

1 EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE SUISSE, RAPPORT 2006

Clément Baujard, Sarah Signorelli et Thomas Kohl

Geowatt AG

Dohlenweg 28

CH-8050 Zürich

e-mail: baujard@geowatt.ch

RESUME

Cette publication donne un aperçu des travaux effectués durant la période du 01.01.2006 au 31.12.2006 afin d'évaluer le potentiel géothermique de la Suisse sont exposés dans ce rapport. Cette étude est financée par le Bureau Fédéral de l'Energie et par la Commission Suisse de Géophysique. La Suisse Alémanique a fait l'objet de précédents rapports en 2004 et 2005. Le travail présenté concerne ici exclusivement le plateau suisse occidental. La zone étudiée est présentée. Cette dernière a fait l'objet d'une étude géologique et hydrogéologique avancée, qui sera présentée en détail dans la publication 2007, qui sera disponible en mai de cette année. Seules les grandes lignes des résultats de ces analyses sont présentées ici.

La définition des modèles structuraux permettant le calcul des températures est exposée. Une simulation numérique basée sur des processus uniquement diffusifs est réalisée pour chaque modèle régional. Une comparaison des résultats en température ainsi obtenus avec les données thermiques disponibles dans chaque domaine défini est effectuée. Les températures calculées sont présentées en 3D sur le domaine considéré. Une estimation des températures rencontrées aux différentes profondeurs de ces horizons ainsi que des puissances thermiques attendues sont calculées et représentées. Ces résultats intégrés sur la surface et dans le temps donnent alors une estimation de l'énergie disponible et de l'énergie utilisable dans le domaine étudié. L'évaluation de la productivité géothermique des aquifères identifiés en Suisse Occidentale est alors effectuée.

1.1 INTRODUCTION ET OBJECTIFS

Le travail effectué dans le cadre de ce projet jusqu'en décembre 2006 concerne le plateau suisse occidental. La région étudiée s'étend du pied du Jura au nord-ouest jusqu'aux Préalpes au sud-est. Cinq modèles régionaux y ont été défini afin de couvrir la majeure partie de cette région (voir figure 1).

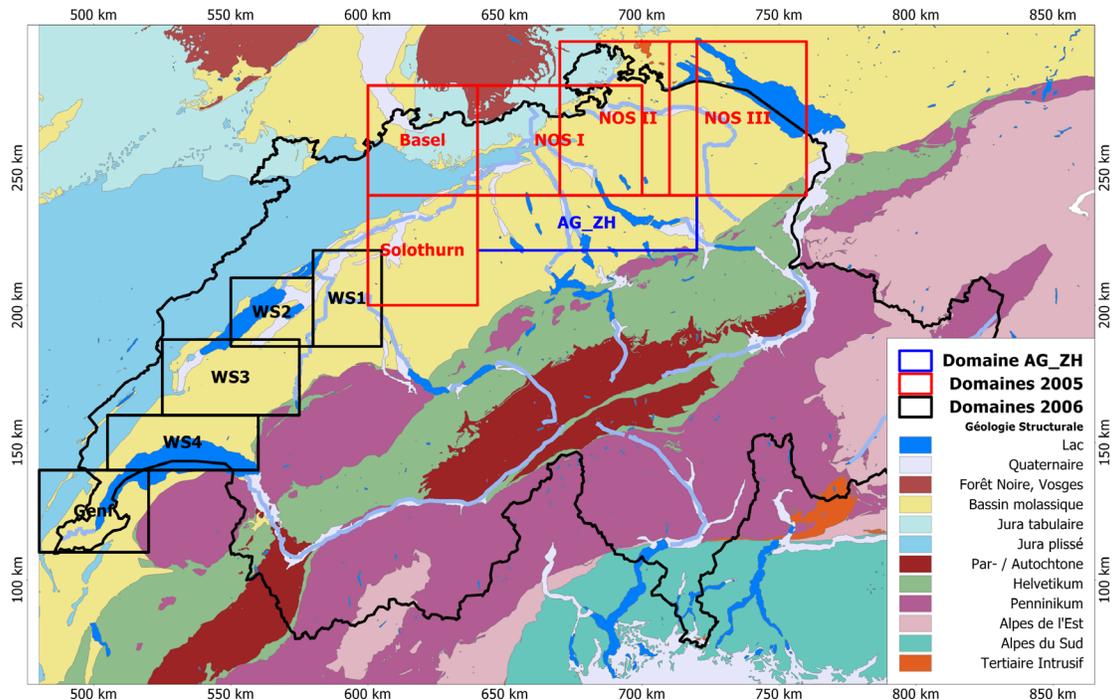


Figure 1: Carte géologique de la Suisse (© swisstopo) Les domaines délimités en rouge ont déjà été modélisés. Les modélisations des domaines délimités en noir (Genf et WS1 à WS4), ainsi que le modèle AG_ZH en bleu ont été réalisés en 2006.

Une connaissance approfondie de la géologie de cette région est nécessaire afin de réaliser les modèles structuraux les plus réalistes des domaines définis et d'interpréter de façon adéquate les mesures de températures effectuées dans les différents forages répertoriés. L'hydrogéologie quant à elle a peu d'influence lors de la réalisation de modèles thermiques diffusifs. En revanche, la présence d'un aquifère localement très perméable peut orienter vers un modèle dans lequel la température est influencée par des processus advectifs. D'autre part, l'étude de la situation hydrogéologique de la région mène à inférer des valeurs de conductivités hydrauliques des différents aquifères, dont dépend la prédiction de productivité et d'énergie utilisable des différents horizons.

Ce rapport se concentre sur les deux premières étapes de l'évaluation du potentiel géothermique de la région du plateau suisse occidental. La première étape est la création des modèles structuraux de Genf, WS1 à WS4 La seconde étape du processus est la réalisation de simulations de régimes thermiques diffusifs sur les modèles structuraux réalisés. Les données de température disponibles sont inventoriées afin d'être prises en compte et comparées aux résultats des modèles diffusifs. Ces derniers résultats sont enfin montrés en une distribution 3D de la température obtenue dans tous les modèles ainsi qu'à la base du mésozoïque.

La dernière partie du présent rapport est consacrée au calcul d'une estimation de l'énergie disponible et de l'énergie utilisable dans les différents aquifères répertoriés sur les domaines considérés. Les données prises en compte comme les profondeurs des aquifères, leur épaisseur ainsi que les résultats sous la forme de puissance thermique disponible sont présentés sous forme de cartes couvrant le domaine étudié.

1.2 CONCEPT DE L'EVALUATION DU POTENTIEL GEOTHERMIQUE

Le concept détaillé menant à l'évaluation du potentiel géothermique de la Suisse a été décrit précisément et la crédibilité des différentes approches possibles discutées par Signorelli, S. et Kohl, T. (2006). Toutefois un rappel de la démarche suivie est proposé dans ce paragraphe.

Schématiquement, les différentes étapes du processus peuvent être ainsi résumées :

Etape 1 :

Etude de la géologie régionale afin d'identifier et de déterminer la localisation des unités lithologiques majeures déterminant la distribution en température du sous-sol, par diffusion du flux géothermique terrestre jusqu'à la surface.

Etape 2 :

Localisation des aquifères présents dans le domaine étudié et évaluation de leurs propriétés hydrauliques régionales. Il est important de pouvoir déterminer si les propriétés hydrauliques estimées en différents points de mesures sont transposables à l'ensemble du domaine étudié.

Sont considérés dans cette étude uniquement les aquifères dont la profondeur est comprise entre 200 m et 5000m. En effet l'exploitation d'une ressource géothermique nécessite la présence d'une certaine chaleur dans l'aquifère considéré (d'où la présence de la borne 200m), et les techniques actuelles d'exploitation ne permettent pas l'utilisation fiable d'une ressource à une profondeur trop importante, ce qui justifie la présence d'une borne supérieure de profondeur, fixée à 5000 m.

Etape 3 :

Regroupement des données sur les températures en profondeur disponibles dans les différents ouvrages recensés. Cette étape nécessite également une évaluation de la qualité des données disponibles, afin de prendre en compte des données dont la crédibilité est établie.

Etape 4 :

Création de modèles géologiques constitués des principales unités lithologiques afin de simuler un régime thermique diffusif et calage des résultats sur les mesures de températures disponibles. Dans un premier temps, les paramètres de calage sont la valeur locale du flux géothermique terrestre et la conductivité thermique de chaque unité lithologique considérée, en se basant sur l'équation de diffusion thermique :

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \cdot \nabla T) - A$$

avec T la température [K], t le temps [s], ρ la densité [kg m^{-3}], c_p la capacité thermique spécifique [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$], λ la conductivité thermique [$\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$], A un terme source thermique [W m^{-3}].

