

Figure 9-15. Présentation des forages pétroliers (points jaunes), des forages géothermiques (points rouges) ainsi que des sources thermales et subthermales (carrés bleus) considérés dans la présente étude.

Crétacé

Comme évoqué précédemment, le Crétacé se situe au sommet de la pile sédimentaire du Mésozoïque. Cette situation a deux conséquences importantes : le faible enfouissement de la formation induit une température trop faible pour une utilisation géothermique sans recours à une pompe à chaleur et d'autre part, les grès sidérolithiques peuvent boucher les karsts ainsi que les fissures ouvertes, rendant la formation peu perméable comme c'était le cas dans le forage de Thônex. L'ensemble de la formation peut cependant être considéré comme potentiellement aquifère, à l'exception des marnes d'Hauterive situées en son milieu.

Dans le forage d'Humilly-2, le Crétacé inférieur (Urgonien) a été rencontré à partir de 430 m de profondeur. Il était saturé en eau peu minéralisée (salinité de $1.2 \text{ g}\cdot\text{l}^{-1}$) mais aucun test de pompage n'ayant été effectué, le débit de production reste inconnu.

Les sources subthermales de la Caille, celles de Bourbonge ainsi que celles des Bains de Bromines ont leur exutoire dans le Crétacé comme d'ailleurs un certain nombre de sources karstiques des environs. Il faut également signaler que l'aquifère du Crétacé est exploité par l'établissement thermal de Divonne-les-Bains qui extrait $25 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ d'eau à 14.4 °C grâce à deux forages d'un peu plus de 100 m de profondeur.

Deux sources karstiques froides sont inventoriées au nord du Salève, il s'agit de celle du Pont de Dingy qui laisse sortir une eau à 9 °C avec un débit compris entre 0.5 et $300 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (ordre de grandeur) et de celle de Fringles avec une eau à 6.6 °C et un débit compris entre 10 et $100 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ (ordre de grandeur) (Charollais, 1988).

Malm supérieur

Le Malm constitue l'aquifère le plus important du Bassin en termes de volume : composé des calcaires du Portlandien, du Kimméridgien et de l'Oxfordien moyen son épaisseur dépasse 400 m. Il est compris entre les aquicludes du Purbeckien (toit) et de l'Argovien (mur). Cette formation constitue la majeure partie des crêtes de la Haute-Chaîne et, de ce fait, elle bénéficie d'une excellente recharge. Elle est aussi intensément karstifiée comme les nombreux gouffres et pertes observables dans tout le Jura l'attestent. Citons un exemple extrême : au nord de Seyssel, le réseau karstique est recoupé par les galeries d'exploitation de la mine d'Orbagnoux où une seule venue d'eau débite entre 70 et 1'750 l·s⁻¹. Des essais de traçage ont montré que cette eau s'infiltré à proximité d'accidents décrochants qui lui ont permis de traverser l'aquiclude de l'Oxfordien ainsi que deux anticlinaux.

Le forage d'exploration géothermique THX-1 à Thônex dans le canton de Genève a été réalisé en 1993. Il a été dévié à partir de la profondeur de 700 m avec un angle de 25° et a atteint la profondeur verticale de 2530 m, pour une longueur forée de 2690 m. Le forage THX-1 a traversé la Molasse tertiaire, les unités du Crétacé et du Jurassique supérieur (Jenny et al., 1995).

Les deux cibles géothermiques visées étaient les calcaires urgoniens du Crétacé inférieur et les calcaires récifaux du Jurassique supérieur. Pour obtenir des débits de production économiquement intéressants, il fallait rencontrer des formations karstiques et/ou fracturées. Malheureusement, après l'acidification de la première cible (Crétacé), la productivité du puits est restée très faible et le forage a repris. Dans les formations de la deuxième cible (Jurassique), trois niveaux dans le Malm ont été détectés en cours de forage et par les diagraphies, mais les résultats des tests de production successifs réalisés après des stimulations massives à l'acide HCl se sont montrés décevants avec un débit de production par air-lift de 3 l·s⁻¹ à la température de 39 °C. Le fluide produit par la formation du Malm est de type chloruré sodique (Na-Cl) mais montre une minéralisation relativement faible (IDS 1.5 g·l⁻¹), alors que son temps de résidence souterrain est élevé ($\geq 10'000$ ans) (Vuataz & Giroud, 2010).

Dans le forage d'Humilly-2, l'aquifère du Malm supérieur a été rencontré dès 846 m de profondeur. Un test de production a été effectué sur le Kimméridgien à 1'137 m de profondeur, mais il n'a livré qu'un débit très faible (< 1 l·s⁻¹) d'eau peu minéralisée (< 1 g·l⁻¹) à la température de 38 °C.

Régionalement, le Malm est une ressource géothermique : dans la zone d'Aix-les-Bains, l'aquifère du Malm est en effet un exutoire naturel connu depuis longtemps ainsi que, dans une moindre mesure, celui du Crétacé grâce à une faille. Ces aquifères sont actuellement exploités par deux forages profonds : Reine-Hortense d'une profondeur de 1'104 m où le fluide est pompé avec un débit compris entre 16 et 22 l·s⁻¹ à la température de 39 °C, ainsi que le forage Chevalley (Figure 9-15 pour la localisation) d'une profondeur de 2'166 m, où le fluide est pompé avec un débit compris entre 14 et 20 l·s⁻¹ à la température de 72 °C (Muralt, 1999).

Dogger

Moins connu que le Malm en région genevoise, le Dogger peut fournir un aquifère géothermique potentiel intéressant en raison de son enfouissement plus profond. L'épaisseur totale de cet aquifère mesure environ 300 m. Il est compris entre les aquicludes de l'Argovien (toit) et de l'Aalénien (mur).

Sa composition plus marneuse le rend moins sensible à la karstification et plus ductile (pâteux) ce qui a pour conséquence que les fractures ouvertes devraient être moins nombreuses que dans le Malm.

L'aquifère du Dogger dans le forage d'Humilly-2 est situé entre 1'855 et 2'088 m de profondeur, mais aucun test de production n'a été effectué à ce niveau. Cette formation aquifère est bien connue dans le Jura, où elle est utilisée pour les besoins en eau potable. Par exemple, la source de Quarts située à l'ouest de Bellegarde sort des calcaires bathoniens avec un débit d'étiage de 0.3 l·s⁻¹. Dans la région de l'étude, le Dogger affleure peu, mais il devrait malgré tout bénéficier d'une bonne recharge car les accidents décrochants sont nombreux dans la région, ce qui permettrait aux fluides de traverser les aquicludes.

Un certain nombre de forages pétroliers (Figure 9-15) ont recoupé le Dogger. Aux forages de Chaleyriat et de Châtillon, la majorité de la boue de forage a été perdue ce qui laisse présager d'une forte perméabilité.

Dans les forages Savoie 106 (1953) et Savoie 107 (1954), cette formation a été testée à plusieurs reprises pendant un cours laps de temps : elle a produit entre 0.1 et 0.5 l·s⁻¹ d'une eau relativement minéralisée (9 à 40 g·l⁻¹ d'équivalents NaCl).

Lias inférieur

Bien que la série carbonatée du Lias soit beaucoup plus importante dans le forage d'Humilly-2 que dans le Jura, il est peu vraisemblable que cette formation soit un aquifère intéressant d'un point de vue géothermique. En effet, même si sa position dans la pile stratigraphique fait qu'elle atteint des températures intéressantes, les calcaires qui la composent sont relativement argileux et, de ce fait la karstification et la fissuration doivent être très limitées.

Muschelkalk

Le Muschelkalk n'affleure pas dans la région. Il est bien connu dans l'est du Jura et a été rencontré dans le forage d'Humilly-2. Le Muschelkalk supérieur y mesure 130 m d'épaisseur et se situe à près de 3'000 m de profondeur. La formation est saturée en eau à plus de 100 °C, mais le test de production effectué a montré une faible perméabilité. Le Muschelkalk se compose de dolomies, de grès et d'argiles : il est limité à son sommet par des couches évaporitiques, ce qui explique que les fluides rencontrés sont généralement fortement minéralisés. A sa base se trouvent les grès du Buntsandstein qui montrent un bon indice de fracturation dans le forage d'Humilly-2. Dans cette étude, les formations du Muschelkalk, de la Lettenkohle et du Buntsandstein sont réunies sous l'appellation de Muschelkalk.

Le Muschelkalk supérieur a été rencontré dans les forages de Riehen (BS), Reinach (BL) et Schinznach Bad (AG) (localisation sur la figure 9-8). A Riehen, le débit de production atteint les 20 l·s⁻¹ et est utilisé pour un réseau de chauffage urbain (température de 65 °C et salinité de 18 g·l⁻¹). Un débit de production de 8.3 l·s⁻¹ à Schinznach Bad permet d'alimenter le centre thermal et d'en chauffer les bâtiments (44 °C et 2.2 g·l⁻¹). A Reinach par contre le débit de 0.1 l·s⁻¹ n'a permis aucune exploitation (72 °C et 46 g·l⁻¹).

Il faut encore signaler que le Buntsandstein a été reconnu comme une formation aquifère fortement fissurée dans trois forages pétroliers (Chaleyriat, La Chandelière et Charmont) avec un débit pouvant atteindre 2 l·s⁻¹.

Conditions géothermiques

Puissance théorique des installations

La puissance thermique théorique maximale d'un forage géothermique peut être calculée en suivant les recommandations de l'OFEN (1992), au moyen de la formule de Gringarten (1978) :

$$Q_{\text{géo}} = \rho C_p \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } W_{\text{th}}$$

avec :

- ρ la masse volumique du fluide en kg·m⁻³
- C_p la chaleur spécifique en J·kg⁻¹·°C⁻¹
- D le débit en m³·s⁻¹
- ΔT la différence entre la température de production et celle de réinjection en °C

Le fluide géothermique étant de l'eau, ρC_p vaut donc $4.186 \cdot 10^6$. En utilisant l'unité de débit $l \cdot s^{-1}$, pour obtenir une puissance théorique en MW_{th} , ce nombre doit être multiplié par 10^{-9} , ce qui donne la formule la suivante :

$$Q_{géo} = 4.186 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot \Delta T \text{ en } MW_{th}$$

La puissance théorique dépend donc uniquement du débit et du différentiel de température et donc, si l'une de ces deux variables est fixe, la puissance théorique est proportionnelle à la deuxième.

Température

Comme cela est mentionné ci-dessus, la puissance d'une installation géothermique dépend principalement de deux facteurs : le débit et la différence entre la température du fluide produit et celle du fluide réinjecté. Cette différence va dépendre de plusieurs facteurs, parmi lesquels la température de la ressource et le mode d'utilisation du fluide ont évidemment une influence prépondérante.

La température de la ressource dépend principalement de la profondeur de la roche réservoir et de la vitesse du fluide dans l'aquifère comme dans le forage. En effet, la roche va chauffer le fluide jusqu'à l'équilibre thermique. Dans le cas de roches fortement karstifiées, les vitesses d'écoulement ne permettent pas cet équilibre et la température de la ressource sera donc inférieure à celle du massif régional. Les forages effectués dans la région de l'arc jurassien et du plateau suisse montrent qu'en règle générale, lorsque les débits sont élevés (phénomènes karstiques), la température de la ressource est sensiblement plus basse que celle attendue pour une profondeur donnée (Tableau 9-8 et Figure 9-16).

Tableau 9-8. Caractéristiques d'une sélection de forages dans la région de l'arc jurassien (Suisse et France). Données BDFGeotherm (www.crege.ch) sauf forage de Bevaix et Aix-les Bains (Muralt, 1999).

