

***Modélisation géologique et étude 3D de la
distribution des températures pour la
sélection de sites favorables au
développement de la géothermie profonde
dans le Canton de Fribourg***

-

Etude de pré faisabilité

Rapport

Prof. Eva SCHILL, Nicolas CLERC, Raphaël GANGNANT, Andréas KELLER

Avec la contribution de GEOWATT AG

Rédigé pour :
Service des transports et de l'énergie
Canton de Fribourg

Impressum

Date : Février 2012

Schill, E., Clerc, N., Gangnant, R., Keller, A.

Réalisation : Laboratoire de Géothermie (CREGE) – Contribution de GEOWATT AG

Coordonnées :

CHYN Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie

Université de Neuchâtel

11 rue E.-Argand, CP 158

CH-2000 Neuchâtel

Tél. +41 (0)32 718 26 00

www.unine.ch/chyn

www.crege.ch

Table des matières

1.	Introduction.....	5
2.	La Géothermie.....	7
2.1	Les systèmes géothermiques en aquifère profond.....	9
2.2	Les systèmes géothermiques stimulés (SGS).....	10
3.	Contexte géologique.....	12
3.1.1	Situation générale.....	12
3.1.2	Le Plateau molassique.....	15
3.1.3	La région molassique subalpine.....	15
3.1.4	Les Préalpes.....	16
3.2	Stratigraphie.....	16
3.2.1	Socle cristallin et sédiments détritiques du Permocarbonifère).....	18
3.2.2	La couverture mésozoïque.....	19
3.2.3	Le remplissage Tertiaire.....	22
3.2.4	Les dépôts Quaternaires.....	23
3.3	Principaux aquifères régionaux.....	24
3.3.1	La Molasse du Plateau.....	29
3.3.2	Le Crétacé inférieur (Hauterivien-Valanginien).....	29
3.3.3	Le Malm supérieur (Séquanien, Kimmeridgien, Portlandien).....	30
3.3.4	Le Dogger.....	33
3.3.5	Le Muschelkalk supérieur.....	33
3.3.6	Le Socle cristallin et les Fossés permocarbonifères.....	35
3.4	Accidents tectoniques majeurs.....	37
4.	Modèle géologique 3D.....	40
4.1	Introduction.....	40
4.2	Données sources du modèle.....	41
4.2.1	Données de forages.....	41
4.2.2	Données sismiques.....	45
4.2.3	Données structurales.....	48
4.3	Description du modèle géologique.....	49
4.3.1	Dimensions du modèle.....	49
4.3.2	Stratigraphie du modèle.....	51

4.3.3	Les failles du modèle	53
4.4	Résultats du modèle géologique	55
4.5	Validation et incertitudes	59
4.5.1	La quantité et la répartition des données	59
4.5.2	La qualité des données	60
4.6	Gravimétrie.....	61
5.	Modèle de température	65
5.1	Présentation des données de température	65
5.2	Calcul de la température dans le modèle	68
5.2.1	Concept de calcul	68
5.2.2	Conditions limites du modèle.....	70
5.2.3	Résultats	72
5.3	Cartes.....	75
5.3.1	Températures	75
5.3.2	Potentiel Géothermique.....	81
6.	Discussion	89
7.	Conclusions et recommandations	91
8.	Références.....	93
8.1	Références citées	93
8.2	Références non-citées	95
9.	Table des illustrations.....	97
9.1	Figures	97
9.2	Tableau	99
10.	Annexes.....	100

1. Introduction

L'explosion démographique mondiale couplée à une modernisation toujours plus importante est la raison majeure d'une demande croissante en énergie. Dans le climat énergétique actuel, l'une des sources d'énergie la plus importante, le nucléaire, est de plus en plus contestée alors que le pétrole pour sa part, se fait de plus en plus rare ou difficile à exploiter. Dans ce contexte, nombreux sont ceux qui souhaitent se tourner vers d'autres sources d'énergies, les énergies dites renouvelables.

Les mouvances politiques pour un mode de vie plus écologique incitent l'utilisation de ces énergies « vertes », les plus connues et les plus répandues d'entre elles étant bien évidemment le solaire, l'éolien et l'hydraulique. Cependant, moins connue du grand public car souvent ignorant des avantages qu'elle apporte, l'énergie géothermique qui vise à exploiter la chaleur du sous-sol offre une alternative intéressante pour la production de chaleur et, quand les conditions le permettent, pour la production d'électricité. En effet, dans le cas de la géothermie dite « profonde », lorsque la température et le débit des fluides hydrothermaux sont suffisamment élevés, une production conjointe d'électricité et de chaleur peut être envisagée. Par ailleurs, contrairement à d'autres énergies alternatives telles que l'éolien ou le solaire, la production d'énergie géothermique n'est pas tributaire des conditions météorologiques, mais a l'avantage d'offrir une puissance électrique constante dite « en ruban ».

La capacité de production de l'énergie géothermique implique de nombreux facteurs tels que les conditions hydrogéologiques et géologiques du sous-sol (température et transmissivité de la formation ciblée), mais est également conditionnée par la technologie d'extraction mise en œuvre (type de forage, stimulation, etc.). La composition chimique du fluide hydrothermal exploité (salinité, pouvoir corrosif) entre également en ligne de compte concernant le dimensionnement, la durabilité et l'entretien des installations.

Par ailleurs, bien que l'énergie électrique puisse se transporter sans problème sur de relativement grandes distances, la valorisation de l'énergie thermique, (souvent nécessaire à la viabilité économique d'un projet de géothermie profonde), nécessite quant à elle une certaine proximité des consommateurs et dans l'idéal, la possibilité d'être raccordée à un réseau de chauffage à distance existant. Le choix d'un site approprié pour l'implantation d'une installation géothermique doit donc faire l'objet d'une réflexion globale qui mette en adéquation un site à la fois favorable du point de vue géologique, mais également du point de vue géographique (proximité des utilisateurs de chaleur).

Depuis plusieurs années, les ressources géothermiques de la Suisse sont évaluées. Les résultats actuels sont compilés dans l'Atlas géothermique du nord de la Suisse (Signorelli et Kohl, 2006) et de la Suisse occidentale (Baujard et al., 2007). Ces investigations ont pour objectif de quantifier l'énergie thermique disponible et utilisable.

En Suisse, l'exploitation de la géothermie profonde à des fins de production de chaleur uniquement existe déjà. On peut citer à titre d'exemple l'exploitation de Riehen (BS) produisant environ 22.8 GWh/a à partir d'eau à 64°C pompée à 20l/s dans l'aquifère profond du Muschelkalk, situé à une profondeur de 1547m. Cette installation assure aujourd'hui près de 50% des besoins de chaleur de Riehen.

Dans notre pays il n'existe par contre (à l'heure actuelle) aucune centrale géothermique produisant de l'électricité. Cependant, mise à part les projets avortés de Bâle et de Thonex (GE), certains projets d'envergure très prometteurs, comme celui de St-Gall ou de GP- La Côte (VD), sont en cours de réalisation.

Au-delà de nos frontières, un exemple de production couplée électricité - chaleur à partir de l'énergie géothermique est la centrale pilote de Soultz-Sous-Forêt dans la partie française du bassin Rhénan. Ce système géothermique stimulé (SGS) produit environ 13MW de chaleur et 1.5MW d'électricité à partir du socle cristallin (5000m) avec des débits de 35l/s d'eau à 175°C.

Dans l'optique de développer la géothermie profonde sur son territoire, le Canton de Fribourg a mandaté le laboratoire de géothermie (CREGE) de l'Université de Neuchâtel pour une étude de pré faisabilité. L'objectif visé est la production d'électricité couplée à du chauffage à distance. Les acteurs principaux de ce projet sont l'Etat de Fribourg, ainsi que les trois grandes compagnies de distribution d'énergie du canton à savoir le Groupe E ; Gruyère Energie SA et IB-Murten. Dans le cadre de ce partenariat, trois sites d'intérêt ont déjà été présélectionnés, mais uniquement sur la base de critères « de surface », soit en fonction des besoins et proximités des consommateurs, ainsi que de l'existence de réseaux de chauffages à distance. Ces trois régions présélectionnées pour l'implantation de centrales géothermiques sont dans la mesure où les conditions géologiques le permettent, les villes de Fribourg, Morat et Bulle.

Le présent rapport consiste en la réalisation d'un modèle géologique 3D à l'échelle du canton et à la mise en évidence de zones potentiellement favorables à la géothermie profonde du point de vue géologique (aquifères profonds, grands systèmes de failles). A partir de ce modèle géologique un modèle de température est réalisé afin d'estimer la productivité thermique du sous-sol fribourgeois dans son ensemble. Sur la base d'informations issues de la littérature, une description à

l'échelle régionale des différents aquifères profonds est également présentée dans ce rapport.

A la lumière des résultats obtenus et des données disponibles pour conduire cette étude, nous proposons enfin quelques recommandations concernant les sites les plus favorables du point de vue géologique pour l'exploitation de la géothermie profonde.

2. La Géothermie

La géothermie consiste à valoriser l'énergie calorifique de la Terre produite naturellement en son centre, mais également par la désintégration radioactive d'éléments constitutifs de la croûte terrestre. Cette chaleur, produite en quantité gigantesque, peut être exploitée par des installations géothermiques pour produire de la chaleur et, quand les conditions le permettent, de l'électricité.

Bien connue depuis l'antiquité sous forme d'hydrothermalisme, la chaleur de la Terre est exploitée à l'échelle industrielle depuis de nombreuses années dans des régions présentant des gradients géothermiques particulièrement favorable, telles que dans les zones volcaniques.

Mais la chaleur de la Terre est en théorie disponible partout. Aujourd'hui, de par l'avènement des technologies de forages, principalement héritées de l'industrie pétrolière et qui permettent de descendre de plus en plus profond, il est possible d'aller chercher cette source d'énergie partout ailleurs, dans des régions présentant un gradient géothermique « normal » (d'environ 3 degrés par 100m en moyenne).

On distingue deux grands types de géothermie :

- la géothermie de faible profondeur ou de basse température (*Figure 1*). Il s'agit essentiellement d'installations extrayant l'énergie thermique du sous-sol grâce à des sondes géothermiques verticales, des champs de sondes ou des pieux énergétiques (géosstructures énergétiques). Dans ces systèmes, un fluide caloporteur (généralement de l'eau) circule en circuit fermé dans le sous-sol dont il capte la chaleur. La température de la ressource utilisée par ces installations étant faible (8-20°C), cette énergie doit être valorisée par le biais d'une pompe à chaleur. En été par contre, cette faible température permet de rafraîchir les bâtiments sans machine frigorifique. De loin la plus répandue en Suisse, la géothermie de faible profondeur s'applique principalement à l'échelle de villas individuelles ou de bâtiments.

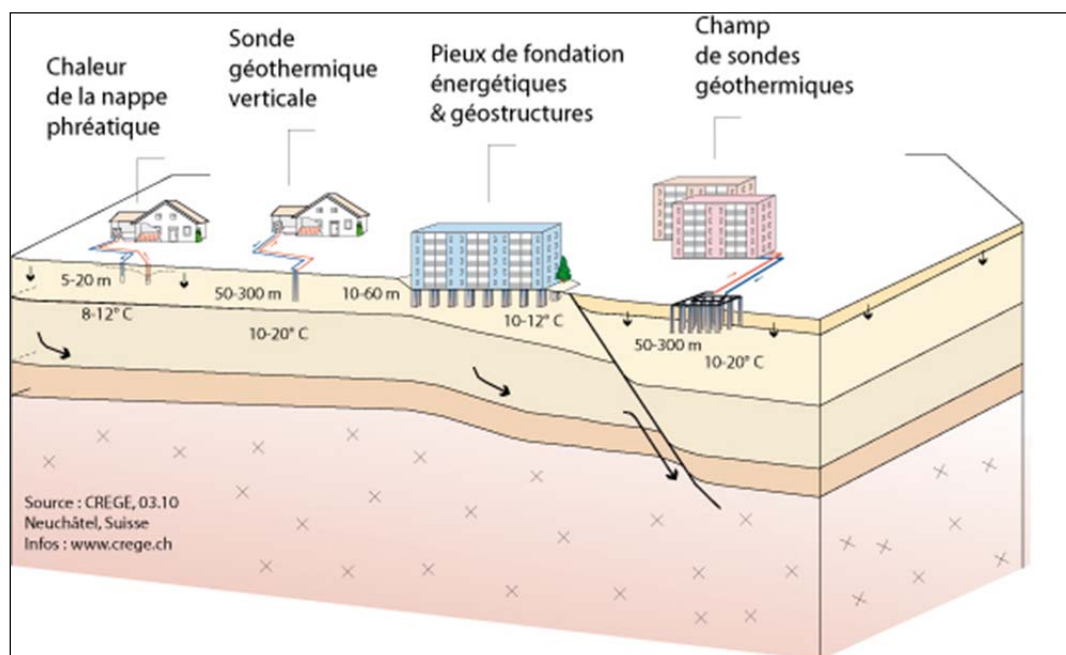


Figure 1. Illustration des différents types d'exploitation de la géothermie de faible profondeur, d'après le site web du CREGE, UNINE.

- La géothermie profonde, qui nous intéresse ici, va chercher l'énergie de la terre beaucoup plus profondément visant des températures plus élevées. Contrairement au cas de la géothermie de faible profondeur où le fluide caloporteur circule en circuit fermé dans une ou plusieurs sondes, sans échange avec les eaux souterraines, les fluides produits dans le cas de la géothermie profonde circulent au sein des formations elles-mêmes où ils se réchauffent. Ce sont donc en général des systèmes en « doublet » nécessitant au moins un puits d'injection et un puits de production, suffisamment espacés pour éviter tout court-circuitage thermique durant la durée de vie de l'installation.

Ces fluides sont souvent saturés en éléments dissous de toutes sortes (gaz, minéraux) leur conférant des pouvoirs corrosifs non négligeables sur les installations. De plus, la précipitation de minéraux qui s'opère lors de changements des conditions de température et pression du fluide peut finir par obstruer les installations. Il s'agit donc de maintenir le fluide hydrothermal à une certaine pression d'équilibre afin que les éléments dissous qu'il contient restent en solution. Afin de prévenir au mieux ces effets indésirables, ces fluides hydrothermaux ne sont pas injectés directement dans les réseaux de chauffage, mais fournissent leur énergie thermique en surface à un fluide secondaire (ou fluide de travail) par le biais d'un échangeur de chaleur. Dans le cas où la température de la ressource n'est pas suffisante, une pompe à chaleur permet de la rehausser. Ce fluide de travail, ainsi chauffé se

transforme en gaz sous pression qui entraîne un turbo-générateur produisant de l'électricité. La chaleur résiduelle est ensuite utilisée dans un réseau de chauffage à distance. Le fluide géothermal, une fois destitué de son énergie thermique, est lui réinjecté dans le réservoir qui forme alors un échangeur de chaleur souterrain et le réchauffe progressivement à nouveau. Une autre raison qui motive cette étape de réinjection est d'ordre juridique puisqu'en Suisse, la loi interdit de rejeter de l'eau trop chaude ou trop saline directement dans la nature.

Ainsi, pour la géothermie profonde, en plus que d'atteindre des températures/profondeurs nécessaires, il s'agit aussi de rencontrer (ou de créer) des perméabilités suffisantes permettant à l'eau de circuler avec des débits raisonnables au sein du réservoir. Sur ce dernier point, il faut cependant faire la distinction entre les systèmes géothermiques en aquifères profonds et les systèmes géothermiques stimulés (SGS). Ces derniers sont décrits séparément plus en détails dans les chapitres suivants.

2.1 Les systèmes géothermiques en aquifère profond

La géothermie en aquifères profonds (*Figure 2*) nécessite, comme son nom l'indique, une formation rocheuse saturée en eau et présentant une bonne perméabilité. Cette perméabilité peut venir de la nature de la roche elle-même, de la présence de failles, de milieux fracturés ou bréchifiés. Cette condition requise vise à assurer une bonne circulation de l'eau dans la roche et ainsi de bons débits de pompage au niveau des puits.

Dans les régions où le gradient géothermique est normal, (autour de 30 °C/km), comme sur le Plateau suisse, les aquifères profonds situés dans des gammes de températures nécessaires à la géothermie profonde (25 – 130°C) se situent généralement entre 1 et 4km de profondeur. Dans la majorité des cas, l'installation géothermique fonctionne par un système en doublet (deux forages). Un puits de production sert au pompage des eaux de l'aquifère dont la chaleur est extraite en surface pour le chauffage ou conjointement pour la production d'électricité, quand les températures le permettent. Le second puits permet de réinjecter le fluide hydrothermal une fois refroidi dans l'aquifère.

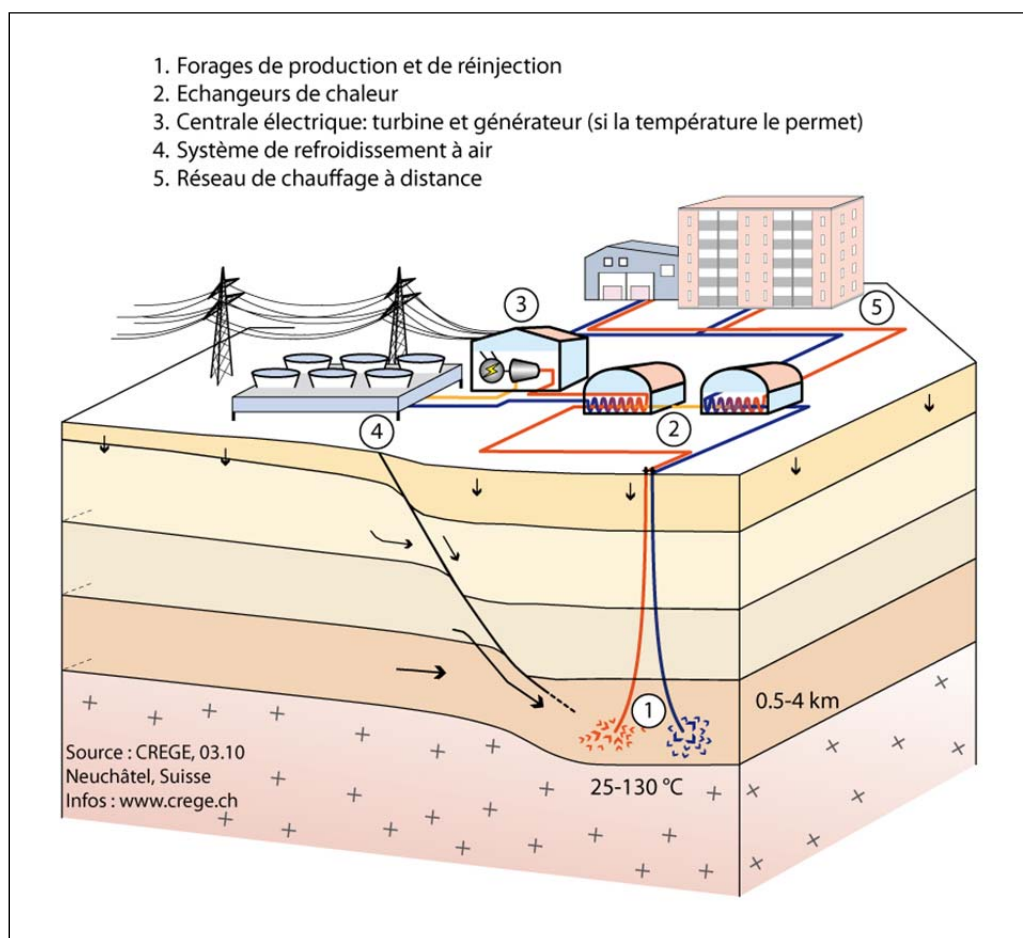


Figure 2. Exploitation de la géothermie en aquifère profond, d'après le site web du CREGE, UNINE.

2.2 Les systèmes géothermiques stimulés (SGS)

Dans les grandes lignes, les systèmes SGS ressemblent aux systèmes géothermiques en aquifère profond. Une différence notable réside dans le fait que les températures et profondeurs ciblées sont en général plus importantes ($> 120^{\circ}\text{C}$; 4 – 6km), mais également dans le fait que les réservoirs visés ne sont plus des formations sédimentaires aquifères, mais se situent en général dans le socle cristallin sous-jacent (Figure 3). Les températures rencontrées à ces profondeurs permettent dans la plupart des cas de prévoir une production conjointe de chaleur et d'électricité.

Bien que cherchant à atteindre des zones déjà naturellement altérées (zones fracturées), ces dernières ne présentent pas toujours une perméabilité suffisante pour assurer les débits nécessaires à une production d'énergie économiquement viable. Il est donc souvent indispensable d'améliorer artificiellement ces

perméabilités par des techniques de stimulation (fracturation hydraulique ou chimique).

La stimulation hydraulique est une méthode déjà largement développée dans l'industrie pétrolière qui consiste à injecter de l'eau dans la roche sous très haute pression de manière à augmenter la taille de fractures existantes mais également d'intensifier le degré de fracturation en ouvrant de nouvelles fissures. Ce procédé permet de mieux connecter les fractures entre elles, améliorant ainsi la circulation au sein du réservoir.

Bien qu'étant plus onéreux que les systèmes géothermiques en aquifères profonds de par la profondeur plus importante des forages qu'ils impliquent et des techniques de stimulation à mettre en œuvre, les systèmes géothermiques stimulés ont l'avantage de pouvoir être déployés presque partout. En effet les procédés visant à améliorer artificiellement la perméabilité naturelle de la roche permettent, jusqu'à un certain niveau, de s'affranchir de certaines contraintes géologiques puisque des formations ayant des propriétés hydrauliques naturelles suffisantes ne sont pas nécessairement requises. Pour ces raisons, les systèmes géothermiques stimulés bénéficient donc d'une plus grande liberté quant aux choix géographiques de leur implantation.

Par ailleurs, cette technique étant encore relativement peu répandue, elle ne bénéficie pas encore d'un grand nombre d'installations géothermiques pouvant faire office de référence. Le cas de la centrale de Soultz-sous-Forêt en France demeure cependant un très bon exemple de système géothermique stimulé opéré avec succès. Certains risques sismiques sont également à considérer lors des phases de stimulation hydraulique, en particulier dans les zones fortement urbanisées. Le cas du projet de Bâle « Deep Heat Mining » abandonné suite aux secousses sismiques engendrées durant la phase de stimulation hydraulique demeure malheureusement un exemple en la matière.

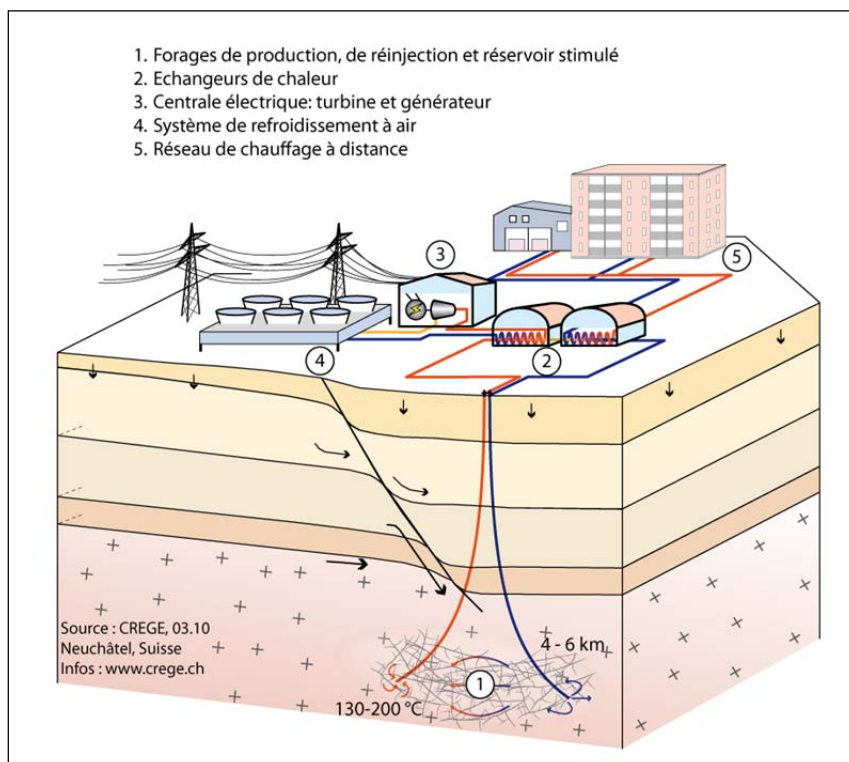


Figure 3. Exploitation de la géothermie par Systèmes Géothermiques Stimulés (SGS), d'après le site web du CREGE, UNINE.

3. Contexte géologique

3.1.1 Situation générale

On distingue trois régions géologiques principales dans le canton de Fribourg (*Figure 4*): Le Plateau molassique (avant-pays alpin formé d'un important remplissage sédimentaire Tertiaire), la région molassique subalpine et les Préalpes (empilement de nappes alpines charriées sur cet avant-pays). Ces régions sont constituées de plusieurs unités géologiques dont la nature et la répartition présentent une certaine complexité (Vuataz & al., 2005).

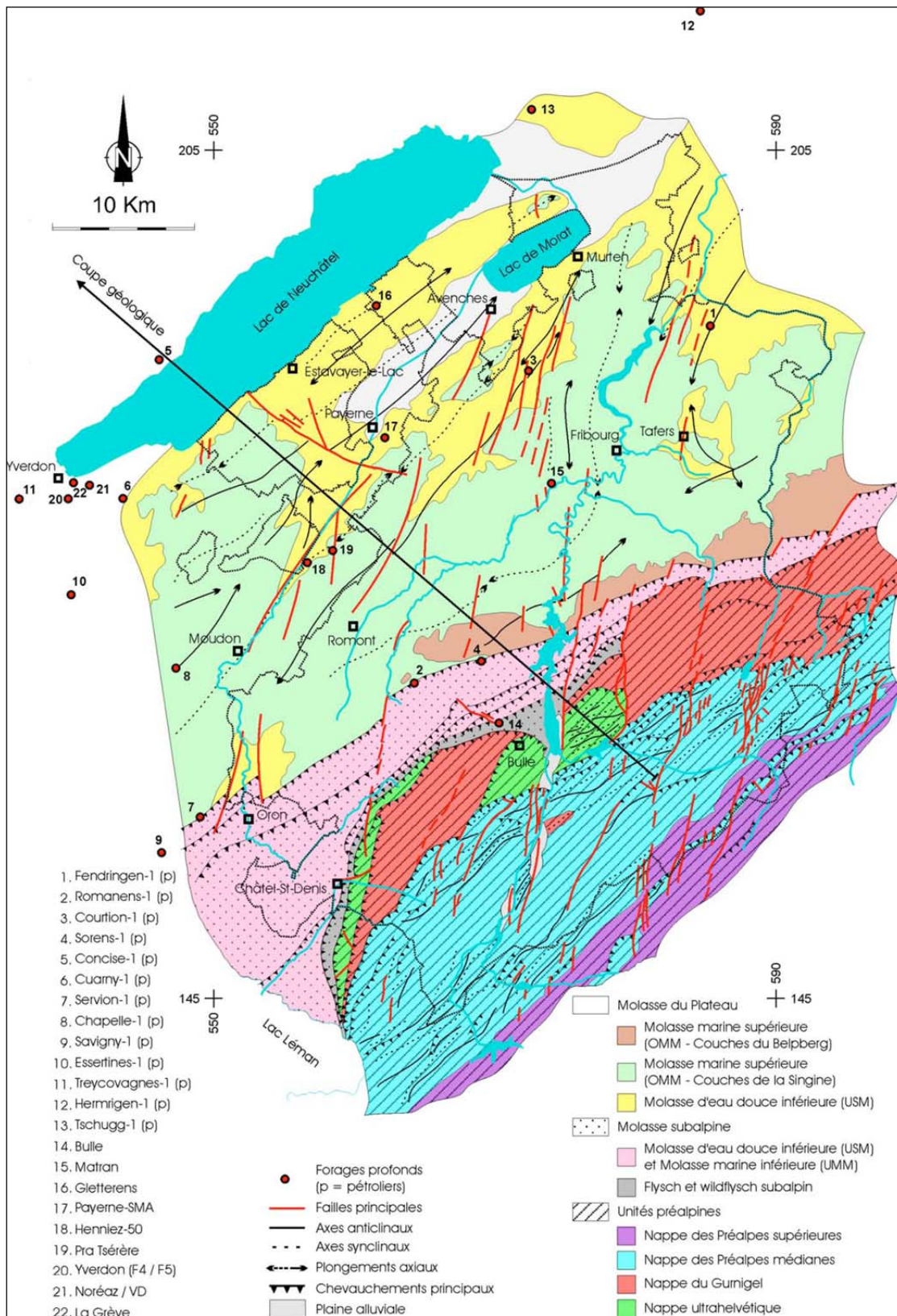


Figure 4. Carte géologique synthétique du canton de Fribourg, avec localisation des principaux accidents tectoniques et forages profonds ainsi que la trace de la coupe géologique de la figure 5 (d'après Vuataz & al., 2005).

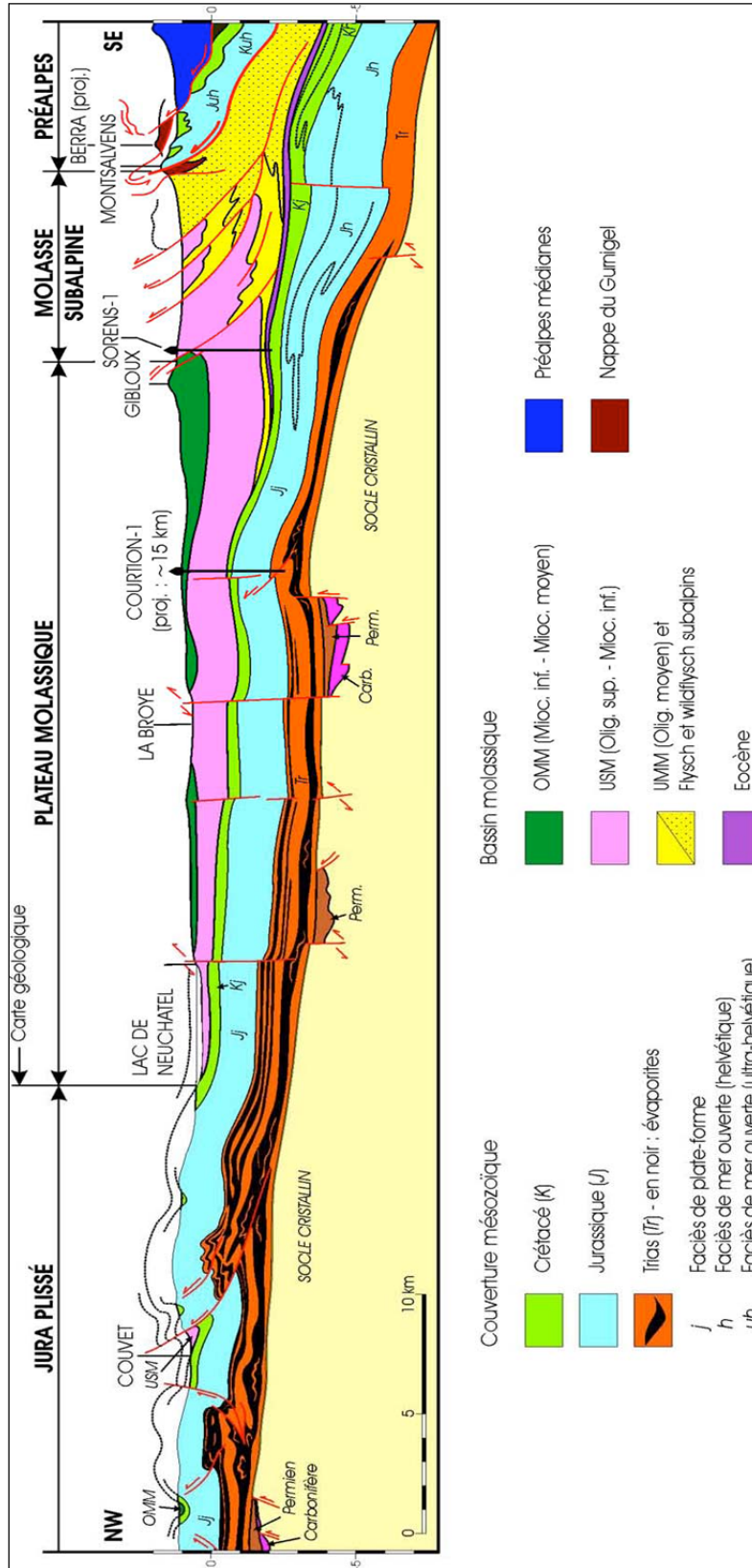


Figure 5. Coupe géologique au travers du plateau molassique, du Jura aux Préalpes fribourgeoises. Voir localisation sur la figure 4 (d'après Vuataz & al., 2005).

3.1.2 Le Plateau molassique

Le Plateau molassique s'étend depuis le front interne de l'arc jurassien jusqu'aux premiers reliefs des Préalpes (*Figures 4 et 5*).

D'un point de vue lithologique, la molasse du Plateau est essentiellement constituée de sédiments détritiques d'âge Tertiaire (Oligocène et Miocène) dans lesquels des grès prédominent souvent sur des conglomérats et des marnes. Provenant de l'érosion de la jeune chaîne alpine, la Molasse s'est accumulée dans un bassin périalpin en subsidence, dans un contexte alternant entre des milieux de dépôts marins, subaériens (fluviaux) ou lacustres. Des plus anciens aux plus récents, on regroupe ces dépôts en quatre unités lithostratigraphiques successives : La Molasse marine inférieure (Untere Meeres Molasse - UMM), la Molasse d'eau douce inférieure (Untere Süswasser Molasse - USM), la Molasse marine supérieure (Obere Meeres Molasse - OMM) et la Molasse d'eau douce supérieure (Obere Süswasser Molasse - OSM).

D'un point de vue structural, la Molasse d'eau douce inférieure (Aquitainien) et la Molasse marine supérieure (Burdigalien et Helvétien), qui forment la majeure partie du remplissage tertiaire dans le Canton de Fribourg, présentent des couches relativement peu tectonisées, mais affectées par des ondulations à grand rayon de courbure (Vuataz & al., 2005).

3.1.3 La région molassique subalpine

A la limite sud-est du plateau molassique, en avant des Préalpes, se trouve la Molasse subalpine. Contrairement aux unités molassiques du Plateau, cette dernière est plus fortement affectée par les processus tectoniques liés à la poussée alpine. En plus que de présenter des pendages plus fortement redressés, une série de chevauchements assurant la transition structurale au domaine préalpin génèrent un empilement d'écaillés tectoniques (*Figure 5*) mettant à l'affleurement la Molasse marine inférieure (Rupélien) ainsi que la base de la Molasse d'eau douce inférieure (Chattien) en plusieurs alternances complexes (Vuataz & al., 2005).

