

Contribution à la géologie de la Suisse

GÉOPHYSIQUE

N. 40

**Publié avec la Commission
Suisse de Géophysique**

**ATLAS DES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES
DE LA SUISSE OCCIDENTALE**

Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse

C. BAUJARD, S. SIGNORELLI & T. KOHL

2007

Contribution à la géologie de la Suisse

GÉOPHYSIQUE

N. 40

**Publié avec la Commission
Suisse de Géophysique**

**ATLAS DES RESSOURCES GÉOTHERMIQUES
DE LA SUISSE OCCIDENTALE**

Domaine Sud-Ouest du Plateau Suisse

C. BAUJARD, S. SIGNORELLI & T. KOHL

2007

L'analyse suivante s'appuie sur des estimations et une évaluation des données réalisées à une échelle régionale. Les résultats présentés montrent des tendances régionales et ne sont pas représentatifs à un niveau local. Une étude plus poussée nécessite une évaluation plus détaillée et locale des données disponibles.

Résumé

L'intérêt croissant porté à la géothermie en Suisse exige une analyse détaillée des ressources géothermiques disponibles. Le projet "Atlas Suisse des Ressources Géothermiques" décrit les étapes d'une telle évaluation. L'évaluation du potentiel géothermique est aujourd'hui finalisée pour l'ensemble du plateau Suisse. Le financement de cette étude est assuré par la Commission Suisse de Géophysique et par le Bureau Fédéral de l'Énergie. La présente étude rapporte les travaux effectués pour la partie Sud-Ouest du Plateau Suisse (entre Genève et Soleure), et fait suite à une précédente publication de la Commission Suisse de Géophysique (n° 39), qui présentait les résultats obtenus pour l'Est du Plateau Suisse (Soleure - lac de Constance)

La méthodologie décrite est valable pour un scénario d'utilisation spécifique et est basée sur des données de température et des mesures hydrogéologiques collectées systématiquement depuis plusieurs années. Contrairement aux études menées par le passé, les données géologiques, hydrogéologiques et pétrophysiques sont directement prises en compte dans les modèles thermiques 3D. Les aquifères déterminants suivants ont été traités: Malm Supérieur, Muschelkalk Supérieur et la zone altérée du socle cristallin supérieur. Certains aquifères (Molasse Marine Supérieure, Dogger) ne sont pas traités ici car ils ne remplissent pas les critères de sélection de ressource géothermique dans la zone étudiée. Les résultats sont donnés en terme de productivité géothermique et d'énergie. Les résultats montrent que plus de 4'500 km³ de sous-sol répartis sur la zone étudiée présentent des ressources géothermiques intéressantes, dont plus des deux tiers sont exploitables avec les technologies actuelles. Les calculs menés identifient le cristallin altéré comme la structure la plus intéressante pour l'exploitation géothermique, avec une productivité maximum par doublet supérieure à 100 MW_{th}.

Zusammenfassung

Das zunehmende Interesse an geothermischer Energie verlangt nach einer detaillierten Analyse der vorhandenen geothermischen Ressourcen für Wärme- und Stromproduktion. Das Projekt "Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz" beschreibt das Vorgehen für eine solche integrierte Bewertung der geothermischen Bodenschätze der Schweiz. Diese Arbeit wurde mit finanzieller Unterstützung der Schweizerischen Geophysikalischen Kommission und des Bundesamtes für Energie durchgeführt. Mit dem vorliegenden Bericht liegt nun zusammen mit der vorangegangenen Publikation (Nr. 39) eine vollständige Darstellung des geothermischen Atlas des Schweizer Mittellandes vor (Sollthurn - Bodensee).

Die gewählte Vorgehensweise berücksichtigt ein bestimmtes Nutzungsszenario und basiert auf verschiedenen Temperaturdaten und hydrogeologischen Messwerten, die über Jahre systematisch gesammelt wurden. Im Unterschied zu früheren Ressourcenanalysen werden hier geologische, hydrogeologische und petrophysikalische Daten in eine numerische 3D Untersuchung integriert. Die Analyse beinhaltet umfassende geologische und thermische 3D Modelle. Es wurden folgende, geothermisch interessante Aquifere betrachtet: Oberer Malm, Oberer Muschelkalk und verwitterte, obere Kristallinzone. Einige Aquifere (Obere Meeresmolasse, Dogger) wurden hier nicht berücksichtigt, weil sie die Auswahlkriterien nicht erfüllt haben. Die Ergebnisse werden als thermische Leistung und Energie dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass mehr als 4'500 km³ Gestein für geothermische Nutzung vorteilhafte Eigenschaften besitzen. Als eine geothermisch vielversprechende Zone wurde dabei der oberste Teil des Kristallin identifiziert, mit maximalen Entzugsleistungen für Dublettensysteme von >100 MW_{th}.

Summary

The increased interest in geothermal energy has led to requests of more sophisticated analyses of available geothermal resources. The project "Geothermal Resource Atlas of Switzerland" describes the steps taken in such integrated assessment of the Swiss geothermal resources. The evaluation of the geothermal potential is actually finalized for the entire Swiss Molasse Basin. Financing is provided by the Swiss Geophysical Commission and the Swiss Federal Office for Energy. This report presents work performed concerning the South-West part of The Molasse Basin (Geneva - Soleure), and follows a previous publication from the Swiss Geophysical Commission (n 39), which was presenting the results obtained for the East part of the Swiss Molasse Basin (Soleure – Constance lake).

The methodology accounts for a specific utilization scenario and is based on temperature data and hydrogeological measurements that have been systematically collected over many years. In contrast to the results obtained from earlier geothermal resource assessments, the existing geological, hydrogeological and petrophysical data are included in 3D geological and thermal models. The following relevant aquifers were treated: Oberer Malm, Oberer Muschelkalk and the weathered Crystalline zone. Some aquifers (Obere Meeresmolasse, Dogger) treated in the first report do not fit the selection criterions for the resource evaluation in the considered zone. The results are displayed in terms of geothermal productivity and energy. The results show that more than 4'500 km³ of underground over the investigated domain show a significant geothermal potential, from which nearly 70% can be exploited with today's technology. The calculations identify the topmost crystalline as a most promising structure for geothermal exploitation with predicted maximum doublet productivities of >100 MW_{th}.

Adresse des auteurs

C. Baujard, S. Signorelli, T. Kohl
GEOWATT AG
Dohlenweg 28
CH-8050 Zürich

Table des matières

Résumé	I
Zusammenfassung.....	I
Summary	II
Table des matières	III
Description des symboles	V
1. Introduction et objectifs.....	1
2. Concept de l'évaluation du potentiel géothermique.....	3
2.1 Aperçu de la méthodologie	3
2.2 Les différentes classes de ressources.....	4
3. A propos des données.....	6
3.1 Données utilisées.....	6
3.2 Qualité des données de température	6
4. Aperçu géologique.....	9
4.1 Le fossé Permocarbonifère: le plateau Occidental et la limite sud du bassin molassique	9
4.2 Le Dogger	9
4.3 Limite sud du bassin molassique – Molasse Subalpine	10
5. Etude hydrogéologique	11
5.1 Introduction	11
5.2 Evaluation de la situation hydrogéologique de la Suisse Occidentale	12
5.2.1 Cristallin Altéré.....	12
5.2.2 Muschelkalk Supérieur	12
5.2.3 Dogger	13
5.2.4 Malm Supérieur.....	14
5.3 Failles et zones faillées hydrauliquement déterminantes	17
5.4 Résumé des propriétés hydrauliques des différents horizons.....	21
6. Potentiel géothermique du plateau suisse occidental.....	23
6.1 Modèle structurel géologique.....	23
6.2 Modélisation de la distribution en température dans le sous-sol.....	26
6.3 Evaluation du potentiel géothermique	32
6.3.1 Répartition des classes de ressource sur le domaine étudié	33
6.3.2 Aquifère du Cristallin altéré.....	33
6.3.3 Aquifère du Muschelkalk Supérieur.....	37
6.3.4 Aquifère du Malm Supérieur	41

7. Conclusions et perspectives	47
Remerciements.....	49
Références	51
Annexe	55

Description des symboles

Symbole	Abréviation	Description
Caractères latins		
A	[W m ⁻³]	Production de chaleur
c	[-]	Rapport entre la capacité calorifique du fluide et celle de l'aquifère
c _p	[J kg ⁻¹ K ⁻¹]	Capacité calorifique spécifique
E _{ut}	[J]	Energie utilisable
E _{HIP}	[J]	Energie théoriquement disponible (Heat in Place)
j _b	[W m ⁻²]	Flux thermique à la base
j _o	[W m ⁻²]	Flux thermique à la surface
K	[m s ⁻¹]	Conductivité hydraulique
p _{th}	[W]	Puissance thermique
Q	[m ³ s ⁻¹]	Débit de production
Q _i	[m ³ s ⁻¹]	Débit de production à l'itération <i>i</i>
QU _i	[-]	Qualité extrapolée en un point <i>i</i>
QU _o	[-]	Qualité des données à un forage
r	[m]	Distance à un forage
r _{max}	[m]	Rayon limite
r _w	[m]	Rayon du forage
R	[-]	Facteur de recouvrement (Recovery Factor)
t	[s]	Temps
T	[K]	Température
Tr	[m ² s ⁻¹]	Transmissivité
T _{reinj}	[K]	Température du fluide réinjecté
T _{prod}	[K]	Température du fluide produit
v _D	[m s ⁻¹]	Vitesse de Darcy
V	[m ³]	Volume de la ressource

Symbole	Abréviation	Description
Caractères grecs		
β	[-]	Nombre de Péclet
Δh_b	[m]	Différence de charge maximale au forage
Δt	[s]	Temps de percée thermique
Δz	[m]	Altitude de l'aquifère ou de la ressource
λ	[W m ⁻¹ K ⁻¹]	Conductivité thermique
ρ	[kg m ⁻³]	Densité
ρc_p	[J m ⁻³ K ⁻¹]	Capacité thermique des roches
$(\rho c_p)_f$	[J m ⁻³ K ⁻¹]	Capacité thermique du fluide

1. Introduction et objectifs

L'énergie géothermique est aujourd'hui une alternative crédible aux systèmes de chauffage classiques. L'utilisation de cette source d'énergie a connu une croissance soutenue ces dernières années (+45 % entre 2000 et 2006). La production d'énergie géothermique (chaleur prise aux sources froides par les pompes à chaleur) en Suisse a ainsi dépassé 1 TWh en 2006 (Signorelli, 2007). Cette énergie a récemment bénéficié d'avancées technologiques notables et de l'intérêt croissant du public pour les énergies propres. En effet, les économies en émissions de CO₂ réalisées grâce à cette énergie propre en 2007 atteignent 430'000 tonnes, soit l'équivalent de la combustion de 135'000 tonnes de pétrole. Cependant, aucune unité de production d'électricité fonctionnant grâce à la géothermie est en service en Suisse.

La création d'un atlas des ressources géothermiques de la Suisse s'inscrit donc dans cette logique de développement et vise à quantifier les ressources géothermiques disponibles en Suisse pour les mettre à disposition afin d'identifier les zones géographiques d'intérêt économique majeur. C'est dans cette optique que ce projet a vu le jour, avec le soutien financier de la Commission Suisse de Géophysique CSG et de l'Office Fédéral de l'Énergie OFEN. La difficulté et l'intérêt du projet résident dans le fait qu'une telle évaluation nécessite le croisement de nombreuses connaissances du sous-sol; en effet, si la connaissance de la distribution en température du sous-sol (température notamment influencée par la géologie) est une donnée indispensable pour quantifier l'énergie disponible, l'exploitabilité d'un réservoir potentiel est grandement déterminée par l'hydrogéologie des roches hôtes.

Une première partie de l'atlas, regroupant les résultats obtenus pour le Nord du Plateau Suisse a été publiée au travers de la Commission Suisse de Géophysique CSG (Signorelli, 2006). La méthodologie de travail y est décrite en profondeur. La méthode adoptée pour l'étude est ici succinctement exposée afin de permettre une compréhension optimale des résultats exposés; le lecteur cherchant des informations supplémentaires est invité à se référer à cette première publication, disponible auprès de la Commission Suisse de Géophysique. Les travaux proposés s'inscrivent dans la suite de cette première étude. Ce rapport présente le travail effectué dans le cadre du projet d'évaluation des ressources géothermiques jusqu'en décembre 2007 et concerne exclusivement le Sud-Ouest du Plateau Suisse. La région étudiée s'étend du pied du Jura au Nord-Ouest jusqu'aux Préalpes au Sud-Est, entre Genève et Soleure. Cinq modèles régionaux y ont été défini afin de couvrir cette région (Figure 1).

Afin de minimiser les erreurs possibles sur la température du sous-sol, des modèles géologiques simples sont mis au point à l'aide du logiciel de modélisation géologique *GOCAD* grâce aux données géologiques connues. Ces modèles sont ensuite discrétisés en modèles numériques aux Éléments Finis, afin de calculer la température grâce à des simulations de régime thermique diffusif. Les calculs sont réalisés avec le code *FRACTure* (Kohl et Hopkirk, 1995). Les résultats sont calibrés avec les données thermiques de puits (type log de température) disponibles. Ainsi, la température du sous-sol prise en compte là où aucune mesure n'est disponible n'est pas simplement le résultat d'une interpolation entre différents points de mesure, mais résulte d'un raisonnement physique logique. La température des différents aquifères est alors extraite des modèles et la méthode de calcul de productivité développée par Kohl et al. (2003) est appliquée afin de quantifier et de cartographier les ressources géothermiques disponibles.

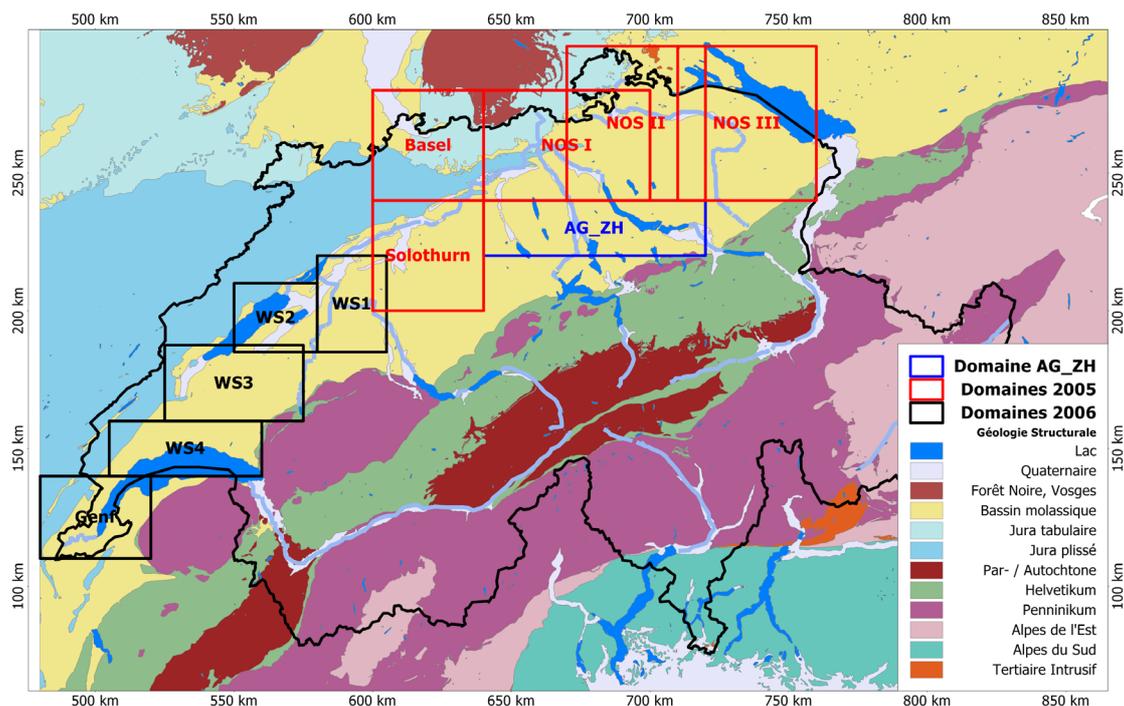


Figure 1: Carte géologique de la Suisse (© swisstopo) Les domaines délimités en rouge ont déjà été modélisés. La modélisation des domaines délimités en noir (Genf et WS1 à WS4), ainsi que le modèle AG_ZH en bleu ont été traités en 2007. Les résultats pour les domaines Genf et WS1 à WS4 sont présentés dans ce rapport.

La géologie et l'hydrogéologie de la région définie sont étudiées dans les deux premières parties de ce rapport. 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.

Il convient ici de remarquer que certaines parties de ce rapport, concernant la géologie et les structures influençant les écoulements régionaux, dues à une coopération avec Martin Burkhard, ont été originellement écrites en Allemand et ont été traduites en français pour ce rapport.

Dans une troisième partie, 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, ainsi que du modèle de AG_ZH qui n'avait pas été traité en 2005. Ce dernier modèle a été réalisé mais n'est pas présenté dans ce rapport, exclusivement destiné à l'analyse des ressources géothermiques en Suisse Occidentale. 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 la profondeur et température 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. Le chapitre suivant rappelle la méthode utilisée.

2. Concept de l'évaluation du potentiel géothermique

2.1 Aperçu de la méthodologie

Plusieurs approches de calcul du potentiel géothermique d'une région sont disponibles dans la littérature. Une méthode directe pour l'étude du potentiel géothermique de l'Allemagne est disponible (Jung et al., 2002). Une approche plus indirecte est ici privilégiée. 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'ou la présence de la borne 200m), et les techniques actuelles de forage ne permettent pas une exploitation économiquement intéressante d'une ressource à une profondeur trop importante, ce qui justifie la présence d'une borne inférieure de profondeur, fixée à 5000 m. Les différentes classes de ressources prises en compte sont décrites plus en détail dans le chapitre 2.2.

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 jeux 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. Les publications traitant de ce thème (par exemple Jung et al., 2002) utilisent un facteur de recouvrement, qui est une fonction empirique de la perméabilité de l'aquifère et des structures micro- et macroscopiques des roches. Ce facteur de recouvrement est généralement estimé d'une valeur variant entre 2% et 20%. L'approche ici présentée est différente. On suppose l'existence d'un réseau de doublets géothermiques fictifs, dont l'écartement minimal entre les puits ($d=200 \text{ m}$) et la distance entre les doublets ($a=4d$) sont donnés permet de calculer un débit optimal 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. Cette énergie utilisable E_{ut} est ainsi fonction de la température de l'aquifère, du débit pouvant être obtenu par le doublet (dépendant de la conductivité hydraulique de l'aquifère), et de la durée d'utilisation du doublet. Une définition des calculs menant à l'obtention de l'énergie utilisable est disponible dans Signorelli, 2006. 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. Les valeurs des paramètres utilisés offrent une estimation conservatrice et prudente de l'énergie géothermique pouvant être exploitée du sous-sol.

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 croiser les résultats afin de comparer le facteur de recouvrement obtenu avec des valeurs connues et utilisées dans le passé.

2.2 Les différentes classes de ressources

La différenciation des classes de ressources géothermiques se fait essentiellement selon la technologie requise afin d'exploiter la ressource. La technologie employée dépend ainsi indirectement de deux facteurs qui sont la température et la profondeur de la ressource. Le schéma proposé rend ainsi compte des ressources technologiquement exploitables aujourd'hui ou dans un futur proche. D'au-

tre part, dans le cas le plus simple, l'énergie géothermique utilisable sur un domaine donné correspond à la somme des énergies E_{ut} disponibles pour chaque classe de ressource. Dans d'autre cas, plus complexes, si les ressources inventoriées se sont pas toutes aujourd'hui technologiquement exploitables, l'énergie utilisable totale sera moindre.