Nom	Canton / Pays	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Profondeur (m)	Aquifère
Aix-les-Bains Source Alun R.-Hortense Chevalley	Savoie, France	40 – 44 39 72	25 16 – 22 14 – 20	5 1104 2166	Malm
Bevaix	NE	9 – 15	75	300	Malm
Courtemaîche	JU	25	7.9	257	Malm
Delémont S1 S2 S3	JU	22	28 15 28	356 352 352	Malm
Hermrigen F1	BE	50	2.8	1300	Dogger
Itingen	BL	22	4.8	246	Muschelkalk
Moiry	VD	18	6	370	Malm
Muriaux FM1 FM2	JU	13	12 5	498 500	Dogger
Reinach	BS	80	0.1	1793	Muschelkalk
Riehen	BS	65	20	1247	Muschelkalk
Schinznach Bad S2 S3A1 S3A2	AG	50 55 65	6.8 8.3 0.75	692 744 944	Muschelkalk
Sonvillier SON1 SON2	JU	20 15	22.5 18.3	445 330	Malm
St-Aubin SA1 SA2 SA3	NE	11 13 12	31 20 20	313 380 315	Malm
Tavannes	BE	14	27.5	315	Malm
Thônex THX-1	GE	70	3.1	1998	Malm
Yverdon-les-Bains La Grève F4 F5 (200) F5 (400) F5 (784) F5 (1117)	VD	30 – 35 35 – 40 25 30 – 35 40 – 45 40 – 60	15.3 28 83 42 1.8 2.5	682 455 200 400 784 1117	Malm Dogger

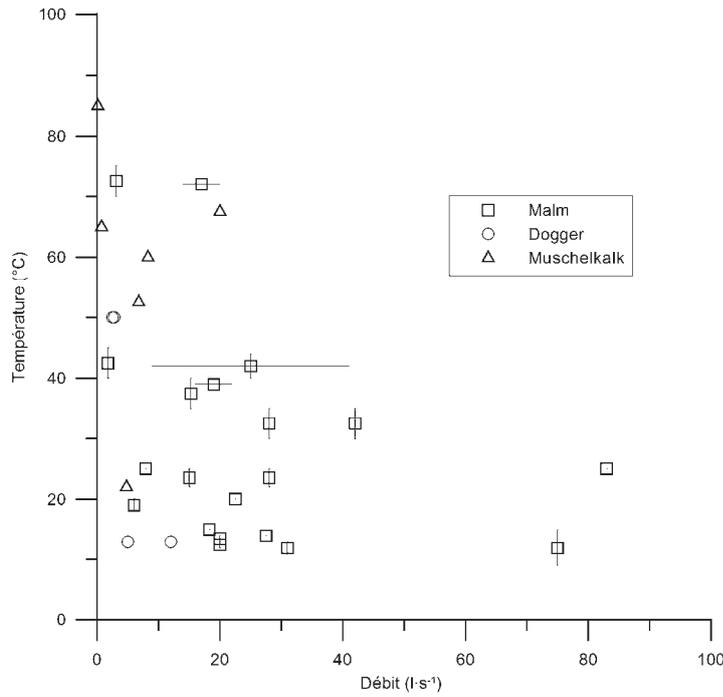


Figure 9-16. Relation entre la température et le débit dans différents forages de la région de l’arc jurassien. Les données utilisées proviennent du Tableau 9-8.

Dans cette étude du potentiel des APR et en l’absence de données suffisantes, seuls la profondeur et un gradient géothermique moyen de 32 °C/km ont été pris en compte pour estimer la température de la ressource dans le canton de Genève. La valeur du gradient géothermique a été déterminée grâce aux forages régionaux pour lesquels des informations de température étaient disponibles (Figure 9-17).

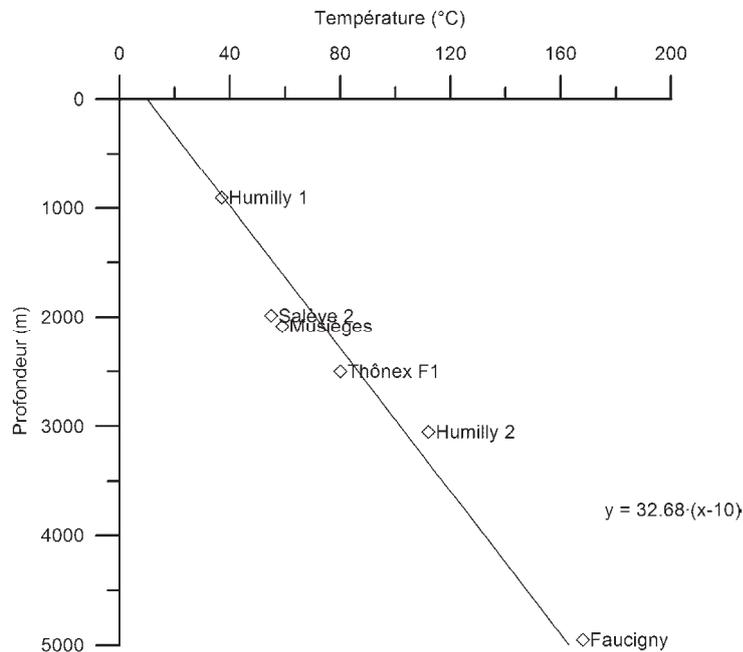


Figure 9-17. Détermination du gradient géothermique régional à l’aide des données de température disponibles dans une sélection de forages. Le gradient a été calculé avec une corrélation linéaire des données et une température annuelle moyenne en surface de 10 °C (données PGV, 2003).

Débit

Les débits attendus dépendent du faciès de la roche réservoir. Dans les cas qui nous intéressent ici, plus la composante marneuse (imperméable) est importante, plus les débits seront faibles. Pour l'estimation des débits, il faut également tenir compte de la profondeur. En effet, il a été constaté qu'en général, plus un forage est profond, moins les débits sont importants, en raison d'une diminution de la karstification dans les calcaires et de la plus faible densité des fractures ouvertes (Figure 9-18).

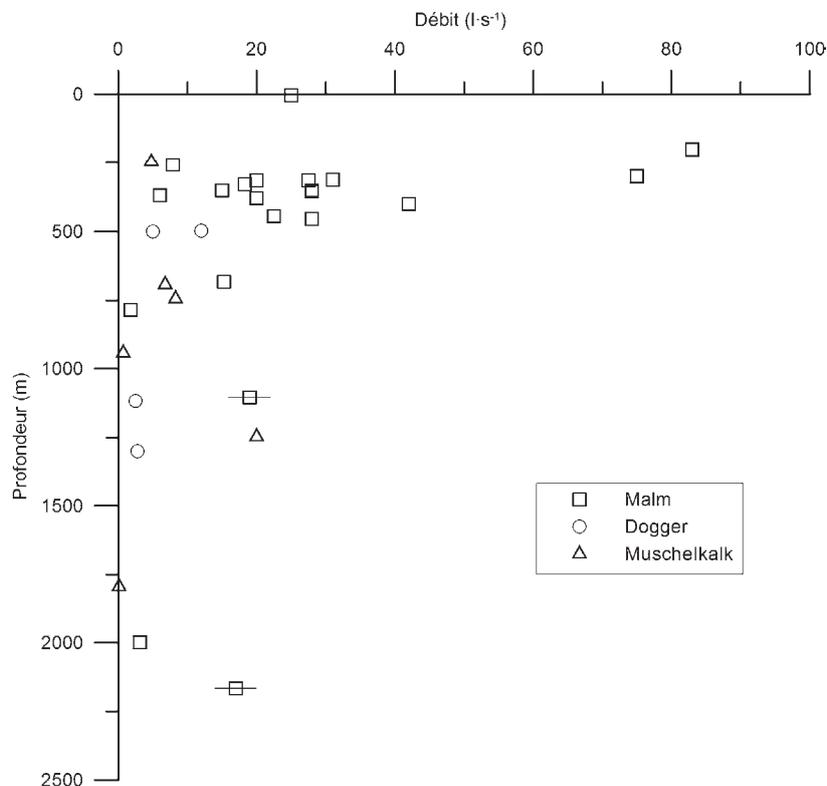


Figure 9-18. Variation du débit en fonction de la profondeur pour les différents forages de l'arc jurassien (données du Tableau 9-8).

Un autre facteur important pour la détermination des débits est l'état de fracturation de la roche. En effet, une roche dure (par ex. calcaire) fortement tectonisée aura une perméabilité nettement plus importante et par conséquent, les débits seront vraisemblablement plus élevés. Les domaines de débit pour chaque aquifère potentiel ont été choisis selon plusieurs critères semi-quantitatifs tels que les faciès sédimentologiques, l'état de fissuration et de karstification, ainsi que les données de débit des forages de l'Arc jurassien. Ces débits sont présentés dans le tableau 9-9.

Tableau 9-9. Débits attendus dans les différents aquifères profonds du canton de Genève.

Débit (l·s ⁻¹)	Crétacé	Malm	Dogger	Muschelkalk
Roche massive	10 – 15	15 – 20	10 – 15	10 – 15
Roche tectonisée	15 – 30	20 – 40	15 – 30	15 – 20

On distingue deux modes d'utilisation thermique du fluide : l'usage direct ou l'usage indirect au moyen d'une pompe à chaleur. Pour l'utilisation directe, la chaleur du fluide est uniquement transférée par un échangeur de chaleur au fluide de chauffage, dont l'énergie sera, si possible, utilisée en cascade jusqu'à une température de l'ordre de 20 °C.

Avec une pompe à chaleur, la température du fluide sera élevée par cette dernière avant de servir dans l'installation de chauffage. Cette technique a l'avantage de permettre l'usage de fluides géothermiques dont la température est trop basse pour un usage direct, mais évidemment elle a un coût énergétique plus élevé. Par contre, l'utilisation d'une pompe à chaleur permet d'abaisser la température du fluide géothermique à 10 °C environ, ce qui représente un gain par rapport à l'usage thermique direct des fluides.

9.5 Résultats

9.5.1 Structures géologiques profondes du Bassin genevois

Les structures du Bassin genevois ont été établies principalement grâce à deux types de données : les données géologiques et les données géophysiques. Pour les données géologiques, il s'agit principalement d'articles, de thèses et de cartes géologiques suisses et françaises. Ces données ont permis de déterminer les différentes lithologies, leur comportement en profondeur ainsi que leur structure, là où les coupes sont proches d'affleurements.

Les données du deuxième type sont les données géophysiques : il s'agit essentiellement de données sismiques issues d'une thèse de doctorat en cours (S. Paolacci, communic. orale ; G. Gorin, communic. écrite), ainsi que des lignes sismiques établies lors des campagnes de 1987 et 1990 et interprétée par G. Gorin (Gorin, 1989, 1992 ; Gorin et al., 1993 ; Signer & Gorin 1995). En ce qui concerne les données de ce travail de thèse, il s'agit de cinq horizons sismiques fournis sous forme de cartes à l'échelle du Bassin sur lesquelles la profondeur est exprimée en temps, ainsi que des cartes des vitesses dans les différentes couches.

La première étape a consisté à digitaliser ces cartes, ce qui a induit un lissage des structures. En effet, l'établissement d'une carte passe par l'interpolation de différentes données dont les dissemblances vont être réduites grâce à plusieurs méthodes mathématiques. Par conséquent la réalisation d'une carte en digitalisant une autre carte fait passer les données de base deux fois par cette interpolation et provoque donc un lissage plus important des structures.

Les cinq horizons sismiques sont :

- La base du Tertiaire.
- Le sommet Dogger.
- La base du Dogger.
- Le sommet du Muschelkalk.
- Un horizon considéré comme la limite entre le Permo-Carbonifère et le socle cristallin.