Dans le domaine subalpin se trouvent aussi les flyshs des Préalpes. Egalement d'âge tertiaire, ces derniers consistent en de puissantes formations détritiques déposées dans des bassins marins profonds et alimentées par l'érosion des différentes nappes alpines en formation. Souvent tectonisés à leur tour par l'avancée du front alpin, ces flyschs sont constitués de fines alternances de grès, de marnes et

d'argilites, leur conférant généralement une lithologie d'ensemble relativement peu résistante (Vuataz & al., 2005).

3.1.4 Les Préalpes

Les Préalpes forment un empilement complexe et épais de nappes plissées, composées de roches sédimentaires marines diverses, datant principalement des Eres secondaire et tertiaire. Les sédiments qui forment ces nappes se sont déposés dans des bassins marins situés plus au sud de leur position actuelle. Par de puissants raccourcissements tectoniques liés à la convergence de la plaque africaine contre la plaque européenne, responsable de l'orogénèse alpine, ces nappes sédimentaires sont ensuite venues s'empiler en direction du nord-ouest, jusqu'à chevaucher et déformer la région molassique subalpine (Vuataz & al., 2005).

3.2 Stratigraphie

Les trois entités morphologiques et structurales, à savoir le Plateau molassique, les molasses et flysch de la zone subalpine ainsi que la région des Préalpes sur lesquelles s'étend le Canton de Fribourg, reposent sur un même substratum composé d'un socle cristallin ancien et de sa couverture sédimentaire mésozoïque (Vuataz & al., 2005). De manière générale, ce substratum présente un approfondissement relativement constant depuis le Nord-Est, où le Mésozoïque affleure dans le Jura, vers le SW où il plonge sous les différentes nappes de chevauchement alpines (*Figure 5*). Une partie allochtone de cette couverture mésozoïque est par ailleurs reprise dans ces nappes alpines et charriée vers le Nord-Est. Sans rentrer dans les détails plus complexes de la région des Préalpes, les différentes unités qui composent la région du Plateau sont décrites ci-dessous des plus anciennes aux plus récentes. La figure 6 montre une corrélation lithostratigraphique entre quelques-uns des principaux forages pétroliers disponibles dans cette région, selon un profil orienté SO – NE au travers de la partie occidentale du Plateau.

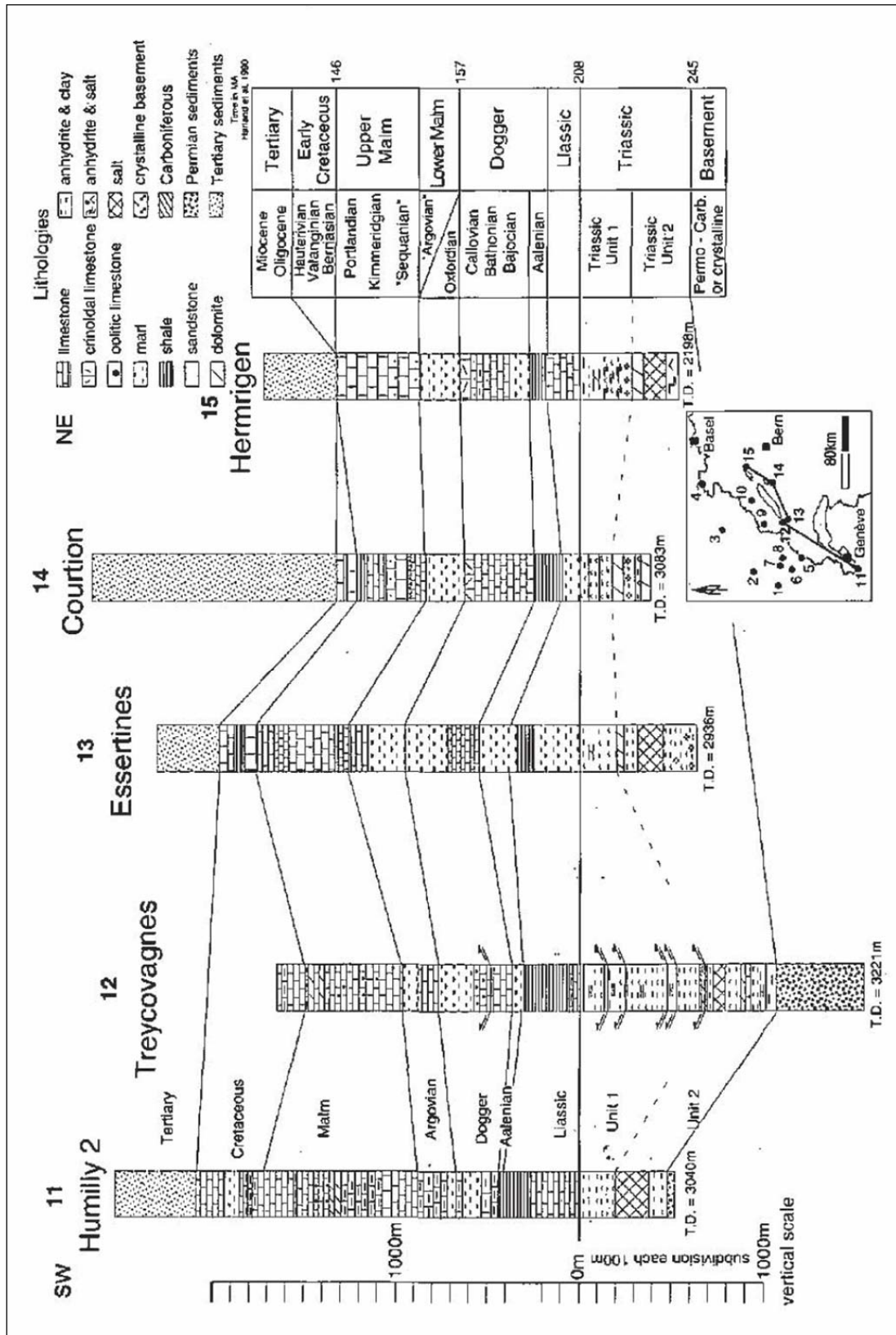


Figure 6. Corrélation lithostratigraphique SW-NE entre des forages pétroliers de la partie occidentale du Plateau suisse (d'après Sommaruga Mosar, 1997). Le niveau de référence (0 m) est fixé à la base du Lias. Les lignes en trait plein représentent les corrélats

3.2.1 Socle cristallin et sédiments détritiques du Permocarbonifère)

Le socle cristallin est formé de très vieilles roches métamorphiques (granites et gneiss), dont le toit se situe à des profondeurs comprises entre 2500m (aux extrémités nord et nord-est du canton) et plus de 4000m au front des Préalpes.

Localement, le socle cristallin est affecté par des fossés d'extension (Graben) remplis par d'épaisses séries des sédiments détritiques (grès, conglomérat, argillite, charbon) d'âges Permien et Carbonifère (Vuataz & al., 2005).

Le socle cristallin, tout comme les fossés permocarbonifères qu'il contient sont, à quelques exceptions près, relativement mal connus en Suisse de par le petit nombre de forages profonds qui les atteignent et la qualité limitée (à ces profondeurs) des lignes sismiques disponibles pour les étudier. Il est par ailleurs supposé que le sommet du cristallin présente un certain degré d'altération sur ses 500 premiers mètres environ (Baujard & al., 2007 ; Signorelli & Kohl, 2006), lui conférant une certaine perméabilité. La figure 7 montre les profondeurs du toit du cristallin au niveau de la partie occidentale du Plateau. Les couleurs sur cette figure permettent également de localiser approximativement les fossés permocarbonifères présumés dans cette région.

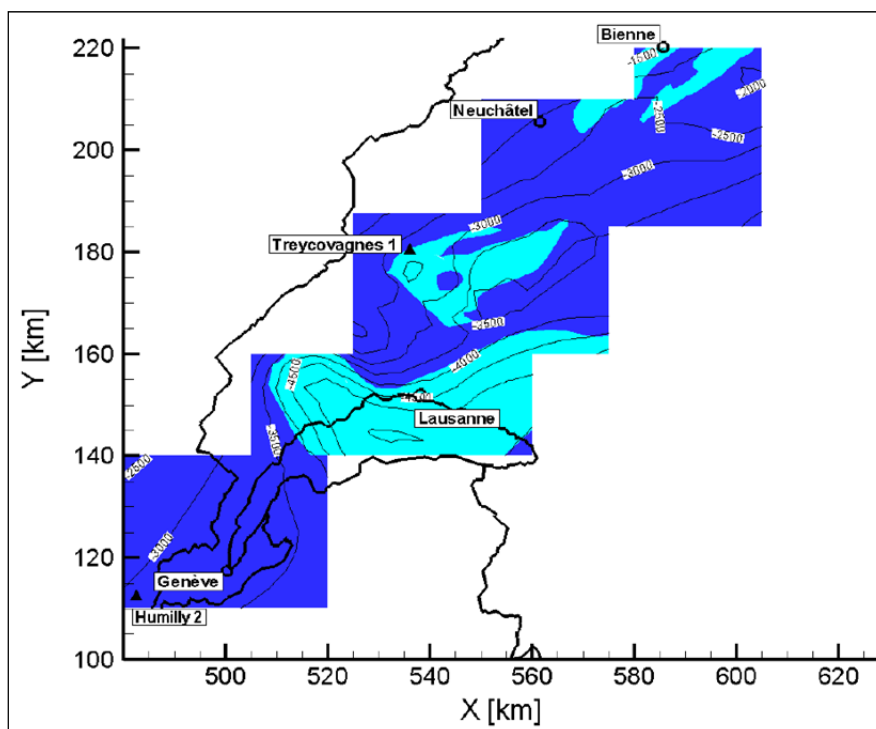


Figure 7. Carte des isohypses du toit du socle cristallin altéré. Bleu : cristallin altéré sous le Mésozoïque ; turquoise : Cristallin altéré sous les fossés permocarbonifères (d'après Baujard et al., 2007).

3.2.2 La couverture mésozoïque

Mieux connues, les roches sédimentaires du Mésozoïque (Ère secondaire) forment les plis du Jura interne où l'on retrouve les plus récentes d'entre elles à l'affleurement. Vers le Sud-Est, ces séries (en position autochtone) se suivent en profondeur sous le bassin molassique puis sous les Préalpes, où elles réapparaissent en position allochtones dans les différentes nappes de chevauchement charriées vers le Nord-Ouest par la poussée alpine.

Dans le Canton de Fribourg, des forages d'exploration pétrolière ainsi que des données sismiques ont permis de relativement bien explorer le Mésozoïque autochtone, mais seulement sous le bassin molassique (Vuataz & al., 2005).

Bien que le nombre de forages suffisamment profonds disponibles y soit relativement modeste, ils permettent de connaître de manière ponctuelle les épaisseurs précises des différentes formations qui composent cette couverture mésozoïque (*Figure 6*).

Les données sismiques disponibles, quant à elles, permettent de mettre en évidence la géométrie ainsi que les grandes tendances structurales du Mésozoïque. Elles révèlent en particulier la présence de faibles ondulations à grands rayons de courbure ainsi que de nombreuses failles ou décrochements affectant cette couverture. Ces lignes sismiques ont également permis de mettre en évidence certaines variations d'épaisseurs du Trias. On observe par exemple une dépression d'orientation approximativement SO-NE dans la région de Fribourg appelée « synclinal de Fribourg » (*Figure 8*). Un amincissement de l'intervalle évaporitique du Trias affecte la géométrie du reste de la séquence mésozoïque à cet endroit. À l'inverse, un certain épaissement du Trias évaporitique est observable sur la même figure au niveau de la bordure Est de cette « zone de Fribourg » (Resun AG, 2008).

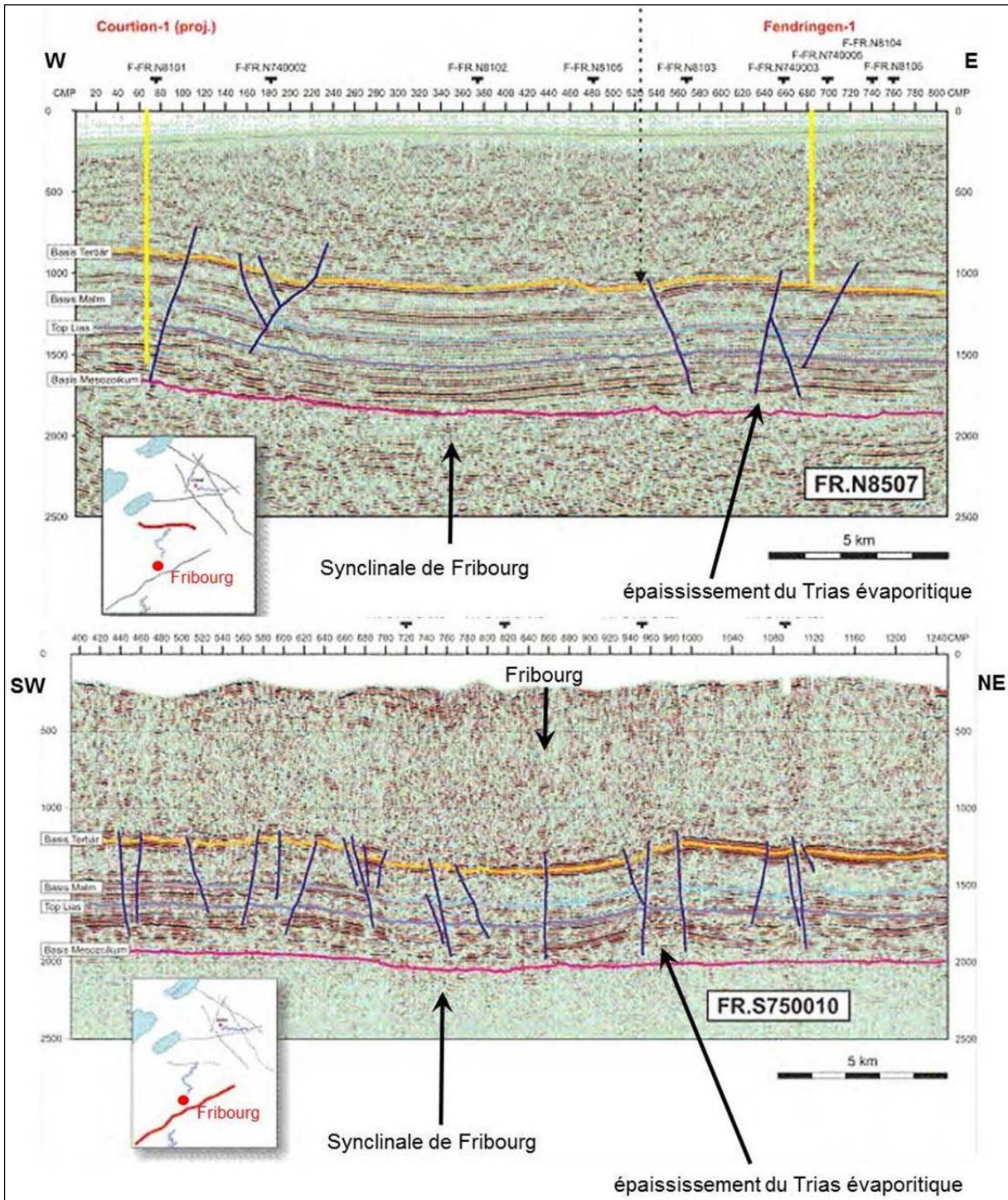


Figure 8. Profils sismique réinterprétés entre Courtion et Fendringen (haut) et entre Le Châtelard et St. Antoni (bas), mettant en évidence une dépression de la séquence mésozoïque au niveau de la zone de Fribourg ainsi qu'un bombement de cette même séquence à l'est de de cette dépression. Cette géométrie résulte d'une diminution et respectivement d'une augmentation de l'épaisseur du Trias évaporitique à la base du Mésozoïque. La base et le toit de la séquence du Mésozoïque sont respectivement délimités par les horizons violet et orange (modifié d'après Resun AG, 2008)

Les différentes formations qui composent la série du Mésozoïque et dont les lithologies consistent principalement en des calcaires, des marnes ou des argiles, reposant sur une épaisse couche d'évaporites (anhydrite, gypse et localement sel gemme) sont décrites ci-dessous, des plus anciennes aux plus récentes.

Le Trias

Le Buntsandstein, qui forme la base de la couverture sédimentaire repose directement sur le socle. D'épaisseur et de continuité latérale très variable, cette formation consiste en des dépôts siliciclastiques d'origine fluviales (grès et argiles). Ils sont directement surmontés par le Trias évaporitique composé principalement d'anhydrite et de sel. De par leur nature très ductile, ces sédiments peuvent fluer, ce qui explique en partie les variations d'épaisseur latérales de cette formation basale (*Figure 8*). Les évaporites du Trias sont généralement considérées comme la surface de décollement le long de laquelle la couverture sédimentaire mésozoïque s'est désolidarisée du socle cristallin lors de la poussée alpine.

Le Muschelkalk, quant à lui, est composé principalement de calcaires dolomitiques et des dolomies contenant des niveaux d'anhydrite.

Le Keuper, qui termine la série du Trias consiste en des argiles marneuses, des schistes argileux, des marnes, de l'anhydrite, de la dolomie ainsi qu'un passage gréseux, le Schilfsandstein (Sommaruga Mosar, 1997 ; Fischer & Luterbacher, 1963).

Le Lias

L'époque du Lias est principalement caractérisée par des calcaires argileux et des marnes (Sommaruga Mosar, 1997 ; Fischer & Luterbacher, 1963).

Le Dogger

A la base du Dogger, l'étage de l'Aalénien comporte des limons plus ou moins marneux, ainsi que des argiles et schistes argileux. Le Bajocien et le Bathonien sont avant tout caractérisés par la présence de marnes plus ou moins sableuses et de calcaires parfois oolithiques mais en général marno-sableux. Selon l'endroit, le faciès peut varier énormément.

Au sommet du Dogger, le Callovien est normalement constitué par des brèches calcaires à échinodermes et des marnes sableuses (Sommaruga Mosar, 1997 ; Fischer & Luterbacher, 1963).

Le Malm

Dans le Malm inférieur (Oxfordien / Argovien), on rencontre surtout des faciès marneux et par endroit également des calcaires marneux.

Le Malm supérieur est principalement constitué de calcaires massifs avec quelques intercalations marneuses ou argileuses (Sommaruga Mosar, 1997 ; Fischer & Luterbacher, 1963).

Le Crétacé inférieur

Le Crétacé inférieur, qui dans cette région forme le toit érosif de la séquence mésozoïque, est constitué principalement de calcaires entrecoupés d'événements marneux ou argileux. En certains endroits, comme mis en évidence dans le forage d'Hermrigen, le Crétacé a été entièrement érodé durant une période d'exposition subaérienne (*Figure 6*). Cette période d'exposition aux eaux météoriques est également responsable d'un développement karstique qui affecte les lithologies calcaires de cette formation. Cependant, cette porosité secondaire semble être fréquemment colmatée par des limons argileux (Sommaruga Mosar, 1997 ; Fischer & Luterbacher, 1963).

3.2.3 Le remplissage Tertiaire

Comme mentionné plus haut, le bassin molassique suisse est comblé par des sédiments détritiques (grès, marnes, argiles) d'origine marine et terrestre datant du Tertiaire. Au front des Préalpes, l'épaisseur de ce remplissage atteint plus de 3km, pour diminuer vers des valeurs situées entre 300 et 500m dans la région du lac de Neuchâtel. De manière générale, la granulométrie de ces sédiments tertiaires a tendance à augmenter en direction des Alpes (faciès proximal) et de diminuer en direction du Jura (faciès plus distal).

Sur la majeure partie du Plateau fribourgeois, c'est la Molasse d'eau douce inférieure (USM) du Chattien et de l'Aquitainien qui repose directement sur le toit du Mésozoïque (Crétacé Inférieur). Elle est surmontée par la Molasse marine supérieure (OMM) du Burdigalien. En direction des Alpes, en revanche, une mince lame de Molasse marine inférieure (UMM) du Rupélien subsiste normalement entre le Crétacé et l'USM (*Figure 5*). Cette dernière est également remaniée, parfois jusqu'à l'affleurement, dans les différents chevauchements qui affectent la région subalpine (Vuataz & al., 2005).

La Molasse d'eau douce inférieure (USM) du Chattien et de l'Aquitainien

En général, la Molasse d'eau douce inférieure comporte typiquement des alternances de grès, marnes gris-beiges et marnes argileuses bigarrées.

La Molasse marine supérieure (OMM) du Burdigalien

La Molasse marine supérieure du Burdigalien est simplement constituée par des grès et dans une moindre mesure par des marnes.

3.2.4 Les dépôts Quaternaires

Les dépôts quaternaires forment la plupart des terrains superficiels que l'on observe aujourd'hui. De nature diverses, ils présentent des origines et des lithologies très variables. Les dépôts quaternaires les plus fréquents sont:

- les terrains d'altération superficiels,
- les formations de pente (éboulis, glissements, etc.)
- les dépôts d'origine glaciaires et périglaciaires (moraines, dépôts fluvioglaciaires et glaciolacustres)
- les dépôts d'origine inter-glaciaires ou post-glaciaires (dépôts alluvionnaires, fluviaux ou lacustres)
- les remblais artificiels

Ces dépôts présentent des épaisseurs variant de 1m à une centaine de mètres environ, à l'exception de quelques remplissages glaciaires qui peuvent parfois atteindre plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Bien que leur importance ne soit plus à démontrer dans les problèmes géotechniques (fondations de bâtiments ou d'ouvrages d'art) ou de problèmes d'hydrogéologie (nappes superficielles), elle est en revanche négligeable en ce qui concerne la géothermie profonde.

3.3 Principaux aquifères régionaux

Les aquifères sont des formations rocheuses suffisamment poreuse et perméables pour contenir une nappe d'eau souterraine présentant un intérêt économique pour son exploitation. Il peut s'agir de roches de natures diverses telles que des calcaires, des dolomies, des roches détritiques et même, dans certains cas, des roches cristallines présentant un certain degré d'altération et de fracturation.

Les propriétés d'aquifères que sont principalement la porosité et la perméabilité peuvent être d'origine primaire (lié au caractère intrinsèque du sédiment et de son mode de déposition), mais également secondaire : soit d'origine diagénétique (dissolution de certains minéraux), d'origine tectonique (fracturation, brèchification), ou encore liée à des processus d'altération de surface tels que la karstification qui s'opère lorsque des formations calcaires se retrouvent en contact avec des eaux météoriques. Il est cependant important de noter que si les processus diagénétiques qui affectent une roche durant son enfouissement et sa lithification peuvent en améliorer les propriétés d'aquifère, ils peuvent aussi les réduire par des phénomènes de recristallisation in-situ, de précipitations de minéraux hydrothermaux ou de stylolitisation (phénomènes de dissolution et de recristallisation sous l'effet de la pression, propres aux roches carbonatées). Notons également qu'en raison des variations verticales de la lithologie qui peuvent exister au sein de certaines formations, l'épaisseur des intervalles considérés comme aquifères est souvent moindre que l'épaisseur stratigraphique des formations qui les contiennent.

Dans ce chapitre, nous discutons les principaux aquifères connus à l'échelle régionale. Ceci n'exclue pas l'existence de zones aquifères plus « locales » qui pourraient être rencontrées lors de forages, mais qui ne sont pas identifiables sur la base des données actuellement disponibles sur le sous-sol fribourgeois. Bien que connus régionalement pour leur qualité d'aquifère, il n'est pas à exclure non plus que de par leur nature géologique, certaines de ces formations puissent localement perdre leur intérêt économique en termes d'aquifères. En effet, une roche n'étant que très rarement homogène sur de longues distances, certaines variations latérales de faciès peuvent localement en affecter son comportement hydraulique.

Ainsi, sous réserve d'y rencontrer les températures adéquates et des propriétés d'écoulement exploitables à une échelle plus locale, ces aquifères régionaux représentent des cibles privilégiées pour leur exploitation dans le cadre de la géothermie en aquifère profond.

Les aquifères régionaux les plus intéressants pour une exploitation géothermique sont : certains niveaux de Molasse (sous réserve, en plus des perméabilités nécessaires, d'y trouver les températures suffisantes en raison de leurs profondeurs très variables) ; le Crétacé inférieur ; le Malm supérieur ; le Dogger ; le Muschelkalk supérieur et éventuellement la partie supérieure du cristallin ainsi que les dépôts permocarbonifères, mais dont les propriétés d'aquifères demeurent très peu connues. Les potentiels aquifères régionaux de ces différentes formations sont discutés plus en détail dans les sections suivantes de ce chapitre.

Les gammes de perméabilités théoriques que l'on peut s'attendre à trouver dans la plupart de ces formations sont résumées dans la figure 9, en fonction de leurs lithologies principales. Egalement, quelques valeurs et informations récupérées dans la littérature, issues pour la plupart des forages de la région, sont rassemblées et synthétisées dans le tableau 1. Pour les raisons mentionnées plus haut, ces informations doivent néanmoins être considérées à titre indicatives uniquement et ne sont pas forcément représentatives sur l'entier du canton.

Les valeurs de température présentées dans le tableau 1 peuvent également être sujettes à certaines imprécisions car les conditions dans lesquelles les mesures ont été acquises sont souvent peu claires. Pour être représentative des conditions naturelles du sous-sol, une mesure de température dans un forage s'effectue normalement après un laps de temps suffisamment long pour permettre un rééquilibrage thermique suite aux perturbations engendrées par les activités de forage elles-mêmes. Une température d'équilibre peut aussi être estimée par correction mathématique. Dans un cas comme dans l'autre, il n'est pas certain que ces procédures aient été respectées puisque la reconnaissance géothermique n'était pas dans les objectifs de la plupart des forages considérés (Vuataz et al., 2005).

A cette problématique s'ajoute encore le fait que les températures mesurées dans les forages dépendent fortement du mode de transport de chaleur qui s'y opère (par diffusion ou par convection). Cela signifie que selon la conductivité hydraulique locale (p.ex. zones fortement fracturées vs zones relativement intactes), le gradient de température au sein d'un même aquifère peut varier de manière significative d'un endroit à l'autre.

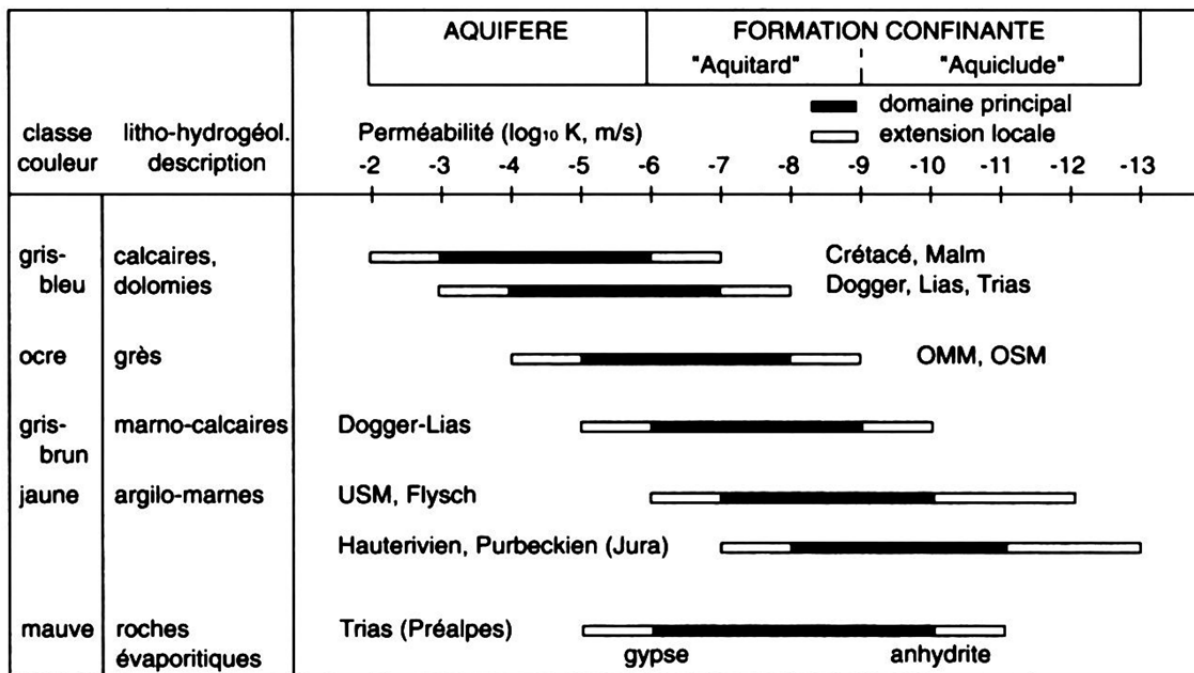


Figure 9. Gammes de conductivités hydrauliques des formations hôtes des principaux aquifères de Suisse occidentale (d'après Pasquier & al., 1999).

	OMM	USM	Crétacé inf.	Malm sup.	Dogger	Muschelkalk sup.	Socle cristallin et sédiments permo-carbonifères
Lithologie prédominante	Grès et marnes gréseuses (1)	Grès et marnes et marnes argileuses bigarrées (1)	Calcaire sabl. + calc. marn. (Hauter.), Calcaires (Valang.) (8)	Calcaire massif (8)	Calcaire (Callovien) sinon marneux (8)	Calcaire dolomitique (3) (8)	Gneiss, Granite (et sédiments) (14)
Type de porosité	de fracture et d'interstice (11)	de fracture et d'interstice (3)	de fracture, karst (Hautriv.) (3)	de fracture (3)	de fracture et primaire (4) (14)	de fracture, karst (3)	de fracture (14)
Porosités maximales [%]	-	5 à 25 (19) (20)	7 à 11 (18)	6 à 13 (20)	3 à 17 (20)	3 à 18 (20)	-
Qualité aquifère (tendances)	aquifère (9) (10) (16)	aquitard / aquiclude (9) (10) (16)	aquifère (14)	aquifère (9) (10) (16)	parfois aquifère, sinon aquitard / aquiclude (9) (10) (16)	aquifère (9) (10) (16)	aquitard, localement aquifère (9) (10) (16)
Conductivité hydraulique k_{estime} [m/s] (val. élevées: forte fracturation)	1.00E-07 (3)	-	1.00E-06 (3)	1.00E-06 (3)	7.00E-07 (15)	7.00E-07 (15)	5.00E-08 (cristallin) (16)
	3.00E-07 (12)	-	-	3.00E-07 (13) (14)	très variable (14)	1.00E-06 (3)	-
	-	-	-	3.60E-06 (14)		3.00E-06 (15)	-
	5.00E-07 (12)	-	-	7.00E-06 (14)		7.00E-06 (16)	8.00E-08 (fossé permo-ca.) (16)
Epaisseur de l'aquifère [m]	très variable (11)	très variable (11)	90-200 (4) (8) (18)	350-450 (8) (18)	50-100 (4) (8)	30-60 (14) (16)	300-500 (14) (16)
Transmissivité calculée [m ² /s] (val. élevées: forte fracturation)	-	-	1.00E-04 (6)	1.20E-04 (6)	-	3.50E-05 (6)	incertaine (14)
	-	-	-	2.80E-03 (6)	-	3.50E-04 (6)	incertaine (14)
Production de chaleur radiogène [μ W/m ³]	-	-	0.5 (17) (14)	0.5 (17) (14)	0.5 (17) (14)	0.5 (17) (14)	cristall. altéré: 2.8 (17) cristall. intact: 3.2 (14)
Conductivité thermique [W/mK]	2.0 - 2.5 (10)	2.0 - 2.5 (10)	2.9 (17) (14)	2.9 (17) (14)	2.9 (17) (14)	2.9 (17) (14)	3.1 (17) (14)

	OMM	USM	Crétacé inf.	Malm sup.	Dogger	Muschelkalk sup.	Socle cristallin et sédiments permocarbonifères
Gradient géoth. forages (approx.)	40 (7)	32 (7)	34 (7) (tout le Crétacé)	32 (7) (tout le Malm)	36 (7) (tout le Dogger)	31 (7) (tout le Trias)	-
Puissance géothermique estimée [MWth] (en considérant: débit = 10 l/s T _{ref.} = 20°C)	Châtel-St-Denis :						
	Fribourg :						
	Tavel :						
	Bulle :						
	Romont :						
	Morat :						
	Estavayer-le-Lac :						
			3.3	3.6	-	4.0	-
			2.3	2.5	-	3.9	-
			1.9	2.6	-	3.9	-
			3.1 (4)	3.4 (4)	-	3.8 (4)	-
			1.5	1.8	-	3.2	-
			0.9	1.2	-	2.6	-
			0.7	1.0	-	2.5	-

Légende (références et remarques):

- ⁽¹⁾ Becker & Ramseyer, 1972 / 1974
- ⁽²⁾ Vollmayr, 1983
- ⁽³⁾ ABA-Geol & al., 1989
- ⁽⁴⁾ Vuataz & al., 2005
- ⁽⁵⁾ Vuataz & Fehr, 2000
- ⁽⁶⁾ Transmissivités calculées sur la base des épaisseurs et conductivités hydrauliques du présent tableau
- ⁽⁷⁾ Moyenne des valeurs calculées à partir de Vuataz & al., 2005
- ⁽⁸⁾ Fischer & Luterbacher, 1963
- ⁽⁹⁾ Müller & al., 2001
- ⁽¹⁰⁾ Schill & al., 2011
- ⁽¹¹⁾ Weidmann & al., 1996
- ⁽¹²⁾ Thierrin, 1990
- ⁽¹³⁾ Murali, 1999
- ⁽¹⁴⁾ Baujard & al., 2007
- ⁽¹⁵⁾ Signorelli & al., 2005
- ⁽¹⁶⁾ Signorelli & Kohl, 2006
- ⁽¹⁷⁾ Schärli & Kohl, 2002
- ⁽¹⁸⁾ Gabus & al., 2000
- ⁽¹⁹⁾ Büchi & Schlanke, 1977
- ⁽²⁰⁾ ELF Aquitaine Exploration Production, 1983

Tableau 1. Caractéristiques hydrogéologiques et géothermiques des aquifères potentiellement exploitables du Canton de Fribourg.