Les différentes classes de ressource proposées sont les suivantes:

- 1. Ressources surfaciques.** Cette classe catalogue les ressources géothermiques pouvant être exploitées par des systèmes de basse enthalpie (de type sonde géothermique ou bien puits peu profond), en combinaison avec une pompe à chaleur. Cette classe de ressources est définie par une profondeur inférieure à 200 m. Les systèmes basse enthalpie font l'objet d'une publication tous les deux ans (Signorelli, 2007). Aujourd'hui, seule une part négligeable des ressources surfaciques sont exploitées en Suisse. L'évaluation des ressources géothermiques surfacique ne sera pas détaillée dans ce présent rapport.
- 2. Ressources hydrothermales à température peu élevée.** Cette classe de ressource contient les aquifères profonds pouvant être utilisés dans un but de production de chaleur avec des technologies existantes. L'utilisation d'une pompe à chaleur peut être requise pour l'exploitation des ressources de cette classe. La définition de cette classe est basée sur les critères suivants: 1) l'aquifère considéré est situé à une profondeur supérieure à 200 m et 2) la température de l'aquifère ne dépasse pas les 100 °C. Pour cette classe de ressources géothermiques, un facteur d'amélioration de 2 de la conductivité hydraulique de l'aquifère est considéré, atteignable grâce à des techniques de stimulation de puits aujourd'hui bien connues.
- 3. Ressources hydrothermales chaudes exploitables avec les technologies actuelles.** Cette classe de ressource contient les systèmes géothermiques pouvant être utilisés dans un but de production d'électricité (Enhanced Géothermal Systems EGS). Ces réservoirs sont exploitables avec les technologies actuelles avec des coûts d'exploration élevés. Des calculs de rentabilité économique montrent qu'il est intéressant de coupler la production d'électricité à une production de chaleur avec les résidus de la centrale, permettant ainsi d'alimenter un réseau de chaleur urbain par exemple. La définition de cette classe est basée sur les critères suivants: 1) la température de l'aquifère est supérieure à 100 °C (température considérée comme minimale pour une production d'électricité par cycle Kalina ou ORC rentable) et 2) la profondeur de l'aquifère ne dépasse pas les 5 km, limite économique actuelle de profondeur de forage. Pour cette classe de ressources, un facteur de stimulation du milieu de l'ordre de 10 est généralement accepté et sera pris en compte dans les calculs. La perméabilité minimale considérée est de 10^{-15}m^2 pour cette classe de ressources.
- 4. Ressources hydrothermales exploitables avec des avancées technologiques envisageables à moyen terme.** Cette classe comprend les ressources de même type que la classe 3, qui ne sont pas encore économiquement utilisables. La production d'électricité pourrait être envisagée grâce à des avancées technologiques concernant les techniques de forage ou de conversion d'énergie chaleur / électricité... On peut s'attendre à ce que des développements technologiques puissent laisser envisager des facteurs de stimulation de l'ordre de 100 pour les roches cristallines et de 10 pour les roches sédimentaires. Dans ces conditions, cette classe de ressources est définie par des perméabilités supérieures à 10^{-16}m^2 . On peut également envisager une limite thermique s'abaissant à 80 °C pour l'unité de conversion d'énergie, et des profondeurs de forage allant jusqu'à 7 km.

5. **Ressources exploitables dans un futur plus lointain.** Les domaines qui ne peuvent être classifiés dans les autres classes même avec des avancées technologiques envisageables à moyen terme, mais dont le potentiel est remarqué figurent dans cette catégorie. On peut par exemple envisager des profondeurs de forage de 7 km et des perméabilités inférieures à 10^{-16} m^2 .

L'analyse des ressources ici proposée propose de se focaliser au maximum sur les classes 2 et 3. La classe 4 sera évoquée mais les ressources disponibles non quantifiées.

3. A propos des données

3.1 Données utilisées

Les sources des données utilisées sont décrites avec précision dans le rapport sur le potentiel géothermique du nord de la Suisse (Signorelli et Kohl, 2006). Les données pétrophysiques, géologiques et les données de températures sont pour l'essentiel communes aux deux études. Seul le volet de l'étude de la situation hydrogéologique de la Suisse Occidentale voit l'ajout de nouvelles données, issues d'études plus locales. Dans ce cas, la référence est clairement indiquée et présente en bibliographie du présent rapport.

3.2 Qualité des données de température

La qualité des données thermiques est un point clé de cette étude, puisque le calage des modèles diffusifs de température s'appuie sur les logs thermiques réalisés dans les différents forages présents en Suisse Occidentale et disponibles dans la littérature. Il est donc indispensable de ne pas perdre de vue la crédibilité des données thermiques disponibles tout au long de cette étude.

Ainsi, pour évaluer la distribution spatiale de la qualité des données de températures disponibles, chaque forage disposant d'un log de température se voit attribué un indice de qualité, variant entre 1 et 3 (1=peu sûr ; 3=sûr). La température mesurée dans un forage traduisant le champ de température dans son voisinage proche, l'indice de qualité attribué varie ainsi dans un rayon de 20 km du forage grâce à l'attribution de fonctions de qualité pour chaque forage, selon :

$$Qu_i = Qu_0 - \frac{r}{r_{\max}}$$

Où :

- Qu_i est l'indice de qualité de la donnée du forage à une distance r du forage considéré
- Qu_0 est l'indice de qualité de la donnée au niveau du forage
- r est la distance considérée
- $r_{\max}=20\text{km}$

La valeur d'une fonction de qualité est nulle pour toute distance r supérieure à 20 km. La forme des fonctions de qualité est montrée en Figure 2, pour des forages dont la qualité du relevé de température vaut 1, 2 ou 3.

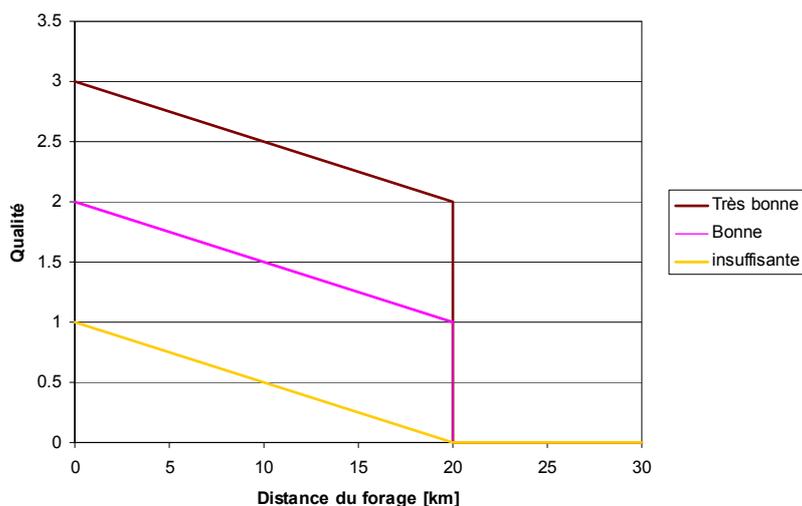


Figure 2: Forme des fonctions de qualité au voisinage des forages (adapté de Signorelli, 2006)

L'attribution des ces fonctions de qualité permet ainsi de cartographier la précision des données sur l'ensemble du territoire modélisé. La Figure 3 montre deux cartes de la qualité des données disponibles en Suisse Occidentale, à des profondeurs de 250 m et 2000 m. On notera que la qualité des données disponibles dépend de la profondeur considérée. Cet artefact traduit simplement le fait que le nombre de forage à 250 m de profondeur est plus important que le nombre de forage à 2000 m de profondeur.

D'autre part, la comparaison avec la qualité des données disponibles pour le Nord de la Suisse (Signorelli et Kohl, 2006) montre que la qualité des données disponibles à grande profondeur pour la présente étude est sensiblement inférieure à la qualité des données disponibles pour le nord de la Suisse. Ceci traduit en effet un nombre de forage profond moins important pour cette partie du territoire que pour la partie précédemment étudiée. En revanche, la qualité des données pour des profondeurs de 500 m est relativement homogène, ce qui présente un avantage certain pour le calage des modèles à relativement faible profondeur.

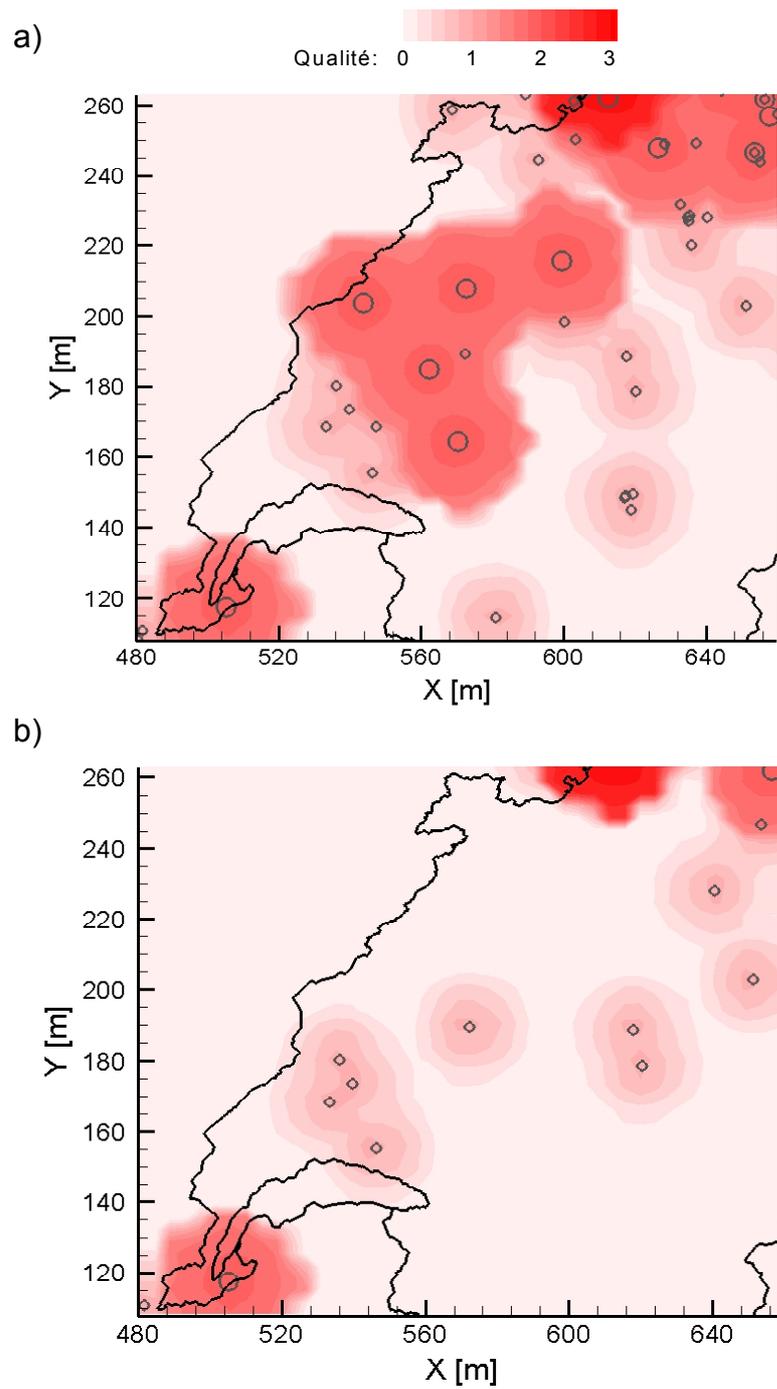


Figure 3 : Carte de qualité à des profondeurs de a) 250m, b) 2000m pour le territoire de la Suisse Occidentale (Indice de qualité: 3= très bon, 2= bon, 1= mauvais, 0= pas de donnée considérée)

4. Aperçu géologique

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 structurel 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 Figure 1). Les chapitres suivants sont destinés à compléter l'étude disponible dans Signorelli et al. (2005), 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).

Les failles, décrochement et accidents géologiques connus en Suisse Occidentale seront 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.

4.1 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 mal connues et aucune donnée consistante n'est disponible à ce sujet. Signer et Gorin (1995) font remarquer 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 est décrite dans le projet CSG "Plateau Suisse" (Mariller et al., 2005). Les limites du fossé Permocarbonifère prises en compte dans la présente étude ont été définies en collaboration avec Anna Sommaruga et Urs Eichenberger, de la Commission Suisse de Géophysique.

4.2 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 infé-

rieur 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 à l'Est du Jura tabulaire.

Les calcaires du Dogger du Jura plissé occidental et central sont généralement des aquifères reconnus. L'épaisseur nominale du Bajocien atteint environ 150 m 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 (Muralt et al. 1997).

4.3 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 de la discontinuité de Moho, et s'étend au moins jusque sous les Alpes centrales, à l'aplomb d'une ligne Coire-Martigny, 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 monoclinal et pouvant être suivi de la Bavière jusqu'à Thoune. 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 Thoune (Michelot 1992; Schlunegger et al. 1993) ainsi qu'un dans la région de la vallée du Rhône (Signer et Gorin, 1995). 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 cisillées 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 pliées ou cassées. 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.

5. Etude hydrogéologique

5.1 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 4).

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 $1 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ et $6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (Matthey, 1986). Ce dernier semble avoir un fonctionnement hydrologique indépendant de l'aquifère du Hauterivien.

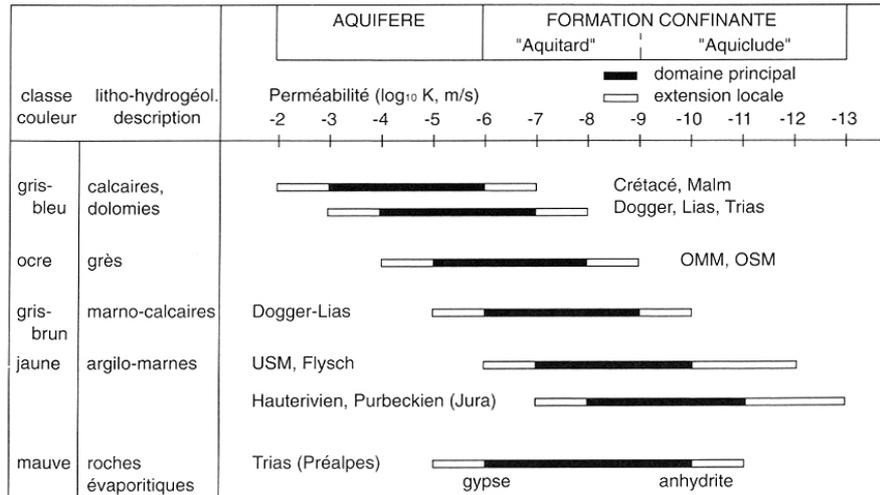


Figure 4 : Domaines de conductivités hydrauliques des horizons hôtes des principaux aquifères de suisse occidentale, d'après Pasquier et al., 1999

5.2 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.

5.2.1 Cristallin Altéré

Le Cristallin est peu étudié sur le domaine considéré. En effet seuls 4 forages atteignant le Cristallin ou le fossé Permocarbone ont été répertoriés sur l'Ouest du Plateau Suisse (ils sont inventoriés en annexe du présent rapport). Aucune valeur de conductivité hydraulique n'en a été dérivée. En conséquence, les valeurs de conductivité hydraulique utilisées par défaut seront les mêmes que celles déduites de l'analyse hydrogéologique pour le Nord-Est du Plateau Suisse ($5 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ pour un milieu non perturbé). D'autre part, par méconnaissance du milieu, aucune fracture ou zone faillée n'est prise en compte. Ainsi, lors de la construction des surfaces moyennes des aquifères dans le but de calculer la productivité de l'aquifère supposé du Cristallin altéré, la conductivité hydraulique du Cristallin est supposée uniforme sur l'ensemble du territoire. A défaut d'informations claires à ce sujet, cette option paraît être la plus plausible.

5.2.2 Muschelkalk Supérieur

L'aquifère potentiel que représente le Muschelkalk est également 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, 2005). Pour mémoire, la valeur de la conductivité hydraulique de l'aquifère y était donnée variant entre $7 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans une zone non faillée jusqu'à $3 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans une zone dans laquelle les écoulements sont dirigés par des failles.

5.2.3 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 110 m. Les données rapportées par Geister-Frantz (1987) figurent dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Transmissivité et conductivité hydraulique du Dogger

Lieu (canton ou pays)	Epaisseur [m]	Conductivité hydraulique [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]	Transmissivité [$\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$]	Référence
¹ Combe des enfers (NE)	² 205	$7 \cdot 10^{-7}$	$1.43 \cdot 10^{-4}$	Geister-Frantz, 1987
¹ La Ranconnière (NE)	² 205	10^{-6}	$2.05 \cdot 10^{-4}$	Geister-Frantz, 1987
Crançot (France)			* $3.6 \cdot 10^{-5}$	Geister-Frantz, 1987
Moyenne	110	10^{-6}	$1.1 \cdot 10^{-4}$	Pasquier et al., 1999

* = après acidification du forage ; ¹ = au droit d'un repli anticlinal ; ² = valeur estimée par Geister-Frantz, 1987

Il est à noter que toutes les valeurs figurant dans le tableau 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 rapporte une épaisseur du Bajocien d'environ 200 m, 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 Treycovagnes. 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 Treycovagnes 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 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. La situation hydrogéologique du Dogger est donc trop complexe pour être traitée à une

échelle régionale. Ce dernier ne sera donc pas considéré comme un horizon exploitable afin de produire de l'énergie géothermique lors du calcul des ressources dans la présente étude. Certains horizons du Dogger peuvent cependant constituer localement une ressource géothermique significative.

5.2.4 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.

Les conductivités hydrauliques ainsi que l'épaisseur de l'aquifère du Malm ont été regroupées dans le tableau suivant.

Tableau 2 : Transmissivité et conductivité hydraulique du Malm Supérieur

Lieu	épaisseur [m]	Conductivité hydraulique [m·s ⁻¹]	Transmissivité [m ² ·s ⁻¹]	Référence
Sorne (Délémont)	255	2.4·10 ⁻⁷	0.1-1·10 ⁻⁴	Flury et al., 1991
Délémont S1		3.4-4.1·10 ⁻⁷	0.86-1.0·10 ⁻⁴	Muralt, 1999
Délémont S2		2.-3.7·10 ⁻⁷	5-9.4·10 ⁻⁵	Muralt, 1999
Délémont S3		2.7-3.2·10 ⁻⁷	6.8-8.1·10 ⁻⁵	Muralt, 1999
Moutier La Foule		1-4·10 ⁻⁵	0.86-4.4·10 ⁻³	Muralt, 1999
Yverdon La grève-1		1.4-5·10 ⁻⁶	0.83-2.9·10 ⁻³	Muralt, 1999
Yverdon F4 (CHYN, 1999)	250		2.2-5.1·10 ⁻³	Muralt, 1999
Aix-les-bains			4.7·10 ⁻⁴	Muralt, 1999
Martel Dernier		0.8-6.3·10 ⁻⁷		Matthey, 1971
La Brévine		0.21-1.51·10 ⁻⁶		Matthey et Simeoni
Le Cachot		0.8-2.2·10 ⁻⁶		Matthey et Simeoni
La Chaux du Mi- lieu		2.46-1.73·10 ⁻⁶		Matthey et Simeoni

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 le tableau suivant (voir Tableau 3). La colonne K_{moyen} est une moyenne entre les valeurs K_{min} et K_{max} telles que données dans la littérature. Dans les calculs, trois moyennes ont été calculées. La première est une moyenne totale, ne prenant pas en compte la présence éventuelle de zones de failles près du captage considéré. La seconde moyenne, qualifiée de moyenne pour zones non faillée, est une moyenne calculée pour tous les forages, à l'exception de 1) les deux captages d'Yverdon, dans lesquels l'écoulement est vraisemblablement très influencé par des failles d'extension régionale, et 2) les forages de Moutier-la-Foule et La-Chaux-de-Milieu sur lesquels peu d'informations sont disponibles. Enfin, la dernière moyenne, qualifiée de moyenne en zone faillée donne la moyenne de conductivité hydraulique pour les deux forages d'Yverdon.

Tableau 3 : Analyse des conductivités hydrauliques du Malm Supérieur. Les intervalles de test sont mentionnés lorsqu'ils sont connus. Il est à noter que deux valeurs différentes de conductivité hydrauliques sont prises en compte pour le forage de Weiach.

	x	y	z	Epaisseur	K_{min}	K_{max}	K_{moyen}
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m s ⁻¹]	[m s ⁻¹]	[m s ⁻¹]
Yverdon La grève-1	540020	181450	430	66	1.40E-06	5.00E-06	3.20E-06
Yverdon-F4	539670	180290	435	348	6.32E-06	1.47E-05	1.05E-05
Martel-Dernier	543730	203610	1025	-	8.00E-08	6.30E-07	3.55E-07
La Brévine	536770	203470		-	2.10E-08	1.51E-06	7.66E-07
Délémont S2	592290	244610		250	2.00E-07	3.70E-07	2.85E-07
Délémont S3	592061	244993		350	2.70E-07	3.20E-07	2.95E-07
Délémont S1				260	3.40E-07	4.10E-07	3.75E-07
Le Cachot				-	8.00E-07	2.20E-06	1.50E-06
St-Imier				-	5.00E-07	3.00E-06	1.75E-06
Benken				189.5			1.00E-08
Weiach				24.1			3.00E-07
							6.00E-08
Moutier La foule	293580	235340		100	1.00E-05	4.00E-05	2.50E-05
La chaux du Milieu				-	1.73E-06	2.46E-06	2.10E-06
Total	Moyenne				1.10E-06	3.13E-06	1.62E-06
	Médiane				3.40E-07	1.51E-06	3.65E-07
Zone non faillée	Moyenne				3.16E-07	1.21E-06	5.70E-07
	Médiane				2.70E-07	6.30E-07	3.28E-07
Zone faillée	Moyenne = médiane				3.86E-06	9.85E-06	6.86E-06

Pour chaque calcul de moyenne sont calculées une moyenne arithmétique et une médiane. On remarque ainsi que, dans le cas d'une zone non faillée, la valeur médiane est presque deux fois plus

faible que dans le cas d'un calcul de moyenne arithmétique. En effet, la médiane a pour effet dans ce cas de diminuer l'influence perturbatrice de valeurs extrêmes la conductivité hydraulique reportée. Dorénavant, la conductivité hydraulique du Malm Supérieur en zone non faillée sera estimée à $K=3 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, et la valeur en zone faillée peut quant à elle être estimée à $K=7 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Ces valeurs peuvent paraître faibles comparativement à ce qui est habituellement estimé (de 10^{-3} à $10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ dans la feuille de la carte hydrogéologique de Sarine), mais elles sont le plus souvent à attribuer à un aquifère confiné localement artésien. La Figure 5 résume le spectre des différentes valeurs de conductivité hydraulique mesurées dans le Malm, ainsi que les valeurs moyennes pour zones poreuses ainsi que pour les zones faillées de l'aquifère.

