

No du projet : 46'094
No de la décision : 86'175

Programme Géothermie

Sous mandat de
L'Office fédéral de l'énergie

ETAT DE VAUD

DEPARTEMENT DE LA SECURITE ET DE L'ENVIRONNEMENT
SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT ET DE L'ENERGIE
DIVISION DE L'ENERGIE

RAPPORT FINAL – JUILLET 2003

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud

Géostructures énergétiques (GE)

Aquifères profonds (AP)

Géothermie haute énergie (HE)

Préparé par

Groupement PGV

Jules Wilhelm, Ing.-conseil, Pully
Gabriele Bianchetti, ALPGEO, Sierre
François-D. Vuataz, Univ. Neuchâtel

c/o Jules Wilhelm, Ing.-cons.
Ch. Du Fau-blanc 26
1009 Pully

SOMMAIRE

Résumé	v
Zusammenfassung	vi
1. INTRODUCTION	1
1.1. Cadre général – Définitions	1
1.1.1 Définition du mandat	1
1.1.2 Exploitation des ressources géothermiques – But de l'étude	1
1.2. Démarche de l'étude	2
1.2.1 Démarche générale	2
1.2.2 Contexte énergétique – Distribution et consommation	2
1.3. Présentation du rapport	4
1.4. Organisation de l'étude	5
2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)	7
2.1 Introduction - Méthode de travail	7
2.2 Les géostructures énergétiques	7
2.2.1 Concept général	7
2.2.2 Projet et caractérisation thermique	10
2.2.3 Avantages d'un système à géostructures énergétiques	13
2.2.4 Réalisations	13
2.2.5 Références	16
2.3 Calcul du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Vaud à l'horizon 2014	16
2.3.1 Introduction	16
2.3.2 Enquête auprès des entreprises	16
2.3.3 Ajustement des quantités	18
2.3.4 Estimation des quantités en 2014	18
2.3.5 Production de chaleur et de froid en 2014	19
2.4 Zones potentielles pour géostructures énergétiques	20
2.4.1 Introduction	20
2.4.2 Méthodes d'évaluation	21
2.4.3 Investigation des pôles de développement cantonaux	25
2.4.4 Applications futures	33
2.5 Conclusions et recommandations	34
2.6 Références	35

3. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)	39
3.1 Introduction – Méthode de travail	39
3.2 Exploitation des aquifères profonds	39
3.2.1 Définitions	39
3.2.2 Modes d'exploitation	40
3.3 Opérations géothermiques AP	43
3.3.1 Phases de réalisation	43
3.3.2 Chantier et aspects environnementaux	44
3.3.3 Techniques de perforation et tests hydrauliques	45
3.3.4 Equipement des forages géothermiques et exploitation par pompage	50
3.3.5 Potentiel géothermique, utilisateurs et besoins énergétiques	51
3.3.6 Coûts et aspects économiques	51
3.4 Développements AP à l'étranger et en Suisse	54
3.4.1 Développements AP dans les pays européens limitrophes	54
3.4.2 Développements AP en Suisse	56
3.5 Réalisations et projets AP dans le canton de Vaud	60
3.5.1 Réalisations à Lavey-les-Bains et à Yverdon	60
3.5.2 Projets dans la région du Sud-Ouest lausannois et à Payerne	64
3.6 Evaluation des ressources géothermiques AP du canton de Vaud	66
3.6.1 Données à disposition	66
3.6.2 Géologie régionale	67
3.6.3 Aspects hydrogéologiques et géothermiques	71
3.6.4 Cibles géothermiques favorables et conditions thermiques	73
3.7 Potentiel de projets AP pour le canton de Vaud à l'horizon 2010	81
3.7.1. Sites potentiellement intéressants	81
3.7.2. Potentiel géothermique et potentiel de consommation	82
3.7.3. Aspects techniques et économiques	85
3.7.4. Concept pour l'exploration et la mise en valeur des ressources AP du canton de Vaud	87
3.7.5 Projets prioritaires et calendrier de réalisation	88
3.8 Conclusions et recommandations	90
3.9 Références	90
Annexes au chapitre 3	
• Annexe 3.1 - Synthèse de quelques documents relatifs à la géologie et à la géothermie du canton de Vaud - Avril 2003	93
• Annexe 3.2 - Bibliographie commentée de publications et documents relatifs à la géologie et à la géothermie du canton de Vaud (liste non exhaustive)	115
• Annexe 3.3 - Compilation des informations concernant les forages profonds situés sur le canton de Vaud et régions limitrophes	119
• Annexe 3.4 - Liste de définitions techniques	133

4. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)	135
4.1 Introduction	135
4.2 Production d'électricité géothermique dans le monde	135
4.3 Technique d'exploitation des roches chaudes profondes	138
4.3.1 Extraction de la chaleur du sous-sol	138
4.3.2 Méthodes de géophysique et technologie de forage	138
4.3.3 Création d'un réservoir fissuré profond	138
4.3.4 Conversion de la chaleur géothermique en électricité	139
4.4 Projets EGS dans le monde	140
4.4.1 Bref historique de la technologie des Roches Chaudes Fracturées	140
4.4.2 Projet européen SGS de Soultz-sous-Forêts	140
4.5 Programme suisse Deep Heat Mining (DHM)	142
4.5.1 Projet DHM de Bâle	142
4.5.2 Réalisation de la centrale pilote DHM à Bâle	144
4.5.3 Evaluation d'autres sites en Suisse	145
4.5.4 Projet Géothermie de Grande Profondeur Genève (GGP)	146
4.6 Evaluation des ressources géothermiques de haute énergie du canton de Vaud	147
4.6.1 Données à disposition	147
4.6.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques	147
4.6.3 Conditions géothermiques	150
4.7 Potentiel de projets SGS pour le canton de Vaud	154
4.7.1 Sites potentiels	154
4.7.2 Potentiel géothermique	154
4.7.3 Potentiel de consommation	156
4.7.4 Aspects économiques	156
4.7.5 Aspects environnementaux	158
4.8 Programme et planification d'une installation géothermique SGS	159
4.8.1 Liste des travaux à exécuter	159
4.8.2 Synergie avec la géothermie des aquifères profonds	160
4.8.3 Etapes de réalisation et calendrier	161
4.9 Conclusions et recommandations	165
4.10 Références	165
4.10.1 Littérature	165
4.10.2 Sites Internet	166
5. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS	167

RESUME

Les investigations conduites entre septembre 2002 et mai 2003 en vue de déterminer le **potentiel géothermique** sur le territoire du canton de Vaud dans le domaine des *géostrucures énergétiques (GE)*, des *aquifères profonds (AP)* et de la géothermie *haute énergie (HE)* ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces trois technologies offre d'**intéressantes perspectives de valorisation**.

Dans le secteur des *géostrucures énergétiques*, des calculs basés sur les résultats d'une enquête du marché de la construction des géostrucures ont permis d'estimer le potentiel de développement dans le canton de Vaud. Il est apparu que dans dix ans, les GE seraient à même de produire annuellement *6'000'000 de kilowattheures de chaleur et 500'000 kilowattheures de froid*.

L'impulsion donnée il y a une quinzaine d'année dans le domaine de la valorisation des *aquifères profonds* a quelque peu fléchi au cours des dernières années, essentiellement pour des raisons budgétaires, alors que la connaissance du potentiel géothermique du sous-sol reste très lacunaire. Au terme des investigations entreprises dans le cadre de la présente étude pour combler ce vide, il est apparu que de réelles possibilités de capter des circulations d'eau chaude en profondeur existent, notamment dans la région entre le pied du Jura et le Léman, alors que jusqu'à présent le sous-sol du canton était réputé être pauvre en ressources géothermiques. L'exploitation des AP du Malm et du Dogger pourrait représenter des potentiels géothermiques de l'ordre de *4 à 5 MWth* par site de production, dans des zones à demande élevée de chaleur.

En ce qui concerne la géothermie *haute énergie*, la technologie des systèmes géothermiques stimulés doit prochainement arriver à un stade pré-industriel avec les premières réalisations, au cours de ces deux à trois prochaines années, de centrales à Soultz-sous-Forêts et en Australie, suivies vraisemblablement de Bâle, vers 2006-2008. Un projet en cours à Genève pourrait entrer en service quelques années plus tard. Actuellement le potentiel de production de géothermie HE en Suisse en général, et dans le canton de Vaud en particulier n'est limité ni par la capacité de la ressource en profondeur, ni par son accessibilité, mais bien par le potentiel de consommation de chaleur. Une telle installation doit être couplée de préférence sur un réseau de chauffage à distance existant. L'absence de barrière géologique autorise l'implantation de centrales DHM à proximité des centres de consommation. Dans un laps de temps de 20 ans, on pourrait envisager la construction de trois centrales de ce type de *10 MWél et 60 MWth* chacune, dans des centres urbains comme Lausanne, Yverdon-les-Bains ou la région de Vevey-Montreux.

Pour assurer le développement des ressources géothermiques identifiées, des **mesures** à l'échelle des objectifs sont à prendre au niveau de la politique énergétique cantonale, conformément aux recommandations exposées à la fin du présent rapport.

ZUSAMMENFASSUNG

Das Kantonsgebiet der Waadt wurde zwischen September 2002 und Mai 2003 im Hinblick auf das **geothermische Potenzial** zur Nutzung durch *energetische Geostrukturen (EG)*, durch *tiefe Aquifere (TA)* und durch die *Hochenergie-Geothermie (HE)* untersucht. Es zeigte sich, dass unter bestimmten Bedingungen jede der drei Technologien **interessante Möglichkeiten** bietet.

Das Entwicklungspotenzial von **energetischen Geostrukturen** wurde basierend auf einer Marktanalyse für den Bau von Geostrukturen abgeschätzt. Es hat sich gezeigt, dass sich in zehn Jahren mit den EG jährlich *6'000'000 Kilowattstunden Wärme und 500'000 Kilowattstunden Kälte* produzieren lassen könnten.

Der Aufschwung vor etwa fünfzehn Jahren im Bereich der Erschliessung von **tiefen Aquiferen** hat in den letzten Jahren hauptsächlich aus finanziellen Gründen etwas nachgelassen, so dass die Kenntnisse in Bezug auf dieses geothermische Potenzial im Untergrund lückenhaft geblieben sind. Die im Rahmen der vorliegenden Studie vorgenommenen Untersuchungen zur Schliessung dieser Lücken haben gezeigt, dass die Erschliessung von warmem Tiefenwasser möglich ist, insbesondere am Jurafuss und in der Region des Genfersees, obschon bis anhin das Kantonsgebiet der Waadt als arm an geothermischen Ressourcen gegolten hat. In den Gebieten mit erhöhter Untergrundwärme kann aus den TA des Malm und des Dogger mit einem geothermischen Potenzial in der Grössenordnung von *4 bis 5 MWth* pro Standort gerechnet werden.

Im Bereich der **Hochenergie-Geothermie** erreicht die Technologie der stimulierten geothermischen Systeme nächstens ein vorindustrielles Stadium. Erste Anlagen sind innerhalb der nächsten zwei bis drei Jahre in Sault-sous-Forêts (F) und in Australien zu erwarten, gefolgt gegen 2006-2008 in Basel. Ein laufendes Projekt in Genf würde dann einige Jahre später den Betrieb aufnehmen. Grundsätzlich ist das geothermische HE-Potenzial in der Schweiz, und damit auch im Kanton Waadt, weder durch die im Untergrund vorhandene Wärmemenge noch durch deren Erreichbarkeit begrenzt. Da eine solche Anlage vorzugsweise an ein bestehendes Fernwärmenetz angeschlossen werden soll, ergibt sich diesbezüglich eine gewisse Einsatzbeschränkung. Die relative Unabhängigkeit von geologischen Randbedingungen erlaubt den Bau von DHM-Kraftwerken in unmittelbarer Nähe der Energieabnehmer. In einem Zeitraum von 20 Jahren wäre die Erstellung von drei Kraftwerken dieses Typs von je *10 MWel und 60 MWth* in Siedlungszentren wie Lausanne, Yverdon-les-Bains, oder in der Region von Vevey-Montreux möglich.

Um eine erfolgreiche Entwicklung der hier identifizierten geothermischen Ressourcen sicherzustellen, werden dem Kanton eine Reihe von energiepolitischen **Massnahmen** empfohlen.

1. INTRODUCTION

1. INTRODUCTION

1.1 Cadre général - Définitions

1.1.1 Définition du mandat

Le présent rapport contient les résultats des investigations effectuées sous mandat du Service de l'environnement et de l'énergie de l'Etat de Vaud, en vue d'évaluer le potentiel géothermique exploitable sur le territoire cantonal, par trois technologies particulières, en partie nouvelles. Il s'agit des échangeurs en géostructure, appelées *géostructures énergétiques (GE)*, de l'exploitation des *aquifères profonds (AP)* et de la production de chaleur et d'électricité à l'aide de la géothermie de grande profondeur ou *géothermie haute énergie (HE)*. Le projet a bénéficié du soutien financier de la Confédération, dans le cadre du programme SuisseEnergie.

1.1.2 Exploitation des ressources géothermiques – But de l'étude

On entend par exploitation géothermique la valorisation du potentiel calorifique du sous-sol en dessous de la surface de la Terre, indépendamment de la provenance de la chaleur qui s'y trouve. Suivant leur nature et leur gisement, les ressources géothermiques sont valorisées en ayant recours à des techniques d'exploitation variées. Ainsi on distingue les dix sources ou formes d'exploitation géothermiques suivantes :

- Sources d'eaux chaudes
- Echangeurs horizontaux enterrés
- Nappes phréatiques
- Sondes géothermiques
- Groupes de sondes géothermiques
- Géostructures énergétiques
- Eaux chaudes des tunnels
- Sondes profondes
- Aquifères profonds
- Géothermie haute énergie

Les méthodes d'exploitation liées à la plupart de ces ressources sont aujourd'hui bien connues. Parmi les trois domaines retenus dans la présente étude, le concept des *géostructures énergétiques* a été lancé voici environ dix ans. Elles sont de plus en plus utilisées, surtout dans le nord du pays. L'exploitation des *aquifères profonds* a débuté en Suisse il y a une quinzaine d'année, et plusieurs réalisations de ce genre existent à ce jour. Enfin l'utilisation des ressources profondes *haute énergie*, très prometteuse, se trouve actuellement encore en phase de développement tant en Suisse qu'à l'étranger. Les trois formes d'utilisation présentent un intérêt certain, mais leur mise en valeur coordonnée demande du temps et une connaissance préalable des potentialités.

A l'heure actuelle, il n'existe aucune réalisation dans ces trois domaines à l'échelle du territoire du canton de Vaud, à l'exception du projet AP à Lavey-les-Bains. C'est la raison pour laquelle les autorités cantonales ont décidé de procéder à une évaluation des potentialités futures.

1.2 Démarche de l'étude

1.2.1 Démarche générale

L'étude du potentiel a été conduite en parallèle dans les trois domaines intéressés. De par leur nature, les géostructures énergétiques ont pu être traitées indépendamment des deux autres ressources. En revanche le potentiel des aquifères profonds et celui de la géothermie haute énergie ont été examinés compte tenu des interférences et des complémentarités tant en ce qui concerne les conditions géologiques, hydrauliques et géothermiques, que le potentiel de consommation.

1.2.2 Contexte énergétique – Distribution et consommation

En ce qui concerne les GE, le potentiel de consommation est donné par les caractéristiques du bâtiment ou de la construction. La consommation et/ou l'échange d'énergie se fait sur place, il n'y a donc pas de réseau de transport à distance à prévoir. En revanche des réseaux de distribution sont nécessaires pour livrer la chaleur et l'électricité produite par les installations AP et HE.

Grâce à la densité du réseau de transport électrique, on peut admettre que la livraison du *courant électrique* produit par la centrale pilote Deep Heat Mining peut être assurée en tout point du canton, moyennant la construction d'une ligne de raccordement de longueur limitée, dont l'importance ne joue pas un rôle déterminant pour l'implantation de l'ouvrage.

Pour livrer aux consommateurs la *chaleur* produite, ces installations doivent être raccordées sur un réseau de chaleur, si possible existant et disposant de capacité libre, pour réduire les coûts d'investissement.

En 2001, neuf communes du canton disposaient d'un réseau de distribution de chaleur et douze projets de réseaux étaient annoncés (Figure 1.2.1). A l'exception de celui de Lausanne, il s'agit de petits réseaux locaux, associés à des installations de production de faible puissance, ne dépassant pas l'ordre de quelques mégawatts.

Seul le réseau de Lausanne, dont le plan directeur, visible à la Figure 1.2.2, comprend à terme la desserte des quartiers entre Lausanne-Vennes et Préverenges, possède une capacité suffisante pour pouvoir envisager d'y injecter la chaleur d'une installation AP (de l'ordre de 10 MWth), ou DHM (env. 20 MWth en phase pilote). Toutefois, au vu de la consommation actuelle de chaleur dans les secteurs desservis, ce réseau et ses installations de production (centrale de Pierre-de-Plan, chaufferie de bois) souffrent actuellement déjà d'un excès de capacité. De plus, avec l'entrée en service de TRIDEL, probablement vers 2006, le réseau devra reprendre la chaleur produite par l'usine d'incinération, ce qui augmentera son offre de l'ordre de 10 à 15 %. Dans cette optique, il apparaît donc peu probable qu'une quantité supplémentaire de chaleur puisse être prise en charge à moyen terme par le réseau lausannois.

Il ressort de ce qui précède qu'il est actuellement difficile de lier géographiquement une installation de production de chaleur géothermique à un réseau de distribution existant. En conséquence, l'étude du potentiel de ces installations a été concentrée sur les *ressources géothermiques*, avec prise en compte des zones potentielles de consommation, situées le long de l'arc lémanique, principalement entre Morges et Villeneuve.

Carte des communes avec ou sans réseau de chauffage à distance

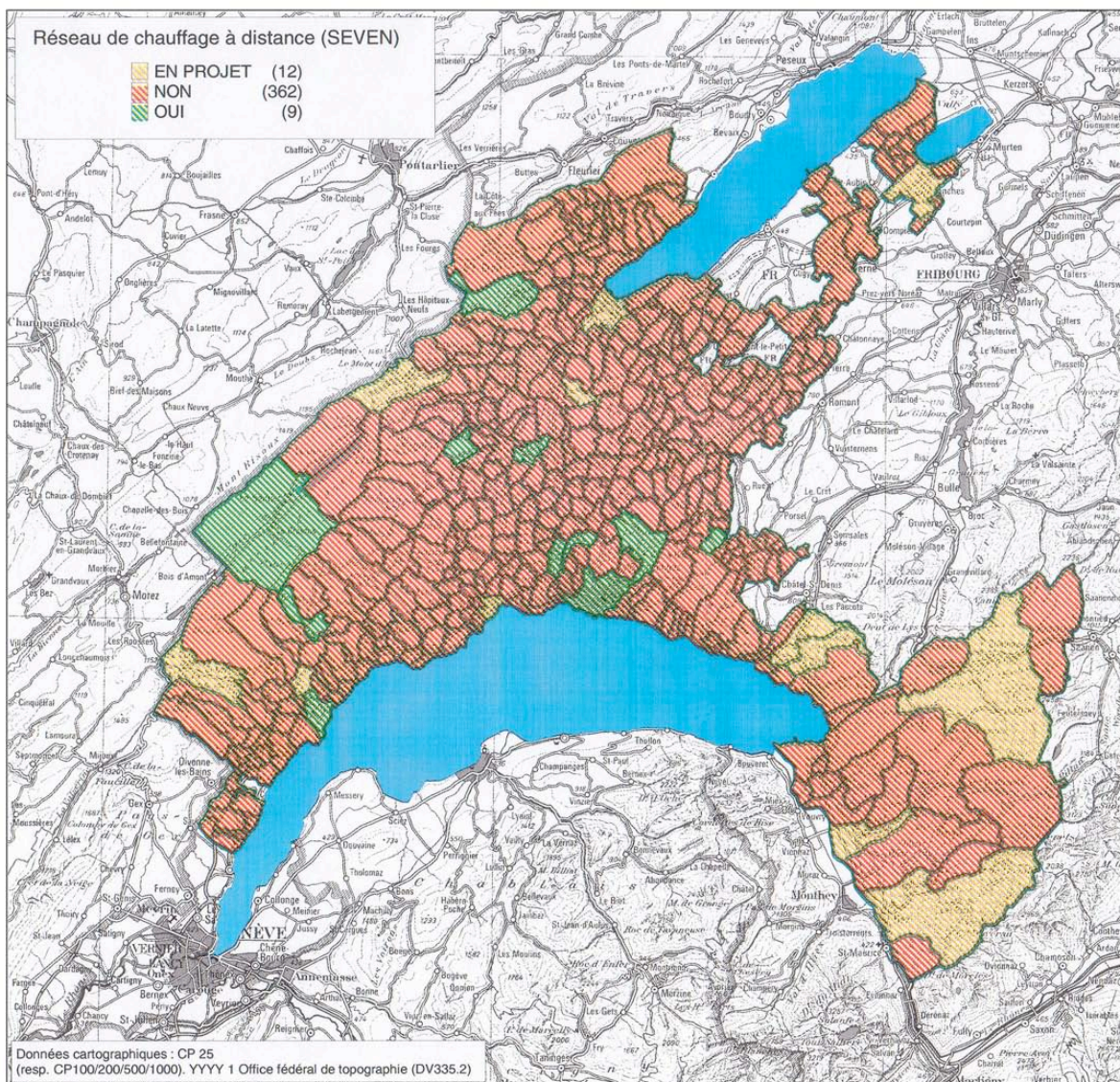


Figure 1.2.1 : Canton de Vaud – Carte des communes avec ou sans réseau de chauffage (SEVEN).



Figure 1.2.2 : Ville de Lausanne – Plan directeur du réseau de chauffage à distance (SI Lausanne).

1.3 Présentation du rapport

Le plan retenu pour le rapport suit la démarche évoquée ci-dessus. La présente introduction (Chapitre 1) est suivie par trois chapitres traitant respectivement les trois domaines cibles.

Le chapitre 2 est consacré aux *géstructures énergétiques* (GE), le chapitre 3 aux ressources en *aquifères profonds* (AP) et le chapitre 4 à la *géothermie haute énergie* (HE). Chacun de ces chapitres forme un tout, avec des conclusions et des recommandations spécifiques. Du point de vue de la présentation, les trois chapitres suivent le même plan, à savoir une première partie rappelant brièvement l'état de développement de la technologie concernée, suivie de l'étude du potentiel, des conclusions et des références bibliographiques.

Le chapitre 5 synthétise les conclusions et les recommandations des trois chapitres précédents.

1.4 Organisation de l'étude

Les études ont été réalisées par le **Groupement PGV** (Potentiel Géothermique du canton de Vaud), composé de :

- **M. Jules WILHELM**, Ingénieur-conseil, Pully,
- **Dr. Gabriele BIANCHETTI**, ALPGEO, Hydrogéologues-Conseils, Sierre,
- **Dr. François-D. VUATAZ**, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Université de Neuchâtel.

Les tâches et les responsabilités au sein du groupement ont été réparties comme suit :

- *J. Wilhelm* : Direction du projet, GE, collaboration à HE
- *G. Bianchetti* : AP
- *F.-D. Vuataz* : HE, collaboration à AP

Les personnes et organismes suivants ont collaboré aux études :

- **Dr. Aymon Baud**, Directeur du Musée cantonal de géologie, Lausanne
- **Prof. Dominique-Marie Chapellier**, Université de Lausanne, Institut de Géophysique, Lausanne
- **Bureau technique Norbert**, Géologues-conseils, Lausanne
- **Prof. Marc Weidmann**, Jongny

Le *Dr. A. Baud* est intervenu en tant qu'expert concernant les structures géologiques du sous-sol, et a fait bénéficier le projet de ses conseils et par la mise à disposition des informations disponibles auprès du Musée géologique cantonal.

La *Prof. D.-M. Chapellier* a interprété les sondages électriques disponibles à l'Institut de Géophysique en vue de la définition de la structure du sous-sol sur des sites de développement de géostructures énergétiques.

Le *Bureau Norbert* a procédé à la caractérisation des conditions géologiques des sites de développement et a évalué leur adéquation à l'implantation de géostructures énergétiques.

Le *Prof. M. Weidmann* a apporté une importante contribution à l'étude des AP. Il a rédigé les paragraphes concernant la géologie régionale (3.6.2) et les aspects hydrologiques et géothermiques (3.6.3), a préparé une bibliographie commentée des documents géologiques, et a compilé les informations disponibles sur les forages profonds du canton et des régions limitrophes.

Les travaux ont en outre bénéficié de l'appui et des conseils des services cantonaux concernés, en particulier le **Service de l'aménagement du territoire**, le **Service des Eaux** et le **Service d'information du territoire**, en plus de la **Division de l'énergie du Service de l'environnement et de l'énergie**.

2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)

2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)

2.1 Introduction – Méthode de travail

Le présent chapitre 2 est consacré à l'évaluation du potentiel géothermique exploitable sur le territoire du canton de Vaud dans le domaine des géostructures énergétiques. La première partie, soit le point 2.2, comprend une présentation générale de la technologie des pieux énergétiques, en décrivant successivement le concept général du procédé, ses avantages et les méthodes de dimensionnement énergétiques. Cette partie inclut également des indications sur les aspects constructifs et se termine par la présentation de quelques exemples significatifs réalisés en Suisse au cours de ces dernières années.

La deuxième partie est consacrée à une évaluation du potentiel énergétique des géostructures à l'horizon 2014 (point 2.3). Partant d'une enquête réalisée auprès des entreprises de travaux spéciaux actives dans le canton, on a procédé à une projection de la production de chaleur et de froid sur une période de 10 ans, avec une estimation du taux de croissance du volume de construction et du pourcentage de géostructures pouvant être équipé en échangeur de chaleur.

Cette méthode d'évaluation apparaît à l'heure actuelle comme étant la plus fiable, car ni les informations sur les constructions projetées, ni celles relatives aux conditions géologiques et géotechniques ne sont d'un niveau suffisant pour savoir, à l'échelle d'une région, où des géostructures seront réalisées, même si l'on connaît les principales zones du canton avec un sous-sol de faible portance.