3.3.1 La Molasse du Plateau

Les aquifères de la Molasse sont en général trop peu profond, et donc trop froids, pour présenter un intérêt quelconque pour l'exploitation de la géothermie profonde. Ces aquifères sont tout de même brièvement discutés ici puisque dans le canton de Fribourg, les épaisseurs de ces formations étant très importantes au front des Préalpes, il n'est pas à exclure que des températures intéressantes puissent malgré tout y être rencontrées dans cette région. La limitation de ces aquifères tertiaires se trouve cependant dans leurs perméabilités. En effet, les forages profonds réalisés sur territoire fribourgeois et dans les régions limitrophes ont démontré que la Molasse (Molasse du Plateau et Molasse subalpine) ne pouvait pas être considérée a priori comme un aquifère susceptible de fournir des débits intéressants pour une exploitation géothermique économiquement rentable (Vuataz & al., 2005).

De par sa rhéologie plutôt plastique, la Molasse d'eau douce inférieure (USM) ne contient qu'une fracturation diffuse, ne permettant pas de circulation d'eau suffisante.

Dans la Molasse marine supérieure (OMM), les circulations d'eau demeurent assez peu importantes elles aussi. Là où elle est la plus épaisse, cette formation pourrait cependant présenter des débits intéressants avec des conductivités hydrauliques variant de $1E-7$ à $5E-7$ m/s (*Tableau 1*) selon le degré de fracturation. Cependant, vu les faibles profondeurs (300-900 m) de cette formation, il s'agit toujours d'eaux trop « froides » pour la géothermie profonde avec par exemple une température d'environ 20° C rencontrée dans le forage de Matran à 333 m. Thierrin (1990) mentionne par ailleurs que l'exploitation de cet aquifère ne permettrait pas de soutirer des débits supérieurs à 1'200 l/min par puits et par secteur.

Sur la base des quelques données de forage à disposition, les gradients géothermiques semblent varier entre 36 et 45° C/km dans l'OMM, respectivement entre 30 et 41° C/km dans l'USM. Sur l'ensemble du territoire fribourgeois, une moyenne de 32 à 33° C/km pour l'USM est cependant plus plausible (*Tableau 1*).

3.3.2 Le Crétacé inférieur (Hauterivien-Valanginien)

Après le retrait de la mer au début du Tertiaire, le Crétacé, alors affleurant, est soumis à une intense érosion beaucoup plus marquée au nord-est de la Suisse qu'au sud-ouest. Cette érosion est accompagnée de phénomènes de karstification qui ont été mis en évidence dans plusieurs forages pétroliers (Vuataz & al., 2005). Lorsque ces paléokarsts ne sont pas colmatés, le Crétacé inférieur (Hauterivien et Valanginien dans le cas du Canton de Fribourg) peut former un bon aquifère. L'épaisseur de celui-ci tend à augmenter vers l'ouest avec des valeurs d'environ 90m

dans les forages de Courtion et de Romanens, jusqu'à environ 200m dans le forage d'Essertines (*Tableau 1*).

En considérant une épaisseur moyenne d'environ 100 m pour le Canton de Fribourg, on peut estimer une transmissivité hydraulique de l'ordre de $1E-4$ m²/s dans le meilleur des cas (*Tableau 1*). En ce qui concerne le gradient géothermique, une seule donnée est à disposition grâce au forage de Cuarny avec $34^{\circ}C/km$. Cependant, comme ce forage se trouve sur l'anomalie thermique reconnue de la zone d'Yverdon-les-Bains, il n'est pas forcément représentatif pour l'ensemble du Canton de Fribourg. Une estimation de la répartition des températures au toit de cette formation sur la zone d'étude est présentée à la figure 36, dans le cadre du modèle thermique.

3.3.3 Le Malm supérieur (Séquanien, Kimmeridgien, Portlandien)

Dans le Malm, les calcaires massifs du Séquanien, du Kimméridgien et du Portlandien constituent le meilleur potentiel aquifère du Mésozoïque (Vuataz & al., 2005). De 450 m à Hermrigen, l'épaisseur de ces trois formations n'augmente que très légèrement en direction du sud-ouest (500 m à Essertines) mais diminue nettement en direction des Préalpes pour n'atteindre plus que 350 m dans les forages de Romanens et Courtion. En prenant une épaisseur moyenne arbitraire de 400 m sur le canton (*Figure 10*), on peut calculer à une transmissivité hydraulique de l'ordre de $1.2E-4$ à $2.8E-3$ m²/s selon le degré de fracturation (*Tableau 1*). Pour le Canton de Fribourg, le gradient géothermique moyen dans le Malm peut être estimé aux alentours des $32^{\circ}C/km$. Cette valeur reste cependant relativement incertaine en raison de la répartition géographique inégale des forages disponibles contenant des données exploitables sur le territoire fribourgeois.

La figure 11 montre les températures et les puissances géothermiques moyennes calculées dans le cadre de l'atlas des ressources géothermiques de la suisse occidentale (Baujard et al., 2007) l'augmentation de ces valeurs en lien direct avec la profondeur de cette formation illustre bien l'approfondissement général du Mésozoïque en direction des Alpes. Ces valeurs de température sont également recalculées dans le cadre du modèle thermique de cette étude (*Figures 37 et 38*).

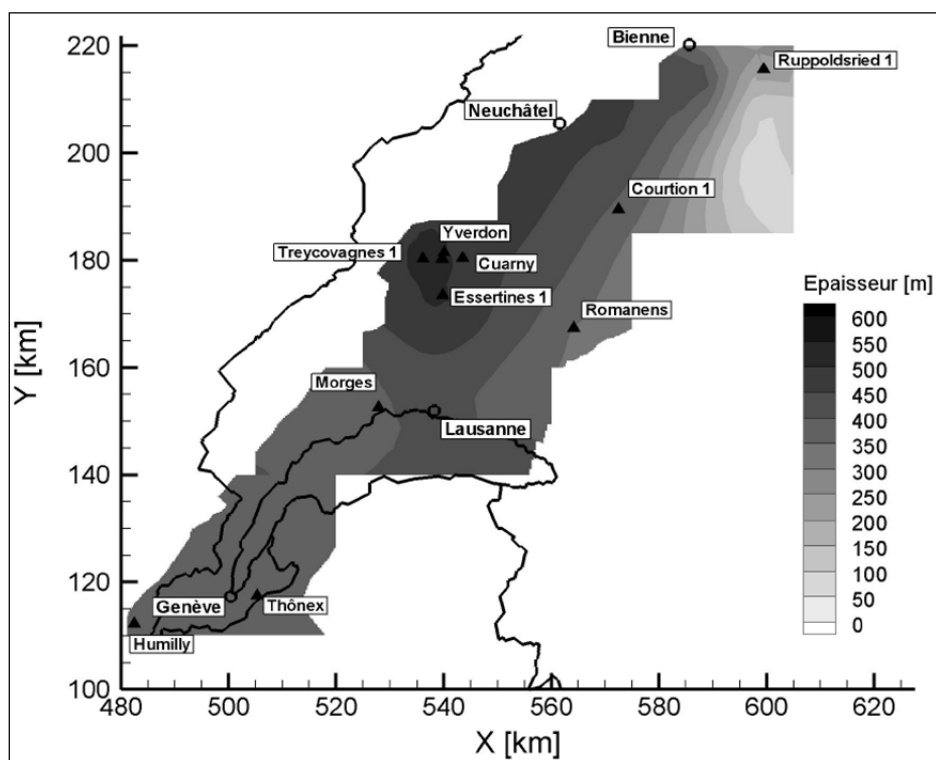


Figure 10. Carte des isopaques du Malm Supérieur (d'après Baujard et al., 2007).

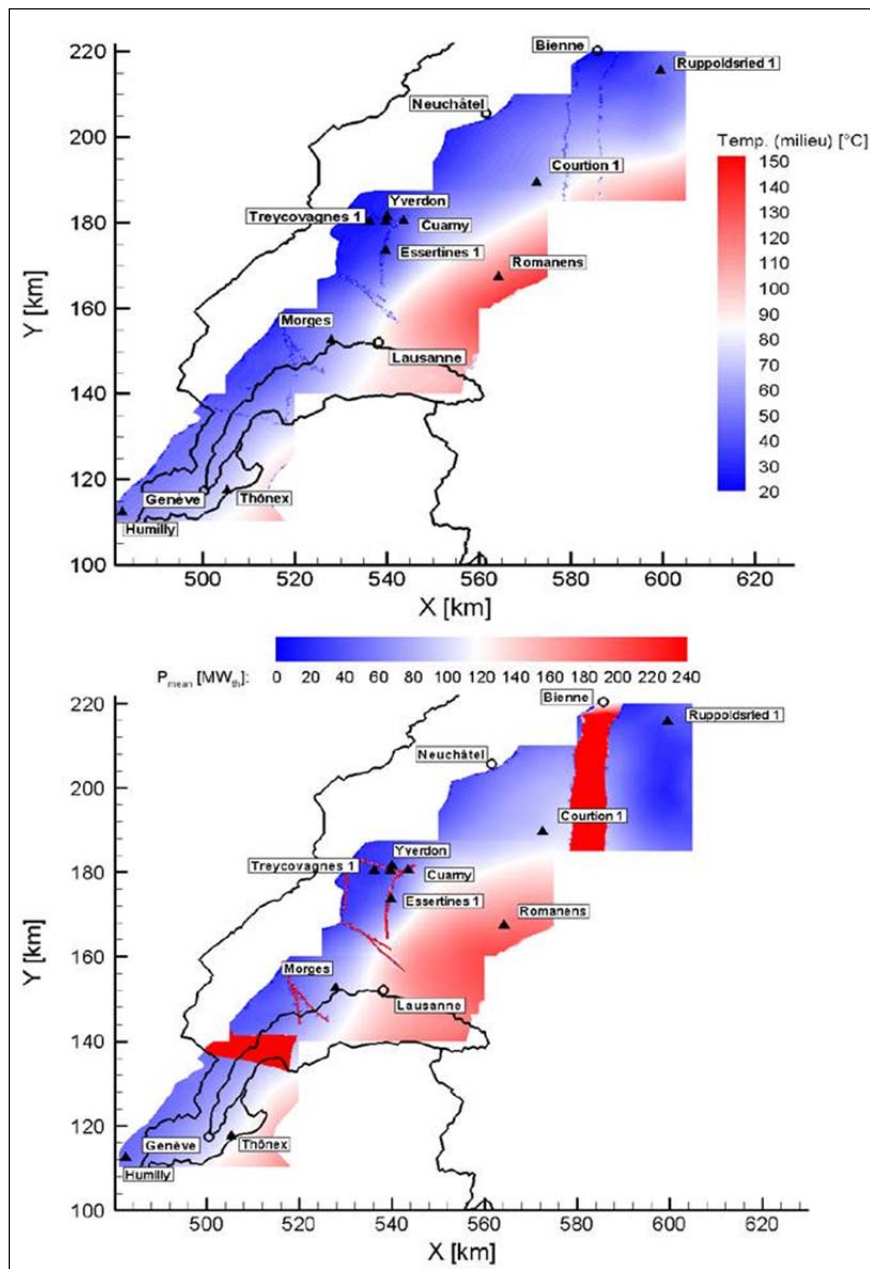


Figure 11. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans l'aquifère du Malm supérieur (modifié d'après Baujard et al., 2007).

3.3.4 Le Dogger

Les aquifères du Dogger sont représentés par les calcaires récifaux du Bajocien (Dogger inférieur) et dans une moindre mesure par les calcaires du Callovien (Dogger supérieur). Cependant, contrairement aux autres grandes formations carbonatées du Mésozoïque qui présentent une « certaine » continuité latérale, de grandes variations latérales de faciès existent au sein du Dogger, lui conférant un caractère très hétérogène en termes d'aquifère régional. Par exemple, les faciès de plate-forme (calcaires massifs) présents en certains endroits peuvent rapidement être remplacés par des faciès de bassin plus marneux indiquant un milieu de dépôt plus profond dans lesquels les qualités hydrodynamiques se dégradent. (Geister-Frantz, 1987). Le gradient géothermique de cette formation mesuré sur les puits de la région d'Yverdon est d'environ 36°C/km (*Tableau 1*). Il n'est cependant peut-être pas représentatif pour le Canton de Fribourg en raison de l'anomalie thermique bien connue présente aux environs d'Yverdon. Une estimation de la répartition des températures au toit de cette formation sur la zone d'étude est présentée à la figure 39, dans le cadre du modèle thermique.

3.3.5 Le Muschelkalk supérieur

Les calcaires du Muschelkalk supérieur dans le Trias constituent enfin un dernier aquifère potentiel au sein des formations du Mésozoïque. Ils sont, par exemple, déjà exploités à Riehen par un forage de 1'547 m avec un débit de 20 l/s. En raison de leur position profonde, peu d'informations existent quant à leur potentiel de production sous le bassin molassique (Vuataz & al., 2005). De manière générale, l'épaisseur de cette formation augmente en direction de l'est. On observe ainsi une épaisseur de 30 m dans le forage d'Essertines qui passe à environ 60 m dans les forages de Romanens, Courtion et Hermrigen (*Tableau 1*). Sur la base des conductivités hydrauliques rassemblées dans ce tableau et en admettant une épaisseur moyenne de 50 m, on peut calculer des transmissivités entre 3.5E-5 et 3.5E-4 m²/s. Dans le forage de Treycovagnes, le gradient géothermique est estimé à env. 31°C/km. A nouveau, comme ce forage se trouve sur l'anomalie thermique reconnue de la zone d'Yverdon-les-Bains, ce gradient n'est pas forcément représentatif pour l'entier du Canton de Fribourg.

La figure 12 montre les températures et les puissances géothermiques moyennes calculées pour le Muschelkalk supérieur dans le cadre de l'atlas des ressources géothermiques de la suisse occidentale (Baujard et al., 2007). Une estimation de la répartition des températures au toit de cette formation sur la zone d'étude est

également présentée à la figure 40, dans le cadre du modèle thermique de cette étude.

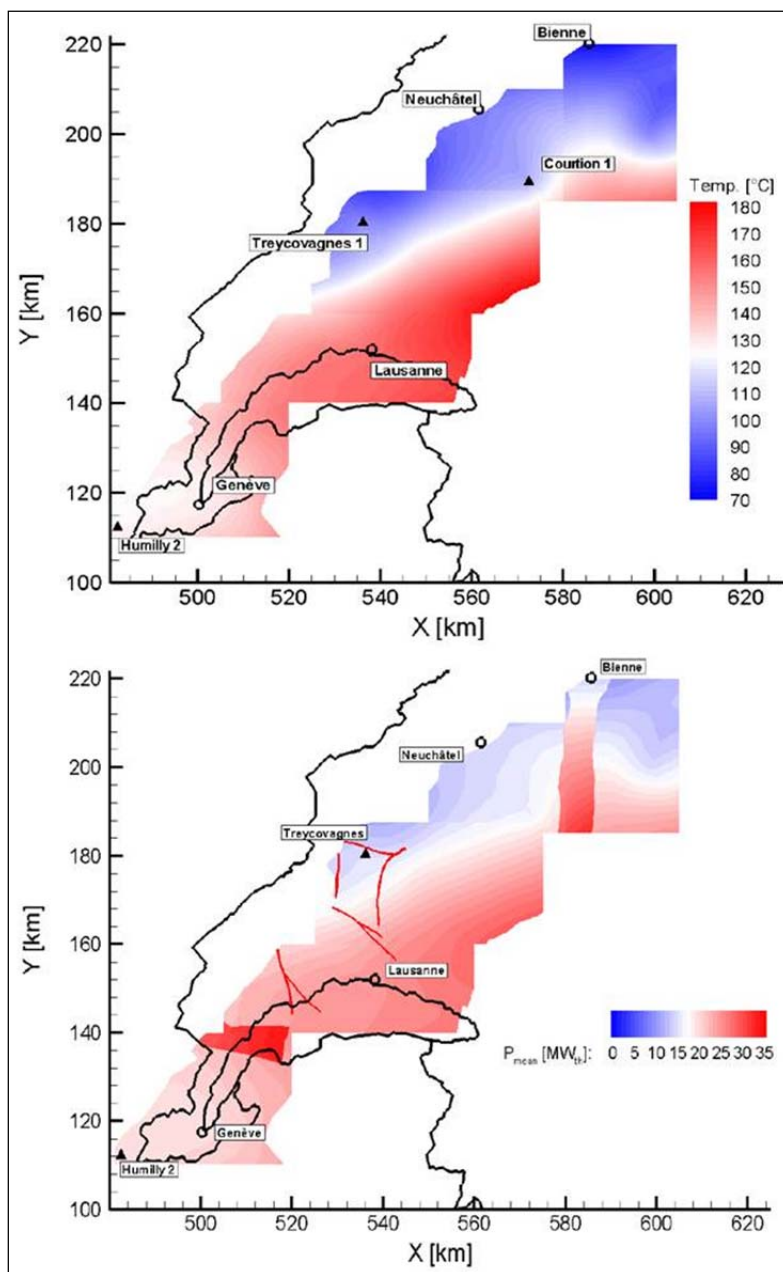


Figure 12. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans l'aquifère du Muschelkalk supérieur (modifié d'après Baujard et al., 2007).

3.3.6 Le Socle cristallin et les Fossés permocarbonifères

De par leur nature, les roches cristallines qui forment le socle ne contiennent pas ou très peu de porosité et perméabilité primaire. Leurs éventuelles propriétés d'aquifère ne se traduisent que par le degré d'altération et de fracturation qu'elles ont subi au cours du temps. Sous le Plateau suisse, de par le fait que ces roches aient été exposées et sujettes à l'érosion à la fin de l'Ere Primaire, certains auteurs (Baujard & al., 2007 ; Signorelli & Kohl, 2006) s'accordent à dire qu'une zone altérée en affecte approximativement les 500 premiers mètres. Cependant, certains forages profonds n'ont pas tous confirmé la présence de cette zone, du moins présentant les degrés d'altération attendus.

Les sédiments du Permien et du Carbonifère présents en certains endroits dans des systèmes de graben affectant le socle cristallin (*Figure 7*), peuvent, quant à eux, présenter des porosités et perméabilités primaires plus intéressantes. Cependant, de par le fort degré de compaction et de diagénétisation que ces sédiments ont subi au cours du temps, on peut s'attendre à ce que ces propriétés soient aujourd'hui drastiquement réduites. C'est donc plutôt dans les zones de failles et de fractures, attendues plus particulièrement aux abords de ces fossés permocarbonifères, que l'on peut espérer rencontrer les meilleures propriétés d'aquifères.

Dans le Nord-Est du pays, un grand fossé permocarbonifère (le « Nordschweizer Permokarbon Trog ») est aujourd'hui relativement bien connu de par sa « faible » profondeur en raison de l'absence de sédiments tertiaires à cet endroit et de par quelques puits Nagra qui l'ont transpercé. Il n'existe par contre que très peu d'information sur le socle cristallin et les fossés permocarbonifères sous le reste du Plateau suisse, de par le faible nombre de forage qui les atteignent. Il est donc difficile d'estimer le potentiel d'aquifère de ces formations. De même, en raison du manque de résolution à ces profondeurs des lignes sismiques existantes sur la région de Fribourg (et partout ailleurs sur le Plateau), l'épaisseur et l'extension de ces fossés permocarbonifères potentiellement présents demeurent très incertaines.

Néanmoins, en admettant la présence de ces fossés en Suisse occidentale telle que présentée sur la figure 7, les températures et les puissances géothermiques moyennes calculées pour la partie altérée du socle cristallin sous-jacent (*Figure 13*) ont été estimées dans le cadre de l'atlas des ressources géothermiques de la suisse occidentale (Baujard et al., 2007). Sur cette figure, les puissances géothermiques calculées des parties du socle situées sous les sédiments permocarbonifères présumés (dont les épaisseurs peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres) sont évidemment plus grandes qu'ailleurs en raison de la profondeur plus importante du socle cristallin à ces endroits (*Figure 7*). Une estimation de la répartition des températures au toit du cristallin altéré (considérant les volumes et extension de

dépôts permocarbonifères modélisés dans le cadre de cette étude) est également présentée à la figure 41.

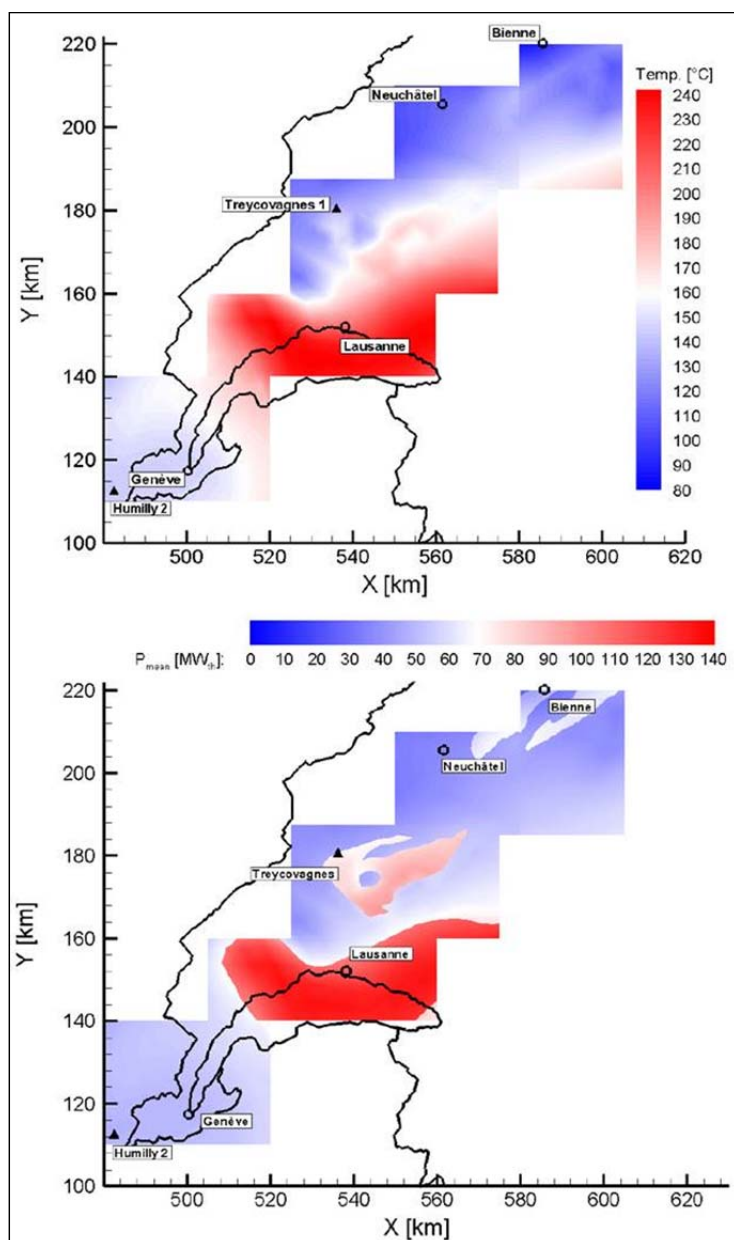


Figure 13. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans le cristallin altéré (500 premiers mètres) (modifié d'après Baujard et al., 2007). Les zones présentant la puissance théorique la plus haute correspondent aux régions où le socle cristallin se situe sous les fossés permocarbonifères supposés, épais de plusieurs centaines de mètres (Figure 7).

3.4 Accidents tectoniques majeurs

Pour une exploitation rentable de la géothermie profonde, mise à part la condition de disposer d'une température suffisamment élevée, il est également nécessaire d'obtenir un bon débit de pompage. Pour obtenir des débits suffisants, il convient de disposer de conductivités hydrauliques et/ou d'épaisseurs de réservoirs élevées. La transmissivité (conductivité hydraulique par épaisseur de réservoir) est donc directement proportionnelle au débit de pompage. Ainsi, surtout les formations épaisses à fort degré de fracturation ou interceptées par des systèmes de failles ouvertes permettent d'obtenir des débits de pompage élevés.

De par leur compétence et leur composition chimique, les formations carbonatées massives (calcaires et dolomies) sont, dans les roches qui forment la couverture sédimentaire mésozoïque, celles qui présentent en général le meilleur degré de fracturation et de karstification respectivement. Les formations plus marneuses ont au contraire tendance à répondre de manière plus plastique aux contraintes physiques qui s'exercent sur elles et de ce fait à être plus difficilement fracturées et donc hydrauliquement moins conductrices.

Les fractures permettent d'accommoder à plus petite échelle le stress lié aux contraintes mécaniques qui s'exerce dans la roche issues du mouvement de failles, elles même répondant des contraintes tectoniques régionales. Par conséquent, l'intensité de la fracturation et donc le degré de conductivité hydraulique d'une roche (dans le cas de fractures ouvertes) tend à augmenter aux abords des accidents tectoniques majeurs tels que les grands systèmes de failles. Les fractures (ou zones de fractures) ne sont la plupart du temps pas directement détectables par des méthodes géophysiques de surface telle que la sismique réflexion, en raison de leur taille inférieure à la résolution de cette méthode. En revanche, les failles peuvent dans certains cas être identifiées sur des profils sismiques. Les zones de failles constituent donc des cibles particulièrement intéressantes pour l'implantation d'installations géothermiques profondes puisqu'elles témoignent de zones présentant des densités de fractures plus importantes et donc potentiellement plus perméables. Cela augmente donc les chances d'y rencontrer des débits plus intéressants. A ceci s'ajoute évidemment le critère de la chaleur impliquant d'intercepter des systèmes non seulement perméables, mais également suffisamment profonds pour y trouver les températures adéquates.

En particulier grâce à la réinterprétation de vieilles lignes sismiques et de l'analyse de l'activité sismique naturelle, de grands progrès ont été fait ces dernières années concernant l'identification des systèmes de failles majeurs dans le Mésozoïque (Deichmann & al., 2004 ; Mosar et al., 2011). La présence de nombreuses failles ou systèmes de failles a ainsi pu être établie dans le Canton de Fribourg (*Figure 14*).

Grâce à des méthodes récentes de l'interprétation de la sismicité naturelle, les profondeurs des hypocentres enregistrés au cours du temps ont été révisées, (Deichmann & al., 2004 ; Kastrup & al., 2007 ; Deichmann et al., 2010), ce qui a permis d'établir que les accidents tectoniques majeurs du canton ne se propagent pas dans le socle cristallin, mais n'affectent que les couches du Mésozoïque pour se propager de manière plus diffuse et atténuée dans les formations molassiques sus-jacentes moins compétentes.

Dans le Canton de Fribourg, on distingue plusieurs accidents tectoniques majeurs potentiellement intéressants pour l'exploitation de la géothermie profonde. Les principaux sont (*Figure 14*) :

- La « **Zone de Fribourg** », qui forme une dépression au niveau du Mésozoïque, d'orientation Nord-Sud, créée par un amincissement du trias évaporitique à la base de cette séquence (*Figure 8*). C'est au niveau des bordures de cette dépression que se trouvent les systèmes de failles les plus importants de cette zone. Ces structures pourraient assurer une conductivité hydraulique bien développée par une bonne interconnexion de la fracturation (Beaujard et al., 2007).
- La **structure de la Broye-Courtion** : Probablement moins intéressante d'un point de vue hydrogéologique que les systèmes décrochants orientés parallèlement au champ de stress actuel (et donc plus susceptibles de présenter des systèmes de fractures ouvertes), ce réseau de failles pourrait néanmoins présenter des zones offrant des perméabilités intéressantes.
- La zone de **faille de La Lance** : Bien connu sous le lac de Neuchâtel (Gorin et al., 2003 ; Clerc 2006), ce décrochement dextre se prolonge vers le sud-est et semble, à l'image des grands systèmes décrochants régionaux, participer à l'accommodation des mouvements de la couverture mésozoïque liés à la poussée alpine.

D'autres systèmes de plus petite ampleur tels que ceux du Mausson, de Corserey-Chênens ou de La Glane-Rossens-La Roche (*Figure 14*) pourraient également présenter des conductivités hydrauliques intéressantes.

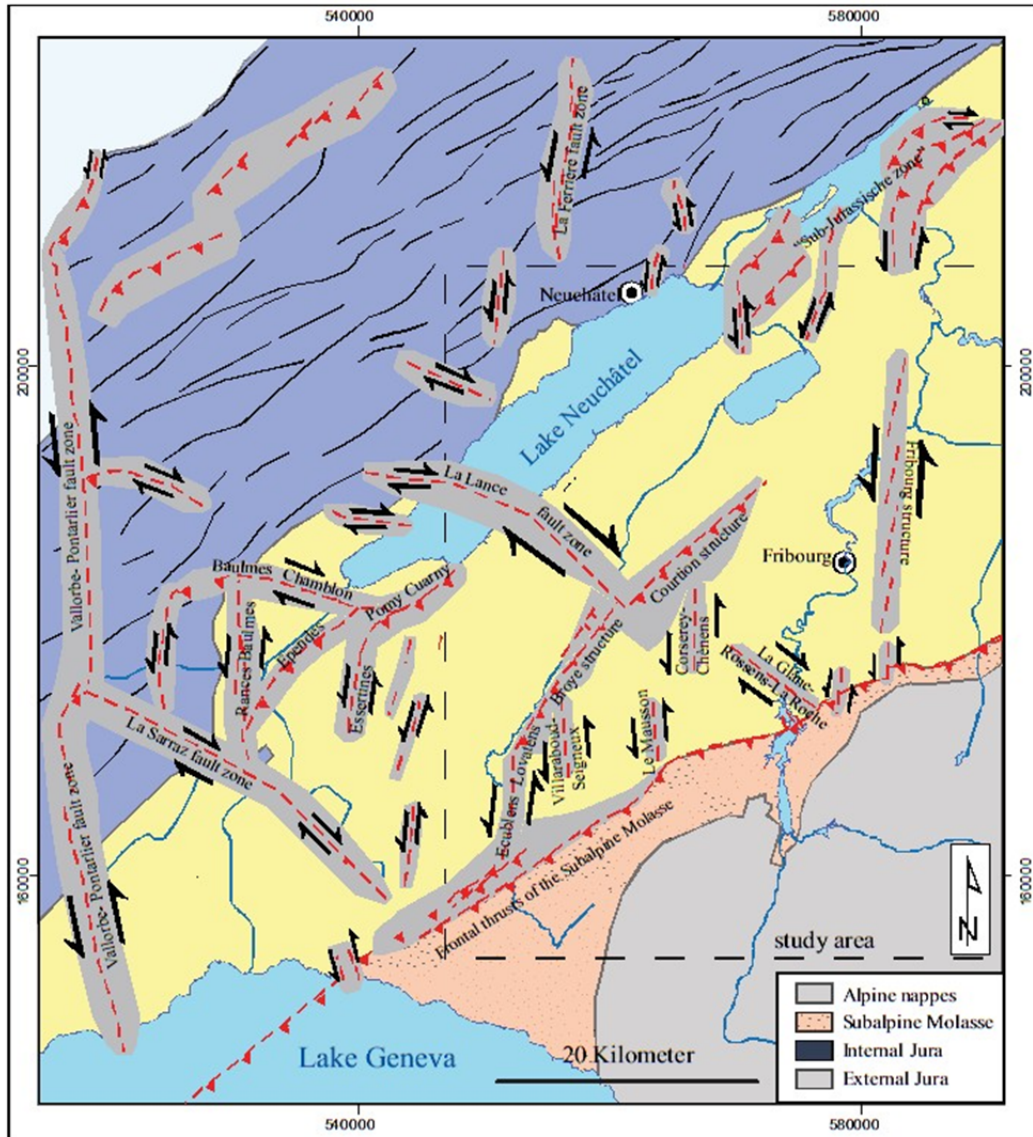


Figure 14. Accidents tectoniques majeurs affectants le Plateau et le Jura dans la région du canton de Fribourg (d'après Ibele, 2011).

4. Modèle géologique 3D

4.1 Introduction

Les modèles géologiques 3D représentent une manière élégante de rassembler dans un même environnement les différentes informations disponibles sur le sous-sol d'une région, qu'elles soient en une dimension (données de forage), ou en deux voire trois dimensions (horizons interprétés sur la base de profils sismiques ou de cube sismiques respectivement). Il existe différents programmes informatiques permettant de créer un modèle du sous-sol, certains équipés d'algorithmes de géostatistique permettant également d'extrapoler des données géologiques, pétrophysiques, ou d'autres types entre les points de contrôles du modèle qui se situent en général au niveau des puits.

Malgré les différentes possibilités qu'offrent ces programmes, l'étape la plus importante dans la construction d'un modèle géologique 3D consiste à définir dans l'espace la géométrie des différents horizons (limites entre les principales formations), les relations structurales et stratigraphiques entre ces derniers, ainsi que les principales discontinuités (failles, chevauchements) qui les affectent. Il va sans dire que le niveau de résolution d'un modèle géologique dépend de sa taille, mais également du niveau de détail disponibles dans les données sources utilisées pour sa conception.

De par les incertitudes qu'il contient, en particulier dans les régions situées entre les points de contrôle, un modèle demeure toujours en partie interprétatif et n'est par conséquent jamais unique. Plus les données disponibles pour sa conception sont complètes, denses et distribuées de manière homogène sur la zone d'étude, mieux le modèle peut être contraint et plus son degré d'incertitude diminue. Cependant, quel que soit la qualité du set de données disponible, le bon sens, le regard critique, mais également les connaissances géologiques et structurales du modélisateur demeurent cruciales quant à la qualité du modèle.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé le programme de modélisation Geomodeller3D, basé sur la méthode des champs de potentiel. Ce programme a été conçu par le *BRGM* et est actuellement commercialisé par *Intrepid Geophysics*.

4.2 Données sources du modèle

Pour la conception du modèle, les deux types de données utilisés comme source d'information sur le sous-sol géologique sont les forages et les lignes sismiques interprétées qui ont pu être mise à notre disposition sur la région du Canton de Fribourg. Les forages donnent des informations ponctuelles sur l'épaisseur et la profondeur des principales formations géologique. Les lignes sismiques quant à elles, interprétées sur la base des données de forage, nous donnent en plus des informations sur la géométrie de ces formations le long de ces profils en deux dimensions.

Compte tenu des règles de modélisation imposées par le programme Geomodeller3D, le modèle doit être un quadrilatère régulier. Par conséquent, afin d'englober l'entier du Canton de Fribourg, le modèle nécessite de s'étendre au-delà de ses frontières pour prendre également en compte certaines zones des cantons avoisinants tels que Neuchâtel, Vaud et Berne (*Figure 18*). Ainsi, afin de pouvoir contraindre le modèle dans ses extrémités situées hors de la zone d'étude, des données sismiques et des forages provenant de ces territoires voisins ont également été utilisés (*Figures 15 et 17*).