Si aucun jeu de paramètres ne permet de correctement simuler la mesure de température observée, alors l'hypothèse d'un régime convectif local est envisagée et prise en compte par l'adjonction d'une source thermique figurant une circulation de fluide dans le milieu (théorie basée sur l'analyse de Péclet). L'analyse de Péclet stipule que si une différence entre les flux géothermiques estimés à la base et au toit d'un aquifère est observée du fait d'une circulation d'un fluide, cette différence est équivalente à l'adjonction d'un terme source thermique conceptuel dans l'équation de diffusion.

Etape 5 :

Evaluation du potentiel géothermique de chaque aquifère, selon la théorie développée par Gringarten, A.C. (1978). Il s'agit tout d'abord d'évaluer l'énergie disponible (*HIP=Heat In Place*) dans l'aquifère considéré, selon :

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

avec ρc_p la capacité calorifique du fluide [$\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$], V le volume de la ressource [m^3], T_{prod} la température de production du fluide [K] et T_{reinj} la température de réinjection du fluide [K].

Cette énergie disponible n'est pas toute utilisable. Un réseau de doublets, géothermiques donnés, dont l'écartement minimal entre les puits ($d=200$ m) et la distance entre les doublets ($a=4d$) sont donnés permet de calculer un débit optimum de production, sur une durée préétablie (30 ans). Ce débit optimal est calculé par un processus itératif et permet ensuite le calcul d'une puissance moyenne thermique

disponible, dont l'intégration sur 30 ans permet la détermination d'une énergie utilisable dans la ressource. Le rapport entre l'énergie utilisable et l'énergie disponible correspond au facteur de recouvrement, qui dépend de différents facteurs, et notamment de la transmissivité de l'aquifère considéré.

L'avantage essentiel de la méthode ici décrite est le fait que le facteur de recouvrement n'est pas une donnée du problème, ou un paramètre, mais un résultat. Ceci permet ainsi de recroiser les résultats afin de comparer le facteur de recouvrement obtenu avec des valeurs connues et utilisées dans le passé.

1.3 APERÇU GEOLOGIQUE

Dans le cadre d'une modélisation de la température du sous-sol comme celle menée dans cette étude des ressources géothermiques de la Suisse, il est important de commencer par dresser un modèle structural de la Suisse occidentale. Cette partie du rapport y est destinée. Le domaine étudié est constitué des sous-modèles Genf et WS1 à WS4, divisant le plateau suisse occidental (voir Fig. 1). Les chapitres suivants sont destinés à compléter l'étude disponible dans Signorelli et al. (2006), qui décrit les conditions géologiques de la zone d'étude de l'Atlas des ressources géothermiques.

En Suisse occidentale, les unités géologiques importantes à différencier sont le Jura plissé, le bassin molassique et les Préalpes (Spicher 1980; sur la région étudiée, les différences introduites par la nouvelle carte géologique de la Suisse sont mineures). La structure du bassin molassique est depuis les années 1940 l'objet de nombreuses études du fait de la prospection pétrolière (Althaus und Rickenbach 1947; 1952, Schuppli 1950, 1952). Depuis lors, des milliers de kilomètres de profils de sismiques-réflexion ont été enregistrés par les entreprises pétrolières. Seule une petite partie de ces profils est aujourd'hui rendue publique sur les cantons de Genève, Vaud et de Neuchâtel (Jordi 1990, Signer & Gorin 1995, Sommaruga 1997, Mariller et al., 2005). Les données de plus de 15 forages profonds datant de prospection pétrolière des années 1960 à 1980 sont disponibles de façon limitée. Une analyse du potentiel géothermique du canton de Vaud a également été publiée sur internet (Wilhelm et al., 2003).

1.3.1 Le fossé Permocarbonifère: le plateau Occidental et la limite sud du bassin molassique

Sur le plateau suisse occidental, tout comme en Suisse Alémanique, l'existence d'un fossé permocarbonifère a été mise en évidence (Signer et Gorin, 1995, Mariller et al., 2005). L'extension et la profondeur de ce fossé permocarbonifère sont très mal connues et aucune donnée consistante n'est disponible à ce sujet. Signer et Gorin (1995) font remarquer à juste titre que la profondeur maximale de ce fossé est de 4 km. En accord avec Pfiffner (communication personnelle 2005) et Signer et Gorin (1995), nous pouvons faire l'hypothèse de l'existence du fossé Permocarbonifère sous la limite sud du Jura plissé. Nous pouvons également supposer que la limite sud-est du Jura plissé est marquée par une faille du socle cristallin (Philippe 1995, Philippe et al. 1996). Cette idée a été émise par Laubscher (1985, 1986) et postule une relation directe entre les failles normales et les chevauchements générés dans la couverture sédimentaire qui prennent naissance sur ces failles. L'existence d'une série de fossés Permocarbonifères présents sur le plateau suisse central, en forme de semi-graben sera décrite dans le projet SGPK "Plateau Suisse" (Mariller et al., 2005). Une analyse critique et détaillée des profils de réflexion sismique au niveau du fossé Permocarbonifère sera menée dans le cadre de ce projet.

1.3.2 Le Dogger

D'après les résultats du rapport NTB 99-08, il existe au sein du Dogger dans le Jura Occidental des aquifères locaux. Ces aquifères prennent place au sein des couches du Bajocien. L'épaisseur du Dogger va en augmentant de l'est à l'ouest. On trouve en Suisse Occidentale dans le Dogger inférieur un faciès alterné constitué d'horizons de calcaires celtiques et de sédiments alémaniques argilo-marneux. Alors que l'on trouve dans les faciès celtiques du Nord ouest des dépôts d'eau de surface avec du calcaire biogène, on trouve à l'est une sédimentation de bassin quand le faciès Alémanique débute. La limite entre ces deux profils se trouve vraisemblablement au niveau du Jura tabulaire de l'est.

Les calcaires du Dogger du Jura plissé occidental et central sont généralement des aquifères reconnus. L'épaisseur nominale du Bajocien atteint environ 150m au niveau du Jura plissé ; il y est alors principalement formé formations grossières tardives et de calcaires oolithiques à la porosité de matrice connue. Après les marnes du Furcil les calcaires oolithiques et tardifs de la "Grande Oolithe" du Bathonien et de la "Dalle Nacrée" du Callovien. Cette dernière formation est connue dans le Jura neuchâtelois pour ses propriétés hydrauliques et l'excellente qualité de ses eaux (notamment résurgence de La Chaux de Fonds, sortie du système de drainage horizontal de la Gorge de l'Areuse). Au pied sud du Jura, ces couches du Dogger plongent avec les calcaires du mésozoïque sous la molasse du plateau et atteignent au niveau de Lausanne-Fribourg une profondeur de plus de 2500m. Le forage de Courtion, au nord de Fribourg montre que le Dogger y est très ressemblant à ce qui est trouvé dans le Jura neuchâtelois (Fischer & Luterbacher 1963; Pasquier et al. 1999). Le forage d'Yverdon-les-bains réalisé dans les années 1990 avait également pour but l'exploitation de cet aquifère supposé (Geister-Frantz 1987). Contre toute attente, cet aquifère s'est montré relativement improductif, du fait que cette unité résulte ici d'un tout autre régime de sédimentation (Murali et al. 1997).

1.3.3 Limite sud du bassin molassique – Molasse Subalpine

En direction du sud, la croûte européenne plonge avec un profil légèrement convexe (avec un léger dévers) sous les Alpes. Ce plongement est très bien documenté au niveau du Moho, et s'étend au moins jusque sous les Alpes centrales, à l'aplomb d'une ligne Coire-Matrigny, où l'épaisseur de la croûte atteint les 60 km. La géométrie précise de la partie supérieure de la croûte est à partir de ce niveau relativement moins bien connue. A la surface, différentes structures du front alpin peuvent être cartographiées: les couches les plus jeunes de la molasse s'enfoncent progressivement sous les Alpes et forment un marqueur plongeant du nord en monoclinale et pouvant être suivi de la Bavière jusqu'à Thoun. Au sud suit une zone d'écaillés monotones d'épaisseur kilométrique inclinées vers le sud appartenant à ce qu'on appelle communément la Molasse Subalpine. Le front alpin classique est défini par le chevauchement principal de la couverture Helvétique. La géométrie du socle sous ces structures de surfaces n'est que très partiellement connue. Quatre profils sismiques sont disponibles: un profil Est-ouest dans la région de Toggenburgs (Stäubli et Pfiffner 1991), un dans la région de Lucerne (Finsterwald; Vollmayr et Wendt 1987), un dans la région de Thoun (Michelot 1992; Schlunegger et al. 1993) ainsi qu'un dans la région de la vallée du Rhône (Singer et Gorin 1991). Tous ces profils montrent une indépendance. Toutes ces lignes montrent clairement l'indépendance des écaillés de la Molasse subalpine et des structures monoclinales inclinées vers le N (quelles sont ces structures monoclinales) des niveaux mésozoïques sous-jacents. Ces structures molassiques sont clairement cisailées le long de la molasse de mer supérieure ("Rupélien"). Les calcaires mésozoïques sous-jacents (supérieur Malm) plongent au moins jusqu'au niveau du front alpin Suisse de façon monotone en direction du sud et ne sont pas ou peu pliés ou cassés. Sous la partie ouest du bassin molassique et sous le front Alpin, au niveau du Malm autochtone se situent des structures anticlinales de grand rayon et d'amplitude variable. L'une de ces structures a été forée afin de rechercher du gaz naturel (Finsterwald, Vollmayer et Wendt 1987); ce forage a atteint son but après avoir traversé deux anticlinaux supposés (Michelot 1992). L'intégration de la Molasse subalpine n'est pas prévue dans cette étude.