En 2002, une méthode d'évaluation, applicable à des zones de développement futures, a été développée pour estimer le potentiel d'utilisation de la chaleur terrestre au moyen des géostructures énergétiques. Cette méthode et son application à une série de pôles de développement cantonaux sont exposées dans la troisième partie de ce chapitre (point 2.4).

Le point 2.5 contient les conclusions et les recommandations quant à la suite à donner à la présente étude. Le chapitre s'achève par une liste des principales publications relatives aux géostructures énergétiques.

2.2 Les géostructures énergétiques

2.2.1 Concept général

Les *géostructures* sont des ouvrages d'appui ou de soutènement mis en place dans le sol ou en contact avec lui. Suivant le concept et la destination, on distingue les types suivants :

Pieux

- Pieux battus (pieux préfabriqués)
- Pieux moulés dans le sol

Parois

- Rideaux de pieux
- Parois moulées de fondation ou de soutènement
- Parois de fondation ou de soutènement préfabriqués

Dalles

- Dalles de fondation
- Dalles d'appui et de séparation dans le sol

En principe tous ces éléments et d'une façon générale toute construction en contact avec le sol peuvent être équipés en échangeur de chaleur géothermique. On les appelle alors des *géostrucures énergétiques*. Pour des raisons pratiques, ce sont les éléments en béton qui sont le mieux adaptés à ce rôle, car la conductivité thermique et la capacité de stockage font du béton un matériau de construction idéal pour des absorbeurs d'énergie thermique. En effet, à partir de 15 à 20 mètres sous la surface de la Terre, la température devient très rapidement constante, avoisinant sous notre climat une valeur de 9-11°C. Ce niveau de température autorise une utilisation thermique pour le chauffage de bâtiments en hiver et pour le refroidissement en été. L'énergie absorbée par les géostrucures est véhiculée par un fluide circulant dans un réseau de conduites dans le béton ou dans une cavité à l'intérieur du béton. Le schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol est visible à la figure 2.2.1. La figure 2.2.2. montre des pieux centrifugés avant battage.



Figure 2.2.1 : Schéma de principe d'un pieu énergétique moulé dans le sol avec sa cage d'armature et les conduites de circulation du fluide caloporteur.



Figure 2.2.2 : Pieux centrifugés déposés sur le chantier avant mise en place (photo GRAM SA).

Les conduites sont reliées à un collecteur qui alimente une ou plusieurs pompes à chaleur (Figure 2.2.3). Comme conduit caloporteur, on fait normalement appel à des tuyaux en matière synthétique. Dans le cas des géostructures préfabriquées et des éléments en béton coulés sur place, ces tuyaux sont fixés à la cage d'armature avant le bétonnage (Figures 2.2.4 et 2.2.5). Pour les pieux en béton centrifugé, les circuits de tubes sont placés dans la cavité centrale du pieu (Figure 2.2.6). L'espace restant est ensuite rempli avec un matériau ad hoc, possédant une bonne conductibilité thermique.

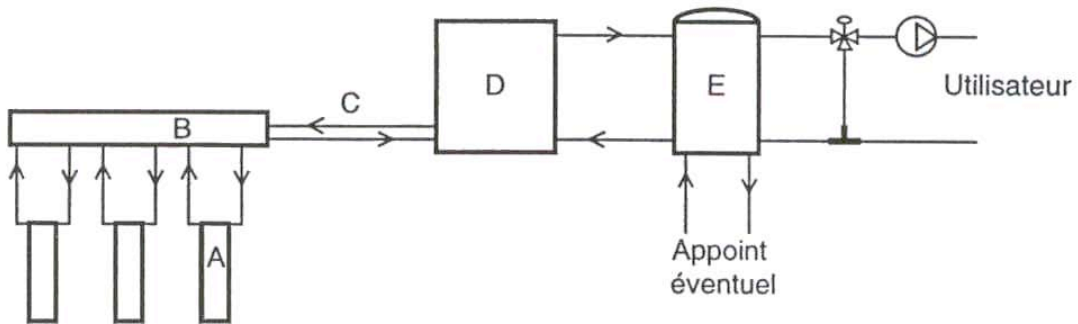


Figure 2.2.3 : Schéma de principe d'une installation de pieux énergétiques avec pompes à chaleur. A : pieux énergétiques, B : collecteur, C : conduites de liaison, D : pompe à chaleur, E : stockage tampon (Pahud, 2002).



Figure 2.2.4 : Conduites de circulation de fluide caloporteur fixées à la cage d'armature d'un pieu moulé.

Figure 2.2.5 : Mise en place de la cage d'armature d'une paroi moulée équipée de conduites de circulation de fluide caloporteur (photo Nägelebau, Röthis).



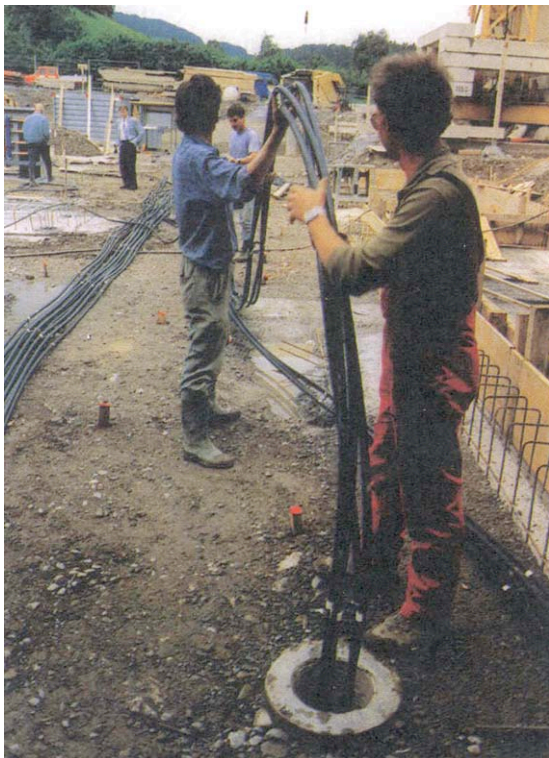


Figure 2.2.6 : Pose de la conduite de circulation du fluide caloporteur dans la cavité intérieure d'un pieu battu dans le sol (photo SACAC AG, Lenzburg).

L'installation fonctionne sur un cycle annuel, avec extraction de chaleur du sol pendant la saison de chauffage (injection de froid dans le sol) et une extraction de froid pendant la saison chaude (injection de chaleur dans le sol). Les puissances installées varient de quelques kW à plusieurs centaines de kW thermiques.

Les *pieux énergétiques* en béton armé ont en général un diamètre entre 40 cm et 1.50 mètre et leur longueur peut atteindre 30 m, voire plus. Les parois moulées sont le plus souvent réalisées avec une épaisseur de 60 cm et peuvent descendre à des profondeurs identiques à celles des pieux.

La capacité énergétique d'un pieu battu, d'un diamètre de 40 cm, représente une puissance thermique ou frigorifique de l'ordre de 30 à 50 W, suivant l'écartement des pieux et les caractéristiques du sous-sol, notamment. Chaque mètre de pieu produit ainsi entre 40 à 90 kWh d'énergie par an. Dans certains terrains, des puissances bien plus élevées sont envisageables. La distance idéale entre deux pieux énergétiques est de 4 à 6 m.

2.2.2 Projet et caractérisation thermique

Le concept d'un système de chauffage et/ou de refroidissement utilisant des géostructures énergétiques doit être établi très tôt dans un projet, puisque les pieux de fondation seront bien souvent mis en œuvre avant que les installations de chauffage et de ventilation ne soient dimensionnées. Le nombre de pieux échangeurs ou le volume des parois moulées doit déjà être connu, ce qui implique à la fois une bonne connaissance des propriétés thermiques du terrain, de l'hydrogéologie locale et du type de géostructure utilisé, ainsi que la connaissance en énergie du bâtiment et de sa conception énergétique, de manière à pouvoir intégrer dans le système les échangeurs énergétiques de façon adéquate.

Au niveau du concept *plusieurs paramètres* doivent être définis très tôt, dont voici les principaux :

- coefficient de performance annuel des pompes à chaleur,
- puissance et quantité d'énergie spécifique annuelle délivrées par les géostructures,
- besoin d'isolation des interfaces entre les divers constituant du système en contact avec le sol,
- régime hydraulique au sein du système de circulation des fluides.

Les principaux *paramètres géologiques et hydrogéologiques* à déterminer sont la capacité thermique volumétrique, la conductibilité thermique, et la perméabilité du terrain. Pour la caractérisation thermique d'un système de géostructures énergétiques, on doit connaître sa résistance thermique et sa capacité thermique. Ces paramètres dépendent notamment du type de géostructure utilisé, de ses dimensions, du nombre et de l'arrangement spatial des tubes incorporés, du régime d'écoulement du fluide dans les tubes, et de la conductibilité thermiques des matériaux utilisés.

Le *dimensionnement thermique* d'un système de géostructures énergétiques s'effectue au moyen de l'outil de simulation PILESIM, développé à l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Il permet d'évaluer rapidement les performances thermiques du système, le potentiel thermique des géostructures et différents concepts du système. Le diagramme de la Figure 2.2.7 résume les éléments intervenants dans le calcul par PILESIM du bilan énergétique global d'un système à pieux énergétiques. La synthèse des principaux résultats numériques du prédimensionnement d'un avant-projet est visible à la Figure 2.2.8. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu énergétique.

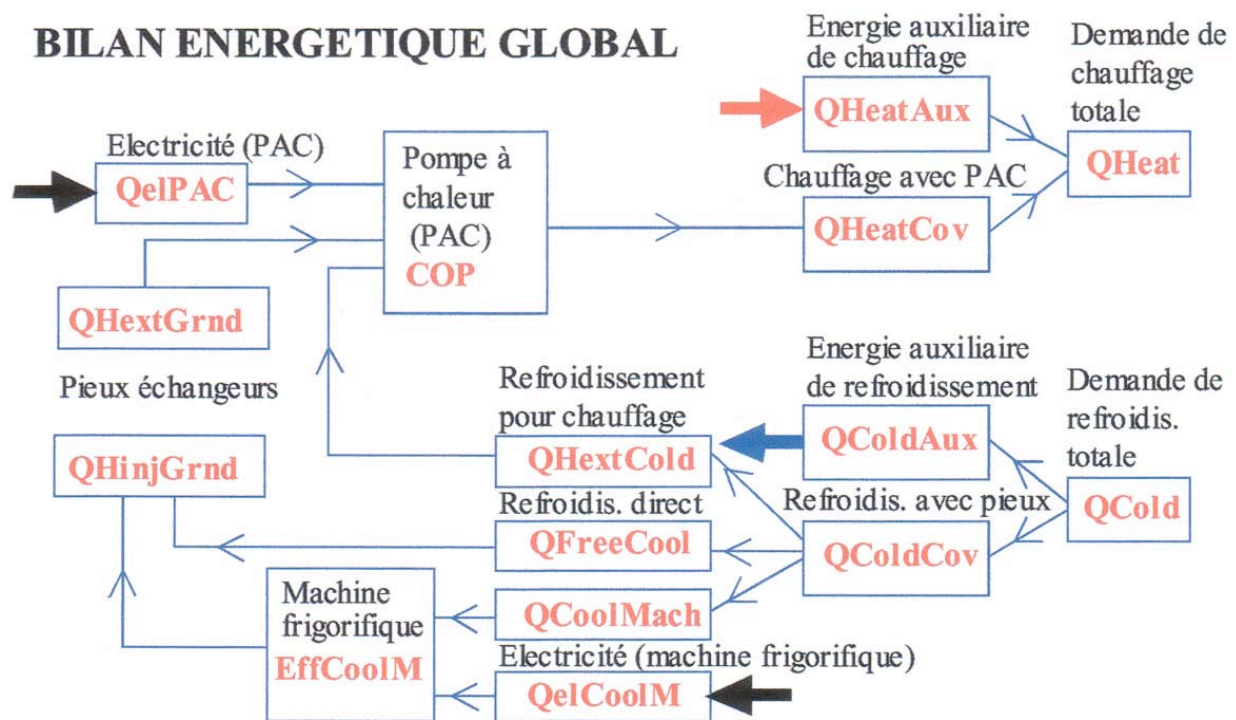
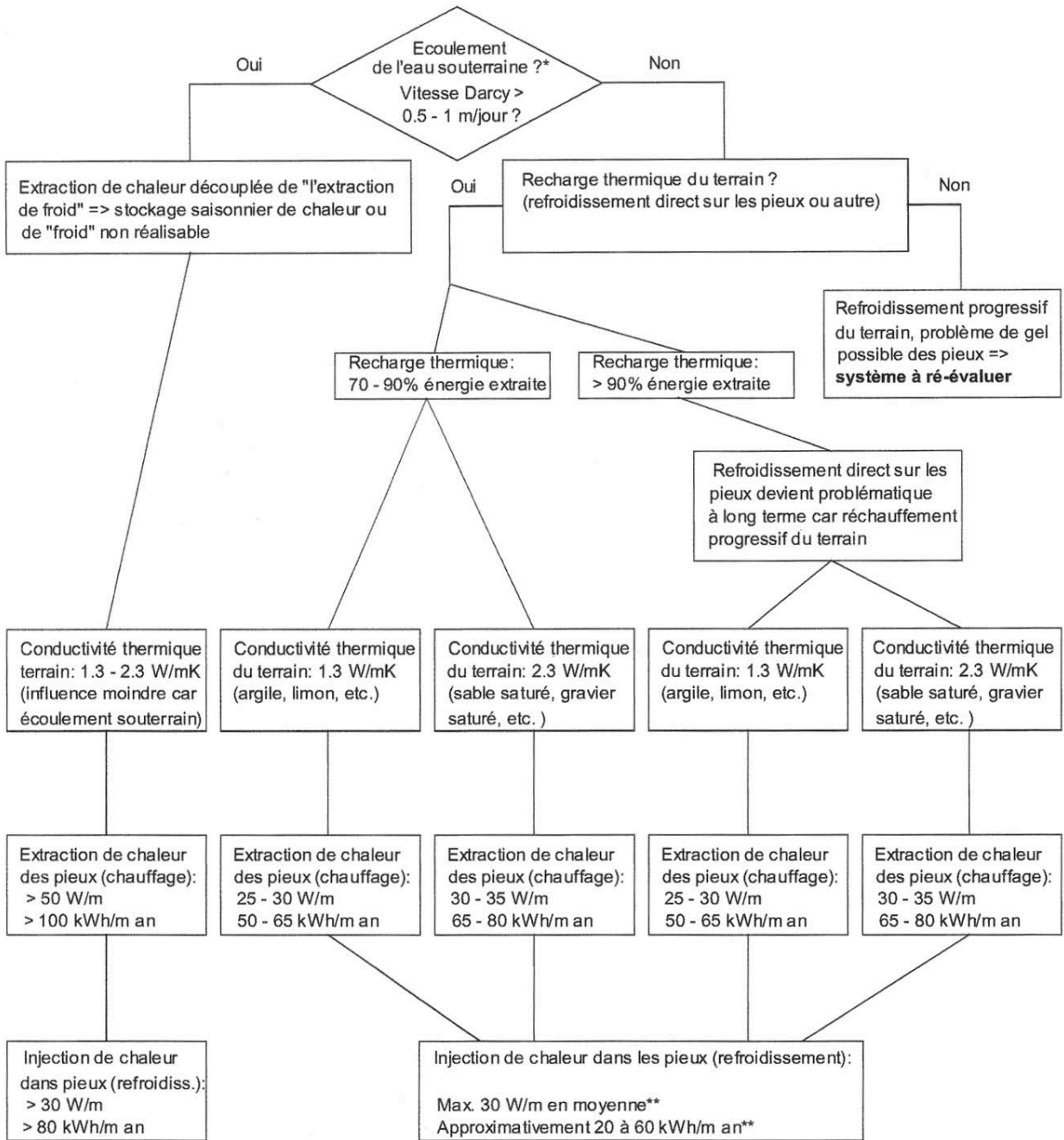


Figure 2.2.7 : Etablissement du bilan énergétique global d'un système à pieux énergétiques à l'aide de PILESIM (Pahud, 2002).



* il suffit que l'eau souterraine s'écoule dans une couche traversée par les pieux échangeurs, même mince relativement à la profondeur de ces derniers, pour que l'effet soit significatif.

** si la recharge thermique du terrain excède 90% de l'énergie prélevée, la température du terrain aura tendance à augmenter à long terme, ce qui limitera la recharge thermique si elle est réalisée par du refroidissement direct sur les pieux.

- avec des pieux de diamètre plus grand (> 40 cm), l'espacement est généralement plus grand, et les performances indiquées ci-dessus peuvent être revues à la hausse (jusqu'à 50% pour des pieux de 1 m de diamètre).

- les valeurs données ci-dessus correspondent à un système monovalent. Pour un fonctionnement en ruban des pieux, la puissance par mètre de pieu sera plus basse, et la quantité d'énergie par mètre de pieu plus grande.

Figure 2.2.8 : Synthèse des principaux résultats numériques du prédimensionnement d'un avant-projet. Les puissances et énergies indiquées sont données par mètre linéaire de pieu énergétique (Fromentin, 1997).

Ce programme de simulation a été utilisé avec succès en Suisse sur pratiquement tous les ouvrages importants au cours de ces dernières années.

Les effets induits dans le système sol-pieux par les *cycles de chargement-déchargement de la température* affectent dans une certaine mesure la faculté de *portance mécanique des pieux* de fondation. L'influence réelle de ce phénomène est étudiée depuis plusieurs années par le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL. Les recherches théoriques sont validées par des observations sur une installation d'essai en vraie grandeur. Les conclusions tirées à ce jour permettent de dire que les effets thermiques ont une réelle importance sur le comportement des fondations profondes, et qu'il convient d'en tenir compte dans le dimensionnement. Toutefois on constate que ceci ne limite en rien la faisabilité de telles installations.

Pour l'établissement d'un avant-projet, il convient de tenir compte de quelques recommandations simples, qui doivent ensuite être vérifiées au niveau du dimensionnement final :

- pour des raisons de statique et de vieillissement prématuré des géostructures, la température du fluide circulant dans les tubes ne devrait jamais être inférieure à zéro degré,
- une recharge thermique du terrain est indispensable en l'absence d'écoulement de l'eau souterraine,
- il est recommandé de combiner la recharge thermique du terrain avec une production de froid en été,
- une recharge thermique n'est pas nécessaire si la nappe souterraine s'écoule avec une vitesse suffisante, soit de l'ordre de 1 m/jour,
- la base du bâtiment devrait être isolée de manière à éviter les problèmes de condensation dans les locaux en contact avec le terrain.

2.2.3 Avantages d'un système à géostructures énergétiques

En matière de coût de l'énergie, la production du froid combinée avec celle de la chaleur est particulièrement économique. Une installation couplée à un système de géostructures énergétiques est sur ce point comparable à un système conventionnel de chauffage et de refroidissement.

Un autre avantage est la réduction d'énergie pour le chauffage. Le refroidissement direct avec les pieux échangeurs demande moins d'énergie électrique qu'une machine frigorifique. L'énergie électrique économisée pendant l'été pour le refroidissement permet de compenser celle nécessaire au fonctionnement de la pompe à chaleur en hiver.

S'agissant de géothermie, le recours à des géostructures énergétiques présente naturellement tous les autres avantages de cette ressource indigène et pratiquement inépuisable, comme l'absence d'émission de gaz à effet de serre, faible encombrement des équipements et exploitation particulièrement aisée.

2.2.4 Réalisations

Les origines de cette technique remontent au milieu des années 80. Depuis lors, un grand nombre de bâtiments de toute nature, situés essentiellement dans le nord-est de la Suisse, a été construit selon ce système. Un des premiers et des plus importants est le centre industriel de l'entreprise Pago, dans le canton de St. Gall, qui repose sur 570 pieux énergétiques et en utilise le potentiel calorifique (Figure 2.2.9).



Figure 2.2.9 : Bâtiment industriel reposant sur 570 pieux énergétiques fonctionnant comme source de chaleur et de froid. 1 : Pieux énergétiques, 2 : Conduites de raccordement, 3 : Collecteur primaire, 4 : Collecteur principal, 5 : Centrale énergétique (Lippuner AG, Grabs).

Un exemple récent est la nouvelle jetée en construction à l'aéroport de Kloten, avec ses 350 pieux moulés de 1 à 1,5 m de diamètre et longs de 30 m, dont une grande partie équipée en échangeur géothermique (Figure 2.2.10). Plus près de chez nous, le bâtiment scolaire de Fully, en Valais, et ses 40 pieux énergétiques, en service depuis trois ans et qui, selon le témoignage des récents tests, présente un bilan énergétique remarquable (Figure 2.2.11). Mais le système est également bien adapté à des constructions de petite et de moyenne taille, comme en témoignent les dizaines de réalisations de ce genre en service depuis des années. Un bon exemple en est le bâtiment locatif de Willerzell, dans le canton de Schwyz, où les pieux énergétiques fonctionnent au sein d'un système énergétique comprenant notamment l'énergie solaire et la chaleur de l'environnement (Figure 2.2.12).

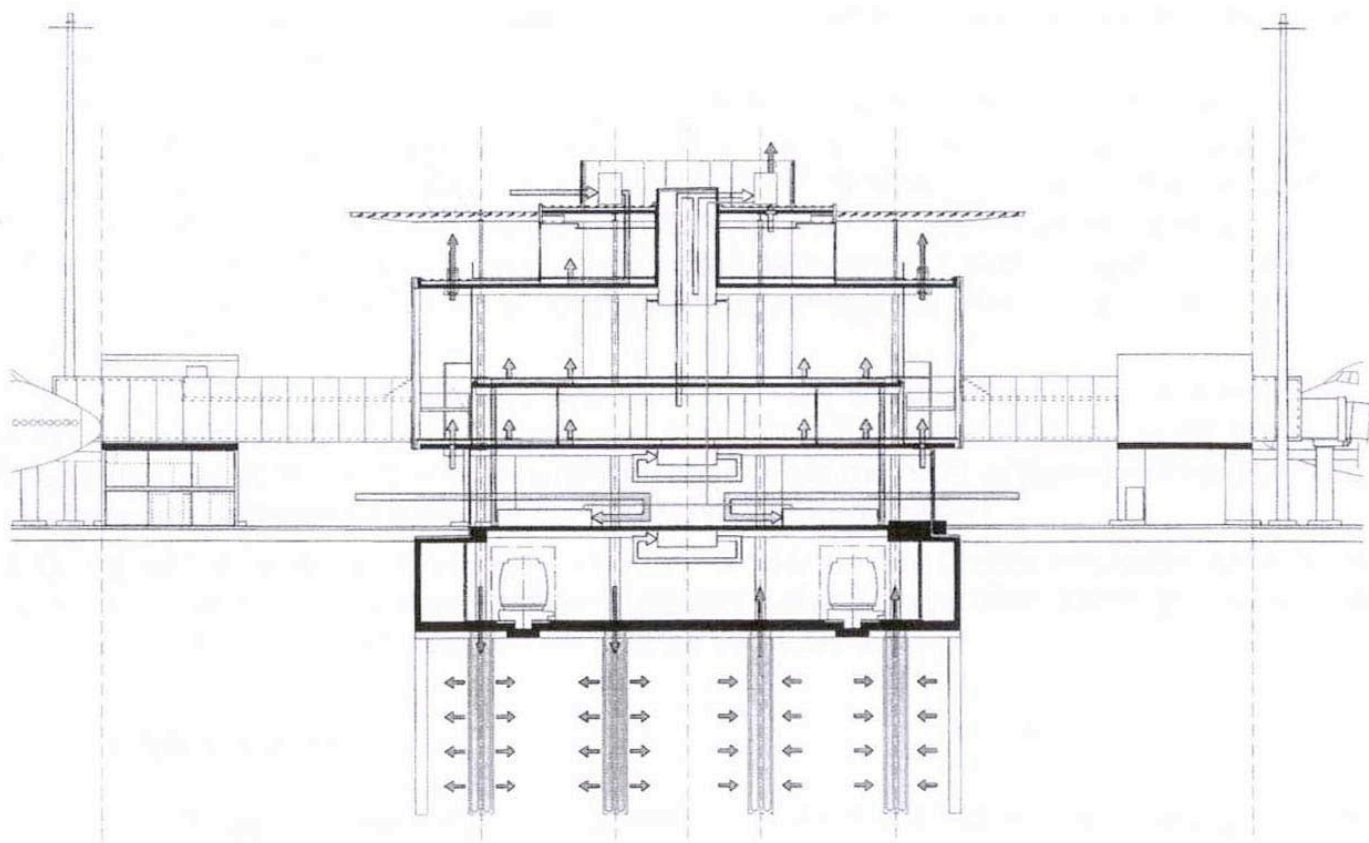


Figure 2.2.10 : Coupe en travers de la nouvelle jetée à l'aéroport de Kloten indiquant la disposition des pieux énergétiques (Hubbuch, 2001).



Figure 2.2.11 : Vue du nouveau bâtiment scolaire de Fully, en Valais, équipé de 40 pieux énergétiques.



Figure 2.2.12 : Vue d'un bâtiment locatif reposant sur des pieux énergétiques à Willerzell, dans le canton de Schwyz (photo H. Schönbächler, Willerzell).

2.2.5 Références

Des informations détaillées relatives à la conception, la réalisation et le fonctionnement des géostructures énergétiques figurent dans les documents de la liste de référence du chapitre 2.6.

2.3 Calcul du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Vaud à l'horizon 2014

2.3.1 Introduction

Le calcul du potentiel se base sur une évaluation du pourcentage de géostructures (GS) réalisé annuellement, susceptible d'être équipée en échangeur de chaleur. La quantité moyenne de pieux et de parois exécutée par an ressort d'une enquête effectuée auprès des entreprises de travaux spéciaux. La quantité de chaleur et de froid produite annuellement est calculée au moyen de valeurs spécifiques tirées de l'expérience.