Grâce au set de donnée dont nous disposons, le modèle géologique a pu être bien défini sur la région du Plateau molassique fribourgeois. Par contre, la répartition des lignes sismique et des forages disponibles sur la zone d'étude ne permet pas de modéliser avec précision les régions présentant des structures géologiques plus complexes telles que les Préalpes ou le Jura, zones où le modèle a par conséquent été simplifié. Si la région du Jura intégrée dans le modèle pour les raisons géométriques mentionnées plus haut ne nécessite pas d'être raffinée dans le cadre d'une étude portant sur le Canton de Fribourg, la région des Préalpes pourrait, quant à elle (et sous réserve d'un accès aux données nécessaires pour cet exercice), nécessiter une modélisation plus détaillée dans le cadre d'une étude ultérieure s'il s'avérait qu'un intérêt particulier pour la géothermie profonde se porte sur cette région.

4.2.1 Données de forages

Pour la conception du modèle, nous avons eu accès à tous les forages les plus profonds qui existent sur la zone d'étude, soit environ une vingtaine, dont la moitié environ provient d'anciennes campagnes de prospection pétrolière. Toutes les données disponibles issues de ces forages ont par ailleurs été compilées dans le

Rapport sur l'Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg, réalisé par le CREGE en 2005 (Vuataz et al., 2005).

Peu de ces forages atteignent cependant les formations géologiques les plus profondes qui nous intéressent (*Tableau 2*), en particulier dans la partie inférieure du mésozoïque. Par conséquent, ces dernières ont été interpolées et générées dans le modèle à partir d'un nombre restreint de points de contrôle. Ces formations profondes restent néanmoins calées sur la sismique et, par extrapolation en profondeur de leur épaisseur, sur les profondeurs des couches sus-jacentes au niveau des puits moins profonds. En effet, partant du principe généralement bien établi que les formations du Mésozoïque présentent dans l'ensemble des épaisseurs relativement constantes (à l'exception peut-être des évaporites du Trias), cette approche demeure acceptable au regard de l'échelle du modèle et de son degré de précision.

Les différentes mesures de puits qu'il est en général possible et judicieux d'acquérir lors du forage (porosité, état de la fracturation, conductivité hydraulique, etc.) ne sont pas disponibles, soit parce qu'elles n'ont simplement pas été acquises (ancienneté de la plupart des puits), soit parce qu'elles restent du domaine privé. Les seules informations que nous possédons sont quelques données de température, mesurées à différentes profondeurs (*Tableau 2*). Nous ne savons cependant pas comment ces mesures ont été réalisées. Il est donc préférable de ne les utiliser qu'à titre indicatif. La figure 15 ci-dessous, montre la localisation des forages disponibles sur la zone d'étude qui ont été utilisés pour la conception du modèle. Les informations stratigraphiques et de profondeurs des différentes formations géologiques disponibles dans les puits utilisés pour la conception du modèle géologique sont rassemblés en annexe à la fin du rapport (annexe 1).

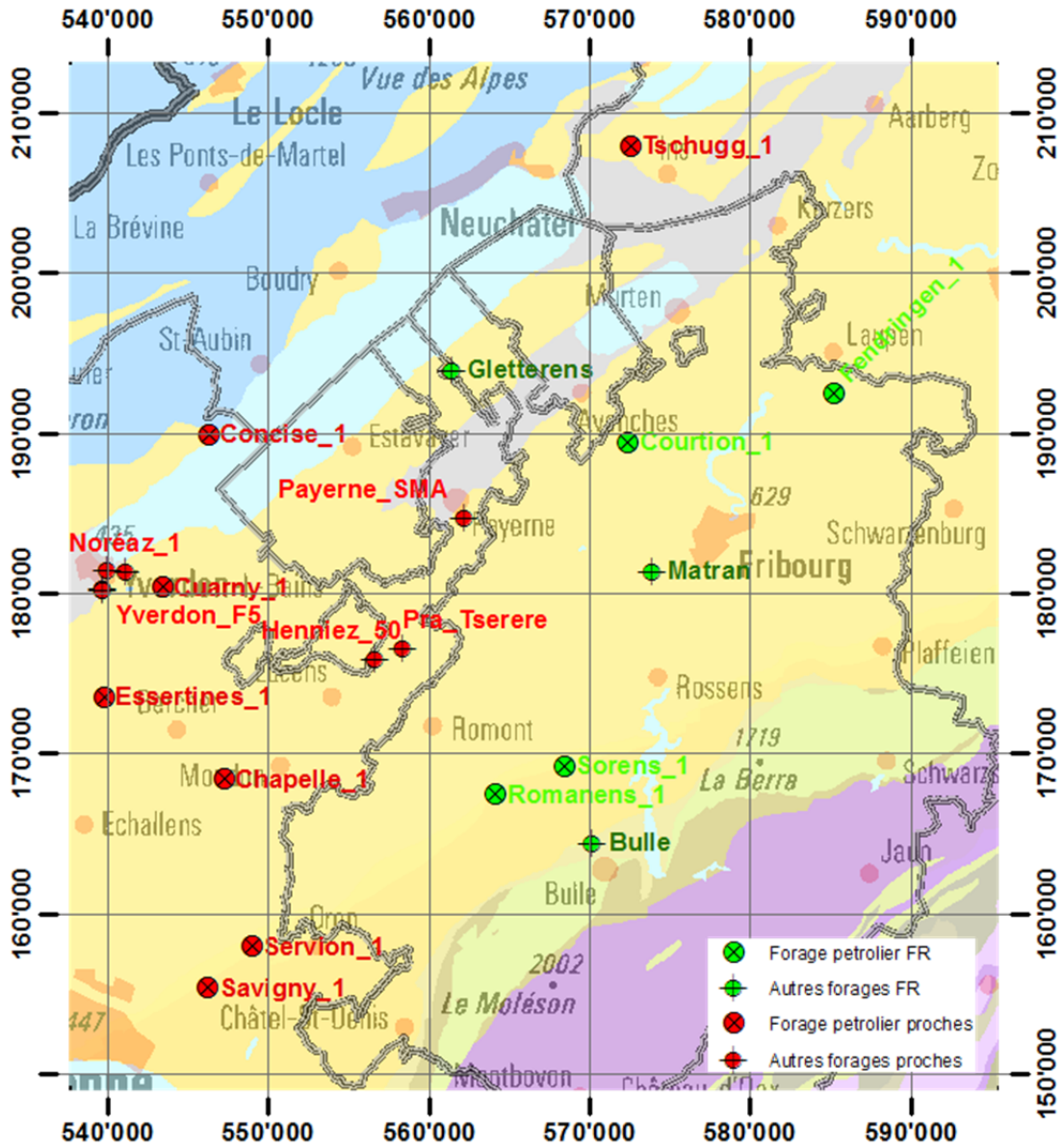


Figure 15. Localisation des forages utilisés pour la création du modèle géologique.

Id	Prof. totale [m]	Formation	T° 500m [°C]	T° 1000m [°C]	T° 2000m [°C]	T° X [°C]	Prof. X [m]
Payerne_SMA	258	USM				16.3	258
Henniez_50	494	USM					
Pra_Tserere	250	USM				16.5	240
Yverdon_F4	598	Malm				31.7	597
Yverdon_F5	1479	Dogger				59	1436
Noréaz_1	571	Crétacé inf.					
La_Greve_1	666	Malm				33.2	666
Fendingen_1	1968	Crétacé inf.					
Romanens_1	4022	Keuper	29	45	77	135	3800
Courtion_1	3083	Muschelkalk	226	41	68		
Sorens_1	3165	Crétacé					
Concise_1	240	Crétacé					
Cuarny_1	2228	Dogger	27	44	79		
Servion_1	1433	USM					
Chapelle_1	1531	Crétacé	31	47		61	1531
Savigny_1	2486	Crétacé	26	42	69	88	2486
Essertines_1	2936	keuper	39	57	94	103	2600
Tschugg_1	704	Malm		45.5			
Bulle	800	UMM	30			36	785
Matran	333	OMM				20	333
Gletterens	420	Molasse					

Tableau 2. Liste des forages utilisés pour le modèle géologique, avec leur profondeur maximales et quelques données de températures mesurées à différentes profondeur.

4.2.2 Données sismiques

Pour la construction du modèle, nous avons utilisés plusieurs profils sismiques qui dans l'ensemble couvrent assez bien la zone d'étude. Parmi ces profils, quatre d'entre eux divisés en 9 segments proviennent de l'Atlas Sismique Suisse du bassin molassique (Marillier et al., en prép), représentés en vert sur la figure 17. Les profils 4 et 5, orientés NO-SE sont principalement concentrés sur la région d'intérêt. Seuls quelques kilomètres du profil 4 sortent de la zone du modèle vers le sud. Quant aux profils 14 et 15, orientés SO-NE, il s'agit des grandes lignes qui parcourent l'entier du bassin molassique. Seule une petite partie de ces derniers a donc été utilisée dans le modèle.

Les informations géologiques disponibles sur ces lignes sont les différents interfaces principaux interprétés en profondeur jusqu'au socle (*Figure 16*) : On retrouve en haut le Tertiaire, où sont esquissés les niveaux approximatifs de la molasse marine supérieur (OMM) et de la molasse d'eau douce inférieure (USM). La couverture quaternaire est comprise dans cet intervalle et n'est pas non plus distinguée dans le modèle géologique. Plus bas se trouve le Mésozoïque, subdivisé en 7 âges distincts, à savoir le Crétacé, le Malm supérieur, le Malm inférieur, le Dogger, le Lias, le Trias supérieur ainsi que le Trias moyen et inférieur. En raison de la faible épaisseur de certaines de ces unités, le Mésozoïque a été regroupé en 5 unités dans le modèle: le Crétacé, le Malm, le Dogger, le Lias et le Trias (*Figure 19*).

Finalement, on retrouve à la base de ces lignes, l'interprétation du toit du socle cristallin ainsi que, localement, une unité sédimentaire (permocarbonifère) regroupant les sédiments primaires du Permien et du Carbonifère. En raison de l'incertitude qui entoure la présence et l'extension exacte de ces fossés permocarbonifères pour les raisons énoncées plus haut, la présence et la géométrie des unités permocarbonifères dans le modèle géologique ne sont que très faiblement contraintes et demeurent par conséquent très interprétatives.

En plus des informations lithologiques, ces lignes sismiques contiennent également des interprétations structurales (*Figure 16*), telles que les failles et décrochements majeurs (ou du moins suffisamment importants pour être visible au niveau de résolution des profils sismiques). De par l'importance qu'elles revêtent pour la géothermie profonde, ces failles, combinées à d'autres interprétations structurales disponibles, ont également été intégrées dans le modèle.

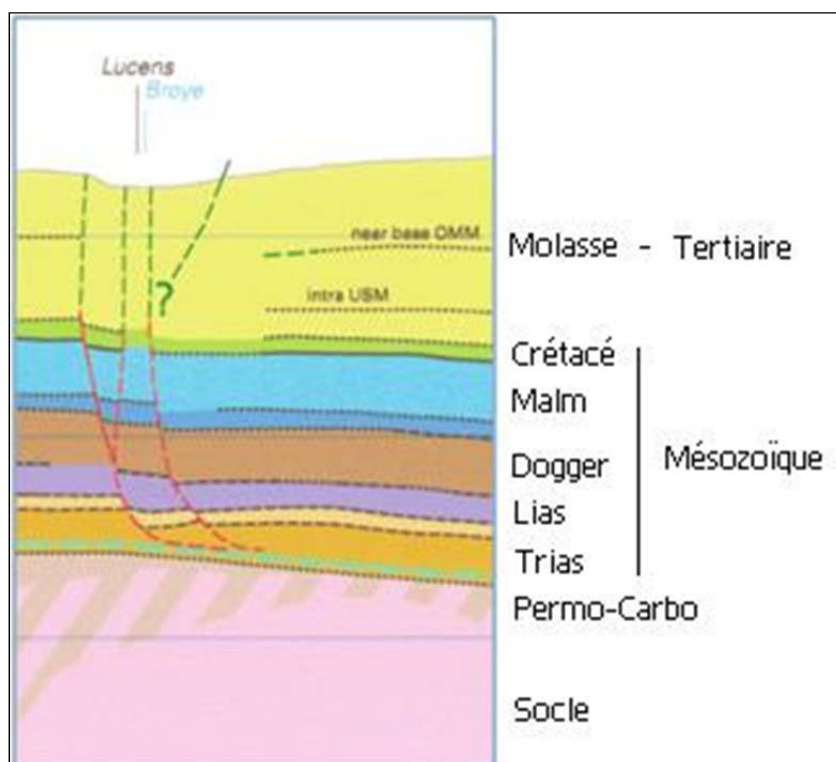


Figure 16. Exemple d'une ligne sismique sur le Plateau réinterprétée dans le cadre de l'Atlas sismique suisse (modifié d'après Marillier et al., en prép).

Sept autres lignes sismiques, provenant d'un rapport public de sécurité sur la centrale nucléaire de Mühleberg (Resun AG, 2008) et représentées en orange sur la figure 17 ont également été utilisées pour la fabrication du modèle. Principalement concentrées dans la partie nord-est de la zone d'étude, ces lignes supplémentaires offrent un bon complément d'information et permettent de mieux contraindre le modèle dans cette région où les lignes de l'atlas sont, elles, moins nombreuses.

Ces lignes présentent toutefois un inconvénient de par le fait que les profondeurs qu'elles indiquent sont en temps double. Pour ramener ces valeurs dans un domaine de profondeur en mètres, il est nécessaire de connaître les vitesses de propagation des ondes sismiques dans chacune des formations traversées afin de pouvoir établir un modèle de vitesse permettant cette conversion temps-profondeur. Nous n'avons pas accès à ces informations qui dans l'idéal se dérivent de mesures soniques dans les puits. A ceci s'ajoute le fait que ces lignes ne se présentent pas sous la forme digitale permettant d'effectuer cette conversion par le biais de programmes spécifiques.

Afin de pouvoir malgré tout exploiter ces lignes pour la construction du modèle géologique, nous avons approximé ce changement de domaine par une méthode de « stretch and squeeze » plus rudimentaire qui consiste, tout en fixant le niveau de la topographie, à comprimer ou dilater l'image verticalement pour en ajuster la profondeur au niveau de certains réflecteurs dont les profondeurs en mètre peuvent être connues par le biais d'autres sources (forage ou autre ligne sismique en profondeur interceptant le profil). Cette pratique implique évidemment de grandes approximations, puisqu'elle revient à effectuer une conversion temps-profondeur en utilisant une vitesse ponctuelle et unique pour toute la pile géologique alors qu'en réalité chaque type de lithologie comporte sa propre vitesse de propagation sismique. La dilatation verticale qui résulte d'une conversion temps-profondeur varie donc normalement aussi latéralement en fonction des variations d'épaisseur de chaque formation. Avec cette méthode, bien que la géométrie d'ensemble des différents réflecteurs soit conservée dans ses grandes lignes, c'est au niveau de la profondeur exacte des réflecteurs qu'une certaine incertitude demeure. Mais les informations de profondeur à l'échelle du modèle étant par nature incertaines, nous avons opté pour une meilleure définition des géométries des couches dans le modèle en utilisant ces lignes sismiques.

En termes de stratigraphie, les profils sismiques issus du rapport sur la centrale nucléaire de Mühleberg présentent sensiblement la même information que ceux de l'atlas sismique, à l'exception près qu'ils ne contiennent aucune interprétation concernant les subdivisions du Tertiaire ou la présence de fossés permocarbonifères. De plus, les horizons du Crétacé et du Trias ne sont pas non plus représentés. Ces derniers ont donc été interprétés manuellement pour la conception du modèle.

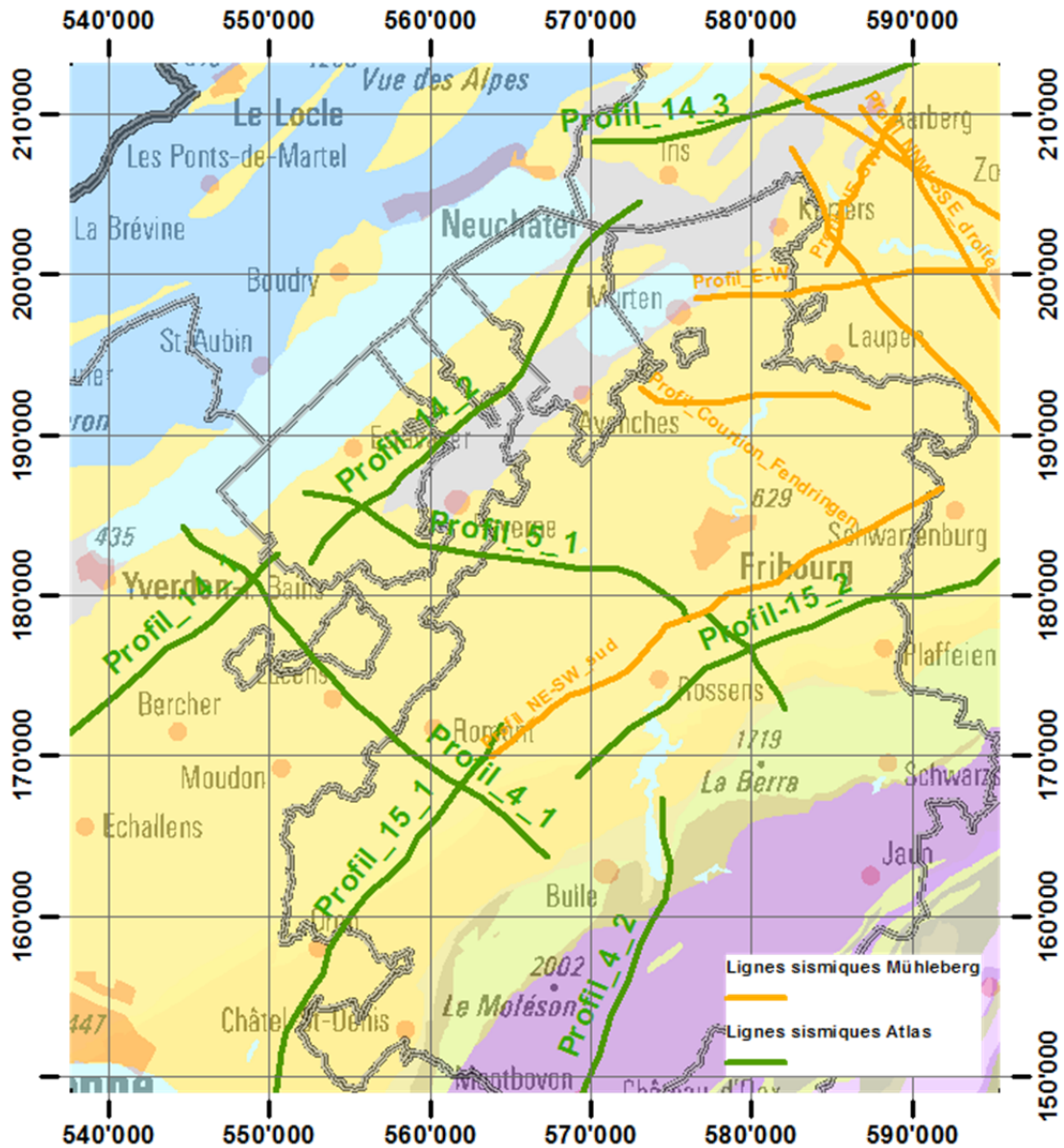


Figure 17. Localisation des lignes sismiques utilisées pour la création du modèle géologique.

4.2.3 Données structurales

Comme il a déjà été mentionné plus haut, les failles ont un rôle important à jouer dans le transport des fluides hydrothermaux. Il est par conséquent important de modéliser les plus importantes d'entre elles afin d'avoir une idée globale des principaux systèmes de failles au travers de la zone d'étude. De par la surface qu'il couvre, l'échelle du modèle est cependant trop importante pour y détailler les systèmes plus locaux. Ces derniers devraient être investigués plus en détails dans

une phase ultérieure du projet, dans le cadre par exemple de modèles plus détaillés, ciblés sur les zones d'intérêt.

Pour la conception du modèle, les informations relatives aux principaux systèmes de failles ont été obtenus d'une part sur la base de leur interprétation sur les profils sismiques disponibles et d'autre part sur la base de travaux récents sur la sismicité naturelle du canton de Fribourg (Mosar et al., 2011), qui ont permis de réviser la position et l'extension des principales failles par rapport à leur interprétation sur les cartes géologiques actuelles.

Par soucis de simplification seules les failles affectant l'intervalle du Mésozoïque (*Figure 21*) ont pour l'heure été modélisées. En effet, les failles de la molasse ayant des comportements plus complexes (systèmes plus diffus accommodant les failles sous-jacentes du Mésozoïque) et étant situées à des profondeurs ne présentant que peu d'intérêt pour la géothermie profonde, il ne nous a pas paru nécessaire de les représenter dans le modèle géologique pour le moment.

Finalement, n'ayant pour ainsi dire aucune information concernant les failles qui affectent le socle et les fossés permocarbonifères, ces dernières n'ont pas été représentées non plus dans le modèle. Il va sans dire que dans le cadre d'étude plus détaillées sur ces fossés, moyennant l'acquisition de nouvelles données permettant de les interpréter, les bordures de ces fossés mériteraient d'être investigués plus en avant d'un point de vue structural.

4.3 Description du modèle géologique

4.3.1 Dimensions du modèle

Le modèle géologique mesure 58km dans la direction E-O et 64km dans la direction N-S, soit une superficie de 3712km², délimitée par les coordonnées géographiques suivantes :

Xmin	Xmax	Ymin	Ymax
537'600	595'600	149'000	213'200

Comme expliqué plus haut, pour des raisons de géométries liées au programme Geomodeller, le modèle se présente sous la forme d'un quadrilatère qui englobe également certaines parcelles des cantons voisins (*Figure 18*). Cependant, cette contrainte d'ordre spatiale n'affecte en rien la qualité du modèle. Cela permet au contraire de contraindre ce dernier par une plus grande quantité d'information (sismique, forages) situés en dehors du canton et de s'affranchir des « effets de bords » dans la zone qui nous intéresse vraiment, au centre du modèle. Comme nous l'avons mentionné plus haut également, de par l'absence de données suffisantes dans ces zones, ainsi qu'en raison du fait qu'elles ne présentent pas d'intérêt particulier à ce stade du projet, les parties alpines et jurassiennes du modèle y ont été très largement simplifiées. Ces régions ne sont donc pas à considérer du point de vue des profondeurs, de la lithologie et des accidents tectoniques qui les affectent.

L'extension verticale du modèle est de 10.7km, s'étendant respectivement de 2.7km au-dessus et de 8km au-dessous du niveau de la mer. Une telle profondeur a été choisie de manière à pouvoir y inclure sans restriction une bonne partie du socle cristallin et des fossés permocarbonifères profonds.

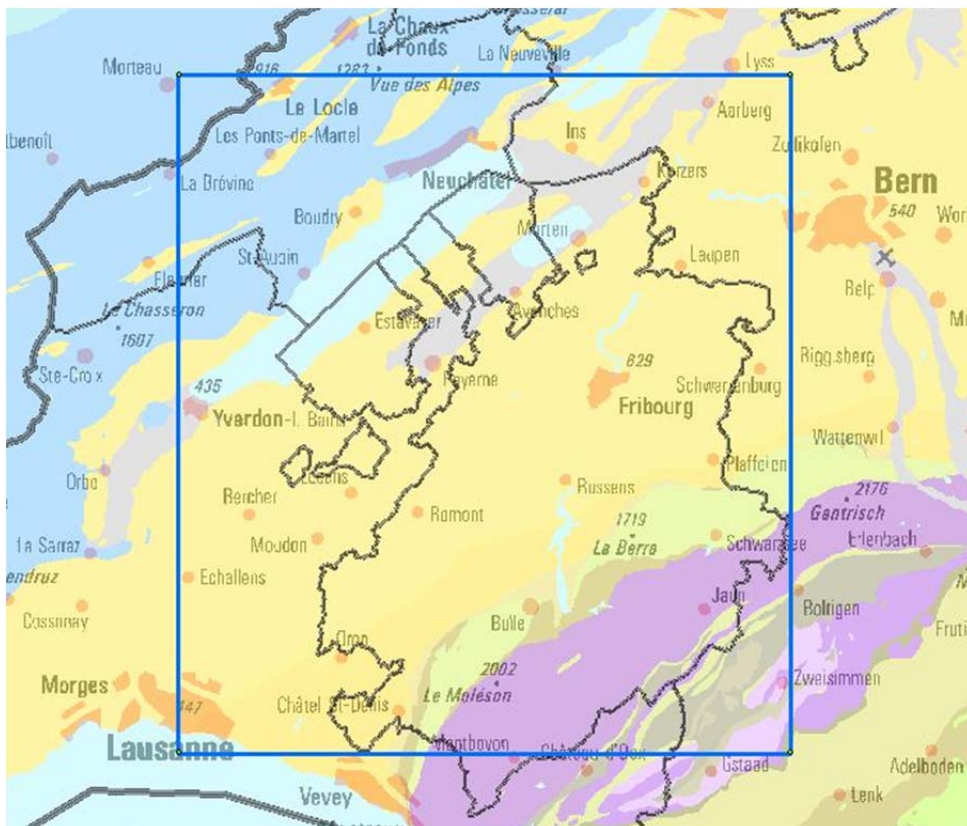


Figure 18. Vue d'ensemble montrant l'extension du modèle géologique au-delà des limites du Canton de Fribourg.

4.3.2 Stratigraphie du modèle

La pile stratigraphique du modèle est présentée dans la figure 19, illustrant les différentes unités géologiques qui y ont été modélisées. Comme mentionné plus haut, en raison de la faible épaisseur de certaines formations au regard de l'échelle du modèle, le Mésozoïque y a été regroupé en 5 unités: le Crétacé, le Malm, le Dogger, le Lias et le Trias.

En raison de l'absence d'interprétation solide et consistante des différentes unités de Molasse ainsi que des remplissages quaternaire sur les lignes sismiques, ces derniers ont été groupés en une seule unité tertiaire. A l'image de son interprétation sur les profils de l'Atlas sismique suisse, le permocarbonifère, quant à lui, est divisé dans le modèle en deux unités : « sédiments permocarbonifères possibles » (en gris foncé) et « extension incertaine des sédiments permocarbonifères » (en gris clair). Finalement, le socle cristallin (unité « Basement ») remplit l'espace restant du modèle jusqu'à sa limite inférieure.

Le modèle ne montre que la profondeur, la géométrie et les variations d'épaisseur latérale de ces unités qui sont chacune traitées comme un seul bloc sans distinction interne. Par conséquent, que ce soit dans l'unité du tertiaire ou dans les cinq unités du Mésozoïque, les sous-unités d'aquifères décrites plus haut ne sont pas distinguées individuellement dans le modèle, mais incorporées dans les unités stratigraphique qui les contiennent. Cependant, pour le Mésozoïque du moins, ces unités et leurs sous-divisions sont subparallèles et se comportent de façon identique au travers du modèle. Pour le Tertiaire, sédiments dans lesquels les variations latérales sont plus importantes, les informations à disposition ne nous permettent pas de distinguer et de modéliser avec suffisamment de précision les intervalles d'aquifères qui s'y trouvent.

Le prolongement latéral de unités du modèle au sein de ce dernier est illustré sur la figure 20, qui représentant une coupe arbitraire d'orientation NO-SE. A l'image de la Figure 5 au niveau du plateau molassique, on y distingue clairement l'important épaissement de la Molasse en direction du front alpin. A proximité du lac de Neuchâtel, la base de la molasse se trouve à environ 70m au-dessus du niveau marin, alors que dans la région de Bulle, elle se situe à plus de 2300m sous ce dernier. Cela représente donc un épaissement de l'ordre de 2.4km sur une distance horizontale d'environ 30km, illustrant les énormes volumes que représentent ces sédiments tertiaires sur le Plateau suisse. La figure 20 montre également les unités subparallèles du Mésozoïque plongeant de manière relativement constante dans la même direction. A cet endroit du modèle, on retrouve en dessous la présence supposée du permocarbonifère (et de son extension possible). La base du modèle est ensuite comblée par le socle cristallin.

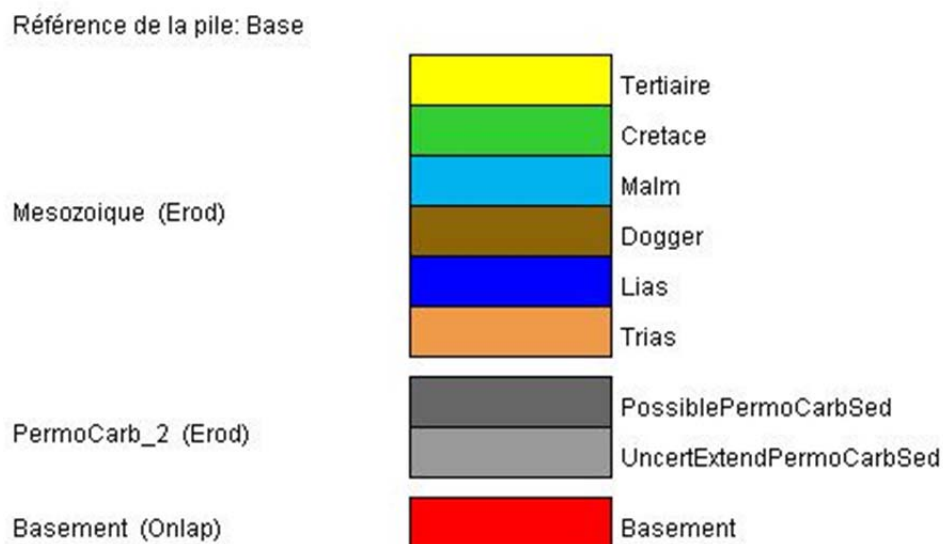


Figure 19. Pile stratigraphique du modèle géologique.

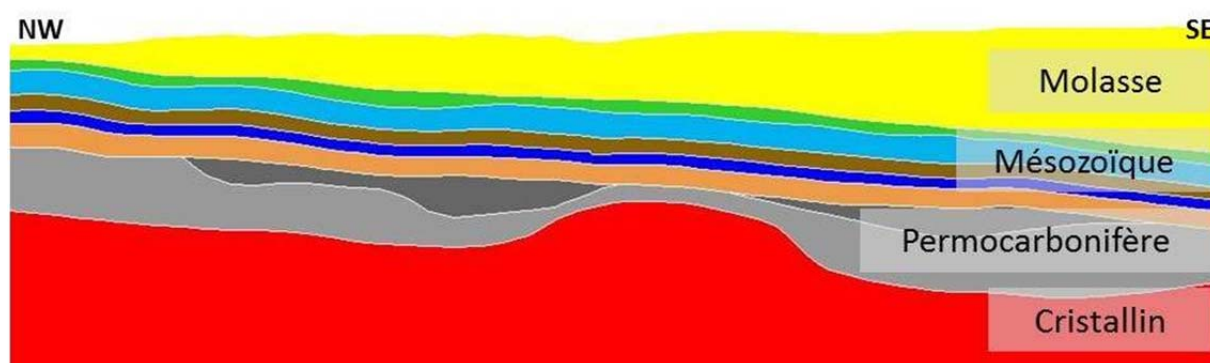


Figure 20. Profil arbitraire d'orientation NO-SE au travers du modèle représentant le comportement latéral des différentes unités stratigraphiques modélisées avec l'épaississement de la Molasse et le plongement régulier des unités subparallèles du Mésozoïque en direction du front alpin.

4.3.3 Les failles du modèle

Une trentaine de failles principales ont été modélisées, (*Figures 21 et 22*) correspondantes entre autres aux systèmes les plus importants mentionnés plus haut, à savoir la zone de Fribourg, le réseau de la faille de la Lance, le graben de la Broye

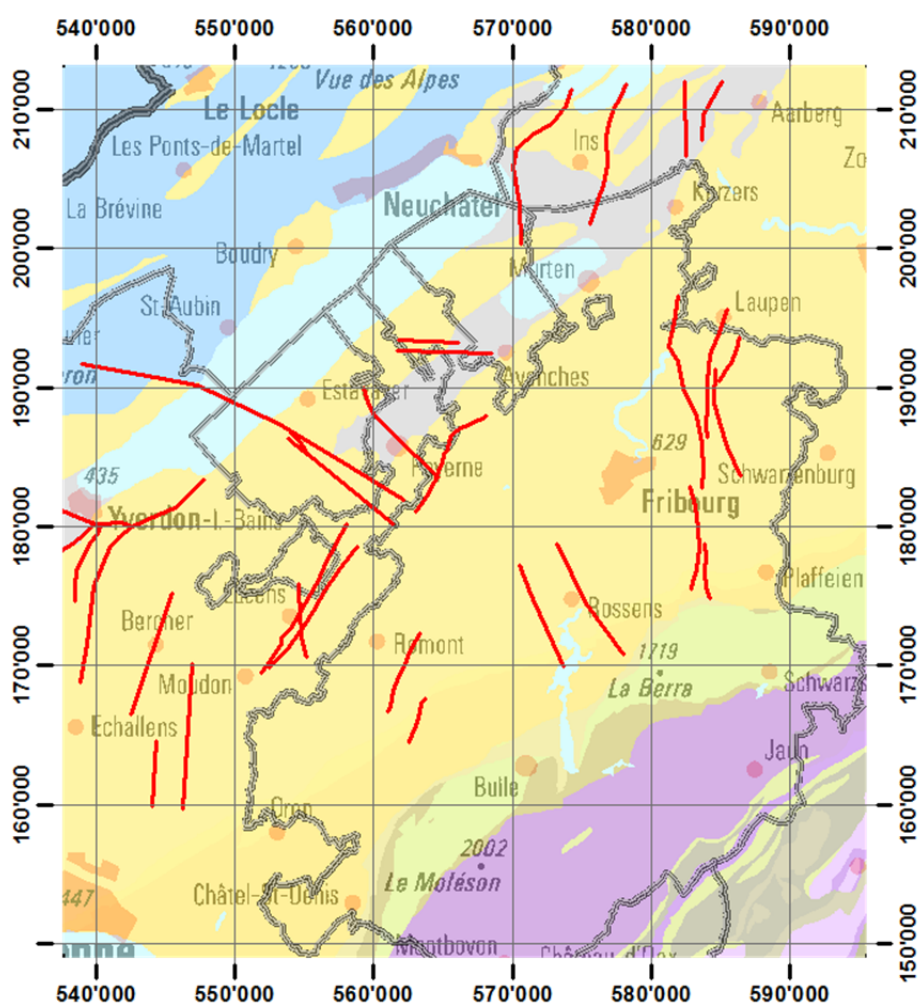


Figure 21. Vue en plan de la traces des failles modélisées au toit du Mésozoïque.