Les failles, décrochement et accidents géologiques connus en Suisse Occidentale sont décrits dans le chapitre suivant de l'étude, car ces objets géologiques sont considérés comme ayant une influence majeure sur l'hydrogéologie et les écoulements dans les aquifères répertoriés.

1.4 ETUDE HYDROGEOLOGIQUE

1.4.1 Introduction

La partie étudiée du plateau suisse occidental s'étend des aquifères karstiques profonds du Jura (formés par les horizons du Malm et du Dogger) au nord-nord ouest jusqu'aux Préalpes, qui sont le siège d'aquifères karstiques et fissurés (Malm et roches cristallines). Entre les deux s'étend le plateau suisse,

avec la couverture sédimentaire, contenant des aquifères locaux épidermiques et l'aquifère de la Molasse d'eau de Mer supérieure.

L'étude de la carte hydrogéologique de Sarine, récemment constituée donne de nombreux renseignements sur la situation hydrogéologique de la région (Pasquier et al., 1999). Les différents aquifères d'extension régionale pris en compte dans notre étude seront les suivant :

- Le socle Cristallin et le fossé Permocarbonifère
- Le Muschelkalk supérieur
- Le Malm Supérieur
- Le Dogger

La molasse d'eau de mer supérieure ne sera ici pas étudiée. En effet cette dernière présente un caractère d'aquifère épidermique lorsqu'elle est présente sur le domaine étudié, ne remplissant ainsi en général pas les critères d'exploitabilité requis (profondeur de l'aquifère compris entre 200 et 5000 m).

L'ensemble des conductivités hydrauliques des différents aquifères précédemment cités est résumé dans un tableau issu de la carte géologique de Sarine (figure 2).

Parmi les aquifères locaux dignes d'intérêt mais non pris en compte dans cette étude du fait d'extensions limitées, nous pouvons citer l'aquifère de l'Hauterivien supérieur – Urgonien, qui est un aquifère de surface près de Neuchâtel (Blant, 1991). Sa porosité globale semble importante, mais les mesures sont peu nombreuses ; son niveau piézométrique correspond environ au lac de Neuchâtel. Nous pouvons également citer le réservoir du Valanginien, dont la conductivité hydraulique des calcaires le formant est estimée entre 1 et $6.10^{-6} \text{ m s}^{-1}$ (Matthey, 1986). Ce dernier semble avoir un fonctionnement hydrologique indépendant de l'aquifère du Hauterivien.

D'autre part, aucune données concernant le cristallin n'a pu être trouvée en Suisse Occidentale. Ainsi, nous considérerons ici que les valeurs utilisées en Suisse Alémanique, pour l'essentiel issues de la Nagra, restent valables sur le domaine étudié.

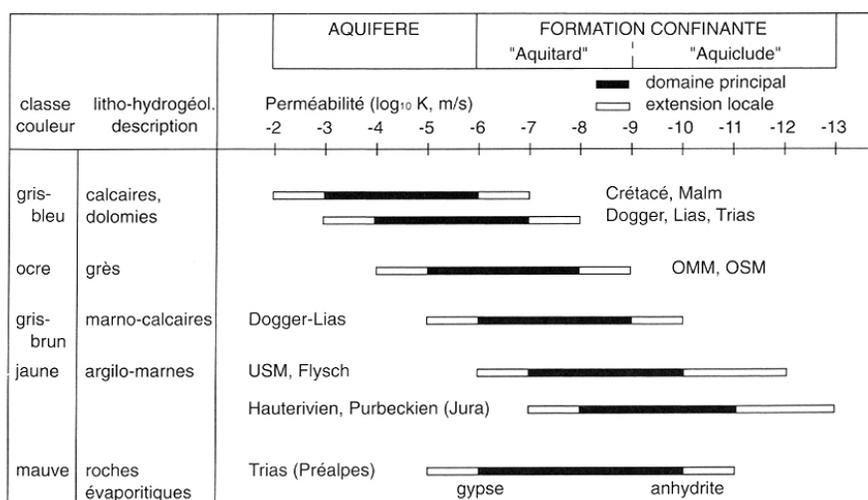


Figure 2: Domaines de conductivités hydrauliques des horizons hôtes des principaux aquifères de suisse occidentale, d'après Pasquier et al., 1999

1.4.2 Evaluation de la situation hydrogéologique de la Suisse Occidentale

L'aquifère le plus étudié en Suisse occidentale est de loin l'aquifère du Malm Supérieur. Beaucoup de données à son sujet sont donc disponibles. Quelques données sont disponibles sur l'aquifère du Dogger.

Le Cristallin ne sera pas ici étudié plus avant ; on peut supposer que ces propriétés varient peu à l'échelle du pays et donc que les propriétés hydrauliques de cette couche déduite de l'étude effectuée en Suisse Alémanique sont applicables en suisse Occidentale.

Muschelkalk Supérieur

L'aquifère potentiel que représente le Muschelkalk est peu étudié en Suisse Occidentale. En effet, la présence d'aquifère aux eaux chaudes et propres à la consommation que sont le Dogger et le Malm diminue le besoin d'effectuer des forages jusqu'à une telle profondeur. Aucune donnée quantitative sur les propriétés de cet aquifère n'a pu être trouvée dans le domaine étudié. Par conséquent, les valeurs dérivées lors de l'étude hydrogéologique de la Suisse alémanique sont ici admises comme étant représentatives de cet aquifère (Signorelli et al, 2006). Pour mémoire, la valeur de la conductivité hydraulique de l'aquifère y était donnée variant entre $7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$ dans une zone non faillée jusqu'à $3 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$ dans une zone dans laquelle les écoulements sont dirigés par des failles.

Dogger

La variabilité spatiale de la conductivité hydraulique des horizons aquifères du Dogger est un facteur prépondérant dans le fonctionnement hydrologique global de cette couche. Il s'agit d'un aquifère calcaire localement karstifié. Les trois couches aquifères majeures du Dogger sont, de haut en bas, la dalle nacrée du Callovien, le Hauptrogenstein, et les calcaires à entroques et récifaux du Bajocien (Geister-Frantz, 1987). L'épaisseur de ces horizons varie également dans l'espace, rendant difficile une évaluation régionale des propriétés de cet aquifère. Au pied du Jura, l'aquifère principal du Dogger est représenté par les calcaires récifaux du Bajocien. Leur épaisseur est estimée aux environs de 110m. Les données rapportées par Geister-Frantz (1987) sont généralement très élevées, puisque les conductivités hydrauliques varient entre $1.1 \cdot 10^{-4} \text{ m s}^{-1}$ et $3.6 \cdot 10^{-5} \text{ m s}^{-1}$. Il est à noter que toutes les valeurs rapportées dans cette étude font référence à des mesures dans le Jura. Le Dogger apparaît ainsi comme un aquifère intéressant dans les régions affectées par les grands accidents décrochants au pied du Jura.

Le forage F5 de Yverdon les bains reporte une épaisseur du Bajocien d'environ 200m, mais l'épaisseur de calcaire traversée est d'une cinquantaine de mètres (CHYN, 1999). Le problème majeur de l'aquifère du Dogger est une grande variabilité de ses propriétés physiques, dues à des variations de faciès des roches hôtes importantes. Ainsi, le rapport final du forage F5 d'Yverdon-les-bains destiné à exploiter des eaux d'une cinquantaine de degrés dans ce dernier, établi par le CHYN en 1999, rapporte que les séries bajociennes montrent dans le forage F5 des lithologies peu semblables au log de Treykovagnes. Les roches très marneuses rencontrées y ont indiqué des faciès de sédimentation en domaine profond se rapprochant des logs d'Essertines et de Courtion. Le Dogger semble ainsi constituer un faciès de transition entre Treykovagnes et Essertines avec des roches non décrites à ce jour. Le forage F5 n'a pas permis d'exploiter l'aquifère du Dogger du fait de débits de production dans le forage bien trop faibles.