Il a alors fallu convertir le temps en profondeur à l'aide des cartes de vitesse. Le principe est relativement simple : si la vitesse d'une onde dans une formation ainsi que son temps de parcours sont connus, il est possible d'obtenir la profondeur. En réalité, les couches géologiques n'étant pas homogènes, le résultat est moins précis. De plus, la densité de données est relativement faible, et par conséquent, les profondeurs présentées doivent être utilisées avec précaution. Quant aux puissances géothermiques, elles seront considérées comme des ordres de grandeur et des tendances plus que comme des valeurs réelles. Il est également évident que cette incertitude augmente avec la profondeur.

Etant donné qu'une seule vitesse moyenne est utilisée pour l'ensemble des couches entre deux horizons, il n'est pas possible dans le cadre de cette étude de traiter correctement l'épaississement local des évaporites du Trias. Par conséquent, la profondeur du Muschelkalk et des couches plus profondes est, selon toute vraisemblance, exagérée.

Coupes géologiques

L'ensemble de ces données ont permis de réaliser cinq coupes géologiques à travers le Bassin genevois (Figure 9-19 et en annexe), quatre transversales (coupe 1 à 4) et une longitudinale (coupe 5). Les données sismiques n'ont été utilisées que pour la partie des coupes se trouvant dans le Bassin genevois (Figure 9-19, partie contenue à l'intérieur de la ligne discontinue grise).

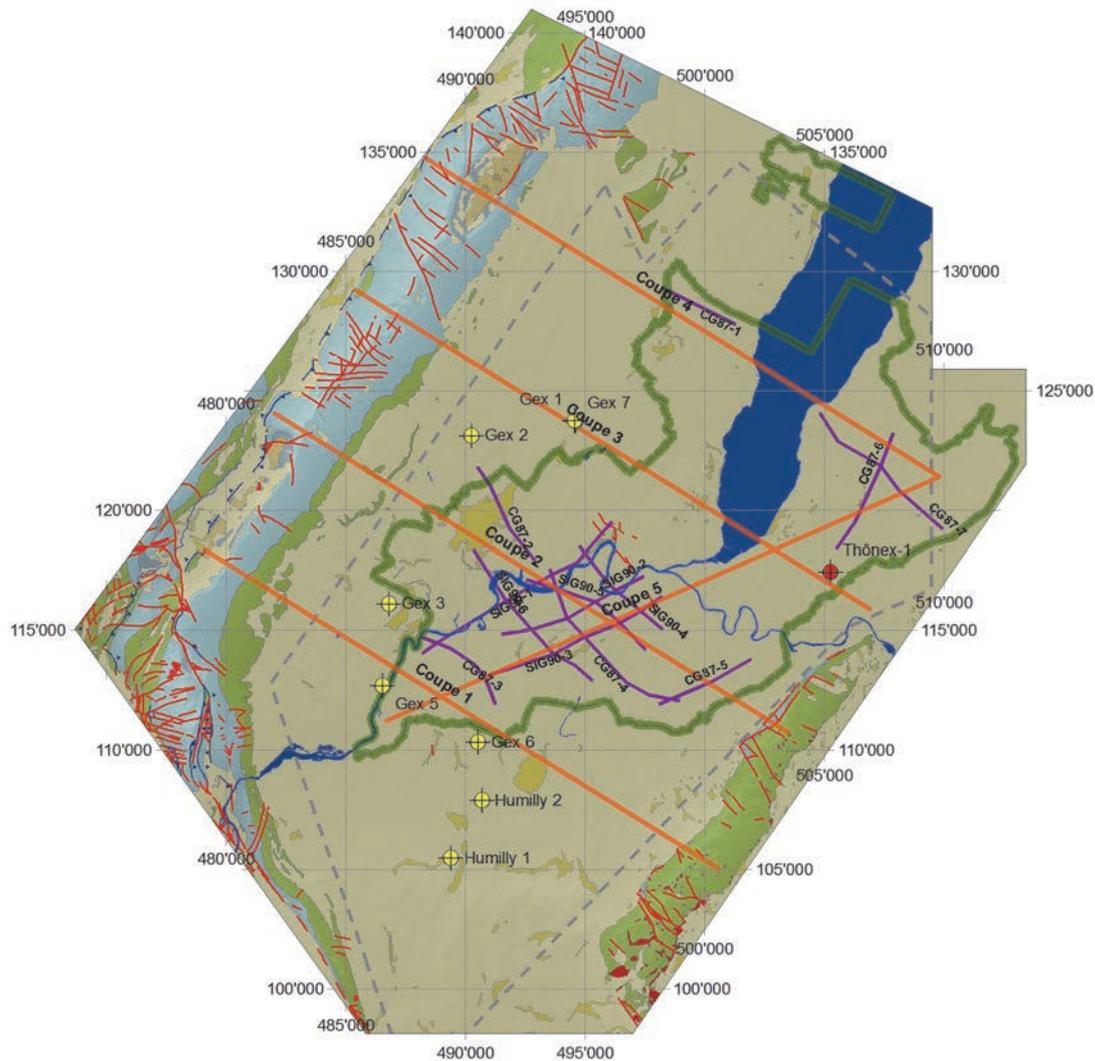


Figure 9-19. Implantation des coupes géologiques (traits orange). Le fond de carte représente la carte géologique et les couleurs des formations correspondent à celles de la figure 9-11. Les lignes rouges représentent les failles répertoriées et les lignes bleues les principaux chevauchements (d'après cartes BRGM 628, 629, 653, 654, 677 et 678). La ligne discontinue grise donne les limites de la partie « Bassin sédimentaire » à l'intérieur de laquelle les données sismiques ont été utilisées. Traits violets : lignes sismiques. Points jaunes : forages pétroliers. Point rouge : forage de Thônex.

Sur les figure 9-20 et figure 9-21 ainsi que dans les annexes, les isothermes en lignes discontinues permettent d'approcher la température des formations potentiellement aquifères. Ces isothermes ont été calculés en utilisant le gradient de 32 °C/km calculé précédemment (Figure 9-17) mais ils n'ont été appliqués que dans la partie « Bassin sédimentaire » de la région afin de tenir compte de l'effet du karst. En effet, la vitesse d'écoulement dans les massifs karstiques pouvant être très élevée, cela induit généralement un drainage du flux géothermique. De plus, avec des vitesses de circulation élevées, les fluides profonds peuvent être plus froids que la roche encaissante, car ils n'ont pas eu le temps de se réchauffer.

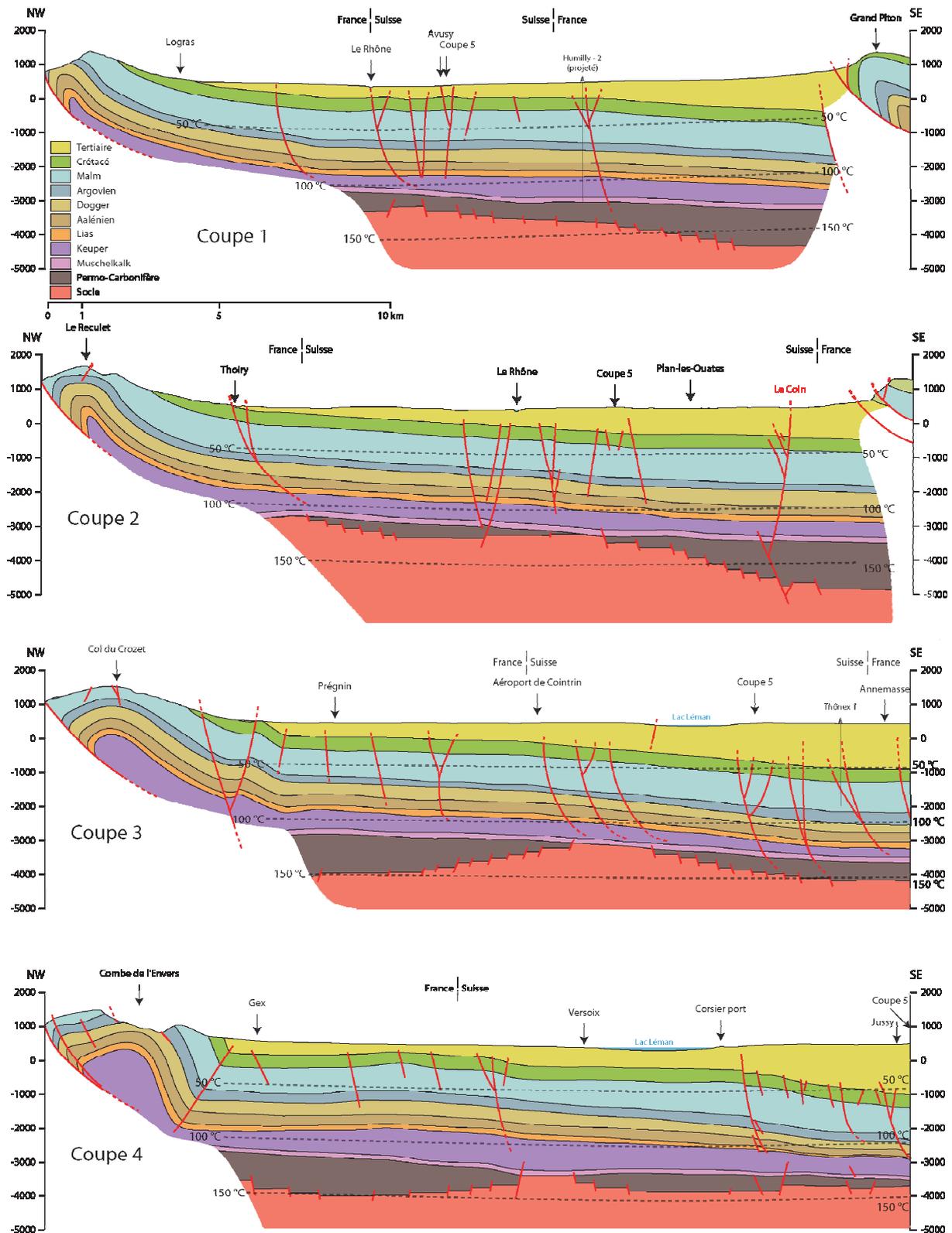


Figure 9-20. Coupes géologiques n° 1 à 4 transversales aux structures du Bassin genevois. Ces coupes sont reproduites à plus grande échelle dans l'Annexe (volume 2 – chap 9). Coupe n°2 d'après Burri (1981), Amberger (1982), Signer & Gorin (1995), Charollais (2007), Meyer (2000) modifié. L'axe vertical est une altitude en m/mer.

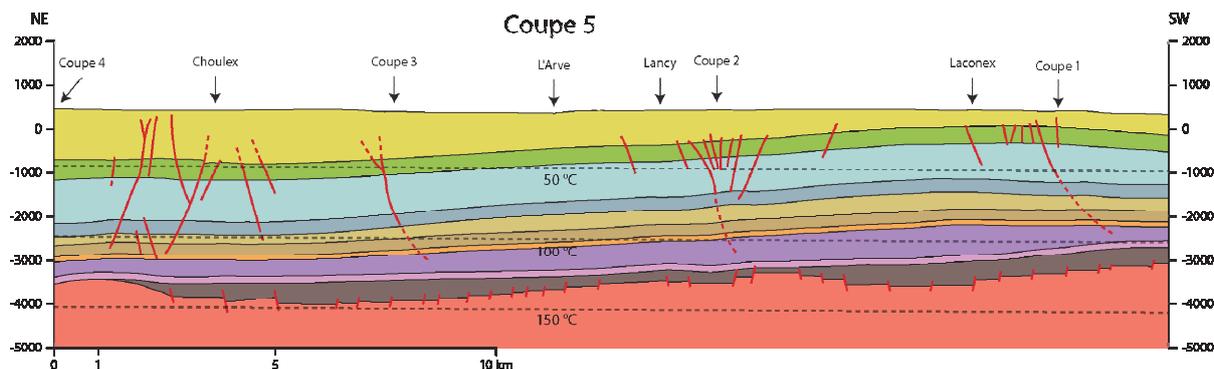


Figure 9-21. Coupe géologique n° 5 longitudinale aux structures du Bassin genevois. Cette coupe est reproduite à plus grande échelle en annexe (volume 2 – chap. 9). L'axe vertical est une altitude en m/mer.

