Ce résultat est à considérer avec précaution, car, bien qu'il existe une anomalie thermique connue par ailleurs (Figure 15), le potentiel mis en évidence semble principalement dû à une forte épaisseur de sédiments. Or, ceci apparaît comme une anomalie probablement due aux erreurs de précision des cartes de profondeur du toit et du mur. Des données de forages complémentaires permettraient de lever cette imprécision et d'affiner les calculs.

#### 4.4. CONCLUSIONS

La reprise des cartes de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan supérieur (Munck *et al.*, 1979) a permis de réaliser des calculs de potentiel sur la partie méridionale du fossé entre Bâle et Karlsruhe.

Il apparaît clairement que la partie nord de la zone d'étude, au-delà d'Erstein, constitue une zone favorable du point de vue de la ressource géothermique avec, dans une moindre mesure qui serait à préciser, les environs de Sélestat. Dans ces régions, le toit du Buntsandstein se situe aux alentours de 2 000 m de profondeur avec une température d'environ 150 °C et une épaisseur autour de 600 m. Le potentiel exploitable est estimé entre 25 GJ/m<sup>2</sup> et 30 GJ/m<sup>2</sup>, pouvant atteindre 40 GJ/m<sup>2</sup> dans l'extrême nord de la zone d'étude.

Sur l'ensemble de la zone étudiée de Bâle à Karlsruhe, le potentiel thermique exploitable du Buntsandstein en termes de géothermie serait de l'ordre de  $330.10^6$  TJ (10 500 GW.an<sub>th</sub>) pour une surface totale de 7 150 km<sup>2</sup>.



## 5. Étude détaillée d'une zone à fort potentiel géothermique

### 5.1. INTRODUCTION

Au sein du fossé, plusieurs anomalies thermiques ont été localisées à partir des cartes isothermes à différentes profondeurs (Genter *et al.*, 2004). En particulier, du côté français, les anomalies de Soultz, Strasbourg et Sélestat, du nord au sud. Dans le cadre de la présente étude, nous nous sommes intéressés à l'anomalie de Strasbourg, située au sud-ouest de l'agglomération (Figure 15). Cette anomalie constitue la seconde anomalie, après celle de Soultz, en termes de gradient de température. Elle est localisée sur la bordure ouest du fossé, proche de la faille rhénane et à la pointe sud du champ de fractures de Saverne (Figure 15). À l'échelle du fossé, les températures extrapolées à 1 500 m indiquent 100 °C, ce qui montre un gradient de 66 °C/km.

Cette zone a donc fait l'objet d'une étude particulièrement détaillée à partir de données de forages et de sismique afin de mettre en évidence la géométrie du réservoir argilo-gréseux du Buntsandstein, formation du Trias germanique inférieur, et ses caractéristiques géothermiques (température, débits...). À partir de la détermination de l'extension de cet aquifère et de ses propriétés pétrophysiques, nous avons pu alors estimer le potentiel géothermique de cette zone volontairement limitée.

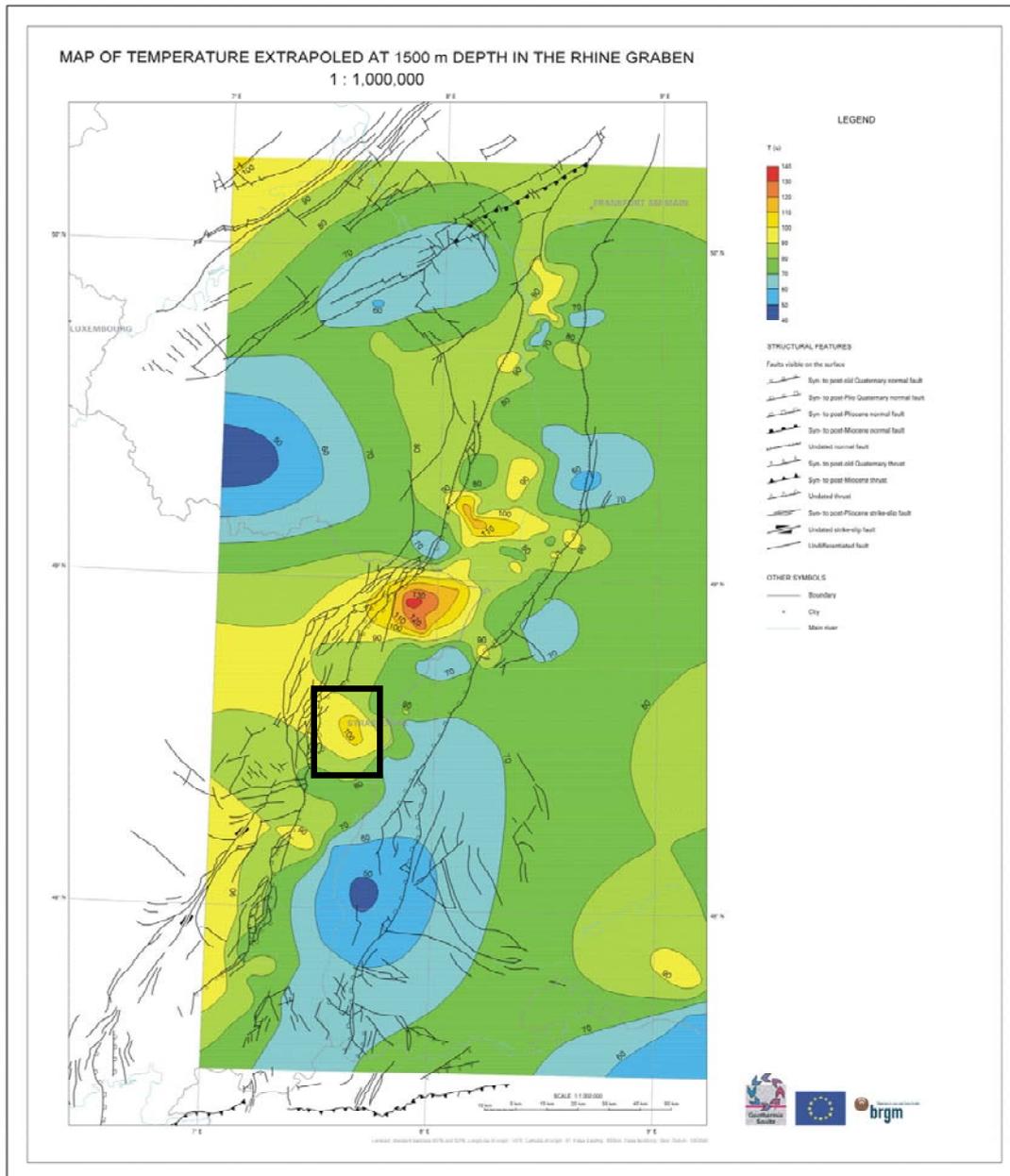


Figure 15 – Carte des températures extrapolées à 1 500 m d'après les données de GGA-Hannover (Genter et al., 2004) et localisation de la zone d'étude.

## 5.2. LOCALISATION DE LA ZONE ET DONNÉES DISPONIBLES

La zone d'étude s'étend entre Strasbourg au NE et Obernai au SW au niveau de la bordure ouest du Fossé rhénan supérieur et au nord du seuil d'Erstein (Figure 16). À l'ouest se situent les terrains triasiques et jurassiques de la pointe sud du champ de fractures de Saverne. Le remplissage quaternaire forme la partie superficielle de la zone d'étude avec principalement la présence de dépôts fluviatiles et de loess dans la partie nord-ouest.

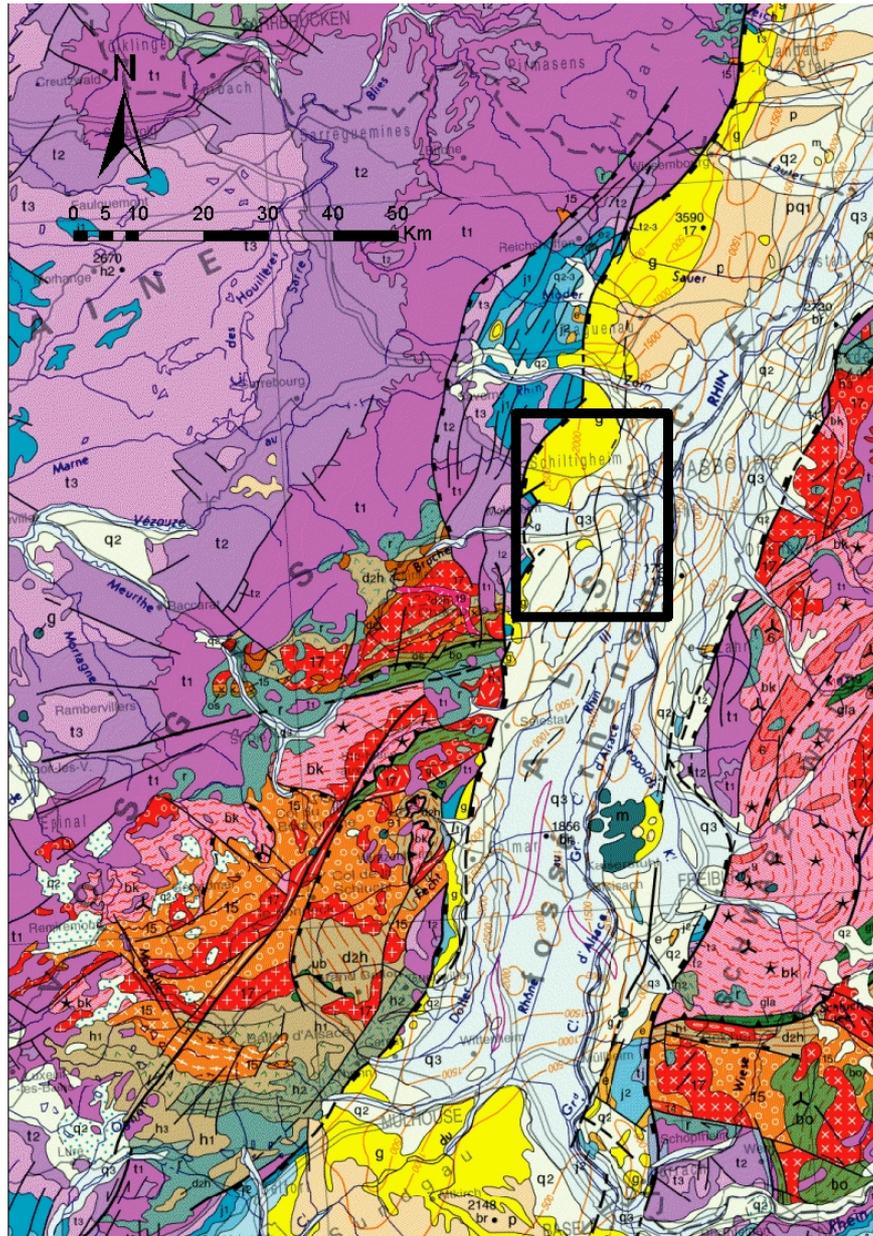


Figure 16 – Localisation de la zone d'étude (cadre noir) sur la carte géologique au million du BRGM.

Une sélection de 143 km de profil sismique réflexion parmi un très grand nombre de lignes existantes et parfois très anciennes a été acquise auprès des contracteurs (Tableau 3 ; Figure 17). Trois années de campagnes anciennes sont disponibles : 1975, 1985 et 1987. La plupart des profils ont été acquis dans le cadre de la recherche pétrolière, mais également pour de la prospection géothermique pour ce qui est du profil 75GE1. Ces données permettent d'obtenir sept coupes sismiques dont cinq sont transverses aux structures du fossé et deux longitudinales. Ces lignes ont été retraitées par des moyens modernes afin d'avoir une bonne image sismique et ont fait apparaître deux problèmes : 1) un problème de croisement des lignes 75GE1 et 85ST01 au nord-est de la zone qui n'a pu être résolu par le traitement (Figure 17) ; 2) un problème de récupération des données anciennes qui n'a pas permis de prolonger la ligne longitudinale 85ST01 vers le sud et de la faire recouper par la ligne perpendiculaire 87ADL1. Cette dernière se trouve alors isolée des autres profils et limite les corrélations 3D (Figure 17).

Nom de ligne	N° DIMAH	Opérateur	Contracteur	Début	Fin	Longueur (km)
75AC 2	11-0167AB	ERAP	CGG	10/10/1975	05/01/1976	12,842
75AC 4	11-0167AB	ERAP	CGG	10/10/1975	05/01/1976	13,047
75AC 6	11-0167AB	ERAP	CGG	10/10/1975	05/01/1976	14,535
75AC 8	11-0167AB	ERAP	CGG	10/10/1975	05/01/1976	11,799
75AC12	11-0167AB	ERAP	CGG	10/10/1975	05/01/1976	24,8
75GE 1	11-0168	ERAP	CGG	27/10/1975	07/11/1975	6,054
85 ST 01	11-0201	SNEA(P)	PRAKLA	12/11/1985	09/01/1986	22,224
85 ST 03	11-0201	SNEA(P)	PRAKLA	12/11/1985	09/01/1986	7,539
85 ST 05	11-0201	SNEA(P)	PRAKLA	12/11/1985	09/01/1986	9,495
87ADL1	11-0208	SNEA(P)	GECO	14/11/1987	22/01/1988	20,603
<b>TOTAL</b>						<b>142,938</b>

Tableau 3 – Caractéristiques des lignes sismiques utilisées dans cette étude.