2.3.2 Enquête auprès des entreprises

En octobre 2002, un questionnaire a été envoyé à 10 entreprises de travaux spéciaux actifs dans le canton en les invitant à communiquer les quantités de géostructures réalisées au cours des trois années 1999 à 2001, selon les catégories d'ouvrages suivants :

- Pieux de fondation moulus ou battus, PF (longueur totale, mètres)
- Rideaux de pieux moulus ou battus, RP (surface totale, mètres carrés)
- Parois en tranchée pré excavée, PT (surface totale, mètres carrés)

Cette subdivision a été retenue pour pouvoir obtenir des chiffres significatifs sans trop compliquer la tâche des personnes chargées d'établir les statistiques.

La moitié des entreprises consultées a fourni des renseignements exploitables en retournant le formulaire d'enquête dûment rempli. Trois n'ont pas répondu, et deux n'ont pas eu d'activité dans ce domaine pendant la période examinée.

Le résultat de l'enquête figure au tableau 2.3.1. En valeur annuelle moyenne, les chiffres sont les suivants :

- Pieux de fondation (PF) : 18'583 m
- Rideaux de pieux (RP) : 4'208 m²
- Parois en tranchées (PT) : 6'900 m²

Tableau 2.3.1 : Production annuelle de géostructures – Résultats de l'enquête auprès des entreprises - Octobre 2002.

Pieux battus et pieux moulés [m]

Entreprise	1999	2000	2001	Moyenne
1	4'800	3'960	3'900	4'220
2	9'550	16'600	7'900	11'350
3	-	1'700	-	567
4	1'976	540	1'823	1'446
5	700	800	1'500	1'000
Total	17'026	23'600	15'123	18'583

Rideaux de pieux battus ou moulés dans le sol [m2]

Entreprise	1999	2000	2001	Moyenne
1	2'400	4'150	1'975	2'842
2	-	-	-	-
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	2'300	1'800	-	1'366
Total	4'700	5'950	1'975	4'208

Parois en tranchée (moulées ou préfabriquées) [m2]

Entreprise	1999	2000	2001	Moyenne
1	-	-	-	-
2	2'000	5'000	6'300	4'433
3	-	-	-	-
4	1'600	1'600	-	1'067
5	3'000	-	1'200	1'400
Total	6'600	6'600	7'500	6'900

2.3.3 Ajustement des quantités

Pour tenir compte de la production des autres entreprises, celles n'ayant pas répondues et celles qui auraient été omises, on augmentera ces valeurs de 100%, ce qui donne :

Quantités totales :

- PF : 37'166 m
- RP : 8'416 m²
- PT : 13'800 m²

Ces données incluent l'ensemble des constructions de ce type, sans égard à leur destination, élément de fondation ou de soutènement, ouvrage de génie civil ou en relation avec une construction consommatrice de chaleur. On peut estimer que la moitié est réalisée à proximité ou dans le cadre d'une telle construction, on aura donc :

Quantités théoriques :

- PF : 18'583 m
- RP : 4'208 m²
- PT : 6'900 m²

En réduisant ces valeurs de 10%, correspondant aux volumes inactifs, on obtient :

Quantités actives :

- PF : 16'900 m
- RP : 3'825 m²
- PT : 6'270 m²

Les valeurs ci-dessus correspondent aux quantités totales de géostructures susceptibles d'être équipées annuellement en échangeur thermique.

2.3.4 Estimation des quantités en 2014

On admet qu'à l'horizon 2014, soit en l'espace de 10 ans, on parviendra à équiper en échangeur thermique la moitié des géostructures potentiellement disponibles.

Quantités de GE en 2003

- PF : 8'450 m
- RP : 1'910 m²
- PT : 3'130 m²

Avec un accroissement annuel de 2% du volume de construction, on arrive à une augmentation de l'ordre de 24%, ce qui donne en 2014 les chiffres suivants :

Quantités de GE en 2014 (accroissement annuel 2%)

- PF : 10'560 m
- RP : 2'390 m²
- PT : 3'880 m²

2.3.5 Production de chaleur et de froid en 2014

Pour le calcul de la production annuelle de chaleur et de froid, on retient les valeurs spécifiques suivantes :

- Production annuelle de chaleur par mètre de pieu : 100 kWh/m · an
- Production annuelle de froid par mètre de pieu : 60 kWh/m · an
- Production annuelle de chaleur par mètre carré de paroi (RP et PT) : 70 kWh/m · an
- Production annuelle de froid par mètre carré de paroi (RP et PT) : 50 kWh/m · an

Ces valeurs sont des moyennes statistiques en vue d'une première évaluation du potentiel calorifique attendu. Comme indiqué plus haut, elles peuvent varier assez fortement en fonction de divers paramètres, tels la qualité des sols, la présence d'une nappe phréatique, la disposition des ouvrages, etc. On peut ainsi calculer la quantité de chaleur et de froid produite en 2014. On admettra que seule la moitié des géostructures énergétiques sera équipée pour la production de froid.

- Production de chaleur par les pieux énergétiques en 2014 : 1'056'000 kWh
- Production de froid par les pieux énergétiques en 2014 : 317'000 kWh
- Production de chaleur par les parois dans le sol en 2014 (RP et PT) : 439'000 kWh
- Production de froid par les parois dans le sol en 2014 (RP et PT) : 157'000 kWh

Ainsi la quantité totale de chaleur et de froid produite en 2014 par l'ensemble des géostructures énergétiques sera, en chiffres ronds, de :

- Chaleur : 1'500'000 kWh
- Froid : 474'000 kWh

Sur les constructions récentes, le coefficient de performance annuelle totale d'une installation est aujourd'hui de l'ordre de 3.0. Grâce à des améliorations attendues au cours des prochaines années, ce coefficient devrait, à l'horizon 2014, se situer aux alentours de 4.0, ce qui signifie que les installations de GE, couplées à une pompe à chaleur, délivreront alors quelques 6'000'000 de kWh de chaleur par an.

En résumé, sur la base des hypothèses ci-dessus et en admettant que le froid est produit entièrement par free cooling, les quantités d'énergie produites annuellement en 2014 sont représentées, en chiffres ronds, dans le tableau 2.3.2.

Tableau 2.3.2 : Quantités annuelles de chaleur et de froid produites en 2014.

Quantité annuelle de chaleur :	6'000'000 kWh
Quantité annuelle de froid (free cooling) :	500'000 kWh

2.4 Zones potentielles pour géostructures énergétiques

2.4.1 Introduction

A l'heure actuelle, il n'existe pas d'informations suffisantes permettant de déterminer, à l'échelle du canton, où des constructions nécessitant des travaux spéciaux de fondation, pieux ou parois de soutènement, seraient à réaliser.

En ce qui concerne les *conditions du sous-sol*, les documents disponibles, cartes géologiques au 1 : 25'000 et cartes géotechniques au 1 : 100'000 ne donnent pas d'informations suffisamment détaillées sur la structure et les caractéristiques mécaniques des terrains. Tout au plus indiquent-ils les zones avec des terrains connus comme étant de faible portance du point de vue fondation des bâtiments. Il s'agit principalement des terrains limoneux et/ou argileux, comme la plaine de l'Orbe, la vallée de la Broye entre Lucens et le lac de Morat, la plaine du Rhône entre Bex et Villeneuve, et la région de la Venoge, principalement entre Ecublens et Morges (Figure 2.4.1). Toutefois, à l'intérieur de ces régions même, il existe une grande diversité tant en ce qui concerne la nature et la composition des sols, que leur structure, en particulier l'épaisseur des couches et leur consistance. En dehors de ces régions, il existe des zones similaires, d'extension restreinte (Vallée de Joux, pied du Jura, etc.).

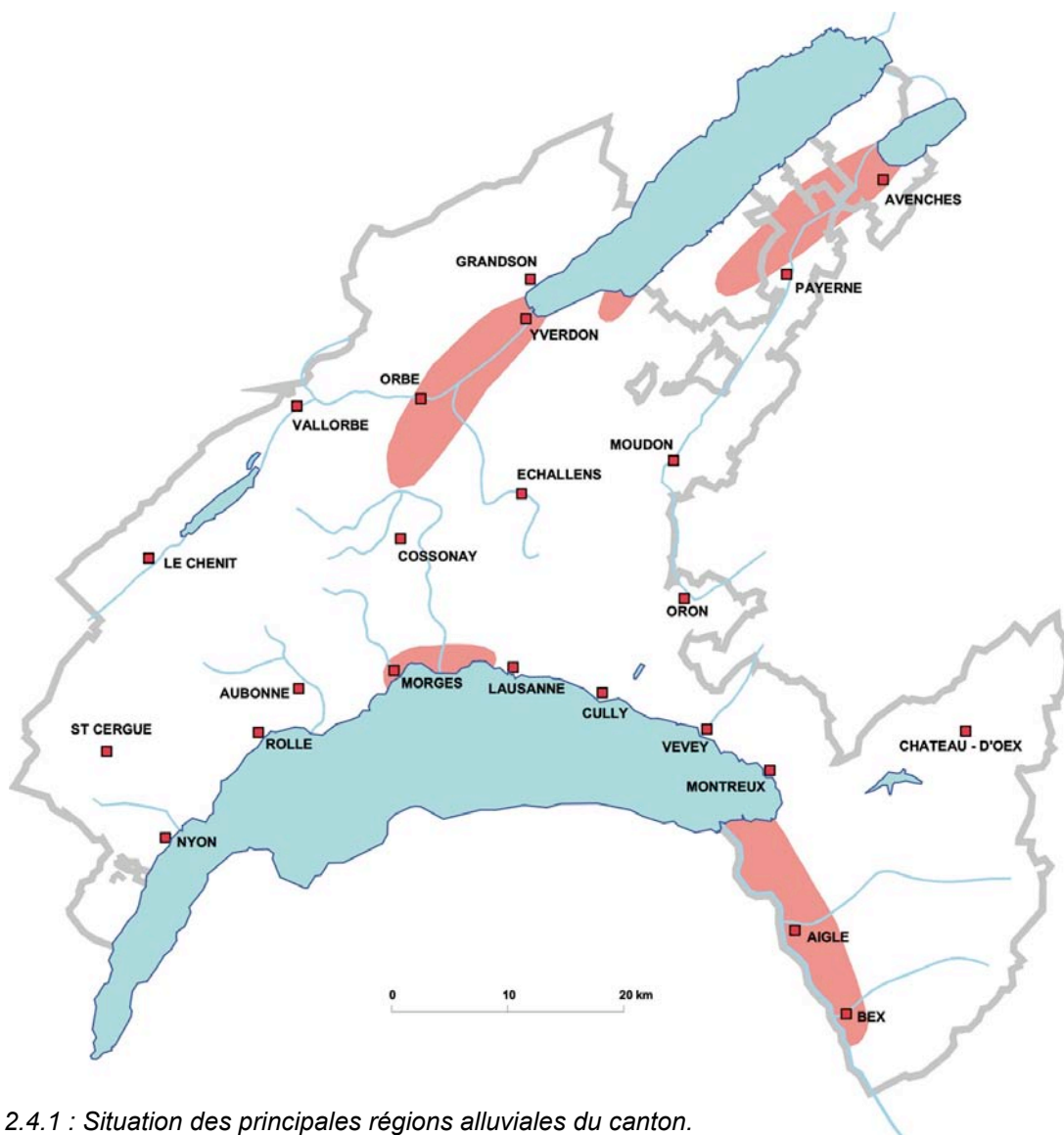


Figure 2.4.1 : Situation des principales régions alluviales du canton.

Dans le domaine des *constructions projetées*, seuls les plans de zones et les plans d'aménagement communaux et cantonaux permettent d'estimer le genre de construction réalisable sur un site donné. Fort heureusement, au cours de ces années passées, les autorités cantonales ont procédé à un recensement des secteurs possédant un potentiel de développement intéressant, appelées Pôles de développement, ce qui a permis d'en identifier un certain nombre et d'évaluer les possibilités d'y réaliser des géostructures énergétiques. A cet effet on a eu recours à une méthode développée récemment à l'EPFL.

Dans ce qui suit, on présentera brièvement la méthode en question, avant de l'appliquer aux Pôles de développement sélectionnés, dans le but d'une part d'évaluer la proportion de zones intéressées et d'autre part de démontrer les possibilités d'application de la méthode, par exemple dans le cadre d'une procédure administrative accompagnant la mise en valeur d'un secteur de développement.

2.4.2 Méthode d'évaluation

Présentation générale

Une méthode d'évaluation du potentiel d'un site à y réaliser des constructions exploitant le potentiel calorifique de la terre par l'intermédiaire de géostructures énergétiques a été élaborée en 2002 dans le cadre d'un travail de diplôme de troisième cycle organisé par le Laboratoire de géologie de l'EPFL.

L'objectif du travail consistait à définir les critères pour l'identification et la sélection des zones potentielles, ce qui devrait permettre que pour chaque nouveau projet comprenant des géostructures, la possibilité de les équiper en échangeurs de chaleur soit prise en compte. Ces critères doivent par la suite également servir de base lors de l'établissement de *cartes* d'utilisation de la chaleur du sol par les géostructures énergétiques.

La première partie du travail consistait à définir les différents critères permettant l'identification des zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques, et ce compte tenu des divers domaines impliqués, à savoir :

- Géologie et hydrogéologie
- Géotechnique et mécanique des sols
- Géothermie et transmission de chaleur
- Travaux spéciaux de fondation
- Aménagement du territoire
- Planification énergétique
- Protection de l'environnement

Dans la deuxième partie, ces critères ont été appliqués à deux sites pilotes dans le canton de Genève.

Les critères d'évaluation

Les critères indiquant la possibilité d'équiper une construction projetée en géostructures énergétiques sont de trois sortes, à savoir :

- Critères conditionnant la *réalisation de géostructures*
- Critères conditionnant l'équipement des géostructures en *échangeurs de chaleur*
- Critères pouvant *limiter la réalisation* de géostructures énergétiques

Le premier critère est censé apporter la réponse à la question de savoir si, sur un site donné, des géostructures peuvent ou doivent être envisagées pour une construction projetée. Le genre de construction réalisable est défini par le plan d'aménagement du territoire, alors que le type

de fondation ou de soutènement dépend des caractéristiques mécaniques et hydrauliques du sous-sol.

Le deuxième critère, celui qui permet de savoir si, sur un site donné, des géostructures sont susceptibles d'être équipées en échangeurs de chaleur, est conditionné par les caractéristiques thermiques et hydrogéologiques du sous-sol (présence d'une nappe d'eau souterraine). La Figure 2.4.1 donne, à titre d'exemple, la synthèse des différents cas selon la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine et les valeurs d'extraction et d'injection de chaleur, en fonction de la conductibilité thermique du sous-sol.

En ce qui concerne les critères susceptibles de limiter, voire d'exclure la réalisation de géostructures énergétiques, on peut citer la protection des nappes souterraines, les effets thermiques au niveau du sous-sol, le danger de formation de barrages hydrauliques et les restrictions imposées à l'exécution des travaux spéciaux de fondation.

La méthode élaborée passe en revue l'ensemble de ces critères, et donne le cadre dans lequel ils doivent être analysés. La synthèse des divers critères et l'évaluation de leur impact sur les possibilités de réaliser des géostructures énergétiques en un lieu déterminé sont résumées dans le tableau 2.4.1.

Tableau 2.4.1 : Synthèse des critères et leur influence sur les possibilités de réalisation de géostructures énergétiques (Joliquin, 2002).

		Critères	Plutôt favorable à la réalisation de géostructures énergétiques	Plutôt défavorable à la réalisation de géostructures énergétiques
Critères conditionnant la réalisation de géostructures	Aménagement du territoire (genre de construction)		Bâtiment locatif et administratif de taille importante	Bâtiment de petite taille, villa
	Caractéristiques mécaniques du sol	Charge admissible par le sol	De peu supérieure ou inférieure à la charge du bâtiment	Nettement supérieure à la charge du bâtiment
		Tenue du sol à l'excavation	Ne permettant pas une excavation sans soutènement	Permettant une excavation sans soutènement
Critères conditionnant l'équipement des géostructures en échangeurs de chaleur	Conductibilité thermique		Supérieure à environ 1.3 [W/mK]	Inférieure à environ 1.3 [W/mK]
	Eau souterraine		Présence d'eau	Absence d'eau
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas sans recharge thermique		Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]
	Vitesse d'écoulement de l'eau souterraine pour un cas avec recharge thermique		Inférieure à 0.5 - 1 [m/jour]	Supérieure à 0.5 - 1 [m/jour]
Critères pouvant limiter la réalisation de géostructures énergétiques	Protection des nappes souterraines		Autorisé dans les zones S3 de protection des eaux souterraines et les secteurs de protection des eaux	Non autorisé dans les zones S1 et S2 de protection des eaux souterraines et dans les périmètres de protection des eaux souterraines
	Effets thermiques		Perturbation moyenne annuelle de la température du sol inférieure à 1°C	Perturbation moyenne annuelle de la température du sol supérieure à 1°C
	Barrages hydrauliques		Faible modification de l'écoulement souterrain	Forte modification de l'écoulement souterrain
	Exécution des travaux		Faibles vibrations, peu de bruit	Beaucoup de vibrations et de bruit

Récapitulation de la méthode d'évaluation

La Figure 2.4.2 récapitule la marche à suivre dans l'application des critères définis ci-dessus pour connaître les possibilités de réaliser des géostructures énergétiques. On constate que les critères favorables sont les zones permettant la réalisation de construction de grande taille, dans des terrains de faible portance sur une épaisseur dépassant 5 à 8 mètres sous le niveau de fondation, une conductibilité thermique du sous-sol supérieure à environ 1.3 W/mK et la présence d'une nappe d'eau en écoulement. Les critères d'exclusion concernent essentiellement la présence d'une nappe d'eau protégée ou le risque de création d'un barrage hydraulique, ainsi que les autres contraintes environnementales liées aux travaux d'exécution (gabarit, bruit, accès, etc).

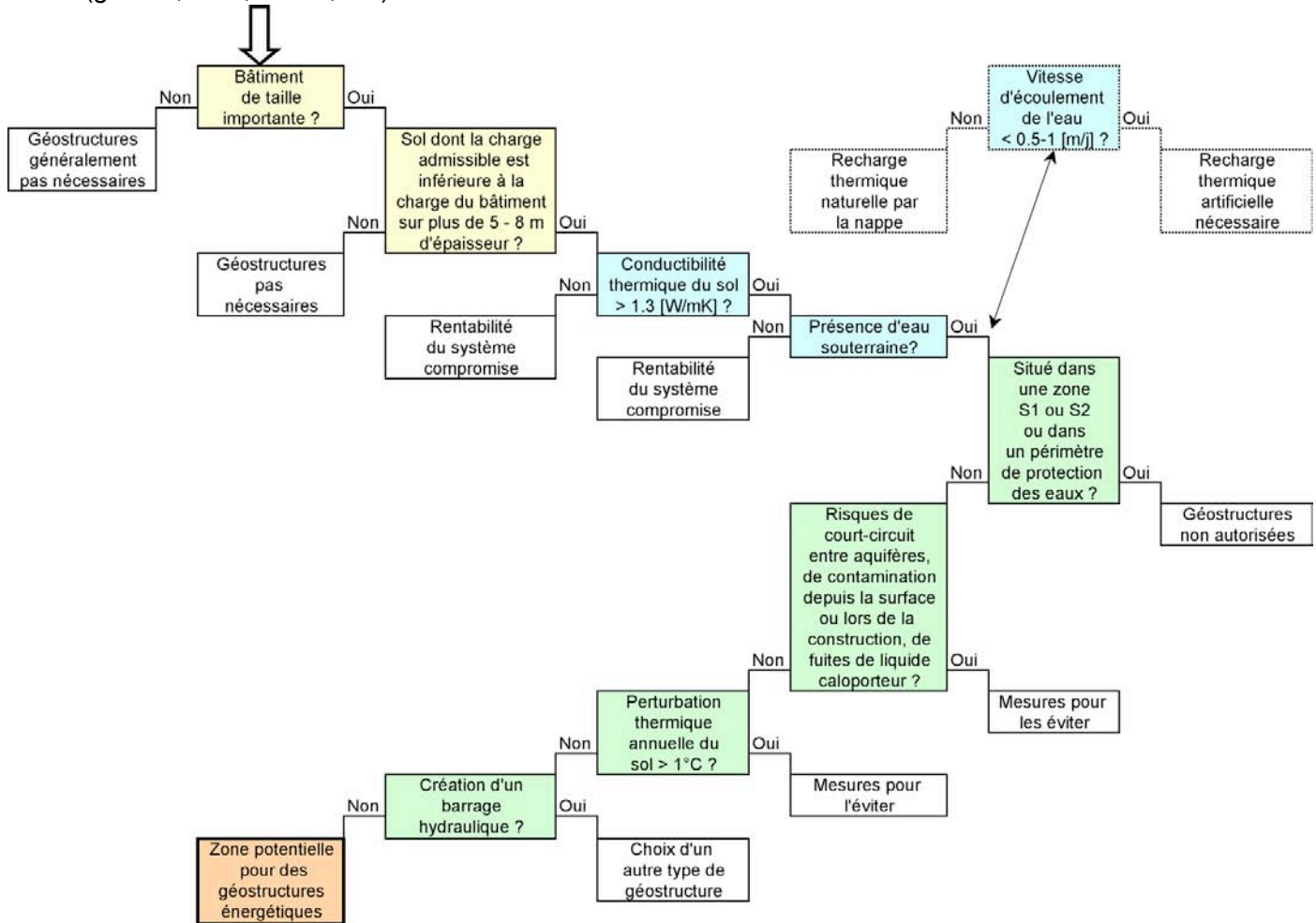


Figure 2.4.2 : Organigramme permettant d'identifier et de caractériser les zones potentielles pour la réalisation de géostructures énergétiques (Joliquin, 2002).

Application de la méthode

Dans une deuxième étape de l'étude, la méthode d'évaluation a été appliquée avec succès sur une série de zones de développement. L'outil mis au point s'est avéré très pratique pour servir de guide aux pouvoirs publics dans la définition des critères d'aménagement de zones de développement. Il est ainsi apparu judicieux d'envisager la prise en compte des possibilités d'extraction de la chaleur de la terre au moyen de géostructures dans les futurs plans directeurs ou dans le concept énergétique des plans localisés de quartier. C'est la raison pour laquelle la méthode a été retenue dans la présente étude pour caractériser les principaux pôles de développement du canton. La démarche suivie et les résultats des investigations sont décrits ci-après.

2.4.3 Investigation des pôles de développement cantonaux

Dès 1997, 19 pôles de développement économique ont été identifiés et caractérisés dans le canton dans le but d’y favoriser l’implantation de zones industrielles par des mesures d’incitation (Figure 2.4.3). Celles-ci comprennent des mesures d’aménagement du territoire, des mesures foncières, des mesures de gestion et de promotion et des mesures fiscales. Les périmètres des zones et leur état de développement étant bien définis, il devenait possible d’appliquer la méthode d’évaluation exposée ci-dessus pour déterminer les possibilités de réalisation de géostructures énergétiques.

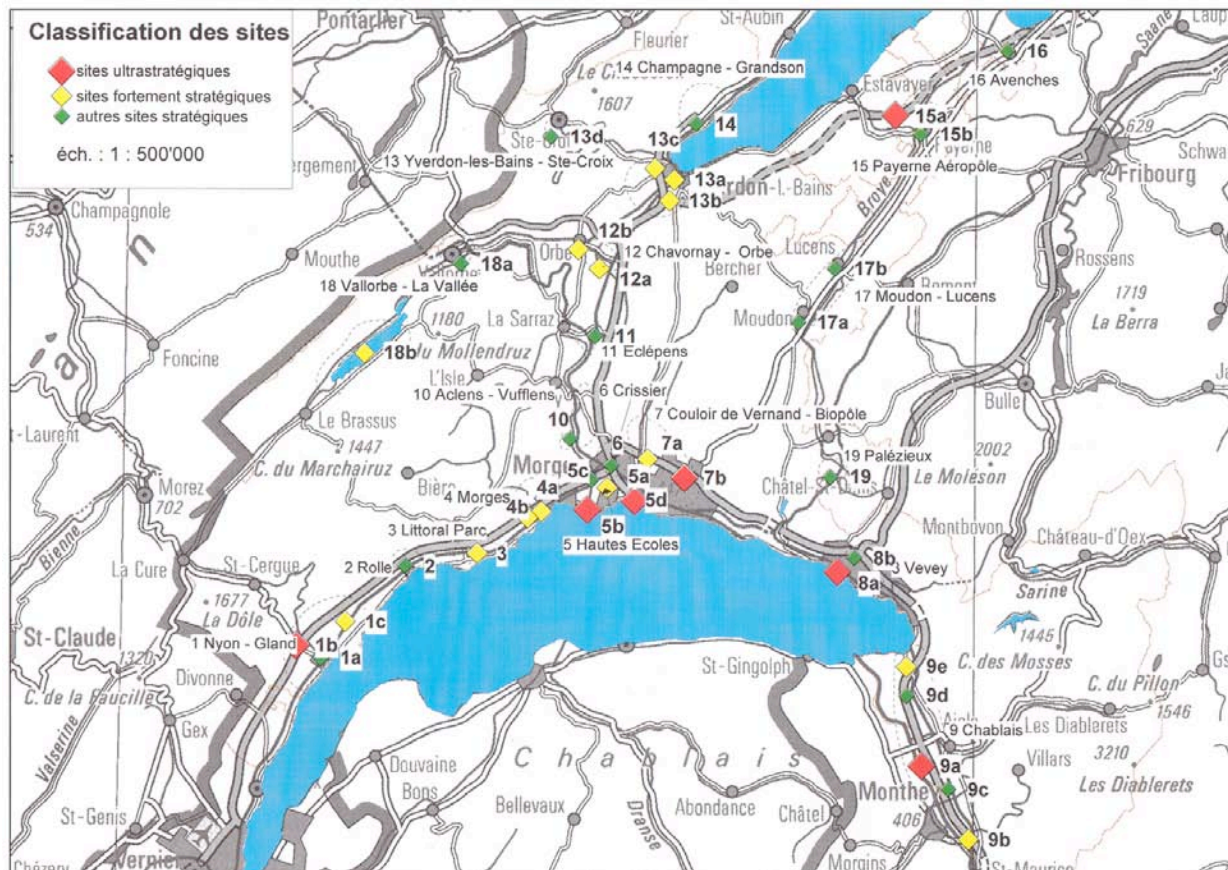


Figure 2.4.3 : Carte des sites stratégiques (SAT, 2002).