Ceci met en évidence le fait qu'il est périlleux de représenter l'aquifère du Dogger par des propriétés hydrauliques homogènes sur toute son extension. Selon toute vraisemblance, le Dogger ne constitue qu'un aquifère aux propriétés très médiocres, voire insuffisantes sur la majeure partie du domaine étudié. **Ce dernier ne sera donc pas considéré comme un horizon exploitable afin de produire de l'énergie géothermique lors du calcul des ressources.**

Malm Supérieur

L'horizon du Malm Supérieur constitue un aquifère de choix sur le plateau suisse occidental, de par son épaisseur, et a donc en conséquence beaucoup été étudié. En effet de nombreux forages de reconnaissance au pied du Jura plissé ainsi que les forages réalisés à Yverdon-les-bains permettent d'obtenir un aperçu régional des propriétés de cet aquifère.

L'appellation Malm Supérieur, qui qualifie souvent les étages hydrogéologiquement intéressants du Malm, regroupe en général deux formations que sont le Kimméridgien et le Portlandien. Le Portlandien est formé de calcaires et de dolomie et le Kimmeridgien est formé de calcaires exclusivement.

L'écoulement dans ces deux étages est dominé par des écoulements dans des structures accidentelles de types failles.

Le massif du Jura constitue la zone d'infiltration de cet aquifère. La couche du Malm plonge au niveau du pied du Jura sous les couches du crétacé et de la Molasse, et gagne en profondeur en direction du massif alpin.

Une analyse des données disponibles a été menée afin de déterminer quelles valeurs moyennes de conductivité hydraulique du Malm pourront être utilisées lors du calcul de la productivité géothermique de l'aquifère. Les résultats sont montrés dans la figure 5

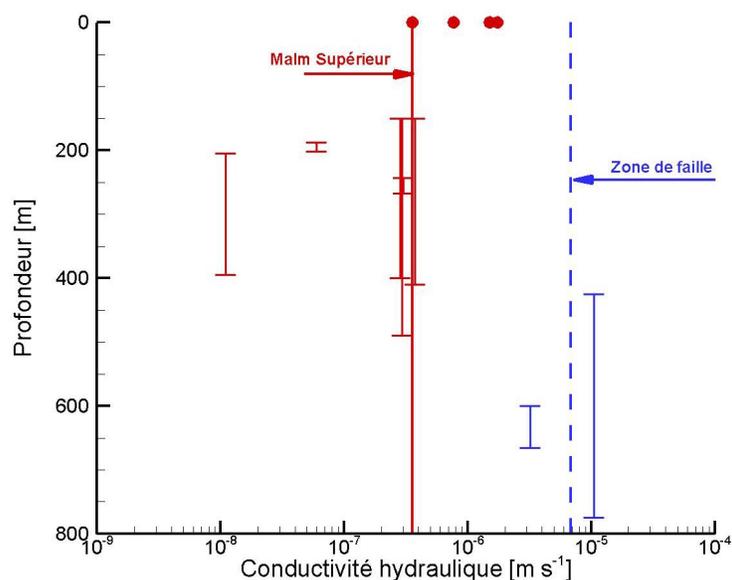


Fig. 1: Conductivité hydraulique K dans le Malm supérieur, en fonction de la profondeur et de l'intervalle de mesure et valeur médiane pour les zones poreuses et faillées. Quatre forages sont représentés sans données de profondeurs sur l'intervalle de mesure.

L'analyse statistique de la distribution des conductivités hydrauliques dans le Malm Supérieur montre qu'une des valeurs présentées ne peut pas être incluse dans une distribution gaussienne des conductivités hydrauliques mesurées (forage de Weiach, mesure de la Nagra estimant la conductivité hydraulique de Malm supérieur à $6 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$). Ainsi, si l'on admet que les valeurs mesurées disponibles sont représentatives de la distribution spatiale des conductivités hydrauliques du Malm Supérieur, seuls 93% du Malm supérieur représente un potentiel géothermique exploitable.

1.4.3 Failles et zones faillées hydrauliquement déterminantes

En comparaison avec le Jura Plissé ou la zone de failles du Jura Tabulaire du sud de Bâle, la région du plateau central, allant de Solothurn aux environs de Payerne – Moudon, peut-être considérée comme calme. Les structures les plus importantes sont des plis d'amplitude inférieure à la centaine de mètres, mais de longueur d'onde beaucoup plus grande que dans la couverture sédimentaire. L'orientation de ces structures plissées est irrégulière: au niveau du pied du Jura sud, ces plis suivent une direction parallèle au Jura plissé, et dans la région de Fribourg, il y a aussi des écarts par rapport à l'orientation N-S.

La plupart des lignes sismiques montrent un décollement principal au niveau des couches d'évaporites du Trias ainsi que l'existence de coussin d'évaporites sous les anticlinaux. L'orientation des est irrégulière : le long du pied méridional du Jura les plis sont essentiellement parallèles au Jura plissé ; dans la région de Fribourg on observe des déviations en direction N-S ou des structures en dômes et bassins non orientés.

Les principales zones de failles sont représentées par des décrochements sénestres orientés principalement N-S:

- La Ferrière – Vue des Alpes au nord-ouest de Neuchâtel
- Pontarlier – Vallorbe au nord-ouest de Lausanne
- Morez-Nyon
- Le Vuache – Annecy à l'ouest de Genève

La zone de faille de la Ferrière – Vue des Alpes n'a pas de continuité triviale dans le bassin molassique. La zone de Fribourg (voir ci-dessous) n'est pas située sur la même ligne, mais décalée de 15 km environs vers l'est. La faille de Fribourg quant à elle n'a pas non plus de prolongement manifeste au nord dans le Jura plissé. En revanche, les trois autres zones de failles de Pontarlier, Morez et Le Vuache se prolongent jusque dans le Jura plissé et dans le bassin molassique limitrophe au sud-est.

La direction de cette dernière zone de faille change progressivement d'est en ouest et tourne en même temps que l'arc de failles, et il paraît vraisemblable qu'il s'agisse dans la couverture de discontinuités (failles) développées pendant le plissement et la formation de l'arc du Jura. Les décrochements ont joué un rôle principal durant le plissement du Jura et ont aussi contribué à arquer la chaîne du Jura. Les mécanismes au foyer des tremblements de terre apportent également des indices en faveur de l'existence de cassures d'orientation "rhénaniques" (N-S) dans le socle à l'aplomb du système Pontarlier–Vallorbe tout comme pour la zone Fribourg – Murten (Kastrup, 2002). Un multiplet sismique très bien documenté orienté ONO-ESE limite les décrochements/chevauchements Vuache – Annecy à la couverture sédimentaire (Thouvenot et al., 1998), il est également supposé ici par l'auteur principal qu'il s'agit d'une structure ancienne du socle toujours réactivée.

Les décrochements sénestres du Jura Plissé sont pour la plupart accompagnés de décrochements dextres et le Jura apparaît ainsi en carte comme une mosaïque de losanges délimités par des failles. A l'ouest d'Yverdon, ce système de failles continue clairement vers le sud dans le bassin molassique. Le bassin molassique s'amenuise en allant vers l'ouest et rejoint à l'ouest de Genève la chaîne subalpine. Dans cette chaîne (tout comme dans les Préalpes Romandes), les décrochements orientés N-S sont associés avec des décrochements dextres E-O, et la question se pose de savoir si la totalité de ce système de failles n'est pas due à la persistances d'une phase de déformation alpine tardive.

Au sein du plateau suisse occidental, cinq structures hydrauliquement déterminantes sont ainsi définies :

- **Décrochement Pontarlier – Vallorbe – Aubonne:** avec quelques 80 km de longueur totale, cette faille transverse N-S est l'une des plus importantes et des mieux connues des structures de failles du Nord des Alpes. Heim (1919) la décrit ainsi: "...comme si un Dieu avait fait une coupure gigantesque inguérissable avec un couteau énorme à travers les rides de la croûte terrestre". Une observation précise de cette faille révèle un système complexe de décrochements principalement sénestres. Les plis du Jura se sont en partie formés en même temps que ce décrochement (Affolter und Gratier, 2004) et peuvent ainsi servir de repère pour le décrochement horizontal. Ceci est observable au milieu de la zone de faille, entre Vallorbe et Pontarlier, sur une longueur de 2 à 3 km. Au sud de Vallorbe, cette faille NS est déportée au NO par le chevauchement de la Dent de Vaulion, Une connexion directe avec le décrochement NNO-SSE situé entre Le Pont à l'ouest du Lac de Joux et Montricher paraît très probable. Plus au sud, la faille se perd sous la couverture quaternaire dans le bassin molassique. On suppose un qu'elle se prolonge jusqu'au lac de Genève, en passant par Aubonne. Une faille conjuguée importante à celle de Pontarlier apparaît au sud du Jura :