Les conversions temps-profondeur des profils sismiques sont déterminées grâce à des mesures de vitesse sismique dans les puits ou carottages sismiques. Seulement cinq forages de la zone étudiée possèdent un carottage sismique et ont pu servir pour caler les coupes en profondeur. Cependant, trois de ces forages sont concentrés dans le sud de la zone, dont un distant de 2,5 km du profil sud 87ADL1 (Figure 17). Ce profil 87ADL1 ne pouvant être corrélé aux autres profils par manque de recoupement, les calages obtenus dans cette zone pourront difficilement s'appliquer à la zone plus au nord. Cette zone pourtant quadrillée par six coupes, ne pourra être calée en profondeur que par deux forages, dont un seul a atteint le Buntsandstein (Tableau 4 ; Figure 17).

Forages	N° BEPH	Indice BSS	Nom du forage	Prof. (m)	Niveau de base	Opérateur	Année
SCS101	11-1273	02725X0101	SCHAEFFERSHEIM 101	1 533,00	Buntsandstein	SNEA(P)	1989
LIP2	11-1266	02726X0105	LIPSHEIM 2	1 815,00	Buntsandstein	SNEA(P)	1986
ERS3	11-1243	02725X0067	ERSTEIN (SCHAEFFERSHEIM) 3	945,00	Dogger	SNEA(P)	1983
GBL1	11-1199	02725X0100	GRUNSBUHL 1	980,00	Bajocien	SNEA(P)	1979
BWG1	11-1198/A	02726X0059	BINNENWEG 1	1 822,00	Buntsandstein	SNPA	1980
MEI2	11-1190	02725X0043	MEISTRATZHEIM 2	1 708,40	Socle granitique	SHELL REX	1974

ESC11	11-1113	02723X0011	ESCHAU 11	918,40	Grande oolithe	PREPA	1958
GT	11-1111	02721X0008	HOLTZHEIM 1	1938,70	Bajocien inf.	PREPA	1958
LIP1	11-1088	02726X0001	LIPSHEIM 1	987,00	Grande oolithe	PREPA	1957
KRA1	11-1035	03082X0027	KRAFFT 1	1409,80	Muschelkalk	PREPA	1955
ESC1	11-1032	02727X0007	ESCHAU 1	1618,80	Buntsandstein	PREPA	1955
DP30		02721X0016	ENTZHEIM	2017,70	Dogger	MDPA	1953
S4152		02345X0104	KLEINFRANKENHEIM	1230,00	Aalénien inf.	SAEM	1941

Tableau 4 – Caractéristiques des forages étudiés. Grisé : forages possédant des carottages sismiques.

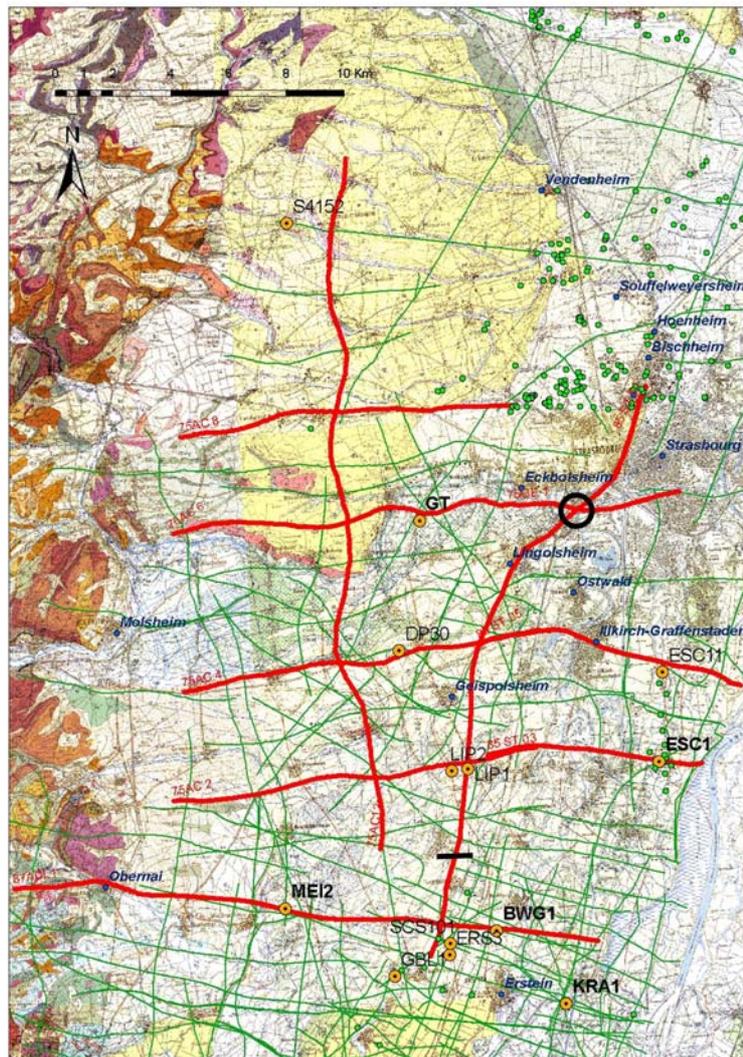


Figure 17 – Positionnement des profils sismiques (lignes rouges) et des forages (cercle orange) étudiés.

En gras, les forages possédant un carottage sismique. Lignes vertes : lignes sismiques existantes. Points verts : ouvrages présents dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS) mais non intégrés à l'étude. Points bleus : principales agglomérations. Cercle noir : problème de croisement des profils. Trait noir : limite sud du profil retraité.

En tout, 13 forages profonds viennent compléter l'étude. Ils atteignent au minimum le Jurassique et cinq ont atteint le Buntsandstein, c'est-à-dire les grès du Trias inférieur. Un seul a atteint le socle sous-jacent, le forage de Meistratzheim 2, et possède en plus un carottage sismique très utile pour le calage temps-profondeur des profils sismiques. Il constituera notre forage de référence (Tableau 4). Cependant, ce forage est situé sur le profil sud 87ADL1 qui n'est pas raccordé aux profils plus au nord (Figure 17).

### 5.3. TEMPÉRATURES ET DÉBITS

Lors d'une précédente compilation géothermique, les données des forages pétroliers de l'Alsace concernant la température, le débit et la salinité du fluide ont été rassemblées (Vernoux et Lambert, 1993). Ces données ont été reprises pour notre zone d'étude, mais seulement huit forages (sur 13 forages dans la zone) possèdent des données d'après cette étude (Tableau 5).

Les données de température proviennent de différents types de mesure. Les valeurs par extrapolation (EXT) ont été obtenues suivant un diagramme de Horner (Maget, 1984) et sont jugées très fiables. Les mesures obtenues lors de tests DST (Drill Stem Test) ainsi que les mesures BTH (Bottom Hole Temperature) corrigées par le BGR sont également jugées fiables. Ces trois catégories de mesures ont été conservées comme telles (Tableau 5). Enfin, les mesures BTH brutes sont des mesures de fond de forage réalisées à l'avancement ou juste après la complétion et avant que l'équilibre thermique de la roche ne soit établi après l'arrêt de la circulation de la boue. Ces mesures ont une fiabilité variable. Cependant ces données ont pu être corrigées soit par une méthode statistique (AAPG, Bodner et Sharp, 1988), soit par une méthode analytique (ICS, Goutorbe *et al.*, 2007).

Les valeurs brutes sont comprises entre 47 et 133 °C suivant la profondeur des mesures et les gradients géothermiques déduits de ces mesures varient entre 42 et 66 °C/km avec une moyenne de 52 °C/km (Figure 18). Cette valeur est deux fois plus élevée que celle connue dans le Bassin parisien.

Forage	Indice	Profondeur (m)	Temp. (°C)	Type de mesure	Temp. corrigée	Type de correction	Débit (l/min)	Type de test	Nature du fluide	Salinité (g/l)	
SCS101	02725X0101	1517							EAU	20	
		1533					333.33	PERTE	BOUE		
LIP2	02726X0105	966	63	BHT	63.7	AAPG				35	
		968	54	BHT	54.7	AAPG					
		986						166.67	PERTE	BOUE	
		1019						58.33	PERTE	BOUE	
		1497	85	BHT	86.7	AAPG					35
		1661	98	BHT	100.1	AAPG					55
		1733	96		98.3	AAPG					
		1739	92		94.3	AAPG					
		1743	89	BHT	102.9	ICS					
		1747	87		89.3	AAPG					
		1760	98	EXT	98.0	EXT					
1764	92	BHT	94.4	AAPG							
1780							41.67	PERTE	BOUE		
ERS3	02725X0067	792	47	BHT	47.5	AAPG					
		840	50	BHT	50.6	AAPG					
		848						8.33	PROD	GAZ	
		869	51	BHT	51.6	AAPG					140
		871						0.36	DST	BOUE+GAZ	70
944	55	BHT	55.7	AAPG							
GBL1	02725X0100	899					0.29	DST	BOUE	8.4	
		929					3.46	DST	EAU SALEE	227	
MEI2	02725X0043	684					10.16	DST	EAU SALEE+BOUE	90	
		709	66.3	BHTCB	66.3	BHTCB					
		1087	80.5	BHTCB	80.5	BHTCB					
		1413	82	DST	82.0	DST	101.39	DST	EAU SALEE	20	
		1437	82	BHT	83.6	AAPG					
1700	102.7	BHTCB	102.7	BHTCB							
ESC11	02723X0011	918	59	BHT	59.7	AAPG					
GT	02721X0008	1939	133.3	BHTCB	133.3	BHTCB					
LIP1	02726X0001	985					3.89	DST(OH2)	EAU SALEE+BOUE	77	
		988	60	BHT	60.8	AAPG					
KRA1	03082X0027	897					65.56	DST(OH2)	EAU SALEE	106.3	
		1286					0.4	DST(OH2)	BOUE		
		1360	67	BHT	68.4	AAPG				62.1	
ESC1	02727X0007	383					16.77	DST(OH)	EAU SALEE+BOUE	70	
		969	59.9	BHTC	59.9	BHTC					
		1316	71	DST	71.0	DST		DST(OH2)			
		1387	94	DST	94.0	DST	85.91	DST(OH2)	EAU SALEE	80	
		1401	94	DST	94.0	DST	47.5	DST(OH2)	EAU SALEE+BOUE	70	
		1425	94	DST	94.0	DST	220	DST(OH2)	EAU SALEE	70	
		1456	95	DST	95.0	DST	37.33	DST(OH2)	EAU SALEE		
		1543	95	DST	95.0	DST	0.53	DST(OH2)	BOUE		
		1588	96	DST	96.0	DST	156.43	DST(OH2)	EAU SALEE+BOUE+GAZ	70	
1619	117.3	BHTC	117.3	BHTC							

Tableau 5 – Données thermiques et de débitmétrie dans les puits de la zone étudiée.

BHT : Bottom Hole Temperature (fiabilité faible). EXT : Extrapolée. DST : Drill Stem Test. BHTC : BHT corrigé, BHTCB BHT corrigé par le BGR (fiabilités correctes). AAPG : méthode de correction statistique adoptée par l'AAPG en 1976. ICS : Instant Cylinder Source. PERTE : perte de boue (fiabilité forte). PROD : test de production (fiabilité forte). DST(OH2) : Drill Stem Test dans Open Hole avec 2 packers (fiabilité correcte).