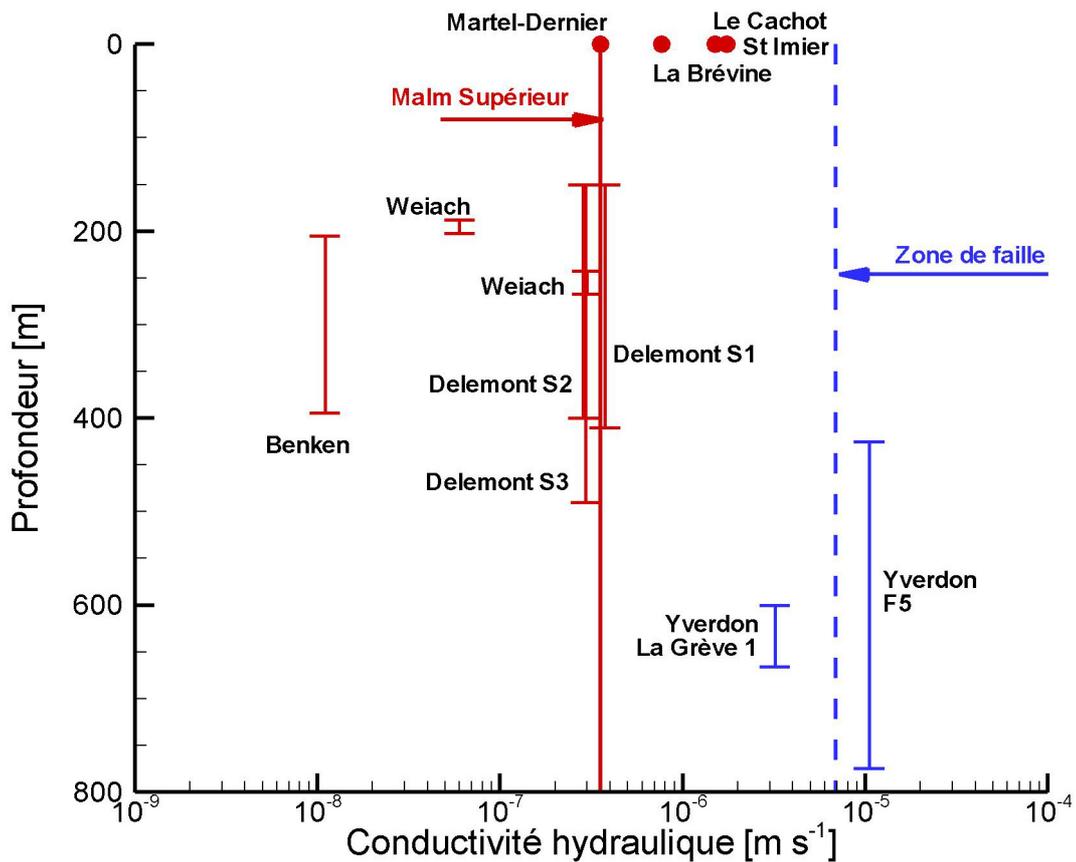


Figure 5 : Conductivité hydraulique K dans le Malm supérieur, en fonction de la profondeur et de l'intervalle de mesure et valeur médiane pour les zones poreuses et faillées. Quatre forages sont représentés sans données de profondeurs sur l'intervalle de mesure.

L'analyse statistique de la distribution des conductivités hydrauliques dans le Malm Supérieur (Figure 6) montre qu'une des valeurs présentées ne peut pas être incluse dans une distribution gaussienne des conductivités hydrauliques mesurées (forage de Benken, mesure de la Nagra estimant la conductivité hydraulique de Malm supérieur à $1 \cdot 10^{-8} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Comme pour les calculs menés pour le Muschelkalk Supérieur sur le Nord-Est du Plateau Suisse, une valeur limite de conductivité hydraulique de $1 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ peut être admise comme valeur limite pour une exploitation géothermique de l'aquifère (considérant un facteur de stimulation de 2.5). Ainsi, si l'on admet que les valeurs mesurées disponibles sont représentatives de la distribution spatiale des conductivités hydrauliques du Malm Supérieur, seuls 85 % du Malm supérieur représente un potentiel géothermique exploitable.

Cette analyse statistique, bien que limitée par le faible nombre de données obtenues, confirme les résultats précédemment énoncés sur les valeurs des conductivités hydrauliques du Malm Supérieur, puisque cette analyse montre une valeur moyenne des conductivités du Malm Supérieur égale à $6.3 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

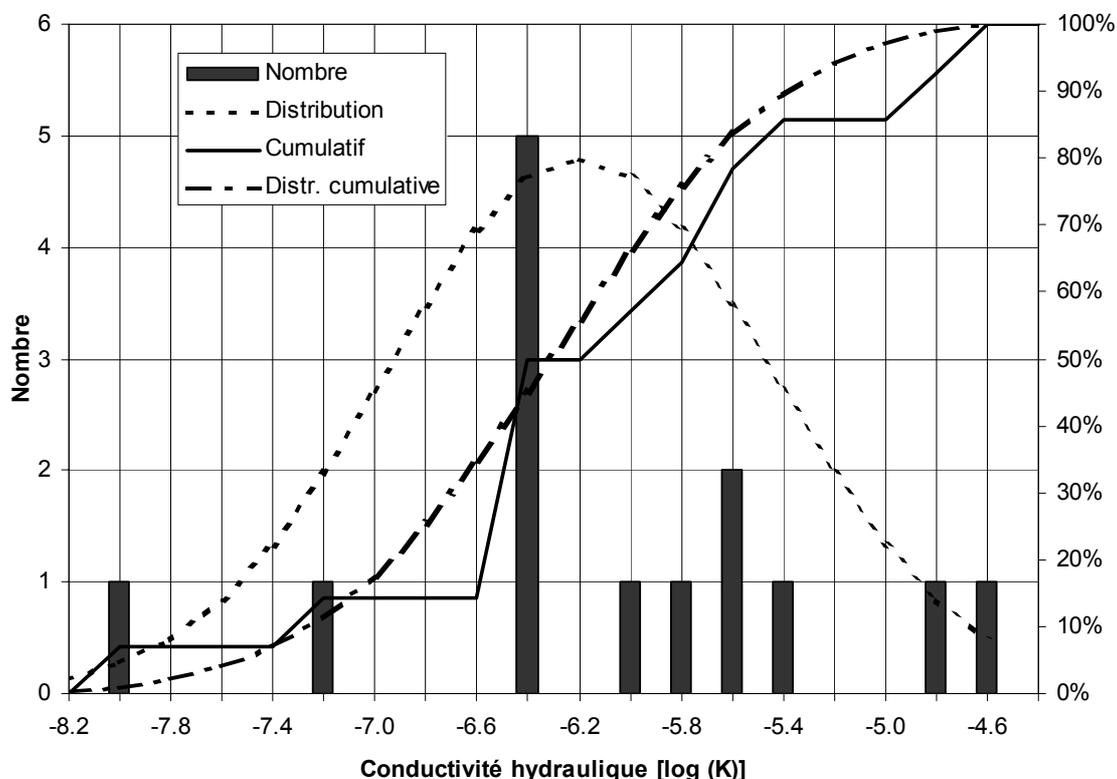


Figure 6 : Histogramme des conductivités hydrauliques du Malm Supérieur. Une distribution log-normale est calculée et superposée à la distribution ($\Delta\log(K)=0.2$)

5.3 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 Soleure 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, des écarts par rapport à l'orientation N-S sont observés.

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 (Figure 7):

- La Tourne – 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

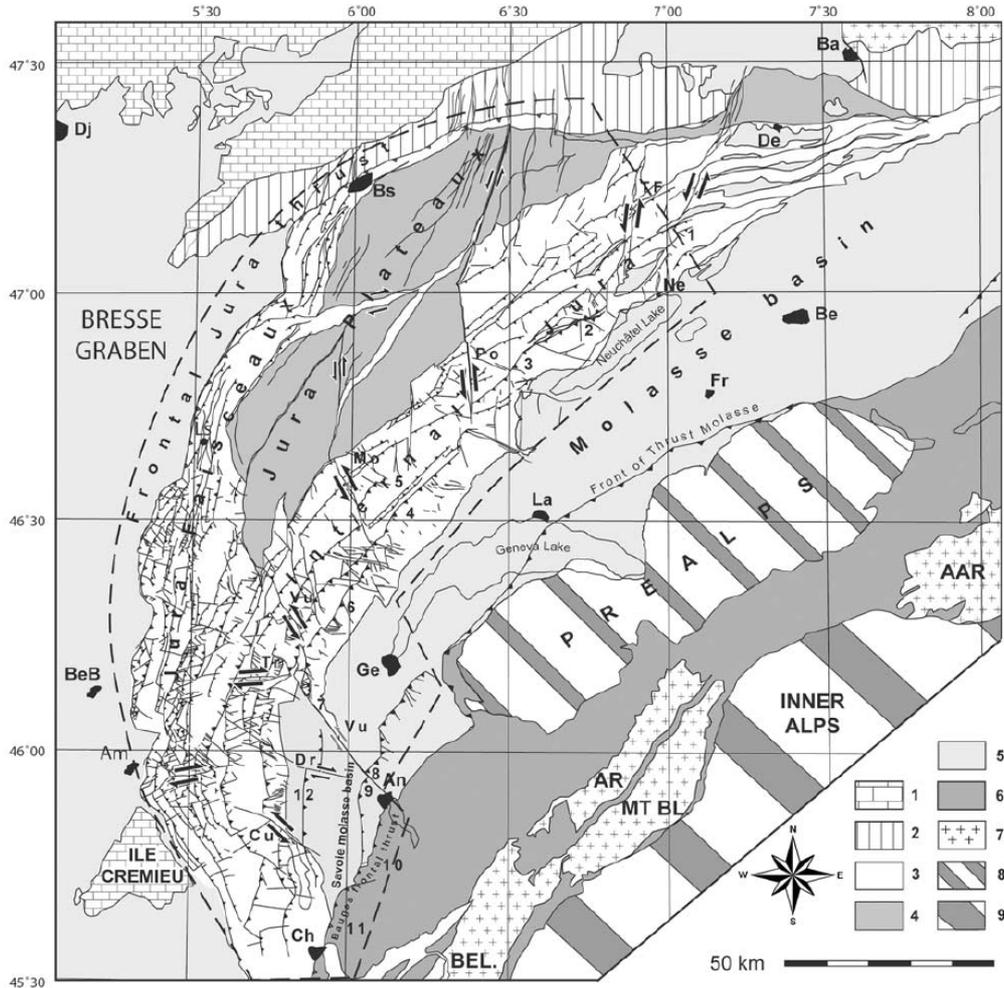


Figure 7 : Géologie structurale de l'Ouest de la Suisse (d'après Affolter et Gratier, 2004). 1, Mésozoïque autochtone; 2, Mésozoïque para-autochtone; 3-4, Jura; 5, remplissage Cénozoïque; 6-7, domaine subalpin; 8, pré-alpes; 9, Alpes. Failles majeures: TF: La Tourne-La Ferrière; Po, Pontarlier; Mo, Morez; Vu, Vuache)

La zone de faille de la Tourne – Ferrière – Vu 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 environ 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 senestres 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, sept structures hydrauliquement déterminantes sont ainsi définies, parmi lesquelles cinq sont prises en compte pour l'évaluation du potentiel géothermique (Figure 8):

- **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 et 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 Vaulion 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 un 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 transpressive 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 Vaulion, la faille PPC a un équivalent conjugué, identifié dans le décrochement NS senestre 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, 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. L'extension de cette zone ici prise en compte a été définie en collaboration avec Martin Burkhard et Anna Sommaruga. Cette zone est également mentionnée dans plusieurs autres sources (par exemple NAGRA, 2005). 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, Vuarne-Gland, Bonmont-Yvoire, Namenlose, Divonne) pour lesquelles le décrochement varie entre 3 et 5 km (Arn et al., 2005). 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.

Le système de failles de **Morez** n'est pas situé dans les domaines étudiés. Concernant la zone de faille de **la Tourne – Ferrière – Vue des Alpes**, si elle est effectivement située sur le domaine considéré, le Malm Supérieur et le Muschelkalk Supérieur n'étant pas présent au niveau cette dernière ne sera pas non plus prise en compte dans les calculs.

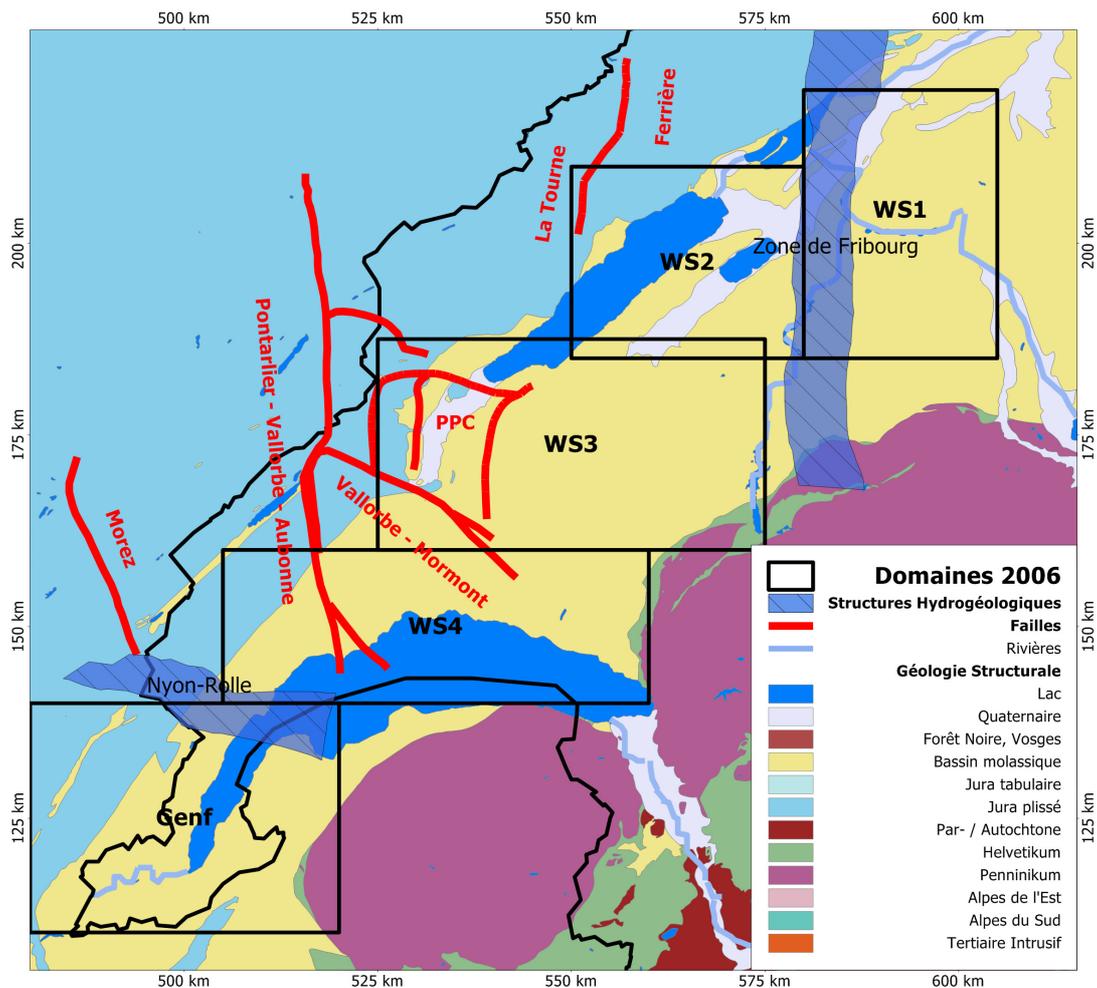


Figure 8 : Failles et structures hydrogéologiquement déterminantes pour les domaines de la Suisse Occidentale.

5.4 Résumé des propriétés hydrauliques des différents horizons

Ce chapitre a été consacré à l'étude des paramètres hydrogéologiques des horizons dont la chaleur est susceptible d'être exploitée. Il complète et précise, au jour de nouvelles données issues des forages présents en Suisse Occidentale les valeurs moyennes proposées dans le rapport de novembre 2006 (Signorelli et Kohl, 2006). L'étude de ces données ne modifie pas substantiellement l'étude précédemment menée mais apporte de nombreuses mesures concernant la conductivité hydraulique du Malm Supérieur, aquifère relativement bien connu en Suisse Occidentale.

Le Tableau 4 montre les conductivités hydrauliques des aquifères pris en compte afin de déterminer l'énergie géothermique utilisable dans les différents horizons géologiques. Pour le Malm Supérieur, la catégorie A "non perturbé", correspond à la médiane des conductivités hydrauliques dérivées pour les zones non faillées (voir chapitre 5.2.4), et la catégorie B "zone de faille" à la moyenne des conductivités hydrauliques mesurées en "zone faillée". La catégorie C, "champ de fracture" correspond aux zones intermédiaires de Nyon et Fribourg. En conséquence, la conductivité hydraulique de cette zone est déterminée par simple moyenne arithmétique des conductivités hydrauliques des zo-

nes A et B. Pour le Muschelkalk Supérieur et le Cristallin Supérieur altéré, les conductivités hydrauliques obtenues dans la précédente publication CSG (Signorelli et Kohl, 2006) ont été conservées. Les valeurs pour la catégorie C "champ de fracture" du Cristallin Supérieur altéré sont utilisées au niveau du fossé Permocarbone.

Tableau 4 : 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"
Malm Supérieur	$3 \cdot 10^{-7}$	$7 \cdot 10^{-6}$	$3.6 \cdot 10^{-6}$
Muschelkalk Supérieur	$7 \cdot 10^{-7}$	$3 \cdot 10^{-6}$	$1.0 \cdot 10^{-6}$
Cristallin Supérieur altéré	$5 \cdot 10^{-8}$	non considéré	$8 \cdot 10^{-8}$

Le Tableau 5 quant à lui donne les épaisseurs moyennes des aquifères pris en compte dans les modèles. Des épaisseurs constantes sont considérées pour le Cristallin Supérieur altéré ainsi que pour la Muschelkalk. Le Malm Supérieur est considéré d'épaisseur variable. Son épaisseur a été interpolée entre les différents points de mesures (puits) ou profils disponibles et est représentée dans cette présente étude en chapitre 6.

Tableau 5 : Epaisseur moyenne des différents aquifères pris en compte.

	Jura plissé	Jura tabulaire	Molasse
Malm Supérieur	150 – 400 m	non considéré	150 – 350 m
Muschelkalk Supérieur		≈ 70 m	
Cristallin Supérieur altéré		≈ 500 m	

6. Potentiel géothermique du plateau suisse occidental

6.1 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 qui ont permis l'élaboration des modèles géologiques structuraux présentés ici sont indiqués sur la figure suivante (Figure 9).

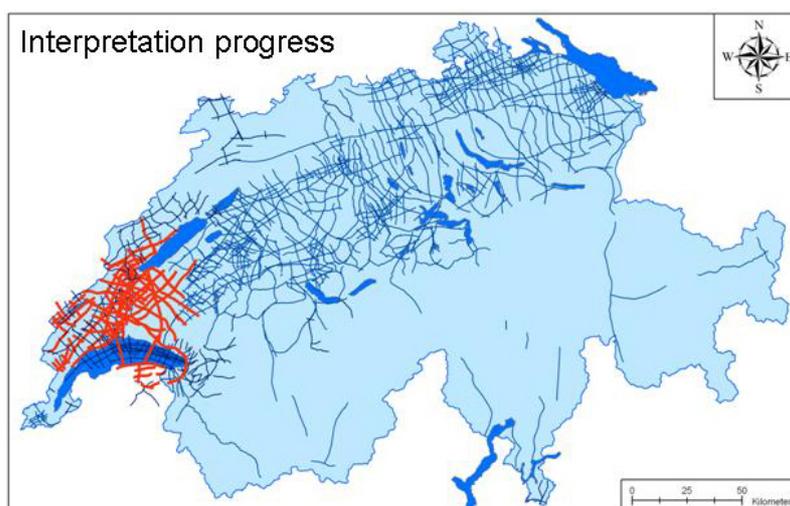


Figure 9 : Couverture des profils sismiques de la Suisse. En rouge, progrès des interprétations jusqu'à fin 2005 (Marillier et al., 2005)

La technique de discrétisation utilisée est similaire à celle décrite dans le rapport annuel précédent (Signorelli et al., 2005). 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 suivante (Figure 10) montre 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 destiné à déterminer un modèle de température diffusif dans le sous-sol ont été construits. Ces derniers ne sont donc logiquement pas pris en compte.