- **Mormont – Vallorbe:** La dent de Vaultion est une structure en forme de clavette (sur une carte), qui chevauche de plusieurs kilomètres dans la direction NO. Au nord-est, cette structure est limitée par le décrochement dextre de Mormont – Vallorbe. On compte au moins deux branches parallèles à cette faille. Cette dernière est clairement définie entre Vallorbe et La Sarraz, dont le décrochement horizontal apparent est de presque un kilomètre. Plus au sud, la faille se perd sous la couverture quaternaire dans le bassin molassique. On suppose qu'elle se prolonge jusqu'au Nord de Lausanne, jusqu'au chevauchement de la molasse subalpine.
- **Faille Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC):** Une zone complexe de chevauchements dextres constituée d'au minimum deux branches de failles bien limitées s'étend de Cuarny à l'est dans la direction de la Plaine de Baulmes à l'ouest. Plusieurs chevauchements sénestres orientés NS prennent fin au niveau de la faille PCC. D'après les recherches menées par Muralt et al. (1997), cette faille tranpressive serait accompagnée d'un rejet vertical (ou d'une composante verticale) allant jusqu'à 500m. L'hypothèse d'une connexion hydraulique directe entre les branches de failles peut être considérée comme acquise. La faille plonge avec un pendage de 80° en centre en direction du SE, et une composante de chevauchement peut clairement être identifiée (le block sud est surélevé). Tout comme la Dent de Vaultion, la faille PPC a un équivalent conjugué, identifié dans le décrochement NS sénestre qui s'étend de Yverdon-les-bains jusqu'à près de Echallens. Deux autres cassures de même orientation et d'une longueur d'au moins 12 km sont identifiables; l'une s'étend de Beaulmes à Mormont et l'autre de Suchet à Romainmotier. Ce système dans sa totalité, comprenant les failles NS et leurs conjuguées NO-SE, peut-être considéré comme faisant partie du grand système de Pontarlier.
- **Zone de Fribourg:** Il existe à proximité de Murten-Fribourg une zone de failles sismiquement actives au niveau du socle cristallin supérieur. Les cartes des épacentres tout comme les mécanismes au foyer montrent clairement la présence d'un décrochement NS (Kastrup, 2002). Cette zone de cassure est tout à fait imperceptible dans la géomorphologie de la surface (Atlas der Schweiz, Höhenmodell dans le raster 25m). Malgré cela, nous pouvons postuler de l'existence d'une structure de graben dans la région de Fribourg (Chenevert et Riesen 1985, Berger 1994, Kastrup 2002) et l'interpréter comme un prolongement du fossé d'effondrement rhénan. L'analyse détaillée des lignes de prospection sur la plateau ouest menée par Mariller et al. (2005) laisse supposer de la présence d'une structure de graben entre Bienne et Fribourg. Les failles du socle sont certainement le prolongement des failles de la couverture sédimentaire, mais ne sont pas identifiables à la surface.
- **Nyon:** Entre Rolle, Nyon et Genève apparaît le premier anticlinal jurassien, clairement accompagné d'un système complet de décrochements dextres d'extension ONO-ESE. Le décrochement horizontal apparent est en moyenne inférieur au kilomètre, sauf pour cinq d'entre elles (St.Cergue – Luins, Vuarnes-Gland, Bonmont-Yvoire, Namenlose, Divonne) pour lesquelles le décrochement varie entre 3 et 5 km. Toutes ces failles sont assises sur la molasse et s'étendent au moins jusqu'au lac de Genève; il peut être raisonnable de supposer que ces dernières continuent jusqu'au front des Alpes du côté français.

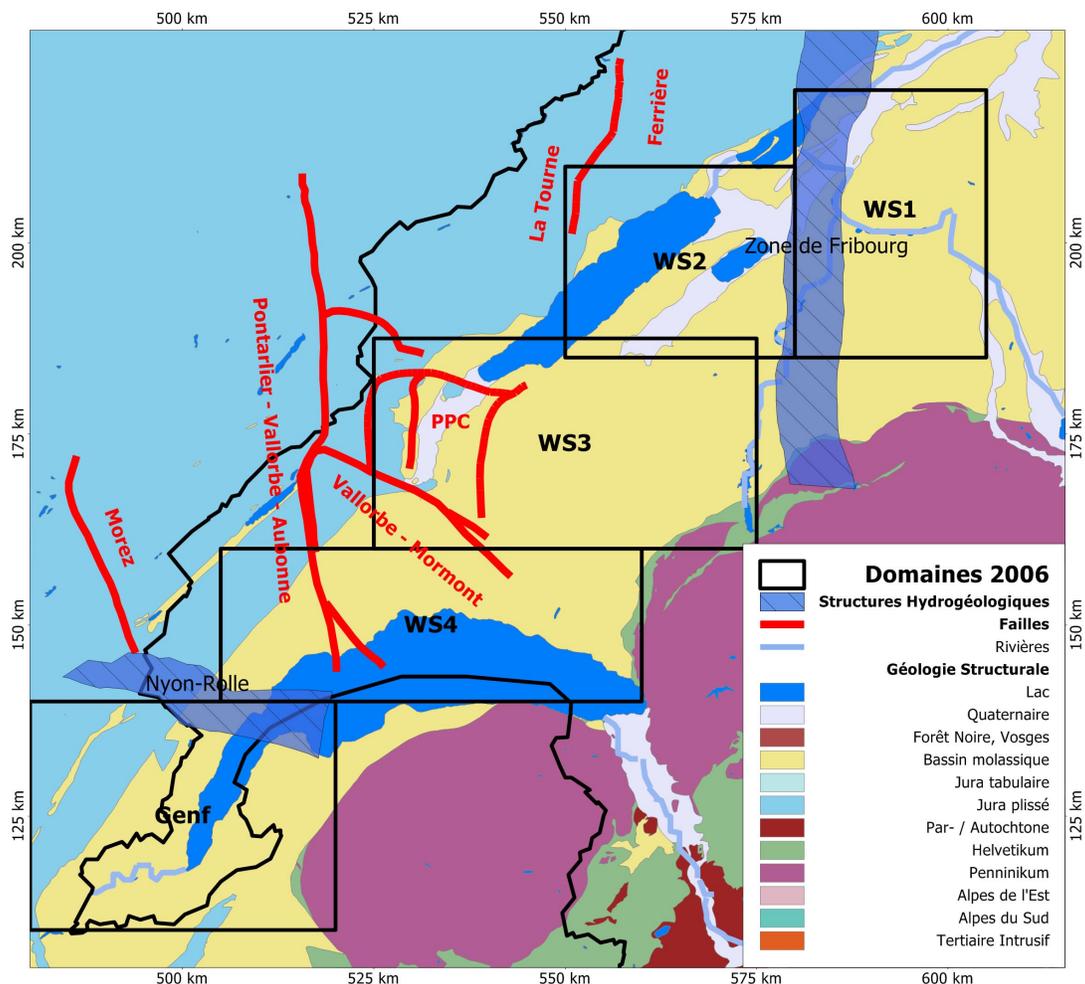


Figure 4: Failles et structures hydrogéologiquement déterminantes pour les domaines de Genève, WS1 à WS4.

1.4.4 Résumé des propriétés hydrauliques des différents horizons

L'étude de ces données ne modifie pas substantiellement l'étude précédemment menée (Signorelli et Kohl, 2006) mais apporte de nombreuses mesures concernant la conductivité hydraulique du Malm Supérieur, aquifère relativement bien connu en Suisse Occidentale. Les tableaux suivants présentent les valeurs de conductivités hydrauliques et d'épaisseur moyenne des aquifères pris en compte.

Tableau 1: Conductivités hydrauliques [$m s^{-1}$] des aquifères. Valeurs utilisées pour la détermination de l'énergie géothermique utilisable.

	Catégorie A "non perturbé"	Catégorie B "zone de faille"	Catégorie C "champ de fracture"	Catégorie D "Jura plissé / Jura tabulaire"
Malm Supérieur	$3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$	-
Muschelkalk Supérieur	$7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$	$8.5 \cdot 10^{-7}$
Christallin supérieur altéré	$5 \cdot 10^{-8}$	$1 \cdot 10^{-7}$	$8 \cdot 10^{-8}$	-

Tableau 2: Epaisseur moyenne des différents aquifères pris en compte.

	Jura plissé	Jura tabulaire	Molasse
Malm Supérieur	150 – 400 m	-	150 – 350 m
Muschelkalk Supérieur	45 – 80 m	40 – 110 m	≈ 80 m
Christallin supérieur altéré	≈ 500 m		

1.5 POTENTIEL GEOTHERMIQUE DU PLATEAU SUISSE OCCIDENTAL

1.5.1 Modèle structurel géologique

Les modèles structuraux utilisés dans cette étude sont basés sur l'interprétation de profils sismiques dans la Suisse Occidentale (Marillier et al., 2005). Les profils interprétés jusqu'en 2005 ont permis l'élaboration des modèles géologiques structuraux utilisés.