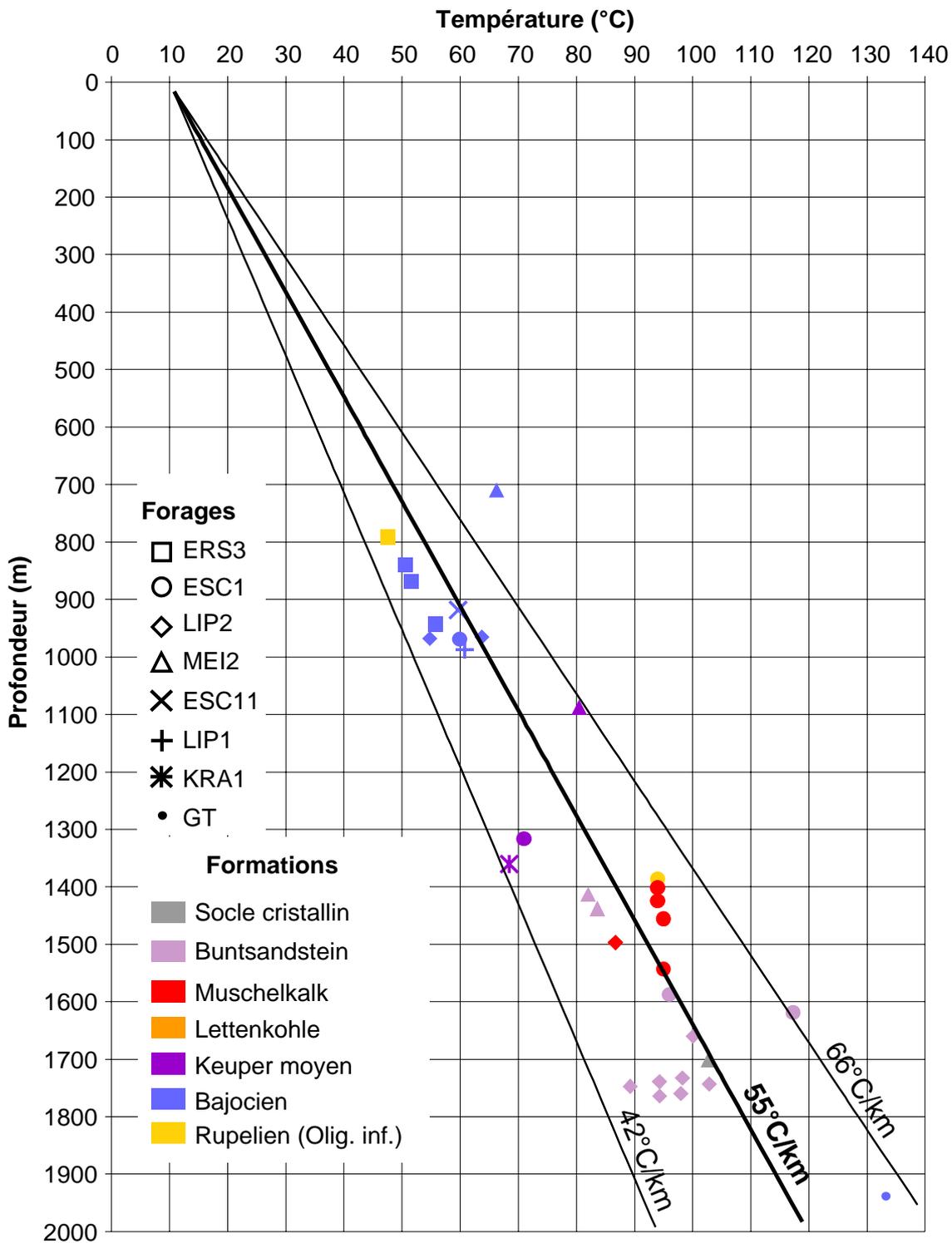


Figure 18 – Valeurs de températures corrigées mesurées dans les forages et gradients géothermiques déduits.

Les données de débit dans les forages montrent des valeurs inférieures à 100 l/mn (6 m<sup>3</sup>/h) dans les réservoirs calcaires de la Grande Oolithe (Bajocien supérieur) et du Muschelkalk (Figure 19). Le débit le plus important se situe dans le réservoir clastique du Buntsandstein avec une valeur de 300 l/mn (20 m<sup>3</sup>/h) mesurée lors de perte de boue dans le forage de Schaeffersheim (SCS101). Ces valeurs de débit sont insuffisantes pour une exploitation géothermique ayant pour objectif de chauffer des grands immeubles, alors que dans le Bassin de Paris, les forages géothermiques ont des débits d'exploitation entre 100 m<sup>3</sup>/h et 200 m<sup>3</sup>/h. Cependant, les mesures que nous avons dans ces forages d'Alsace ne sont pas réalisées dans une perspective d'exploitation géothermique. De plus, nous ne connaissons pas la complétion précise de ces puits (souvent en petit diamètre), ni leur état (présence de boue sur les parois, type de boue,...) lorsque la mesure de débit a été faite. Par expérience, le débit mesuré dans les forages pétroliers est beaucoup plus faible que le débit réel qui peut être extrait d'un forage géothermique. Dans notre zone d'étude, au niveau du Buntsandstein, les débits varient entre 42 l/mn (2,5 m<sup>3</sup>/h) et 300 l/mn (20 m<sup>3</sup>/h). Cette différence importante est probablement due à la présence de fractures, ce qui implique de fortes variations locales dans les débits du fluide géothermique. Il apparaît donc qu'une meilleure connaissance géologique (localisation des failles, nature de leur remplissage,...) de ce réservoir permettrait d'améliorer la position des forages et donc les débits de production. Par exemple, en Allemagne, plusieurs projets dans le réservoir du Buntsandstein ont démarré à Bruchsal et Speyer, où les débits attendus sont respectivement de 75 m<sup>3</sup>/h et 90 m<sup>3</sup>/h (Baumgaertner *et al.*, 2006). Dans le cadre du nouveau projet géothermique de Landau, la cible est une zone de faille perméable recoupant à la fois le Muschelkalk, le Buntsandstein et le toit du socle granitique. Ce type de réservoir fracturé partiellement perméable a été stimulé par injection hydraulique afin d'obtenir un débit suffisant pour l'exploitation géothermique (250 m<sup>3</sup>/h attendu, Baumgaertner *et al.*, 2006). Une centrale fonctionnant avec un système binaire à l'isobutane sera inaugurée le 21 novembre 2007. Les températures mesurées dans les deux puits GtLa1 et GtLa 2 sont entre 150 °C et 155 °C. La production électrique de cette centrale sera de l'ordre de 3 MW<sub>e</sub> avec une production de chaleur.

La salinité du fluide géothermique est également un paramètre important à prendre en compte lors de l'exploration géothermique. Elle peut être responsable de la corrosion des tubages des forages lors de l'exploitation. Dans notre secteur, la salinité est très variable dans le réservoir de la Grande Oolithe, en moyenne entre 30 g/l et 140 g/l, avec des valeurs extrêmes de 8 g/l et 227 g/l dans le forage de Grunsbuhl-1 (GBL1, Figure 20). La salinité du fluide dans les réservoirs triasiques est modérée avec des valeurs entre 20g/l et 80g/l (Figure 20). À Soultz-sous-Forêts, dans les puits du site expérimental de géothermie profonde EGS, la salinité des eaux provenant du Buntsandstein est supérieure à 100 g/l (Pauwels *et al.*, 1993) et à Bruchsal, elle est de 130 g/l (Baumgaertner *et al.*, 2006).

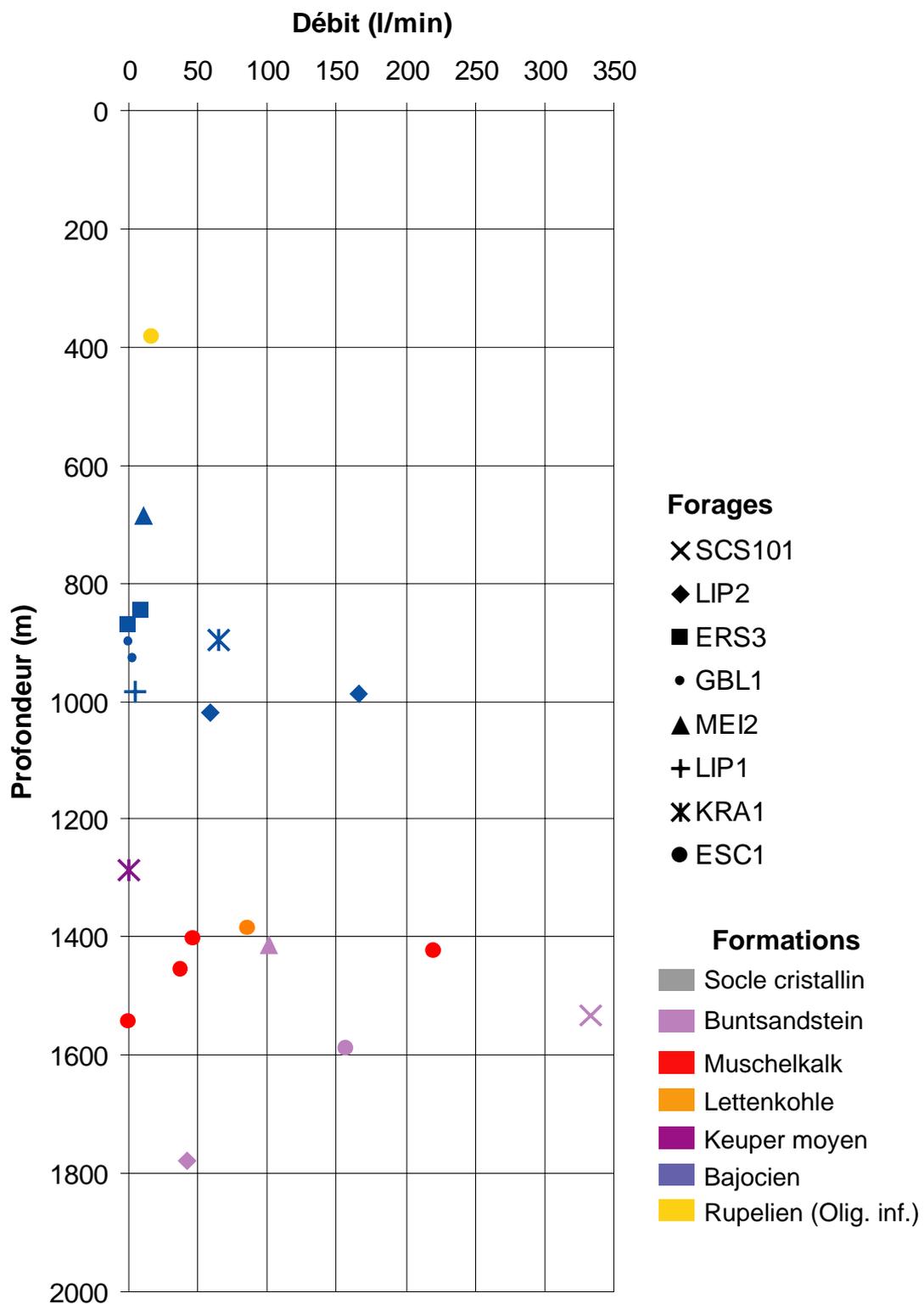


Figure 19 – Valeurs de débit dans les anciens puits pétroliers de la zone.

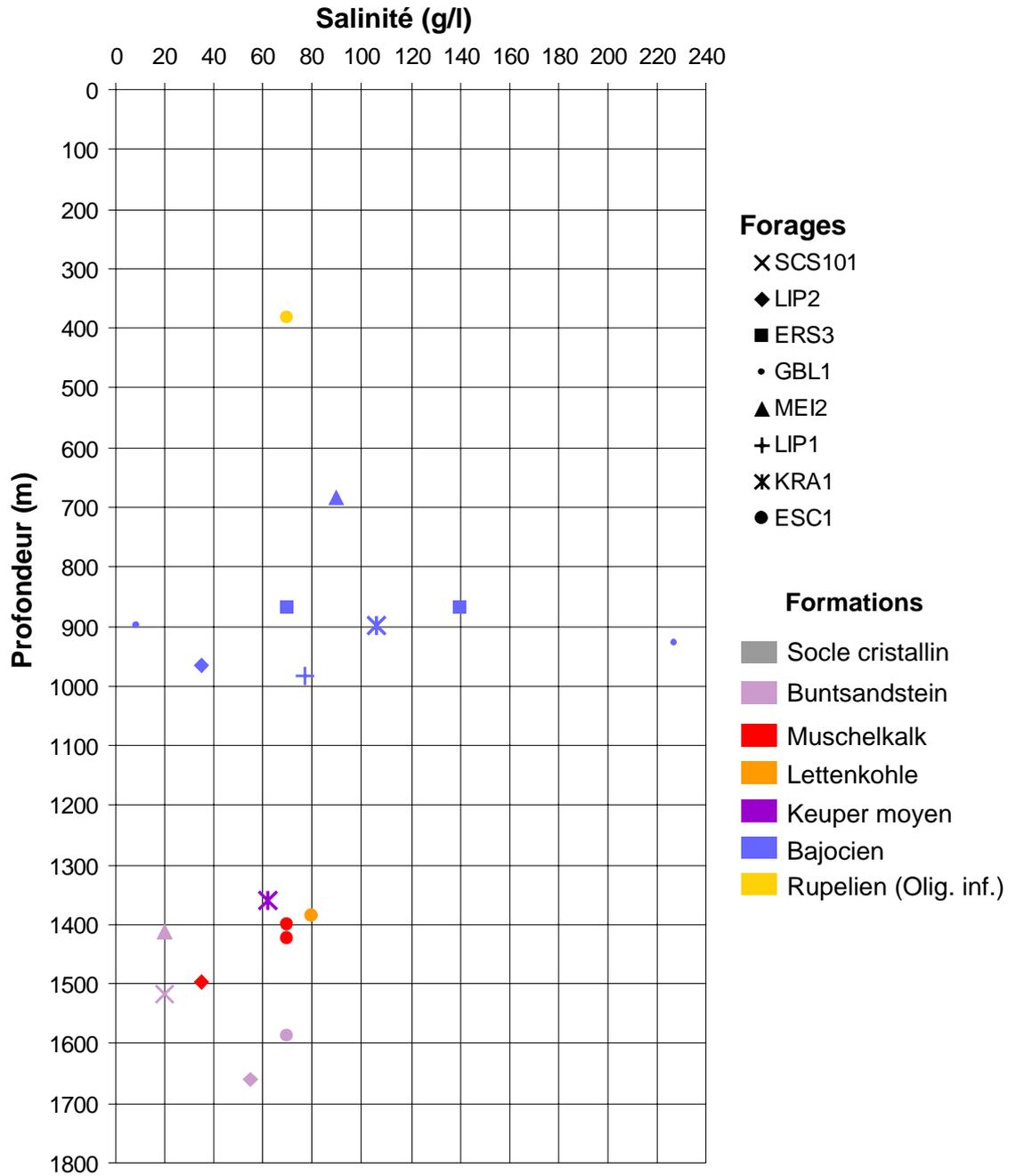


Figure 20 – Salinité des fluides dans les anciens puits pétroliers de la zone.