Dans un premier temps, on a procédé avec les services cantonaux à une sélection des sites en fonction de leur état de développement et des priorités liées aux contraintes économiques et administratives. Il en est résulté que 9 d’entre eux gardaient à l’heure actuelle un intérêt quant au but recherché, les autres se trouvaient en général dans une phase de développement trop avancé.

Dans un deuxième temps, on a mené une enquête auprès des services cantonaux, l’Institut de géophysique de l’Université de Lausanne et des bureaux privés, concernant les caractéristiques géologiques du sous-sol. Les informations recueillies ont permis de traiter 5 zones de développement, soit les sites 7 b (Biopôle Lausanne-Vennes), 9 c (Chablais Ollon), 9 e (Chablais Ollon), 12 b (Orbe) et 14 a (Basse vallée de l’Arnon).

Les résultats des investigations sont résumés dans les tableaux 2.4.2 à 2.4.6. Les figures 2.4.4 et 2.4.5 représentent les plans de situation de deux des cinq zones (nos 7 b et 9 e) avec l’indication des forages ayant servis à la définition des conditions géologiques.

Tableau 2.4.2 : Pôles de développement – Zones potentielles pour géostructures énergétiques.

Fiche signalétique
Site 7b : Biopôle : Lausanne-Vennes

Coordonnées approximatives :

inférieur gauche : 540'000 / 154'500

supérieur droit : 540'060 / 155'000

Sources :

- Carte géologique 1 : 25'000, feuille Lausanne
- Archives Norbert :
 - Carte géologique et profil en long, Autoroute N9, 1966
 - Profils en long géologiques et forages, Métro M2 Lot E, 1999
 - Forages, études diverses

Données géologiques et hydrogéologiques :

Site divisé en deux zones (voir plan de situation, figure 2.4.4) :

Zone nord : Molasse de Lausanne (épaisses séries de marnes et grès) sous faible couverture de moraine limono-argileuse, dure. Par endroits, remblais importants (jusqu'à 10 m d'épaisseur), de consistance dure.

En général forages secs, sauf dans le secteur du carrefour des Croisettes où l'eau est atteinte entre 3 et 5 m de profondeur dans deux forages.

Zone sud : Couverture morainique sur Molasse de Lausanne. L'épaisseur de la couverture diminue en direction du nord. Elle passe de plus de 16 m à l'extrémité sud-ouest à moins de 2 m à la limite avec la molasse subaffleurante au nord. Il s'agit d'une moraine graveleuse formée de limons graveleux ou sableux dont la consistance est en général plutôt ferme à dure.

Pas d'eau dans les divers forages.

Potentialité pour géostructures énergétiques :

Zone nord : Vu les divers forages, la molasse est supposée subaffleurante sur une grande partie de cette zone. Il est donc peu probable que des géostructures soient réalisées dans cette zone, sauf éventuellement dans quelques rares cas où les remblais ou la couche superficielle ont près de 10 m d'épaisseur. De plus, la conductibilité thermique des grès est faible (0.3 - 0.4 [W/mK])

Zone sud : Au sud-ouest de cette zone, l'épaisseur de moraine est assez importante, mais sa consistance en général dure permet de supposer que des pieux ne seront pas nécessaires comme fondation. Des parois pourraient au contraire être envisagées. L'absence d'eau est un facteur plutôt défavorable pour les géostructures énergétiques, puisqu'elle implique une conductibilité thermique assez faible.

Ainsi, de manière générale, ce site est peu propice aux géostructures énergétiques.

Tableau 2.4.3 : Pôles de développement – Zones potentielles pour géostructures énergétiques.

Fiche signalétique
Site 9c : Chablais : Ollon

Coordonnées approximatives :

inférieur gauche : 563'750 / 125'300

supérieur droit : 564'400 / 127'350

Sources :

- Carte de résistivités électriques 1 : 25'000, Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois
- Archives Norbert :
 - Carte géologique et coupe géologique, Autoroute N9 Plaine du Rhône, 1969
 - Investigation des sites contaminés, CFF, 2002
 - Forages, Gare de triage St-Triphon
 - Etude piézométrique, CEDRA

Données géologiques et hydrogéologiques :

La zone d'étude se trouve dans les alluvions rhodaniennes. Il s'agit principalement de graviers avec quelques lentilles sableuses, puis dès une profondeur supérieure à environ 15 m de sables.

Ces matériaux perméables constituent un aquifère dont le toit se situe constamment à 3 m au-dessous de la surface du sol. L'écoulement de l'eau s'effectue en direction de l'ouest.

Potentialité pour géostructures énergétiques :

Ces dépôts graveleux et sableux saturés ont une très bonne conductibilité thermique (1.8 à 3.3 [W/mK]) et sont ainsi favorables aux géostructures énergétiques.

Du point de vue des caractéristiques mécaniques, ces dépôts ont une bonne portance et donc il est très peu probable que des pieux soient effectués dans cette zone. Par contre, des parois pourront être envisagées.

Ainsi, ce site est assez favorable aux géostructures énergétiques.

Tableau 2.4.4 : Pôles de développement – Zones potentielles pour géostructures énergétiques.

Fiche signalétique
Site 9e : Chablais : Villeneuve

Coordonnées approximatives :

inférieur gauche : 559'800 / 136'800

supérieur droit : 561'400 / 138'100

Sources :

- Carte géologique 1 : 25'000, feuille Montreux
- Carte de résistivités électriques 1 : 25'000, Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois
- Archives Norbert :
 - Carte géologique, coupe géologique et forages, Viaduc de la Plaine du Rhône, Villeneuve, Autoroute N9, 1966
 - Forages, Echangeur de Villeneuve, Autoroute N9 et route cantonale, 1966
 - Carte géologique et coupe géologique, Autoroute N9 Lausanne - St-Maurice, 1964
 - Etude géotechnique et sondages pour résidence privée, Villeneuve, 1989

Données géologiques et hydrogéologiques :

Le site se trouve dans les alluvions fluviales et fluvio-glaciaires de la Plaine du Rhône. On observe une couche de tourbe, limons tourbeux ou argile limoneuse sur environ 3 à 4 m d'épaisseur. Au-dessous, on a souvent des sables, mais aussi parfois des couches graveleuses. Dans la partie à l'est de l'Eau Froide, on trouve également souvent des limons en profondeur. Ces dépôts sont en général lâches et peu compacts en surface et deviennent assez compacts dès 10 m de profondeur en moyenne.

Le terrain est saturé dès une profondeur de 1 m en moyenne.

Potentialité pour géostructures énergétiques :

Les dépôts sableux saturés ont une bonne conductivité thermique (1.7 à 3.2 [W/mK]). Concernant les limons, cette conductivité thermique est plus faible (1.2 à 2.5 [W/mK]), mais reste favorable pour les géostructures énergétiques.

De manière générale, la portance des terrains sur ce site est moyenne à faible. Ainsi, il y a de fortes chances pour que des géostructures soient réalisées sur ce site.

Ce site constitue donc une zone propice aux géostructures énergétiques.

*Tableau 2.4.5 : Pôles de développement – Zones potentielles pour géostructures énergétiques.***Fiche signalétique****Site 12b : Orbe****Coordonnées approximatives :**

inférieur gauche : 531'000 / 174'400

supérieur droit : 531'900 / 175'400

Sources :

- Carte géologique 1 : 25'000, feuille Orbe
- Carte de résistivités électriques 1 : 10'000, Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois
- Archives Norbert :
 - Carte géologique et forages, Autoroute N9b, 1995

Données géologiques et hydrogéologiques :

Le site se trouve dans le cône de déjection de l'Orbe. On est en présence de formations graveleuses et sableuses. Aucun forage n'étant à disposition sur ce site, on ne connaît en particulier pas la compacité de ces dépôts.

Ces terrains perméables constituent un bon aquifère.

Potentialité pour géostructures énergétiques :

Les dépôts graveleux et sableux saturés ont une très bonne conductibilité thermique (1.8 à 3.3 [W/mK]) et sont de ce fait favorables aux géostructures énergétiques.

Les caractéristiques mécaniques et notamment la portance de ces dépôts est en général bonne. Il est donc peu probable que des pieux soient nécessaires dans cette zone. Par contre, des parois peuvent tout à fait être envisagées.

Ainsi, ce site est assez favorable aux géostructures énergétiques.

Tableau 2.4.6 : Pôles de développement – Zones potentielles pour géostructures énergétiques.

Fiche signalétique
Site 14a : Basse Vallée de l'Arnon

Coordonnées approximatives :

inférieur gauche : 540'500 / 186'000

supérieur droit : 542'350 / 187'000

Sources :

- Carte de résistivités électriques 1 : 25'000, Atlas des résistivités électriques apparentes du Moyen-Pays vaudois
- Archives Norbert :
 - Cartes géologiques, coupes et forages, Autoroute N5, 1976, 1987, 1989, 1993

Données géologiques et hydrogéologiques :

Dans la zone nord-ouest du site, on se trouve dans une ancienne dépression comblée par des dépôts graveleux. On retrouve, en profondeur et sur les côtés, de la moraine limono-graveleuse. Les dépôts graveleux sont de compacité moyenne en général, alors que la moraine est ferme à dure. Quelques passées fines de dépôts lacustres limono-argileux peuvent s'intercaler dans les graviers.

Dans la zone sud-est du site, on est dans les dépôts graveleux du cône de déjection de l'Arnon. En dessous, on retrouve à des profondeurs variables la moraine limono-graveleuse. On suppose que ces dépôts ont des caractéristiques mécaniques similaires à celles rencontrées dans la zone nord-ouest.

Une nappe d'eau souterraine est présente dans les graviers à une faible profondeur.

Potentialité pour géostructures énergétiques :

Les dépôts graveleux saturés ont une très bonne conductibilité thermique (1.8 à 3.3 [W/mK]) et sont de ce fait favorables aux géostructures énergétiques.

Les caractéristiques mécaniques sont en général moyennes. Il est donc probable que des géostructures soient nécessaires dans cette zone.

Ainsi, ce site semble assez favorable aux géostructures énergétiques.

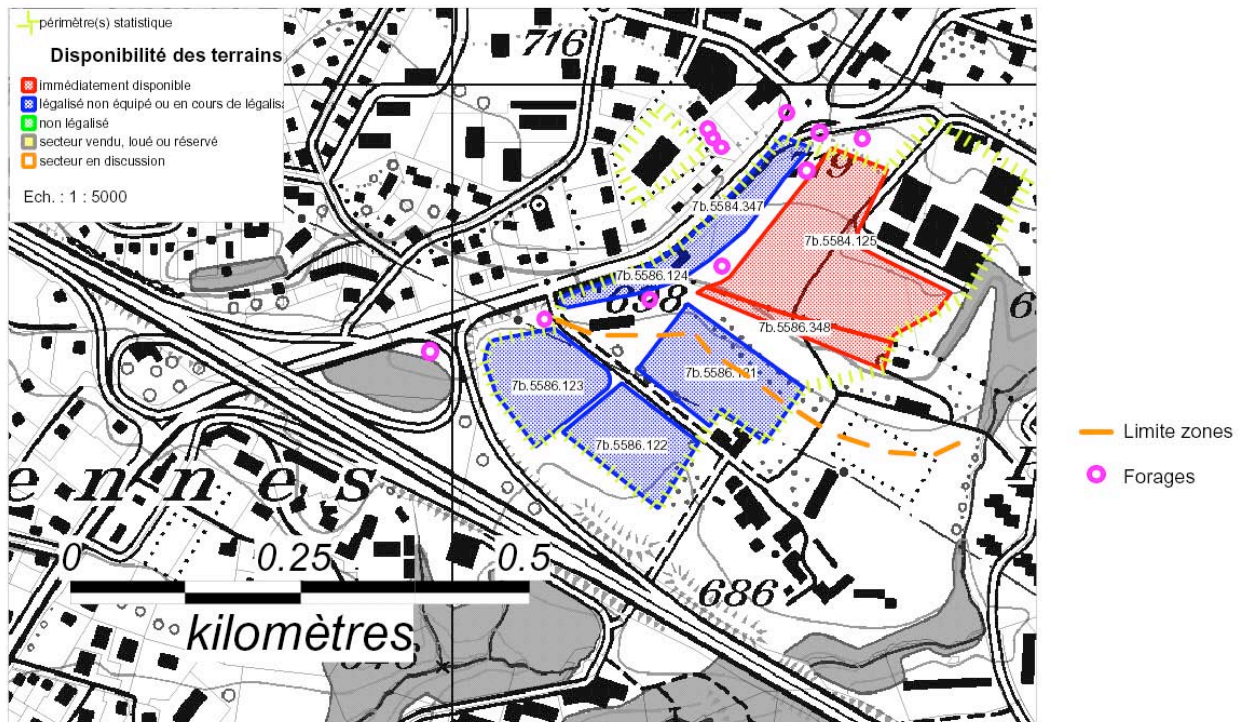


Figure 2.4.4 : Site 7b : Biopôle – Situation et forages (SAT et Bureau Norbert).

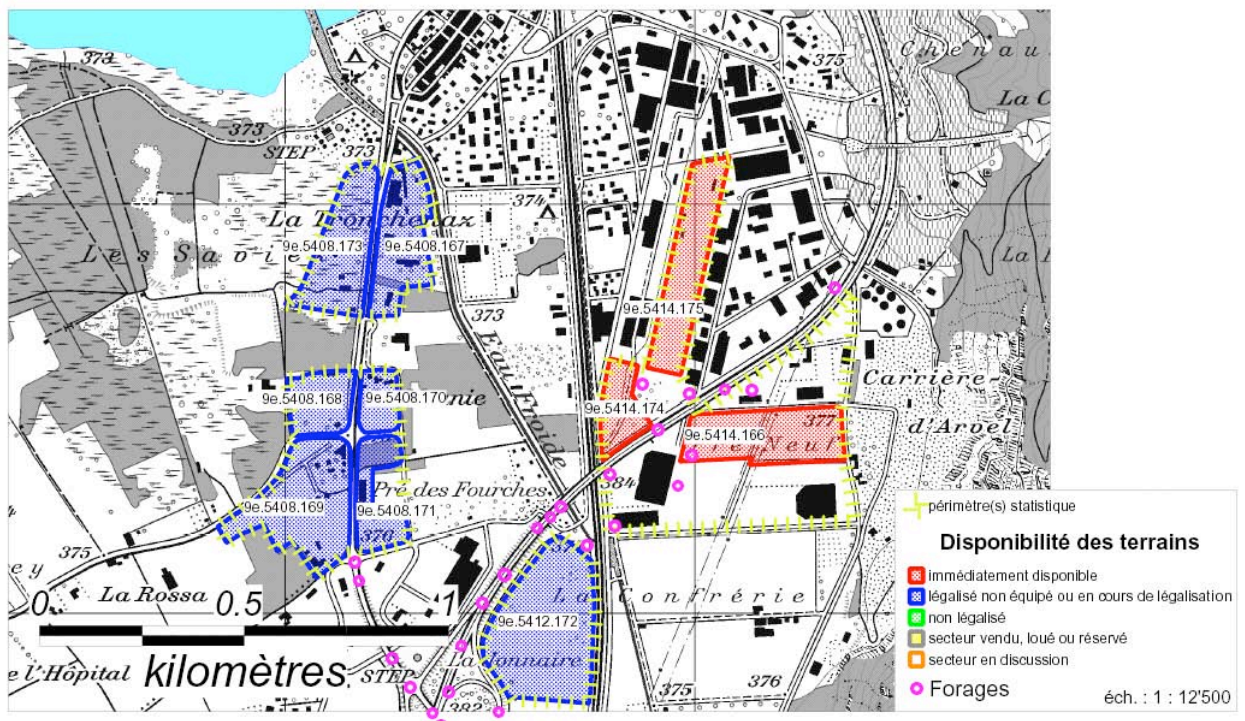


Figure 2.4.5 : Chablais / Villeneuve – Situation et forages (SAT et Bureau Norbert).

En complément, l'Institut de géophysique de l'Université de Lausanne a procédé à une détermination de la position du substratum rocheux de deux des zones considérées. Les résultats recourent assez bien ceux obtenus par les forages. La figure 2.4.6 montre la situation en plan des sondages électriques interprétés sur le site 14 a, la Figure 2.4.7 donne l'interprétation d'un tel sondage permettant de déterminer les limites géologiques.

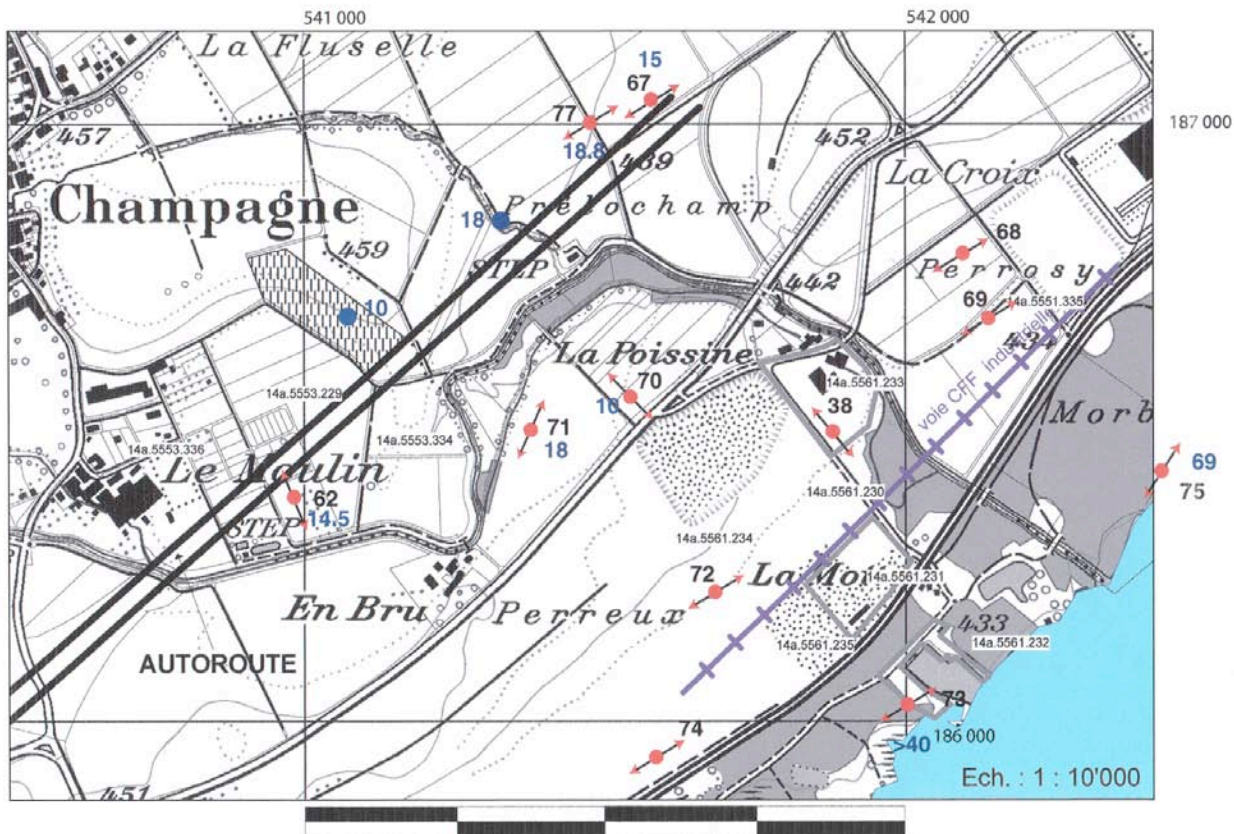


Figure 2.4.6 : Pôle 14a : Basse vallée de l'Arnon - Plan de situation des sondages électriques (SAT et Institut de Géophysique de l'UNIL, 2003).

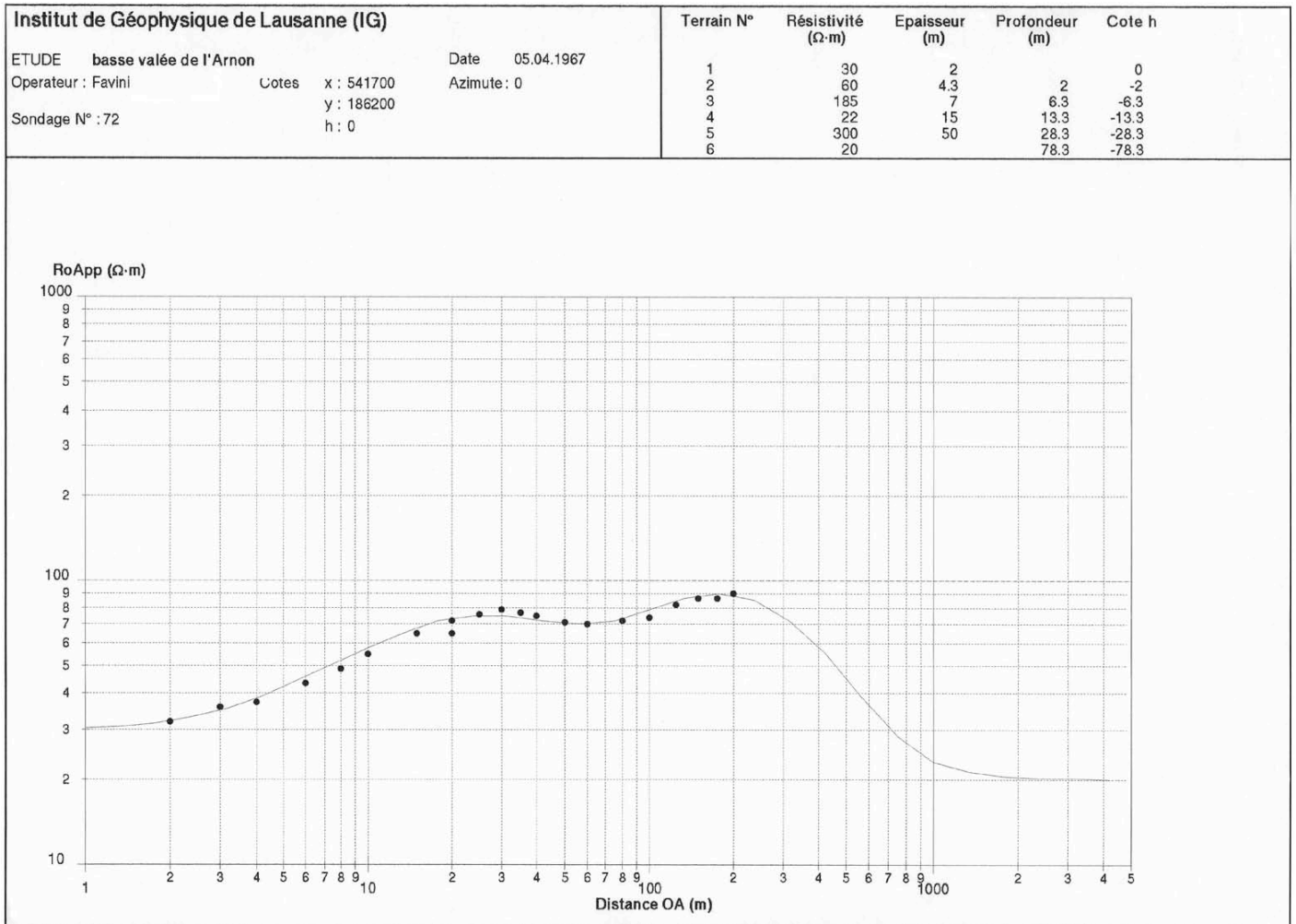


Figure 2.4.7 : Pôles 14a : Basse Vallée de l'Arnon - Interprétation d'un sondage électrique (Chapellier, 2003).

Il résulte de ces investigations qu'une des zones (9 e) est a priori favorable à la réalisation de géostructures énergétiques, trois sont plutôt favorables (9 b, 12 b et 14 a) et une est considérée comme peu propice.

2.4.4 Applications futures

La méthode exposée ci-dessus est un outil efficace pour d'identification des sites favorables à la réalisation de géostructures énergétiques pour autant que certaines informations sur le type de construction projeté et sur les conditions du sous-sol soient disponibles.

La typologie des constructions envisageables peut en général être déterminée avec assez de précision dans des zones de développement élaborées dans le cadre d'un plan d'aménagement local ou régional, ou d'autres types de zones, comme les pôles de développement cantonaux évoqués. En ce qui concerne le sous-sol, on a constaté que dans le cas des pôles de développement, des informations exploitables existaient pour les trois quarts d'entre eux. Ces données se trouvent en général en possession des bureaux d'ingénieur et de géologie, des entreprises de forage, des instituts universitaires et des administrations cantonales ou communales.

L'application de la méthode d'identification à des zones de développement aurait l'avantage d'attirer à temps l'attention des constructeurs sur les possibilités d'utilisation du potentiel

calorifique du sous-sol. Par ailleurs elle permettrait aux pouvoirs publics de connaître les potentialités existantes et d'envisager le cas échéant des mesures d'encouragement en faveur de cette forme d'énergie.

2.5 Conclusions et recommandations

Les *géostrutures énergétiques* sont des constructions enterrées équipées en échangeur, permettant l'échange thermique avec le sol. Ce sont essentiellement des constructions en béton, soit des pieux et des parois, voire des murs et des dalles en contact avec le sol.