La technique de discrétisation utilisée est similaire à celle décrite dans le rapport annuel précédent (Signorelli et al., 2006). Les données disponibles sont intégrées grâce au logiciel *GOCAD* et un maillage est créé. Le domaine modélisé de la Suisse Occidentale est divisé en cinq modèles: Genf, WS1, WS2, WS3 et WS4. La figure 4 montre ainsi la couverture spatiale de ces différents modèles, ainsi que la localisation des forages avec données de température disponibles. La profondeur des modèles est de 10 000 m.

Les seules unités géologiques considérées pour les modèles sont les suivantes :

- La couverture sédimentaire, différente selon que l'on se trouve sur le massif du Jura ou bien sur le plateau Suisse,
- Le socle cristallin altéré
- Le socle cristallin.

Les données disponibles sur les fossés permocarbonifères n'étaient pas disponibles au moment où les modèles numériques structuraux destinés à déterminer un modèle de température diffusif dans le sous-sol ont été construits. Ces derniers ne sont donc logiquement pas pris en compte.

En revanche, les données sont arrivées afin de permettre la prise en compte de ces fossés permocarbonifères pour le calcul de l'énergie disponible dans le sous-sol en fonction des températures calculées et des transmissivités des différents aquifères, ce qui a permis de prendre en compte dans cette partie (chapitre 1.5.3) la profondeur réelle du toit du cristallin et du Muschelkalk.

1.5.2 Modélisation de la distribution en température dans le sous-sol

Les propriétés thermiques des différentes unités lithologiques sont considérées comme homogènes dans l'ensemble des domaines. Le calage des températures avec les données est effectué grâce au flux géothermique, considéré dans le problème comme un paramètre.

Tab. 1.1: Propriétés thermiques des unités lithologiques prises en compte pour le calcul des distributions en température dans les modèles, d'après Schärli et Kohl (2002)

	Conductivité thermique [W m ⁻¹ K ⁻¹]	Terme source [μWm ⁻³]
Sédiments	2.9	0.5
Jura plissé	2.9	0.5
Cristallin altéré	3.1	2.8
Socle cristallin	3.1	3.2

La qualité des données disponibles est très variable d'un domaine à un autre. En effet, entre deux et huit forages avec données de température sont disponibles pour différents domaines. La définition des domaines a été déterminée afin de prendre en compte un maximum de forages avec données en température par domaine. D'une manière générale, l'écart entre le modèle et les mesures est acceptable.

Le but de la calibration du modèle est double. Tout d'abord, les résultats calculés doivent s'accorder au mieux avec les mesures en températures disponibles. D'autre part, il convient de s'assurer que la température calculée dans les modèles est bien continue d'un domaine à un autre, et ce sur toute la profondeur du modèle. A ce sujet, la continuité entre les domaines WS4 et Solothurn a été respectée lors de la calibration des modèles thermiques diffusifs.

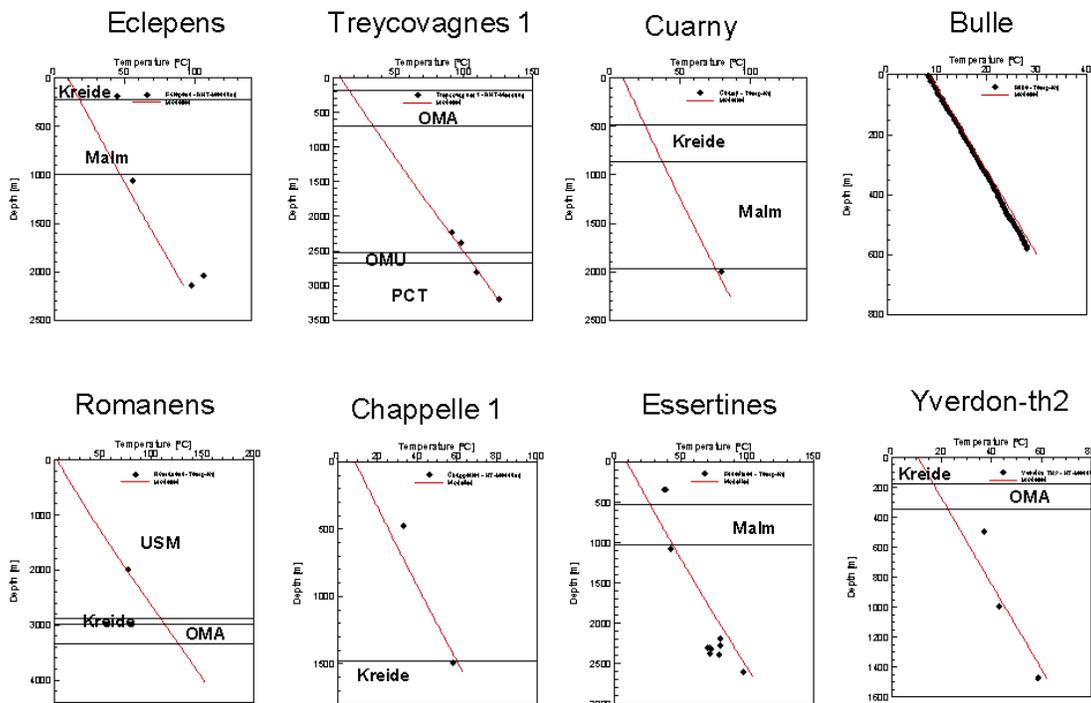


Figure 5: Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine WS3 (USM= Untere Süsse Molasse, OMA= Oberer Malm, OMU= Oberer Mulschelkak)

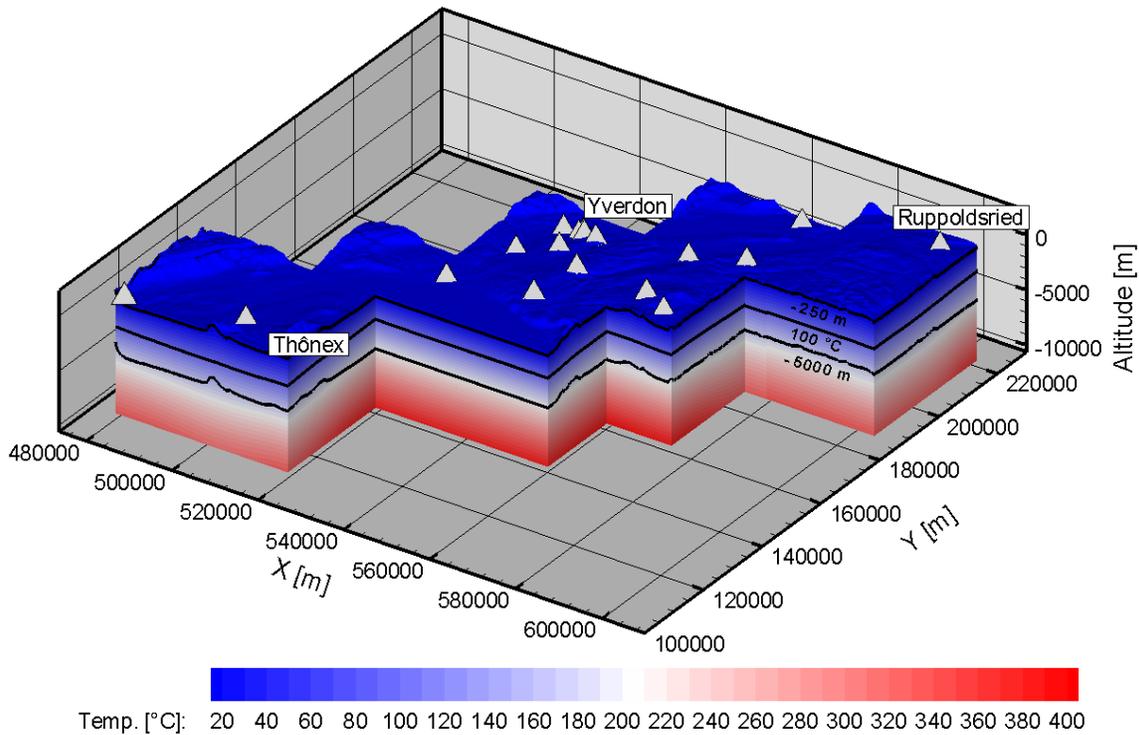


Figure 6: Résultats du calcul de la température en 3D des modèles diffusifs de Genf, WS1 à WS4

1.5.3 Evaluation du potentiel géothermique

A ce stade des travaux, un modèle 3D complet des distributions en température en Suisse Occidentale est disponible, basé sur les mesures disponibles et crédibles. Afin de pouvoir en déduire l'énergie utilisable, il faut pour chaque horizon susceptible de contenir un aquifère exploitable (cristallin altéré, Muschelkalk Supérieur, Malm Supérieur) extraire du modèle les valeurs suivantes :

- Profondeur de toit de l'aquifère considéré;
- Epaisseur de l'aquifère afin de déterminer sa transmissivité si ce dernier n'est pas supposé de puissance constante
- Température de l'aquifère à une profondeur moyenne;

Ces données permettent de calculer pour chaque aquifère une carte montrant la puissance thermique moyenne utilisable. Le total de cette puissance est alors intégré numériquement sur la surface disponible et dans le temps afin d'obtenir l'énergie utilisable E_{ut} de chaque aquifère, qui, rapporté à l'énergie disponible permet d'obtenir le coefficient de recouvrement et ainsi de vérifier si les hypothèses de calcul sont réalistes.