## 5.4. STRUCTURES GÉOLOGIQUES

### 5.4.1. Logs géologiques des forages

Les logs géologiques validés provenant de la Banque de données du Sous-Sol (BSS) montrent des épaisseurs de Tertiaire aux alentours de 800 m mais pouvant varier de 500 m (MEI2) à 1 800 m (DP30 et GT) (Figure 21). Ces variations sont liées au découpage en horst et graben de la bordure du fossé. Ainsi, les coupes transversales au fossé montrent des alternances d'épaisseur variable d'ouest en est suivant le compartiment dans lequel se situe le forage (Figure 22). La coupe (a) montre une différence de près de 1 000 m de la base du Tertiaire entre le forage DP30 à l'ouest et ESC11 à l'est (Figure 22). Le rejet de ou des failles séparant ces deux forages est donc très important et antithétique à la faille bordière. La coupe (b) montre en revanche très peu de variation entre les forages LIP1 et LIP2 à l'ouest et ESC1 à l'est (Figure 22). Le rejet des failles apparaît donc se compenser entre ces forages. Au niveau de la coupe (c), de nombreux forages sont alignés d'ouest en est et montrent des alternances de variations d'épaisseur de dépôt qui indiquent une série de horsts et grabens assez étroits (Figure 22). La coupe longitudinale (d) montre que les épaisseurs de dépôt les plus importantes sont situées au centre de la zone d'étude (Figure 22).

L'épaisseur du Jurassique est d'environ 350 m et varie légèrement dans le secteur ( $\pm 50$  m).

Le Muschelkalk possède une épaisseur en moyenne de 180 m avec de faibles variations ( $\pm 10$  m).

Quant au Buntsandstein, un seul forage l'a recoupé complètement et montre une épaisseur de 335 m.

Plusieurs failles sont mentionnées sur les descriptions lithologiques des forages (Figure 21 et Figure 22). Certaines apparaissent même comme des failles majeures avec des niveaux bréchiques sur plusieurs mètres (ex. : Eschau 1). La plupart de ces failles sont intra-Tertiaire ou mettent en contact le Tertiaire et le Jurassique.

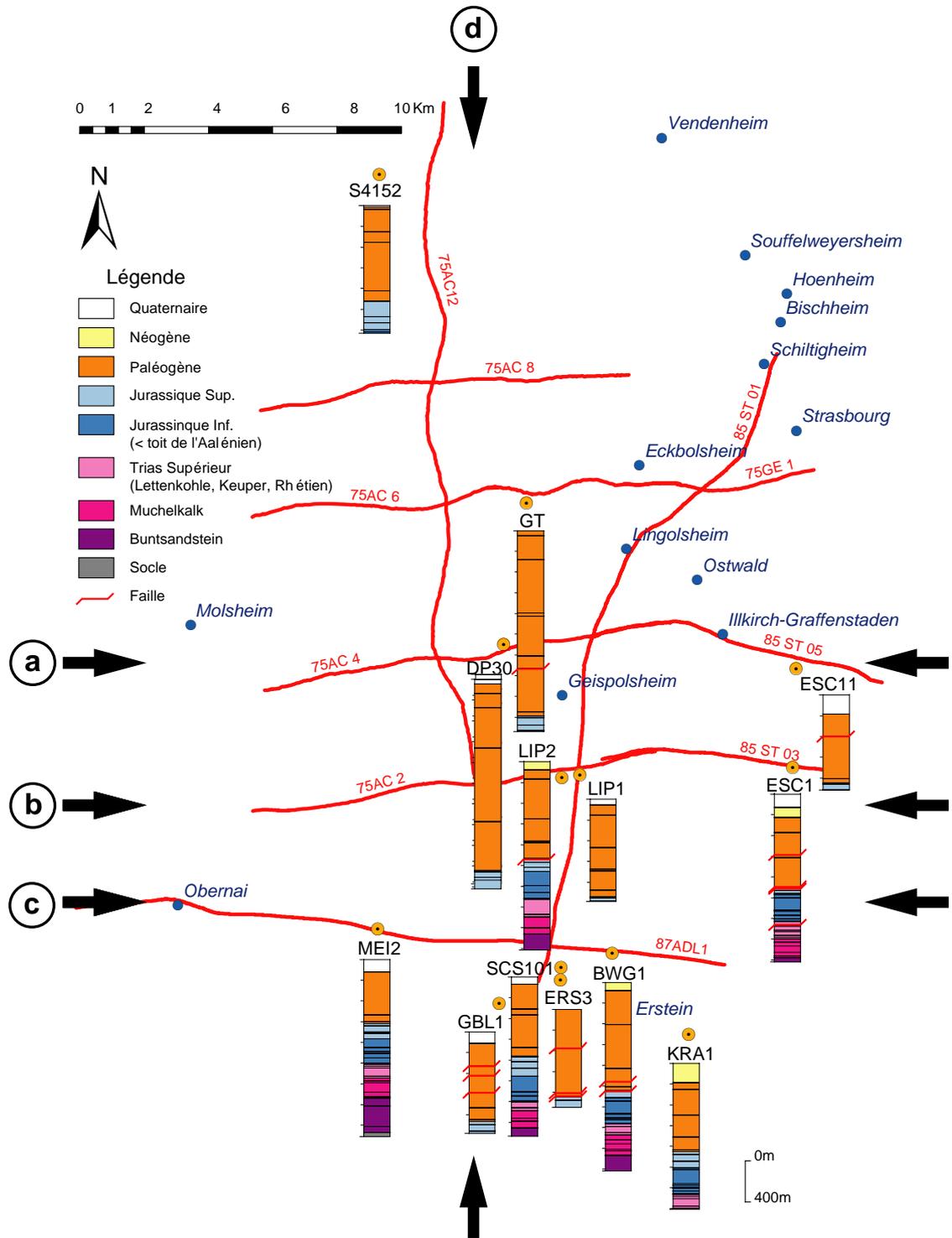


Figure 21 – Logs géologiques simplifiés dans les différents forages positionnés en carte par rapport aux profils sismiques. Les flèches noires indiquent la position des coupes projetées de la Figure 22.

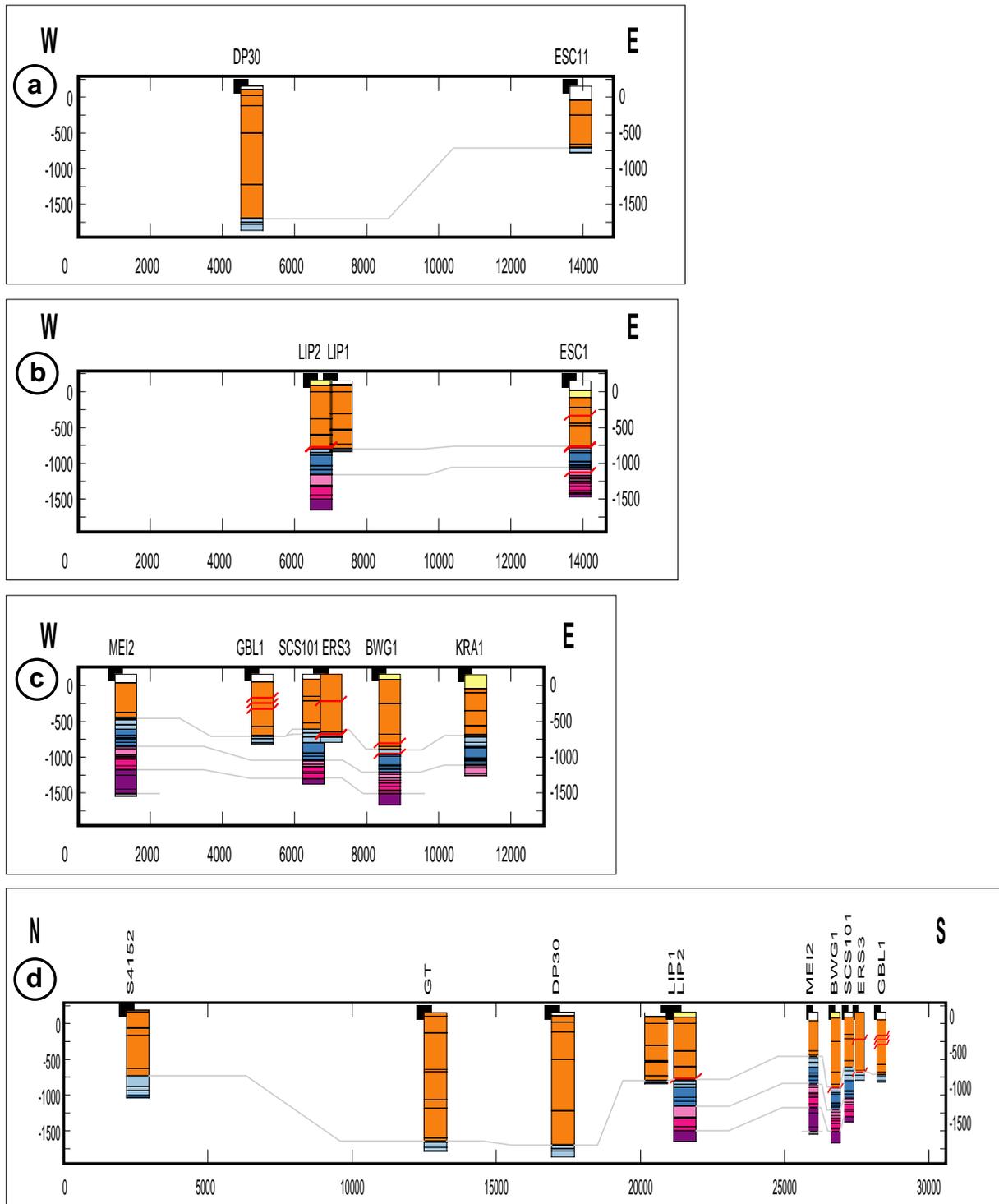


Figure 22 – Coupes projetées des forages.  
Positionnement des coupes et légende : cf. Figure 21.

### 5.4.2. Analyse des coupes sismiques

L'interprétation des lignes sismiques migrées a consisté au pointé des horizons sismiques remarquables définis par les interfaces en forages ou les discordances (Figure 23).

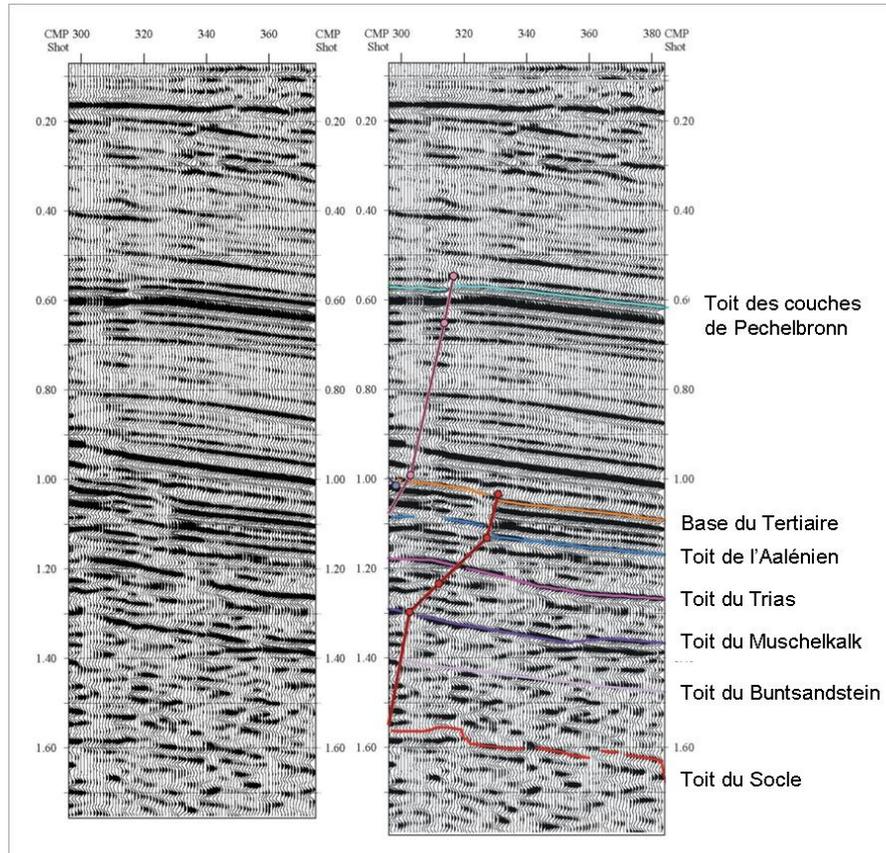


Figure 23 – Sections sismiques migrées brute (à gauche) et interprétée (à droite).