La structure générale est celle d'une rampe sur laquelle s'est formé un anticlinal, la Haute-Chaîne du Jura. Au pied de cette dernière, les couches géologiques vont plonger sous la Molasse avec un pendage faible. La profondeur des couches et, par conséquent, leur température vont donc augmenter en direction du sud-est.

Autres résultats

En plus des résultats directement liés à la présente étude, les données sismiques ont permis d'établir une carte des zones où il y a, selon toute vraisemblance, un épaissement du Trias (Figure 9-22).

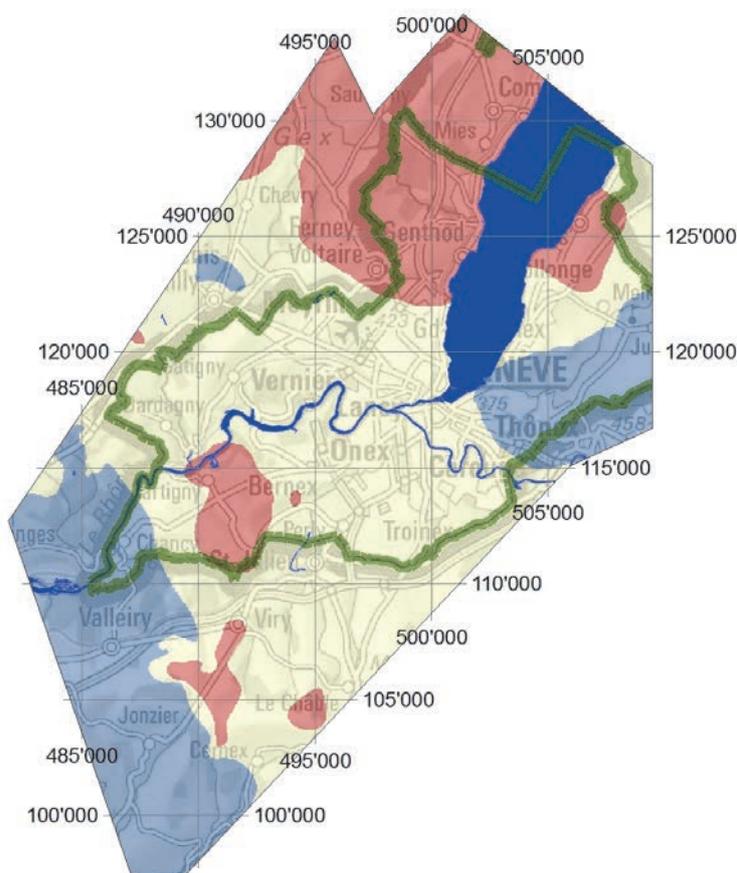


Figure 9-22. Variation d'épaisseur du Keuper. En raison de l'incertitude liée à la méthode de conversion du temps en profondeur, la carte est présentée sans valeurs quantitatives d'épaissement et à titre indicatif. Légende : épaissement marqué (en rouge), épaissement probable mais peu marqué (en beige) et épaisseur standard (en bleu).

Ces mêmes données nous ont également permis d'établir une carte sur laquelle sont représentés les demi-grabens permo-carbonifères supposés (Figure 9-23). Il est aisé de reconnaître ces structures typiques sur les coupes transversales (Figure 9-20 et Annexes - volume 2 – chap. 9).

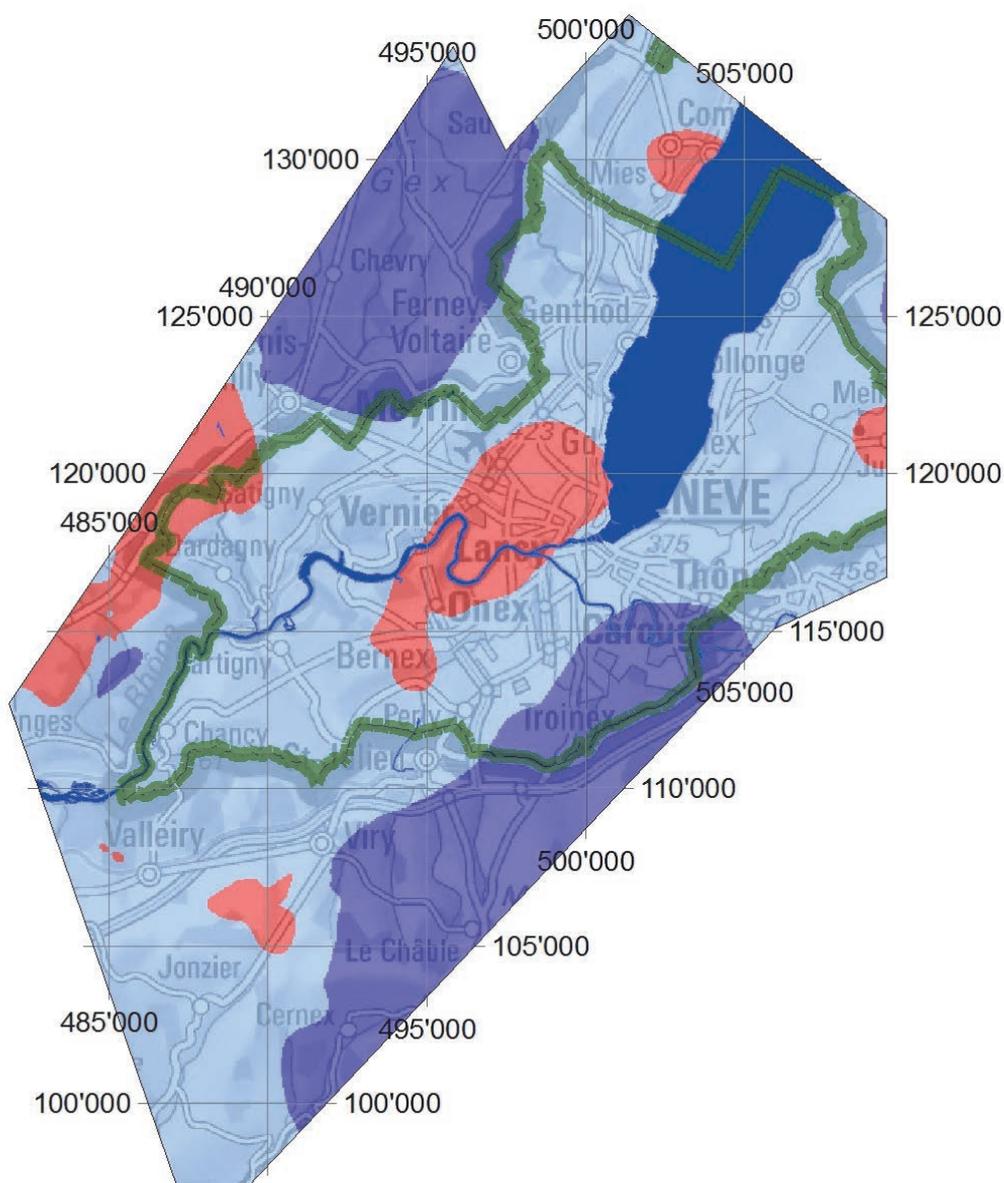


Figure 9-23. Cartographie des demi-grabens permo-carbonifères du Bassin genevois. En raison de l'incertitude liée à la méthode de conversion du temps en profondeur, la carte est présentée sans valeurs quantitatives de profondeur et à titre indicatif. Légende : zone sans graben permo-carbonifère, c'est-à-dire des horsts (en rouge), graben permo-carbonifère (en bleu foncé) et zone d'approfondissement des grabens (en bleu clair).

9.5.2 Potentiel géothermique des aquifères profonds

Afin de pouvoir comparer les potentiels géothermiques obtenus entre les aquifères, les mêmes critères ont été appliqués pour tous les aquifères potentiels. Le premier critère est celui de la température de réinjection : elle a été fixée à 30 °C, ce qui correspondrait à une utilisation optimale en cascade de la ressource géothermique sans pompe à chaleur.

Ce premier critère nécessite le choix de la température minimum dans l'aquifère. Nous avons en effet considéré qu'en dessous d'une différence de 10 °C entre la température du fluide pompé et celle du fluide réinjecté, aucune installation ne pourrait être envisagée. A nouveau ce critère exclut le recours aux pompes à chaleur qui permettent d'abaisser davantage la température du fluide. Le potentiel a été calculé au milieu de la hauteur de l'aquifère à l'exception de celui du Malm, où, il a été calculé à son sommet et à sa base en raison de sa très forte épaisseur.

Comme cela a été évoqué précédemment, les zones de failles favorisent certainement les écoulements des fluides et il en est tenu compte dans le calcul du potentiel. Dans ce but, des zones de failles ont été déterminées dans lesquelles un forage peut atteindre des cibles intensément fracturées et donc bénéficier d'un débit plus important (Figure 9-24).

Le potentiel exprimé sur les différentes cartes représente par conséquent une puissance moyenne potentielle pour un doublet dans l'aquifère concerné. Cette puissance pouvant varier fortement, des tableaux donnant des valeurs moyennes pour chaque aquifère sont présentés ci-dessous (Tableau 9-10 à tableau 9-13).

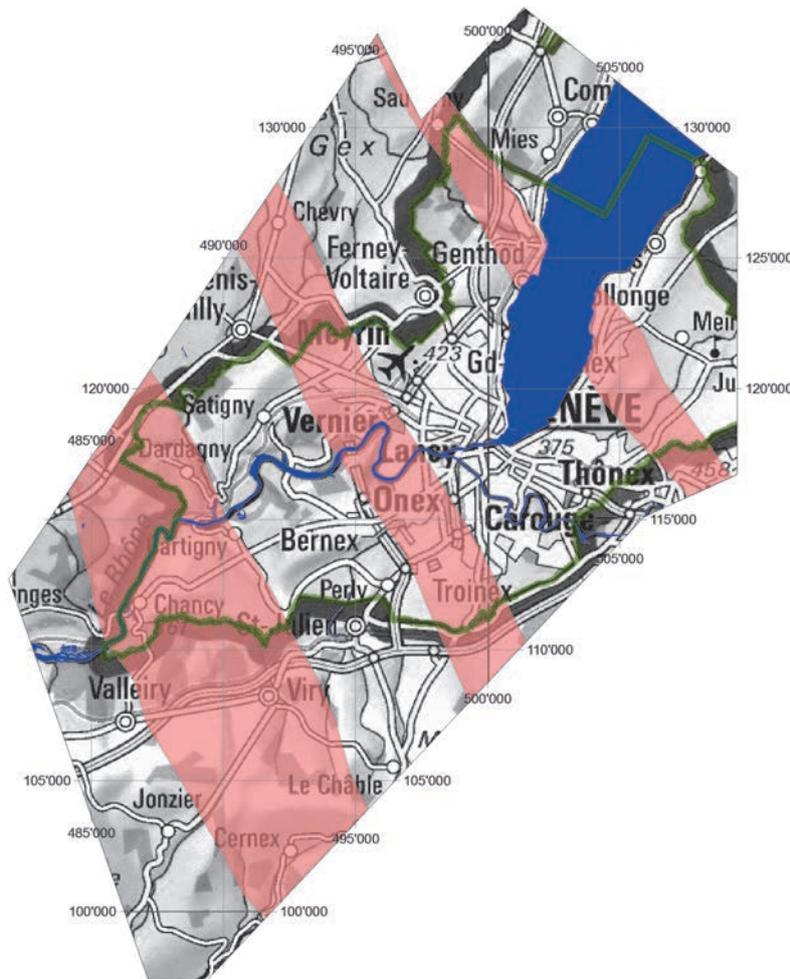


Figure 9-24. Localisation des zones de failles dans lesquelles un forage peut atteindre des cibles intensément fracturées.