Cette technologie est en plein essor depuis plus de 10 ans. De nombreuses *réalisations* à l'étranger, avant tout en Autriche, et dans le nord-est de la Suisse, prouvent leur intérêt sur les plans énergétique et écologique. En Suisse romande, on n'en connaît pour le moment qu'un seul exemple, qui est celui du nouveau bâtiment scolaire de Fully, construit entre 2000 et 2001 et comprenant 40 pieux échangeurs. Les récents tests viennent de démontrer le bon rendement énergétique du système.

Le *prix moyen* du kilowattheure thermique produit est fonction des caractéristiques du projet, des conditions du sous-sol et du prix de l'énergie primaire. Il se situe aujourd'hui entre 8 et 16 centimes, avec une tendance marquée à la baisse, comme cela avait été le cas des sondes géothermiques où, en dix ans, le prix a pratiquement baissé de moitié.

Afin de déterminer le *potentiel de développement* des géostrutures énergétiques dans le canton de Vaud à l'horizon 2014, on a procédé à une enquête auprès des entreprises de travaux spéciaux actifs dans le canton. Dans un premier temps, on a procédé à une estimation de l'évolution du volume de construction. Puis, au moyen de valeurs statistiques, on a calculé la quantité annuelle d'énergie de chauffage et de refroidissement produite par les géostrutures, en admettant que dans 10 ans la moitié des géostrutures susceptibles d'être équipées en échangeur le sera effectivement. Dans ces conditions, l'accroissement moyen de la production annuelle de chaleur et de froid apparaît dans la figure 2.5.1, ci-dessous.

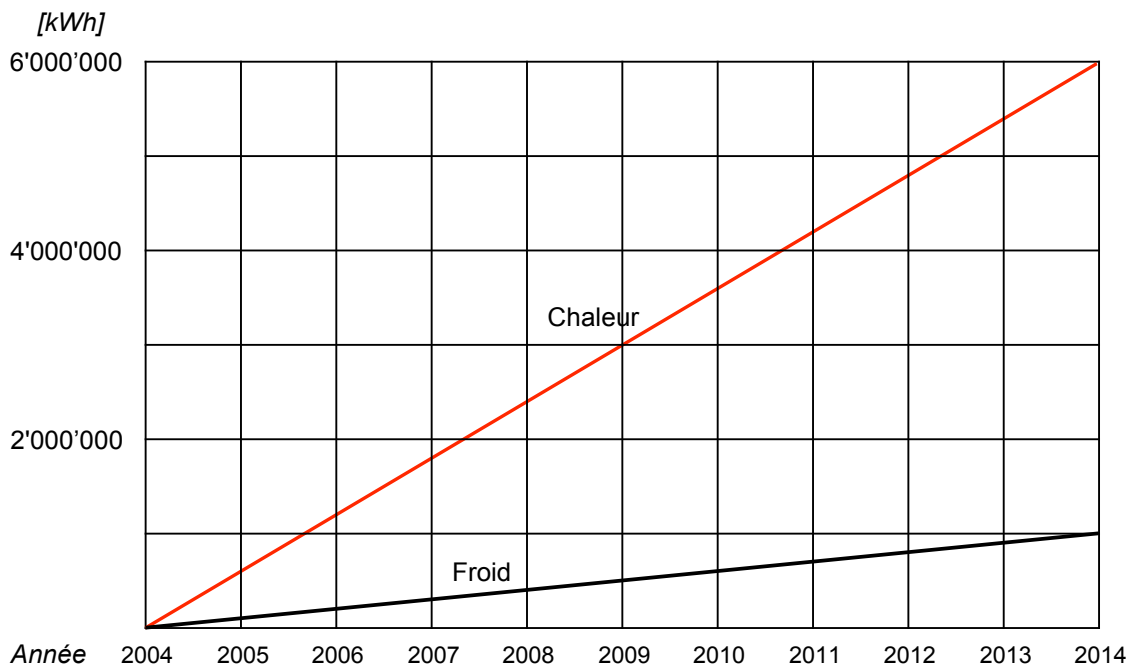


Figure 2.5.1 : Evolution de l'énergie produite annuellement par les géostrutures [kWh] (accroissement moyen).

On constate qu'en l'espace de dix ans, les géostructures énergétiques seraient à même de produire annuellement 6'000'000 de kilowattheures de chaleur et 500'000 kilowattheures de froid. Ceci permettrait de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 200 tonnes par an, par rapport au chauffage au mazout.

Pour atteindre cet objectif des *mesures* sont à prendre au niveau de la politique énergétique cantonale. Elles peuvent être incitatives et/ou contraignantes. Les *mesures incitatives* à mettre en œuvre pourraient être les suivantes :

- Campagne d'information à l'intention du grand public ;
- Information ciblée des divers milieux concernés, autorités politiques, administrations, promoteurs, professionnels de la branche (architectes, planificateurs, ingénieurs CV et ingénieurs civils, géologues et géotechniciens), sous forme d'exposés, de séminaires d'information, de cours de formation, de distribution de documentation, etc. ;
- Conseils aux promoteurs et aux professionnels dans le cadre de projets concrets ;
- Etablissement de cartes des zones potentielles à l'aide de la méthode d'identification développée à cet effet ;
- Soutien financier à des projets de géostructures énergétiques.

Comme exemple de *mesure contraignante*, plus difficile à mettre en place, on peut citer une demande de justification, au niveau du permis de construire ou à un autre stade de la préparation du projet, de la prise en compte ou non de l'énergie géothermique pouvant être produite par les géostructures.

Au vu de l'intérêt représenté par les géostructures énergétiques, il est proposé d'inclure leur développement dans la *conception cantonale* de l'énergie et d'établir un *plan d'action* comprenant une partie ou la totalité des mesures mentionnées ci-dessus.

2.6 Références

- Anstett M. (2001). Pieux énergétiques du centre scolaire de Fully ; 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne
- Bilfinger + Berger & NEK Umwelttechnik GMBH (1997). Energiepfähle für den Neubau der Landesbank Hessen-Thüringen, Frankfurt am Main ; Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Mannheim
- Bonvin M. & Cordonier P. (2001). Pieux énergétiques avec distribution de chaleur et de froid intégrée dans la structure. Rapport OFEN
- Burger A., Recordon E., Bovet D., Cotton L. & Saugy B. (1985). Thermique des nappes souterraines ; Presses polytechniques romandes, Lausanne
- Chapellier M.-D. (2003). Interprétation des profils sismiques de la Basse Vallée de l'Arnon. Institut de Géophysique de l'UNIL
- Fromentin A., Pahud D., Jaquier C. & Morath M. (1997). Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; Rapport final, Programme de recherche : géothermie, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne
- Fromentin A., Pahud D., Laloui L. & Moreni M. (1999). Pieux échangeurs : conception et règles de pré-dimensionnement ; Revue française de génie civil n°6/1999, vol. 3, pp. 387-421

- Hubbuch M. (2001). Dock Midfield, Zürich Flughafen, Planung und Ausführung der Energiepfähle ; 12. Fachtagung und Hauptversammlung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG), 20. April 2001, Bern
- Joliquin P., (2002). Exploitation de la chaleur terrestre par des géostructures énergétiques. Méthodologie de détermination des zones potentielles. Diplôme d'études postgrades en géologie de l'ingénieur et de l'environnement. GEOLEP, Lausanne.
- Laloui L., Moreni M., Fromentin A., Pahud D. & Vulliet L. (1999a). In-situ thermo-mechanical load test on a heat exchanger pile ; 4th International Conference on Deep Foundation Practice + Piletalk, 29, 30 July 1999, Singapore
- Laloui L., Moreni M., Steinmann G., Vulliet L., Fromentin A. & Pahud D. (1999b). Test en conditions réelles du comportement statique d'un pieu soumis à des sollicitations thermo-mécaniques ; Rapport final, Programme géothermie, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Lausanne
- OEHE, OPED (1998). Utilisation de la chaleur de l'eau et du sol, Carte d'ensemble du canton de Berne ; Office de l'économie hydraulique et énergétique (OEHE), Office de la protection des eaux et de la gestion des déchets (OPED), Berne
- OFEN (1998). Géothermie, Exploitation de l'énergie géothermique, Guide pour concepteurs, maîtres d'ouvrages, investisseurs et décideurs ; Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne
- OFPE (1977). Instructions pratiques pour la détermination des secteurs de protection des eaux, des zones et des périmètres de protection des eaux souterraines ; révision partielle en 1982, Office fédéral de la protection de l'environnement (OFPE), Berne
- OFPE (1982). Directives sur l'utilisation de la chaleur des eaux et du sol ; Office fédéral de la protection de l'environnement (OFPE), Berne
- Pahud D. (2001). Recommandations pour la réalisation d'installations avec pieux échangeurs ; 12^{ème} journée technique et d'information de la SSG, 20 avril 2001, Berne
- Pahud D., Fromentin A. & Hubbuch M. (2001). Système de chauffage et de refroidissement avec pieux échangeurs, L'aéroport de Zurich – exemple d'approvisionnement en énergie axé sur l'avenir ; Bulletin ASE/AES 7/01, Fehraltorf
- Pahud D. (2002). Heat Exchanger Pile Systems – Examples, design and thermal calculations. SUPSI – DCT - LEEE
- Preg R. (2001). Kunsthaus Bregenz, Nutzung geothermischer Energie über Beton mit neuen Technologien ; 12. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie (SVG), 20. April 2001, Bern
- Robyr Soguel D. & Henz H.R. (2001). La prise en compte de l'énergie éolienne dans les plans directeurs et les plans d'affectation, Rapport final ; Programme Vent, Office fédéral de l'Energie (OFEN), Berne
- Sanner B. (2002). Entwicklung und Stand des mobilen Thermal Response Test ; Géothermie ch, Bulletin de la Société Suisse pour la Géothermie (SSG), N°32, juin 2002, Berne
- SIA (1988). Base de dimensionnement des systèmes exploitant la chaleur du sol à basse température, Documentation D 025 ; Société suisse des ingénieurs et des architectes, Zürich
- SSG (2001). Fiches techniques 1 à 4, Les sondes géothermiques, Champs de sondes géothermiques et sondes profondes, Géostructures et pieux énergétiques, Géothermie des tunnels ; Société Suisse pour la Géothermie (SSG), Neuchâtel

- Von der Hude N. & Kapp C. (1998). The use of heat exchanger piles as exemplified in the Main Tower building in Frankfurt am Main ; 5th Darmstadt Geotechnical Conference, 19th March 1998, Darmstadt
- Von der Hude N. & Kapp C. (2001). Energiepfähle für Hochhäuser in Frankfurt am Main – Ausführungsbeispiele – aus der Sicht einer Spezialtiefbaufirma ; 12. Fachtagung der Schweizerischen Vereinigung für Geothermie, 20. April 2001, Bern
- Wilhelm J. (2001). 10 ans de géostructures énergétiques en Suisse ; 12^{ème} journée technique de la Société Suisse pour la Géothermie, 20 avril 2001, Berne

3. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)

3. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)

3.1 Introduction – Méthode de travail

Aucune évaluation du potentiel géothermique des ressources en aquifères profonds (AP) n'existe à ce jour à l'échelle du canton de Vaud. Il est vrai qu'une prospection géothermique le long du pied du Jura avait été réalisée au milieu des années 80 dans le cadre des projets du Nationaler Energie-Forschung-Fonds (NEFF). Toutefois, cette excellente étude ne concernait qu'une partie du territoire vaudois et de plus elle n'avait pu accéder à la totalité des informations provenant des forages profonds réalisés dans le canton.

Depuis, les connaissances géothermiques des AP sur sol vaudois n'ont été complétées que localement, sur les sites d'Yverdon-les-Bains et de Lavey-les-Bains, grâce à des forages profonds qui ont capté des circulations d'eau thermique profonde. Il est vrai que d'autres informations récentes ont été apportées par la réinterprétation des lignes sismiques pétrolières (Gorin et al. 1993 ; Sommaruga 1997), toutefois ces études n'ont pas du tout considéré des objectifs géothermiques. Pour cette raison, la présente étude constitue une approche préliminaire, sans aucune comparaison avec par exemple les investigations réalisées entre 1988 et 1992 à l'échelle du canton limitrophe du Valais dans le cadre du programme GEOTHERMOVAL (VUATAZ et al. 1993). La différence de densité des indices géothermiques apparents (essentiellement les sources thermales et les forages de prospection) justifie tout à fait cette approche minimaliste et le budget restreint qui a été consacré, en tout cas au stade des connaissances actuelles.

La méthodologie de travail suivante a été employée :

- Compilation de la documentation existante, recensement des forages profonds (> 400 m) situés sur le territoire cantonal et dans les régions limitrophes ;
- Elaboration d'une carte géologique et structurale synthétique à l'échelle du canton ;
- Analyse des réalisations géothermiques AP existantes, ainsi que synthèse et critique des projets non réalisés ;
- Identification de cibles géothermiques favorables et de site potentiellement intéressants ;
- Elaboration d'un concept pour l'exploration et la mise en valeur des ressources hydrothermales profondes du canton ;
- Formulation de recommandations pour le démarrage de projets AP à l'horizon 2005.

3.2 Exploitation des aquifères profonds

3.2.1 Définitions

L'énergie géothermique ou chaleur du sous-sol est l'énergie calorifique stockée sous la surface terrestre. L'exploitation des AP vise à capter et à mettre en valeur l'énergie thermique des réserves naturelles d'eau chaude emmagasinées dans des couches perméables profondes. Les bains thermaux sont certainement la forme la plus ancienne d'exploitation de l'énergie géothermique des AP. A la faveur de fractures dans la croûte terrestre, l'eau chaude profonde remonte à la surface sous forme de sources et peut être exploitée avec des captages peu profonds. Avec le développement des techniques de forage utilisées pour la prospection des gisements pétroliers, on a progressivement approfondi les puits, ce qui a permis d'augmenter tant le débit que la température des eaux captées par pompage. Par la suite, les forages ont permis aussi d'atteindre des AP dont on ne connaissait pas d'exutoires en surface et de les exploiter à divers fins de chauffage selon le principe de l'utilisation en cascade.

Par définition et de manière arbitraire, on limitera les ressources des AP du canton de Vaud à une **profondeur comprise entre 400 et 3'000 m**, et l'on parlera de Géothermie de Moyenne Energie (GME). La valeur limite supérieure est celle utilisée pour sélectionner les forages bénéficiant du financement de la couverture du risque de forages géothermiques octroyée par l'Office fédéral de l'Energie (OFEN) durant la période 1987-1997. La profondeur maximale permet d'atteindre des températures de l'ordre de 100°C. Elle coïncide approximativement avec la profondeur du socle cristallin dans le canton de Vaud, considéré comme peu perméable et constituant la limite avec les objectifs visés par la Géothermie Haute Energie (GHE, cf. chapitre 4).

Le domaine de températures qui caractérise la GME se situe entre environ 20 et 100°C. En ce qui concerne la limite inférieure, il est souhaitable de viser, pour les besoins de chauffage, une température de l'eau d'au moins 30°C. Pour cette raison, les forages de moyenne profondeur (< 700 m) doivent traverser des zones de remontée d'eau profonde (failles) pour atteindre cet objectif.

Le but d'une opération géothermique en AP est donc d'intercepter et de recouper des aquifères suffisamment perméables et chauds pour en permettre une exploitation économiquement rentable.

Une liste de définitions techniques permettant de mieux comprendre le texte qui suit sont proposées dans l'annexe 3.4

3.2.2 Modes d'exploitation

Si les eaux souterraines profondes ne sont que faiblement minéralisées (moins de 2 g/l) et non sulfurées, il est possible d'évacuer l'eau refroidie après l'extraction thermique dans le réseau hydrographique de surface (OFEN 1998). Un seul puits de production (singlet) suffira alors. L'eau est extraite du puits grâce à une pompe immergée électrique placée dans une chambre de pompage (figure 3.2.1). La pompe est suspendue par un tubage qui permet d'évacuer l'eau (colonne de pompage). La profondeur d'aspiration dépend de la productivité du puits : elle n'excède que rarement 200 m. La pompe et tous les éléments de la colonne de pompage sont en INOX pour résister à la corrosion de l'eau géothermale.

Par contre, si l'eau est trop salée ou contient du sulfure, un second forage (puits d'injection) est alors nécessaire pour refouler l'eau refroidie dans l'aquifère profond. Ce mode de fonctionnement est appelé doublet géothermique (figure 3.2.2). Un forage de production amène l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée vers un (des) échangeur(s) de chaleur qui permet(tent) de transmettre la chaleur à un circuit secondaire (pour éviter la corrosion des corps de chauffe par l'eau géothermale). Si nécessaire, une pompe à chaleur (PAC) permet d'augmenter la température de l'eau. Une pompe de circulation alimente les utilisateurs par une conduite isolée de chauffage à distance. L'eau refroidie est restituée enfin à l'aquifère profond par un forage d'injection. Ce système en circuit fermé évite toute pollution de l'environnement par les eaux salines du sous-sol. A titre indicatif, les températures de l'eau peuvent se situer entre de 30 à 100 °C en tête de puits et entre 20 et 70°C pour l'eau réinjectée.

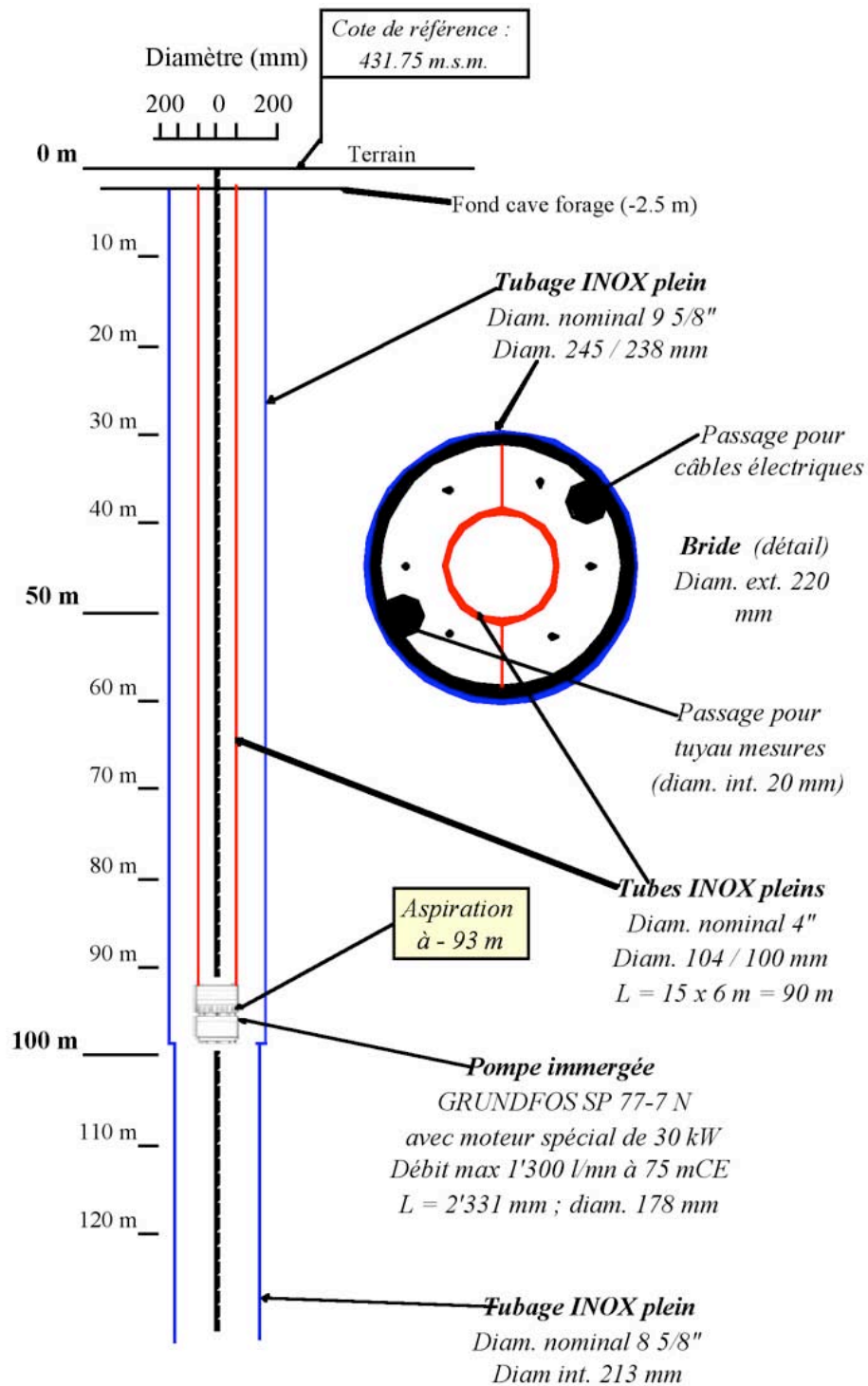


Figure 3.2.1 : Chambre de pompage du puits géothermique P600 à Lavey-les-Bains (Bianchetti 2002). La pompe immergée permet de livrer un débit maximum de 22 l/s.

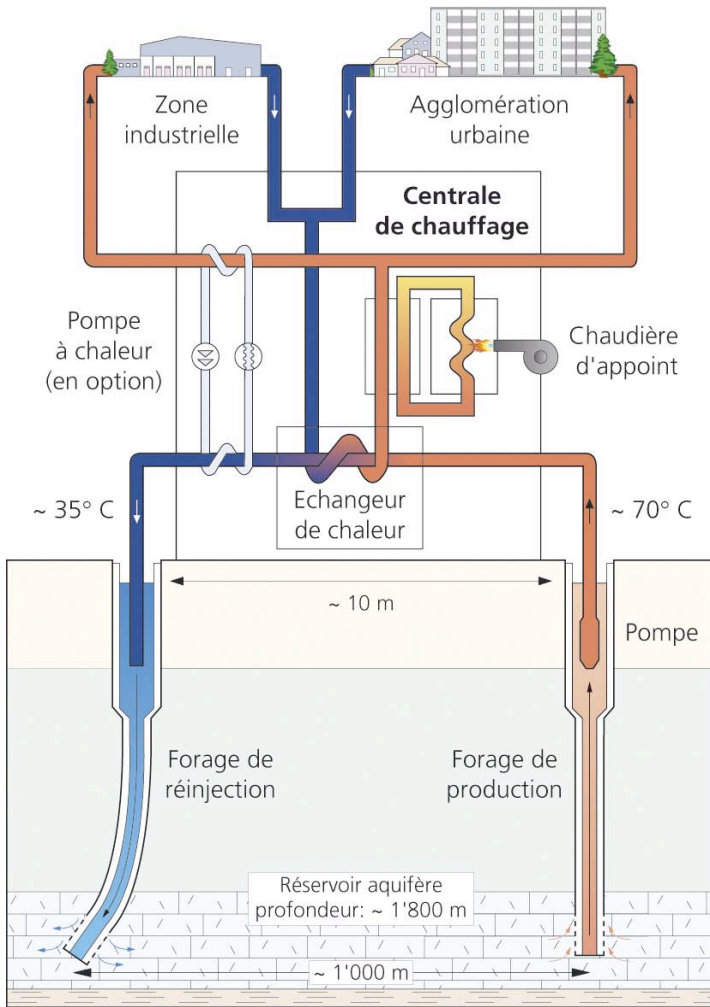


Figure 3.2.2 : Schéma d'un doublet géothermique (Infos-Géothermie n°3, septembre 2002).

Afin d'éviter un court-circuit thermique (l'eau refroidie injectée atteint la zone de pompage trop rapidement et commence à faire baisser la température de l'eau pompée), la base des puits doit se situer à une distance suffisante. Celle-ci est de l'ordre de 1 km pour un temps de retour supérieur à 20 ans. Depuis les premières réalisations géothermiques, la typologie des doublets a évolué (figure 3.2.3). Si dans les années 70 on utilisait des puits verticaux espacés en surface (1), depuis lors on réalise les deux forages à partir d'une plateforme commune et l'on atteint l'espacement voulu en profondeur grâce à une déviation des forages (4).

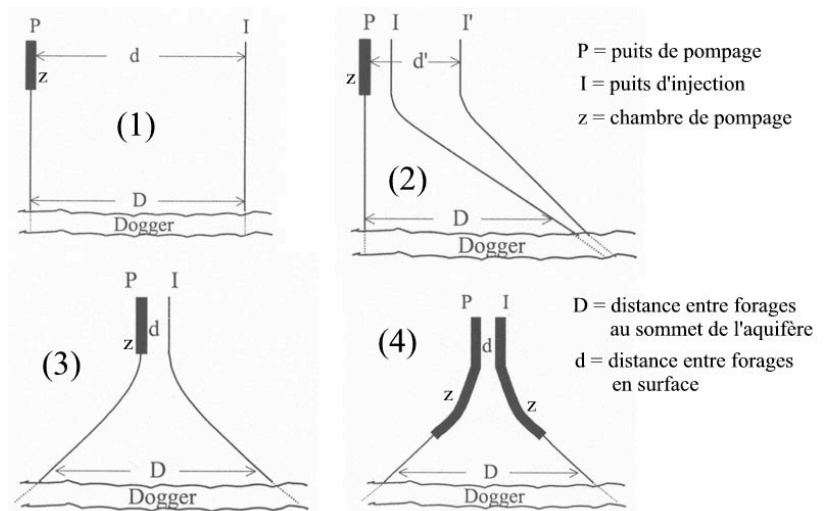


Figure 3.2.3 : Evolution de la typologie des doublets du Bassin Parisien (UNGEMACH 2001). Les chiffres 1 à 4 indiquent les différentes générations de doublets.