Les limites stratigraphiques sont les suivantes :

- toit des Couches de Pechelbronn, Éocène supérieur (base des sédiments purement marins du Rupélien), limite intra-Tertiaire qui correspond à un réflecteur de forte amplitude, continu, lisse. Cet excellent marqueur est visible sur l'ensemble du fossé ;
- base du Tertiaire (toit érodé des sédiments jurassiques), qui est souvent une discordance. Il s'agit d'un réflecteur de forte amplitude et haute fréquence ;
- toit de l'Aalénien (transition calcaires / grès marneux), qui correspondrait à la base du triplet de réflecteurs de fortes amplitudes et hautes fréquences, concordants et continus ;

- toit du Trias (transition calcaires / marnes), correspondant à un réflecteur de forte amplitude et basse fréquence, sur lequel repose en *onlap* l'unité sus-jacente ;
- toit du Muschelkalk (transition calcaires marneux / calcaires massifs), correspondant à un réflecteur de forte amplitude et basse fréquence, souvent discontinu ;
- toit du Buntsandstein (transition calcaires massifs / grès), réflecteur de faible amplitude, basse fréquence et discontinu ;
- toit du socle, correspondant à un réflecteur de forte amplitude et de basse fréquence. C'est le dernier réflecteur visible. Au-delà, le faciès est sismiquement sourd.

Le calage des horizons sismiques aux limites des formations géologiques a été effectué à l'aide des forages localisés sur les lignes sismiques. Les forages possédant une loi de vitesse ont permis la transformation temps/profondeur des interfaces pointées. Les informations dérivées des autres forages (profondeur des limites géologiques) ont également été utilisées afin de contraindre la position des interfaces.

La sismique terrestre utilisée a une résolution limitée. L'épaisseur du signal est d'environ 10 ms, ce qui représente, pour une vitesse de propagation égale à 2 000 m/s, environ 20 m. Donc, toutes les formations ou rejets de failles inférieurs à 20 m ne sont pas observables avec ces données.

La transformation temps/profondeur des horizons sismiques est fonction des lois de vitesse choisies. Les correspondances temps/profondeurs sont données via cinq forages (BINNENWEG 1 ; MEISTRATZHEIM 2 ; HOLTZHEIM 1 ; KRAFFT 1 ; ESCHAU 1). Au vu de la complexité du schéma structural, plusieurs logs de vitesse hypothétiques ont été intégrés pour homogénéiser la grille de vitesse.

Les failles ont également été pointées le long des profils. Il s'agit de failles normales fortement inclinées comportant des rejets apparents plus ou moins importants allant de 0,001 à 0,4 seconde temps double pour la base du Tertiaire. La vergence de ces failles s'inverse fréquemment, structurant la zone en une série de horsts et grabens.

### 5.4.3. Coupes géologiques et modèles 3D

Afin d'interpréter le pointé des lignes sismiques, nous avons réalisé un modèle géologique 3D d'un domaine de 30 km x 33 km x 7 km en X, Y et Z avec le Geomodeller développé au BRGM qui permet de modéliser les objets géologiques en profondeur. Le but est d'interpréter les différentes failles présentes sur les profils et de les corrélérer entre elles afin de pouvoir interpoler les interfaces lithologiques entre les blocs ainsi délimités. Ce logiciel représente explicitement les failles par des surfaces limitées ou illimitées, tandis que les surfaces stratigraphiques sont interpolées utilisant une méthode de champ de potentiel par cokrigage (Lajaunie *et al.*, 1997). Cette méthode prend en compte simultanément la localisation de l'interface, son orientation et l'influence que peuvent avoir les failles.

La construction du modèle géologique s'est faite à partir des pointés des interfaces lithologiques transformées en profondeur grâce aux lois de vitesse et exportés à partir des interprétations sismiques. Ces interfaces ont été digitalisées, ainsi que les failles qui correspondent à des interruptions d'interfaces, dans les coupes correspondant aux coupes sismiques analysées (Figure 24). Les interfaces sont toutes en superposition, aucune intersection n'ayant été observée sur les coupes sismiques (Figure 25).

Dans la partie nord du secteur modélisé, où les six profils s'intersectent pour former un quadrillage, les corrélations entre les failles sont assez bien contraintes, formant des structures en horst et graben ou en demi-graben (Figure 24). En revanche, au sud, la ligne sismique 87ADL1 montre une structuration différente avec un large graben dans la partie ouest et une série de nombreuses fractures fortement inclinées vers l'Est dans la partie est du profil (Figure 24).

La différence de schéma structural entre la partie nord et la partie sud de la zone d'étude peut s'expliquer par une zone de transfert transversale au graben du Rhin. À l'échelle du graben, deux zones de transfert sont présentes (Derer *et al.*, 2007) : l'une au nord au niveau de Darmstadt, l'autre au sud au niveau du seuil d'Erstein constituant probablement le prolongement de la faille varisque de Lalaye-Lubine (Villemin *et al.*, 1996 ; Schumacher, 2002). Ces zones de transfert subdivisent le graben en demi-graben à polarité inverse et dont les failles majeures se situent soit en bordure est, soit en bordure ouest du fossé (Figure 6).

Notre zone d'étude étant localisée dans le voisinage de la zone de transfert sud, l'évolution tectonique peut apparaître complexe. C'est probablement une des raisons pour laquelle la corrélation des failles entre les profils est compliquée. Il faut y ajouter le fait que le Geomodeller représente les failles comme des disques de rayon fini ou infini même si il prend en compte une chronologie du développement de ces failles. Cependant, il ne permet pas de faire arrêter une faille infinie ou d'une dimension supérieure sur une faille d'une dimension inférieure. La réalité géologique et les contraintes géométriques en 3D nous ont amené à faire des hypothèses simplificatrices sur la continuité des failles et la corrélation d'une coupe à l'autre.

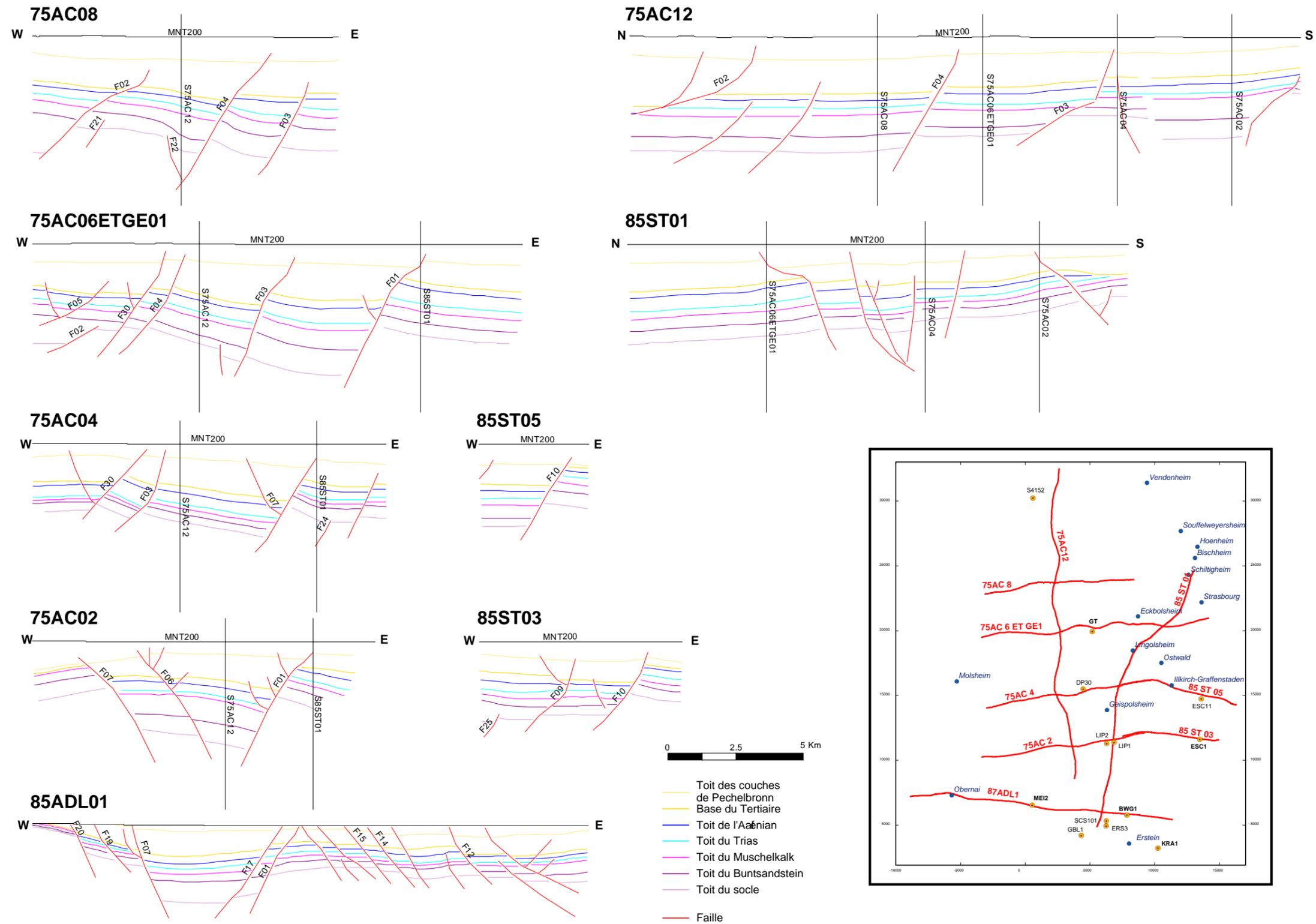


Figure 24 – Coupes géologiques interprétées à partir des profils sismiques et dessinées dans le Géomodelleur.

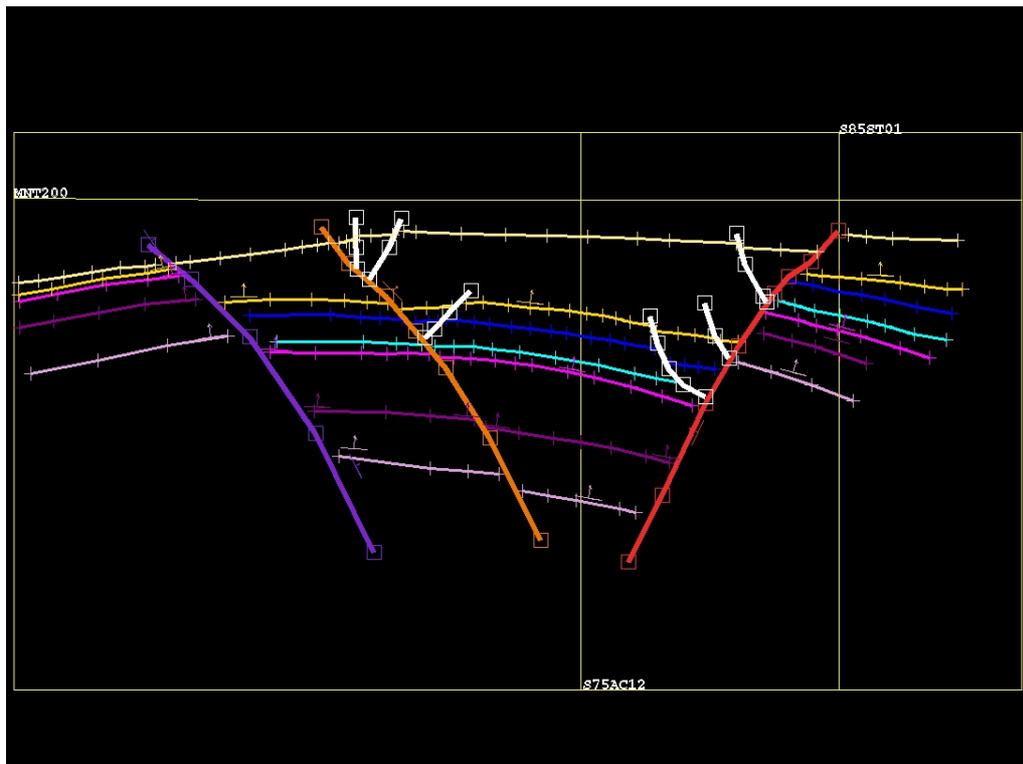
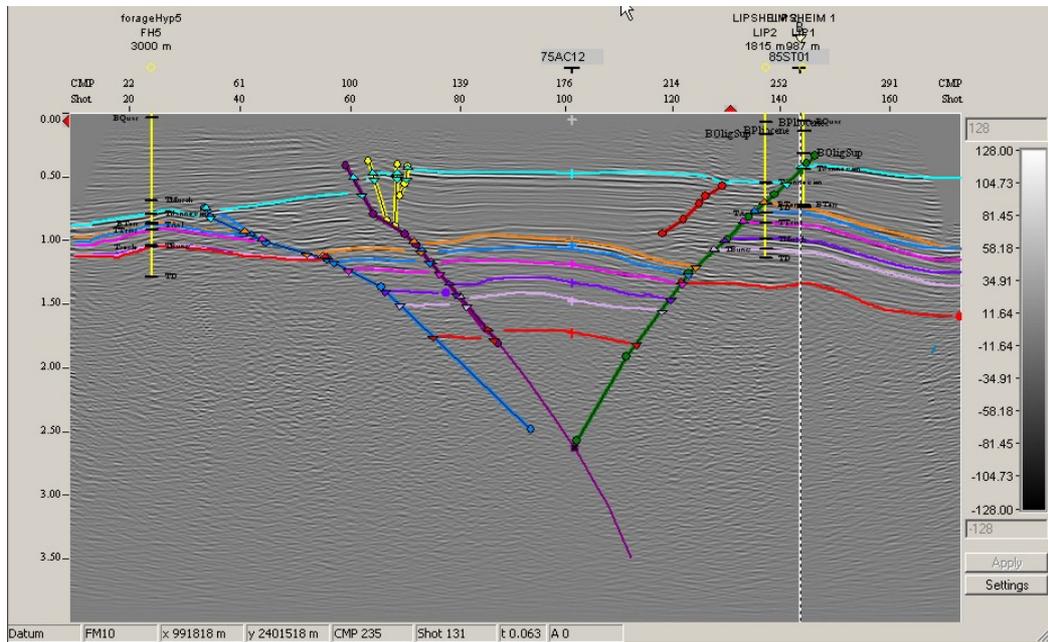


Figure 25 – Interprétation sismique de la coupe 75AC02 en temps (en haut) et importation (en bas) dans le Geomodeller des interfaces lithologiques converties en profondeur. Les couleurs des interfaces de la coupe en profondeur (en bas) correspondent à la légende de la Figure 24.