Crétacé

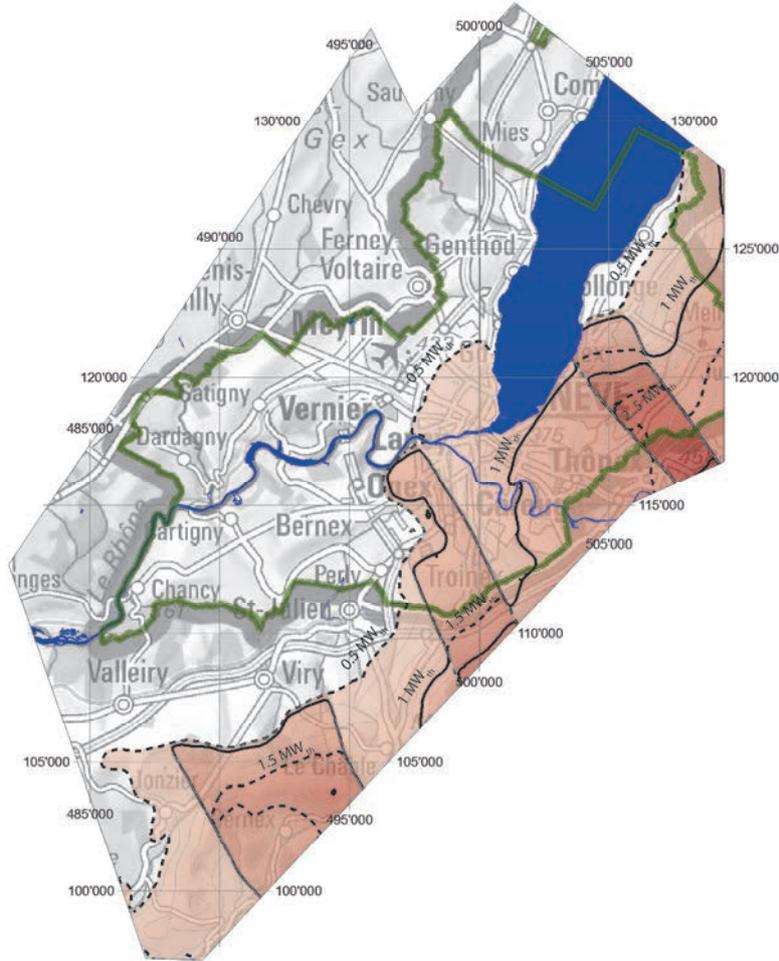


Figure 9-25. Puissance théorique pour un doublet dans le Crétacé. Les températures en dessous de 40 °C n'ont pas été considérées.

Tableau 9-10. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Crétacé en fonction du débit et de la température. La température de 40 °C est la valeur minimale considérée. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	15 (40) - 63	10 – 15	0.4 – 2.1
Roche tectonisée		15 – 30	0.6 – 4.1

Malm

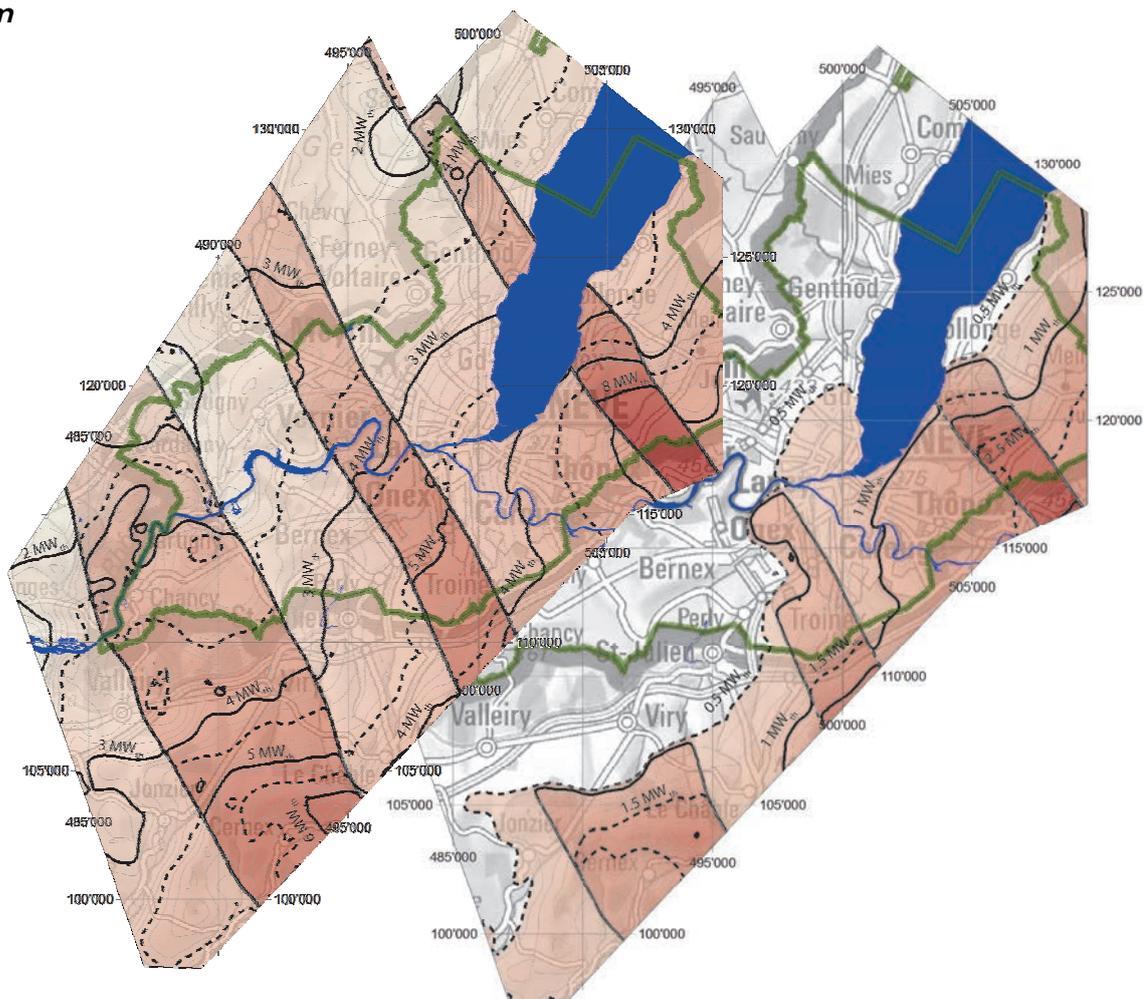


Figure 9-26. Puissance théorique pour un doublet au sommet de l'aquifère du Malm (à droite) et à sa base (à gauche). Les températures en dessous de 40 °C n'ont pas été considérées.

Tableau 9-11. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Malm en fonction du débit et de la température. La température de 40 °C est la valeur minimale considérée. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

		Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
sommet	Roche massive	20 (40) – 69	15 – 20	0.6 – 3.3
	Roche tectonisée		20 – 40	0.8 – 6.5
base	Roche massive	49 – 102	15 – 20	1.2 – 6
	Roche tectonisée		20 – 40	1.6 – 12.0

Dogger

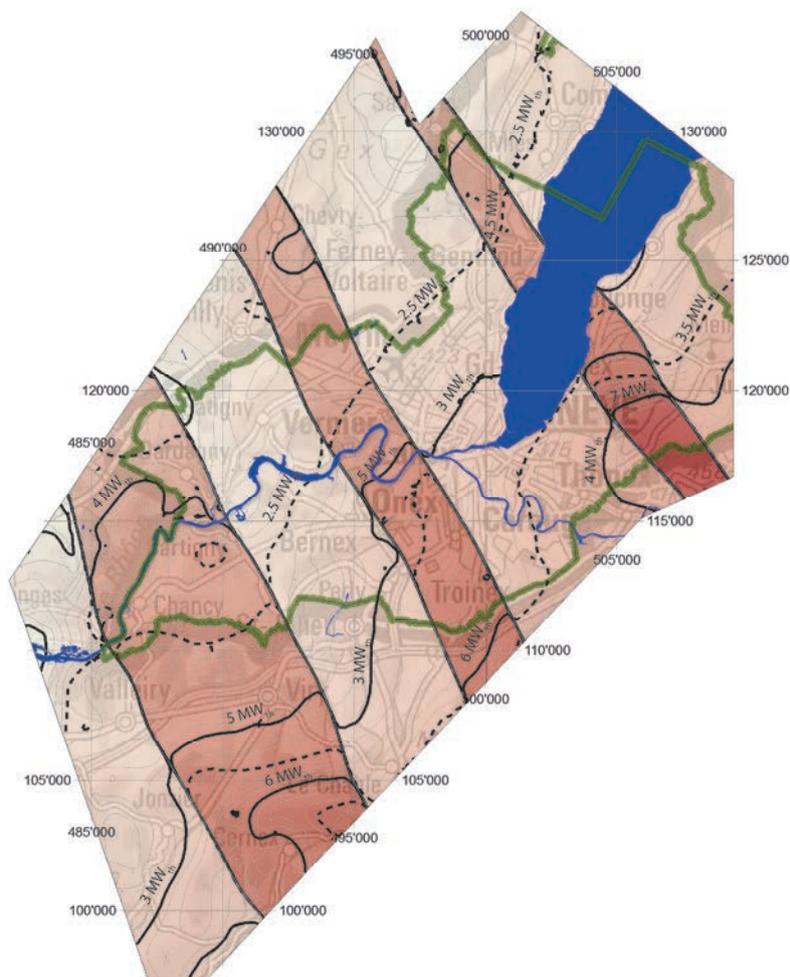


Figure 9-27. Puissance théorique pour un doublet dans le Dogger.

Tableau 9-12. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Dogger en fonction du débit et de la température. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	63 – 112	10 – 15	1.4 – 5.1
Roche tectonisée		15 – 30	2.1 – 10.3

Muschelkalk

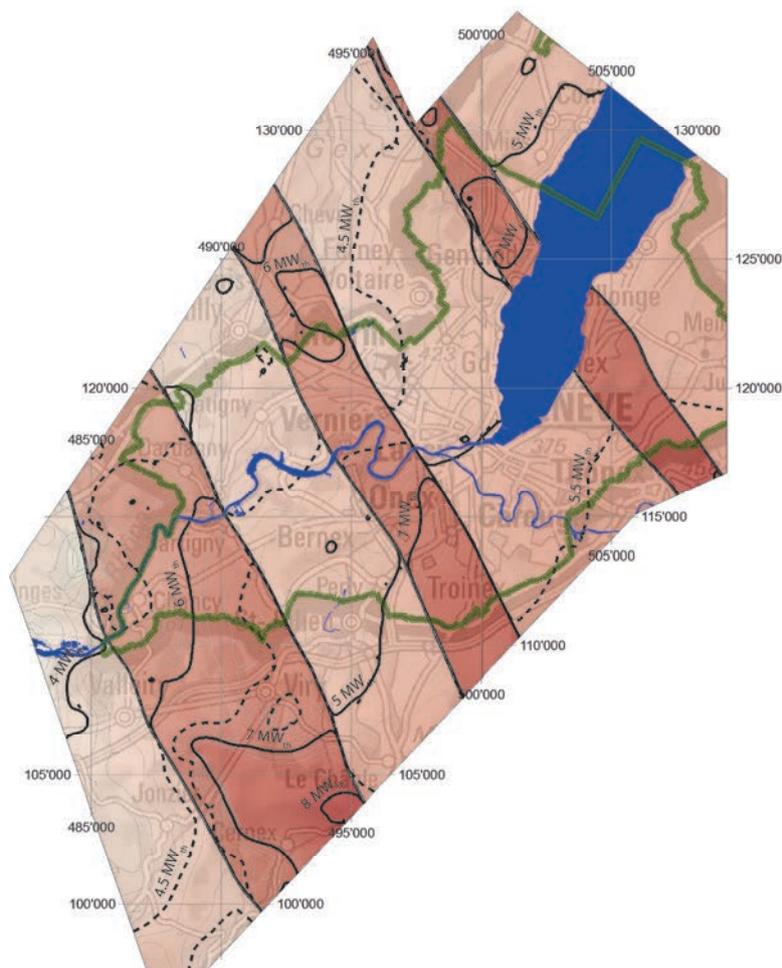


Figure 9-28. Puissance théorique pour un doublet dans le Muschelkalk.