Les résultats obtenus sont ici présentés pour l'aquifère du Muschelkalk Supérieur. Tout comme pour le cristallin, le Muschelkalk supérieur est supposé d'épaisseur constante, prise à 70 m sur le domaine considéré. Signorelli, S. et Kohl, T.(2006) ont mis en évidence que 35% des valeurs du Muschelkalk Supérieur rendaient cet aquifère impropre à la production d'énergie géothermique.

Les figures 7 à 9 montrent la profondeur du toit du Muschelkalk Supérieur, la température dans cette aquifère à une profondeur moyenne (35 m sous son toit) et la puissance géothermique extractible de cet aquifère. La valeur maximale prédite par les modèle est de 35 MW_{th} .

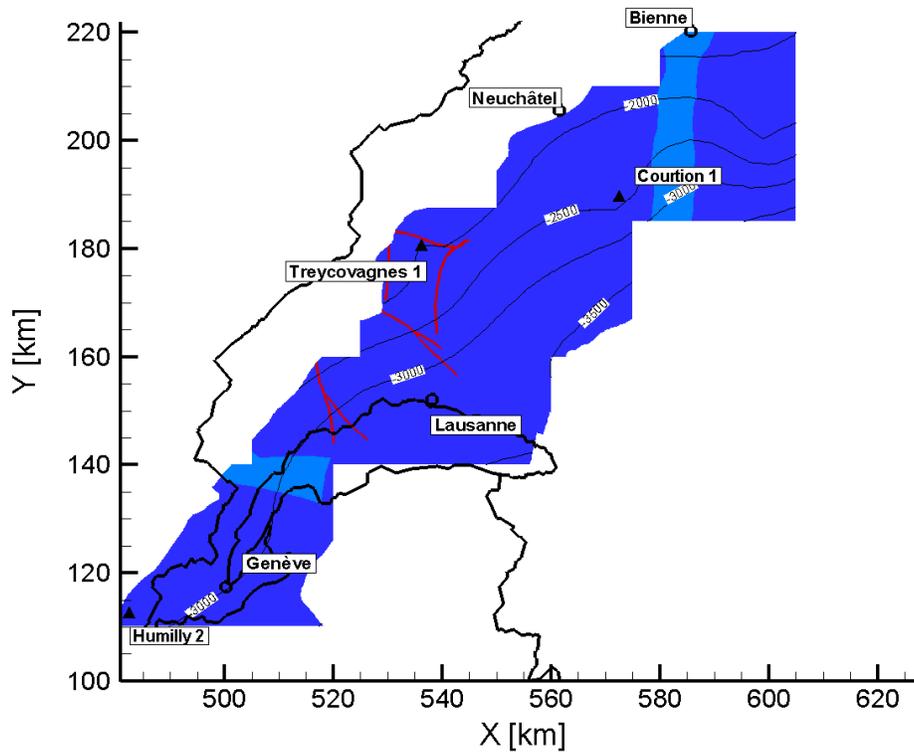


Figure 7: Carte des Isohypes du Muschelkalk Supérieur (en bleu foncé), avec les failles (en rouge) et les zones fracturées (en bleu clair). Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

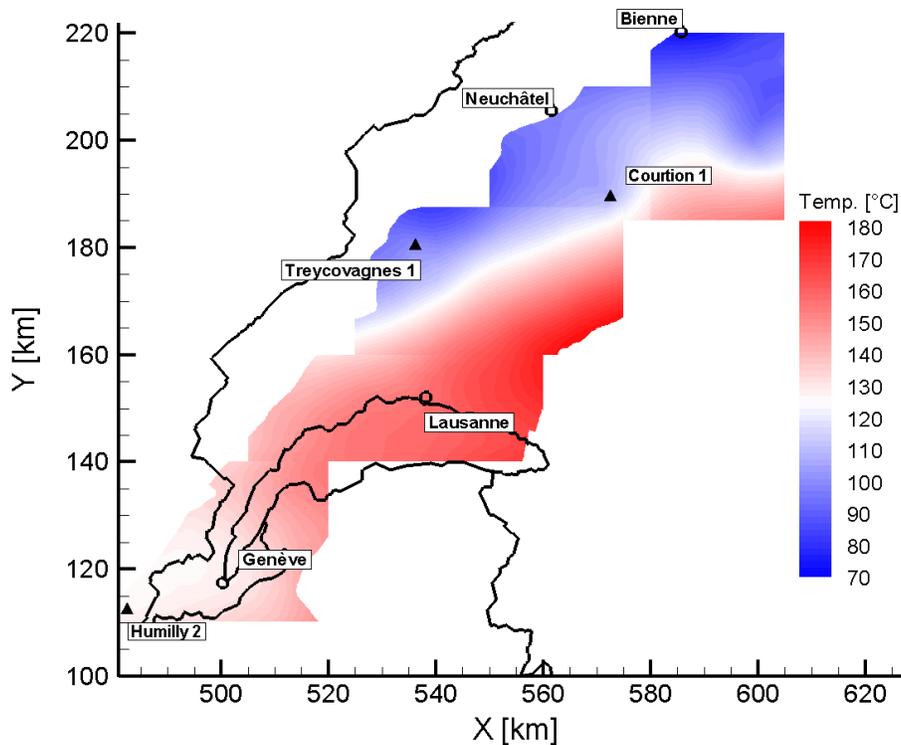


Figure 8: Température moyenne dans l'aquifère du Muschelkalk Supérieur altéré. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

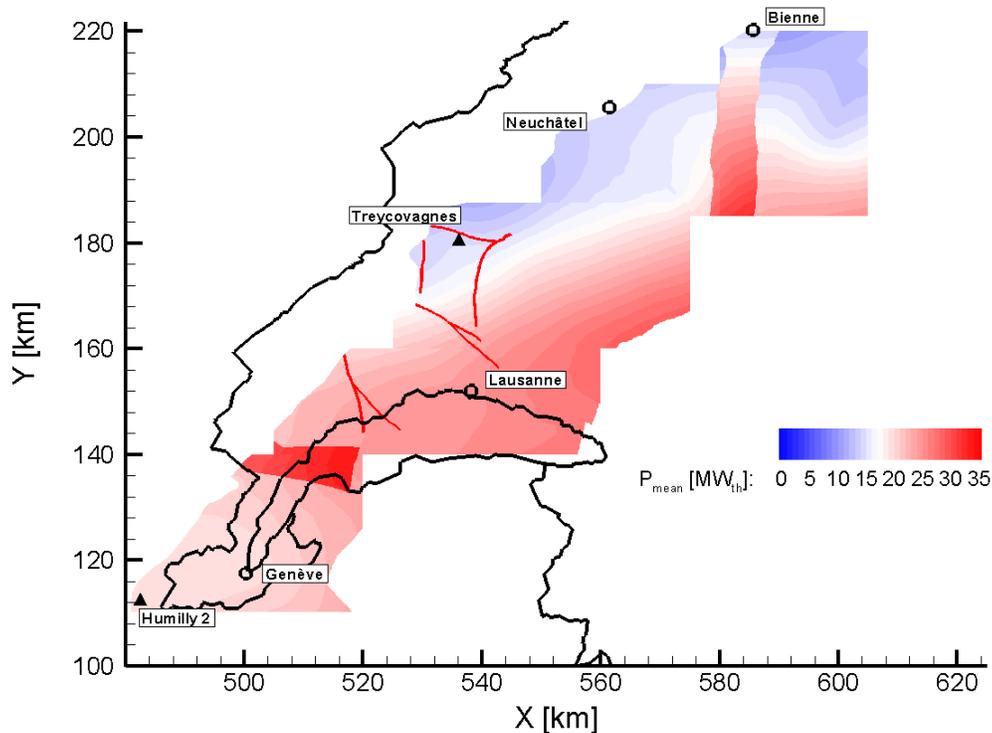


Figure 9: Puissance géothermique moyenne calculée pour l'aquifère du Muschelkalk Supérieur. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

1.6 CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES DE TRAVAIL JUSQU'A LA FIN DU PROJET

Ce rapport annuel de la Commission Suisse de Géophysique présente un aperçu du travail effectué dans le cadre de ce projet. Parallèlement à la publication 2006 de la Commission Suisse de Géophysique présentant l'intégralité des résultats pour de l'évaluation du potentiel géothermique en Suisse Alémanique, **une publication définitive du travail mené et de l'ensemble des résultats obtenus pour la Suisse Occidentale sera disponible en mai 2007.**

D'un point de vue pratique, lors de la réalisation de l'étude, si le calage des modèles thermiques diffusifs sur les données disponibles semble se faire de manière naturelle, quelques problèmes ont été rencontrés lors de cette phase de travail :

- D'une manière générale, les horizons établis comme des marqueurs sismiques sont différents des horizons influençant le calcul des températures
- Très peu de données sont disponibles concernant le canton de Genève. Par exemple, l'intégration d'un fossé permocarbonifère au niveau de ce canton n'a put être prise en compte pour ce rapport. Il sera alors nécessaire de revoir les résultats ici annoncés si des données à ce sujet deviennent publiques prochainement.
- Les positions des failles dans le cristallin sont mal connues. L'état actuel des connaissances sur le socle cristallin ne permet pas de déterminer avec précision des zones à fort potentiel de productivité géothermique.
- Aucune mesure de température dans le cristallin n'est disponible sur le domaine de la Suisse Occidentale.