Différentes configurations de corrélation des failles ont ainsi été testées grâce au Modelleur 3D en tenant compte de leur position, leur direction de plongement et leur rejet. Une chronologie relative et une dimension de failles sont alors supposées afin de faire stopper certaines failles sur d'autres. Enfin, l'interpolation des surfaces représentant les interfaces stratigraphiques est réalisée entre les blocs délimités par les failles (Figure 26). Les configurations retenues sont alors celles qui conduisent à une distorsion minimum des interfaces modélisées intra-blocs. Ainsi, dans la configuration de la Figure 27, les failles présentes dans la partie sud-ouest du modèle montrent des amortissements de rejet très rapides impliquant de fortes distorsions de l'interface du toit du socle. En revanche, sur la configuration de la Figure 17, les rejets le long des failles sont réguliers, mais cela implique d'accepter la présence d'un sous-bassin intra-graben de direction NE-SW.

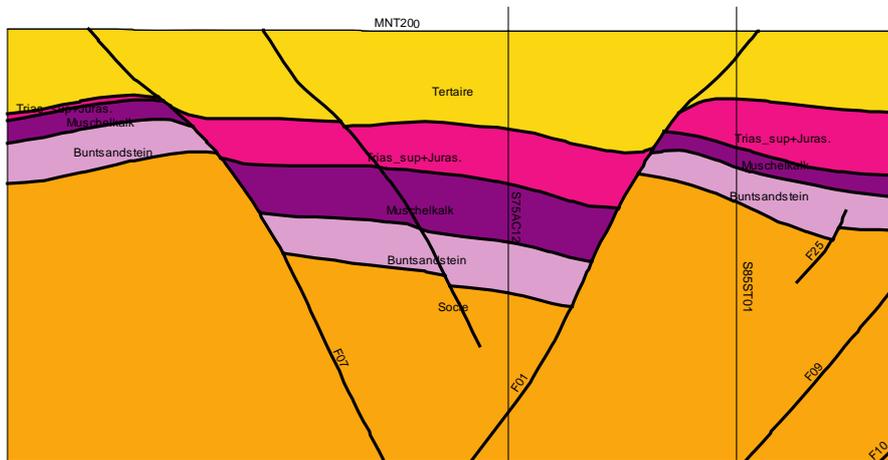


Figure 26 – Exemple d'interpolation de certains interfaces stratigraphiques et des failles sur la coupe 75AC02.

De toute façon, les modèles les plus probables montrent un réseau de faille orienté NNE-SSW (Figure 29 et Figure 30). Les niveaux anté-Tertiaires sont basculés vers le nord, comme dans le reste du fossé (Sittler, 1967 ; Munck *et al.*, 1979). Dans la partie sud du modèle, le socle est à environ 2 000 m de profondeur, tandis que dans la partie nord, sa profondeur varie entre 3 400 m et 4 000 m.

Une importante faille recoupe le modèle avec un rejet supérieur à 1 000 m. Cette faille est associée, dans la partie SE du modèle, à une autre faille importante dont le rejet est d'environ 1 000 m, formant une structure de sous-graben d'orientation NE-SW. Dans la partie la plus profonde de ce graben, le socle se situe à 3 800 m de profondeur.

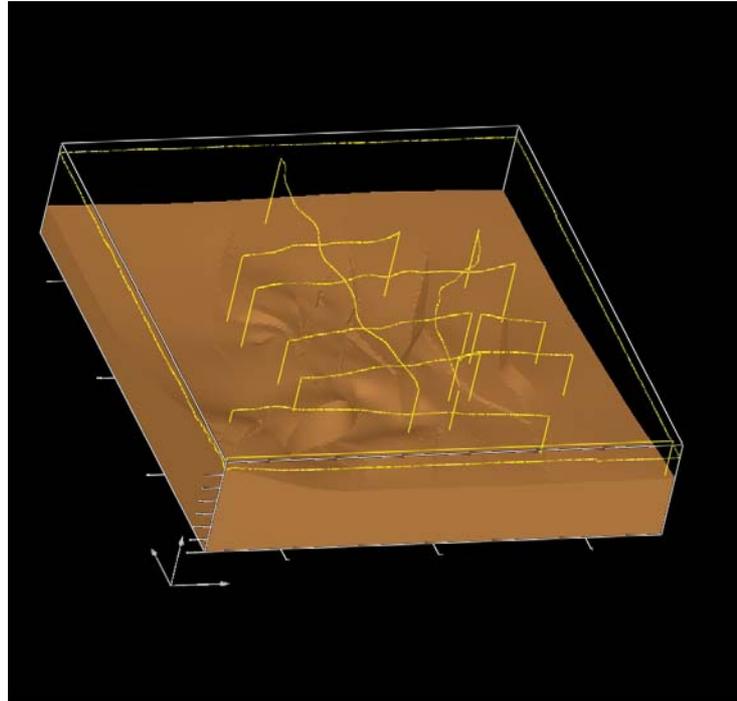


Figure 27 – Vue vers le NE du modèle 3D montrant une distorsion de l'interface du toit du socle au niveau d'une faille, dans le coin SW, à fort rejet qui s'amortit très rapidement.

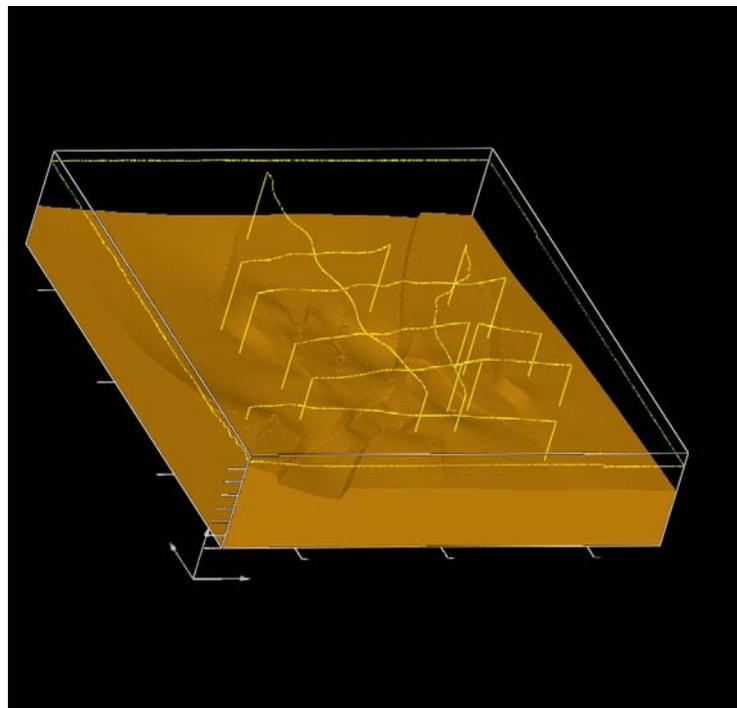


Figure 28 – Vue vers le NE du modèle 3D montrant un sous-bassin intra-graben de direction NE-SW.

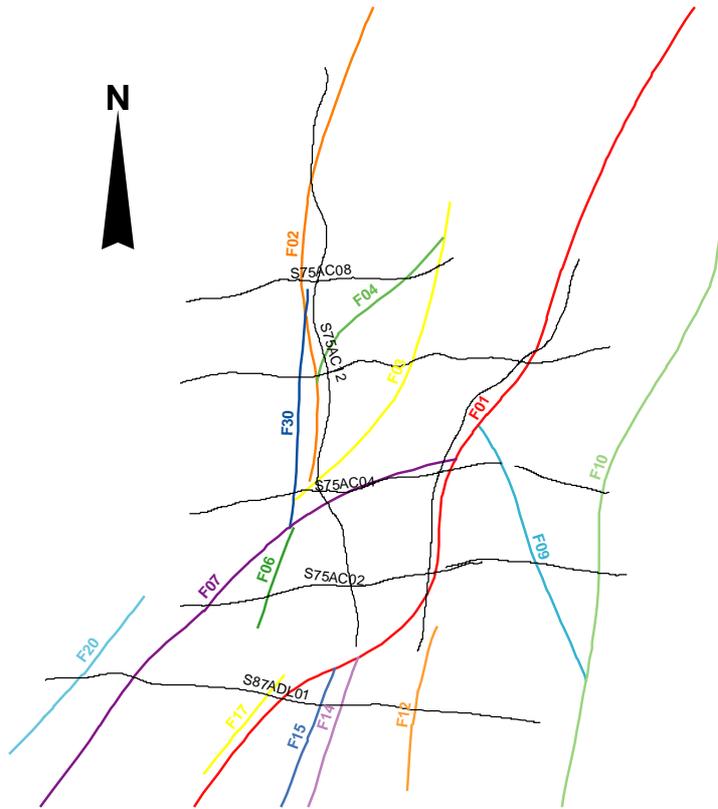


Figure 29 – Projection en surface des failles modélisées (cf. Figure 28) atteignant le Tertiaire.

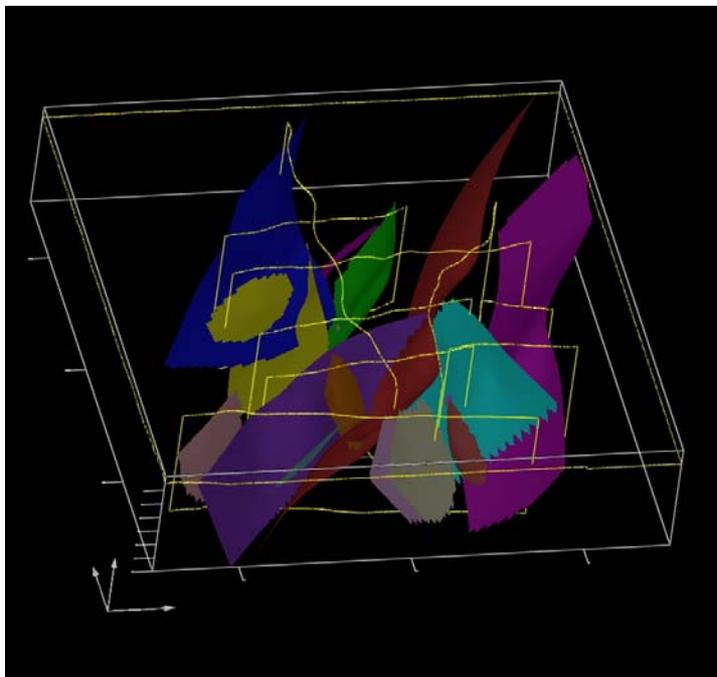


Figure 30 – Vue en 3D du réseau de failles du modèle présenté en Figure 28.

## 5.5. RÉSERVOIR GÉOTHERMIQUE DU BUNTSANDSTEIN

À partir du modèle 3D de notre zone d'étude, nous avons pu extraire des grilles au pas de 200 m permettant de reconstituer des cartes d'iso-profondeur et d'iso-épaisseur du Buntsandstein (Figure 31 et Figure 32).