Peu avant la fin du projet, les données ont été disponibles 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 6) la profondeur réelle du toit du cristallin et du Muschelkalk.

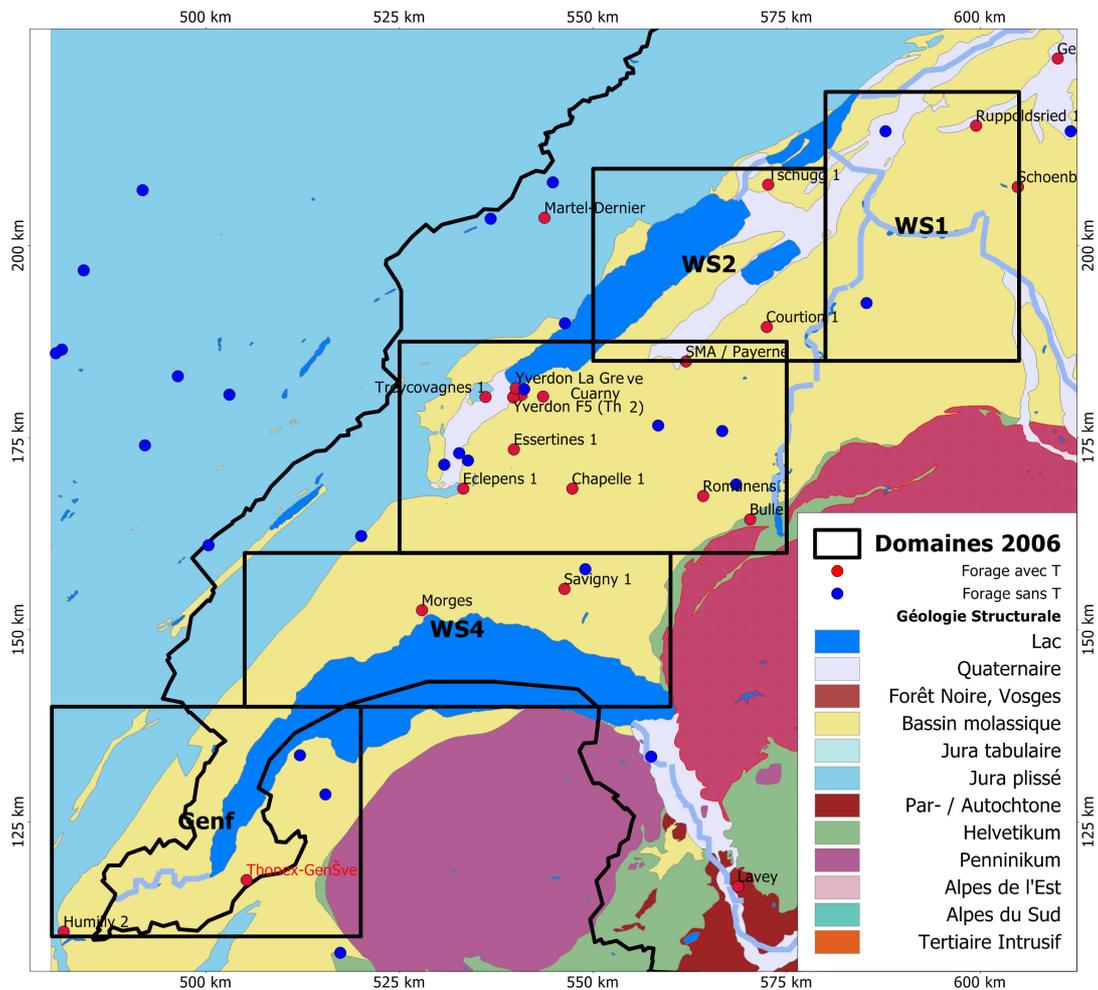
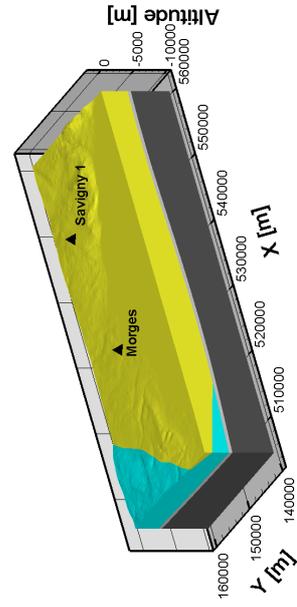
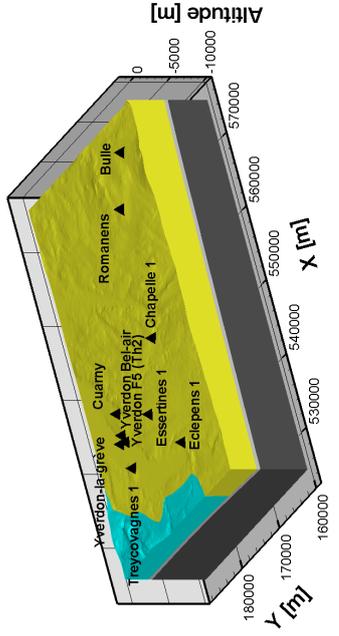
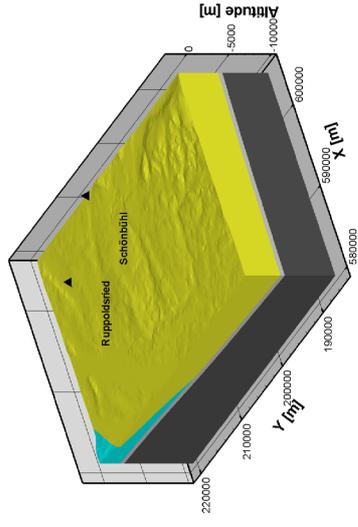


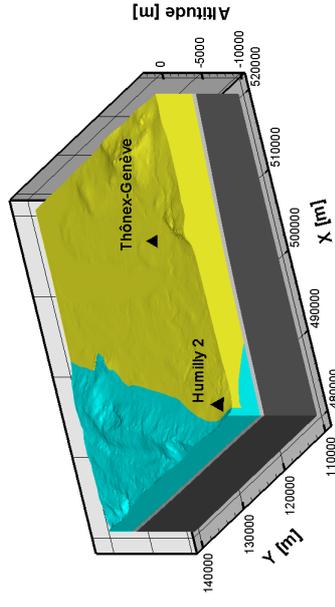
Figure 10 : Forages disponibles et domaines modélisés sur le plateau suisse occidental. Les noms des forages avec données en température sont indiqués sur la figure.



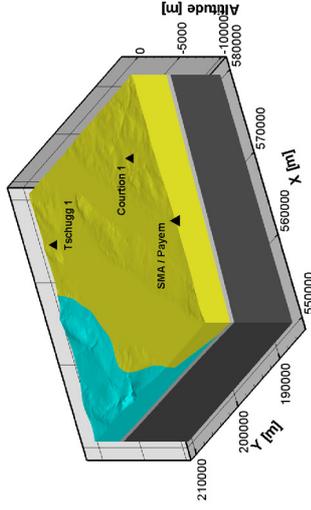
a)

b)

c)



d)



e)

Jura
Sédiments
Cristallin altéré
Socle cristallin



Figure 11 : Modèles structuraux géologiques pour les domaines suivants : a) WS4, b) WS3, c) WS1, d) Region Genf e) WS2.

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

Lorsque les modèles géologiques sont établis, l'étape suivante de travail consiste à mailler ces domaines dans le but d'obtenir un maillage tridimensionnel, formé de tétraèdres, afin de pouvoir effectuer des calculs numériques dans le but de calculer la distribution en température dans le sous-sol. La phase de maillage est effectuée avec le logiciel *GOCAD*, tout comme les modèles géologiques. Il en résulte des fichiers ASCII décrivant un maillage éléments finis qui est alors interfacé avec le code *FRACTure* (Kohl and Hopkirk, 1995) grâce au logiciel *Geoproductivity*, développé par GEOWATT dans le cadre de ce projet. Il est alors possible de calculer la température en trois dimensions dans les modèles géologiques précédemment décrits. La Figure 12 illustre la procédure décrite.

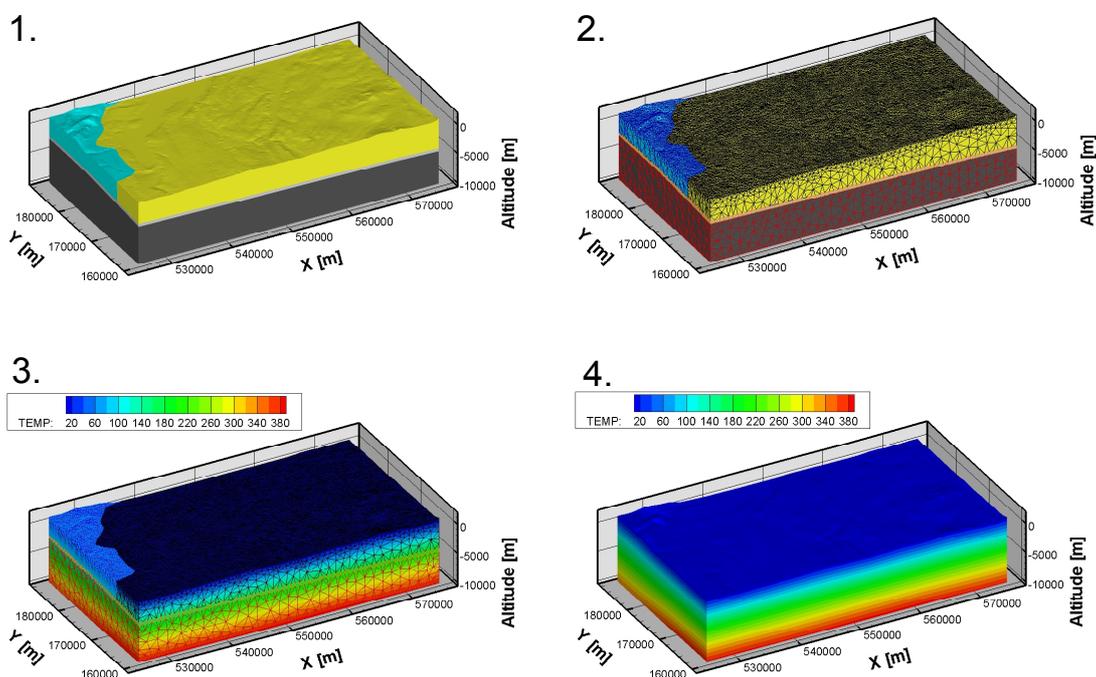


Figure 12: Exemple de procédure sur le modèle WS3. Le modèle géologique (1.) est maillé (2.); la température est ensuite calculée sur le maillage (3.). La distribution en 3D est ensuite représentée sans le maillage (4.)

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

Tableau 6 : 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]	Production de chaleur radiogène [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

Les figures suivantes (Figure 13 à Figure 17) montrent des comparaisons entre les gradients de température calculées à l'aide de modèles diffusifs avec les mesures de température disponibles dans différents forages. Seul le forage de Payerne, dans lequel les données de température sont trop peu profondes (< 250 m) n'a pas été pris en compte pour la calibration thermique. 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 Soleure a été respectée lors de la calibration des modèles thermiques diffusifs.

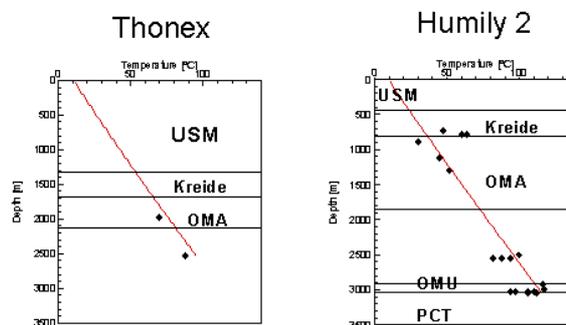


Figure 13 : Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine Genf (USM= Untere Süsswassermolasse ou molasse d'eau douce inférieure, OMA= Oberer Malm ou Malm Supérieur, OMU= Oberer Muschelkalk ou Muschelkalk Supérieur)

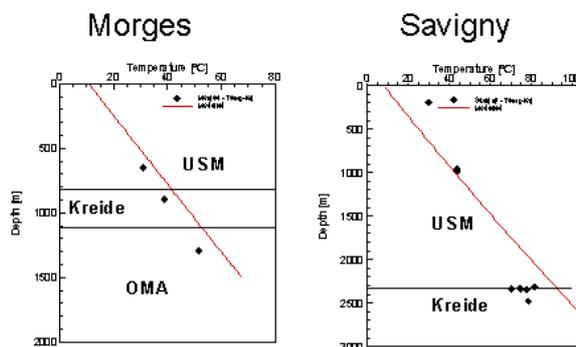


Figure 14 : Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine WS4 (USM= Untere Süsswassermolasse ou molasse d'eau douce inférieure, OMA= Oberer Malm ou Malm Supérieur)

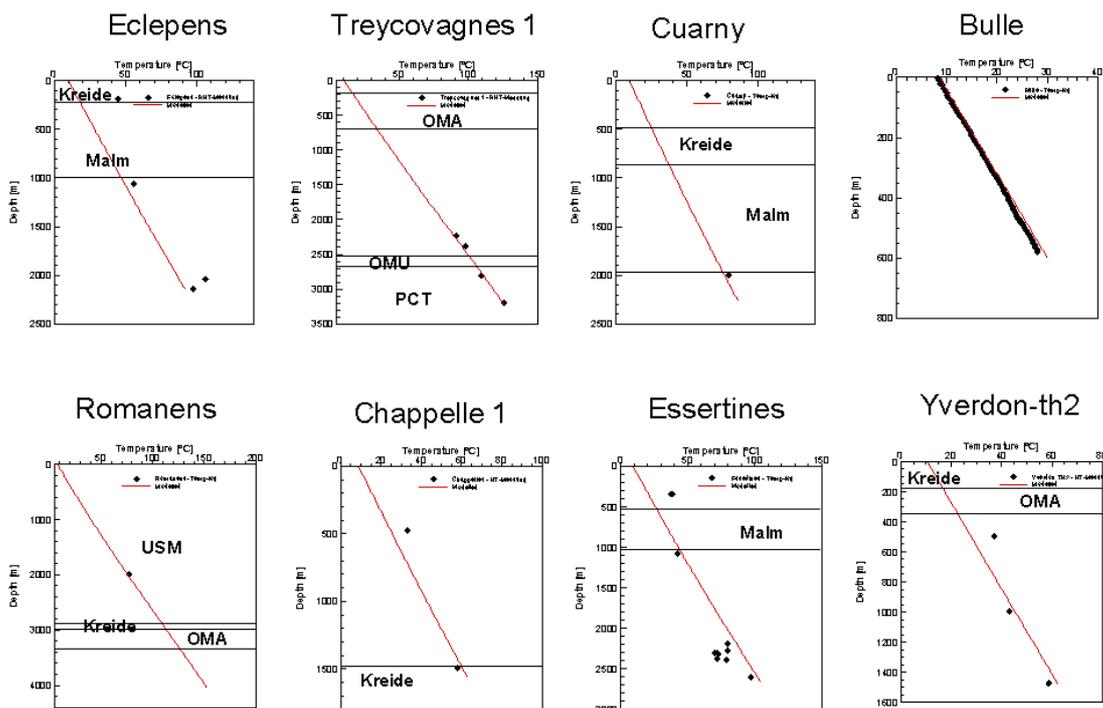


Figure 15 : Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine WS3 (USM= Untere Süsswasserolasse ou molasse d'eau douce inférieure, OMA= Oberer Malm ou Malm Supérieur, OMU= Oberer Muschelkalk ou Muschelkalk Supérieur)

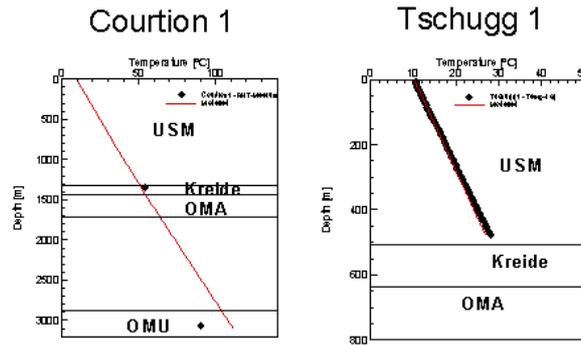


Figure 16 : Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine WS2 (USM= Untere Süsswassermolasse ou molasse d'eau douce inférieure, OMA= Oberer Malm ou Malm Supérieur, OMU= Oberer Muschelkalk ou Muschelkalk Supérieur)

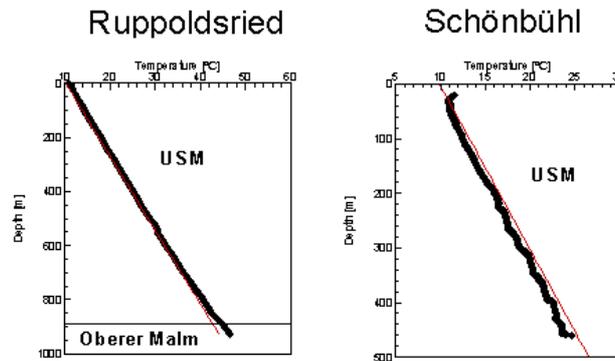


Figure 17 : Comparaison des résultats obtenus avec un modèle diffusif (en rouge) avec les mesures en températures (en noir) pour le domaine WS1 (USM= Untere Süsswassermolasse)

Lorsque tous les modèles sont ajustés au mieux, les domaines sont regroupés et il est possible d'obtenir des images de la température à différentes profondeurs ou sur différents horizons préalablement définis. La Figure 18 montre les températures calculées par le modèle diffusif à la base de Mésozoïque. Cet horizon est celui qui a été utilisé afin de réaliser les modèles structuraux. La Figure 18 montre une vue 3D d'un regroupement de tous les domaines modélisés jusqu'à maintenant et des distributions en température calculées.