Dans la plupart des cas, les principales données dont nous disposons sur les failles se résument à des traces interprétées au niveau du toit du Mésozoïque (Mosar et al., 2011). Bien que donnant des informations quant à leurs directions, ces informations ne donnent en revanche aucune indication sur les pendages ou sur le rejet de ces failles. Dans certains cas, ces paramètres ont pu être définis par la correspondance de ces failles avec leur interprétation sur certains profils sismiques, ce qui a permis d'en extrapoler les valeurs. Dans le cas où aucune association n'était possible entre les failles interprétées à la fois sur des surfaces en profondeur et sur des profils sismiques, ces valeurs ont alors été imposées selon la règle suivante : Pour les failles à caractère normales ou inverses d'orientation parallèle aux grandes structures compressives (SO-NE), un pendage compris entre 70 et 80° a été choisi. Les failles à caractère plutôt décrochant (orientées grossièrement N-S ou NO-SE) ont été considérées verticales, soit avec un pendage de 90°. Toutefois, les valeurs de rejets restant inconnues, aucun rejet n'a été pour le moment considéré dans le modèle.

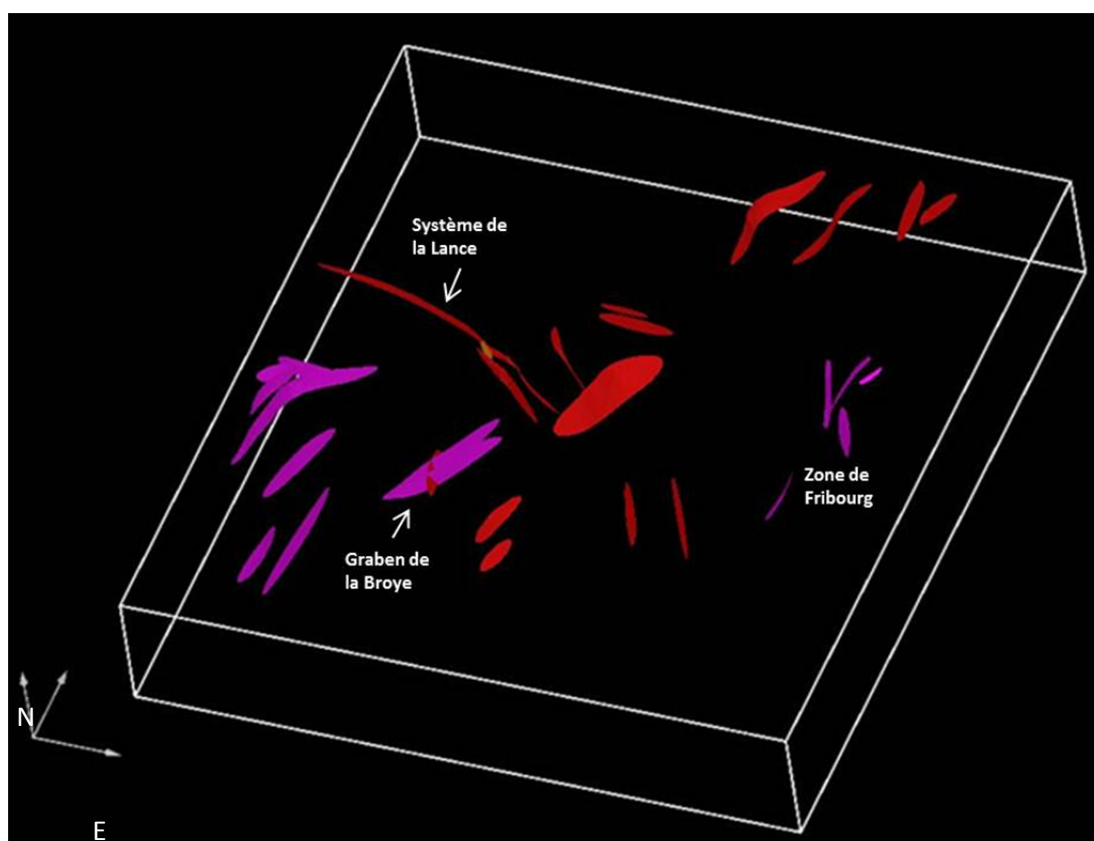


Figure 22. Représentation en 3 dimensions des failles modélisées.

4.4 Résultats du modèle géologique

Pour visualiser les résultats du modèle, une série de coupes passant par les villes de Morat, Bulle et Fribourg ont été extraites de ce dernier (*Figures 23, 24 et 25*). La figure 26 offre, quant à elle, une visualisation en 3 dimensions du Mésozoïque formant le sous-sol du plateau molassique fribourgeois.

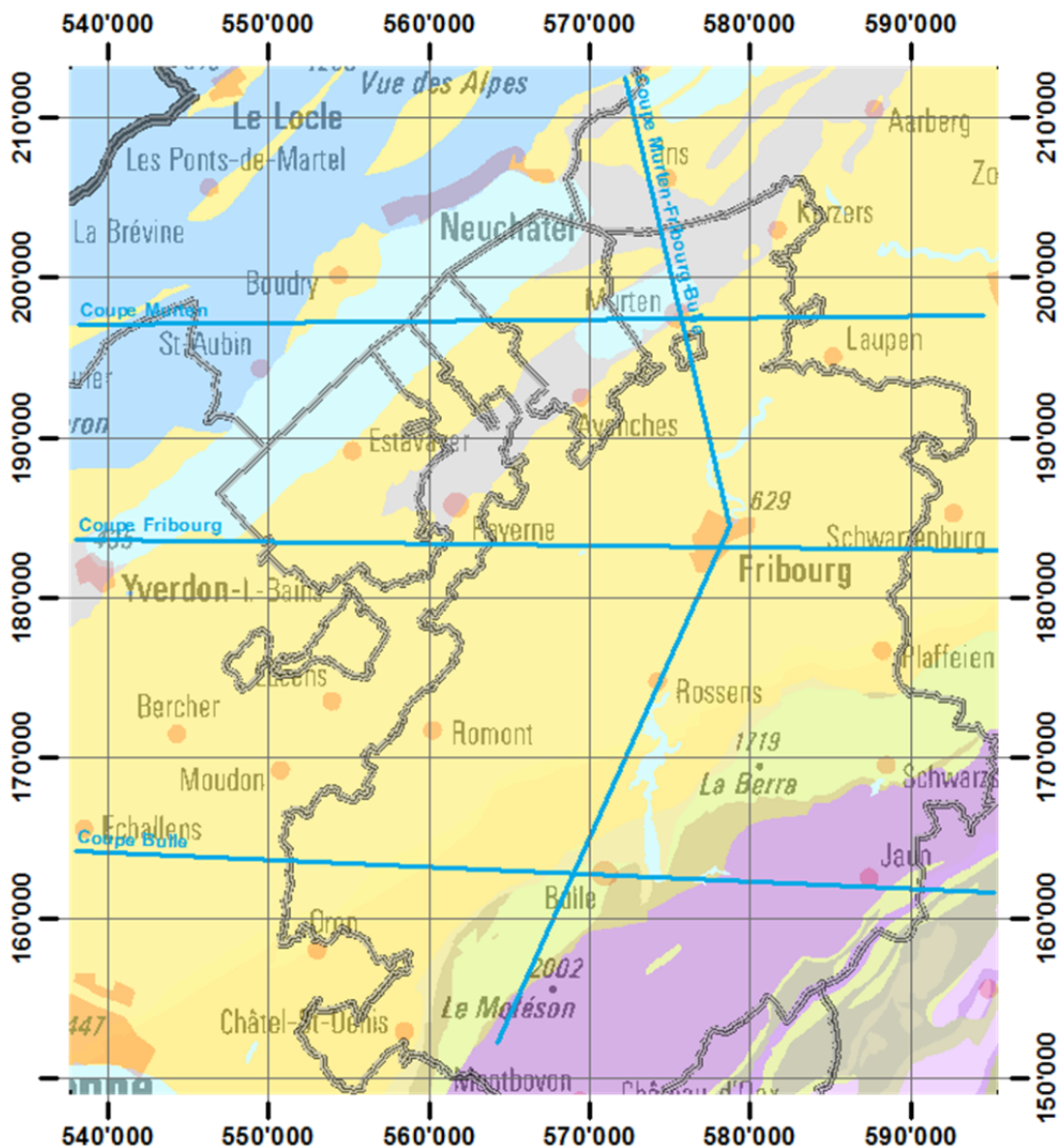


Figure 23. Localisation des coupes des figures 24 et 25.

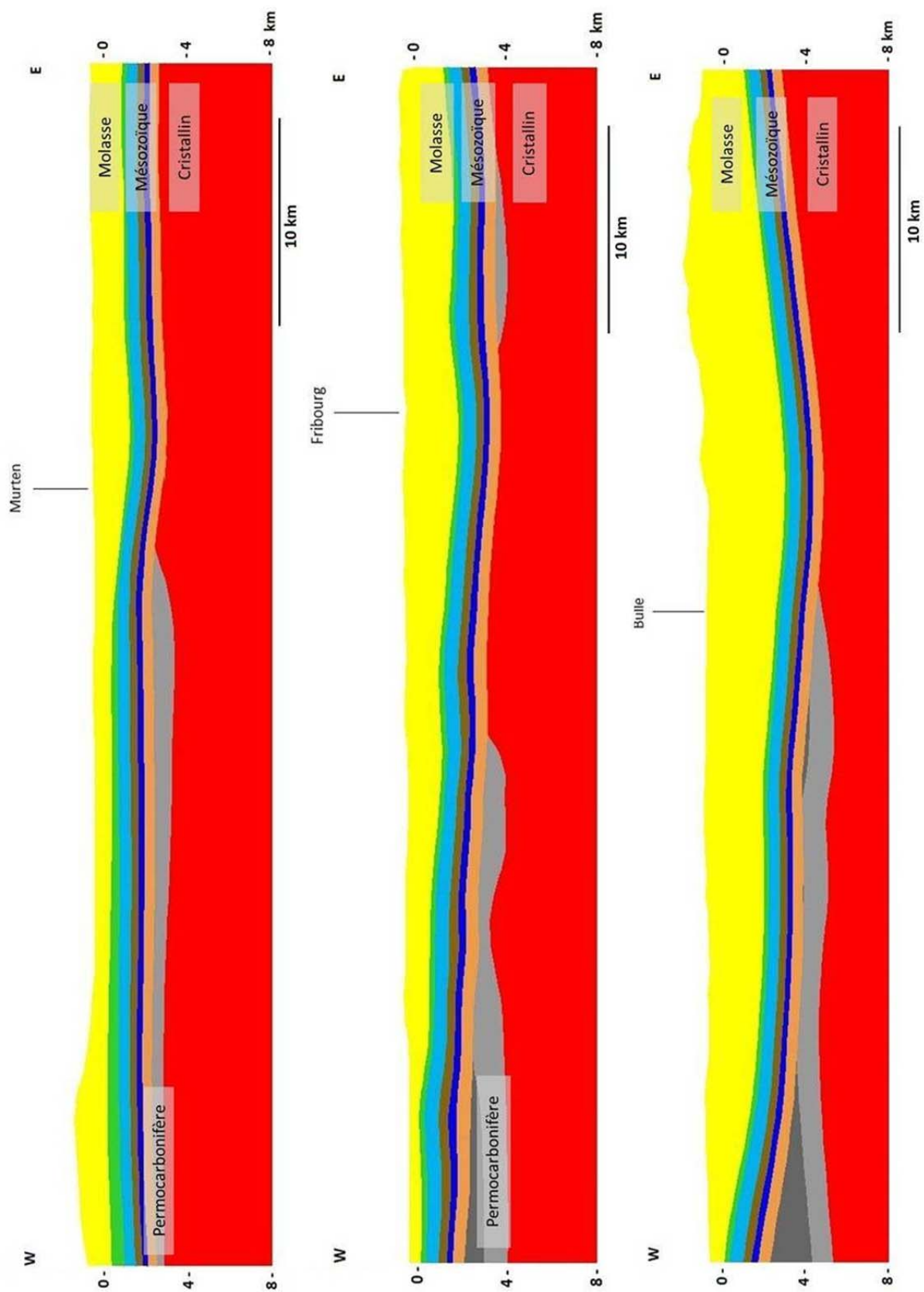


Figure 24. Coupes O-E extraites du modèle géologique, passant par les villes de Morat, Fribourg et Bulle. Voir figure 23 pour leur localisation géographique.

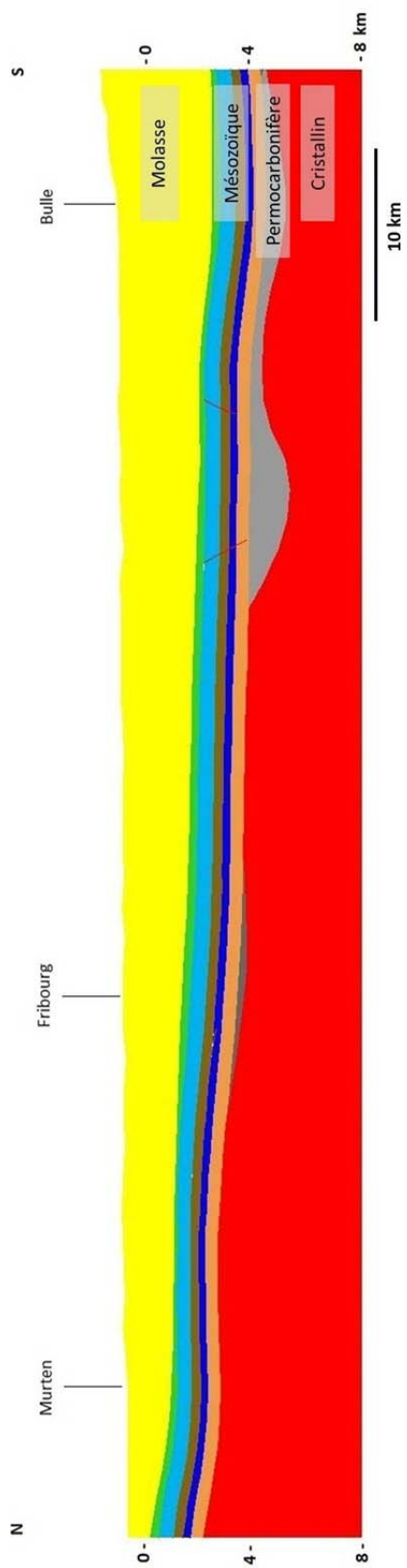


Figure 25. Coupe N-S extraite du modèle géologique, passant par les villes de Morat, Fribourg et Bulle. Voir figure 23 pour sa localisation géographique.

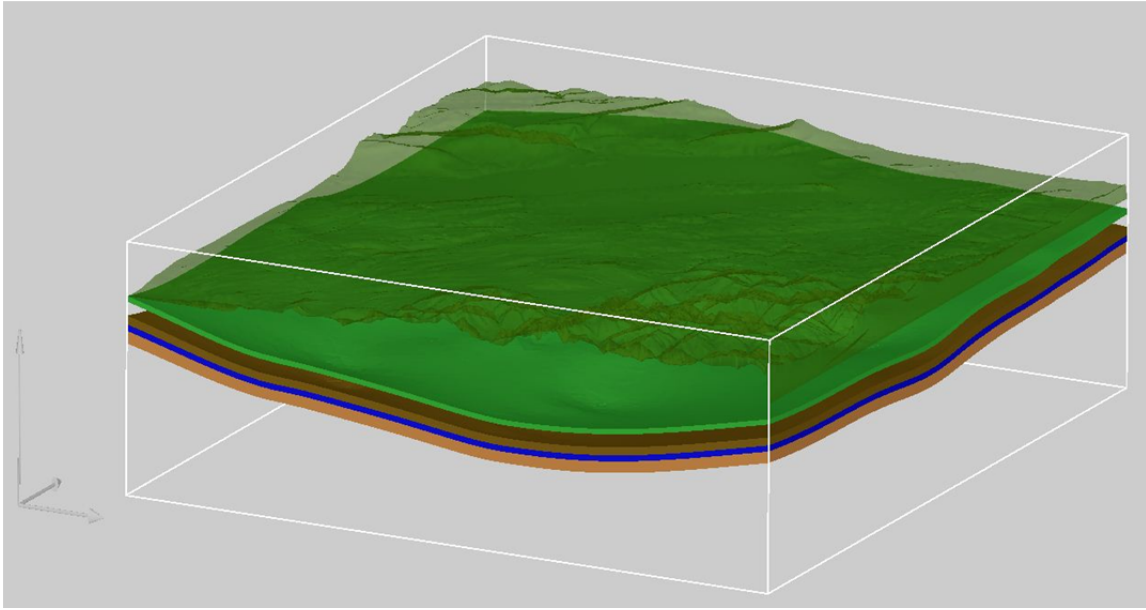


Figure 26. Vue en 3 dimensions depuis le SE du Mésozoïque dans le modèle. Les remontées de ces formations sur les bords du modèle sont dues à des « effets de bords » et ne représentent donc pas la réalité.

Epaisseur [m]

	Crétacé	Malm	Dogger	Lias	Trias
Murten	210.8	516.2	319.0	240.3	455.8
Fribourg	235.5	575.5	353.0	264.4	496.5
Bulle	228.4	562.3	349.8	263.4	499.8

Tableau 3 Epaisseurs (issues du modèle géologique) des formations contenant les principaux aquifères régionaux sous les 3 villes d'intérêts..

4.5 Validation et incertitudes

Sans pour autant pouvoir les quantifier, il est néanmoins possible de discuter de manière qualitative les incertitudes liées au modèle géologique. Ces dernières résultent principalement de la quantité, de la répartition et de la qualité des données à disposition.

Une analyse des anomalies gravimétrique résiduelles sur la zone d'étude, effectuée sur la base des points gravimétriques de l'atlas suisse et présentée dans le prochain chapitre, permet dans une certaine mesure de valider certains aspects du modèle.

4.5.1 La quantité et la répartition des données

Les programmes de modélisation permettent, par des algorithmes spécifiques, de générer des structures dans l'espace par interpolation et extrapolation à partir de points de contrôles que sont en général les forages et les profils sismiques. Par conséquent, plus la densité de point de contrôles est importante, moins le programme a de liberté au niveau de la propagation de ces informations dans le reste du volume, ce qui tend à y limiter la marge d'erreur. La quantité de données est donc un aspect important quant à la qualité du modèle. Cependant, leur répartition est également déterminante. En effet, l'abondance de données sur une zone du modèle permettra de relativement bien caler ce dernier, mais ne pourra pas compenser le manque d'information dans une autre région. Il est donc important que ces données soient répartis de manière la plus homogène possible au travers de la zone d'étude. Chaque type de donnée (forages, profils sismiques) apportant son propre lot d'information, le cas idéal revient à une répartition homogène d'un grand nombre de chaque type de données au travers de la zone à modéliser. Bien évidemment, ces conditions ne sont que très rarement remplies. Il faut donc faire au mieux avec les informations disponibles et utilisables, tout en gardant en tête que le degré d'incertitude d'un modèle peut ainsi varier d'une région à l'autre.

Dans le cas présent, comme le montrent les figures 15 et 17 pour la répartition des forages et des lignes sismiques respectivement, on observe que la couverture est globalement bonne, en particulier sur le plateau molassique. Cependant, si l'on regarde chaque type de donnée de manière indépendante, on se rend compte que les forages (et en particulier les forages profonds interceptant la plupart des formations géologiques qui nous intéressent) se concentrent principalement dans la partie occidentale du modèle.

De même, la couverture sismique paraît plus dense dans la zone nord-est du modèle. Mais cette zone est en réalité couverte par des lignes issues du rapport de

Mühleberg qui sont en temps double et que nous avons donc dû convertir dans un domaine de profondeur pour pouvoir les exploiter. Comme discutée plus haut, cette conversion amène à elle seule également un certain degré d'incertitude qui se répercute dans le modèle lui-même. Par conséquent, les profondeurs des formations géologiques les plus profondes dans la région nord-est du modèle sont à considérer avec un certain recul.

4.5.2 La qualité des données

La qualité des données exploitables joue également un rôle important quant au degré d'incertitude qui qualifie un modèle.

L'ancienneté ainsi que le but pour lequel étaient initialement prévus les forages (pétroliers ou autres) utilisés y est pour beaucoup, d'une part parce que les données se perdent, se distillent ou s'altèrent avec le temps, d'autre part parce que certaines mesures n'ont tout simplement pas été acquises à l'époque car encore insuffisamment développées, trop onéreuses ou tout simplement inutiles à acquérir pour le but premier du forage. En effet, certaines mesures sont souvent acquises pour répondre à des investigations bien spécifiques dans un contexte exploratoire précis. Elles ne sont donc pas forcément toujours utilisables dans d'autres domaines d'applications.

Dans un contexte de modélisation, la profondeur des forages à disposition peut également se juger en termes de qualité de données puisque l'absence d'informations stratigraphiques pour les formations géologiques les plus profondes porte également préjudice à la validité et la précision du modèle. Ce cas de figure est particulièrement présent ici pour les formations de la base du Mésozoïque (Trias) ainsi que pour les formations sous-jacentes (sédiments permocarbonifères, socle cristallin).

Le lien entre qualité et ancienneté des données est encore plus flagrant en ce qui concerne les données sismiques. En effet, les méthodes d'acquisition et les algorithmes de traitement de ces mesures évoluent très vite, rendant très rapidement obsolètes des enregistrements vieux de quelques années seulement. Dans certains cas, et en particulier quand les données d'acquisition brutes peuvent être récupérées en format digital, il est possible d'en améliorer légèrement le rendu en les retraitants à nouveau avec des algorithmes plus modernes.

Tout comme pour les forages également, la qualité en profondeur des lignes sismiques dépend fortement du but (ou de la profondeur d'investigation) pour lequel la campagne d'acquisition sismique d'époque avait été paramétrée. Les lignes sismiques utilisées pour la conception de ce modèle correspondent à d'anciennes lignes pétrolières réinterprétées. A l'époque, cette prospection se faisait principalement au niveau des sédiments tertiaires et mésozoïques. Les fréquences

de tirs étaient donc paramétrées de façon à illuminer au mieux ces profondeurs. Par conséquent, les résultats de ces enregistrements ne fournissent que très rarement des informations fiables et de qualité à des profondeurs plus importantes. C'est une des raisons pour lesquelles aussi peu d'informations sur le socle cristallin et les sédiments permocarbonifères peuvent être extraites de ces lignes sismiques. Il en résulte donc un certain niveau d'incertitude pour ces profondeurs dans le modèle, et en particulier pour ce qui est de l'existence, de la localisation et de l'extension de ces fossés permocarbonifères ainsi que d'éventuels accidents tectoniques majeurs affectant le socle cristallin.

Finalement, la précision et la finesse des interprétations de toutes ces données impacte aussi sur la qualité des informations qu'elles fournissent. Toutes les données interprétées de puits ou de sismique au travers de la zone du modèle ne présentaient pas le même niveau de détail.

4.6 Gravimétrie

La gravimétrie est une méthode géophysique qui consiste à mesurer de manière relative, des contrastes de densité présents dans le sous-sol. Pour se faire, la composante verticale du champ de gravité terrestre est mesurée en différents points répartis sur la zone à étudier.

De par la nature de cette méthode, chaque point de mesure ($g_{\text{mesuré}}$) est influencé par toute une série d'effets régionaux plus ou moins importants en fonction de leur éloignement et de leur densité. Il est donc nécessaire de corriger ces effets par l'intermédiaire d'un traitement approprié. Ce traitement implique entre autre la correction des effets d'altitude, de latitude et de topographie. Une valeur de densité théorique de 2.67g/cm^3 , représentative de la croûte terrestre dans son ensemble, est en outre assignée en guise de référence.

A ces corrections se soustrait ensuite une valeur de « g théorique », ($g_{\text{théorique}}$), correspondant à la valeur de gravité au niveau d'un ellipsoïde de référence, (une forme géométrique simplifiée approchant le géoïde terrestre), pour obtenir une anomalie de Bouguer (g_{Bouguer}).

$$g_{\text{mesuré}} + \text{corrections} - g_{\text{théorique}} = g_{\text{Bouguer}}$$

Ainsi corrigée de tous les effets connus, les variations gravitaires que présente une carte d'anomalies de Bouguer ne sont donc plus liées qu'à des anomalies de densité

présentes dans le sous-sol. Ces anomalies, positives ou négatives ne sont que relative puisqu'elles se réfèrent à une densité théorique de 2.67g/cm³.

Bien que déjà « interprétable » à ce stade, l'anomalie de Bouguer peut ensuite être affinée et corrigée des tendances régionales en lui soustrayant un « g régional » ($g_{\text{Régionale}}$). De par les différentes manières de concevoir ces tendances régionales, laissées au libre choix de l'opérateur en fonction du cas de figure, la carte d'anomalies résiduelles ($g_{\text{Résiduelle}}$) obtenue demeure une interprétation parmi d'autres possibles.

$$g_{\text{Bouguer}} - g_{\text{Régionale}} = g_{\text{Résiduelle}}$$

A ceci s'ajoute le principe d'équivalence faisant foi dans cette méthode, stipulant qu'il n'est pas forcément possible de distinguer l'origine d'une anomalie gravitaire en termes de taille et de profondeur. L'effet d'une structure diminuant en fonction du carré de sa distance ($1/d^2$), une structure étendue à faible impacte gravitaire mais située proche de la surface (ex. dépôts quaternaires) peut générer la même anomalie qu'une structure plus ramassée à fort impacte gravitaire et située à plus grande profondeur (*Figure 27*). La non-unicité de cette méthode en fait une méthode principalement complémentaire à d'autres méthodes telles que la sismique réflexion. Elle a néanmoins l'avantage de pouvoir mettre en évidence certaines structures sur des surfaces relativement étendues, et ce à moindre coût comparé à d'autres méthodes géophysiques de surface telles que la sismique réflexion.

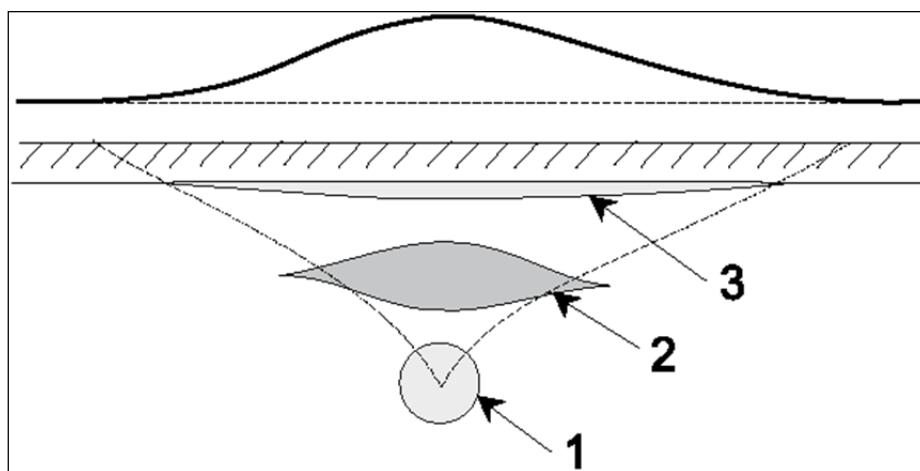


Figure 27. Illustration du principe d'équivalence en gravimétrie : Différentes structures, de différentes tailles et de différentes densités (1, 2 et 3), situées à des profondeurs différentes, peuvent générer la même anomalie gravifique (d'après Giroux et Chouteau, 2008).

Une carte d'anomalies de Bouguer ou une carte d'anomalie résiduelle permettent donc de mettre en évidence des zones présentant des anomalies de densité relatives présentes dans le sous-sol. Une anomalie positive va témoigner d'une zone à densité globale plus dense que présumée et inversement pour une anomalie négative. A titre d'exemples ; un remplissage quaternaire moins compacté (et donc moins dense) que du sédiment tertiaire pourra créer une anomalie négative. A l'inverse, une remontée granitique (horst) pourra créer une anomalie positive.

Cependant, comme chaque mesure est influencée par la totalité de son environnement gravitaire, certaines anomalies peuvent s'amoinrir voire complètement s'annuler les unes avec les autres. Il convient donc, comme dit plus haut, de considérer cette méthode comme complémentaire à d'autres méthodes d'évaluation du sous-sol.

Dans le cadre de cette étude, nous avons obtenu des points de mesures gravimétriques (g_{Bouguer}) de l'atlas suisse de gravimétrie auprès de Swisstopo au travers de la zone d'étude. Nous avons ensuite appliqué une correction régionale à cette anomalie de Bouguer de manière à redresser l'effet du plongement général des structures vers le sud-est, pour obtenir une carte d'anomalies résiduelles affranchie de cette tendance, sur laquelle nous avons superposé les interprétations des principaux systèmes de failles ainsi que des remplissages quaternaires majeurs (*Figure 28*). Sur cette carte, on peut distinguer les zones présentant un remplissage quaternaire important qui se traduisent par des anomalies négatives étroites, orientées SO - NE, parallèles aux directions d'écoulement des glaciers würmiens dans le nord du canton. Elles sont particulièrement évidentes dans la région du Seeland et dans la vallée de la Broye en amont du lac de Morat. D'autres anomalies sont également identifiables d'un point de vue géologique. Il s'agit des zones 1, 2 et 3 entourées sur la figure 28 et décrites ci-dessous :

Zone 1 :

Cette anomalie négative s'assimile de par son orientation N – S et sa signature modérée, au synclinal de Fribourg discuté plus haut. En effet, cette anomalie s'explique par la présence d'un remplissage tertiaire plus important et de densité inférieure aux formations du Mésozoïque qui forment cette dépression.

Comme le montre le profil sismique de la Figure 8, le système de failles de même orientation qui borde cette dépression à l'Est se situe lui sur une remontée du Mésozoïque liée à un épaissement du Trias évaporitique. Cette remontée de sédiments mésozoïques plus denses dans la molasse tertiaire moins dense est probablement responsable de l'anomalie positive qu'on observe à cet endroit.

Zone 2 :

Sans grande surprise, cette grosse anomalie négative située dans la région de Bulle correspond aux grands volumes de molasses subalpines pincés sous le front des Préalpes.

Zone 3 :

D'origine incertaine, cette anomalie négative est cependant assez fortement marquée. De par sa taille, elle pourrait être liée à la présence de sédiments permocarbonifères soupçonnés dans cette région, présentant des densités moindres que celles du cristallin qui les encaisse.

Le mouvement dextre de la faille de la Lance (grande faille d'orientation WNW – ESE dans la partie ouest du modèle) est connue pour décaler les calcaires du Mésozoïque de plusieurs centaines de mètres vers le sud-est sous le lac de Neuchâtel (Gorin et al., 2003 ; Clerc, 2006). Ce contact entre des calcaires massifs (anomalie positive) et la Molasse semble s'illustrer sur la carte de la figure 28 au sud de St-Aubin. De par les perturbations qu'il doit vraisemblablement engendrer à ses abords (fractures, brèches, failles secondaires), un rejet horizontal d'une telle ampleur rend cette faille particulièrement intéressante d'un point de vue géothermique en terme de perméabilité.

Les points de l'atlas gravimétrique suisse utilisés ici couvrent l'entier du territoire de manière régulière, mais selon une grille assez espacée. Par conséquent, seules les structures relativement larges ou présentant un fort contraste de densité peuvent espérer être identifiés. Des mesures gravimétriques plus fines, ciblées sur certaines zones d'intérêt, pourraient contribuer à mettre en évidence des détails gravifiques plus subtils. Il n'est par exemple pas impossible que certaines zones fortement fracturées (diminuant ainsi localement la densité globale d'une roche) puissent être identifiées par cette méthode.

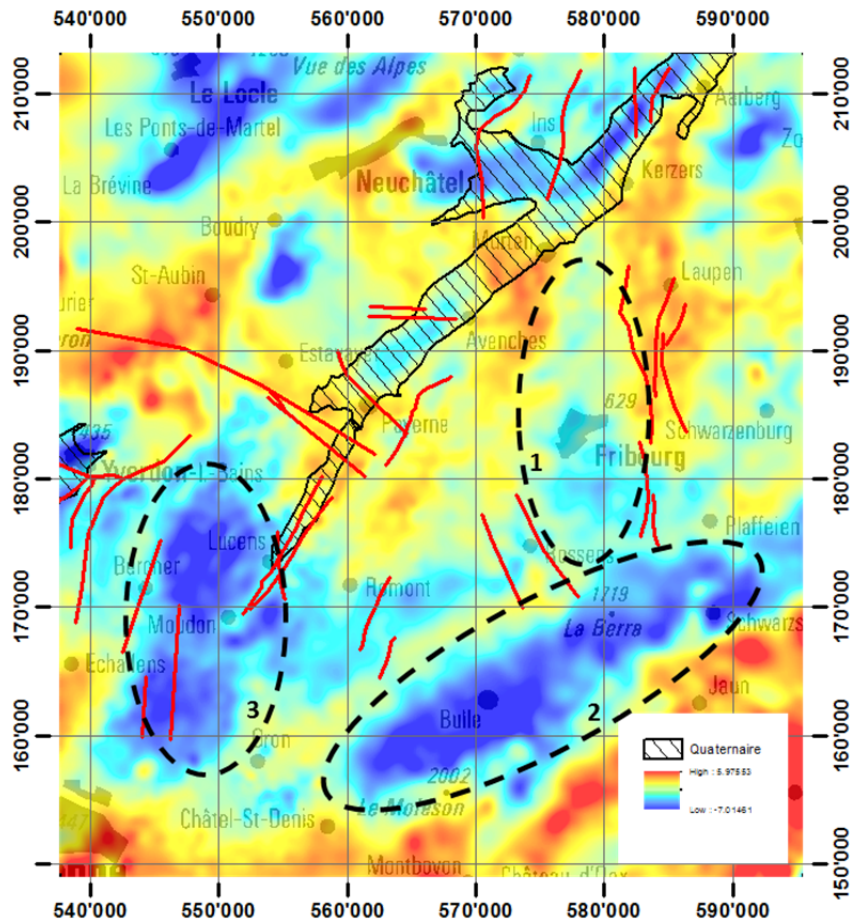


Figure 28. Carte d'anomalies gravifiques résiduelles sur la région du Canton de Fribourg (couleur chaudes : anomalies positives ; couleurs froides : anomalies négatives), avec la trace des principaux systèmes de failles de la région (lignes rouges) et les remplissages quaternaires importants (zone hachurée)

5. Modèle de température

Ne disposant pas des programmes informatiques nécessaires à l'établissement d'un modèle de température à l'université de Neuchâtel, cet exercice a été confié auprès de GEOWATT AG.

5.1 Présentation des données de température

De nombreuses données de températures sont présentes sur le domaine du modèle (Figure 29). Ces données ont été trouvées pour une part dans la base de donnée de GEOWATT AG, d'autre part dans la compilation des données géothermiques Suisse

(Schärli et Kohl, 2002) ainsi que dans l'évaluation du potentiel géothermique du Canton de Fribourg (Vuataz et al., 2005).