3.3 Opérations géothermiques AP

3.3.1 Phases de réalisation

Le schéma directeur pour une opération géothermique AP comprend en principe 5 phases distinctes (OFEN 1992) :

1. **Etudes préliminaires** : doivent permettre de fournir au promoteur des indications de base quant à la faisabilité du projet. Les indications suivantes sont à fournir : objectifs géologiques et aquifères visés, identification des utilisateurs potentiels et de leurs besoins énergétiques, évaluation du potentiel géothermique à comparer aux besoins énergétiques, estimation préliminaire de l'ensemble des investissements, plan de situation général. Le coût de cette phase est estimé à moins de 10'000 CHF, à la charge du promoteur.
2. **Avant-projet** : doit permettre d'atteindre les objectifs suivants :
 - obtenir des indications détaillées sur la géologie, les aquifères visés et le potentiel géothermique attendu (débit et température de l'eau) ;
 - déterminer les caractéristiques techniques du forage et les coûts relatifs ;
 - définir de manière plus précise les besoins en chaleur des utilisateurs potentiels et préparer un concept de chauffage ;
 - réaliser une étude paramétrique pour évaluer le montant des investissements et le coût spécifique de la chaleur fournie en fonction du débit (et de la température) qu'il sera possible d'obtenir.

Les coûts de cette phase peuvent varier entre quelques dizaines de milliers, et jusqu'à quelques centaines de milliers de CHF s'il y a lieu d'effectuer une campagne de sismique ou des forages de reconnaissance. A l'heure actuelle, les coûts de cette phase ne sont pas systématiquement pris en charge par l'OFEN.

3. **Réalisation du (des) forage(s)** : dans cette phase, il y a un gros risque d'échec. L'investissement est important, de l'ordre de 1 Mio CHF pour un puits de 500 m équipé (tubages et crépines) et de l'ordre de 6 Mio CHF pour un doublet avec deux puits de 1'500 m équipés (y.c. suivi hydrogéologique). Cette phase prévoit la mise en place du chantier, la perforation et les tests de pompage, l'équipement du forage et la réalisation des essais de production. En cas de débit insuffisant, des essais de stimulation (injection d'acide ou fracturation hydraulique) devront encore être réalisés. En fonction des résultats et du chimisme de l'eau, on décidera s'il faut encore réaliser un deuxième forage pour réinjecter l'eau dans l'aquifère profond. Depuis l'arrêt de la couverture du risque géothermique (1997), cette phase est entièrement à la charge du promoteur.
4. **Etude détaillée du projet** : lorsque la productivité du puits est connue, ainsi que le potentiel géothermique, on planifie la réalisation de la centrale géothermique et l'on détermine avec précision son enveloppe budgétaire. Dans cette phase, diverses options doivent être prises en compte pour optimiser la rentabilité des installations (utilisation directe des eaux uniquement avec des échangeurs de chaleur et des pompes de circulation, mise en place de PAC et éventuellement d'une centrale de cogénération chaleur-force, valorisation en cascade de la ressource, etc.). Une partie des frais d'étude peut être prise en charge par l'OFEN.
5. **Réalisation du projet** : après la réalisation des installations de surface, on rentre dans la phase d'exploitation de la ressource énergétique. Durant au moins deux ans, un suivi est demandé et pris en charge par l'OFEN. Il est possible ainsi de mesurer avec précision les performances des diverses installations et, au besoin, d'en améliorer le concept pour optimiser la valorisation du potentiel géothermique. L'OFEN participe au financement de cette réalisation en couvrant les investissements supplémentaires par rapport à une installation thermique traditionnelle.

3.3.2 Chantier et aspects environnementaux

L'installation du chantier dure de 2 à 3 semaines. Pour économiser la surface du terrain occupé en zone urbaine, l'ensemble des installations s'organise sur une plateforme rectangulaire de taille fortement réduite par rapport à celle d'un chantier en pleine nature (figure 3.3.1). La profondeur du forage détermine aussi les dimensions de la plateforme. A titre d'exemple, elles étaient de 50 x 70 m pour le chantier de Riehen (forage en milieu urbain de 1'547 m) et de 25 x 25 m à Lavey-les-Bains (forage en pleine nature, profondeur de 595 m).

Du point de vue environnemental, un effort particulier doit être consenti pour la protection de la nappe phréatique. L'ensemble des équipements est installé sur un radier rigoureusement étanche (revêtement en asphalte), présentant une légère déclivité pour l'écoulement des eaux (FEHLMANN TRAVAUX HYDRAULIQUES S.A. 1992). Celles-ci sont dirigées vers des séparateurs d'huiles, qui doivent être périodiquement contrôlés et vidangés par une entreprise spécialisée.

Il faut aussi éviter que les boues de forage, chargées de différents produits chimiques, puissent polluer le sous-sol. Celles-ci sont maintenues en circulation entre le forage et les installations de traitement en surface. Elles transitent par des bassins et des tamiseurs où elles sont débarrassées des débris de roche. Les résidus essorés sont déchargés dans des bassins de décantation (« bourbiers »), pourvus d'un revêtement étanche. Les eaux d'essorage subissent un traitement adéquat (décantation, floculation, etc.) avant d'être évacuées dans les canalisations d'eaux usées ou rejetées dans les bourbiers. Ces derniers sont régulièrement vidangés par des entreprises spécialisées.

Si le site de forage se trouve à proximité de zones habitées, il faudra apporter un soin particulier à la protection phonique. Les installations doivent être entourées d'une paroi ou d'une digue antibruit d'au moins 5 m de haut, doublée par une seconde enceinte phonique autour de la plateforme de forage (Wilhelm 1995). L'emplacement des baraques de chantier peut contribuer à l'effet d'écran phonique. En outre, les machines doivent être isolées individuellement et des amortisseurs de choc positionnés aux endroits clés.

Ces mesures de protection représentent environ 20% du coût total d'un chantier de forage. A titre indicatif, quelques coûts de chantiers sont indiqués dans le tableau 3.3.1.

Tableau 3.3.1 : Exemples de coûts d'installation des chantiers.

Chantier	Coût en CHF	Remarques
Bulle	18'000.-	Forage vertical de 800 m en pleine campagne
Lavey-les-Bains	88'000.-	Forage dévié de 595 m en pleine campagne
Riehen	1'032'000.-	Doublet vertical avec une distance en surface de 1 km. Il s'agit en fait de deux plateformes différentes en milieu urbain



Figure 3.3.1 : Exemples de chantiers de forages géothermiques. A gauche, celui du forage de Reinach (profondeur 1'793 m), muni d'une protection phonique. A droite, le chantier du forage P600 de Lavey-les-Bains, situé en pleine nature. La photo du bas montre l'emprise au sol du puits géothermique en exploitation. Outre la cave de forage et le radier asphalté, un treuil pour ressortir la pompe immergée a été laissée sur place (sources : Weber 1990 et Bianchetti 2002).

3.3.3 Techniques de perforation et tests hydrauliques

Les techniques de forages géothermiques dérivent directement de celles utilisées en recherche pétrolière. La plupart des forages géothermiques sont effectués en principe selon la méthode « rotary » à l'aide d'une tour de forage. On perce le rocher à l'aide d'un trépan qui le désagrège en petits débris (« cuttings »). Le trépan est animé d'un mouvement de rotation à l'aide de tiges métalliques creuses vissées au fur et à mesure de l'avancement. Par l'intérieur de ces tiges, on injecte en permanence une boue de forage permettant de refroidir l'outil, de remonter les cuttings en surface, d'éviter l'effondrement des parois du trou et de contenir d'éventuelles éruptions en jouant sur la densité de la boue.

Un avant-puits avec tubage technique en acier dont le diamètre varie entre 40 et 50 cm est mis en place pour protéger le forage des terrains meubles de surface, le plus souvent sur environ 10 à 30 m. Ensuite, le forage est réalisé par étapes qui se terminent par des tests de courte durée effectués dans la partie en trou nu (diagraphies, essais de pompage). Avant de poursuivre la perforation, on consolide les parois dans la zone en trou nu par la mise en place d'un tubage technique en acier noir et par l'injection de ciment dans l'espace annulaire (figure 3.3.2). Le forage continue alors avec des trépans de plus en plus réduits à chaque étape supplémentaire. La partie terminale du forage, censée capter les eaux souterraines, est laissée en trou nu si la tenue des parois est bonne ou est équipée avec des crépines en INOX. A titre indicatif, les diamètres de perforation, des tubages techniques et de l'équipement de trois forages géothermiques déviés sont présentés dans le tableau 3.3.2.

Lorsque le forage a traversé l'aquifère qu'on veut exploiter, des tests de production de plusieurs jours, voire semaines sont entrepris dans la partie en trou nu pour évaluer la productivité du futur puits et déterminer les caractéristiques physico-chimiques des eaux. Outre les pompages, des diagraphies doivent permettre de localiser les arrivées d'eau et de déterminer leurs caractéristiques (débit, température et conductivité). Ces tests permettront de définir la géométrie du chemisage du futur puits de pompage, et dans le cas d'un doublet, du futur puits de réinjection.

Tableau 3.3.2 : Logs techniques de trois forages géothermiques déviés réalisés entre 1997 et 1999 (P = perforation ; T = tubage technique ; C = chemisage ; N = trou nu). Sont donnés les diamètres externes. Dans le cas d'Yverdon, il n'y a pas eu de chemisage du forage (productivité insuffisante). A Simbach-Braunau, le chemisage a été réalisé avec des tubages suspendus (« liner hanger »).

Lavey-les-Bains (CH) Longueur totale : 595 m	Yverdon-les-Bains (CH) Longueur totale : 1'479 m	Simbach-Braunau (D/A) Longueur totale : 3'203 m
		P 800 mm (0 - 20 m)
P 444 mm (0 - 8 m)	P 437 mm (0 - 18 m)	P 444 mm (20 - 604 m)
P 375 mm (8 - 50 m)	P 369 mm (18 - 60 m)	
P 311 mm (50 - 105 m)	P 306 mm (60 - 256 m)	P 306 mm (604 - 2'293 m)
P 250 mm (105 - 254 m)	P 247 mm (256 - 784 m)	
P 200 mm (254 - 595 m)	P 197 mm (784 - 1'117 m)	P 212 mm (2'293 - 3'128 m)
	P 156 mm (1'117 - 1'479 m)	P 153 mm (3'128 - 3'203 m)
T 406 mm (0 - 8 m)	T 406 mm (0 - 18 m)	T 500 mm (0 - 20 m)
T 340 mm (0 - 50 m)	T 340 mm (0 - 60 m)	
T 273 mm (0 - 105 m)	T 273 mm (0 - 256 m)	
T 219 mm (0 - 254 m) *	T 219 mm (242 - 784 m)	
	T 177 mm (756 - 1'117 m)	
		C 334 mm (0 - 604 m)
C 241 mm (0 - 98 m)		C 241 mm (501 - 2'293 m)
C 216 mm (98 - 254 m)		
		C 175 mm (2'233 - 3'203 m)
N 200 mm (254 - 595 m)	N 158 mm (1'117 - 1'479 m)	N 153 mm (3'128 - 3'203 m)

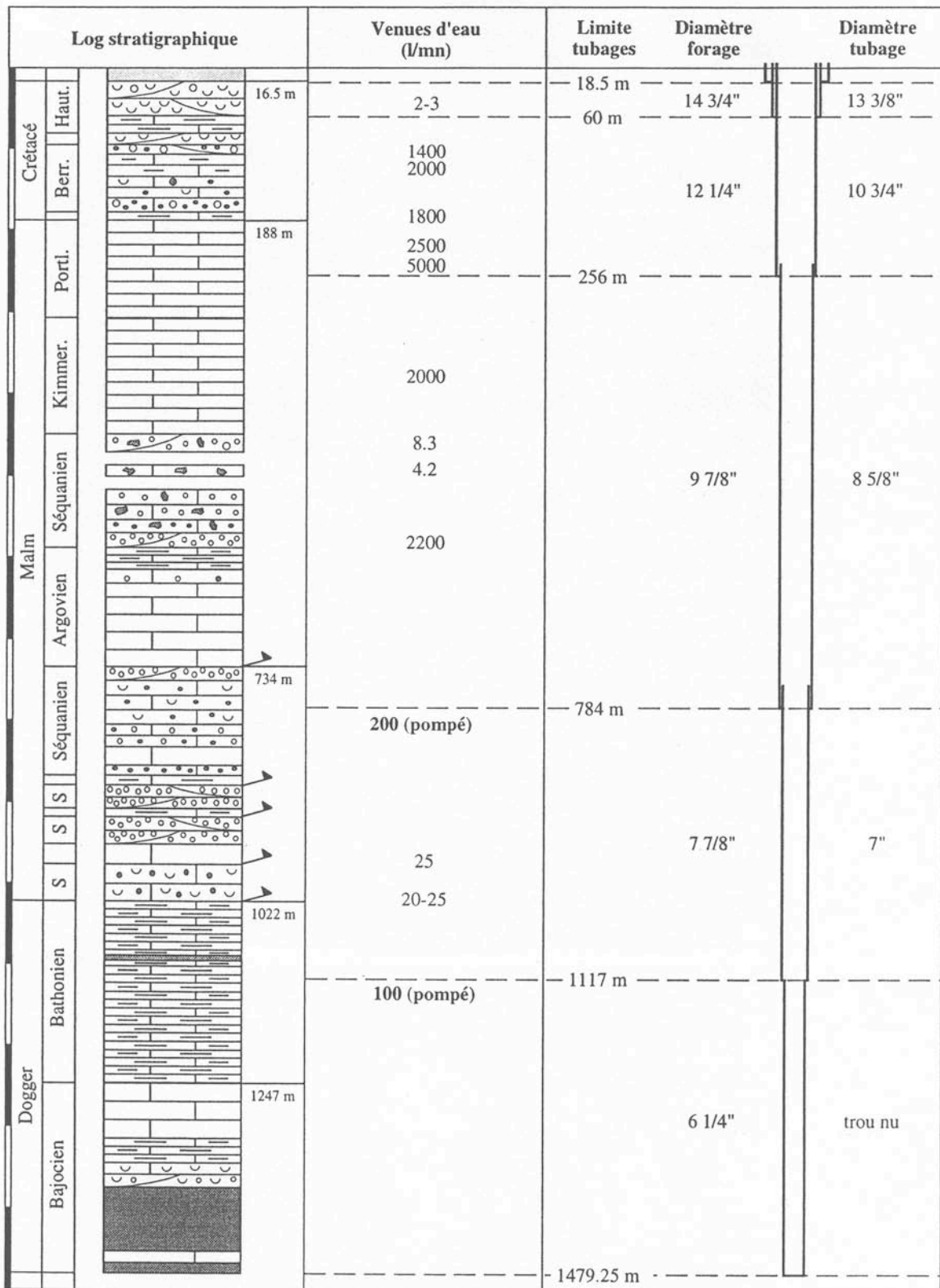


Figure 3.3.2 : Exemple de coupe technique de forage, avec diamètres de perforation et des tubages techniques (forage F5 à Yverdon, Vuataz et al. 1997). Pour les dimensions, 1" (pouce) = env. 25 mm.

L'ensemble des travaux de perforation et des tests hydrauliques peut prendre entre 2 et 6 mois selon la profondeur du forage et la durée des essais de production (figure 3.3.3). La perforation s'effectue jour et nuit, avec 3 équipes de travail de 8 heures chacune.

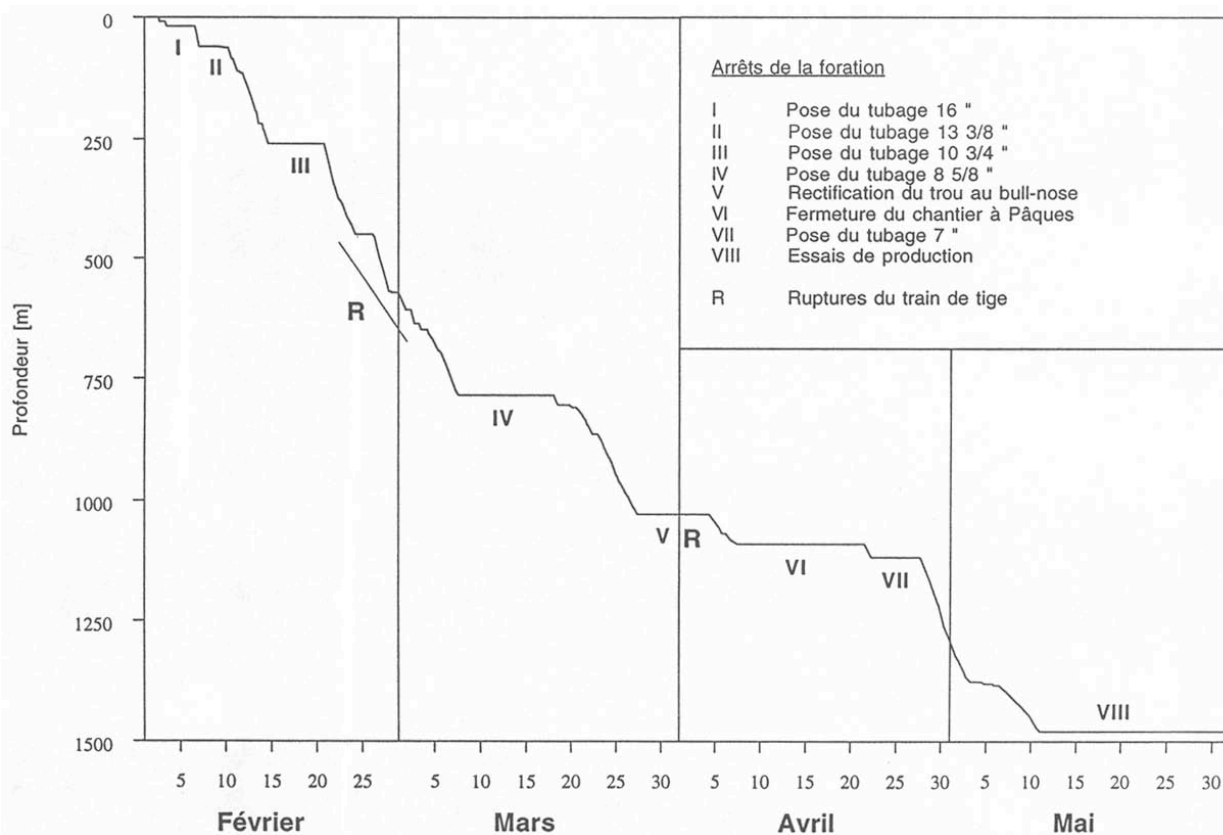


Figure 3.3.3 : Chronologie des travaux de perforation et des essais de production pour le forage F5 à Yverdon-les-Bains (Vuataz et al. 1997). Il arrive fréquemment que la durée planifiée soit dépassée par des imprévus techniques et géologiques (rupture des tiges de perforation, déviation non voulue du forage, pronostic géologique non confirmé, etc.).

L'inclinaison et la trajectoire d'un forage peuvent être progressivement modifiées, dans des limites de rayon de courbure imposées par la souplesse et l'élasticité du train de tiges. L'inclinaison peut être augmentée en modifiant de manière adéquate la géométrie des tiges à proximité du trépan et en dosant savamment les vitesses de rotation et les pressions sur l'outil (figure 3.3.4). Cette technique n'entraîne pas de surcoûts. Une autre méthode consiste à utiliser une pièce coudée spéciale qui, posée au fond du forage, permettra de le poursuivre avec un certain angle. La déviation du forage permet par exemple d'éloigner la base des forages dans le cas d'un doublet ou de recouper un maximum de fractures aquifères subverticales.

Pour diriger un forage (modification progressive de la trajectoire), il faut recourir à des entreprises spécialisées qui opèrent couramment dans le milieu des forages pétroliers. A l'aide d'un outil appelé turbine, le forage peut être dévié dans toutes les directions. Ce type d'opération est très coûteux (env. CHF 20'000 par jour) et peut durer jusqu'à 2 semaines. Il peut représenter ainsi jusqu'à 10% du budget total du forage.

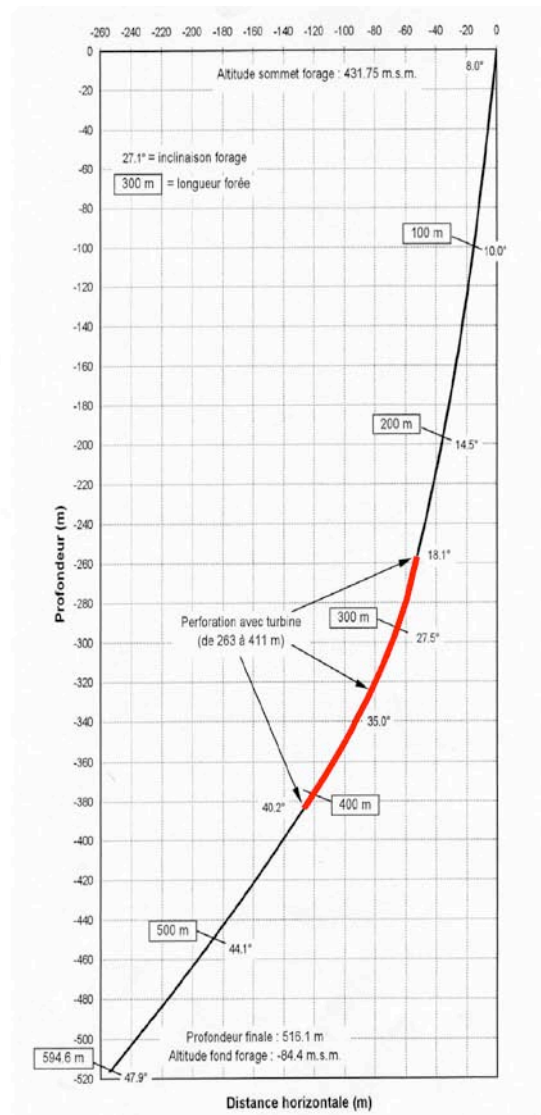
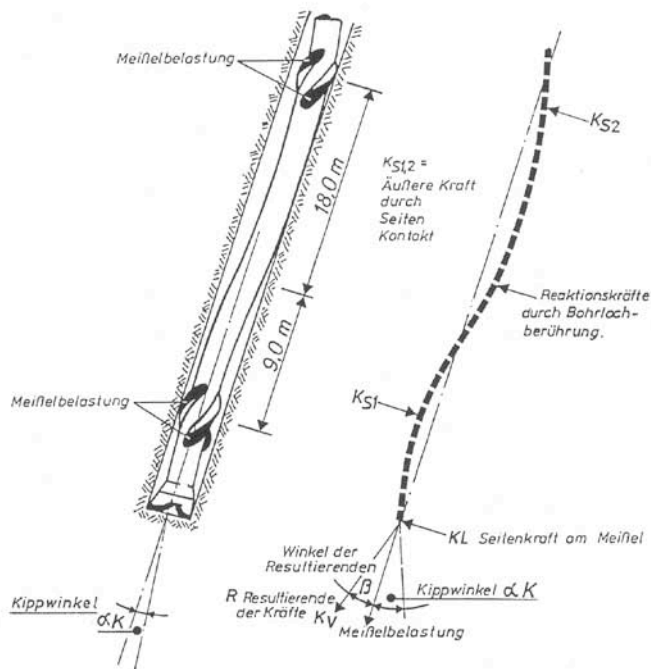


Figure 3.3.4 : Déviation de l'inclinaison du forage en agissant sur la géométrie des tiges (Berli & Pingel 1994). A droite, on observe que l'inclinaison du forage P600 à Lavey-les-Bains a été progressivement augmentée, grâce à cette technique et sans surcoûts, entre la surface et 263 m, passant de 8° à 18° par rapport à la verticale, ainsi qu'entre 411 m et 595 m (de 40° à 42°). La déviation entre 263 et 411 m a été par contre obtenue avec une turbine, qui avait dû être mobilisée pour changer la trajectoire du forage, dévié par la schistosité (feuilletage plus ou moins serré) de la roche.

Dans les années 90, lors du boom des forages géothermiques suisses, certaines entreprises de forage ont mis au point des machines de forage montées sur camion, permettant ainsi une plus grande souplesse d'installation et une diminution des coûts du chantier. Toutefois, chaque forage géothermique a été réalisé dans l'optique d'obtenir directement un puits de production de gros diamètre, alors qu'il aurait été préférable de procéder au préalable à un forage d'exploration, réduisant ainsi les pertes en cas d'échec. L'application des techniques de forage de faible diamètre (slimhole) à l'exploration géothermique est préconisée pour réaliser ce type d'exploration et pour réduire les coûts de perforation (Vuataz 1997). A ce jour, celles-ci n'ont jamais vraiment été appliquées en Suisse. Les économies par rapport à un forage traditionnel au rotary pourraient être de l'ordre de 25 à 50% selon le site, le type, le nombre et la profondeur des forages. La question essentielle est la capacité du forage slimhole à devenir un forage de production, dans le cas où un aquifère profond est atteint. Des études expérimentales montrent que pour un débit de l'ordre de 1'000 l/mn (= 16.7 l/s ou 60 m³/h), il suffirait d'avoir un diamètre dans la zone productive de l'ordre de 90 à 130 mm.

Actuellement, l'arrêt de la couverture du risque des forages géothermiques par l'OFEN a sonné le glas de la prospection géothermique en Suisse. Les rares entreprises de forage en Suisse n'ont donc pas l'occasion de développer ces techniques particulières. En cas de nouvelles réalisations géothermiques AP en Suisse, il faudra alors probablement aller chercher dans les pays limitrophes le savoir faire pour réaliser de tels forages.

3.3.4 Equipement des forages géothermiques et exploitation par pompage

Le chemisage du forage doit permettre d'installer une pompe immergée et de maintenir les parois du trou dans la zone productive. Parfois, celle-ci peut être laissée en trou nu si les roches sont suffisamment compétentes (= peu déformables), permettant ainsi une économie non négligeable. Les tubages et les crépines sont en acier INOX, dont la qualité doit être choisie en fonction de l'agressivité des eaux géothermales minéralisées pour permettre de résister à la corrosion de celles-ci.

Les dimensions de la chambre de pompage sont définies en fonction des résultats des essais de production qui font suite à la perforation. Elle doit être suffisamment profonde pour permettre un rabattement important du niveau d'eau et doit avoir un diamètre assez grand pour installer une pompe immergée permettant de délivrer le débit voulu. A titre indicatif, les diamètres minimums en fonction de plusieurs débits de pompage sont donnés dans le tableau 3.3.2. Pour un bon fonctionnement des pompes immergées, il est préférable que l'inclinaison de la chambre de pompage ne dépasse pas 10 à 15° par rapport à la verticale.