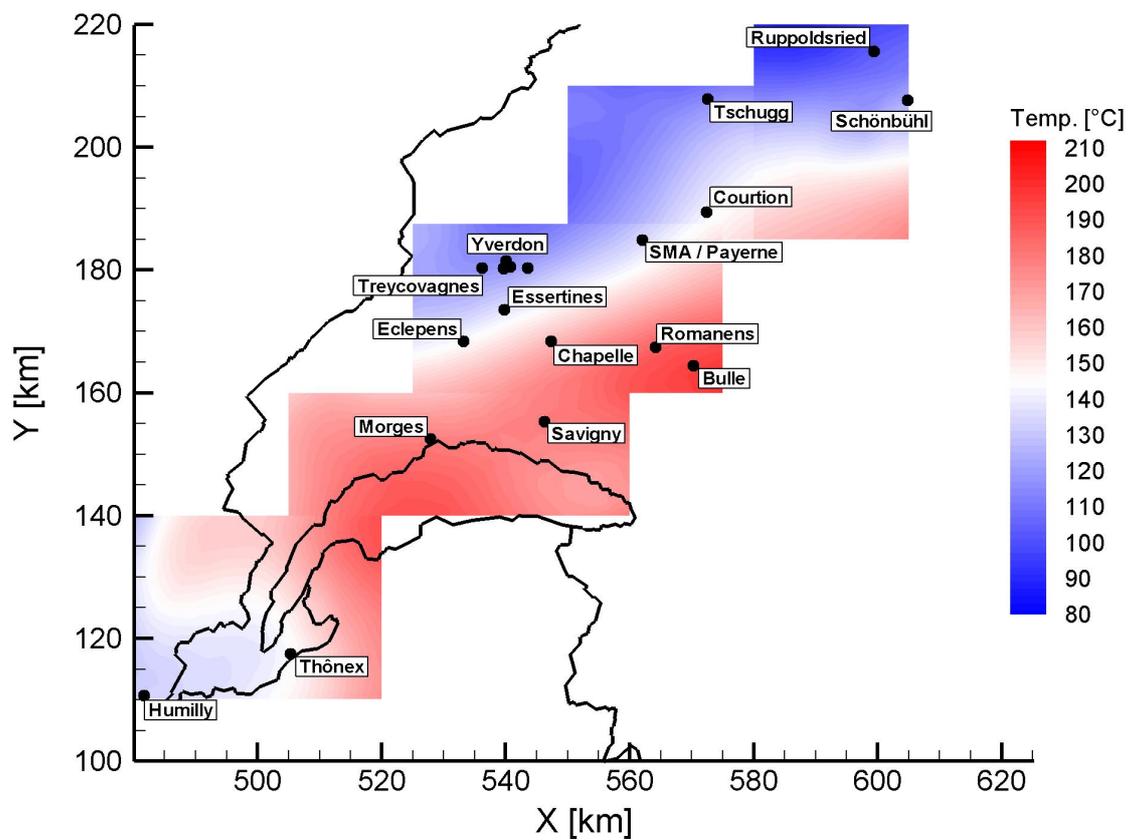


Figure 18 : Distribution en température calculée à la base du Mésozoïque

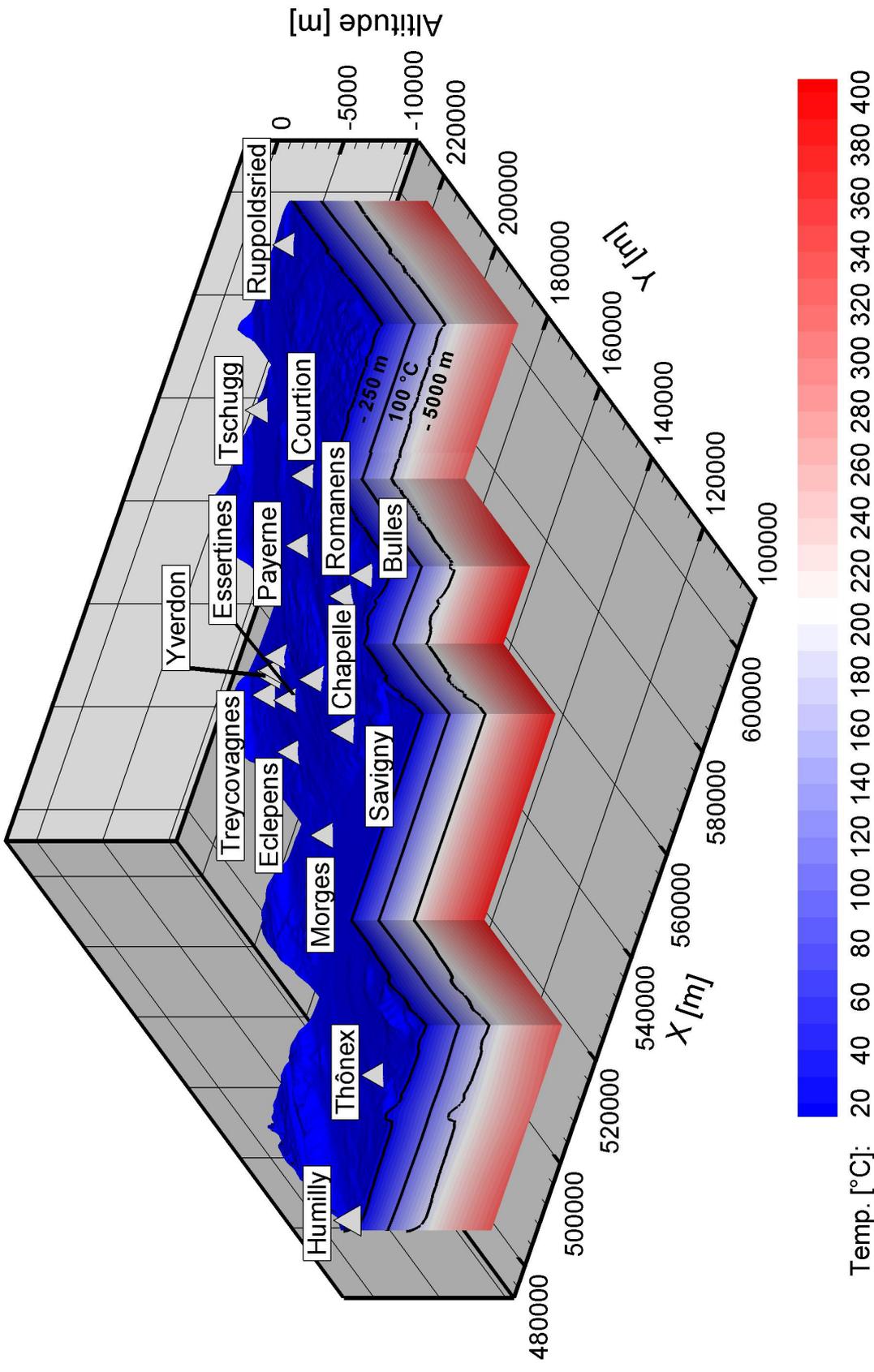


Figure 19 : Résultats du calcul de la température en 3D des modèles diffusifs de Genf, WS1 à WS4

6.3 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. Dans ce chapitre, les potentiels géothermiques des trois aquifères retenus seront calculés et représentés. Un intérêt particulier sera porté à la classification des différentes classes de ressources; l'énergie utilisable E_{ut} de chaque aquifère sera répartie selon les classes 2 et 3 (voir chapitre 2.2). Les paramètres clés conditionnant le calcul de ces énergies sont:

- la température moyenne de l'aquifère, qui dépend de sa profondeur et de la distribution 3D en température précédemment calculée, et
- la transmissivité de chaque aquifère, définie par le produit de la conductivité hydraulique de chaque aquifère (voir chapitre 5.4) par son épaisseur.

Dans la suite, chaque aquifère potentiellement intéressant dans une optique d'exploitation géothermique est traité (cristallin altéré, Muschelkalk Supérieur, Malm Supérieur). Les paramètres suivants sont représentés pour chaque aquifère :

- 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, extraite des modèles tridimensionnels de température.

Pour chaque aquifère, l'énergie géothermique disponible E_{HIP} est calculée. L'énergie géothermique utilisable E_{ut} est ensuite calculée, selon la théorie du réseau de doublets de Gringarten (1978). Pour des explications plus approfondies concernant cette théorie, le lecteur pourra se reporter au chapitre 2.1 du présent rapport ou à la précédente publication de l'Atlas géothermique de la Suisse (Signorelli et Kohl, 2006). Les paramètres de calculs sont ici exposés. Concernant les transmissivités, seul l'aquifère du Malm Supérieur est supposé d'épaisseur variable sur le domaine étudié; le Muschelkalk Supérieur et la zone altérée du Cristallin sont supposés d'épaisseur constante, respectivement de 70 m et 500 m (Tableau 5). Il est supposé que les propriétés hydrauliques des aquifères peuvent être améliorées artificiellement avant le début son exploitation géothermique. Il faut ainsi introduire un facteur de stimulation, qui décrit l'amélioration de l'injectivité ou de la productivité d'un puits. Un facteur de stimulation de puits est donc pris en compte dans les calculs, fixé à 2.5 pour un milieu sédimentaire, et à 10 pour un milieu cristallin (voir par exemple Jung et al., 2002). Une température de réinjection dans l'aquifère de 15°C est supposée, afin de pouvoir baser les calculs sur des exploitations de doublets géothermiques. Une telle température peut être rendue possible grâce à une utilisation de l'énergie géothermique en cascade: les résidus thermiques d'une unité de conversion chaleur/électricité peuvent être utilisés par exemple pour un réseau de chauffage urbain, et les résidus thermiques de cette dernière utilisation peuvent par exemple être utilisés à des fins de chauffage de serres ou d'aquaculture par exemple. Une durée d'exploitation de 30 ans est prise en compte dans les calculs (pris moyen d'un retour sur investissement).

Dans la théorie développée par Gringarten (1978), l'écart entre les puits du doublet et le débit obtenu sont calculés de façon à trouver un optimum de productivité pour chaque doublet. Cette distance varie donc d'un aquifère à l'autre, et même au sein d'un même aquifère si sa transmissivité change dans l'espace (une augmentation de la transmissivité implique une augmentation de la distance entre les puits). La distance entre deux doublets est prise égale à 4 fois la distance entre deux puits d'un

même doublet. La surface attribuée à un doublet est ainsi de $20d^2$ ($4d \cdot 5d$), si d est la distance entre deux puits d'un même doublet. La distance minimale entre deux puits d'un même doublet est fixée à 200 m; le rabattement maximal au puits accepté est de 500 m. Un débit minimal dans les doublets de $12 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$ est considéré.

Le calcul de l'énergie géothermique utilisable pour chaque aquifère permet la création de cartes de potentiel géothermique, ou productivité géothermique, homogène à une puissance. 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.

6.3.1 Répartition des classes de ressource sur le domaine étudié

La classe de ressources 2 est définie par une profondeur minimale de 200 m et une température maximale de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. La classe 3 est définie par une température minimale de $100 \text{ }^\circ\text{C}$ et une profondeur maximale de 5000 m.

La totalité du volume représenté par les 3 aquifères est égale à $4'590 \text{ km}^3$ ($2'633 \text{ km}^3$ pour le Cristallin altéré, 313 km^3 pour le Muschelkalk Supérieur et $1'643 \text{ km}^3$ pour le Malm Supérieur). La répartition des classes de ressource est la suivante:

- Classe 1: $< 0.1 \%$
- Classe 2: 33%
- Classe 3: 56%
- Classe 4: 11%

On note ainsi qu'un tiers des ressources géothermiques de l'Ouest du Plateau Suisse appartiennent à la classe 2, et que plus de la moitié est située en classe 3. D'autre part, la classe 4, avec environ $\frac{1}{10}$ des ressources occupe une part non négligeable des ressources.

La température moyenne calculée pour la classe 2 est évaluée à $62 \text{ }^\circ\text{C}$, valeur identique à celle trouvée par Signorelli et Kohl, 2006. En revanche, la température moyenne de la classe de ressource 3 est évaluée à $142 \text{ }^\circ\text{C}$, contre $152 \text{ }^\circ\text{C}$ dans la partie Est du Plateau. Ceci est dû au fait qu'une partie importante de la ressource du cristallin (environ 20%) est considérée ici comme appartenant à la classe de ressource 4, et non à la classe 3, faisant ainsi chuter la température moyenne de la ressource.

6.3.2 Aquifère du Cristallin altéré

En l'absence de données fiables concernant le Cristallin altéré dans cette partie du Plateau Suisse, les valeurs d'épaisseur et de conductivité hydraulique dérivées par Signorelli et Kohl (2006) sont ici prises comme valeur par défaut. Ainsi, une épaisseur constante de 500 m de Cristallin est supposée altéré sur toute l'extension de l'aquifère. Deux valeurs de conductivité hydraulique K du Cristallin altéré ont été prises en compte sur le domaine (voir chapitre 5.4). Il faut ici souligner que la géométrie du toit du Cristallin est très mal connue dans cette partie du Plateau, du fait de la présence de fossés Permocarbonifères, dont l'existence et la localisation sont supposées après interprétation de différentes données géophysiques. Une valeur $K = 5 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est considérée là où le Cristallin est situé sous le Mésozoïque, et une valeur $K = 8 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ est prise en compte au niveau du fossé Permocarbonifère. Le facteur de stimulation implique la prise en compte d'une conductivité hydraulique augmentée d'un facteur 10 dans les calculs (milieu cristallin).

L'élévation du toit du Cristallin est montrée en Figure 20, ainsi que les différentes zones de propriété hydrogéologique considérées. La distribution en température au milieu du Cristallin est représentée dans la figure suivant (Figure 21). Cette température a été extraite du modèle thermique tridimensionnel (Figure 19).

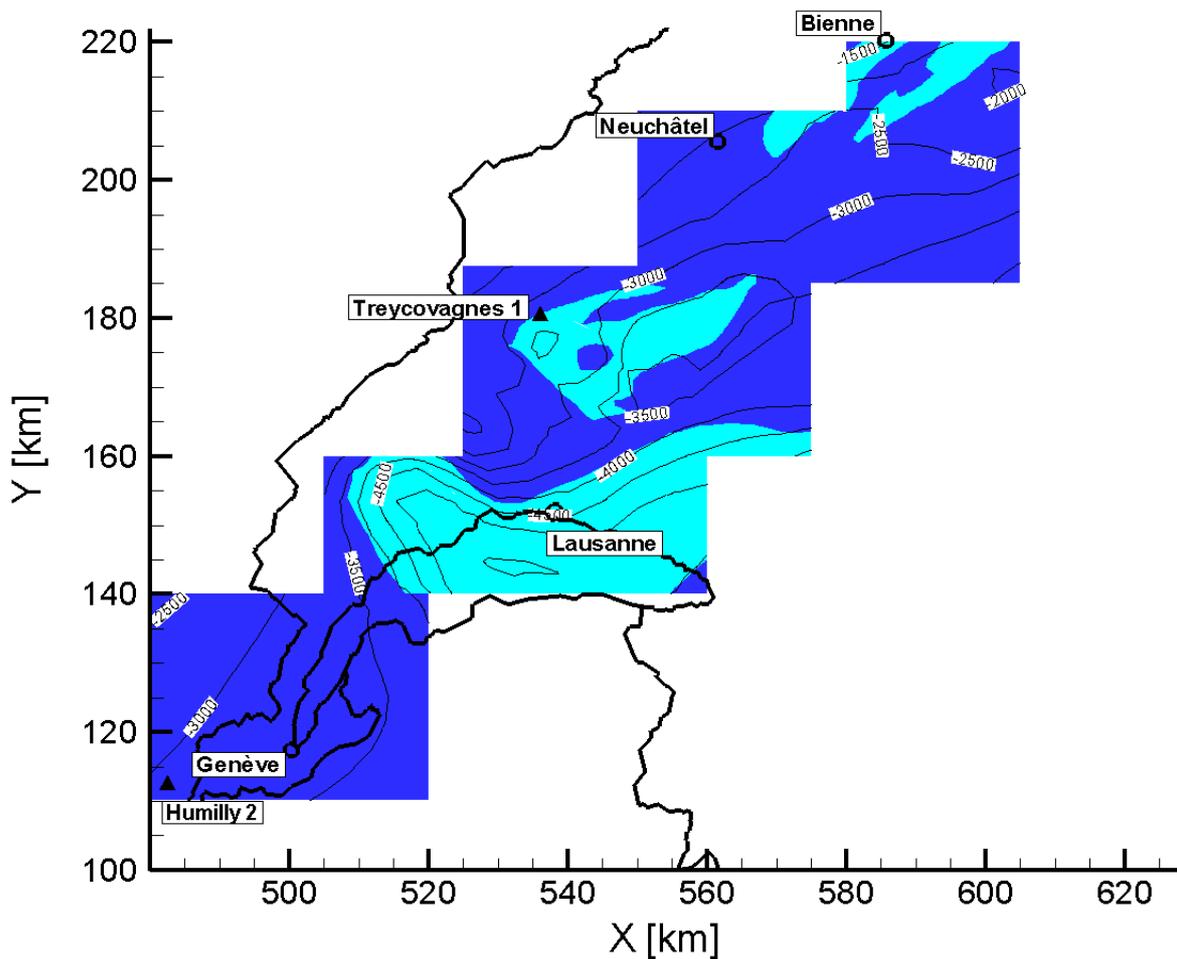


Figure 20 : Carte des isohypses du Cristallin altéré. Bleu : cristallin altéré sous le mésozoïque; turquoise: cristallin altéré sous le fossé Permocarbonifère. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Cristallin ou le Permocarbonifère.

A partir de la distribution en température dans l'aquifère, des conductivités hydrauliques des différentes zones et de l'épaisseur de l'aquifère, l'énergie géothermique utilisable E_{ut} et la puissance géothermique moyenne P_{mean} de l'aquifère sont calculées (Figure 22 et Tableau 7). La carte met en lumière deux processus physiques:

- La puissance augmente avec la profondeur (grâce à l'augmentation de température)
- La puissance augmente avec la conductivité hydraulique du milieu

Ainsi, un gradient général de puissance nord-ouest/sud-est apparaît sur la carte, grâce à l'augmentation de température, conséquence du pendage général du toit du Cristallin dans cette région. Une puissance plus importante est calculée au niveau des fossés Permocarbonifères, conjugaison, d'une température et de conductivités hydrauliques plus élevées.

Le volume total des 500 m supérieur du Cristallin calculé sur le domaine considéré est de 2'660 km³. La température moyenne y est très élevée (161 °C), menant à une énergie disponible E_{HIP} relativement importante (850'000 PJ). Ceci se traduit par une densité énergétique élevée (320 PJ·km³), plus élevée que pour le domaine de l'Est du Plateau Suisse (200 PJ·km³). Il faut tempérer ces résultats dans la mesure où 20 % du volume du Cristallin est classifié dans la classe de ressource 4 (aujourd'hui difficilement exploitable). Etant donné que cette classe de ressources est plus énergétique que les classes 2 et 3, ces 20 % du volume représentent 30 % de l'énergie disponible. Ainsi, l'énergie utilisable E_{ut} totale calculée sur le domaine s'élève à 14'800 PJ, dont 10'700 PJ font partie de la classe 3, le reste faisant partie de la classe 4. La densité énergétique de la classe 3 vaut alors 5 PJ·km³, valeur identique à celle calculée par Signorelli et Kohl (2006). On remarque que l'intégralité du Cristallin est altéré est de température supérieure à 100 °C, ce qui explique l'absence de la classe de ressources 2 dans le bilan énergétique de l'aquifère.

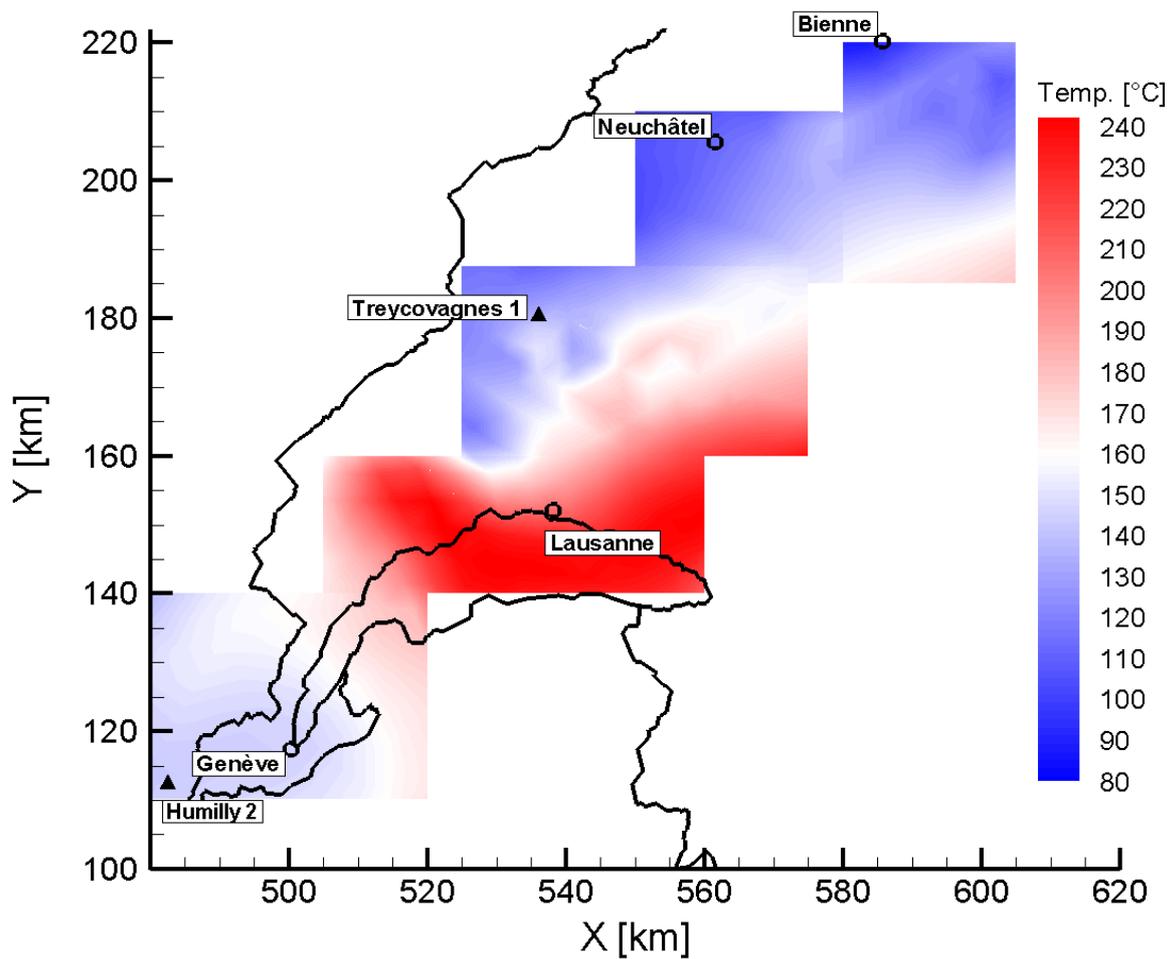


Figure 21 : Température moyenne dans l'aquifère des 500 m de cristallin altéré. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le cristallin.

Tableau 7 : Résultats des simulations donnant l'énergie disponible E_{HIP} et l'Energie utilisable E_{ut} dans le cristallin altéré pour les domaines Genf, WS1 à WS4, selon les différentes classes de ressources.