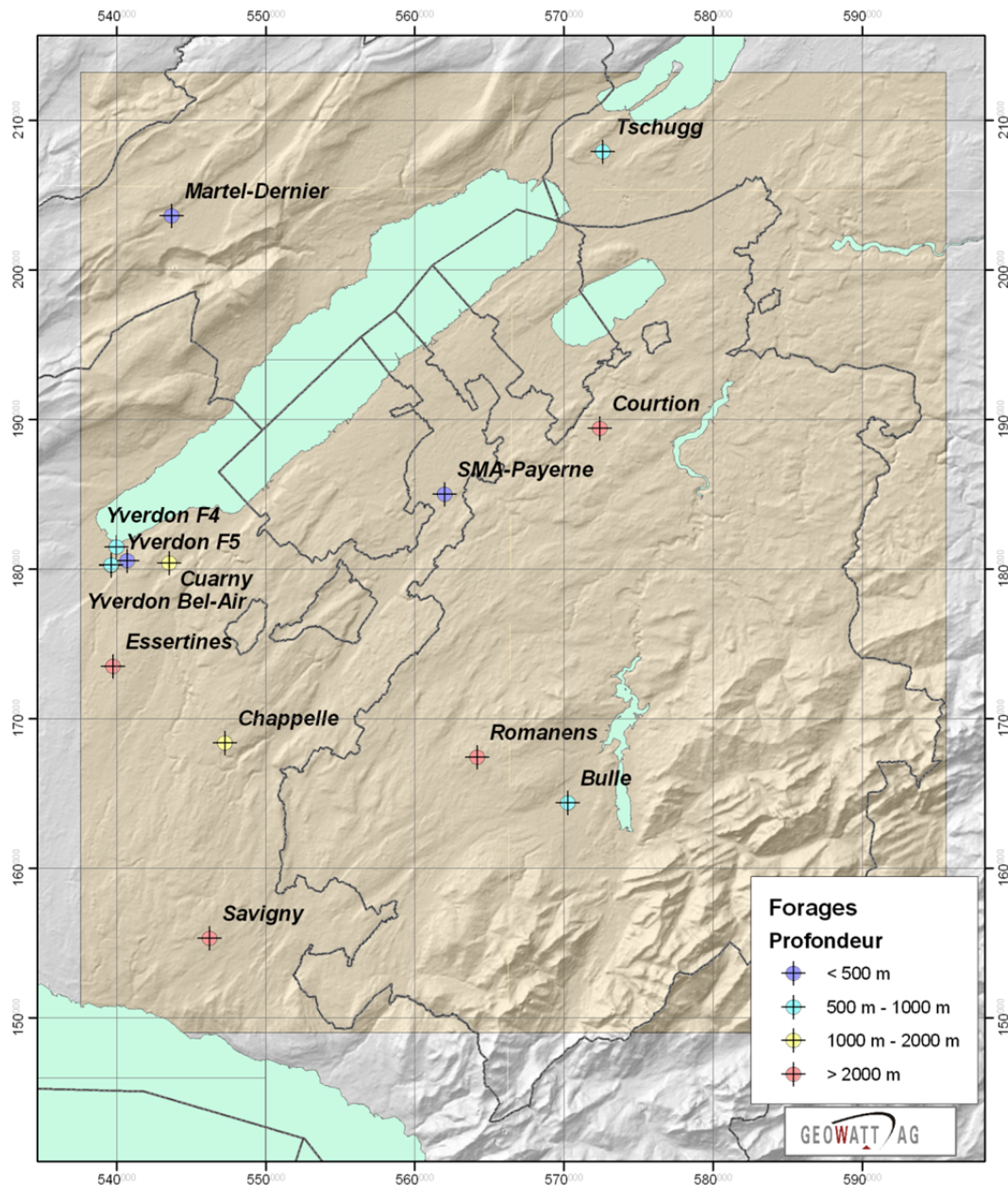


Figure 29. Profondeur des données de températures présentes sur le domaine. Le modèle est indiqué en orange.

Comme souligné par Vuataz et al. (2005) dans l'évaluation du potentiel géothermique du Canton de Fribourg, la qualité des données de température est très souvent plus que variable. On ne sait en général pas si l'équilibre thermique du puits était atteint lorsque la mesure a été prise. Nous avons donc tenté de quantifier la

qualité des données disponibles. La qualité que nous estimons provient de l'archive des données géothermiques suisse (voir Schärli et Kohl., 2002). Les résultats sont montrés dans la figure 30. Les données sont représentées à la fin du rapport (annexe 2).

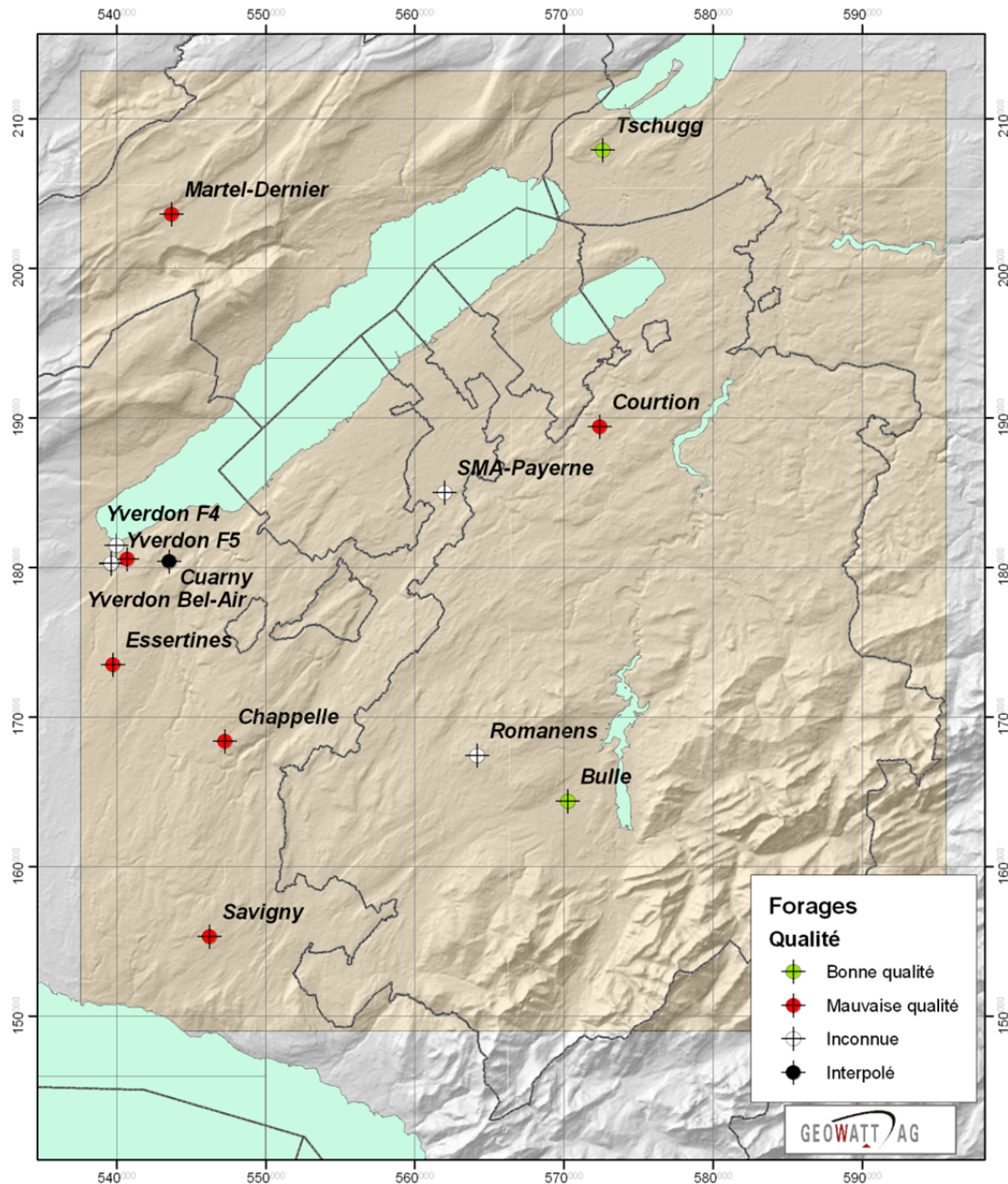


Figure 30. Qualité des données de températures présentes sur le domaine. Le modèle est indiqué en orange.

5.2 Calcul de la température dans le modèle

5.2.1 Concept de calcul

Le potentiel géothermique dépend de la température de chaque couche. Afin d'extrapoler les températures dans le sous-sol le plus précisément possible, des modèles numériques ont été développés. Ces modèles sont calibrés afin de reproduire au mieux les données de température existantes et permettent ainsi de prendre en compte la géologie en 3D, la température à la surface et le flux thermique naturel lors de la prédiction d'une température en profondeur. Une conductivité thermique est attribuée à chaque couche géologique, et une diminution de la conductivité thermique de chaque roche avec la profondeur est également prise en compte.

Afin de calculer la température en 3D et pour chaque couche, un maillage est construit sur la base des modèles géologiques 3D. Le modèle numérique aux éléments finis obtenu par ce procédé prend ainsi en compte les principales couches géologiques présentes dans les modèles géologiques (les couches les plus fines, qui ne jouent qu'un rôle mineur dans la répartition de la température, ne sont pas prises en compte dans le procédé).

Le processus de calcul nécessite plusieurs étapes qui seront ici brièvement décrites.

Maillage

Chaque modèle géologique est discrétisé afin d'obtenir un maillage en éléments finis. Cette étape est réalisée grâce à différents outils numériques internes développés par GEOWATT AG. Chaque interface géologique est transformée en une grille puis un modèle en 3D est extrudé selon la méthode dite du « Layer Cake ». Il en résulte un maillage formé d'hexaèdres semi régulier (*Figure 34*).

Calcul de la température

Le calcul est basé sur le code Éléments Finis FRACTure (Kohl und Hopkirk, 1995). Les résultats présentés, en l'absence de données hydrogéologiques, se basent sur un modèle diffusif de la température, avec couplage de la conductivité thermique et de la température, ce qui nécessite un processus de calcul itératif.

Les calculs thermiques nécessitent tout d'abord la définition de conditions de bord et de propriétés de matériaux. Les paramètres suivants sont ainsi nécessaires :

- La température à la surface, $T_0(z)$
- La conductivité thermique λ à 20°C pour chaque matériel (chaque couche géologique)
- Le taux de production de chaleur A pour chaque matériel (chaque couche géologique)
- Le flux thermique naturel q à la base du modèle.

Les processus advectifs (modification de la température à cause d'écoulements d'eau dans le sous-sol) ne sont pas pris en compte, dans la mesure où il n'existe pas assez de données permettant de les modéliser de manière satisfaisante sur les domaines concernés. Le principe des modèles est montré à la figure 31.

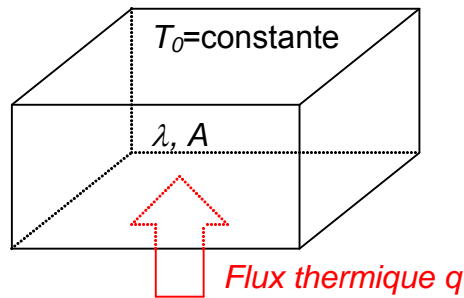


Figure 31. Principe de calcul de la température

La température à la surface est prise en compte avec dépendance avec l'altitude. La relation entre l'altitude et la température à la surface est donnée dans Signorelli et Kohl (2004).

Concernant les propriétés thermiques des roches (conductivités thermiques et production de chaleur), aucune donnée n'est disponible sur les domaines d'étude. Les paramètres utilisés dans les calculs proviennent de la base de données de Schärli et Kohl (2002) et de résultats de calibrations de modèles thermiques sur le plateau Suisse, en particulier de l'Atlas des Ressources Géothermiques de la Suisse Occidentale (Baujard et al., 2007). Les paramètres utilisés dans les calculs figurent dans le tableau 4.

Il est à noter que le Permocarbone incertain n'est pas pris en compte dans le calcul de la température.

	<i>Conductivité thermique</i> $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$	<i>Production de chaleur</i> $[\mu W \cdot m^{-3}]$
Tertiaire	2.8	0.5
Crétacé	2.6	0.5
Malm	2.5	0.5
Dogger	2.5	0.5
Lias	1.8	0.5
Trias	3.0	0.5
Permocarbonifère	2.0	0.5
Socle	4.0	2.5

Tableau 4. Propriétés thermiques à 20°C des roches utilisées dans les modèles. Les valeurs données décroissent avec la température.

Comme indiqué précédemment, la conductivité thermique d'un matériau dépend de sa température. Une valeur de conductivité thermique à 20°C est ainsi donnée en paramètre d'entrée et le code de calcul FRACTure détermine d'après une loi de décroissance hyperbolique quelle est la conductivité réelle de la roche à la température calculée, selon un processus itératif.

5.2.2 Conditions limites du modèle

Température à la surface

Afin de calculer la température en profondeur, il est nécessaire d'imposer une température moyenne à la surface. Cette température imposée dépend de l'altitude, suivant une relation linéaire. Nous utilisons dans ces calculs la relation établie par Signorelli (2004).

Les figures 32 et 33 montrent la topographie du modèle ainsi que la température imposée à la surface.

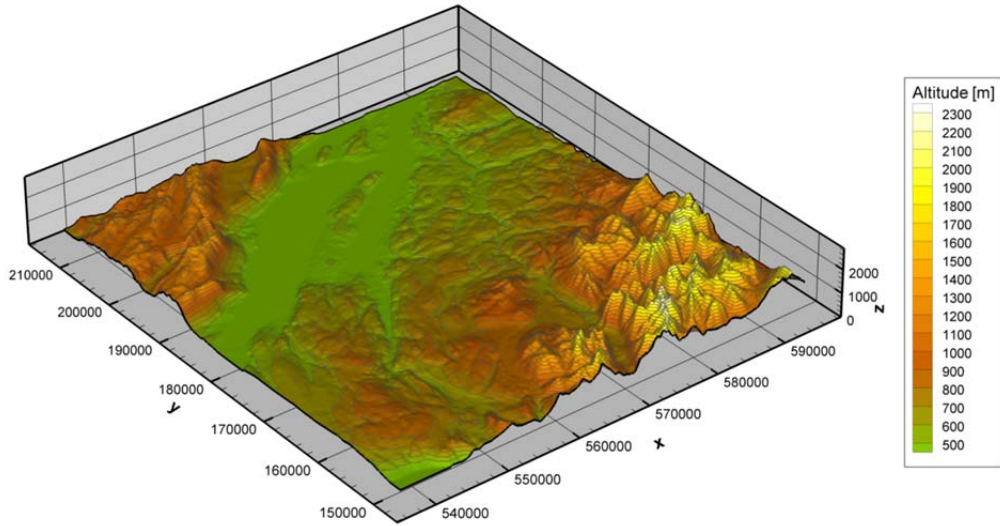


Figure 32. Topographie du modèle

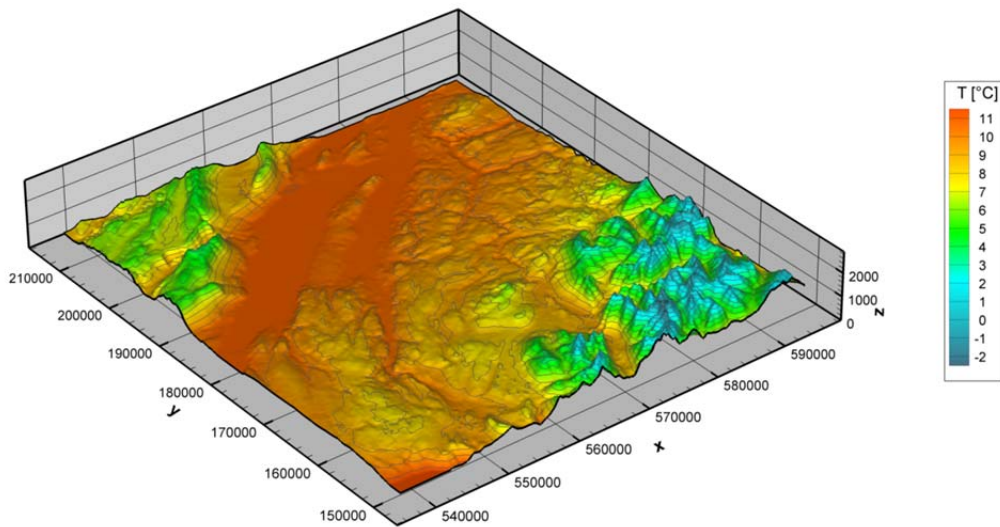


Figure 33. Température imposée à la surface du modèle

Flux thermique

Le flux thermique imposé en base du modèle est homogène. La valeur est calibrée autour d'une valeur de départ, dérivée de différentes sources, parmi lesquelles :

- L'atlas de la suisse (ETH et Swisstopo, 2004), mais qui fournit des données incomplètes sur le domaine considéré, et
- La carte du flux thermique en Suisse, publiée par Medici et Rybach, 1995 et reproduite par Vuataz, et al., 2005.

Les résultats de Medici et Rybach (1995) semblent aller en direction d'une valeur moyenne du flux thermique à la surface de l'ordre de 80-85 mW/m² sur le domaine considéré, avec une valeur plus élevée dans la région d'Yverdon-les-Bains.

5.2.3 Résultats

Maillage

Le maillage en éléments finis obtenu est représenté à la figure 34. Ce maillage contient 111'215 nœuds et 103'936 éléments.

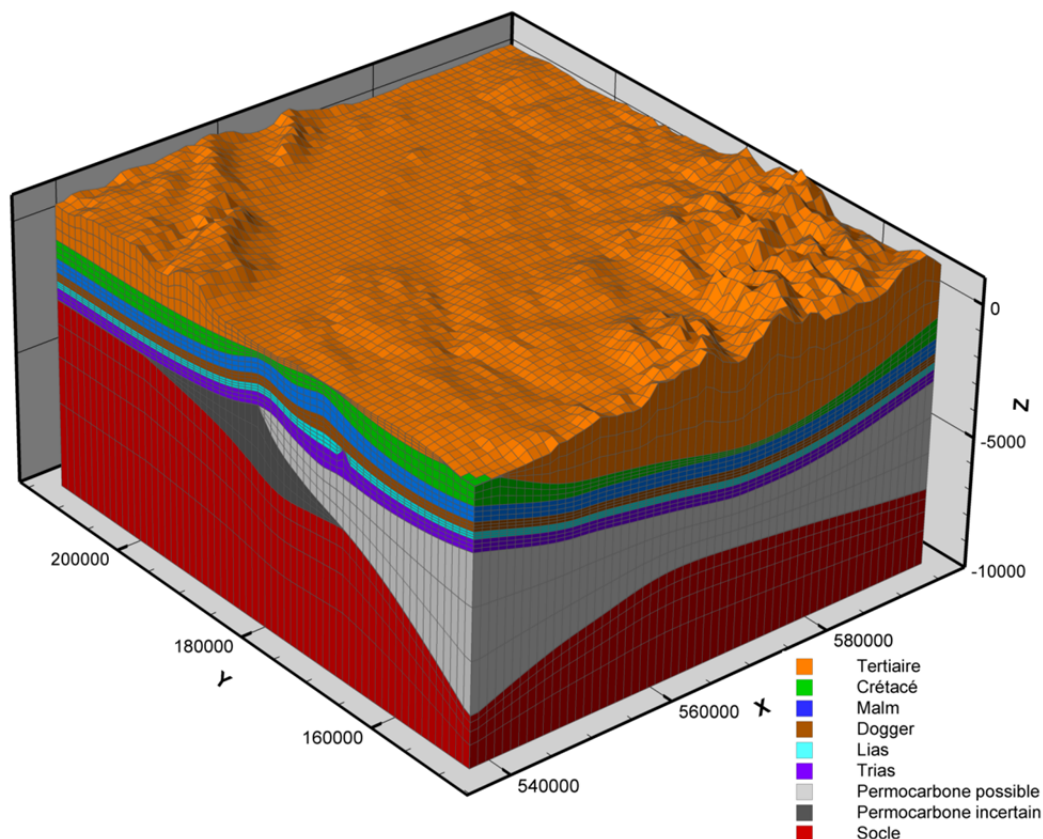


Figure 34. Maillage 3D du modèle de Fribourg, vue du Sud-est. Système de coordonnées CH1903+.

Calibration

La calibration effectuée consiste à modifier la valeur du flux thermique à la base du modèle afin de reproduire au mieux les mesures de températures disponibles sur le domaine.

Les résultats de notre calibration sont représentés en annexe à la fin du rapport (annexe 2) et montrent un flux thermique à la base du modèle (10 km sous le niveau de référence) de 73 mW/m². La valeur résultante à la surface dépend de l'épaisseur relative de cristallin et des sédiments, le cristallin ayant un taux de production de chaleur plus important que les sédiments. Ainsi, une valeur de 73 mW/m² à -10 km équivaut à une valeur de flux thermique à la surface de 84 mW/m², en supposant 3 km de socle et 7,5 km de sédiments, et de plus de 94 mW/m², en supposant 8 km de socle et 2,5 km de sédiments. Ces valeurs sont tout à fait en accord avec les estimations de Medici et Rybach (1995).

Température calculée

La température calculée dans le modèle est représentée à la figure 35. Il est important de remarquer le fort effet du permocarbonifère sur la température à la base du modèle. En effet celui-ci agit comme un isolant, permettant des températures plus élevées sous ce dernier et un gradient thermique plus faible au-dessus. Ainsi, malgré un flux thermique homogène imposé sur le domaine, le flux thermique résultant à la surface est plus élevé au nord-est du modèle qu'au sud par exemple, du fait de la différence d'épaisseur de sédiments permocarbonifères.

Les résultats proposés dans la carte du flux thermique Suisse de Médici et Rybach (1995) sont donc confirmés par ce modèle.

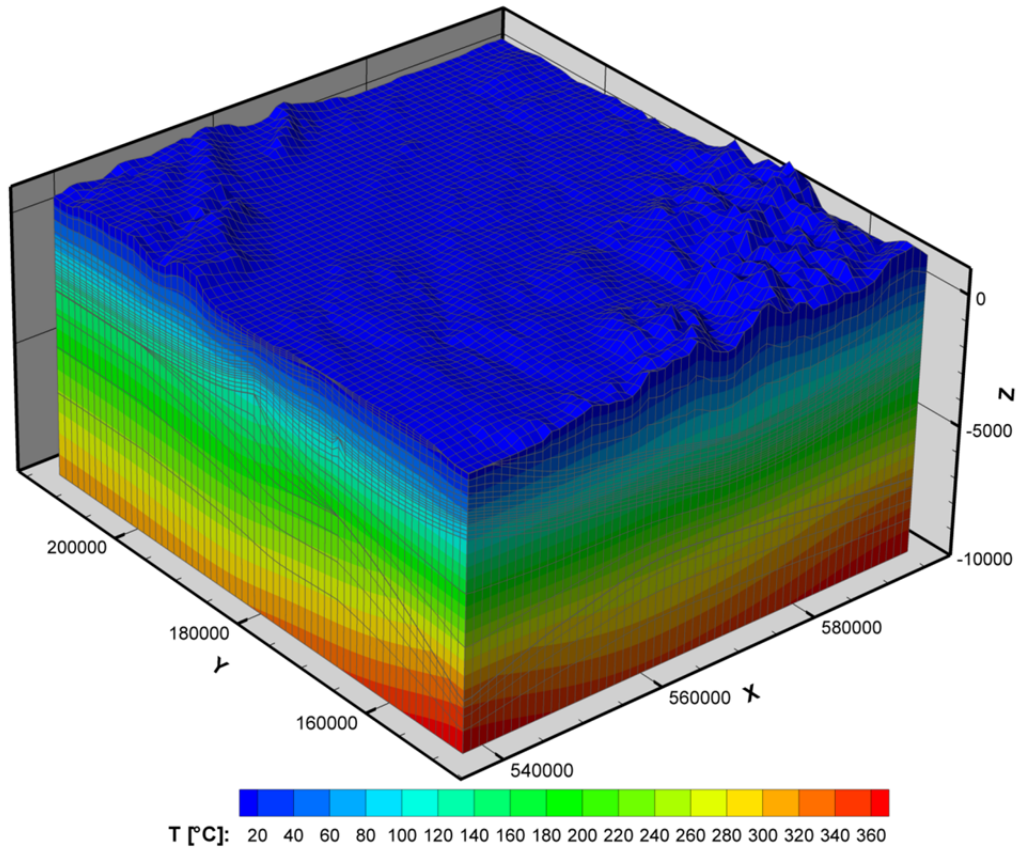
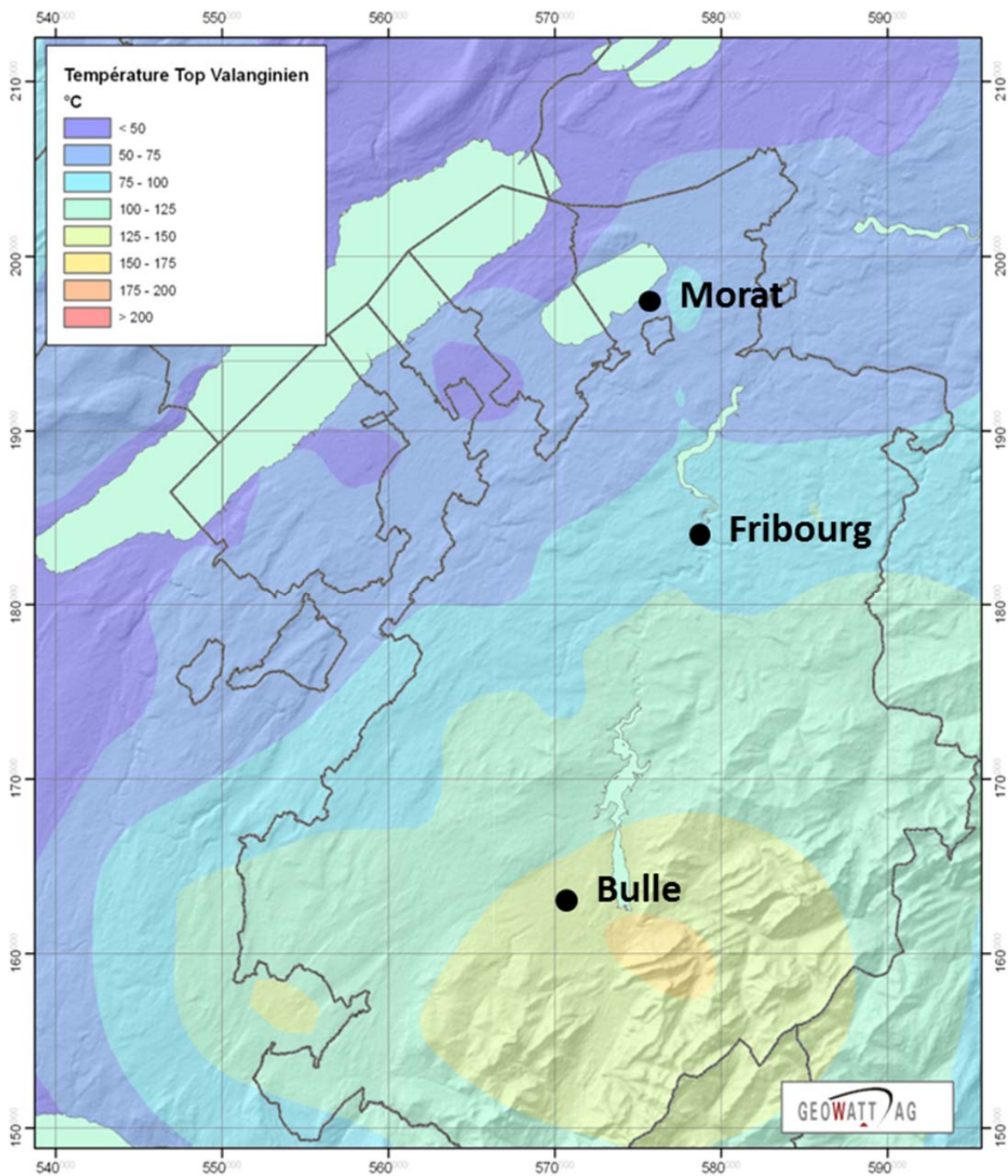


Figure 35. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle. Système de coordonnées CH1903+.

5.3 Cartes

5.3.1 Températures

La température au toit des différents aquifères est représentée dans les figures 36 à 41 ci-dessous. La même échelle de couleur a été utilisée afin de pouvoir comparer les différents aquifères.



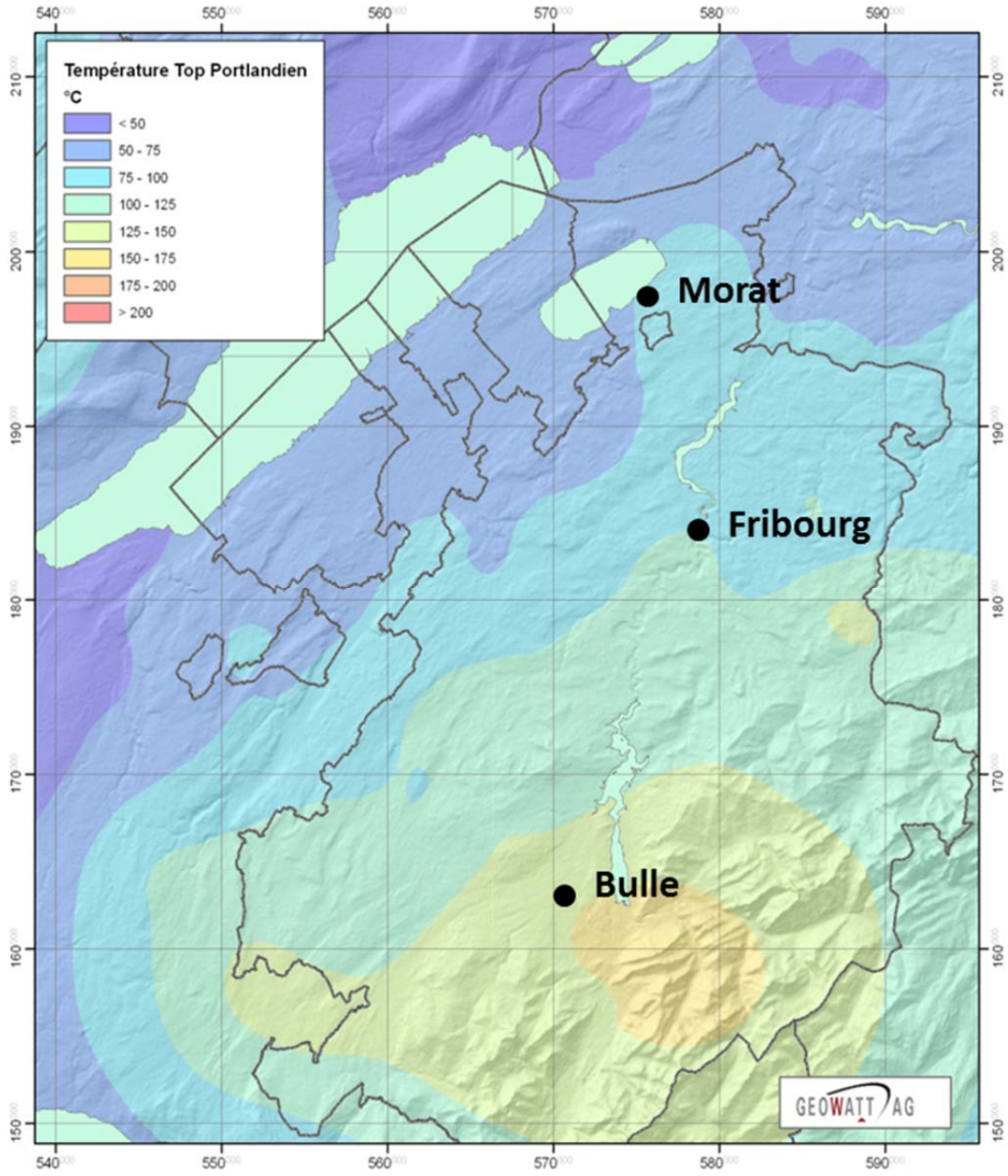


Figure 37. Température calculée au toit du Portlandien (Malm Supérieur).

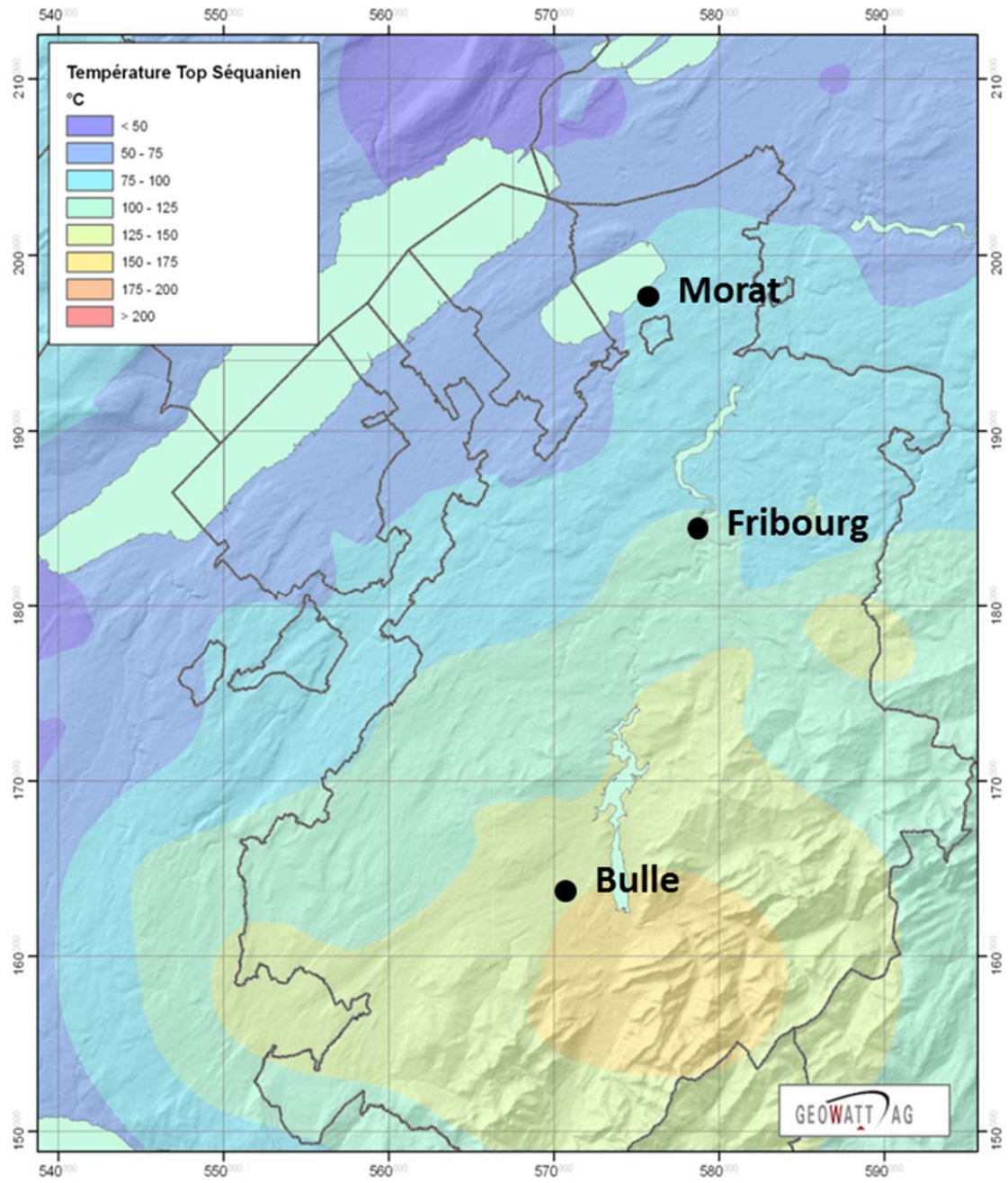


Figure 38. Température calculée au toit du Séquanien (Malm).