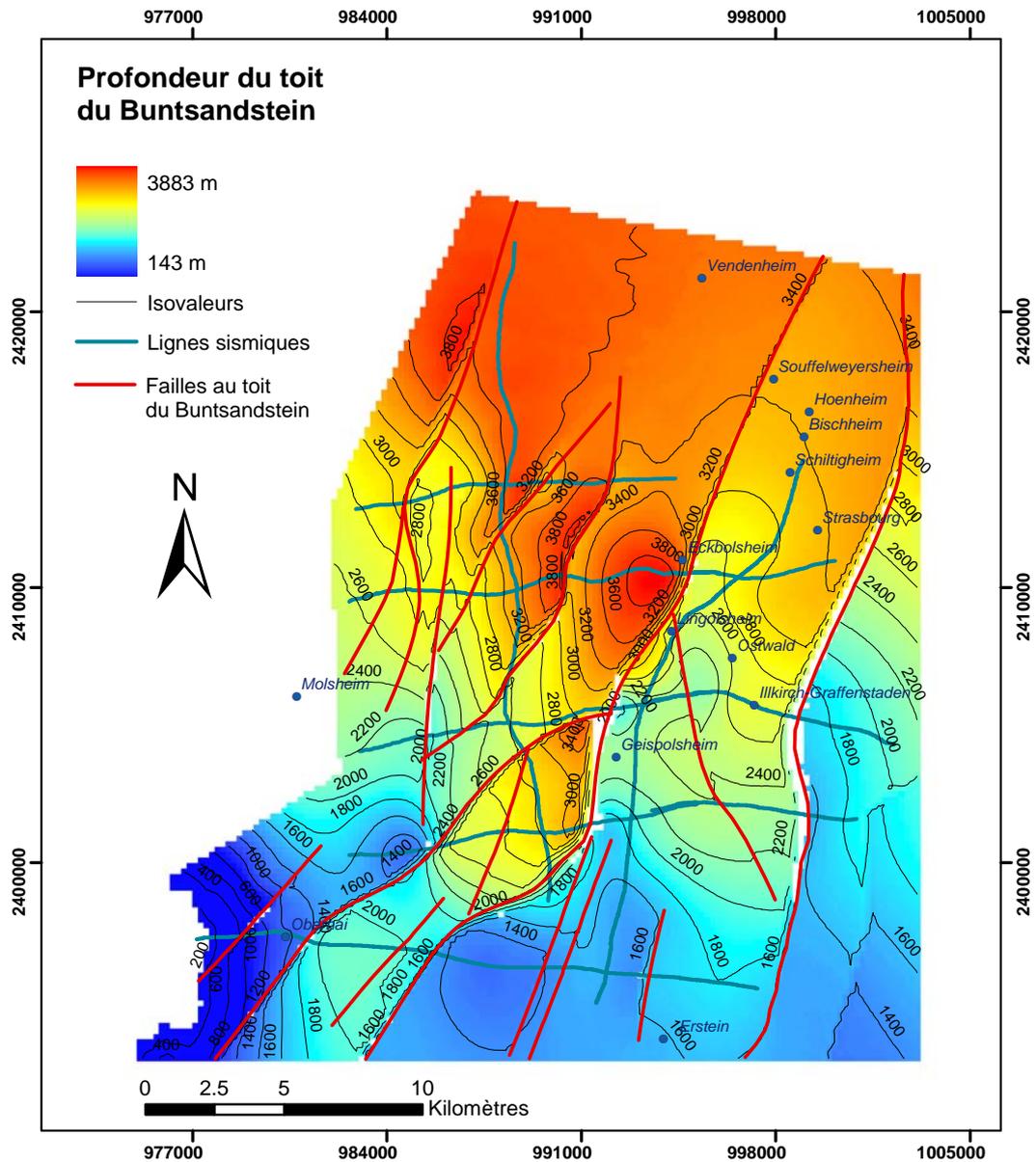


Figure 31 – Profondeur du toit du Buntsandstein à partir du modèle géologique 3D présenté Figure 28.

La carte du toit du Buntsandstein montre un approfondissement de la formation vers le nord, ce qui est la tendance générale sur tout le fossé (Figure 31). Dans la partie nord de la zone d'étude, le toit du Buntsandstein se situe entre 3 200 m et 3 700 m de profondeur et peut atteindre 3 880 m de profondeur à la base des blocs basculés, qui sont inclinés principalement vers l'est. Dans la partie sud, l'interface Buntsandstein-Muschelkalk remonte pour atteindre 1 000 m à 1 500 m de profondeur et même 200-300 m en bordure du massif des Vosges.

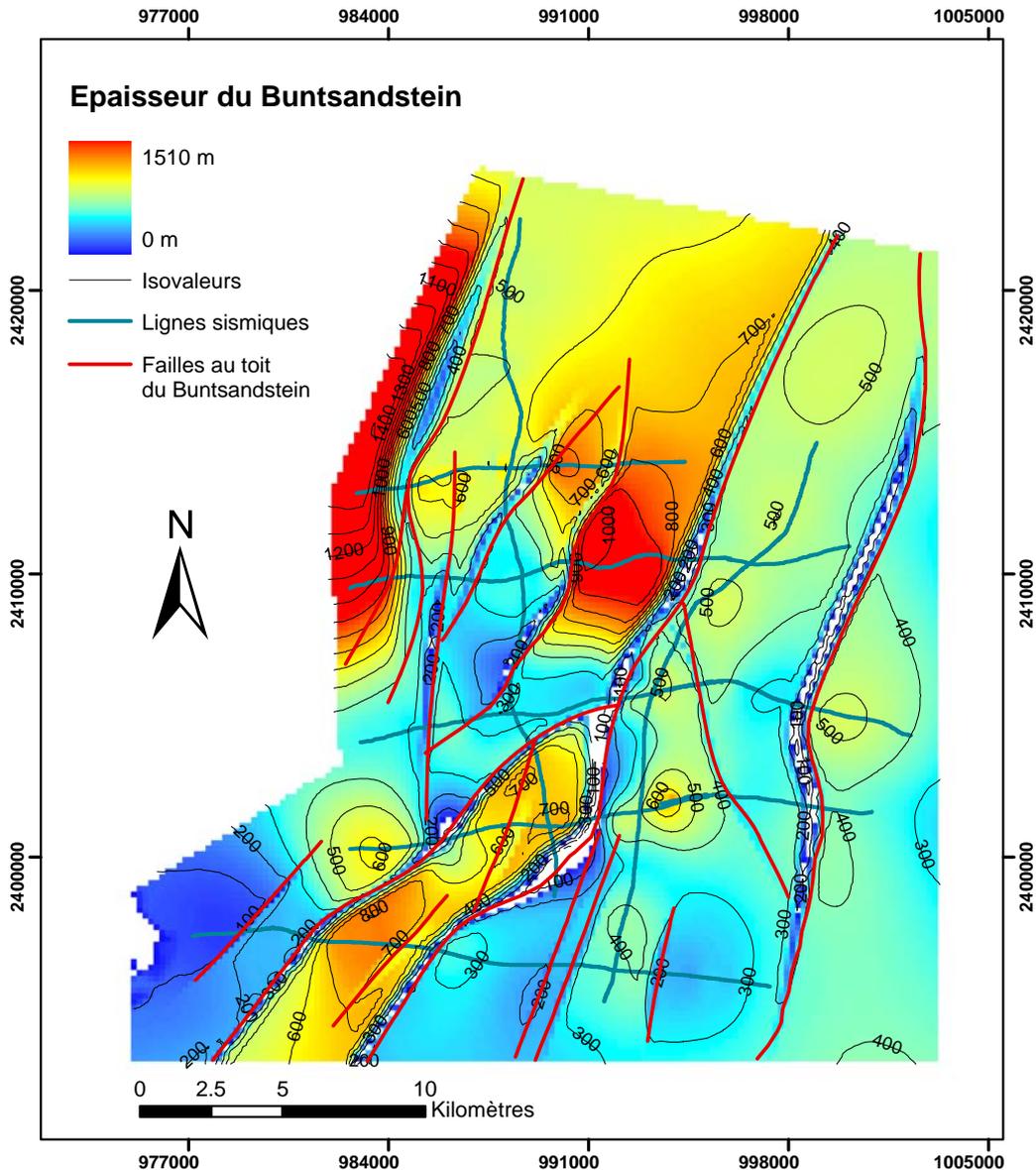


Figure 32 – Épaisseur du Buntsandstein à partir du modèle géologique 3D présenté Figure 28. Les isopaques apparaissent très perturbées en raison de la présence de failles à fort rejet.

L'épaisseur du Buntsandstein est en moyenne entre 300 m et 500 m (Figure 32). Au centre du sous-bassin et sur la bordure ouest, les épaisseurs atteignent 1 000 m. Cependant, il faut tenir compte du fait que cette formation identifiée en sismique semble inclure les grès permien de la formation Rotliegendes et qui ne sont pas facilement distinguables sur les profils sismiques.

Ces sédiments clastiques ne sont pas continus sur la totalité du fossé et apparaissent principalement dans l'est et le centre du graben. Ils peuvent atteindre des épaisseurs de 500 m au centre du fossé (Munck *et al.*, 1979). Ils sembleraient ici occuper des grabens orientés NE-SW à NNE-SSW. Ces grès constituent des réservoirs de gaz dans le Nord de l'Allemagne et pourraient constituer un réservoir géothermique potentiel s'ils étaient mieux reconnus au sein du Fossé rhénan.

À partir de la grille d'épaisseur du Buntsandstein, nous avons pu calculer le volume de la formation et ainsi estimer son potentiel géothermique pour la zone d'étude (Dezayes *et al.*, 2007). Pour cela, nous avons utilisé les deux modèles géologiques (Figure 27 et Figure 28) afin de comparer les deux interprétations en termes de volume et de potentiel géothermique.

Les paramètres pétrophysiques utilisés pour le calcul sont ceux des grès et nous avons considéré une température moyenne de 100 °C (Tableau 6).

Paramètres	Description	Unité	Valeur
$\rho$	Densité de la roche	Kg/m <sup>3</sup>	2 200
$C_p$	Capacité calorifique	J/Kg.K	710
V	Volume (surface x épaisseur)	m <sup>3</sup>	Variable
$T_i$	Température initiale moyenne de l'aquifère	°C	100
$T_f$	Température finale ou température en surface	°C	10
$T_R$	Température de réinjection	°C	25

Tableau 6 – Paramètres utilisés pour les calculs de potentiel géothermique dans la zone d'étude.

Dans le cas du modèle le plus réaliste, présentant un sous-bassin (Figure 28), le volume du Buntsandstein atteint 300 km<sup>3</sup>, alors qu'il est plus faible dans le cas du modèle présentant une distorsion au niveau d'une faille (Figure 27) avec une valeur de 275 km<sup>3</sup> (Tableau 7).

	Modèle avec sous-bassin (Figure 28)	Modèle avec distorsion (Figure 27)
<b>Volume</b>	302 km <sup>3</sup>	275 km <sup>3</sup>
<b>Q</b>	1 346 GW.an <sub>th</sub>	1 224 GW.an <sub>th</sub>
<b>Qexpl</b>	370 GW.an <sub>th</sub>	337 GW.an <sub>th</sub>

Tableau 7 – Résultat des calculs de potentiel géothermique pour les deux modèles géologiques considérés.

Dans notre cas, le facteur de température  $R_T$  est de 83 % et le facteur de récupération  $R$  est de 27,5 %, ce qui implique que la quantité de chaleur exploitable est de 337 GW.an<sub>th</sub> à 370 GW.an<sub>th</sub> suivant le modèle considéré (Tableau 7).

## 5.6. CONCLUSIONS

Nous avons ainsi pu faire une estimation du potentiel géothermique du réservoir du Buntsandstein dans un secteur limité du Fossé rhénan à partir de données de forages anciens et de lignes sismiques retraitées et réinterprétées. Les données de forages nous ont servi d'une part à caler la sismique, et d'autre part à fournir des renseignements sur les caractéristiques hydrauliques du réservoir du Buntsandstein.

Bien que les températures brutes ne soient pas très élevées, nous pouvons estimer la température moyenne de la formation autour de 100 °C dans la région considérée. Ceci apparaît suffisant pour produire de la chaleur et probablement de l'électricité à partir des nouvelles technologies de conversion d'énergie par centrale binaire (Köhler et Ziegler, 2006). Quant au débit apparent mesuré dans les forages, il n'est pas suffisant pour une exploitation géothermique de grande envergure. Cependant, il apparaît que le réservoir du Buntsandstein est très fracturé et contient de nombreuses zones de fractures. La production de cet aquifère est alors liée au réseau de fractures qu'il sera important de bien connaître dans le cadre d'une éventuelle exploitation de ce réservoir. De plus, sa perméabilité pourra être améliorée grâce à des techniques de stimulation hydraulique ou chimique déjà mises en œuvre dans d'autres types de projet comme à Landau en Allemagne (Baumgaertner *et al.*, 2006).

À partir des interprétations des lignes sismiques nouvellement retraitées, nous avons réalisé un modèle géologique 3D afin de pouvoir imager correctement la formation du Buntsandstein. L'analyse des coupes montre une différence de schéma structural entre la partie nord, montrant des demi-grabens et des blocs basculés, et la partie sud, montrant un large graben à l'ouest et une succession de faille normale à l'est. Cette différence peut s'expliquer par la présence à proximité de la zone de transfert sud du graben du Rhin. La présence de cette structure profonde complique la corrélation des failles entre chaque profil. Ainsi, le modèle le plus probable fait apparaître un réseau de fractures normales NE-SW et la présence d'un sous-bassin dans la partie SW de la zone, qu'il serait intéressant de confirmer à partir de la réinterprétation d'autres lignes sismiques présentes dans la zone d'étude. En effet, l'interprétation géologique a une grande influence sur la forme des interfaces stratigraphiques et donc sur l'estimation du volume du réservoir et la valeur du potentiel géothermique. Dans notre cas, le volume de la formation du Buntsandstein impliqué est d'environ 300 km<sup>3</sup> pour une surface d'étude autour de 670 km<sup>2</sup>. Il semblerait cependant que la formation considérée contienne également des grès permien du Rotliegendes qui sont difficilement différenciables en sismique. Le potentiel géothermique exploitable est alors d'environ 350 ± 15 GW.an<sub>th</sub>.

En conclusion, il apparaît donc indispensable d'avoir une bonne connaissance de la géologie profonde d'un réservoir pour déterminer son potentiel géothermique, ainsi que du type de réservoir afin d'en faire la meilleure exploitation possible.

## 6. Conclusions générales

La formation argilo-gréseuse du Buntsandstein, étudiée dans le cadre du projet Ademe-BRGM « CLASTIQ », présente dans le soubassement du Fossé rhénan supérieur un intérêt non négligeable quant à la ressource géothermique pour la production de chaleur, voire d'électricité.

À partir de notre connaissance géologique du Fossé rhénan et des données anciennes disponibles, nous avons pu faire une première estimation du potentiel géothermique de ce réservoir à deux échelles différentes.