E_{HIP}	total	850'000 PJ
	par km ³ total	320 PJ
E_{ut} (30 années d'utilisation)	total	14'800 PJ
	Res.Classe 3	10'700 PJ
	par km ³ Res.Classe 3	5 PJ

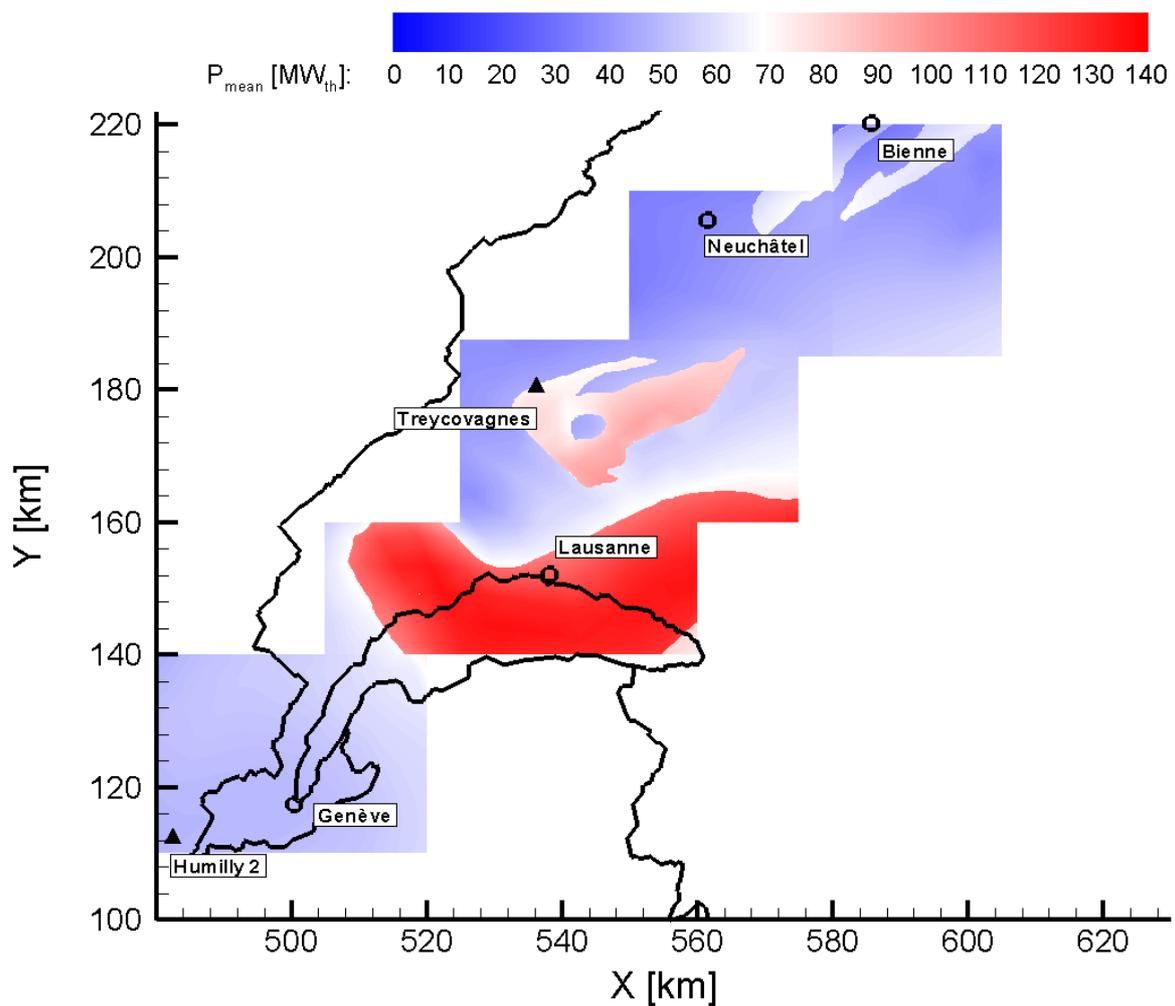


Figure 22 : Puissance géothermique moyenne calculée dans la zone de cristallin altéré. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le cristallin.

Il convient ici de relativiser ces résultats. La zone de Lausanne par exemple paraît ici une zone extrêmement intéressante du point de vue de son potentiel géothermique. Or, ce fort potentiel est dû à

la très grande profondeur du toit du cristallin dans cette région (présence d'un fossé Permocarbonifère). Ainsi il n'est pas rare de trouver dans cette région des profondeurs du toit de cristallin supérieures à 5000 ou 6000 m, ce qui rend la zone de Lausanne difficilement économiquement exploitable avec les techniques actuelles (voir la définition des classes de ressource en paragraphe 2.2).

Deux autres remarques peuvent être effectuées. La première concerne la probable présence d'un fossé Permocarbonifère au niveau de Genève, non pris en compte dans cette étude par manque de données. D'autre part, il est plus que probable que de nombreuses failles non connues et non identifiables aujourd'hui parcourent cette zone du cristallin altéré, changeant ainsi la distribution des puissances disponibles dans cet aquifère.

6.3.3 Aquifère du Muschelkalk Supérieur

L'analyse des ressources disponibles dans les Muschelkalk Supérieur est menée de façon analogue à celle du Cristallin Altéré. La Figure 23 montre l'élévation du toit du Muschelkalk Supérieur ainsi que les zones de différente conductivité hydraulique prises en compte pour le calcul de la productivité géothermique de l'aquifère.

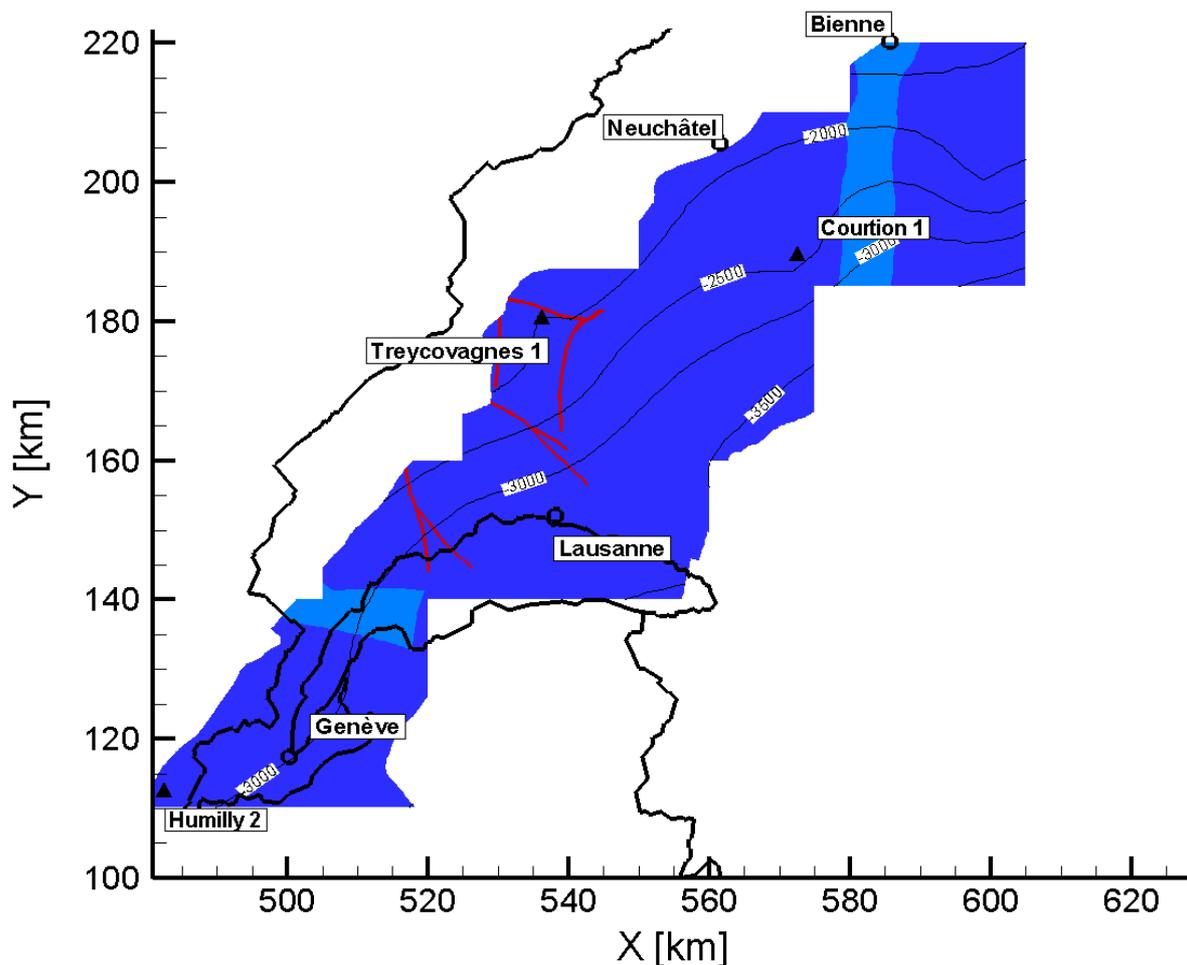


Figure 23 : Carte des Isohypses du Muschelkalk Supérieur (en bleu foncé), avec les failles (en rouge) et les zones fracturées (en bleu clair). Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

Comme expliqué en paragraphe 5.3, de nombreuses zones de failles sont prises en compte dans cet aquifère. La figure suivante (Figure 24) montre les températures extraites du modèle tridimensionnel de température. La répartition en température dans l'aquifère montre une augmentation régulière de la température du Nord-Ouest vers le Sud-Est ; cette tendance homogène est due à la géologie puisque dans cette région notre modèle géologique considère que le pendage du Muschelkalk est relativement régulier et orienté Nord-Ouest/Sud-Est.

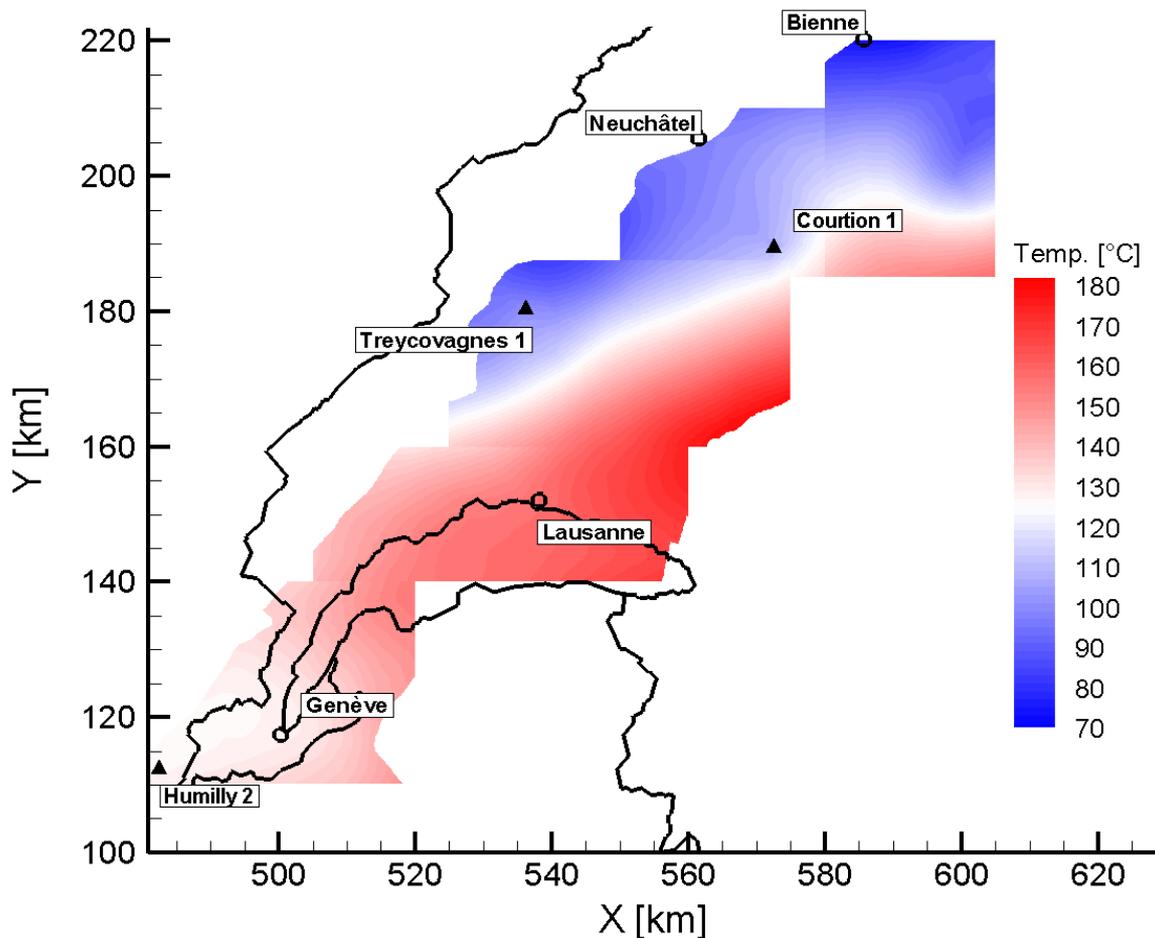


Figure 24 : Température moyenne dans l'aquifère du Muschelkalk Supérieur altéré. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

La Figure 25 montre le potentiel géothermique calculé pour l'aquifère. Tout comme pour le Cristallin, le Muschelkalk supérieur est supposé d'épaisseur constante, prise à 70 m sur le domaine considéré. Trois différentes zones de conductivité hydraulique ont été définies sur le domaine étudié (Figure 23). Les valeurs des conductivités hydrauliques prises en compte ont été décrites dans le paragraphe 5.4 et sont ici rappelées:

- Muschelkalk Supérieur non perturbé: $K=7 \cdot 10^{-7} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Zone de faille: $K=3 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
- Champ de fractures: $K=1 \cdot 10^{-6} \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Il faut préciser qu'un facteur de stimulation du puits (amélioration de la conductivité hydraulique) de 2.5 a été pris en compte lors des calculs. Ce facteur était égal à 10 pour le Cristallin (roches non sédimentaires). Le facteur de stimulation est volontairement inférieur dans le cas de roches sédimentaires.

Tableau 8 : Résultats des simulations donnant l'énergie disponible E_{HIP} et l'Energie utilisable E_{ut} dans le Muschelkalk Supérieur pour les domaines Genf, WS1 à WS4

E_{HIP}	total	79'300 PJ
	par km ³ total	250 PJ
E_{ut} (30 années d'utilisation)	total	2'700 PJ
	Res.Classe 2	300 PJ
	Res.Classe 3	2'400 PJ
	par km ³ Res.Classe 2	5.5 PJ
	par km ³ Res.Classe 3	9 PJ

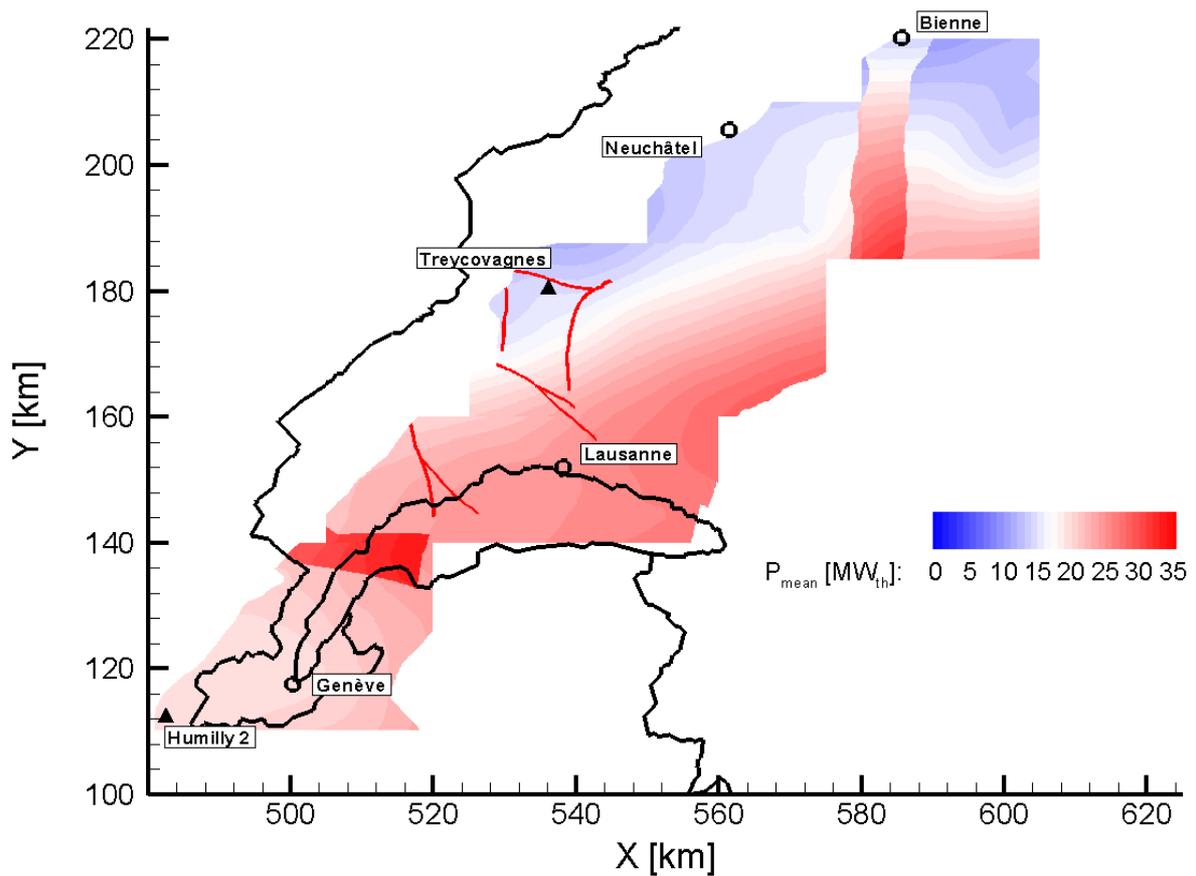


Figure 25 : Puissance géothermique moyenne calculée pour l'aquifère du Muschelkalk Supérieur. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Muschelkalk Supérieur.

La température moyenne du Muschelkalk supérieur est calculée égale à $122\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur le domaine étudié (Volume total de 316 km^3). Pour comparaison, Signorelli et Kohl ont calculé une température moyenne de $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ sur le Nord-Est du Plateau Suisse. La valeur élevée ici mise en évidence est due à une profondeur moyenne du Muschelkalk bien plus importante dans cette partie de la Suisse. Ceci se traduit également par une très forte densité énergétique (en ce qui concerne l'énergie disponible E_{HIP}) du Muschelkalk Supérieur, de $250\text{ PJ}\cdot\text{km}^{-3}$ (valeur pour le Nord-Est du Plateau: $130\text{ PJ}\cdot\text{km}^{-3}$) (voir Tableau 8). 16 % du volume de l'aquifère du Muschelkalk Supérieur sont classifiés dans la classe de ressource 2, et 84 % dans la classe de ressource 3. Étant donné que l'énergie disponible ou utilisable croît avec la température, les 84 % du volume de l'aquifère classifiés dans la zone 3 représentent 90 % de l'énergie disponible. Ainsi, la densité de l'énergie utilisable dans le Muschelkalk Supérieur est estimée égale à $5.5\text{ PJ}\cdot\text{km}^{-3}$ pour la classe 2 et $9\text{ PJ}\cdot\text{km}^{-3}$ pour la classe 3. Ces valeurs plus élevées que pour le Nord-Est du Plateau s'expliquent par la température moyenne de l'aquifère plus élevée.

6.3.4 Aquifère du Malm Supérieur

La Figure 26 montre l'élévation du toit du Malm Supérieur et les zones de différente conductivité hydraulique prises en compte pour le calcul de la productivité géothermique de l'aquifère.