La consommation électrique des pompes immergées dépend de leur puissance, qui est directement proportionnelle aux débits et aux hauteurs manométriques. A titre indicatif, quelques puissances en fonction du débit et de cette hauteur sont fournies dans le tableau 3.3.3. Etant donné que les débits d'eau thermale sont modulés en fonction de la demande énergétique, il est possible d'optimiser la consommation électrique en installant des variateurs de fréquence, qui permettent de réduire la vitesse de rotation du moteur des pompes immergées lorsque la demande de débit diminue.

Tableau 3.3.3 : Diamètres minimums de la chambre de pompage en fonction des débits d'exploitation. Sont données aussi les puissances du moteur en fonction de deux diverses hauteurs manométriques H (d'après données du catalogue Grundfos).

Débit de pompage	Ø chambre de pompage (min.)	Puissance pompe (H = 50 m)	Puissance pompe (H = 100 m)
400-800 l/mn (7-13 l/s)	7" (~180 mm)	6 – 11 kW	11 - 22 kW
800-1'500 l/mn (13-25 l/s)	10" (~250 mm)	11 – 22 kW	22 – 45 kW
1'500-2'500 l/mn (25-42 l/s)	12" (~300 mm)	22 – 45 kW	45 – 75 kW
2'500-4'500 l/mn (42-75 l/s)	14" (~350 mm)	45 – 90 kW	75 – 185 kW

En raison de la température relativement élevée des eaux géothermales, il faut surdimensionner le moteur des pompes immergées, ce qui permettra d'en assurer le refroidissement. Pour assurer une bonne longévité des pompes, il est préférable de les laisser tourner en continu, plutôt que de les enclencher et déclencher en fonction de la demande de débit. Un débit de fuite minimum doit être choisi en fonction des caractéristiques de la pompe et une soupape de sécurité doit être installée pour éviter des dégâts en cas de fermeture accidentelle d'une vanne d'approvisionnement. Pour terminer, une attention particulière doit être apportée aux chutes de tension du réseau, qui peuvent causer un surchauffement du moteur des pompes et entraîner des dégâts importants.

3.3.5 Potentiel géothermique, utilisateurs et besoins énergétiques

La puissance du potentiel géothermique $Q_{géo}$ (à savoir la puissance thermique qui peut être fournie par l'eau chaude du forage) peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (OFEN 1992) :

$$Q_{géo} = 4.18 \cdot 10^{-3} \cdot D \cdot (T_s - T_r) \quad \text{en MWth}$$

avec D = débit en l/s ; T_s = température de la source ; T_r = température du rejet

La température du rejet est fixée en fonction du mode d'utilisation prévu de la chaleur, par exemple de 5 à 10°C en cas de recours à des pompes à chaleur.

A titre indicatif, pour des forages géothermiques exploités actuellement en Suisse, les puissances thermiques en tête de puits avec refroidissement à 10°C varient entre 0.2 MWth (Kloten) et 5.5 MWth (Lavey-les-Bains). La géothermie est utilisée essentiellement pour des bains thermaux ou des quartiers d'habitation. La seule opération géothermique qui alimente actuellement un réseau de chauffage urbain de vastes dimensions est celle de Riehen à Bâle (apport par la géothermie : 4.4 MWth).

Avant la réalisation d'un forage géothermique, il s'agit d'identifier les utilisateurs potentiels de la chaleur et d'évaluer leurs besoins énergétiques pour voir de quelle manière le potentiel géothermique pourrait correspondre à ces besoins. Une fois le forage réalisé, un ajustement se fera sur la base du débit réel disponible. L'évaluation succincte des besoins peut se faire de différentes manières (OFEN 1992). Une approche rapide consiste à estimer le volume des différents bâtiments. Pour évaluer le besoin global en puissance thermique, on utilisera alors une puissance de 30W/m³ pour les habitations datant de plus de 5 ans et 20 W/m³ pour les logements neufs.

Si on utilise une pompe à chaleur pour relever le niveau de température de la source, la puissance disponible à la sortie de la PAC sera fonction de la puissance géothermique et du coefficient de performance (COP) de la PAC. Ainsi, en admettant un forage de 700 m qui délivre un débit de 12 l/s avec une température de l'eau thermique de 30°C, l'apport de la géothermie est de 1MWth. La puissance totale disponible à l'aide d'une PAC avec un COP de 3.5 sera de 1.4 MWth (OFEN 1992).

3.3.6 Coûts et aspects économiques

Les coûts des forages géothermiques devraient en principe augmenter de manière quasiment exponentielle en fonction de la profondeur. En réalité, si on considère les coûts réels de dix de ces forages réalisés en Suisse entre 1988 et 1998 (y.c. le suivi hydrogéologique), on s'aperçoit de manière surprenante qu'ils sont directement proportionnels à la longueur des forages (figure 3.3.5). Sur la base de cette règle empirique et en ne considérant que les prix des 4 forages couronnés de succès, le tableau 3.3.4 permet d'estimer de manière approximative le coût probable d'un nouveau forage géothermique en Suisse.

Tableau 3.3.4 : Coût probable d'un forage géothermique d'exploitation réalisé en Suisse et complètement équipé, estimé sur la base du prix des 4 forages couronnés de succès. Les montants présentés sont probablement largement comptés, car depuis quelques années les prix de perforation ont baissé en raison de nouvelles technologies.

Profondeur du forage (m)	Coût probable du forage (Mio CHF)
500	0.9
1'000	2.4
1'500	3.9
2'000	5.4
2'500	6.9

Une analyse statistique a été entreprise par Vuataz (1995) sur la base des prix de 7 forages géothermiques et d'un doublet (Riehen) réalisés en Suisse. Elle met en évidence un fort coefficient de variation (>75 %) pour certains postes (plateforme de forage, essais de pompage, suivi géologique et direction travaux). Ces étonnantes différences, si elles s'expliquent au niveau des plateformes (différentes profondeurs de forage, chantier en milieu rural ou habité), sont difficiles à justifier pour le suivi géologique et la direction des travaux. Normalement, l'ensemble de ces deux postes ne devrait pas dépasser 15% de l'investissement global. Quant à la comparaison avec des forages réalisés dans les pays de la Communauté européenne, on constate que ceux réalisés dans le Bassin Parisien sont en moyenne nettement meilleur marché (Vuataz 1992). Ce qui est étonnant, c'est de voir qu'en France deux forages géothermiques de production complètement équipés peuvent être réalisés avec le budget d'un forage en Suisse ! Cette différence ne peut pas s'expliquer uniquement par l'absence d'imprévus lors de la perforation en raison d'une parfaite connaissance des aquifères profonds et de la structure géologique du Bassin Parisien. Pour permettre d'optimiser à l'avenir les coûts des forages géothermiques suisses, une nouvelle analyse statistique basée sur les prix de tous les forages réalisés depuis 1988 devrait être entreprise, avec une étude comparative des prix pratiqués dans les pays européens limitrophes.

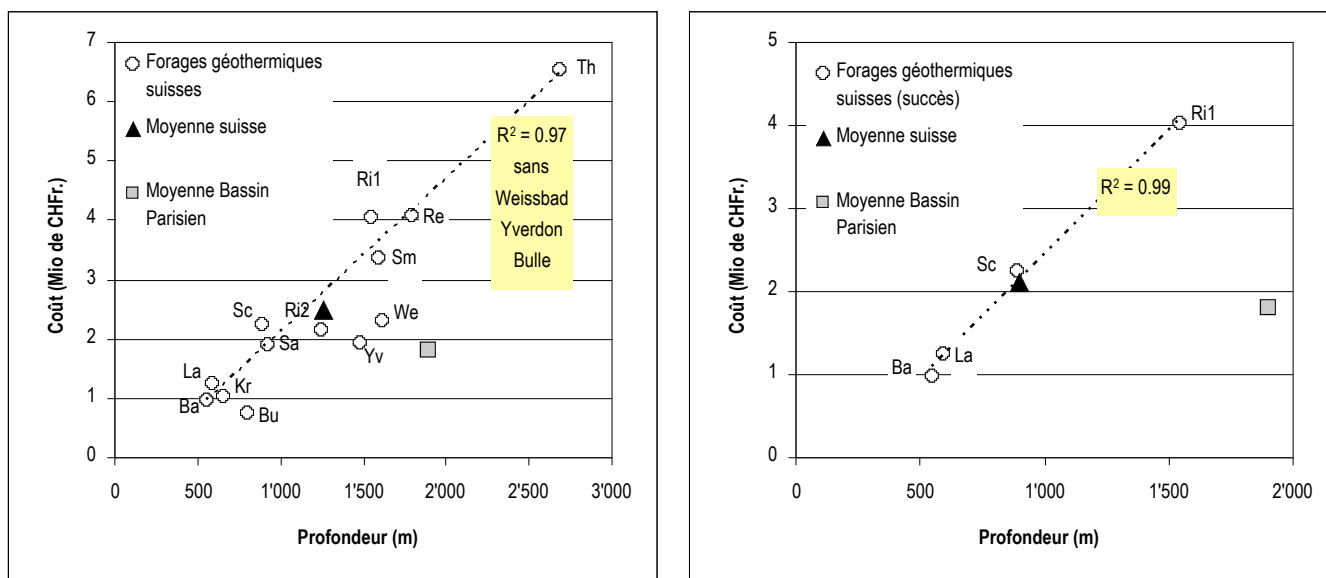


Figure 3.3.5 : Coûts des forages géothermiques de production complètement équipés réalisés en Suisse entre 1988 et 1998 en fonction de leur longueur (source : VUATAZ 1997). Sur le diagramme de gauche, 10 forages s'alignent le long d'une droite de régression. Font exception à cette règle les forages de Bulle, Yverdon et Weissbad (échecs, pas d'équipement). Sur le diagramme de droite, seuls les quatre forages couronnés de succès ont été considérés. On observe que le coût des forages géothermiques en France est nettement plus bas qu'en Suisse.

En ce qui concerne l'évaluation des coûts des installations de surface (réseau géothermique, centrale de chauffe, réseau de distribution de la chaleur et sous-stations, puits géothermiques non compris), nous ne disposons que d'approximations qui datent du début des années 90 (OFEN 1992). Pour une agglomération jusqu'à 2'000 habitants-équivalent (hab-eq), l'investissement spécifique devrait être approximativement de CHF 1'000 par kW_{th} installé si on utilise des PAC électriques. Ce montant s'abaisserait à CHF 850 pour de plus grandes agglomérations. Par contre, si l'on fait appel à des PAC avec moteur thermique, on devrait rajouter environ CHF 200. A la lumière de la réalisation géothermique de chauffage urbain à Riehen (40 Mio CHF y.c. les forages pour 15'000 kW_{th} installés), ces estimations apparaissent nettement sous-estimées. Elles devraient être mises à jour sur la base de statistiques récentes

effectuées sur des centrales géothermiques de chauffage urbain fonctionnant en Allemagne ou en Autriche.

Pour le transport de l'eau thermale, l'utilisation de conduites flexibles et isolées en polyéthylène réticulé (PE-X), protégées par un revêtement en polyéthylène à basse densité (PE-LD), en broches de plusieurs centaines de mètres, permet d'abaisser nettement les coûts de mise en place. Ce système a fait ses preuves à Lavey-les-Bains.

Des logiciels de calcul permettent de simuler différentes variantes énergétiques et d'estimer les investissements (p.ex. GEOTERM fourni par l'OFEN). A titre indicatif, les prix pour les différents postes d'une opération géothermique sont fournis dans le tableau 3.3.5.

Tableau 3.3.5 : Investissements indicatifs pour différents postes lors d'une réalisation de forage géothermique et d'un réseau de chauffage urbain (Hadorn 1996).

Poste	Investissement	Remarques
Puits géothermique (1'000 à 2'000 m)	CHF 2'500.- / m	Y.c. suivi géologique, équipement complet et pompe immergée
Conduite isolée en PE en milieu rural	CHF 470.- /m	Y.c. fouille
Conduite de liaison avec centrale de chauffe (INOX)	CHF 1'000.- /m	2 conduites, y.c. fouille
Réseau CAD en plastique en milieu urbain	CHF 650.- /m	
Introduction dans les bâtiments importants	CHF 50'000.-	Par introduction
Groupe CCF installé et équipé	CHF 1'200 / KW _{th} installé	
Echangeur de chaleur à plaques installé et raccordé	CHF 10'000.- CHF 15'000.-	Unité de 1'000 kW _{th} Unité de 500 kW _{th}
PAC installée et raccordée	CHF 1'200.- / KW _{th} installé	Puissance : 500 – 1'000 kW
Chaudière à gaz installée avec son circuit	CHF 500.- / kW	
Bâtiment technique, y.c. le terrain	CHF 300.- /m ³	
Etudes et direction projet	Env. 10% de l'investissement global	

Sur la base des données fournies au tableau 3.3.5, on obtient pour Riehen un investissement global de l'ordre de 30 Mio CHF, donc nettement inférieur à la réalité (40 Mio CHF). Pour ce cas particulier (il s'agissait de la première centrale en Suisse), la création du réseau de chauffage à distance en milieu fortement habité, la fourniture de chaleur à des bâtiments déjà existants, ainsi que les difficultés techniques rencontrées au cours des premières années d'exploitation ont sûrement engendré des surcoûts. Toutefois, la différence entre évaluation et réalité ne peut pas s'expliquer uniquement par ces facteurs défavorables. Il est donc probable que les montants indicatifs de ce tableau soient aussi sous-estimés.

3.4 Développements AP à l'étranger et en Suisse

3.4.1 Développements AP dans les pays européens limitrophes

France

Le développement de la géothermie française a pris son envol lors des deux crises de l'énergie des années 1970, avec une importante activité entre 1978 et 1987 (SSG 2002). Actuellement, quelques 55 centrales géothermiques sont en fonction, principalement dans le Bassin parisien et dans le Bassin aquitain (sud-ouest). Elles sont utilisées essentiellement pour du chauffage urbain de quartiers résidentiels. Des chaudières d'appoint sont couplées pour assurer les demandes de pointes. Souvent le fluide géothermal d'origine profonde est fortement salé (env. 30 g/l) et ne peut être rejeté en surface après son usage calorifique. C'est pourquoi, toutes les installations géothermiques du Bassin parisien sont basées sur le principe du doublet. A proximité immédiate du puits de production, le fluide géothermal échange sa chaleur avec le fluide de chauffage, avant d'être réinjecté en profondeur. A fin 1999, la puissance totale installée était de 328 MW_{th} (Laplaige et al. 2000).

Au centre du Bassin parisien, entre 1.8 et 2 km de profondeur, se trouve l'aquifère sédimentaire du Dogger, dont la température (56 à 83°C) et la productivité (39 à 167 l/s) sont très favorables pour des installations de chauffage géothermique. Un autre critère favorable est représenté par les nombreux consommateurs de chaleur des cités résidentielles de la couronne parisienne, qui sont toutes raccordées à des réseaux de distribution de chaleur. Au total, 34 opérations géothermiques avec une puissance installée de 227 MW_{th} permettent de chauffer quelques 140'000 équivalents-logements, soit près de 500'000 personnes.

A Meaux, ville de l'est parisien, quatre doublets géothermiques desservent depuis 1983 15'000 équivalents-logements (50'000 personnes) par le biais de trois réseaux de distribution. La géothermie assure plus de 75% des besoins de chaleur (chauffage et eau chaude) d'appartements, d'un centre hospitalier et de divers équipements publics. Cela représente quelques 18'000 tonnes de pétrole économisées par an pour un investissement global d'environ 68 millions de CHF (valeur 1984).

Plus aucun forage n'a été réalisé depuis 1988, principalement en raison des coûts très bas des énergies fossiles. Depuis 1986, 19 centrales géothermiques ont été fermées dans le Bassin parisien, en raison des conditions économiques mais aussi de problèmes techniques liés à l'agressivité des eaux géothermales.

Allemagne

Quelques 30 grandes centrales géothermiques utilisent des fluides chauds provenant d'aquifères profonds, situés dans les bassins sédimentaires du nord de l'Allemagne, de la Bavière et du Fossé rhénan (SSG 2002). Il s'agit principalement de centrales de chauffage à distance, souvent combinées avec des centres thermaux, et de serres agricoles. Les températures des eaux exploitées varient entre 26 et 108°C et les débits vont de 1 à 81 l/s. A fin 1999, la puissance totale installée était de 55 MW_{th}. Au contraire de la France, on observe en Allemagne une forte progression de la géothermie AP, avec plusieurs nouvelles centrales en cours de réalisation qui devraient permettre d'atteindre une puissance installée supérieure à 90 MW_{th} en 2003 (Schellschmidt et al. 2000). Notamment, la nouvelle centrale transfrontalière avec l'Autriche de Simbach-Braunau permet de fournir depuis 2001 une puissance installée supplémentaire de 30 MW_{th}, avec une eau très peu minéralisée (1.1 g/l), captée dans les calcaires du Malm par un forage dévié long de 3'203 m (Goldbrunner 2001).

En 1983, un forage de prospection pétrolière de 2.3 km a découvert, dans la petite ville d'Erding à 36 km au nord-est de Munich, une ressource géothermique à 65°C. Depuis 1994, un réseau de distribution de chaleur d'une extension de 13 km et un grand parc thermal ont été construits. Progressivement, de nombreux consommateurs d'énergie ont été raccordés, et actuellement,

2'000 appartements, des écoles et un hôpital sont chauffés par ce réseau, ainsi que les piscines thermales. La géothermie assure 50% des besoins de chaleur du réseau. Pour élever la température de l'eau du réseau de chauffage jusqu'à 100°C selon la saison, une pompe à chaleur et une chaudière à gaz ont été installées. Finalement, après refroidissement à 20°C, l'eau géothermale est mélangée à de l'eau froide puis injectée dans le réseau d'eau potable. L'ensemble des investissements pour la géothermie (sauf le forage) se sont élevés à environ 20 Mio CHF pour 8.6 MW_{th} installés. En contrepartie, chaque année, 3'000 tonnes de fuel sont économisées.

Autriche

Malgré une longue tradition d'utilisation des ressources géothermiques pour le thermalisme et les bains, les aspects énergétiques de la géothermie n'ont été développés que récemment, notamment grâce à l'arrivée de l'Autriche dans l'Union européenne (financement de projets par le programme THERMIE). Des ressources géothermiques existent dans la plupart des provinces autrichiennes, mais elles ne sont exploitées que dans deux régions, le bassin Styrien et le bassin molassique de Haute-Autriche (SSG 2002). Les températures des eaux exploitées varient entre 33 et 95°C, avec des débits jusqu'à 81 l/s. Au total, une douzaine d'exploitations géothermiques sont en fonction pour le chauffage d'hôtels, de centres thermaux ou pour des habitations au moyen de réseaux de distribution de chaleur. A fin 1999, la puissance totale installée était de 27.3 MW_{th}.

Dans la localité d'Altheim, une petite installation originale produit de l'électricité à partir de ressources géothermiques à 100°C seulement. Depuis plusieurs années, 40% des 5'000 habitants de cette ville sont chauffés grâce à une ressource géothermique à 106°C produite par un forage de 2'300 m de profondeur. Un autre forage sert à réinjecter l'eau refroidie. En 2000, une petite centrale de production d'électricité de 1 MW électrique a été construite, basée sur la technique ORC (fluide organique à bas point de vaporisation). Selon la saison et la demande en chauffage, les deux centrales se partagent la ressource géothermique entre production de chaleur et d'électricité. L'ensemble du projet de production d'électricité a coûté environ 6.5 Mio CHF, dont 35% ont été couverts par le programme européen THERMIE.

Italie

Malgré l'existence de très nombreuses sources chaudes et un thermalisme traditionnel important, la géothermie de moyenne température ne s'est pas beaucoup développée, non pas par manque de ressources, mais par l'absence d'incitations économiques. Quelques systèmes de chauffage existent pour des villages proches des centrales géothermiques, pour des groupes de serres agricoles et des installations de pisciculture (SSG 2002). Les centrales géothermiques exploitant des aquifères profonds dont la température est inférieure à 100°C ne sont qu'une dizaine et l'on recense une seule installation avec réseau de chauffage à distance (Ferrare). On peut estimer qu'à fin 1999, la puissance totale installée de type AP était de 232 MW_{th} (Cappetti 2000). Les thermes d'Abano (~230 forages avec une profondeur moyenne de 400 m), de Montegrotto et de Battaglia, dont les eaux atteignent des températures entre 64 et 78°C avec un débit total par site jusqu'à 580 l/s, représentent à elles seules le 80% de la puissance totale précitée.

Au nord-est de l'Italie, un forage pétrolier a mis en évidence en 1956 une ressource géothermique à 100°C à la profondeur de 1'100 m. Actuellement, trois puits sont en fonction, deux producteurs et un pour la réinjection. Après les échangeurs de chaleur situés à proximité des puits, une conduite isolée de 2 km transporte l'eau de chauffage à 95°C vers la centrale. Celle-ci est composée de réservoirs de stockage, de chaudières à gaz pour les demandes de pointe, ainsi que d'un incinérateur. Le réseau de distribution, d'une longueur totale de 30 km, alimente une partie importante de la ville de Ferrare (9'960 équivalents-logements). La puissance installée est de 16 MW_{th}. La contribution de la géothermie s'élève à près de 60% des besoins en chaleur et permet de substituer 5'000 tonnes de pétrole par an. L'ensemble du projet a coûté environ 90 Mio CHF.

3.4.2 Développements AP en Suisse

Jusqu'en 1976, le développement de la géothermie AP en Suisse était quasiment inexistant (Vuataz & Fehr 2000). L'utilisation des eaux chaudes provenant des profondeurs était confinée au remplissage des piscines de stations thermales. La première réalisation géothermique pour le chauffage de bâtiments (en complément avec l'exploitation d'un établissement thermal) a vu le jour à Lavey-les-Bains, grâce à la réalisation en 1972 d'un forage profond 200 m et pouvant délivrer une eau à 62°C avec un débit de 400 l/mn (Jaffé et al. 1976).

Dès la première crise pétrolière en 1974, l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) a mis en place une politique d'encouragement des énergies renouvelables et notamment de la géothermie avec la création en 1975 d'une Commission fédérale de géothermie et du stockage souterrain de chaleur (KGS). Celle-ci avait pour mission de clarifier les aspects scientifiques, techniques et économiques liés à la géothermie et d'en promouvoir la connaissance et le développement. Les travaux de la KGS se concrétisèrent en 1981 avec l'édition d'une « Synthèse des données géothermiques » (Rybach et al. 1981). Des cartes furent publiées avec indications du gradient géothermique calculé à partir des mesures de température fournies par les forages pétroliers profonds (figure 3.4.1). Un manuel spécifique fut conçu pour aider les réalisateurs d'installations et ceux qui les soutenaient à mettre en œuvre des projets (OFEN 1992).

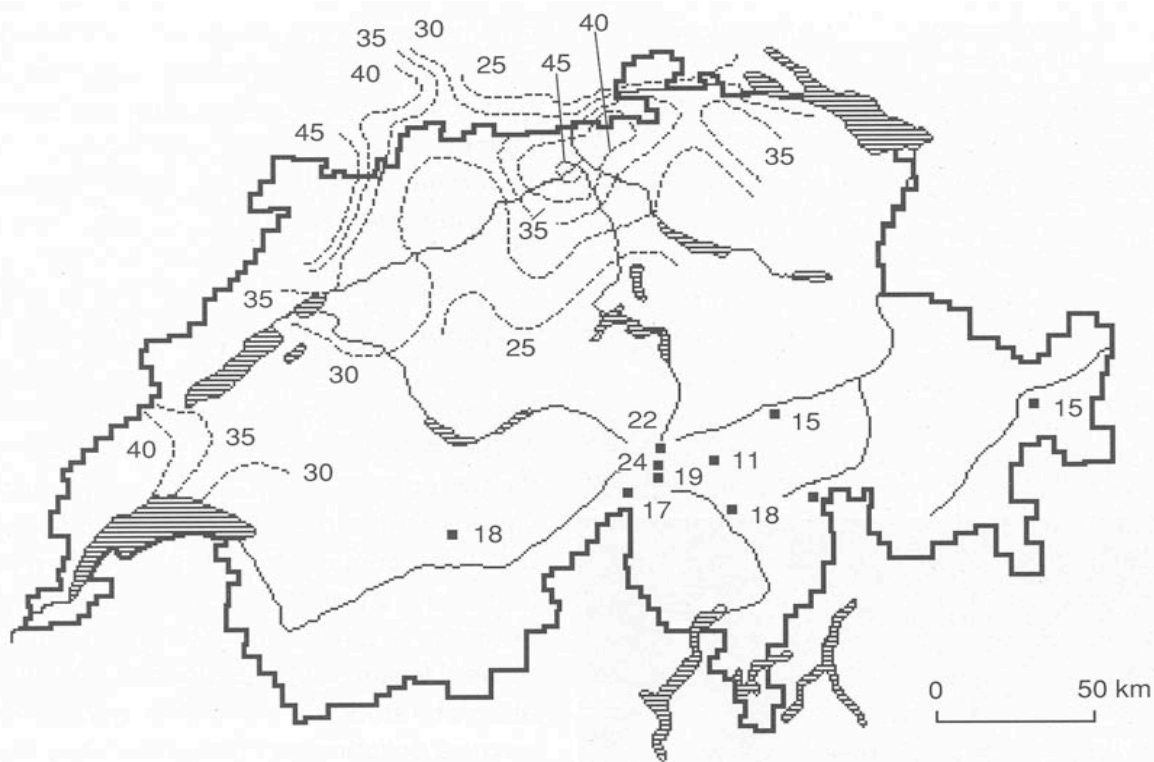


Figure 3.4.1 : Carte géothermique de la Suisse avec indications des valeurs moyennes de gradient géothermique (Weber & Fehr 1990). Dessinée en 1982, elle montre des gradients anormalement élevés dans la région de Bâle et dans la vallée inférieure de l'Aar. Les informations sont concentrées essentiellement au Nord de la Suisse (nombreux forages profonds), alors que les données lacunaires au niveau du territoire du canton de Vaud ne permettent pas d'avoir une répartition précise des gradients géothermiques.