Tableau 9-13. Caractéristiques et puissance potentielle théorique par doublet dans le Muschelkalk en fonction du débit et de la température. La puissance a été calculée au moyen de la formule de Gringarten (1978) en utilisant les données de température et de débit ci-dessous.

	Température (°C)	Débit (l·s ⁻¹)	Puissance (MW _{th})
Roche massive	93 – 141	10 – 15	2.6 – 7.0
Roche tectonisée		15 – 30	4.0 – 9.3

9.5.3 Synthèse des résultats

La structure générale du Bassin genevois implique un approfondissement des formations géologiques et donc des aquifères potentiels profonds en direction du sud-est. Cet approfondissement se traduit par une augmentation de la température des formations et cela induit donc également une augmentation de la puissance théorique d'un doublet.

Les autres structures ayant un effet important sur le potentiel thermique sont les zones de failles, car elles ont pour conséquence d'augmenter le débit et donc également la puissance extractible. Dans cette étude, les différentes zones de failles ont toutes été traitées de la même manière car les connaissances à leur sujet restent très limitées. Le prolongement du décrochement de l'Arve à travers le canton, par exemple, n'est pas encore avéré, mais reste une hypothèse valable.

Les puissances obtenues reflètent par conséquent l'effet de ces structures, mais les conditions les plus favorables où les moins favorables ne sont jamais toutes réunies en une même zone. La variation réelle des puissances potentielles a donc été calculée en effectuant des géostatistiques sur les cartes des figures 9.25 à 9.28 et le résultat est présenté dans le Tableau 9-14.

Tableau 9-14. Synthèse des données compilées sur les aquifères profonds du Bassin genevois et puissance potentielle par doublet.

Formation aquifère	Profondeur (km)	Température (°C)	Puissance (MW _{th})
Crétacé	0 – 1.8	10 – 63	0 – 3.1
Malm	0.3 – 2.9	20 – 102	0 – 8.9
Dogger	1.5 – 3.4	63 – 112	1.9 – 7.6
Muschelkalk	2.5 – 4.3	93 – 141	3.5 – 8.1

Les paramètres fixés dans cette étude pour l'utilisation thermique des fluides ont comme conséquence un potentiel géothermique nul pour le Crétacé et le sommet du Malm sur une bonne partie du canton de Genève. Au nord-ouest du canton, là où elles sont les moins profondes, ces formations aquifères pourraient toutefois être exploitées à l'aide d'une pompe à chaleur et fournir de l'énergie à un quartier de bâtiments à basse consommation. De plus, la faible profondeur de ces formations dans certaines zones rend leur identification plus simple et les forages pour les atteindre bien moins coûteux.

En ce qui concerne la production d'électricité, seul l'aquifère potentiel du Muschelkalk possède une température suffisante pour envisager une coproduction de chaleur et d'électricité. Cependant il s'agit de l'aquifère le moins connu, tant du point de vue de sa lithologie que de sa géométrie. Par conséquent un projet ayant pour cible l'aquifère du Muschelkalk, devra procéder à des investigations complémentaires par les méthodes géophysiques avant de positionner un premier forage d'exploration.

9.6 Conclusions et recommandations

Les quatre aquifères profonds du Bassin genevois pourraient être potentiellement exploités à des fins thermiques, mais ce sont le niveau de température et la quantité d'énergie recherchée qui vont dicter quelles seront les futures cibles à prospector. Il faut cependant garder en mémoire que la connaissance hydrogéologique et tectonique des formations profondes reste actuellement très lacunaire et des investigations détaillées par les méthodes géophysiques d'abord et par des forages d'exploration ensuite seront indispensables si l'on souhaite assurer un développement économique et durable des ressources géothermiques profondes du Bassin genevois.

Dans un premier temps, c'est la recherche d'aquifères profonds depuis le Crétacé jusqu'au sommet du socle cristallin qui doit être prioritaire. Lorsque les structures tectoniques et les formations géologiques les plus profondes auront été reconnues par forage, voire exploitées, et que la technologie des systèmes géothermiques EGS aura atteint une certaine maturité, alors la recherche de nouvelles ressources pourra se diriger naturellement vers les roches fracturées du socle cristallin entre 4 et 5 km de profondeur.

Recommandations

Tâches pour la reconnaissance du sous-sol profond du bassin genevois

- Compilation et synthèse de l'ensemble des informations contenues dans les rapports de la trentaine de forages pétroliers sur territoire français à la périphérie du bassin genevois.
- Mesures de sismique sur l'ensemble du territoire du canton, éventuellement du Bassin. Dans le cas récent des travaux de prospection menés à St Gall, au moyen d'un réseau de lignes sismiques sur une superficie de 300 km², seuls 80 km² sont réellement interprétables en 3D. Le but étant d'obtenir une géométrie précise pour un modèle géologique 3D.
- Utilisation des données de gravimétrie existantes et mesures complémentaires dans des zones sélectionnées. Les buts étant de localiser d'éventuels grabens permio-carbonifères et de préciser la localisation des failles et leur porosité (anomalie négative).
- Etude de l'activité sismique historique du Bassin genevois : mécanismes au foyer, localisation des failles actives. Amélioration du réseau de mesures sismologiques et collecte de données (par ex. CERN ?).
- Photogrammétrie sur les affleurements du Salève et du Jura : orientation et ouverture des principales familles de failles.
- Télédétection sur la base des images satellites : localisation et précision des accidents tectoniques.
- Mesures des propriétés thermiques des roches : acquisition de données pour réaliser un modèle thermique des APR, respectivement du Bassin genevois.
- Collaboration active avec la chaire de sismique de l'Université de Genève.

Tâches pour la prospection géothermique profonde liée à un projet

- Un projet de prospection des APR devrait cibler l'une des grandes failles traversant le canton, par exemple celle du Coin qui est la mieux localisée, ou celle de l'Arve, ou encore celle de Cruseilles, afin de maximiser les chances de succès d'un premier forage d'exploration profonde.
- Prospection des failles transformantes au moyen des méthodes géophysiques (sismique 2D et 3D, gravimétrie et éventuellement magnétotellurique). Seules les méthodes sismiques pourront apporter une précision suffisante pour localiser la cible d'un projet en aquifère profond telle qu'une structure tectonique (faille, décrochement, graben) : il est important de localiser les intersections, les limites, ainsi que la géométrie d'un accident tectonique (longueur, largeur, profondeur). Les autres méthodes (gravimétrie, MT) permettront de corriger et de détailler le modèle géologique.
- Etude technico-économique des zones d'investigation (du type de l'étude de BG pour le projet PAV).
- Synergie avec le projet de Thônex (données, projet, etc.).

9.7 Bibliographie

ADEME – BRGM, 2004. *La géothermie*, Collection Les enjeux des géosciences. Val de Loire Impression, 44 pp.

Affolter T. & Gratier J.-P., 2004. *Map view retrodeformation of an arcuate fold-and-thrust belt : The Jura case*. Journal of Geophysical research, vol. 109, 20pp.

Altwegg P., Schill E. & Vuataz F.-D., 2009. *Programme GEOTHERMEOS : Etude A – Valorisation des projets en cours en Suisse Romande*. Rapport CREGE 11-09/01 pour EOS Holding, Neuchâtel, 47pp.

Amberger G. 1982. *Profil tectonique schématique à travers le canton de Genève*. In Encyclopédie de Genève, 1: Le Pays de Genève, éd. Roto-Sadag, Genève.

Andenmatten-Berthoud N. & Kohl T., 2003. *Assessment & Evaluation of geothermal potential in Switzerland (Atlas des ressources Géothermiques Suisses)*. Rapport Annuel 2003 pour l'Office Fédéral de l'Energie, Bern. Commission Suisse de Géophysique CSGP, 70 pp.

Bianchetti G., Crestin G., Kohl T. & Graf O, 2006. Agepp, *Alpine Geothermal Power Production, Géothermie du cristallin profond de la vallée du Rhône*. Etude préliminaire, 77 pp.

Bianchetti G., Marillier F. & Arn R., 2009. *GP La Côte. Rapport de Phase A. Module A1 « Aquifères profonds »*. Rapport pour l'OFEN et le SEVEN, 53 pp.

Blondel T., Charollais S. & Wildi W., 1990. *Terminaison de la première chaîne du Jura : rampe latérale et complication*. Réunion de la société Géologique Suisse, Genève. Excursion A (2.10.1990).

Boissier F., Desplan A. & Laplaige P., 2010. *France country update*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

BRGM & AFME, 1985. *Prescriptions minimales et recommandations spécifiques aux forages géothermiques, Dogger du Bassin parisien*. Service public géothermie et hydroénergie, 65 pp.

BRGM, 1952. *Extrait du rapport du sondage Savoie 101*. N° BRGM 0701-4x-0001. 5 pp.

- BRGM, 1952. *Extrait du rapport du sondage Savoie 104*. N° BRGM 0701-4x-0003. 5 pp.
- BRGM, 1953. *Extrait du rapport du sondage Savoie 105*. N° BRGM 0701-4x-0002. 4 pp.
- BRGM, 1954. *Extrait du rapport du sondage Savoie 106*. N° BRGM 0677-6x-0001. 10 pp.
- BRGM, 1954. *Extrait du rapport du sondage Savoie 107*. N° BRGM 0701-2x-0001. 8 pp.
- BRGM, 1956. *Extrait du rapport du sondage Savoie 108*. N° BRGM 0677-8x-0003. 4 pp.
- BRGM, 1959. *Extrait du rapport du sondage Savoie 109*. N° BRGM 0677-8x-0002. 6 pp.
- BRGM, 1960. *Extrait du rapport d'implantation du sondage Salève 1*. N° BRGM 0678-1x-0002. 15 pp.
- BRGM, 1962. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 677 : Seyssel, avec notice explicative*, 17 pp.
- BRGM, 1963. *Extrait du rapport d'implantation du sondage Salève 2*. N° BRGM 0678-1x-0001. 11 pp.
- BRGM, 1970. *Rapport géologique sur le projet de captage de la source des Quarts, commune de Montanges (Ain)*. N° BRGM 0653-1x-0015, 1 pp.
- BRGM, 1972. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 628 : St Claude, avec notice explicative*, 17 pp.
- BRGM, 1982. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 03*. N° BRGM 0653-3x-0032, 1 pp.
- BRGM, 1982. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 04*. N° BRGM 0653-3x-0031, 2 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 01*. N° BRGM 0653-4x-0040, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 02*. N° BRGM 0653-3x-0033, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 05*. N° BRGM 0653-7x-0010, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 06*. N° BRGM 0653-9x-0009, 1 pp.
- BRGM, 1983. *Résumé du rapport géologique sur le forage GEX CD 07*. N° BRGM 0653-9x-0039, 1 pp.
- BRGM, 1992. *Résumé du rapport géologique sur le forage Charmont 1 (CHT1)*. N° BRGM 0652-3x-0121/gb, 1 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1969. *Extrait du rapport d'implantation du forage d'exploration Faucigny 1*, N° BRGM 0654-7x-0010, 5 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1976. *Extrait du rapport technique de fin de forage (forage d'exploration) La Tailla*, N° BRGM 0701-6x-0004, 32 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1989. *Extrait du rapport de fin de sondage Chaleyriat 1*, N° BRGM 0676-2x-0031, 4 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1990. *Extrait du rapport de fin de sondage La Chandelière (LCD 1)*, N° BRGM 0676-3x-0014, 4 pp.
- BRGM, Esso Rep, 1992. *Extrait du rapport de fin de sondage Chatillon 1D (CTL 1D)*, N° BRGM 0676-2x-0032, 4 pp.
- BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1958. *Extrait du rapport de fin de sondage Humilly n°1*, N° BRGM 0653-7x-0001, 11 pp.

BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1958. *Extrait du rapport d'implantation du sondage d'exploration d'Humilly 2 (Viry)*, N° BRGM 0653-7x-0003, 8 pp.

BRGM, Prepa-Transworld Petroleum S.A.F., 1959. *Extrait du rapport de fin de sondage Messery 1 / Haniel et Lueg*, N° BRGM 0629-7x-0002, 11 pp.

BRGM, Société de prospection et d'exploration pétrolière en Alsace, 1963. *Extrait du rapport de fin de sondage mont de Boisy 1*, N° BRGM 0629-7x-0001, 11 pp.

BRGM, Société de prospection et d'exploration pétrolière en Alsace, 1963. *Extrait du rapport de fin de sondage mont de Musiège 1*, N° BRGM 0677-3x-0001, 11 pp.

Buonassorte G., Rizzi R. & Passaleva G., 2007. *Direct Uses of Geothermal Energy in Italy 2005-2009: Update Report and Perspectives*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Burger A. & Gohran H.L., 1986. *Etude des ressources géothermiques suisses. Prospection géothermique le long du pied Sud du Jura*. Rapp. de recherches NEFF N° 165, in Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 6 : 91-198.

Burkhard M. & Sommaruga A., 1998. *Evolution of the western Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt*. In : Mascle A., Puigdefàbregas C, Luterbacher H. P. & Fernández M. (eds) *Cenozoic Foreland Basins of Western Europe*. Geological Society Special Publications, 134 : 279-298.

Burri J. -P. & Associé, 1981. *Energie géothermique dans le canton de Genève, 2^{ème} étude complémentaire. Etude hydrodynamique des aquifères profonds du bassin genevois*. République et canton de Genève, département de l'intérieur et de l'agriculture. Service cantonal de géologie. Rapport, 76 pp.

Charollais J. et al., 1988. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 678 : Annecy - Bonneville, avec notice explicative*. BRGM, 133 pp.

Charollais J. et al., 1993. *Précisions stratigraphiques sur les Collines du Faucigny, Préalpes ultrabelvétiennes de Haute-Savoie (France)*. Eclogae geol. Helv 86/2 : 397-414.

Charollais J. et al., 2007. *La molasse du Bassin franco-genevois et son substratum. Société de Physique et d'Histoire Naturelle de Genève*. Archives des Sciences Vol. 60, Fasc. 2-3, 174 pp.

Charollais J., Plancherel R., Monjuvent G. & Debelmas J., 1998. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 654, Carte géologique de la Suisse spéciale N°125 : Annemasse, avec notice explicative*. BRGM, 139 pp.

Chauve P., Contini D. & Millet M., 2009. *Le Jura dans son cadre régional. Evolution paléogéographique et géodynamique*. Géologue N° 160 : 20 – 33.

Coudret J.-M. & Ferrandes R., 1987. *Energie géothermique*. Technique de l'ingénieur 8, 20 pp.

Dewarrat P. & Bianchetti G., 2009. AGEPP. *Phase B - Etude de faisabilité technico-financière. Valorisation de la chaleur & business plan*. Rapport de synthèse, 49 pp.

DGRST, 1976. *La géothermie. Chauffage de logements*. Rapport, 24 pp.

Donzeau M., Wernli R. & Charollais J., 1997. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 653. Carte géologique de la Suisse spéciale N° 124 : St-Julien-en-Genevois, avec notice explicative*. BRGM, 149 pp.

Donzeau M., Wernli R. & Charollais J., 1998. *Interprétation nouvelle de la géométrie de l'accident du Vuache dans le Jura méridional : le relais de failles transpressif sénestre Léaz-Champfromier (Ain)*. Géologie de la France, N° 2: 25-45.

ENGINE Coordination Action, 2008. *Best practice handbook for the development of unconventional geothermal resources with a focus on enhanced geothermal systems*. ENGINE Coordination Action, 97 pp.

Fritz B. & Gérard A., 2010. *On the way to the exploitation of deep geothermal resources in naturally fractured environments*. C. R. Geoscience, 342 : 493-501.

Garnish J., 2002. *European activities in Hot Dry Rock research*. In: Open Meeting on Enhanced Geothermal Systems. U.S. Department of Energy, Reno, Nevada : 8-9.

Goldbrunner J., 2001. *Geothermieprojekt Simbach-Braunau (D/A)*. Bull. Geothermie CH, 30 : p. 10-11.

Goldbrunner J., 2010. *Austria – Country Update*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Gorhan H.L. & Griesser J.C., 1988. *Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad - Baden*. Rapp. de recherches NEFF, in Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser., 76, 73 pp.

Gorin G., 1989. *Interprétation de la campagne sismique CG 87 dans le canton de Genève*. Département de l'intérieur et de l'agriculture, Service cantonal de géologie, 33 pp.

Gorin G., 1992. *Rapport sur l'interprétation de la campagne sismique réflexion 1990 dans le canton de Genève (Périmètre Vernier-Onex-Sezegnin-Aully-Vernier)*. Services industriels de Genève, Service du gaz, 14 pp.

Gorin G., Signer C. & Amberger G., 1993. *Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data*. Eclogae geol. Helv. 86/3 :693-716.

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.

Groupe de travail boucle géothermale, 1987. *Recommandations spécifiques pour la conception, l'exploitation et l'entretien d'une boucle géothermale, Dogger du Bassin parisien*, rapport, 129 pp.

Groupe de travail PDGN, 2010. *Programme cantonal de développement de la géothermie à Neuchâtel (PDGN)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE 07-10/01, Neuchâtel.

Groupe de travail PGN, 2008. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Neuchâtel (PGN)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, CREGE 11-08/02, Neuchâtel.

Groupement PGF, 2005. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg (PGF)*. Vol. 1 : Rapport final, Vol. 2 : Annexes, Service des transports et de l'énergie, Fribourg.

Groupement PGV, 2003. *Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud*, Rapport final pour le Service de l'environnement et de l'énergie, Vaud.

Häring M, Leimer T. & Wahl S., 2002. *Wärme-Contracting Geothermie-Doublette Siedlung Solar One, Itingen, BL*. Schlussbericht BFE, Projekt Nr 26745, 9 pp.

Jaffé F., Benoit F. & Roux D., 1976. *Low enthalpy geothermal energy in Switzerland : the thermal spring of Lavey and its utilisation*. Int. Congr. Thermal Waters, Geothermal Energy, Vulcanism Mediterranean Area, Athens, 1 : 268-274.

Jayet A., et al., 1964. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1281 Coppet*, N° 46, avec annexe de la feuille 1260 Col de la Faucille et notice explicative. Swisstopo.

Jenny J, Burri J.-P., Muralt R., Pugin A., Schnegg R., Ungemach P., Vuataz F.-D. & Wernli R., 1995. *Le forage géothermique de Thônex (Canton de Genève) : Aspects stratigraphiques, tectoniques, diagénétiques, géophysiques et hydrogéologiques*. Eclogae geol. Helv. 88/2 : 365-396.

- Lemale J. & Jaudin F., 1998. *La géothermie, une énergie d'avenir*, ARENE, 117 pp.
- Lemale J. & Pivin M., 1986. *La filière géothermique : premier bilan, évaluation technico-économique de la géothermie basse énergie en France*, AFME, 80 pp.
- Lombard A. et al., 1965. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1301 Genève*, N° 48, avec notice explicative. Swisstopo.
- Lund J. W., Freeston D. H. & Boyd T. L., 2010. *Direct Utilization of Geothermal Energy 2010 Worldwide Review*. Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.
- Mariller F., Eichenberger U. & Sommaruga A., 2006. *Seismic synthesis of the Swiss molasse basin*. Rapport Annuel 2006. Commission Suisse de Géophysique CSGP, 15 pp.
- Marti J., 1969. *Rapport de fin de sondage d'Humilly 2. SNPA, direction exploration et production, division Europe*. Rapport, 33 pp., annexes 99 pp.
- Matousek F. & Graf H., 1998. *Trinkwasser und Wärme aus 300 m Tiefe*. GWA 1/98: 3-9.
- Mégel T., 2007. *Forschungs- und Entwicklungsprogramm zur geothermischen Stromerzeugung in der Schweiz (FEGES)*. Internes Strategiepapier der Dachorganisation GEOTHERMIE.CH.
- Menjot A., 1989. *Gestion et exploitation des aquifères profonds du Bassin parisien*, Exposé du 13.06.1989 à Reinach, 18 pp.
- Meyer M., 2000. *Le complexe récifal kimméridgien – thithonien du Jura méridional interne (France), évolution multifactorielle, stratigraphie et tectonique*. Terre & Environnement Vol. 24, 179 pp.
- Meyer M., 2000. *Structure du « diapir » de Champfromier (Jura, Ain, France)*. Eclogae geol. Helv. 93 : 221-229.
- Meyer M., Meister C. & Wernli R., 2000. *Stratigraphie de Champfromier (AIN)*. Géologie de la France, No 1 : 47-57.
- Muralt R., 1999. *Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains)*. Matériaux pour la Géologie de la Suisse, série Géotechnique, 82, 236 pp.
- NEFF, 1980. *Geothermische Prospektion im Raum Koblenz – Wildegg – Dielsdorf. Schlussbericht*, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- NEFF, 1984. *Nutzbarmachung des Geothermie im Raume Baden und Umgebung*. Schlussbericht, Nationaler Energie-Forschungs-Fonds, Basel.
- Nissille J.-C., 1989. *Les sources thermales, subthermales et karstiques de la Caille (Cruseilles), Bromines et Lovagny (Haute-Savoie, France)*. Université de Genève, Diplôme ès Sciences de la Terre, 107 pp.
- OFEN, 1992. *Avant-projet d'installation de géothermie en Suisse : aspects techniques et financiers*. Brochure, 30 pp.
- OFEN, 1998. *Géothermie : exploitation de l'énergie géothermique. Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs*. Brochure, 23 pp.
- Paréjas E et al., 1938. *Atlas géol. Suisse 1:25'000, feuille 1280 Dardagny – Vernier – Chancy - Bernex* (N° 449 - 450bis), avec notice explicative. Swisstopo.
- Pasquier F., Bouzelboudjen M & Zwahlen F., 1999. *Carte Hydrogéologique de la Suisse, Sarine, Feuille 6*. Commission Géotechnique Suisse et Service Hydrologique et Géologique national.

Perritaz D. & Dewarrat P., 2009. *GP – La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise*. Rapport de phase A, Module A2 « valorisation de la chaleur », 71 pp.