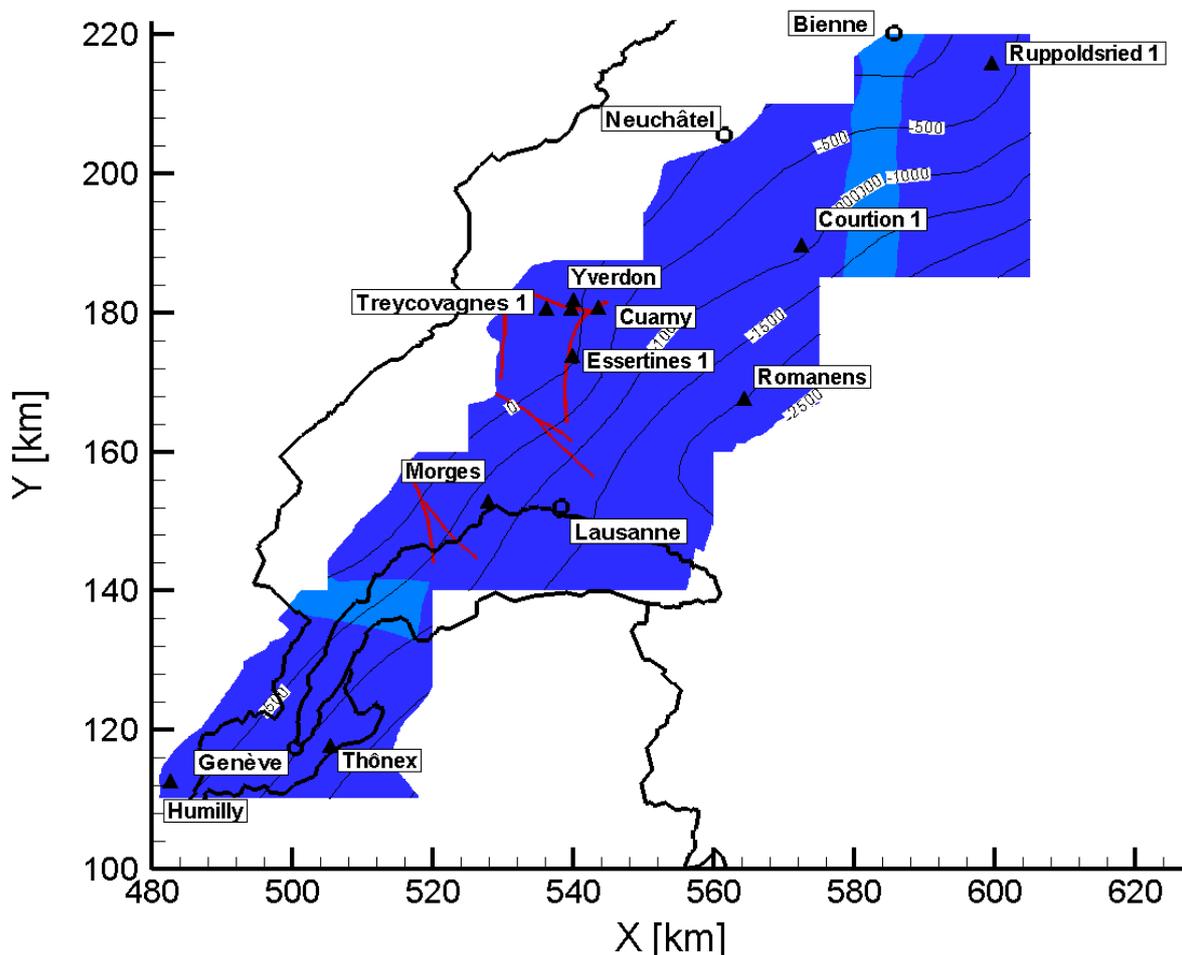


Figure 26 : Carte des Isohypes du Malm Supérieur (en bleu foncé), avec les failles (en rouge) et les zones fracturées (en bleu clair). Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Malm Supérieur.

Les valeurs des conductivités hydrauliques prises en compte ont été décrites dans le paragraphe 5.4 et sont ici rappelées:

- Malm Supérieur non perturbé: $K=3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Zone de faille: $K=7 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- Champ de fractures: $K=3.6 \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Dans le cas de cet aquifère, tout comme pour Muschelkalk Supérieur, un facteur de stimulation de l'aquifère est considéré, et ce dernier a pour valeur 2.5.

L'aquifère du Malm Supérieur, contrairement aux deux aquifères précédemment traités, ne peut pas être considéré comme un aquifère de puissance constante. Une carte représentant les isopaques est donc logiquement présentée dans les pages qui suivent (Figure 27).

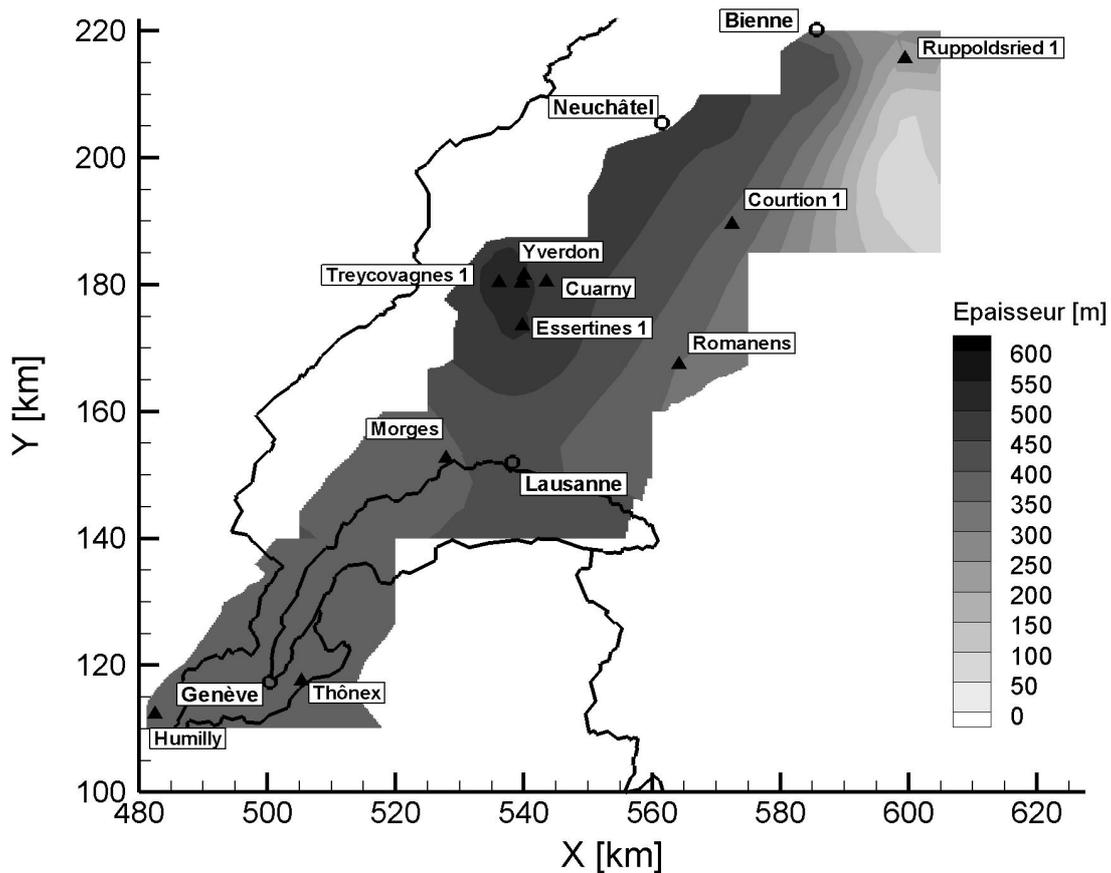


Figure 27 : Carte des isopaques du Malm Supérieur. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Malm Supérieur.

L'épaisseur moyenne du Malm a été extrapolée à partir de données de la littérature (voir chapitre 5.2.4). Il faut ici souligner que ses données sont relativement incertaines. La plus importante incertitude est marquée au niveau de Genève, où les données obtenues pour le forage d'Humilly ne permettent pas de dériver une épaisseur du Malm Supérieur. Ainsi, une valeur par défaut de 400 m a ici été prise en compte afin d'autoriser les calculs et l'interpolation de l'épaisseur de l'aquifère sur le modèle considéré.

La profondeur moyenne de l'aquifère a ensuite été calculée à partir d'un modèle de topographie, de l'élévation moyenne du toit de l'aquifère et de son épaisseur ; la température a alors été extraite du modèle 3D de températures (Figure 28). Les valeurs de température de l'aquifère du Malm Supérieur sur le domaine considéré sont très comparables à celles calculées pour le Nord-Est du Plateau par Signorelli et Kohl (2006). Notons que l'incertitude sur l'épaisseur a un effet relativement faible sur la température moyenne de l'aquifère (dépendance linéaire avec la profondeur) mais que l'effet sur le potentiel géothermique peut être bien plus important (dépendance non linéaire avec la transmissivité de l'aquifère).

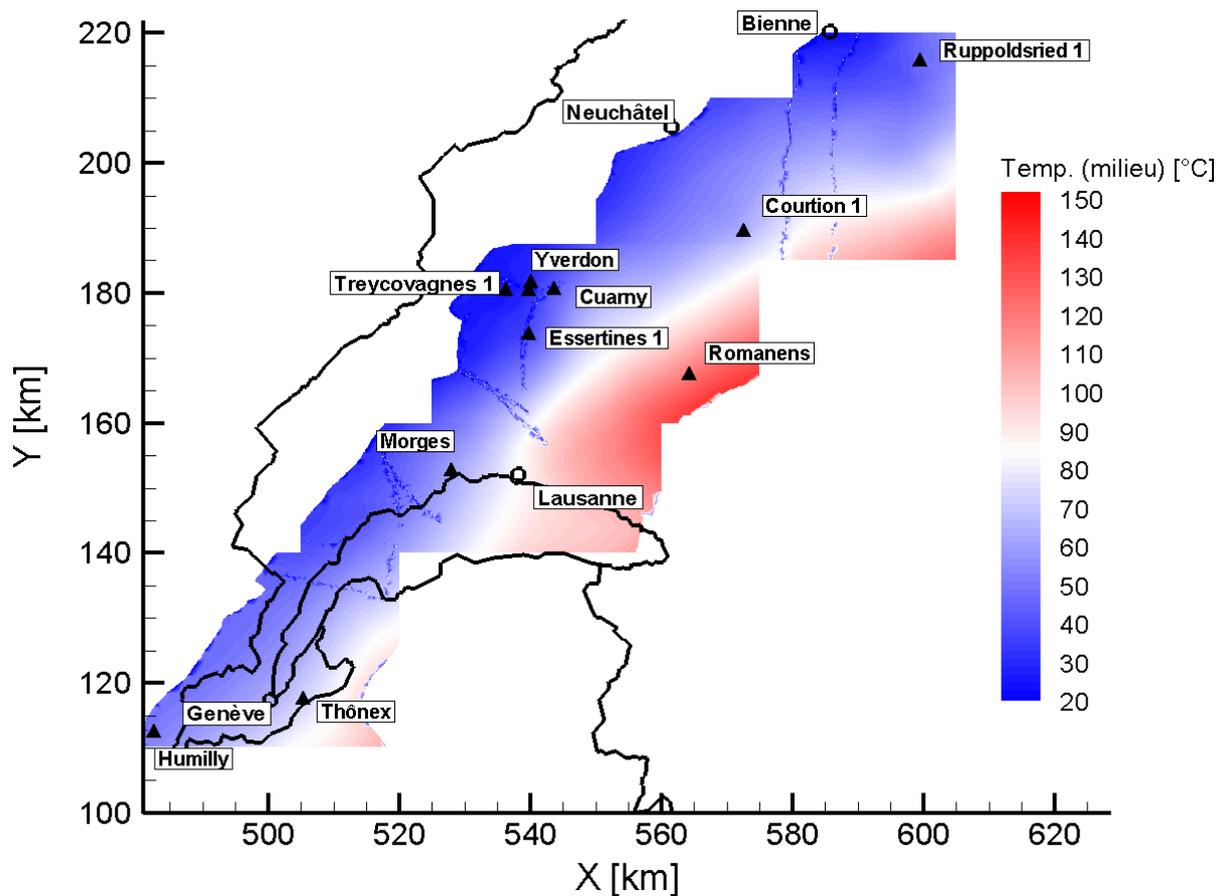


Figure 28 : Température moyenne dans l'aquifère du Malm Supérieur altéré. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Malm Supérieur.

La Figure 29 montre le potentiel géothermique exploitable de l'aquifère du Malm Supérieur. Le Tableau 9 regroupe les résultats des calculs.

La température moyenne du Malm calculée sur l'ensemble du domaine d'investigations est égale à 66 °C. Le volume total de l'aquifère est estimé à 1'700 km³. La classe de ressource 2 compose 89 % du domaine étudié, mais ne compte que pour 78 % du total de l'énergie disponible. Ainsi, la classe 3 compose quant à elle 11 % du volume, et 22 % de l'énergie disponible.

La densité énergétique du Malm Supérieur est estimée à 110 PJ·km⁻³, valeur plus faible que celle calculée pour le Nord-Est du Plateau Suisse (140 PJ·km⁻³). Ceci est dû au fait que la température moyenne de l'aquifère sur le domaine étudié est inférieure à celle calculée lors de la première phase de l'étude (80 °C). On observe également, comme à l'habitude, que la densité d'énergie utilisable dans la classe de ressources 3 (2.6 PJ·km⁻³) est bien supérieure à celle de la classe 2 (1.2 PJ·km⁻³).

Tableau 9 : Résultats des simulations donnant l'énergie disponible EHIP et l'Energie utilisable Eut dans le Malm Supérieur pour les domaines Genf, WS1 à WS4

E_{HIP}	total	184'800 PJ
	par km ³	total 110 PJ
E_{ut} (30 années d'utilisation)	total	2'300 PJ
	Res.Classe 2	1'800 PJ
	Res.Classe 3	500 PJ
	par km ³	Res.Classe 2 1.2 PJ
	par km ³	Res.Classe 3 2.6 PJ

Les valeurs de l'énergie utilisable ainsi que les densités d'énergie utilisable ici calculées sont bien supérieures à celles calculées pour le Malm Supérieur sur le Nord-Est du Plateau. Pour rappel, l'énergie totale utilisable sur le Nord-Est du Plateau Suisse avait alors été estimée à 81 °PJ. En comparant les densités énergétiques calculées, on s'aperçoit que la densité d'énergie utilisable dans le domaine étudié est 30 fois supérieure à celle calculée pour le Nord-Est du Plateau.

Ces différences ne sont pas dues à la température de l'aquifère, ni à son épaisseur. Elles sont le fait de la conductivité hydraulique du Malm Supérieur utilisée pour les calculs. Ainsi, une conductivité hydraulique de $1 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ avait alors été utilisée pour le Malm Supérieur et milieu non perturbé (pour $3 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ sur le domaine étudié dans ce rapport). Ainsi, on retrouve ce facteur 30 entre les densités énergétiques et les conductivités hydrauliques. Une telle conductivité hydraulique avait été utilisée pour le Malm Supérieur sur le Nord-Est du Plateau car l'étude hydrogéologique avait été menée sur la partie Nord-Est du Plateau, où seuls deux forages donnant des valeurs de conductivité hydraulique du Malm. Ces deux valeurs inférieures à $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ont mené à une estimation de la conductivité du Malm bien inférieure à celle dérivée pour l'Ouest du Plateau. Même si les différences de productivité de l'aquifère du Malm Supérieur calculées entre les deux régions paraissent élevées, des changements de faciès dans l'aquifère peuvent expliquer des changements. Bien évidemment, les limites entre différents faciès ne sont certainement pas aussi abruptes que le laissent supposer les résultats obtenus, la méconnaissance de cet aquifère – notamment à l'Est – ne permet pas d'inférer une limite plus précise.

On touche ici une des limites de l'évaluation régionale du potentiel géothermique, puisque les conductivités hydrauliques des aquifères considérés sont supposées constantes au sein de zones prédéfinies, or de nombreux aquifères montrent une variabilité spatiale de leurs propriétés hydrauliques très importante. Ceci n'est pas tenu en compte lors de l'estimation du potentiel géothermique de chaque aquifère; des études plus locales sont nécessaires afin d'évaluer au mieux le potentiel géothermique de chaque aquifère.

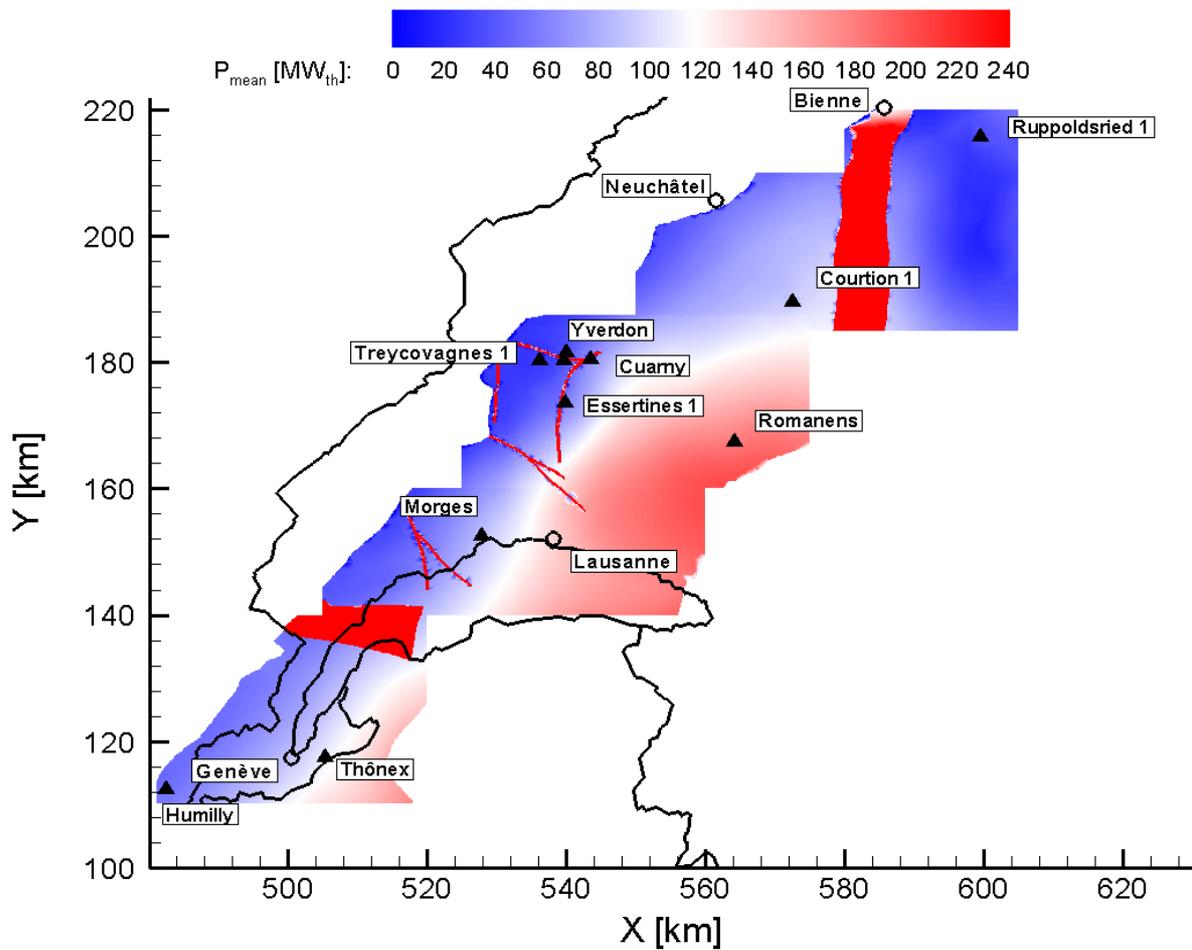


Figure 29 : Puissance géothermique moyenne calculée pour l'aquifère du Malm Supérieur. Sont indiqués sur la carte les principales agglomérations ainsi que les forages profonds atteignant le Malm Supérieur.

7. Conclusions et perspectives

Cette publication met fin au projet d'évaluation des ressources géothermiques de la Suisse. Une première publication de la Commission Suisse de Géophysique (n°39) a permis de présenter les résultats obtenus pour le Nord-Est du Plateau Suisse (Soleure – lac de Constance), et cette publication détermine le potentiel géothermique de l'Ouest du Plateau Suisse (Genève - Soleure).

Ce rapport présente une estimation de l'énergie géothermique disponible au niveau du Plateau Suisse Occidental. Une étude de dimension régionale fait nécessairement des compromis dans ses objectifs. Ainsi, les résultats se concentrent uniquement sur les ressources géothermiques de profondeur supérieure à 200 m, sur les aquifères et les zones faillées (aux propriétés hydrauliques potentiellement intéressantes). En effet la présence d'un aquifère est aujourd'hui indispensable à l'exploitation de l'énergie géothermique. L'approche choisie dans cette évaluation représente un développement des travaux préexistants. Les productivités calculées ne sont pas seulement fonction de la température et du volume des aquifères (approche classique) mais tiennent directement compte des conditions hydrogéologiques (propriétés hydrauliques des aquifères) et d'opération (espacement des doublets). D'autre part, les méthodes traditionnelles d'évaluation utilisent des modèles à une dimension pour l'interprétation de la température, mais les progrès effectués en calcul numérique autorisent aujourd'hui des analyses tridimensionnelles intégrant les effets à grande échelle de structures topographiques, géologiques ou hydrogéologiques.

L'évaluation des ressources géothermiques a été réalisée en trois grandes étapes :

- Modélisation du régime thermique régional, et croisement avec les données de températures aux puits disponibles
- Etude géologique et hydrogéologique régionale destinée à isoler les aquifères susceptibles d'offrir une productivité énergétique intéressante
- Evaluation de la quantité d'énergie utilisable pour chaque aquifère précédemment mis en valeur, sur une durée de 30 ans.