À l'échelle régionale, la reprise des anciennes cartes de la Synthèse Géothermique du Fossé rhénan Supérieur nous a servi de document de base pour des calculs d'interpolation et a permis de réaliser des cartes de potentiel géothermique du Buntsandstein sur la partie méridionale du fossé entre Bâle et Karlsruhe. Celles-ci montrent que la partie sud du fossé, au-delà d'Erstein, est peu favorable à l'exploitation géothermique. Bien que la température atteigne 100 °C à environ 2 000 m de profondeur au toit de la formation, son épaisseur inférieure à 100 m en fait un aquifère peu exploitable. En revanche, au Nord, l'épaisseur du Buntsandstein varie entre 200 et 600 m, atteignant parfois 1 000 m. Le toit du réservoir se rencontre à plus de 3 000 m où la température atteint 150 °C environ. L'estimation du potentiel géothermique exploitable donne alors des valeurs entre 15 et 30 GJ/m<sup>2</sup>, alors que par exemple, il n'est que de 7 GJ/m<sup>2</sup> au maximum pour le Dogger du bassin de Paris et 15 GJ/m<sup>2</sup> pour le Trias (Haenel, 1989). Sur la zone du Fossé rhénan étudiée, d'environ 7 150 km<sup>2</sup>, l'énergie géothermique exploitable est estimée autour de 380 TJ.

À l'échelle locale, certains secteurs apparaissent plus favorables et leur potentialité mérite d'être approfondie. C'est le cas au sud-ouest de Strasbourg où nous avons fait une étude détaillée du secteur à partir de données anciennes afin d'avoir une meilleure connaissance du réservoir, mais également de valider la démarche pour pouvoir l'appliquer dans l'avenir à d'autres secteurs qui pourraient avoir des enjeux intéressants.

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

Les données des 13 forages nous ont, d'une part permis de recalibrer la sismique en profondeur, et d'autre part nous ont fourni des renseignements concernant les caractéristiques hydrauliques du réservoir. Ainsi, la température du réservoir est en moyenne autour de 100 °C entre 1 600 et 1 800 m de profondeur, ce qui est suffisant pour une production de chaleur, voire même d'électricité grâce aux cycles de transformation binaire. Les débits mesurés dans ces forages ne sont pas très importants, mais il apparaît que la production de l'aquifère est liée au réseau de

fractures qui pourrait être stimulé hydrauliquement ou chimiquement. Dans ce cas, une bonne connaissance de sa géométrie et des caractéristiques minéralogiques des remplissages est indispensable à une meilleure exploration puis exploitation du réservoir.

La géométrie du réservoir a pu être imagée grâce à l'analyse des profils sismiques retraités de la zone. Cependant, ce type d'acquisition sismique ne permet pas d'imager les interfaces profonds avec une haute résolution, ce qui implique une précision assez faible du pointé. Il faut ajouter à cela le fait que nous possédions peu de carottages sismiques pour convertir les interfaces temps en profondeur et que le maillage des lignes sismiques retraitées était large. Nous avons donc dû avoir recours à la modélisation 3D afin de déterminer de la façon la plus contrainte possible la géométrie du réservoir du Buntsandstein. À partir des données, plusieurs modèles géologiques en 3D ont été réalisés intégrant différentes hypothèses de corrélation de fractures entre les lignes sismiques. Nous avons pu ainsi obtenir des cartes de profondeur et d'épaisseur du Buntsandstein et estimer le potentiel géothermique du secteur qui est d'environ  $350 \pm 15 \text{ GW.an}_{\text{th}}$  pour une surface de  $670 \text{ km}^2$ .

Cette étude montre que le volume est un facteur difficilement appréhendable de façon précise dans l'estimation du potentiel géothermique d'un réservoir. Il apparaît également qu'il faut une très bonne connaissance du milieu géologique pour pouvoir bien définir la forme du réservoir. D'après notre étude, le retraitement et la réinterprétation d'anciennes lignes sismiques semblent être une bonne approche. Il faut cependant s'assurer qu'il existe suffisamment de données de carottage sismique afin de pouvoir transformer avec précision les mesures de temps des profils sismiques en profondeur. Le maillage des profils doit être suffisamment dense pour que les corrélations entre profils soient fondées sur des hypothèses réalistes. Enfin, l'acquisition d'un ou plusieurs profils sismiques avec une résolution adaptée à la cible recherchée est indispensable sur les secteurs stratégiques.

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

Il apparaît ainsi que pour l'exploration du Fossé rhénan, le retraitement et la réinterprétation de données sismiques sont indispensables pour avoir une première approche de la géométrie des réservoirs et des grandes structures qui les découpent. Pour les zones à fort potentiel géothermique, de nouvelles acquisitions de sismique 2D et 3D pourront apporter des éléments importants afin d'imager en détail ces réservoirs. C'est ce qui est prévu par exemple en Allemagne, dans le nord du Fossé rhénan supérieur, où des campagnes d'acquisition sismique sont programmées fin 2007 par des opérateurs privés sur une surface de  $60 \text{ km}^2$  pour la sismique 3D et  $50 \text{ km}^2$  pour la sismique 2D sur 5 secteurs au niveau des zones de transfert (Haimberger, 2007). Compte tenu de ces développements potentiels outre-Rhin, cette étude fondée en

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



## **7. Remerciements**

Je remercie tout particulièrement C. Garibaldi pour avoir bien voulu effectuer les calculs de corrections sur les mesures de température pour la zone de Strasbourg-Obernai.



## 8. Bibliographie

**Baumgaertner J., Teza D., Hettkamp T, Homeier G.** (2006) – Geothermal exploration in the Upper Rhine valley in Germany. ENGINE Launching Conference, Orléans, 12-15 February 2006.

**Berger J.P., Reichenbacher B., Becker D., Grimm M., Grimm K., Picot L., Storni A., Pirkenseer C., Schäfer A.** (2005) – Éocène-Pliocène time scale and stratigraphy of the Upper Rhine Graben (URG) and the Swiss Molasse Basin (SMB). *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* (2005) 94, 711-731.

**Bergerat F.** (1985) – Déformation cassante et champs de contrainte tertiaires dans la plate-forme européenne. Doctorat d'état, Paris VI.

**Bonjer K.P.** (1997) – Seismicity pattern and style of seismic faulting at the eastern border fault of the southern Rhine Graben. In: *Tectonophysics* (edited by Fuchs K., Altherr R., Mueller B., Prodehl C.) 275, 41-69.

**Bodner D. P., Sharp J.M.J.** (1988) – Temperature variations in South Texas subsurface. *Am. Ass. Petr. Geol. Bull*, 72, 21-32.

**Brun J.P., Gutscher M.A., Blum R., et al.** (1992) – Deep crustal structure of the Rhine Graben from DEKORP-ECORS seismic reflection data; a summary. In: *Tectonophysics* (edited by Ziegler, P.A.), 208. Elsevier, Amsterdam, 139-147.

**Derer C., Kosinowski M., Luterbacher H.-P., Schäfer A., Süß M.P.** (2003) – Sedimentary response to tectonics in extensional basins: the Pechelbronn Beds (late Eocene to early Oligocene) in the northern Upper Rhine Graben, Germany. In: McCann T, Saintot A (eds) Tracing tectonic deformation using the sedimentary record. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 208, 55-69

**Derer C. E., Schumacher M. E., Schäfer A.** (2005) – The northern Upper Rhine Graben: basin geometry and early syn-rift tectono-sedimentary evolution. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* (2005) 94: 640–656. DOI 10.1007/s00531-005-0515-y.

**Dezayes C., Thinon I., Genter A., Courrioux G.** (2007) – Clastic reservoirs in the Rhine graben: geothermal potential of the Triassic sandstones based on seismic profiles and deep boreholes. European Geothermal Congress, 30 May-1 June 2007, Unterhaching, Germany.

**Edel J.-B., Schulmann K., Rotstein Y.** (2006) – The Variscan tectonic inheritance of the Upper Rhine Graben: evidence of reactivations in the Lias, Late Eocene–Oligocene up to the recent. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)*, DOI 10.1007/s00531-006-0092-8.

**Genter A., Guillou-Frottier L., Breton J.P., Denis L., Dezayes Ch., Egal E., Feybesse J.L., Goyeneche O., Nicol N., Quesnel F., Quinquis J.P., Roig J.Y., Schwartz S.** (2004) – Typologie des systèmes géothermiques HDR/HFR en Europe. Rapport final BRGM/RP-53452-FR, 165 p., 75 fig., 10 tabl.

**Goutorbe B., Lucazeau F., Bonneville A.** (2007) – Comparison of several BHT correction methods: a case study on an Australian data set. *Geoph. J. Int.*, V.170, issue 2, p. 913-922.

**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.

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

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

**Köhler S., and Ziegler F.** (2006) – Low enthalpy cycles. Power plant concepts. ENGINE Workshop 5, Strasbourg, 14-16 September 2006.

**Lajaunie C., Courrioux G. and Manuel L.** (1997) – Foliation fields and 3D cartography in geology: principles of a method based on potential interpolation, *Mathematical Geology*, 29(4), 571-584.

**Lavigne J.** (1978) – Les ressources géothermiques françaises. Possibilités de mise en valeur. *Ann. des Mines*, Avril, 1-16.

**Liaghat C., Villemin T., Jouanne F.** (1998) – Déformation verticale actuelle dans la partie sud du fossé d'Alsace (France). *C. R. Acad. Sci. Paris, Sciences de la Terre et des Planètes*, 327, 55-60.

**Lopes Cardozo G.G.O., Edel J.B., Granet M.** (2005) – Detection of active crustal structures in the Upper Rhine Graben using local earthquake tomography, gravimetry and reflection seismics. *Quaternary Science Reviews* 24, 339-346.

**Maget P.** (1984) – Les tests « DST » en géothermie. Rapport BRGM 84 SGN 159 SPG.

**Maurin J.C., Nivière B.** (2000) – Extensional forced folding and décollement of the pre-rift series along the Rhine graben and their influence on the geometry of the syn-rift sequences. *In: Cosgrove J.W., Ameen M. S. (eds) - Forced folds and fractures.* Geological Society, London, Special Publications, 169, 73-86.

**Mauthe G., Brink H.J., Burri P.** (1993) – Kohlenwasserstoffvorkommen und -potential im deutschen Teil des Oberrheingrabens. *Bulletin der Vereinigung Schweizerischer Petroleum-Geologen und Ingenieure* 60(137), 15-29

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

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

**Pauwels H., Fouillac C., and Fouillac A. M.** (1993) – Chemistry and isotopes of deep geothermal saline fluids in the Upper Rhine Graben: Origin of compounds and water-rock interactions. *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 2737-2749.

**Roussé S.** (2006) – Architecture et dynamique sédimentaires des séries marines et continentales de l'Oligocène Moyen et Supérieur du sud du Fossé rhéan : Evolution des milieux de dépôt en contexte de rift en marge de l'avant-pays alpin. Thèse de doctorat, Université Louis Pasteur.

**Rozsa Sz., Mayer M., Westerhaus M., Seitz K., Heck B** (2005) – Towards the determination of displacements and precise antenna modelling. *Quaternary Science Reviews* 25, 427-440.

**Schumacher M.** (2002) – Role of pre-existing structures during rift evolution. *Tectonics*, vol. 21, n°1.

**Sittler C.** (1965) – Le Paléogène des fossés rhéan et rhodanien. Études sédimentologiques et paléoclimatiques. *Mém. Serv. Carte géol. Als. Lorr.*, Strasbourg.

**Sittler C.** (1967) – Le soubassement et le remplissage sédimentaire du Fossé rhéan, au niveau du bassin de Pechelbronn et du seuil d'Erstein. Coupes géologiques à travers le Fossé rhéan. *In: The Rhinegraben Progress Report, Mém. Serv. Carte Géol. Als. Lorr.* n° 26, 69-87.

**Sittler C.** (1974) – Les Vosges et le Fossé rhéan. *In: Vieux massifs et grands bassins sédimentaires* (Éd. Doin). *Géologie de la France*, 1, 63-104.

**Sittler C.** (1985) – Les hydrocarbures d'Alsace dans le contexte historique de géodynamique du Fossé rhéan. *Bull. Centres Rech. Explor.-Prod. Elf-Aquitaine*, 9, 2, 335-371.

**Tesauro M., Hollenstein C., Egli R., Geiger A., Kahle H.-G.** (2005) – Continuous GPS and broad-scale deformation across the Rhine Graben and the Alps. *Int. J. Earth Sci. (Geol. Rundsch.)* 94, 525-537.

**Vernoux JF., and Lambert M.** (1993) –Aquifères profonds d'Alsace. Constitution d'une base de données à usage géothermique. Rapport BRGM SGN/IRG ARG 93 T 37.

**Villemin T.** (1986) – Tectonique en extension, fracturation et subsidence : le Fossé rhénan et le bassin de Sarre-Nahe. Unpublished Géologie Structurale Thesis, Paris VI.

**Villemin T., Alvarez F., Angelier J.** (1986) – The Rhine graben: extension, subsidence and shoulder uplift. *Tectonophysics*, 128, 47-59.

**Von Eller J.P.** (1984) – Guide géologique régional Vosges - Alsace.



**Centre scientifique et technique**  
**Département de géothermie**  
3, avenue Claude-Guillemin  
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34