Pomerol C. et al., 1980. *France géologique : grands itinéraires*. Guides géologiques régionaux. Masson, Paris, 254 pp.

Projet GGP-Genève, 2004. *Géothermie de grande profondeur GGP-Genève. Etape 3*. Rapport d'étape, octobre 2004.

Rojas J., Brach M., Criaud A., Fouillac C., Martin J.C. & Menjoz A., 1989. *Characterization and modelling of low enthalpy geothermal reservoirs; example of the Paris Basin*. Geothermal European Update. Fourth international seminar on the results of EC geothermal energy research and demonstration, Florence, Italy, April 27-30, 1989: 109-118.

Rybach L., Büchi U.P., Bodmer Ph., Griesser J.-C., Israng L., Kappeler S., Rellstab W., Schlanke S. & Weiss H.P., 1981. *Geothermische Datensynthese der Schweiz. Schriftenreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft*, 26, Bern, 122 pp. + 24 annexes (cartes).

ScanE, SIG & ADHM, 2003. *GGP - Valorisation de la géothermie de grande profondeur à Genève. Description générale*. Avril 2003, 34 pp.

Schellschmidt R., Sanner B., Pester S. & Schulz R., 2010. *Geothermal Energy Use in Germany*, . Proc. World Geothermal Congr., Bali, Indonesia, April 2010.

Schroeder J.-W., 1958. *Géologie du pays de Genève. Le Globe*, Mémoires de la Société de géographie de Genève (Publication du Centenaire). Tome 97, 277pp.

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.

Signorelli S. & Kohl T., 2006. *Geothermischer Ressourcenatlas der Nordschweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz, Geophysik*, N° 39, 107 pp.

Signorelli S. & Kohl T., 2007. *Atlas des ressources géothermiques de la Suisse occidentale. Contribution à la géologie de la Suisse*, Géophysique, 40, 57 pp.

Signorelli S., Andenmatten Berthoud N. & Kohl T., 2004. *Geothermischer Ressourcenatlas der Schweiz. Schlussbericht*, Energieforschung Projekt 100'022, 55 pp.

Sommaruga A., 1997. *Geology of the central Jura and the Molasse Basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt*. Mémoire de la Société neuchâteloise des Sciences naturelles, tome XII, 176 pp.

Syndicat mixte pour la géothermie à Meaux, 1984. *Géothermie à Meaux*, 10 pp.

Tester J.W. et al., 2006. *The Future of Geothermal Energy – Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st Century*. MIT - Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 372 pp.

Ungemach P. & Antics M., 2009. *Conception et réalisation d'un doublet géothermique dans le Bassin parisien : le cas de La Courneuve-Nord, GPC-IP, Roissy*. Présentation à la Table ronde sur les projets de géothermie profonde en Suisse romande, le 11.06.09, Neuchâtel.

U.S. DOE, 2008. *An evaluation of enhanced geothermal systems technology*. Geothermal technologies program. U.S. Department of energy, 23 pp.

Vallat P., 2009. *GP La Côte, Projet de géothermie profonde sur la côte vaudoise*. Rapport de synthèse de la phase A, 10 pp.

Vial R., Conrad M. & Charollais J., 1989. *Carte géologique de la France à 1/50'000 N° 629 : St Douvaine, avec notice explicative*. BRGM, 25 pp.

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

Vuataz F.-D. & Giroud N., 2010. *Caractéristiques géochimiques du fluide profond du forage géothermique Thônex-1, Genève*. Rapport CREGE12-10/01, Neuchâtel.

Vuataz F.-D. (éd.), 2007. *PROGEO THERM - Programme national de développement de la géothermie en Suisse*. Rapport final élaboré par le Groupe de travail PROGEO THERM pour l'Office fédéral de l'énergie, 78 pp.

Vuataz F.-D., 1997. *Applications des techniques de forage slimbole pour la prospection des aquifères profonds*. Eclogae geol. Helv., 90 : 497-512.

Wildi W., Blondel T., Charollais J., Jaquet J.-M. & Wernli R., 1991. *Tectonique en rampe latérale à la terminaison occidentale de la Haute-Chaîne du Jura. Compte-rendu de l'excursion de la Société Géologique Suisse du 2 octobre 1990*. Eclogae geol. Helv., 84/1 : 265-277.

<www.geothermal-energy.org/304,iga_geothermal_conference_database.html>. *IGA Geothermal Conference Database*. International Geothermal Association.

10. Conclusions et recommandations finales

10.1 Conclusions

Les études menées dans le cadre de l'évaluation du potentiel géothermique du canton de Genève ont permis de faire un point de situation déterminant sur les possibilités d'utilisation de ces technologies dans notre région.

Pour la **géothermie de faible profondeur** (< 400 m), les sondes géothermiques verticales (SGV) représentent de loin la méthode la plus prometteuse. Déjà largement utilisée en Suisse et à Genève, cette technologie est bien maîtrisée et ne se heurte qu'à peu de contraintes dans notre canton (protection de la nappe souterraine du Genevois essentiellement). Les simulations effectuées montrent qu'une proportion importante de la demande actuelle en énergie de chauffage du canton (6'000 GWh/an) pourrait être couverte par des sondes ou des champs de sondes, soit au moins 20% avec des scénarios conservatifs, pouvant toutefois atteindre des valeurs nettement plus élevées en optimisant les techniques (recharge saisonnière avec possibilité de produire du froid).

Les géostructures énergétiques, sur les mêmes principes de fonctionnement que les sondes, représentent des solutions éprouvées à l'étranger et en Suisse mais encore peu utilisées à Genève (un seul exemple actuellement). Sur le canton, le potentiel global représenté par cette technique est relativement peu élevé car elle consiste à profiter de la réalisation d'ouvrages de fondation ou de soutènement pour les utiliser comme échangeur de chaleur. Or, ces ouvrages n'étant réalisés que dans des conditions particulières, il s'agit donc plutôt d'une technique opportuniste, relativement peu coûteuse puisque ces ouvrages souterrains sont réalisés dans le cadre du projet de génie-civil et peuvent couvrir en moyenne 30% des besoins en chaleur d'un bâtiment. L'importante zone de développement Praille - Acacias - Vernets (PAV) est un secteur particulièrement intéressant à cet égard. On citera également la possibilité de tirer profit des ouvrages souterrains (tunnels, tranchées couvertes). A cet égard, la mise en place de telles installations dans certains ouvrages du CEVA est à souligner comme particulièrement intéressante.

L'exploitation des nappes phréatiques peu profondes offre également des perspectives d'avenir, même si elle implique des contraintes hydrogéologiques et juridiques plus importantes que pour les deux premières méthodes. Les nappes principales de Montfleury et du Rhône présentent un potentiel élevé pour des projets de grande taille. Les nappes superficielles ont quant à elles des potentiels faibles à moyens pour des projets de taille réduite avec en plus des caractéristiques hydrogéologiques hétérogènes. La production potentielle totale de chaleur, toutes nappes confondues, a été estimée entre 40 et 110 GWh/an. Cette (recharge saisonnière, stockage). L'exploitation des nappes phréatiques offre également un important potentiel de production de froid.

Le stockage saisonnier se présente principalement comme une optimisation importante des autres méthodes géothermiques de faible profondeur (champs de sondes, exploitation des nappes) en profitant des cycles thermiques naturels (journaliers, saisonniers...) et de la réversibilité des systèmes (stockage de chaud ou de froid). Cette technique offre également la possibilité de valoriser des sources énergétiques disponibles (chaleur récupérée par refroidissement de bâtiments industriels) pour les utiliser ensuite pour des logements (stockage tampon). On peut également stocker de la chaleur dans des réservoirs d'eau enterrés avec des sources d'énergie diverses (solaire notamment). A Genève, le potentiel d'utilisation se présente plutôt sous la forme de stockage lié à des champs de sondes géothermiques verticales.

En ce qui concerne la **géothermie de grande profondeur**, les études montrent que le potentiel d'exploitation des aquifères profonds est réel dans le Bassin genevois. Il existe en effet plusieurs couches aquifères potentiellement intéressantes (Crétacé, Malm, Dogger, Muschelkalk) ainsi que plusieurs zones fracturées importantes les recoupant et qui permettraient de les exploiter dans des conditions plus favorables (débits plus importants). L'aquifère le plus profond (Muschelkalk), situé entre 2.5 à 4.3 km de profondeur est toutefois le seul à présenter une température suffisante ($\geq 110^{\circ}\text{C}$) pour envisager une coproduction de chaleur et d'électricité.

La technologie des systèmes géothermiques stimulés (EGS) pourrait également être envisagée à Genève (exploitation de la chaleur du socle cristallin entre 5 et 6 km de profondeur). Un tel projet avait d'ailleurs été initié en 1998. Les événements sismiques survenus à Bâle en 2006 ont conduit à l'interruption de ces projets, tant à Bâle qu'à Genève. Il n'en reste pas moins que cette ressource est très importante et qu'à terme, lorsque la technologie EGS aura atteint une certaine maturité et que les structures profondes auront été reconnues par forage, elle pourra certainement être exploitée pour la coproduction de chaleur et d'électricité.

10.2 Recommandations

Les **recommandations** exprimées dans chacun des chapitres 5 à 9 de ce rapport visent à définir les actions principales à entreprendre dans un avenir proche pour le développement des techniques géothermiques à Genève.

Pour la géothermie de faible profondeur, les techniques sont actuellement maîtrisées et peuvent donc être mises en œuvre. Une bonne expérience existe déjà pour les sondes géothermiques mais elle est moindre pour les autres méthodes. Leur cadre d'utilisation est désormais défini à Genève suite à la présente étude. Les actions à mener dès maintenant consistent d'une part à promouvoir la géothermie auprès des différents acteurs concernés et d'autre part à définir les cadres réglementaires de leur utilisation pour éviter de mauvaises expériences, notamment en termes de conflits de voisinage. Des cahiers des charges type pour les études à réaliser dans le cadre de projets géothermiques devraient être établis. Par ailleurs, une plate forme de coordination est à mettre en place pour toutes les méthodes de faible profondeur (planification énergétique, géologie, aménagement du territoire) afin d'optimiser leur application. Il apparaît également important de promouvoir des solutions thermiquement équilibrées (recharge saisonnière, stockage) qui permettent de rendre la ressource pratiquement inépuisable et de suivre les développements visant à augmenter l'efficacité énergétique des systèmes.

Pour la géothermie de grande profondeur, les techniques d'exploration et d'exploitation des aquifères profonds sont également maîtrisées à l'heure actuelle. En revanche, la connaissance des structures géologiques profondes du Bassin genevois est pour l'instant très lacunaire. Il s'agit donc dans un premier temps d'engager dès que possible des programmes d'investigations détaillées (géophysique, forages) pour être prêts, le moment venu à exploiter ces ressources de grande capacité potentielle. De telles reconnaissances sont en cours dans d'autres cantons.

Pour ce qui est de la technologie EGS (systèmes géothermiques stimulés), il apparaît qu'elle passe pour l'instant en deuxième priorité à Genève. Cette ressource reste toutefois clairement disponible à des profondeurs accessibles et il semble donc parfaitement adéquat de recommander de mettre à profit les reconnaissances ciblées sur les aquifères profonds pour également récupérer toutes les informations liées au sommet du socle cristallin.

En guise de conclusion finale, on constate que la mise en pratique intensive des méthodes géothermiques, tant de faible que de grande profondeur, est possible à Genève dont le sous-sol présente des caractéristiques favorables à cet égard. Ce passage à « l'ère géothermique » doit toutefois être précédé et accompagné par des mesures et des études à diverses échelles, qu'il s'agit d'entreprendre dès à présent pour éviter des erreurs à court terme (faible profondeur) et de prendre du retard à long terme (grande profondeur).