La réalisation de modèles numériques aux éléments finis tridimensionnels de température présente l'avantage d'éviter une extrapolation hasardeuse des données thermiques de puits sur les différents aquifères et permet d'associer un raisonnement physique aux valeurs de température utilisées. Dans cette étude, un total de 18 profils de température provenant de la zone Genève – Soleure ont été utilisés pour la calibration des calculs. La plupart de ces données ont pour origine l'industrie pétrolière, pour qui la précision des mesures de température n'était que secondaire. En se basant sur ces données, les meilleurs ajustements possibles entre les mesures disponibles et les calculs ont été effectués. Bien que les données soient moins nombreuses dans cette partie de la Suisse que dans la partie Est, une bonne corrélation entre les données et les résultats a pu être obtenue pour les forages présents dans la région.

L'étude hydrogéologique poussée permet de dériver des propriétés hydrauliques des aquifères étudiés; l'étude géologique de ces aquifères permet de définir différentes zones de perméabilité (failles, zones fracturées...). Enfin, l'évaluation de l'énergie utilisable pendant 30 ans par un réseau de doublet géothermique permet de ne pas passer par l'évaluation empirique d'un coefficient de recouvrement (qui dépendrait de la nature de l'aquifère), défini par le quotient de l'énergie utilisable par l'énergie disponible.

Les aquifères du Cristallin altéré (les 500 m supérieurs du Cristallin sont ici considérés), du Muschelkalk Supérieur et du Malm Supérieur ont ici été étudiés. La totalité du volume représenté par les 3 aquifères est égale à 4'590 km³, dont 2'633 km³ pour le Cristallin altéré, 313 km³ pour le Muschelkalk Supérieur et 1'643 km³ pour le Malm Supérieur. Sur le domaine étudié, les ressources déterminées dans les aquifères du Muschelkalk Supérieur et du Malm Supérieur sont partagées entre la classe 2 (production de chaleur) et la classe 3 (production de chaleur et d'électricité). Les ressources du Cristallin quant à elles sont essentiellement localisées dans la classe 3 et 4 (difficilement économiquement exploitable avec les techniques actuelles), notamment au niveau des fossés Permocarbonifères.

Il ressort de cette étude que plus de 2'000 PJ sont exploitables dans un but de production de chaleur (Classe 2, dans les aquifères du Muschelkalk et Malm Supérieurs). Plus de 13'500 PJ sont exploitables dans un but de production d'électricité et de chaleur (classe 3), essentiellement au niveau des aquifères du Cristallin altéré et du Muschelkalk Supérieur. Si le Muschelkalk Supérieur semble posséder la plus grande densité énergétique utilisable (grâce à une température relativement élevée et à une bonne conductivité hydraulique), le Cristallin altéré constitue de loin la plus grande réserve en énergie utilisable sur le domaine étudié, si les hypothèses concernant l'altération du Cristallin Supérieur et les conductivités hydrauliques de cette zone sont confirmées.

Ce processus d'évaluation régionale connaît certaines limites. Tout d'abord, certains aquifères susceptibles de présenter localement des propriétés permettant l'exploitation de l'énergie géothermique ne sont pas représentés. C'est le cas notamment en Suisse Occidentale des aquifères de la Molasse Marine Supérieure et du Dogger, dont les propriétés hydrauliques semblent présenter une trop grande variabilité spatiale. Certains aquifères locaux, d'extension trop réduite ou inconnue n'ont pas non plus été traités dans cette étude, bien qu'ils puissent présenter un certain intérêt géothermique. C'est le cas par exemple au pied du Jura (aquifères du Hauterivien). D'une manière générale, la variabilité spatiale des propriétés hydrauliques des aquifères traités n'est pas prise en compte dans les calculs, ce qui peut mener à des erreurs ou à des différences d'estimation du potentiel importantes entre différentes régions, comme c'est le cas par exemple entre le Nord-Est et le Sud-Ouest du Plateau pour l'aquifère du Malm supérieur.

La seconde limitation générale de cette étude concerne la méconnaissance du sous-sol profond. Bien que la Suisse dispose de données géologiques et hydrogéologiques nombreuses et de qualité, les zones profondes, donc les plus chaudes et les plus intéressantes du point de vue de l'énergie géothermique utilisable sous condition de la présence d'un aquifère, restent relativement méconnues. Ce problème est parfaitement illustré par le cas des fossés Permocarbonifères, dont la localisation et l'extension sont les plus souvent mal connues, et diffèrent selon les interprétations trouvées dans la littérature.

D'un point de vue plus 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, l'importance des phénomènes advectifs (pouvant localement influencer la température d'un aquifère, ou prolonger la durée de vie d'un doublet) ne sont pas pris en compte
- 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 pu 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 ou de conductivité hydraulique dans le cristallin n'est disponible sur le domaine de la Suisse Occidentale.

Les résultats proposés sont naturellement dépendants de l'état actuel des connaissances du sous-sol dans la zone étudiée. Il est donc suggéré d'affiner ces résultats à l'avenir avec des résultats de nouveaux forages ou nouvelles prospections géophysiques (sismique, gravimétrie...).

Pour terminer, il faut remarquer que si l'énergie géothermique présente de forts avantages dans l'optique d'une réduction des émissions de CO₂, de par sa nature renouvelable, 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.

Remerciements

Ce travail a été réalisé grâce au concours de nombreuses personnes. Martin Burkhard a largement contribué à l'étude géologique de la partie du Plateau Suisse ici présentée. Nous lui sommes très reconnaissants pour sa disponibilité et son soutien actif au projet. Anna Sommaruga, Urs Eichenberger et François Marillier de la Commission Suisse de Géophysique ont également permis l'obtention de nombreuses données, tant géologiques que thermiques.

Eduard Kissling de la Commission Suisse pour la Géophysique a largement soutenu ce travail, et nous sommes également particulièrement reconnaissants à Harald Gorhan ainsi que Marcus Geissmann, du Bureau Fédéral de l'Énergie pour leur soutien sans failles.

Nos remerciements vont également à Luigi Burlini, Philip Birkäuser et Emil Klingelé qui ont relu et ce document et nous ont fait part de leur remarques constructives.

Références

- 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.
- Anonyme, 1970. Interprétation d'un essai de pompage dans le forage de La Brévine, rapport préliminaire, Université de Neuchâtel.
- Arn, R. , Conrad, M.A., Meyer, M. and Weidmann, M., 2005, Atlas géologique de la Suisse 1:25000, notice explicative, feuille 1261 Nyon (feuille 117 de l'Atlas)
- 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 Eurafrikan wrench-fault zones: differential drift and driving mechanism. Bulletin der Vereinigung Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure 51(121), 23-58.
- Erard, P. F. 1999. Traitement et interprétation de cinq lignes sismiques réflexion à travers le Plateau molassique et les Préalpes suisses, de Bienne à Lenk. Unpublished Doctorat thesis, Lausanne.
- 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,
- Flury, F., Matthey, B. and Rieben, C., 1991. Nouvelles ressources en eau et aspects géothermiques. Ingénieurs et architectes suisses, 24(November): 487-490.
- 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.
- Jung, R., Weidler, R., 2000. A conceptual model for the stimulation process of the HDR-system at Soultz. Geothermal Resources Council Transactions, Vol. 24, September 24 – 27, 2000.

- Jung, R. et al., 2002. Abschätzung des technischen Potenzials der geothermischen Stromerzeugung und der geothermischen Kraft-Wärmekopplung (KWK) in Deutschland, BGR & Institut für Geowissenschaftliche Gemeinschaftsaufgaben, Hannover.
- Kastrup, U. 2002. Seismotectonics and stress field variations in Switzerland. Unpublished PhD thesis, ETH-Zürich.
- Kemmeier, F., Perrochet, P., Andrews, R., Kiraly, L., 1985. Simulation par modèle mathématique des écoulements souterrains entre les Alpes et la Forêt Noire. Rapport Technique Cedra 84-50, Baden.
- Kohl, T. and Hopkirk, R.J., 1995. "FRACTure", a simulation code for forced fluid flow and transport in fractured porous rock. *Geothermics*, 24(3): 345-359
- Kohl, T., Andenmatten, N., Rybach, L., 2003. Geothermal resource mapping - example from northern Switzerland. *Geothermics* 32, 721 – 732.
- 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., 1971. Forage de Martel Dernier: Etude de la perméabilité par essai d'injection, Université de Neuchâtel - Centre d'hydrogéologie.
- Matthey, B., 1986. Gisement géothermique du littoral Neuchâtelois; possibilités d'exploitation à des fins thermales ou géothermiques; recherche d'un site favorable, Ofen, Berne.
- Matthey, B. and Simeoni, G.P., Estimation de la perméabilité en terrains calcaires par essais d'injection d'eau, Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel, Neuchâtel.
- Michelot, J. 1992. Le puits de Thoune - Forage d'exploration pétrolière en Suisse, Consortium Pétrolier Fribourgeois et Bernois. *Bulletin der Vereinigung Schweizerischen Petroleum-Geologen und -Ingenieure* 58(133), 23-32.
- Mural, R., 1999. Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Dölémont, Yverdon-les-bains, Moiry, Genève et Aix-les-bains). *Matériaux pour la géologie de la Suisse, série géotechnique*, 82: 54-62.
- Nagra, 2005, Technischer Bericht 05-02: Geologische Tiefenlagerung der abgebrannten Brennelemente, der Hockaktiven und langlebigen mittelaktiven Abfälle, Darstellung und Beurteilung der aus sicherheitstechnische-geologischer Sicht möglichen Wirtgesteine und Gebiete, 94 p.
- 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.
- Raymond, D., Defontaines, B., Fehri, A., Dorioz, J. M. & Rudant, J. P. 1996. Néotectonique dans la région sud-lémanique (Haute-Savoie, France): approche multisources (imagerie optique et hyperfréquences, analyse morphostructurale). *Eclogae Geologicae Helvetiae* 89(3), 949-973.
- Rieben, C., 1999. Recherche d'eau à 666.6m de profondeur. *Groundwasser*: 7.
- 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., Engelhardt, I. und Kohl, T., 2005. Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Jahresbericht, Bundesamt für Energie.
- 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.
- Signorelli, S., 2007. Statistik Geothermische Nutzung der Schweiz bis Jahre 2006, Office Fédéral de l'Énergie, Bern, In Press
- Signer, 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. 1997. Geology of the central Jura and the Molasse Basin. New insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. *Mém. de la Soc. neuchâtel. Sci. nat.*, 176 p.
- Spicher, A. 1980. Tektonische Karte der Schweiz. Schweiz. Geol. Kommission.
- Stäuble, 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.
- Thierrin, J., 1990. Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse Occidentale). Thèse, Université de Neuchâtel.
- 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. http://www.crege.ch/pdf/Rapport_PGV_screen.pdf

Annexe

Cette annexe présente un inventaire des données de puits utilisées pour créer les modèles géologiques ainsi que les surfaces des aquifères lors de la modélisation thermique et de l'extraction des températures de ces modèles. A ce sujet, les horizons marqueurs sismiques de différents horizons basés sur l'interprétation de profils sismiques dans la Suisse Occidentale ont été fournis par la Commission Suisse de Géophysique (Marillier et al., 2005) et feront prochainement l'objet d'une publication de la Commission plus détaillée. Les modèles et surfaces des horizons sont en majorité basés sur ces données.

Tableau 10: Liste des forages dans le domaine étudié utilisés pour la création des modèles géologiques et les élévations du toit du Cristallin.

Forage	Coord x	Coord y	Altitude [a.s.l]	Top Cristallin [a.s.l]
Treycovagnes 1	536136	180273	473.5	-2270 (pct)
Essavilly	496400	183000	795	-1229
Valempoulières1	481400	186500	653	-737
Humilly 2	490715	108035	499	-2531 (pct)

Tableau 11: Liste des forages dans le domaine étudié utilisés pour la création des modèles géologiques et les élévations du toit du Muschelkalk.

Forage	Coord x	Coord y	Altitude [a.s.l]	Top Muschelkalk [a.s.l]
Chessel	557420	133510	380	221
Courtion1	572410	189420	599	-2271
Essavilly	496400	183000	795	-867
Eternoz	491800	207200	521	-506
Faucigny1	517360	107973	761	-3557
Hermrigen	587790	214900	480	-1527
Laveron	503000	180600	1080	-900
Treycovagnes1	536136	180273	473.5	-2057

Tableau 12: Liste des forages dans le domaine étudié utilisés pour la création des modèles géologiques et les élévation du toit du Malm.

Forage	Coord x	Coord y	Altitude [a.s.l]	Top Malm [a.s.l]
Courtion1	572410	189420	599	-835
Cuarny	543540	180380	562	-158
Eclepens	533220	168380	530	310
Essavilly	496400	183000	795	759
Essertines	539775	173490	660	129
Faucigny1	517360	107973	761	-2107
Hermrigen	587790	214900	480	77
Humily2	490715	108035	499	-313
La Balme 1	520891	102062	446	-918
Laveron	503000	180600	1080	1080
Mont Risoux	500310	161020	1350	116
Morand-Montricher	520025	162180	665	338
Morges	527875	152525	405	-685
Romanens	564200	167400	947	-1995
Ruppoldsried	599450	215600	480	-409
Thônex	505270	117450	428	-1239
Toillon	492100	174000	844	844
Treycovagnes1	536136	180273	473.5	296
Tschugg1	572610	207910	463	-175
Yverdon-F4 Centre Thermal	539670	180290	435	185
Yverdon-F5 Thermal 2	539683	180220	435	247
Yverdon-La Grève 1	540020	181450	430	-170

- No.**
- 27 **G. Fischer, R-A. Schnegg.** Updating the Geomagnetic Survey of Switzerland. - 8 p., 5 figs., 3 tabs., 6 maps, 1994.
- 28 **S. Sellami.** Propriétés physiques des roches des Alpes Suisses et leur utilisation à l'analyse de la réflectivité de la croûte alpine. - 160 p., 58 figs., 16 tabs., 14 p. annexes avec tabs., 1994.
- 29 **E. Rüttener.** Earthquake hazard evaluation for Switzerland. - 106 p., 62 figs., 13 tabs., 29 p. appendix with earthquake catalog, 1995.
- 30 **F..Medici, L. Rybach.** Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density). - 36 p., 11 figs., appendix with 2 tabs. and revised edition of geophysical map nr. 10, 1995.
- 31 **E.Klingelé, M.Cocard, M.Halliday, H.-G.Kahle.** The airborne gravimetric survey of Switzerland. - 104 p., 62 figs., 10 tabs., 1996.
- 32 **P.-A. Schnegg.** The magnetotelluric survey of the Penninic Alps of Valais. - 75 p., 23 figs., 3 tabs., 1998.
- 33 **J.J. Wagner, G. Gong, M. Sartori, St. Jordi.** A catalogue of physical properties of rocks from the Swiss Alps and nearby areas. - . 80 pages, 14 figures, 5 appendices, 2 diskettes, 1999.
- 34 **A. Rosselli, R. Olivier, Ph. Logean, B. Dumont.** Les anomalies gravifiques de la vallée du Rhône entre Villeneuve et Brigue. - 64 pages, 14 figures, 2 tables, 16 cartes, 1999
- 35 **M. Gurk.** On the distribution of the electrical conductivity in the Central Alps. - 121 pages, 55 figures, 14 tables, 2000.
- 36 **U. Schärli, T. Kohl.** Archivierung und Kompilation geothermischer Daten der Schweiz und angrenzender Gebiete. -134 Seiten, 9 Figuren, 5 Tabellen, 2 Karten, 2002.
- 37 **I.G. Hedley, G. Gong, W. Silverio.** A magnetic susceptibility study of some Swiss soils: environmental aspects. - 22 pages, 15 figures, 2002.
- 38 **A. A. Becker.** Deformationsmessungen mit der Bohrlochschliutzsonde im Jura und im Schweizerischen Molassebecken - Messkampagne 1995-1997. - 117 Seiten, 14 Abbildungen, 1 Tabelle, 6 Anhänge, 2003.
- 39 **S. Signorelli, T. Kohl,** Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz; Gebiet des nördlichen Schweizer Mittellandes, 94 Seiten, 40 Abbildungen, 15 Tabbelle, 2006

Bestellen unter www.sgpk.ethz.ch

No.

- 1 **H. Röthlisberger.** Zur seismischen und petrographischen Charakterisierung einiger Molassegesteine, einschliesslich der Beschreibung von Methoden der Korngrössenbestimmungen in Festmaterial. 91 S., 31 Fig., 1957.
- 2 **O. Friedenreich.** Eine grossräumige Widerstandskartierung nordwestlich von Zürich und ihre geologische Deutung. 47 S., 22 Textfig., 9 Karten, 1959.
- 3 **F. Gassmann.** Schweremessungen in der Umgebung von Zürich. - 70 S., 24 Textfig., 2 Tfn., 1962.
- 4 **E. Poldini.** Les Anomalies gravifiques du Canton de Genève. - 63 p., 25 figs., 3 pl., 1963.
- 5 **L. Rybach.** Refraktionsseismische Untersuchungen im Raum Aare-, Limmat- und Surbtal. - 49 S., 42 Fig., 1962.
- 6 **O. Gonet.** Etude Gravimétrique de la plaine du Rhône. Region St-Maurice-Lac Léman. - 52 p. 30 figs., 2 pl., 1965.
- 7 **C. Meyer de Stadelhofen.** Carte des résistivités de la plaine du Rhône. - 8 p., 2 figs., 2 pl., 1966.
- 8 **O. Gonet.** Etude gravimétrique du Lac Léman à bord du mésoscaphe «Auguste Piccard». - 20p., 8 figs., 1 pl., 1969.
- 9 **J.J. Wagner.** Elaboration d'une carte d'anomalie de Bouguer. Etude de la vallée du Rhône de Saint-Maurice à Saxon (Suisse). - 91 p., 32 figs., 2 pl., 1970.
- 10 **G. Lazreg.** Etude géophysique, géologique et hydrogéologique de la région de Concise à Pompaples (Pied du Jura vaudois). - 51 p., 16 figs., 7 pl., 1971.
- 11 **M. Petch.** Contribution à l'étude hydrogéologique de la plaine de l'Orbe. - 95 p., 23 figs., 15 pl., 1970.
- 12 **P.-A. Gilliand.** Etude géoélectrique du Klettgau (Suisse), Canton de Schaffhouse. - 85 p., 47 figs., 10 annexes, 5 pl., 1970.
- 13 **P. Corniche.** Application des méthodes géophysiques à la recherche hydrogéologique -.- 65 p., 25 figs., 1973.
- 14 **F. Heller.** Magnetische und petrographische Eigenschaften der granitischen Gesteine des Albignagebietes (Nördliches Bergeller Massiv). - 66 S., 24 Textfig., 1972.
- 15 **E. Klingelé.** Contribution à l'étude gravimétrique de la Suisse Romande et des régions avoisinantes. - 94 p., 6 figs., 35 pl., 1972.
- 16 **W. Sigrist.** Contribution à l'étude géophysique des fonds du Lac Léman. - 56 p., 28 figs., 1 pl., 1974.
- 17 **R. Olivier.** Elaboration d'un système de traitement gravimétrique géré par l'ordinateur. - 170 p., 81 figs., 4 pl., 1976.
- 18 **H. Buchli, R. Paquin, A. Donzé.** Etude géoélectrique et gravimétrique du Chablais entre Anières et Evian. - -170 pages, 81 figures, 4 planches. 1976.
- 19 **G. Fischer, R.-A. Schnegg J. Sesiano.** A New Geomagnetic Survey of Switzerland. - 44 p., 15 figs, 8 tab., 10 maps, 1979.
- 20 **E. Klingelé R. Olivier.** Die neue Schwerekarte der Schweiz. La nouvelle carte gravimétrique de la Suisse. - 93 S., 9 Textfig., 1 Karte, 1980
- 21 **J.-J. Wagner, St. Mueller.** Geomagnetic and Gravimetric Studies of the Ivrea Zone. - 61 p., 44 figs., 1984.
- 22 **Ph. Bodmer, L. Rybach.** Geothermal Map of Switzerland (Heat Flow Density). - 48 p., 21 figs., 6 tab., 1984.
- 23 **G. Schwarz.** Methodische Entwicklungen zur Aerogammaspektrometrie. - 148 Seiten, 56 Textfig., 17 Tab., 1991.
- 24 **U. Schärli, L. Rybach.** Geothermische Detailkartierung der zentralen Nordschweiz (1:100' 000). - 51 S., 13 Textfig., 3 Tab., 2 Karten, 1991.
- 25 **G. Schwarz, E. Klingelé, L. Rybach.** Airborne radiometric mapping in Switzerland. - 71 p., 12 figs., 17 tabs., 14 maps, 1 overlay transparency (1: 500'000), 1992.
- 26 **K. Risnes, B. Dumont, R. Olivier, J.-J. Wagner.** Etude des anomalies magnétique et gravimétrique de la région du Chasseral. - 42 p., 14 figs., 3 tabs., 1993.