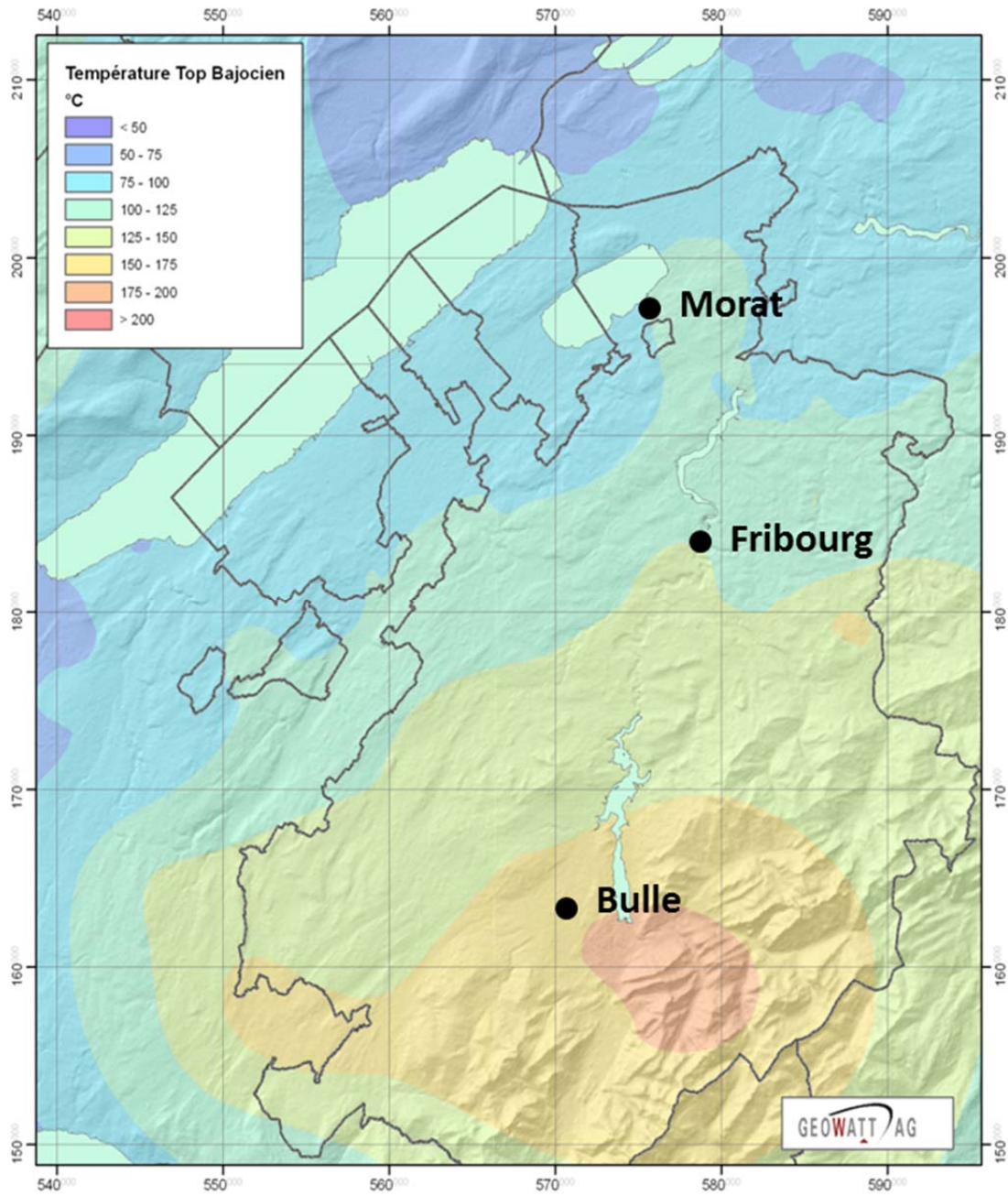


Figure 39. Température calculée au toit du Bajocien (Dogger).

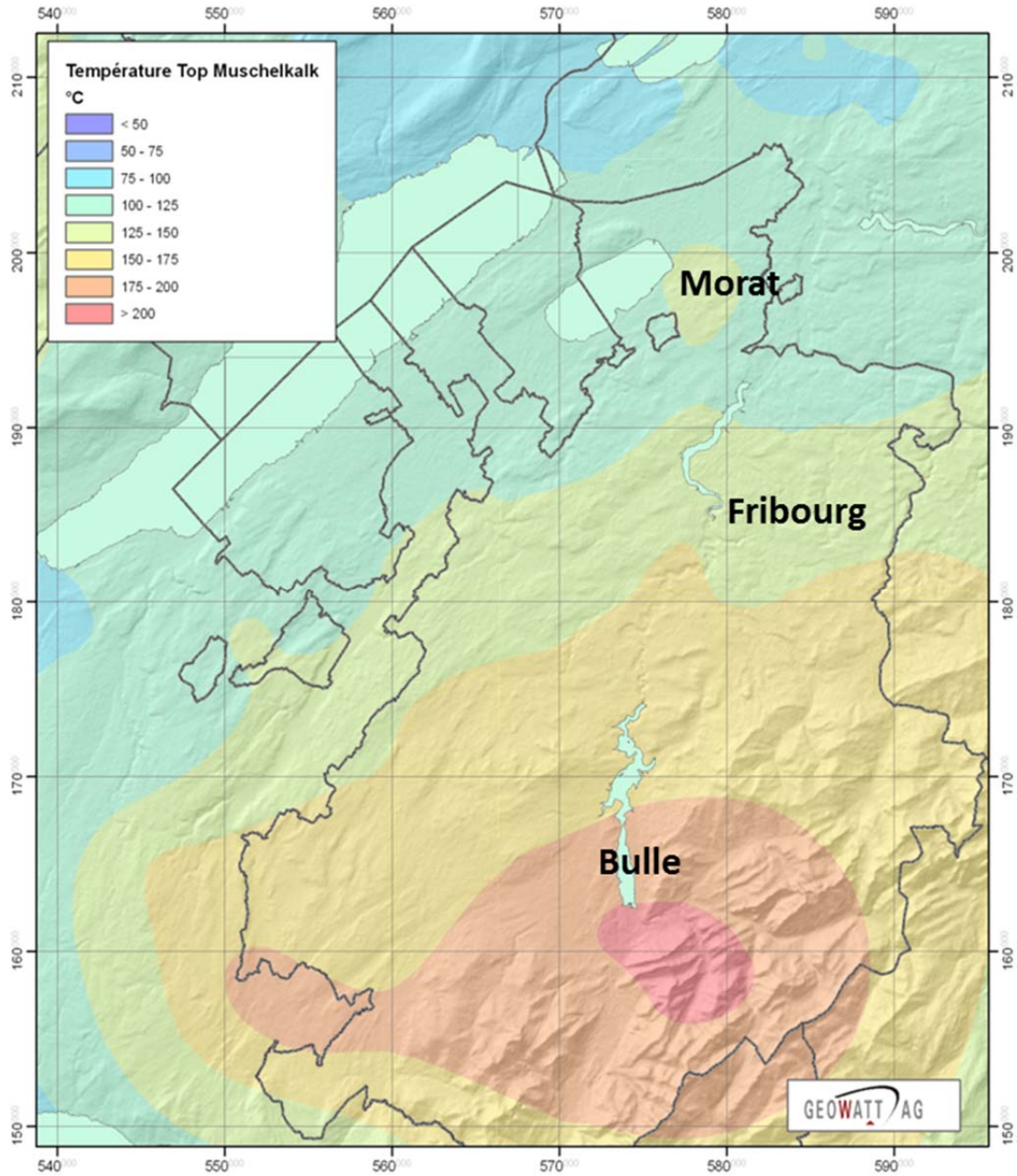


Figure 40. Température calculée au toit du Muschelkalk (Trias).

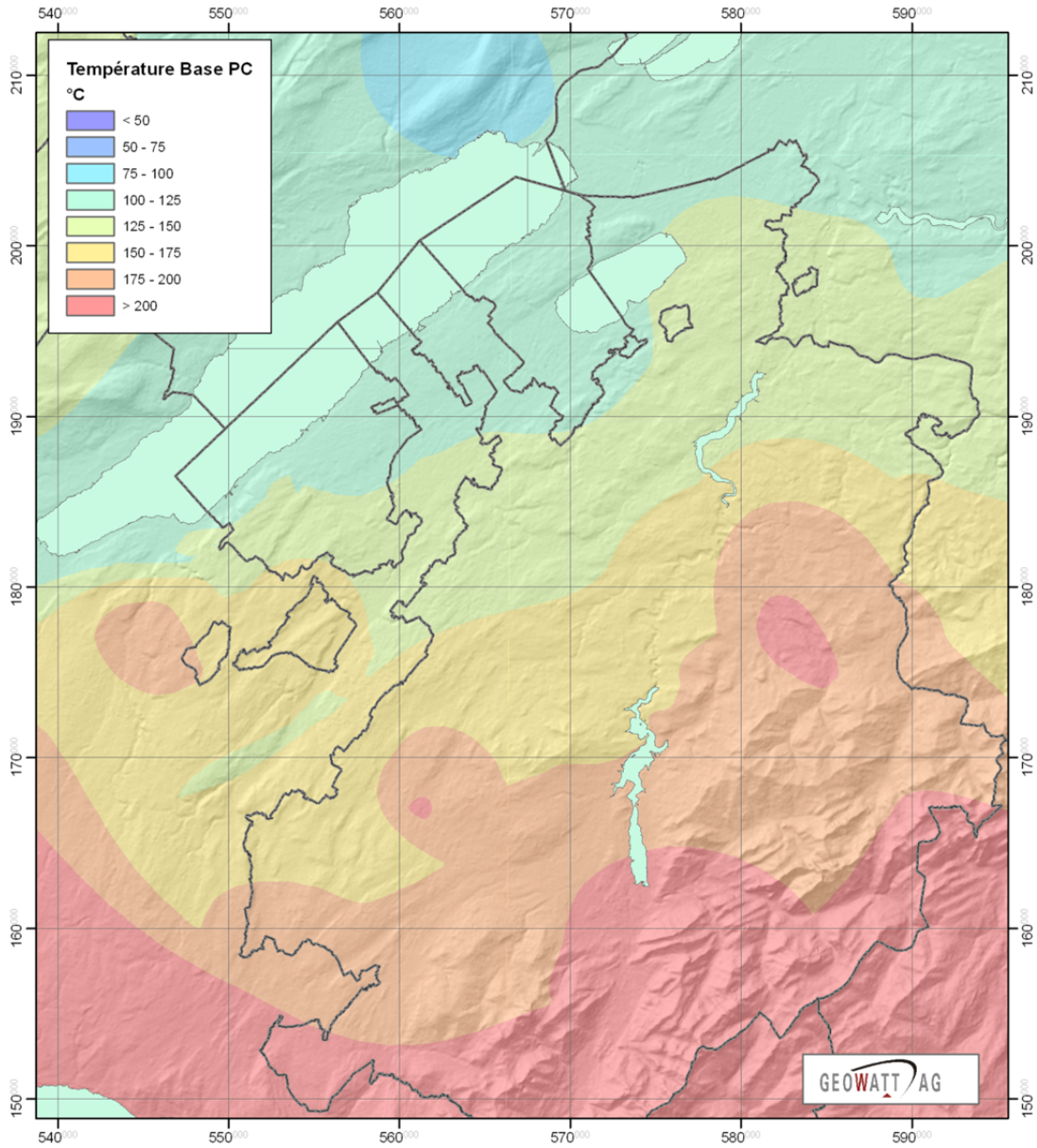


Figure 41. Température calculée à la base du Permocarbonifère (seul le Permocarbonifère « possible » est pris en compte ; le Permocarbonifère « incertain » n'est pas pris en compte).

5.3.2 Potentiel Géothermique

L'évaluation du potentiel géothermique se base sur la quantification de la chaleur stockée, théoriquement disponible (Heat in Place), E_{HIP} . Cette grandeur dépend du volume et de la température du sous-sol, selon :

$$E_{HIP} = \rho C_P \cdot V \cdot (T_{prod} - T_{reinj})$$

Avec ρC_P la capacité calorifique de la roche [$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$] ; V le volume de la ressource [m^3] ; T_{prod} la température de production du fluide [$^{\circ}K$] et T_{reinj} la température de réinjection du fluide [$^{\circ}K$].

Cette grandeur représente la quantité de chaleur stockée, et peut donc ainsi être très importante. Par exemple, si 1 km^3 de roche est refroidie de $100^{\circ}C$, l'énergie thermique disponible E_{HIP} est de 230 PJ (ou encore 64'000 GWh).

Les paramètres utilisés sont représentés dans le tableau 5. Les calculs sont menés avec une température de réinjection de $60^{\circ}C$ et une capacité calorifique de la roche de $2.2 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$. La chaleur stockée E_{HIP} est ainsi uniquement dépendante de la température de l'aquifère considéré et de sa puissance.

	<i>Valeur</i>	<i>Unité</i>
Capacité calorifique de la roche *	$2.2 \cdot 10^6$	[$J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$]
Épaisseur de l'aquifère	Selon géométrie	[m]
Température de réinjection**	60	[$^{\circ}C$]

* valeur moyenne

** La température de réinjection dépend du type d'utilisation. La température utilisée peut être supposée réaliste.

Tableau 5. Paramètres de calcul de la chaleur stockée.

Les résultats sont représentés dans les figures 42 à 47. La même échelle de couleur a été utilisée, sauf pour le cristallin (socle). Les résultats sont donnés en MJ/m^2 . Il s'agit d'une densité surfacique d'énergie thermique.

Les épaisseurs d'aquifères utilisées sont basées sur le forage de Courtion et sont regroupées dans le tableau 6.

<i>Aquifère</i>	<i>Épaisseur</i>
Valanginien	50 m
Portlandien - Kimmeridgien	245 m
Séquanien	100 m
Bajocien	160 m
Muschelkalk	63 m
Socle	Variable, entre -7'000m et le toit de l'aquifère

Tableau 6. Épaisseurs des aquifères basées sur le forage de Courtion.

La chaleur stockée n'est pas définie sur l'ensemble du modèle pour certains aquifères. Ceci est dû aux faits suivant :

- Pour le Valanginien, Portlandien-Kimmeridgien et Séquanien, la température des aquifères peut être inférieure à 60°C, ce qui ne permet pas de calculer de chaleur stockée.
- Pour le Cristallin (socle), la chaleur stockée n'est pas définie dans la partie sud du modèle, car le toit de la couche considérée est plus profond que 7 km, ce qui ne permet pas de calculer la chaleur stockée.

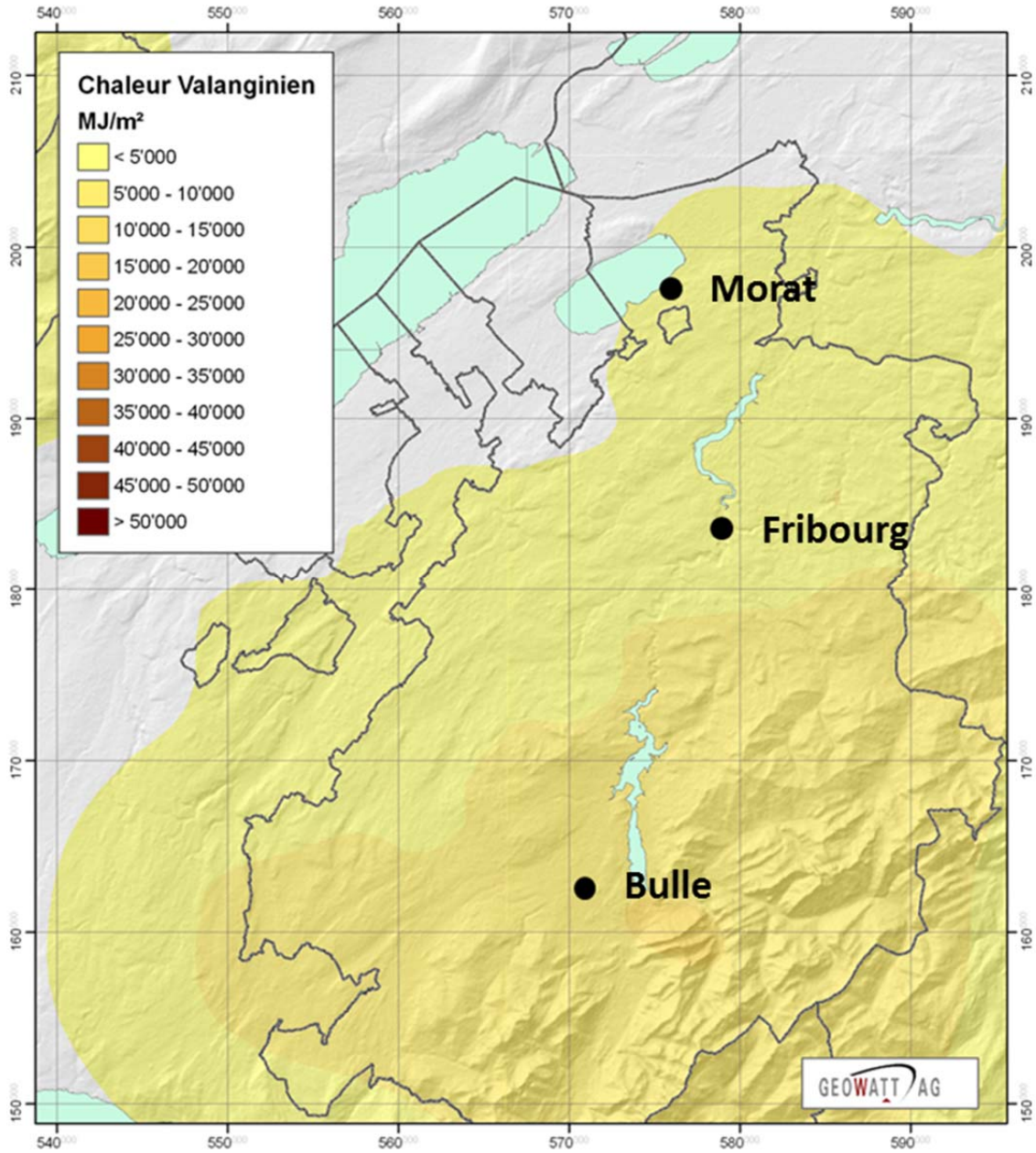


Figure 42. Chaleur stockée dans le Valanginien (Crétacé Inférieur).

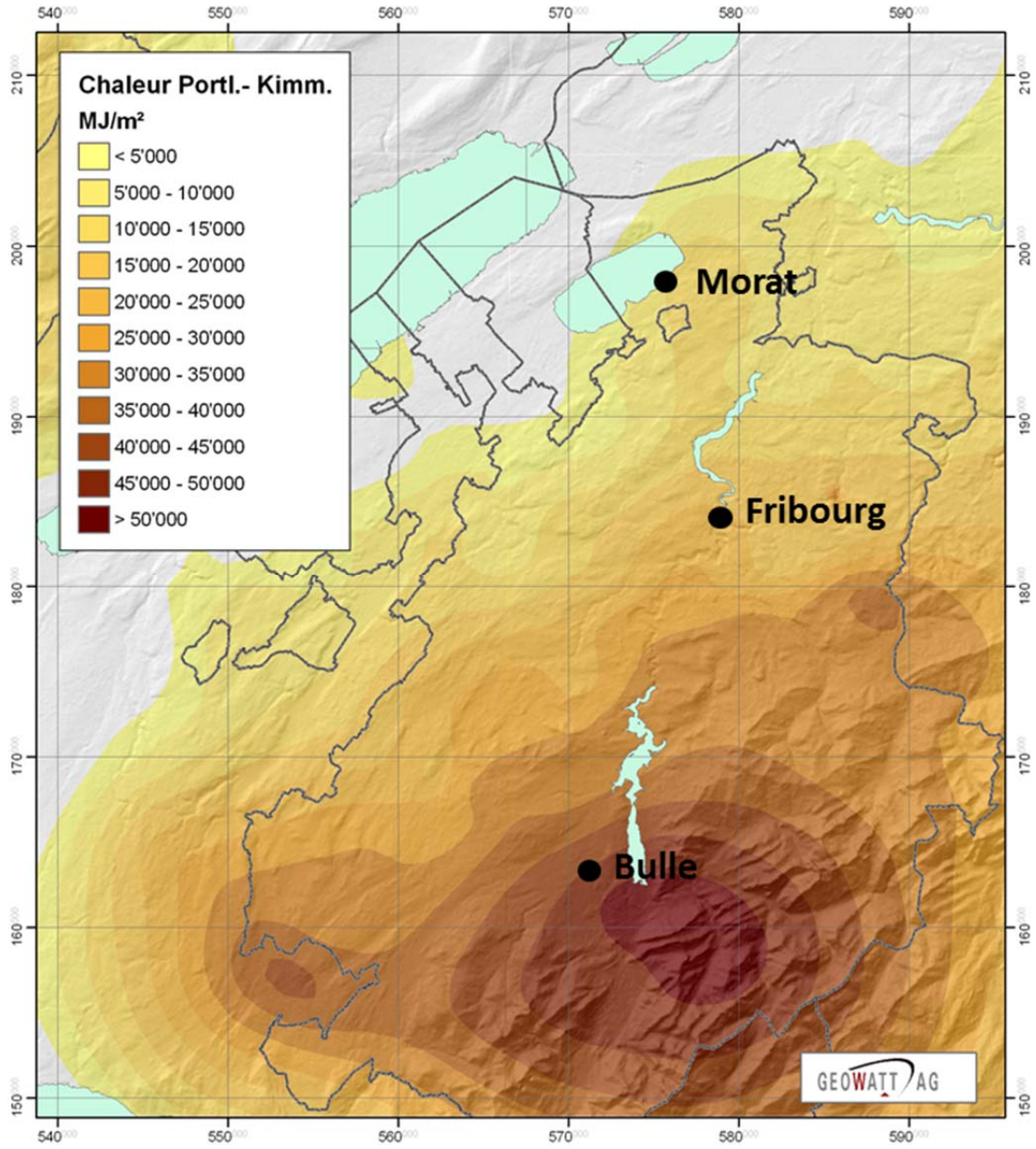


Figure 43. Chaleur stockée dans le Portlandien-Kimmeridgien (Malm Supérieur).

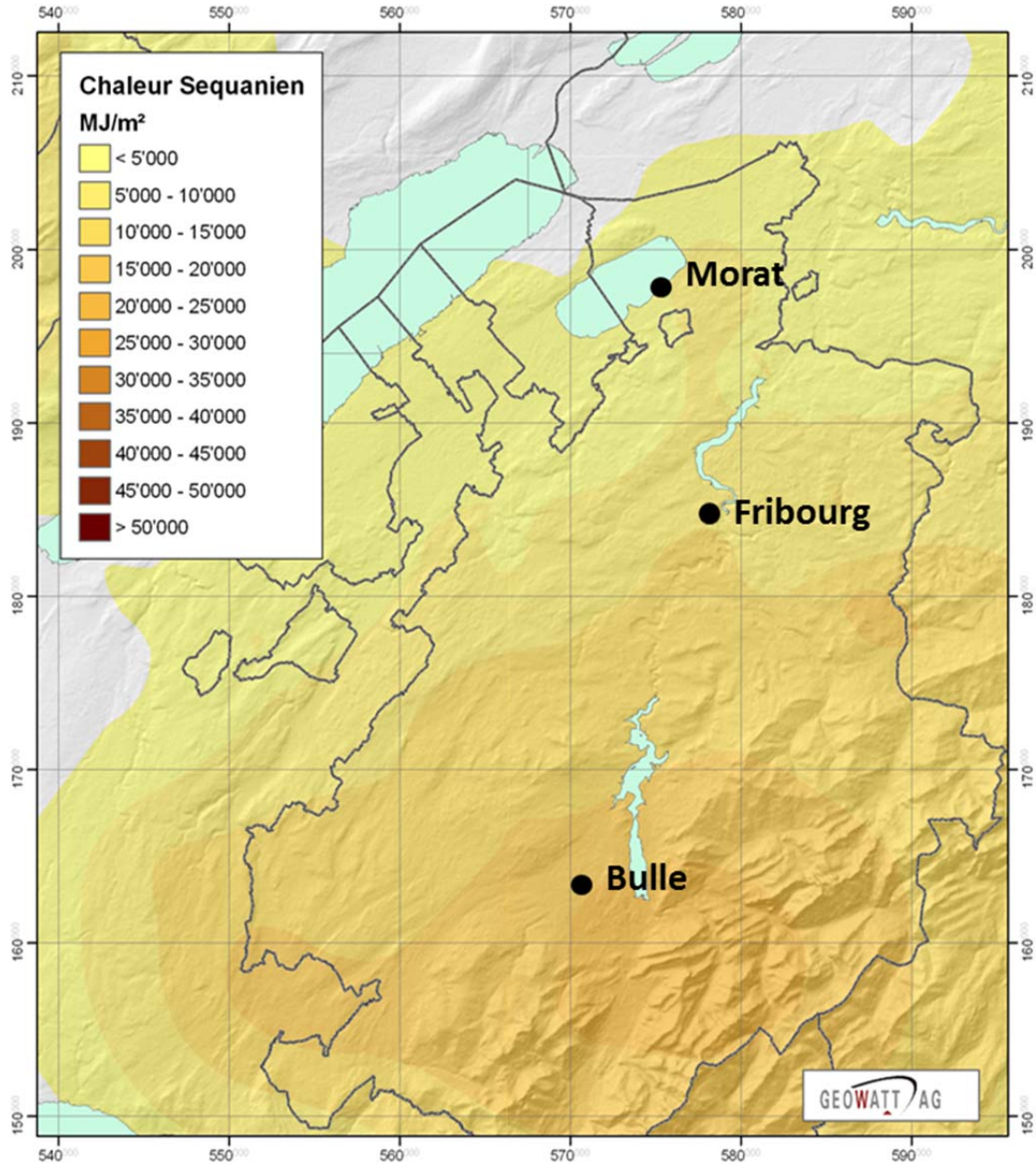


Figure 44. Chaleur stockée dans le Séquanien (Malm).

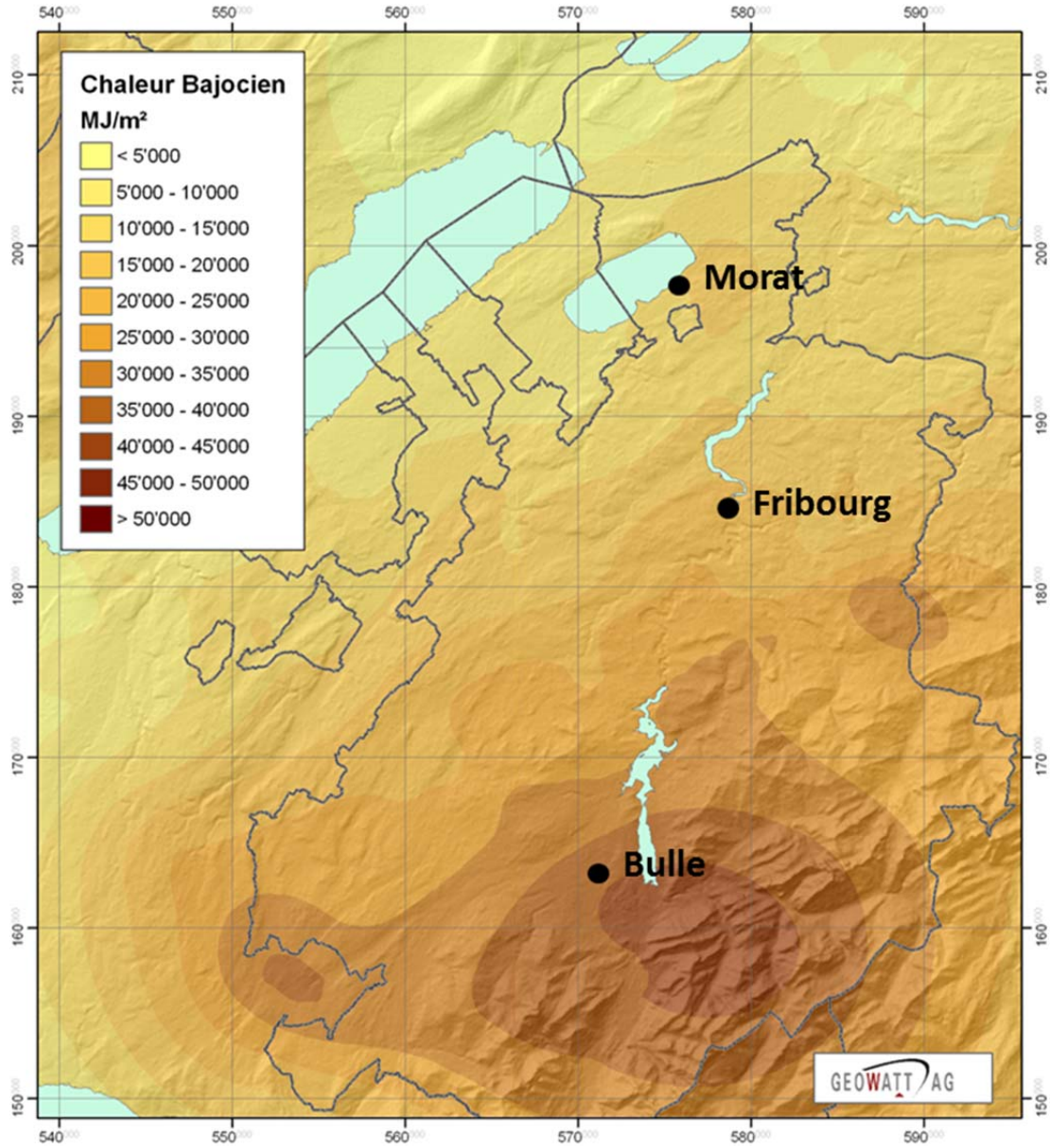


Figure 45. Chaleur stockée dans le Bajocien (Dogger).

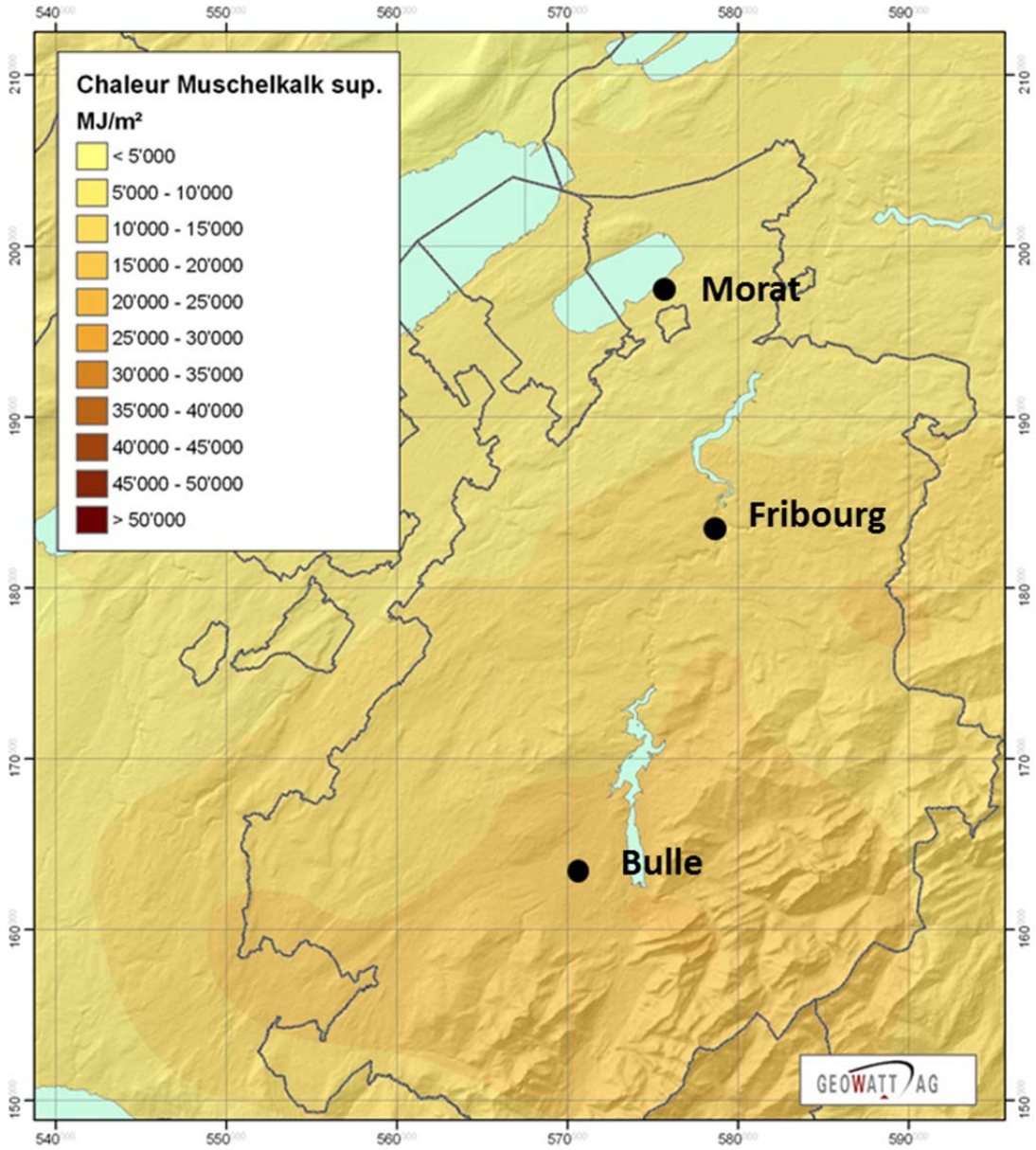


Figure 46. Chaleur stockée dans le Muschelkalk supérieur (Trias).