Pour terminer, il faut remarquer que si l'énergie géothermique présente de forts avantages comme une faible émission de CO₂, cette dernière se présente sous forme brute comme de la chaleur, qui est une

énergie remarquablement peu transportable. Ainsi afin de pouvoir tirer au mieux profit de cette source d'énergie, il paraît indispensable de croiser les résultats de l'étude présentée ici avec des données de surface recensant les demandes en énergie réparties sur le territoire, afin de pouvoir déterminer avec précision les zones économiquement viables pour l'exploitation de l'énergie géothermique. Dans cet objectif, une coopération avec l'ETH de Zürich afin de croiser les résultats obtenus avec les données de terrain est prévue jusqu'à la fin de l'année 2007.

1.7 REFERENCES

- Althaus, H. E. (E. Rickenbach), 1947: Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, Teil I: Die ölführende Molasse zwischen Genfer- und Neuenburgersee. Über geologische Untersuchungen im Gebiet der ölführenden Molasse in Genf. - E. Rickenbach: Vorkommen von bituminösen Schiefern. Asphaltvorkommen. Erdgasvorkommen. Beiträge Geol. Karte CH, Geotechn. Serie 26/1
- Althaus, H.E. & Rickenbach, E. 1952: Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, IV. Teil. Beitr. Geol. Schweiz, Geotechn. Ser. 26, 79p.
- Affolter, Th. & Gratier, J.P. 2004. Map view restoration of an arcuate fold-and-thrust belt: The Jura case. J.G.R. 109 B03404, doi: 10.1029/2002JB002270, 2004.
- Berger, J.P. (online 2006)
http://comp1.geol.unibas.ch/modules.php?name=Downloads&d_op=viewdownload&cid=7&min=0&orderby=titleA&show=10
- Blant, D., 1991. Essais de perméabilité en forage et hétérogénéité - cas de la Béroche (Neuchâtel, Suisse). Bulletin du Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel(10): 108-119.
- CHYN, 1999. Forage géothermique F5 à Yverdon-les-bains, rapport technique final, CHYN - Université de Neuchâtel.
- Chenevart, C. J. & Riesen, A. R. 1985. Possible significance of Eurafrican wrench-fault zones: differential drift and driving mechanism. Bulletin der Vereinigung Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure 51(121), 23-58.
- Fischer, H. & Luterbacher, H. 1963: Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion 1 (Kt. Fribourg) und Altishofen 1 (Kt. Luzern). Matér. Carte Géol. Suisse [n.s.] 115,
- Geister-Frantz, M., 1987. Données géothermiques des aquifères du Dogger au pied sud du Jura suisse. Bulletin du Centre d'hydrogéologie(7).
- Gringarten, A.C., 1978. Reservoir lifetime and heat recovery factor in geothermal aquifers used for mountainous terrain: a model study. Journal of Geophysical Research, 94 (B7), 9439 – 9451.
- Heim, A. 1921. Geologie der Schweiz. Tauchniz, Leipzig.
- Jordi, H.A. 1990: Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. Bull. Ver. Schweizer. Petrol.-Geol. u. Ing. 56, 1-11.
- Kastrup, U. 2002. Seismotectonics and stress field variations in Switzerland. Unpublished PhD thesis thesis, ETH-Zürich.
- Laubscher, H. P. 1985. The eastern Jura: relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. Nagra, NTB 85-53 Baden.
- Laubscher, H. P. 1986. The eastern Jura: Relations between thin-skinned and basement tectonics, local and regional. Geologische Rundschau 75(3), 535-553.
- Marillier, F., Eichenberger, U. et Sommaruga, A, 2005. Rapport Annuel 2005, Commission Suisse de Géophysique CSGP
- Matthey, B., 1986. Gisement géothermique du littoral Neuchâtelais; possibilités d'exploitation à des fins thermales ou géothermiques; recherche d'un site favorable, Ofen, Berne.

- Michelot, J. 1992. Le puits de Thoun - Forage d'exploration pétrolière en Suisse, Consortium Pétrolier Fribourgeois et Bernois. Bulletin der Vereinigung Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure 58(133), 23-32.
- Muralt, R., 1999. Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Dôle, Yverdon-les-bains, Moiry, Genève et Aix-les-bains). Matériaux pour la géologie de la Suisse, série géotechnique, 82: 54-62.
- Pasquier, F., Bouzelboudjen, M. and Zwahlen, F., 1999. Carte Hydrogéologique de la Suisse, Sarine, feuille 6. Commission Géotechnique Suisse et Service Hydrologique et Géologique National.
- Philippe, Y. 1995. Rampes latérales et zones de transfert dans les chaînes plissées: géométrie, conditions de formation et pièges structuraux associés. Unpublished PhD thesis, Chambéry (Savoie, France).
- Philippe, Y., Coletta, B., Deville, E. & Mascle, A. 1996. The Jura fold-and-thrust belt: a kinematic model based on map-balancing. In: Peri-Tethys Memoir 2: Structure and Prospects of Alpine Basins and Forelands (edited by Ziegler, P. A. & Horvath, F.). Mém. Mus. natn. Hist. nat. 170, 235-261.
- 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, Nr. 36).
- Schlunegger, F., Matter, A. & Mange, M. A. 1993. Alluvial fan sedimentation and structure of the southern Molasse Basin margin, Lake Thun area, Switzerland. *Eclogae Geologicae Helvetiae* 86(3), 717-750.
- Schuppli, H. M. 1950: Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, Teil III: Ölgeologische Untersuchungen im Schweizer Mittelland zwischen Solothurn und Moudon. Beiträge Geol. Karte CH, Geotechn. Serie 26/3.
- Schuppli, H. M. 1952: Erdölgeologische Untersuchungen in der Schweiz, Teil IV: Ölgeologische Probleme der subalpinen Molasse der Schweiz. Ölgeologische Probleme des Mittellandes östlich der Linie Solothurn-Thun. Beiträge Geol. Karte CH, Geotechn. Serie 26/4.
- Signorelli, S. et Kohl, T., 2006. Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz, Gebiet des Nördlichen Schweizer Mittellandes Beiträge zur Geologie der Schweiz, GEOPHYSIK NR. 39, Publiziert durch die Schweizerische Geophysikalische Kommission.
- Singer, C., Gorin, G., 1995. New geological observations between the Jura and the Alps in the Geneva area, as derived from reflection seismic data. *Eclogae geol. Helv.*, 88/2: 235-265.
- Sommaruga, A. 1995. Tectonics of the Central Jura and the Molasse Basin. New insights from the interpretation of seismic reflection data. Bulletin Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles 118, 95-108.
- Spicher, A. 1980. Tektonische Karte der Schweiz. Schweiz. Geol. Kommission.
- Stäubli, M. & Pfiffner, O. A. 1991. Processing, interpretation and modeling of seismic reflection data in the Molasse basin of Eastern Switzerland. *Eclogae geologicae Helvetiae* 84(1), 151-175.
- Thouvenot, F., Frechet, J., Tapponnier, P., Thomas, J. C., Le Brun, B., Menard, G., Lacassin, R., Jenatton, L., Grasso, J. R., Coutant, O., Paul, A. & Hatzfeld, D. 1998. The M-L 5.3 Epagny (French Alps) earthquake of 1996 July 15: a long-awaited event on the Vuache Fault. *Geophysical Journal International* 135(3), 876-892.
- Vollmayr, T. & Wendt, A. 1987. Die Erdgasbohrung Entlebuch 1, ein Tiefenaufschluss am Alpennordrand. Bulletin der Vereinigung Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure 53(125), 67-79.
- Wilhelm, J., Bianchetti, G. and Vuataz, F.D., 2003. Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud, Rapport final.