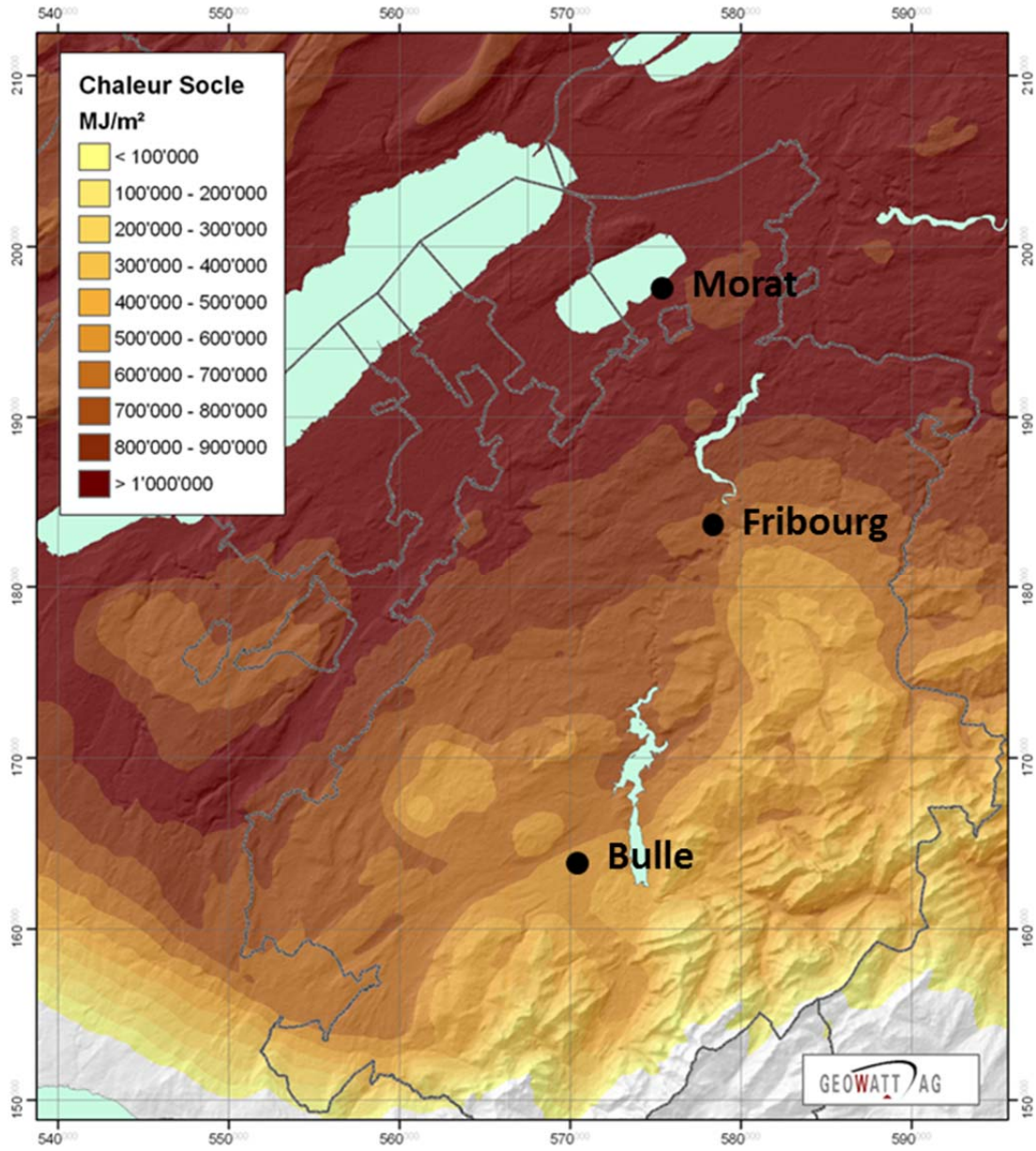


Figure 47. Chaleur stockée dans le socle.

6. Discussion

Du point de vue des températures, le contexte géothermique du bassin molassique dans le Canton de Fribourg est relativement classique, avec un gradient géothermique oscillant autour des valeurs standard de 30°C/km. De ce fait, la nécessité de forer à des profondeurs situées aux alentours des 4000m semble inévitable pour atteindre une température d'environ 120 à 130°C nécessaire pour la production d'électricité.

Le tableau 7 résume pour chaque niveau d'aquifère régional les gammes de températures que l'on peut s'attendre à rencontrer sous les 3 zones présélectionnées par les mandataires de cette étude que sont les villes de Bulle, Fribourg et Morat. En raison du plongement du Mésozoïque vers le sud-est, les profondeurs et températures de chacun de ces aquifères varient évidemment d'une ville à l'autre.

Principaux Aquifères régionaux	Morat		Fribourg		Bulle	
	<i>Prof. [m]</i>	<i>T [°C]</i>	<i>Prof. [m]</i>	<i>T [°C]</i>	<i>Prof. [m]</i>	<i>T [°C]</i>
Crétacé inf.	1'680	50-75	2'550	75-100	3'500	125-150
Malm sup.	1'770	~ 75	2'650	~ 100	3'600	125-150
Dogger inf.	2'450	75-100	3'350	100-125	4'350	150-175
Muschelkalk	3'100	100-125	4'020	125-150	5'070	175-200
Cristallin (base PC)	3'300	125-150	4'272	150-175	5'460	~ 200

Tableau 7. Synthèse des données de température et de profondeur issus des modèles géologiques et thermiques, au droit des villes de Morat, Fribourg et Bulle pour les différents aquifères régionaux potentiellement exploitables pour la géothermie profonde.

A Morat, la relativement faible profondeur du Mésozoïque rend ce dernier vraisemblablement trop froid pour une production conjointe d'électricité et de chaleur. Il faudrait dans cette zone descendre jusqu'au socle cristallin situé à environ 3'300m sous la surface pour y trouver les températures adéquates. Cependant, comme décrit plus haut, les propriétés hydrodynamiques du socle cristallin sont assez peu connues. Il n'est donc pas assuré d'y obtenir des débits de pompages qui soient économiquement rentables. En effet, les roches cristallines n'étant par nature pas ou très faiblement perméables, seul un certain degré d'altération du socle permettrait d'y trouver des perméabilités nécessaires.

Néanmoins, malgré le risque de sismicité induite durant les phases de stimulation hydraulique et les surcoûts que cela implique, un système géothermique stimulé (SGS) permettrait certainement d'exploiter la ressource géothermale dans cette région.

A Fribourg, il faudrait descendre jusque dans l'aquifère profond du Muschelkalk situé à plus de 4'000m sous la surface pour y trouver des températures propices à la production conjointe d'électricité et de chaleur. Cet aquifère est régionalement connu pour présenter de bonnes propriétés hydrodynamiques. Il contient cependant des fluides relativement salins en raison des faciès évaporitiques présents dans cette formation. Il n'est cependant pas à exclure certaines déprédations locales de ses propriétés, que les données et connaissances actuelles ne nous permettent pas d'investiguer. Du point de vue des transmissivités hydrauliques, la dépression mésozoïque (zone de Fribourg) semble avoir généré un certains nombres de failles au sein du Mésozoïque (*Figure 8*), qui sont autant d'objets susceptibles d'offrir de bonne perméabilités dans les niveaux aquifères considérés.

A Bulle, ce sont les premiers aquifères du Mésozoïque (Crétacé inférieur et Malm supérieur) situés respectivement à 3'500 et 3'600m sous la surface qui présentent les températures minimales requises à la production conjointe de chaleur et d'électricité. Aucune information concernant l'existence d'accidents tectoniques susceptibles d'améliorer les perméabilités n'est actuellement connue. Ceci n'exclue cependant pas la présence d'un système de faille approprié qui pourrait être mise en évidence par l'acquisition de données sismiques.

Comme mentionné dans le chapitre précédent, il est à noter que le modèle de température sur lequel se basent ces estimations ne prend pas en compte les processus advectifs, à savoir les modifications de température dues aux mouvements de fluides hydrothermaux dans le sous-sol. On peut donc s'attendre à rencontrer certaines variations de température au niveau des grands systèmes de failles ayant une forte conductivité hydraulique.

D'un point de vue géologique uniquement, les zones potentiellement les plus favorables pour l'exploitation de la géothermie profonde restent néanmoins les grands systèmes de failles décrochantes qui affectent le Mésozoïque (bordure Est de la zone de Fribourg ; faille de la Lance). On peut en effet s'attendre à y rencontrer de meilleures perméabilités et par conséquent des débits plus intéressants puisque le mouvement de ces accidents tectoniques tend à fragiliser la roche dans son environnement immédiat (failles, fractures, brèches). D'autres accidents tectoniques de plus petites ampleurs au travers du canton (*Figure 14*) mériteraient également d'être investigués.

7. Conclusions et recommandations

Sans pour autant s'affranchir des conditions économiques de surface (réseau de distribution de la chaleur, proximité des consommateurs), impondérables à la viabilité économique d'un projet de géothermie profonde, il convient de concilier au mieux les critères de surface avec Les conditions géologiques les plus favorables au développement de cette technologie pour en augmenter les chances de succès.

Dans ce sens, à la lumière des informations disponibles ainsi que des investigations menées dans le cadre de cette étude, la zone de Fribourg, de par la présence de failles associées à la dépression mésozoïque qui la borde, semble présenter un intérêt privilégié pour le développement de la géothermie en aquifère profond dans le canton.

Les sites de Bulle et de Morat ne montrent quant à eux (avec les données disponibles aujourd'hui) aucune d'évidence quant à la présence d'accidents tectoniques profonds susceptibles d'améliorer localement les perméabilités. On ne peut cependant pas dire que de telles structures y soient absentes. L'acquisition de nouvelles données géophysiques (sismique réflexion) ciblées sur ces zones apporterait de plus amples précisions à ce sujet.

Il serait probablement prématuré à ce stade de l'étude de ne sélectionner qu'une seule zone cible pour la suite du projet. Nous recommandons que des investigations plus détaillées soient entreprises sur quelques cibles présélectionnées afin d'en améliorer les connaissances à une échelle plus localisée. Notamment par l'accès à quelques lignes sismiques pétrolières existantes mais du domaine privé. L'acquisition de nouvelles lignes sismiques judicieusement placées et dimensionnées au niveau des zones cibles apporterait également de précieuses informations d'ordre structurales. En parallèle, quelques campagnes de mesures gravimétriques plus fines, également ciblées sur les zones d'intérêt, permettraient vraisemblablement de distinguer des variations gravifiques plus détaillées, apportant ainsi leur lot d'information.

L'apport de données supplémentaire permettrait donc dans un stade ultérieur du projet de générer des modèles géologiques et structuraux plus précis et mieux contraints pour chacune des zones sélectionnées. Ces modèles, mieux calés en profondeur permettraient entre autre une meilleure planification de futurs forages exploratoires.

Finalement, il est important de mentionner que les informations de profondeur, température, productivité etc. articulées dans ce rapport ne sont que des estimations qui se basent sur des études antérieures, sur la littérature et sur la compilation des données que nous avons eues à disposition pour mener cette étude. Elles permettent d'offrir une idée générale de la situation, visant à aider à la sélection de

zones cibles qui devront par la suite faire l'objet d'études plus détaillées, notamment grâce à l'apport de nouvelles données (sismique réflexion, gravimétrie).

A la suite de quoi, certains de ces paramètres pourront être prononcés avec plus de certitude (profondeurs, présence de failles) alors que d'autres, tels que ceux ayant trait aux propriétés d'aquifères (températures, conductivités et transmissivités hydrauliques, fracturation) ne seront définitivement connus que lorsque ces cibles auront été interceptées et testées par des forages d'exploration.

8. Références

8.1 Références citées

ABA-Geol SA, Fehlmann Travaux Hydrauliques SA, Sulzer Energie Consulting SA & Conrad Zschokke SA, 1989. Utilisation du potentiel géothermique profond dans la région payernoise. Etude préliminaire pour la commune de Payerne, env. 80 pp., inédit.

Baujard C., Signorelli, S. & Kohl, T., 2007. Atlas des Ressources géothermiques de la Suisse Occidentale, Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz – Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse, Commission Suisse de Géophysique, 40, 56pp.

Becker F. & Ramseyer R., 1972-1973. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 63 Murten et notice explicative. Commission géologique suisse, 28 pp.

Büchi U.P. et Schlanke S., 1977. Schlussbericht über die Aufschlussbohrung Tschugg 1, 661.

Clerc N., 2006. Etude du remplissage sédimentaire quaternaire du lac de Neuchâtel (Suisse) par sismique réflexion à haute résolution. Contribution à la géologie glaciaire. Diplôme d'ingénieur géologue de l'université de Genève, 101pp.

Deichmann N., Baer M., Braunmiller J., Cornou C., Fäh D., Giardini D. & al., 2004. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2003. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. *Swiss Journal of Geosciences*, 97(3), 447–458.

Deichmann N., Clinton J., Husen S., Edwards B., Haslinger F., Fäh D., Giardini D., Kästli P., Kradolfer U., Marschall I. & Wiemer S., 2010. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 2009. *Eclogae Geologicae Helvetiae*. *Swiss Journal of Geosciences*, 103, 535–549.

ELF Aquitaine Exploration Production S.A., 1983. Rapport géologique final du sondage Hermrigen 1D

ETH et Swisstopo, 2004. Atlas der Schweiz, DVD, Version 2.

Fischer H. & Luterbacher H., 1963. Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion 1 und Altishofen 1. *Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz*, 145, 40 pp.

Geister-Frantz M., 1987. Données géothermiques des aquifères du Dogger au pied Sud du Jura suisse. *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 7 : 31-47.

Gabus J.H., Boegli J.C., Mornod L. & Parriaux A., 2000. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 103 Moudon et notice explicative. Service hydrologique et géologique national, 46 pp.

Giroux B., 6 Chouteau M., 2008. Géophysique appliquée I – GLQ2200, Notes de cours – Gravimétrie. Laboratoire de géophysique appliquée, Ecole polytechnique de Montréal, Canada.

Gorin, E.G., Morend D. & Pugin A., 2003. Bedrock, Quaternary sediments and recent fault activity in central Lake Neuchâtel, as derived from high-resolution reflection seismics. *Eclogae Geol. Helv.*, 96, Supplement 1, S3-S10.

Ibele T., 2011. Tectonics of the western Swiss Molasse Basin during Cenozoic times. Unpublished thesis No 1714. Université de Fribourg.

Kastrup U., Deichmann N., Fröhlich A. & Giardini D., 2007. Evidence of an active fault below the northwestern Alpine foreland of Switzerland. *Geophys. J. Int.* 169 : 1273-1288.

Marillier F et al., (en prép.). Seismic Atlas of the Swiss Molasse Basin. Commission suisse de géophysique. Swisstopo.

Medici, F. et Rybach, L., 1995. Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density), Commission Suisse de Géophysique, Nr. 30.

Mosar, J., Abednego, M., Ibele, T., Matzenauer, E., Meier, B., Sommaruga, A., Sprecher, C., Vouillamoz, N., 2011. Du Jura central aux Préalpes romandes – Une tectonique active dans l'avant-pays des Alpes. *Géochronique* 117 : 52-55.

Müller W.H., Naef H. & Graf H.R., 2001. Geologische Entwicklung der Nordschweiz, Neotektonik und Langzeitszenarien Züricher Weinland. Nagra Technischer Bericht. Wettingen. NTB 99-08.

Muralt R., 1999. Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc Jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains). *Mat. Géol. Suisse, Géotechnique*, 82, 236 pp.

Pasquier F., Bouzelboudjen M. & Zwahlen F., 1999. Carte Hydrogéologique de la Suisse, Sarine, feuille 6. Commission Géotechnique Suisse et Service Hydrologique et Géologique national.

Resun AG, 2008). Rapport de sécurité: Remplacement de la centrale de Mühleberg

Schärli U. & Kohl T., 2002. Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. ISSN 0253-1186, Schweizerische Geophysikalische Kommission. Beiträge zur Geologie der Schweiz: Geophysik, 36.

Schill E., Klingler P., Radogna P. V., Beck M., Baujard C., Ollinger D., Rieben C., Pfiffner A., Böhi D., & Gruner U., 2011. Geothermiestudie des Energieservices Biel/Bienne. Endbericht. 71 pp.

Signorelli S., Andenmatten Berthoud N. & Kohl T., 2005. Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz - Jahresbericht, Schweizerische Geophysikalische Kommission.

Signorelli, S. et Kohl, T., 2004. Regional ground surface temperature mapping from meteorological data. *Global and Planetary Change*, 40: 267-284.

Signorelli S. & Kohl T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Schweizerische Geophysikalische Kommission. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Geophysik, 39. 94 pp.

Site web du CREGE : www.crege.ch

Sommaruga Mosar A., 1997. Géologie du Jura central et du bassin molassique: nouveaux aspects sur une chaîne d'avant-pays plissée et décollée sur des couches d'évaporites. Thèse. 176 pp.

Thierrin J., 1990. Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel, 306 pp.

Vollmayr T., 1983. Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. U. – Ing., vol. 49, 116 : 15-27.

Vuataz F.D. & Fehr A., 2000. 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. Bull. Géothermie CH, 26 : 2-10.

Vuataz F.D., Bossy F., Colliard B. & Wilhelm J., 2005. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg. Rapport final préparé par le groupement PGF pour le Service des transports et de l'énergie (STE), canton de Fribourg, non publié, 162 pp.

Weidmann M., Briel A. & Inglin H., 1996. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 99 Romont et notice explicative. Service hydrologique et géologique national, 48 pp.

8.2 Références non-citées

Deichmann N. & al., 2000. Earthquakes in Switzerland and surrounding regions during 1999. *Eclogae Geol. Helv.*, 93(3). 395–406.

Fröhlich A., 1991. Seismotektonik der Westschweiz unter Beruecksichtigung der Bebenserien von Freiburg (1987), Romont (1988) und Boltigen (1989). Diplomarbeit, Institut für Geophysik, ETH-Zürich.

Jordi H.A., 1995. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 94 Yverdon-les-Bains et notice explicative. Service hydrologique et géologique national, 49 pp.

Kastrup U., 2002. Seismotectonics and stress field variations in Switzerland. Unpublished PhD thesis No. 14527, ETH-Zürich.

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

Muralt R., Vautaz F.D., Schönborn G., Sommarurga A. & Jenny J., 1997. Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermique. Cas d'Yerdon-les-Bains, pied du Jura. *Eclogae geol. Helv.*, 90: 179-197.

Pasquier J.B. & Plancherel R., 2005. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 115 Gruyères et notice explicative. Office fédéral des eaux et de la géologie, 95 pp.

Pavoni N., 1992. Seismoactive fault systems in the basement and sedimentary cover of the Swiss Plateau and the Jura Mountains. *Eclogae Geol. Helv.*, 85/3, 781–784.

Python C., Berger J.P. & Plancherel R., 1998. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 98 Fribourg et notice explicative. Service hydrologique et géologique national, 54 pp.

Vouillamoz N., Saudan C. & Mosar J., 2010. Microzonage sismique du canton de Fribourg - Cartographie au 1 : 25'000 des sols de fondation selon la norme SIA 261. 57 pp.

Weidmann M., Dorthe J.P., Emmenegger C. & van Stuijvenberg J., 2005. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 105 Rossens et notice explicative. Office fédéral des eaux et de la géologie, 85 pp.

Weidmann M., 2006. Atlas géologique de la Suisse, 1:25'000. Feuille 123 Payerne et notice explicative. Office fédéral de topographie, Cartographie géologique, 48 pp.

9. Table des illustrations

9.1 Figures

Figure 1. Illustration des différents types d'exploitation de la géothermie de faible profondeur, d'après le site web du CREGE, UNINE.	8
Figure 2. Exploitation de la géothermie en aquifère profond, d'après le site web du CREGE, UNINE.	10
Figure 3. Exploitation de la géothermie par Systèmes Géothermiques Stimulés (SGS), d'après le site web du CREGE, UNINE.....	12
Figure 4. Carte géologique synthétique du canton de Fribourg, avec localisation des principaux accidents tectoniques et forages profonds ainsi que la trace de la coupe géologique de la figure 5 (d'après Vuataz & al., 2005).	13
Figure 5. Coupe géologique au travers du plateau molassique, du Jura aux Préalpes fribourgeoises. Voir localisation sur la figure 4 (d'après Vuataz & al., 2005).	14
Figure 6. Corrélations lithostratigraphiques SW-NE entre des forages pétroliers de la partie occidentale du Plateau suisse (d'après Sommaruga Mosar, 1997). Le niveau de référence (0 m) est fixé à la base du Lias. Les lignes en trait plein représentent les corrélations.....	17
Figure 7. Carte des isohypses du toit du socle cristallin altéré. Bleu : cristallin altéré sous le Mésozoïque ; turquoise : Cristallin altéré sous les fossés permocarbonifères (d'après Baujard et al., 2007).....	18
Figure 8. Profils sismiques réinterprétés entre Courtion et Fendringen (haut) et entre Le Châtelard et St. Antoni (bas), mettant en évidence une dépression de la séquence mésozoïque au niveau de la zone de Fribourg ainsi qu'un bombement de cette même séquence à l'est de cette dépression. Cette géométrie résulte d'une diminution et respectivement d'une augmentation de l'épaisseur du Trias évaporitique à la base du Mésozoïque. La base et le toit de la séquence du Mésozoïque sont respectivement délimités par les horizons violet et orange (modifié d'après Resun AG, 2008).....	20
Figure 9. Gammes de conductivités hydrauliques des formations hôtes des principaux aquifères de Suisse occidentale (d'après Pasquier & al., 1999).....	26
Figure 10. Carte des isopaques du Malm Supérieur (d'après Baujard et al., 2007).....	31
Figure 11. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans l'aquifère du Malm supérieur (modifié d'après Baujard et al., 2007).	32
Figure 12. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans l'aquifère du Muschelkalk supérieur (modifié d'après Baujard et al., 2007).	34
Figure 13. Température moyenne (haut) et puissance géothermique calculée (bas) dans le cristallin altéré (500 premiers mètres) (modifié d'après Baujard et al., 2007). Les zones présentant la puissance théorique la plus haute correspondent aux régions où le socle cristallin se situe sous les fossés permocarbonifères supposés, épais de plusieurs centaines de mètres (Figure 7).....	36
Figure 14. Accidents tectoniques majeurs affectant le Plateau et le Jura dans la région du canton de Fribourg (d'après Ibele, 2011).	39
Figure 15. Localisation des forages utilisés pour la création du modèle géologique.	43
Figure 16. Exemple d'une ligne sismique sur le Plateau réinterprétée dans le cadre de l'Atlas sismique suisse (modifié d'après Marillier et al., en prép).....	46
Figure 17. Localisation des lignes sismiques utilisées pour la création du modèle géologique.	48
Figure 18. Vue d'ensemble montrant l'extension du modèle géologique au-delà des limites du Canton de Fribourg.	50
Figure 19. Pile stratigraphique du modèle géologique.	52

Figure 20. Profil arbitraire d'orientation NO-SE au travers du modèle représentant le comportement latéral des différentes unités stratigraphiques modélisées avec l'épaississement de la Molasse et le plongement régulier des unités subparallèles du Mésozoïque en direction du front alpin.	52
Figure 21. Vue en plan de la traces des failles modélisées au toit du Mésozoïque.	53
Figure 22. Représentation en 3 dimensions des failles modélisées.	54
Figure 23. Localisation des coupes des figures 24 et 25.	55
Figure 24. Coupes O-E extraites du modèle géologique, passant par les villes de Morat, Fribourg et Bulle. Voir figure 23 pour leur localisation géographique.	56
Figure 25. Coupe N-S extraite du modèle géologique, passant par les villes de Morat, Fribourg et Bulle. Voir figure 23 pour sa localisation géographique.	57
Figure 26. Vue en 3 dimensions depuis le SE du Mésozoïque dans le modèle. Les remontées de ces formations sur les bords du modèle sont dues à des « effets de bords » et ne représentent donc pas la réalité.	58
Figure 27. Illustration du principe d'équivalence en gravimétrie : Différentes structures, de différentes tailles et de différentes densités (1, 2 et 3), situées à des profondeurs différentes, peuvent générer la même anomalie gravifique (d'après Giroux et Chouteau, 2008).	62
Figure 28. Carte d'anomalies gravifiques résiduelles sur la région du Canton de Fribourg (couleur chaudes : anomalies positives ; couleurs froides : anomalies négatives), avec la trace des principaux systèmes de failles de la région (lignes rouges) et les remplissages quaternaires importants (zone hachurée)	65
Figure 29. Profondeur des données de températures présentes sur le domaine. Le modèle est indiqué en orange.	66
Figure 30. Qualité des données de températures présentes sur le domaine. Le modèle est indiqué en orange.	67
Figure 31. Principe de calcul de la température	69
Figure 32. Topographie du modèle	71
Figure 33. Température imposée à la surface du modèle	71
Figure 34. Maillage 3D du modèle de Fribourg, vue du Sud-est. Système de coordonnées CH1903+.	72
Figure 35. Vue en 3D de la température calculée dans le modèle. Système de coordonnées CH1903+.	74
Figure 36. Température calculée au toit du Valanginien (Crétacé Inférieur).	75
Figure 37. Température calculée au toit du Portlandien (Malm Supérieur).	76
Figure 38. Température calculée au toit du Séquanien (Malm).	77
Figure 39. Température calculée au toit du Bajocien (Dogger).	78
Figure 40. Température calculée au toit du Muschelkalk (Trias).	79
Figure 41. Température calculée à la base du Permocarbonifère (seul le Permocarbonifère « possible » est pris en compte ; le Permocarbonifère « incertain » n'est pas pris en compte).	80
Figure 42. Chaleur stockée dans le Valanginien (Crétacé Inférieur).	83
Figure 43. Chaleur stockée dans le Portlandien-Kimmeridgien (Malm Supérieur).	84
Figure 44. Chaleur stockée dans le Séquanien (Malm).	85
Figure 45. Chaleur stockée dans le Bajocien (Dogger).	86
Figure 46. Chaleur stockée dans le Muschelkalk supérieur (Trias).	87
Figure 47. Chaleur stockée dans le socle.	88

9.2 Tableau

Tableau 1. Caractéristiques hydrogéologiques et géothermiques des aquifères potentiellement exploitables du Canton de Fribourg.	28
Tableau 2. Liste des forages utilisés pour le modèle géologique, avec leur profondeur maximales et quelques données de températures mesurées à différentes profondeur.....	44
Tableau 3Épaisseurs (issues du modèle géologique) des formations contenant les principaux aquifères régionaux sous les 3 villes d'intérêts.....	58
Tableau 4. Propriétés thermiques à 20°C des roches utilisées dans les modèles. Les valeurs données décroissent avec la température.....	70
Tableau 5. Paramètres de calcul de la chaleur stockée.	81
Tableau 6. Épaisseurs des aquifères basées sur le forage de Courtion.	82
Tableau 7. Synthèse des données de température et de profondeur issus des modèles géologiques et thermiques, au droit des villes de Morat, Fribourg et Bulle pour les différents aquifères régionaux potentiellement exploitables pour la géothermie profonde.	89

10. Annexes

Profondeurs des différentes formations géologiques disponibles dans les puits utilisés pour la conception du modèle géologique.

	Payerne_SMA		Henniez_50		Pra_Tserere		Yverdon_F4	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	> 258	0	494	0	> 250	0	35
Crétacé							35	215
Malm							250	> 348
Dogger								
Lias								
Trias								
Permocarb								

	Fendringen_1		Romanens_1		Sorens_1		Concise_1	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	1805	0	2857	0	3100	0	220
Crétacé	1805	> 183	2857	760	3100	> 65	220	> 20
Malm			3617	168				
Dogger			3785	201				
Lias			3986	> 36				
Trias								
Permocarb								

	Savigny_1		Essertines_1		Treycovagnes_1		Hermrigen_1	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	2331	0	337	0	117	0	395
Crétacé	2331	> 155	337	194	117	777	395	8
Malm			531	815	894	470	403	675
Dogger			1346	559	1364	308	1078	472
Lias			1905	397	1672	1009	1550	1131
Trias			2302	> 634	2681	> 540	1727	177
Permocarb							2681	> 540

	Gletterens		Morand/Montricher		La_Greve_1		Chapelle_1	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	> 420	0	37	0	300	0	1506
Crétacé			37	> 338	300	600	1506	> 25
Malm					600	> 66		
Dogger								
Lias								
Trias								
Permocarb								

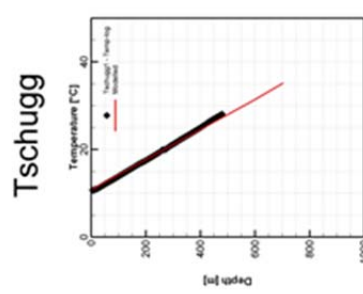
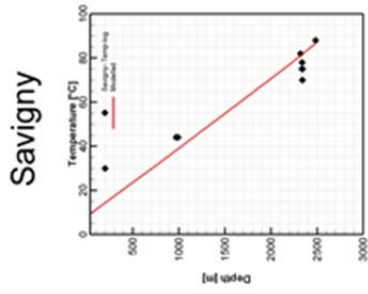
	Tschugg_1		Bulle		Yverdon_F5		Noréaz_1	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	509	0	> 800	0	18	0	413
Crétacé	509	147			18	170	413	> 158
Malm	638	> 66			188	834		
Dogger					1022	> 457		
Lias								
Trias								
Permocarb								

	Cuarny_1		Servion_1		Matran	
	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]	Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	0	480	0	> 1433	0	> 333
Crétacé	480	240				
Malm	720	1240				
Dogger	1960	> 268				
Lias						
Trias						
Permocarb						

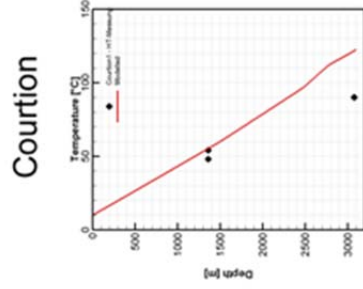
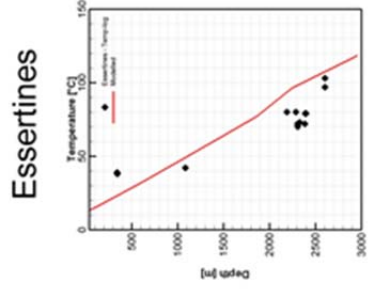
Courtion

		Profondeur Top [m]	Epaisseur [m]
Tertiaire	Molasse	0	1322
Crétacé	Hauterivien	1322	62
	Valanginien	1384	50
Malm	Purbeckien ca.	1434	43
	Portlandien-Kimmeridgien	1477	245
	Séquanien ca.	1721	100
	Argovien	1822	215
Dogger	Callovien	2038	65
	Bathonien-Bajocien	2103	335
Lias	Aalénien	2438	150
	Toarcien-Hettangien	2590	100
Trias	Keuper	2690	180
	ob. Muschelkalk ca.	2870	63
	Anhydrite groupe?	2933	>150

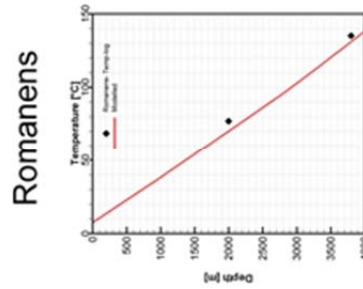
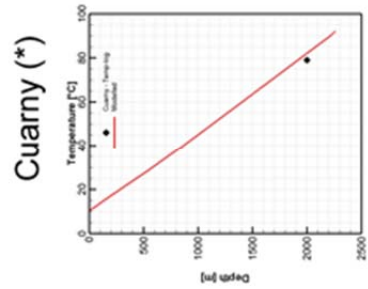
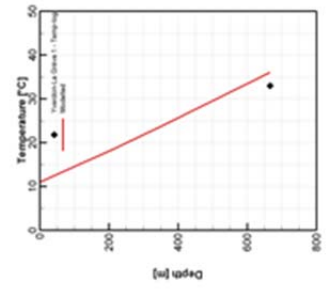
Données de température et résultats de la calibration pour le modèle de température



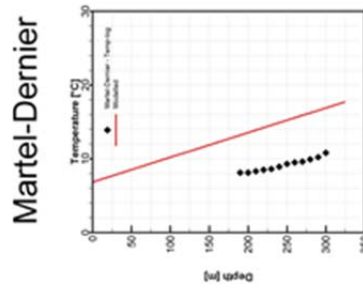
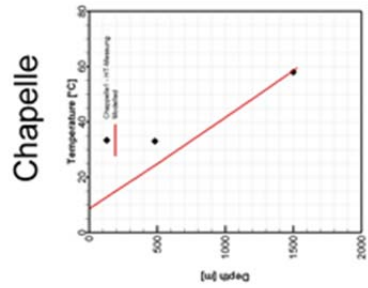
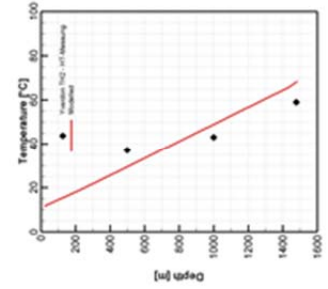
(*) Température interpolée



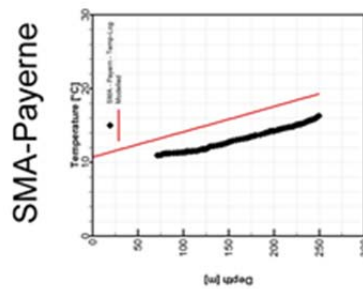
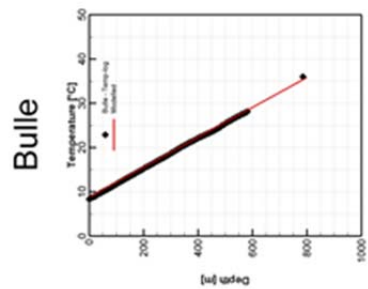
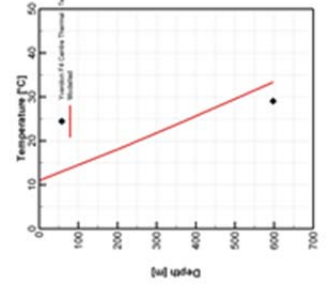
Yverdon La Grève



Yverdon F5



Yverdon F4



Yverdon Bel-Air