La région du plateau suisse a été identifiée comme la zone la plus favorable pour l'exploitation d'aquifères susceptibles de fournir de l'eau chaude. Au niveau du bassin molassique, dont l'épaisseur passe de quelques mètres au pied du Jura à plus de 3'000 m, les grès de la Molasse marine supérieure et ceux de la Molasse d'eau douce inférieure sont relativement perméables, du moins dans le Nord de la Suisse. Plus en profondeur, trois horizons formés de

roches compétentes fissurées (calcaires, dolomies et gypses) sont aussi aquifères : le Malm, le Dogger et le Trias (Muschelkalk supérieur). Les régions les plus favorables pour atteindre ces aquifères par des forages profonds avec un investissement économiquement rentable se situent au Nord de la Suisse et au pied de la chaîne du Jura.

Pour cette raison, dès 1980 deux projets de prospection régionale des ressources géothermiques ont été réalisés, l'un dans la région comprise entre Zursach au nord et Schinznach au sud et l'autre le long du pied du Jura entre Bad Lostorf et Genève, en passant par Bienne (NEFF 1980 et 1984, Burger & Gorhan 1986, Gorhan & Griesser 1988). Ces études ont été financées par le Nationaler Energie-Forschung-Fonds (NEFF) et exécutées par un groupe de recherche comprenant des instituts d'universités et d'écoles polytechniques, ainsi que des bureaux d'ingénieurs. Le Muschelkalk supérieur, considéré comme un aquifère potentiel important, a été la cible de 5 forages de prospections réalisés dans le Nord de la Suisse jusqu'à une profondeur de 410 m.

Les cantons, communes et autres milieux intéressés par l'exploitation géothermique des aquifères profonds n'étaient pas à même de supporter seuls le financement des forages profonds, relativement coûteux, avec le risque de ne pas trouver une productivité suffisante. Aussi la Confédération décida-t-elle, en 1987, d'assurer pour une période de 10 ans une couverture du risque géologique, avec un montant global de 15 millions de CHF et pour des forages dont la profondeur dépassait 400 m. En cas d'insuccès, il était prévu de rembourser aux promoteurs jusqu'à 50% des coûts de forage et de tests. Plus tard, une subvention fut mise en place jusqu'en 1995, couvrant à titre d'encouragement jusqu'à 25% de ces coûts. L'octroi de la couverture du risque et le paiement des montants étaient effectués sur recommandations de la KGS, après une évaluation préliminaire détaillée du projet et une analyse des résultats du forage.

Avec cette couverture du risque, 13 forages profonds (dont un doublet) ont été réalisés jusqu'en 1998, dont 10 sont exploités commercialement (tableau 3.4.1). Toutefois, par rapport aux objectifs de réussite établis par les contrats avec la Confédération, seules 4 réalisations géothermiques ont été considérées comme un succès (Riehen, Bassersdorf, Bad Schinznach et Lavey-les-Bains) et deux comme un succès partiel (Saillon et Kreuzlingen, figure 3.4.2). Pour ces projets, les températures des eaux profondes captées varient entre 26 et 69°C et les débits de production entre 4 et 22 l/s. Les puissances géothermiques en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MW_{th}.

Tableau 3.4.1 : Caractéristiques des forages géothermiques profonds réalisés en Suisse entre 1983 et 1998 (Vuataz & Fehr 2000).

Forage	Canton	Prof. totale (m)	Formation aquifère	Tempér.: fond (f) ou tête (t) de puits (°C)	Débit de product. (l/s)	Puissance en tête de puits avec refroidissement à 10°C (kW th)	Minéralisation de l'eau (g/l)	Utilisation de la géothermie en 1999	Année de forage
Kloten	ZH	400	Molasse marine supér.	22.7 f 19.0 t	5.0	188	0.92	Quartier de 70 logements	1983
Riehen 1 (producteur)	BS	1547	Muschelkalk supér.	67.0 f 62.0 t	20	4350	18.2	Réseau de chauffage urbain	1988
Riehen 2 (injecteur)		1247		54.0 f	14	–	14.2		1988
Kreuzlingen	SG	655	Molasse marine supér.	30.0 f 26.5 t	3.7	255	0.87	Piscine	1988
Reinach	BL	1793	Muschelkalk supér.	72.0 f	0.10	26	46.2	Aucune	1989
St Moritz	GR	1600	Série de Chastelets Nappe de Platta	47.2 f 22.0 t	1.3	67	14	Aucune	1991
Bulle	FR	800	Molasse marine infér.	30.0 f	0.08	7	–	Aucune	1992
Bassersdorf	ZH	553	Molasse marine supér.	23.0 t	4.3	232	–1	Home médicalisé	1992-93
Weggis	LU	2302	Molasse continent. infér.	73.0 f	0	~70 (sonde géothermique)	–	3 petits immeubles	1992-93
Thönex	GE	2650	Crétacé infér., Jurass. supér.	88.5 f	3.1	765	–1	Aucune	1993
Weissbad	AI	1618	Molasse contient. infér.	45.0 f	0	~50 (sonde géothermique)	–	Centre thermal	1993
Schinznach Bad	AG	891 415	Muschelkalk sup.	63.0 f 44.5 t	8.3	1200	2.15	Centre thermal	1996
Saillon	VS	929	Lias, Trias	32.4 f 30.5 t	4.9	420	4.45	Centre thermal et école (en cours de montage)	1996
Lavey-les-Bains	VD	595	Cristallin Aiguilles Rouges	72.0 f 69.0 t	22.5	5550	1.4	Centre thermal	1997
Yverdon-les-Bains	VD	1440 256 500 1117	Crét. inf., Jurassique sup. et moyen	60 f 22 t 28 t 39 t	92 50 4.3	4590 3760 525	0.45 0.40 0.50	Aucune	1998

L'abrogation de la couverture du risque a signé l'arrêt de mort des projets géothermiques visant à exploiter les aquifères profonds. Il serait pourtant souhaitable d'explorer, grâce à de nouveaux forages profonds, les niveaux aquifères peu connus des roches sédimentaires du Mésozoïque, notamment les moins profonds (Malm et Dogger), dans les zones à forte densité de peuplement de Plateau suisse. L'aide de la Confédération devrait en fait, contrairement à ce qui a été fait lors de la couverture du risque géologique, subventionner des forages d'exploration moins chers (slimhole) et, en cas de succès, laisser l'entier du financement des puits de production aux promoteurs.

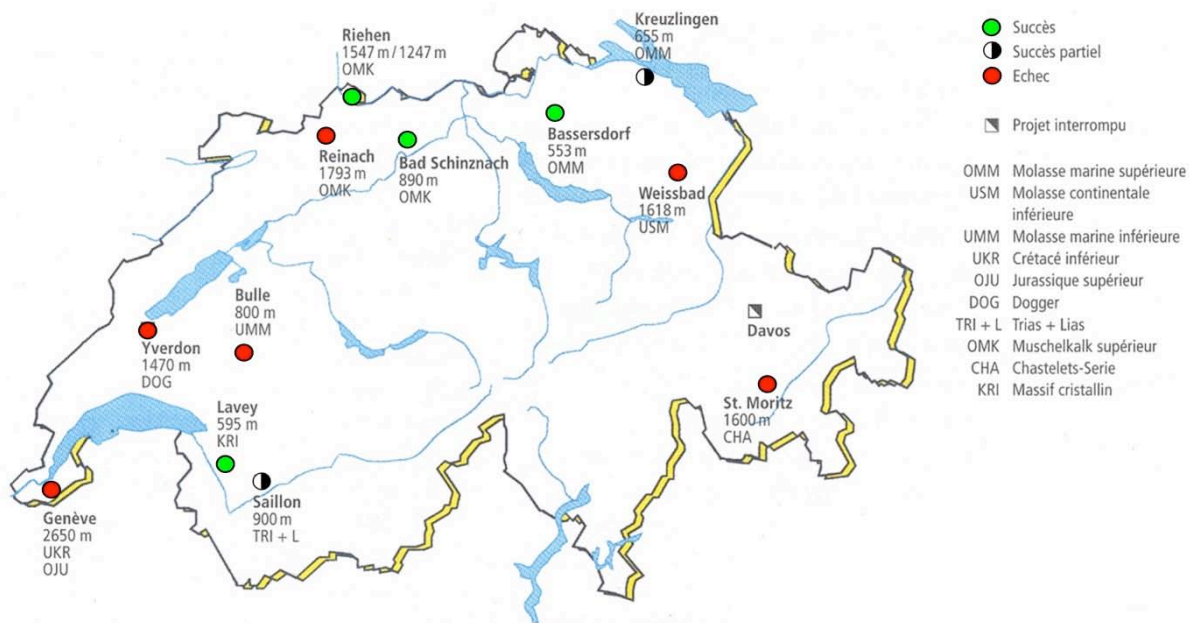


Figure 3.4.2 : Situation, profondeur et état des projets de forages géothermiques profonds en Suisse effectués entre 1987 et 1998 avec l'aide de la Confédération (modifiée d'après OFEN 1998).

La première et la seule centrale géothermique de Suisse fonctionnant sur le principe du doublet, a été mise en service en 1994 pour le réseau de distribution de chaleur de Riehen (Bâle). Les deux installations exploitant l'énergie géothermique sont équipées chacune d'une pompe à chaleur entraînée électriquement et d'une centrale de cogénération chaleur-force. (Vuataz & Fehr, 2000). L'exploitation des eaux souterraines est réalisée par deux forages verticaux distants de 1 km. Le forage de production a une profondeur de 1'547 m, celui de réinjection atteint 1'247 m. La température de l'eau en tête de forage est de 62°C, le débit d'exploitation, qui était au début de 14 l/s, a été porté à 20 l/s après acidification (injection d'acide chlorhydrique qui permet de dissoudre la calcite et d'élargir ainsi les fissures aquifères). L'aquifère exploité est celui du Muschelkalk supérieur et l'eau pompée, qui a une minéralisation de 18 g/l (approximativement la moitié de celle de l'eau de mer) ne peut pas être rejetée en surface dans un cours d'eau. La puissance installée atteint 15 MW_{th}, dont environ le tiers est fourni par la géothermie, et l'investissement total est de l'ordre de 40 Mio CHF. Quelques 160 immeubles sur territoire suisse sont chauffés par la géothermie, et une zone étendue de nouvelles constructions située de l'autre côté de la frontière, à Lörrach (Allemagne), a été approvisionnée en énergie dès fin 2000 par la centrale géothermique de Riehen. Grâce à cette part de chauffage fournie par la géothermie, sur une année ce sont 900 t de CO₂, 2 t de SO₂ et 1 t de NO_x qui n'ont pas été rejetées dans l'atmosphère (Oppermann 2001).

3.5 Réalisations et projets AP dans le canton de Vaud

3.5.1 Réalisations à Lavey-les-Bains et à Yverdon

Deux projets géothermiques AP ont été réalisés dans le canton de Vaud, avec des succès divers. Le forage géothermique profond de Lavey-les-Bains, réalisé en 1997, a capté l'eau souterraine la plus chaude de Suisse (68°C), avec un débit important. Il a bénéficié de plusieurs études et de toute une série de forages de reconnaissance réalisés durant la période 1990–1996, qui ont permis d'affiner une stratégie de forage appropriée permettant de recouper des fissures aquifères subverticales, dont on connaissait la direction. Par contre, le forage géothermique profond d'Yverdon-les-Bains, dont la longueur est nettement plus importante, n'a pas permis d'atteindre les objectifs préfixés, en raison d'un contexte structurel et géologique nettement plus compliqué à modéliser. Au niveau de l'aquifère profond visé, la lithologie du Dogger, qui s'est révélée beaucoup plus marneuse que les prévisions géologiques, n'a pas permis de drainer un débit suffisant.

Forage géothermique profond à Lavey-les-Bains

L'opération géothermique de Lavey-les-Bains avait pour objectifs de capter en profondeur de l'eau thermale avec une température de plus de 63°C avec un débit de l'ordre de 800 l/min. Elle devait garantir l'autonomie énergétique des Bains et du Centre médical de Lavey pour les besoins de chauffage, ventilation, production d'eau chaude sanitaire et pour les bassins, sans devoir recourir à des pompes à chaleur. En 1997, le forage P600, financé par l'Etat de Vaud, a été réalisé sur le site thermal. Avec une longueur de 595 m et une profondeur de 517 m, ce forage incliné et dévié (environ 45° dans la zone cible) a été un franc succès. Le programme de perforation, les délais de réalisation et le budget de 1.24 Mio CHF ont été parfaitement respectés. Les tests de pompage et les diagraphies ont montré la possibilité de capter dans les gneiss fissurés de l'eau thermale à ~69°C avec des débits supérieurs à 1'100 l/min.

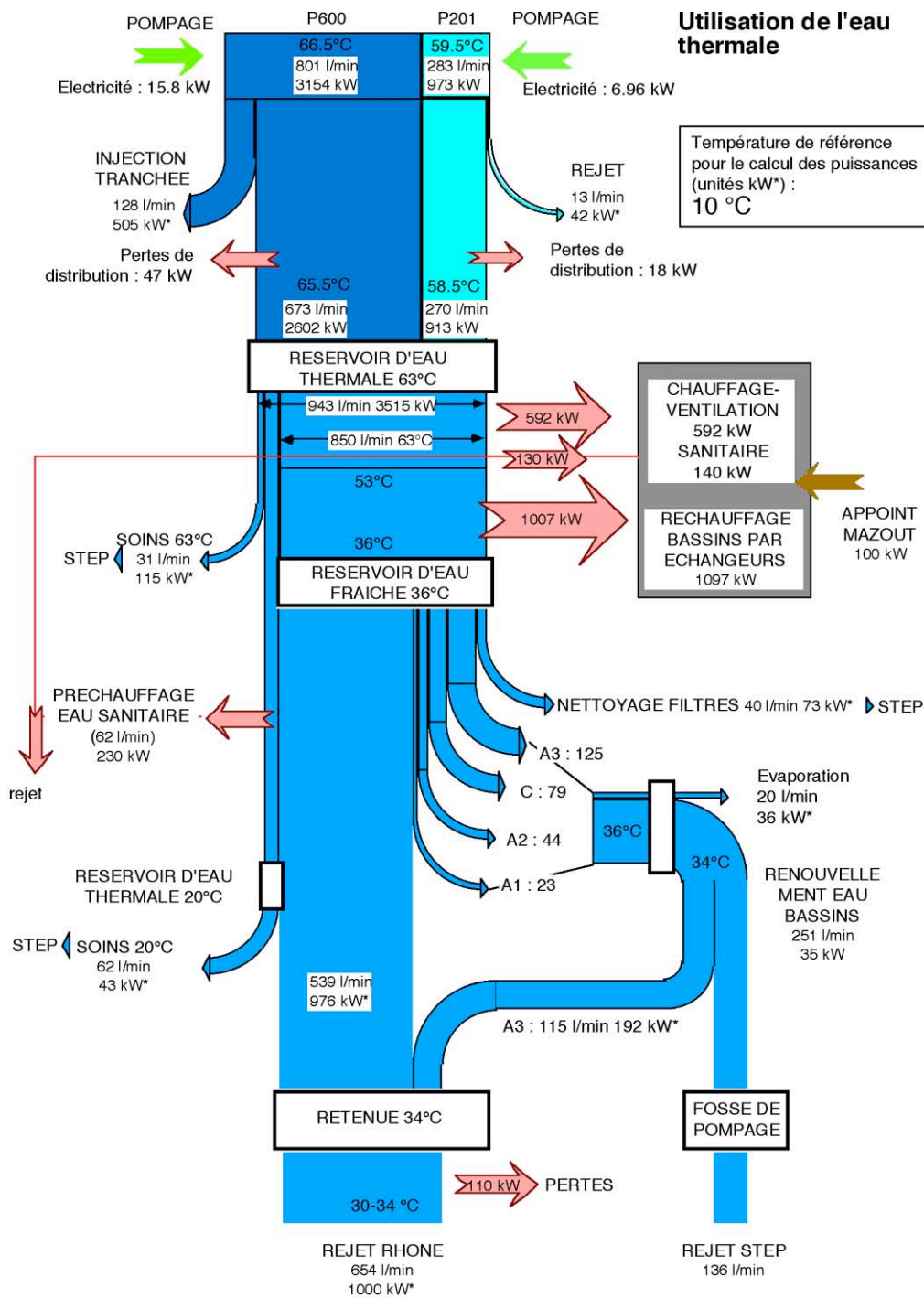
Le test de production réalisé en 1998 dans le tronçon aquifère entre 254 et 595 m a donné des résultats qui ont largement dépassé les prévisions les plus optimistes : débit de 1'340 l/min, rabattement de 77 m et température de l'eau en tête de puits de 68.7°C. Le potentiel thermique disponible est de l'ordre de 5.8 MW_{th} (rejet à 5°C). Le chimisme des eaux montre une minéralisation relativement faible (1.4 g/l), de type Na-SO₄>Cl.

L'impact sur l'ancien puits P201, en production depuis 1973, est relativement contenu. Pour cette raison, depuis avril 2000 on exploite simultanément les deux puits géothermiques. L'eau thermale pompée permet d'alimenter le complexe thermo-ludique des Bains de Lavey (figure 3.5.1), qui connaît actuellement un essor prodigieux, et le Centre médical de Lavey. Les équipements de raccordement et de pompage ont bénéficié du soutien financier de l'OFEN. Trois conduites isolées DN 100 en polyéthylène, dont deux de 870 m pour le P600, permettent d'acheminer l'eau jusqu'aux Bains. En 2002, environ 500'000 m³ d'eau ont été fournis aux utilisateurs, avec un débit moyen annuel de 500 l/min pour le P600 et de 466 l/min pour le P201. Au total, à fin 2002 plus de 1.5 Mio de m³ avaient été pompés depuis le début de l'exploitation ! La consommation électrique cumulée des pompes immergées est de l'ordre de 160'000 kWh. La consommation spécifique a été de 0.29 kWh par m³ d'eau pompée pour le P600 et de 0.25 kWh par m³ pour le P201.



Figure 3.5.1 : Bassin extérieur de 1'000 m² aux Bains de Lavey. L'utilisation en cascade de l'énergie géothermique fournie par les forages P600 et P201 permet, entre autres, de maintenir l'eau à une température constante de 36°C (Bianchetti, 2001).

Les pompages en continu permettent de fournir un débit maximum de 1'240 l/min à ~66 °C pour le P600 et 470 l/min à 58 °C pour le P201 (valeurs en décembre 2002). L'eau thermique fournie aux utilisateurs permet ainsi de couvrir la presque totalité des besoins en chauffage, production d'eau chaude sanitaire, ainsi qu'évidemment le réchauffement de l'ensemble de l'eau des piscines des Bains et du Centre médical de Lavey (figure 3.5.2). Cela est possible grâce à une exploitation en cascade de l'eau thermique à différents niveaux de température, produits par un enchaînement hiérarchisé d'échangeurs de chaleur, sans utilisation d'aucune pompe à chaleur. Sur les 1'829 kW_{th} que représente le besoin moyen annuel en chaleur, seulement 100 kW_{th} sont apportés par une chaudière à mazout d'appoint (5.5%). Les rejets actuels du centre thermal, qui se chiffrent à ~650 l/min d'eau à une température comprise entre 30 et 34°C, pourraient être valorisés dans un projet de chauffage à distance à St-Maurice (Valais). En rajoutant un groupe chaleur-force à la centrale de chauffage, la puissance maximale à distribuer atteindrait alors ~4.7 MW_{th}, permettant de chauffer plus de 500 équivalent-logements.



BSI SA / OG 27.05.2002

Figure 3.5.2 : Diagramme de flux d'eau thermique et des échanges d'énergie pour la réalisation géothermique de Lavey-les-Bains (année 2001). Depuis l'automne 2002, il n'y a plus aucun rejet d'eau thermique avant la fourniture aux utilisateurs (Bianchetti 2002).

Forage géothermique profond à Yverdon-les-Bains

Les travaux de recherche scientifique menés dans la région d'Yverdon-les-Bains ont évalué les potentialités de trouver un aquifère plus profond et par conséquent plus chaud que celui qui est actuellement exploité par le Centre thermal de Yverdon-les-Bains grâce au puits F4 (Muralt 1999). Celui-ci puise, à 470 m de profondeur, de l'eau thermique avec une température de 28°C, captée dans les calcaires du Malm (Vuataz et al. 1999).

Le site de forage a été choisi en fonction de la structure géologique reconnue et de sa proximité du Centre thermal. La cible géologique retenue était représentée par les calcaires oolitiques du Dogger inférieur (Bajocien). Afin de rester dans des zones favorables pour la circulation des fluides, le forage F5 devait suivre de près l'importante zone faillée de Pipechat-Chamblon-Chevressy (PCC), car c'est elle qui semble assurer une bonne perméabilité secondaire et contrôler l'ensemble des écoulements souterrains régionaux. D'après les estimations, le fluide provenant du Dogger devait atteindre une température supérieure à 50 °C et une minéralisation maximale de 5 g/l, avec présence d'hydrogène sulfurés (H₂S).

En 1998, la perforation, qui a duré 4 mois, a permis d'atteindre une longueur de forage de 1'479 m (profondeur d'environ 1'450 m). De très importantes venues d'eau thermique artésienne (au total > 120 l/s à des températures entre 22 et 28°C) ont été rencontrées à plusieurs niveaux dans les calcaires fissurés et karstifiés du Crétacé inférieur et du Malm supérieur. L'attendue liaison hydraulique avec le forage F4, qui exploite ces mêmes aquifères, a été prouvée. Une opération de déviation à la turbine s'est déroulée entre 803 et 1'028 m, afin de retourner dans le compartiment Sud de la zone de faille, considéré comme le plus prometteur pour la circulation des fluides (figure 3.5.3). Le forage a été tubé jusqu'à -1'117 m par cinq casings, dont quatre ont été intégralement cimentés. Seule la section entre 1'117 et 1'479 m a été laissée en trou nu, avec un diamètre de 16 cm. Conformément aux prévisions, une température de 59°C a été mesurée à 1'436 m.

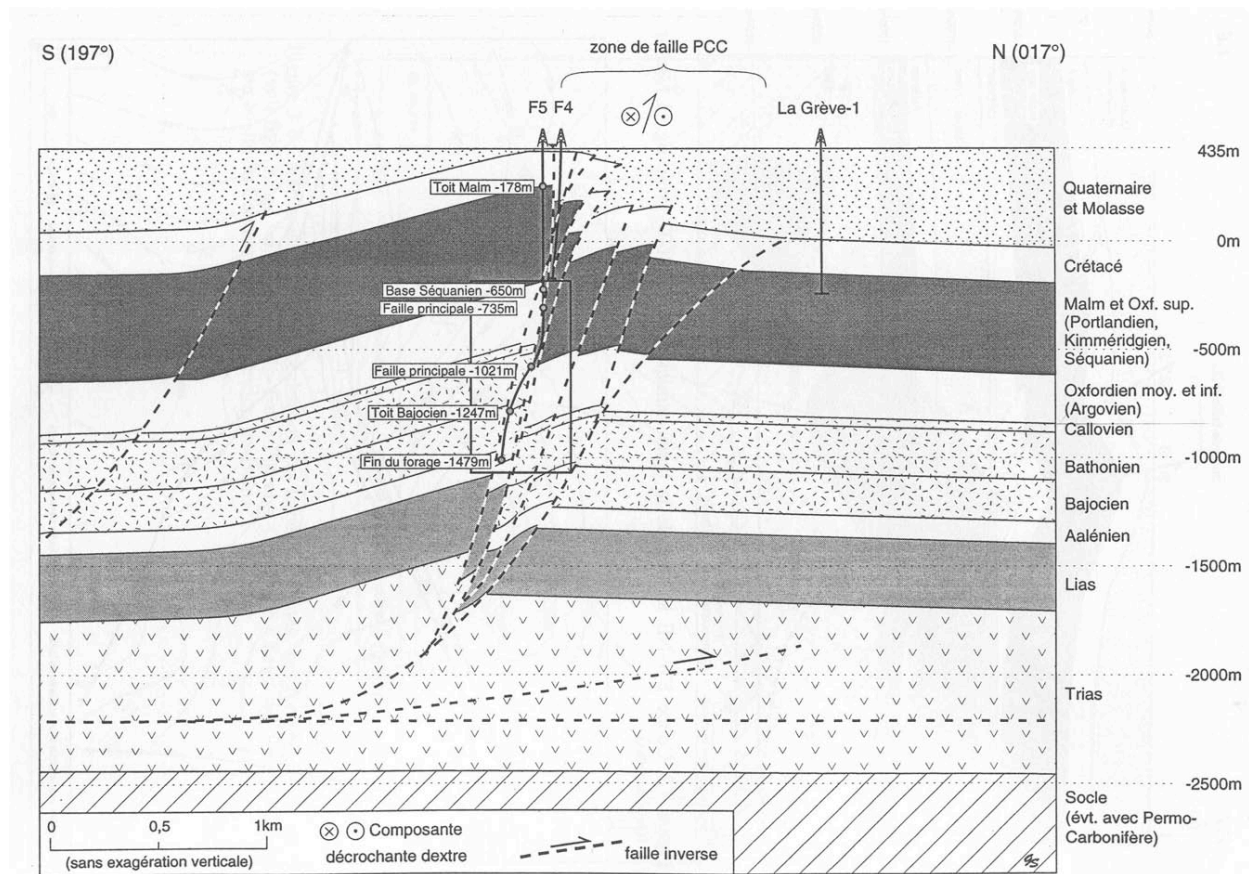


Figure 3.5.3 : Coupe géologique S-N passant par les forages F5 et F4 (Centre thermal d'Yverdon-les-Bains) et par le forage La Grève-1 (Arkina). On observe la déviation du forage F5 pour rester dans le compartiment Sud de la zone de faille PPC (Vuataz et al. 1999).

Malgré plusieurs nettoyages à l'air et à l'eau et une acidification, la zone non tubée dans le Dogger s'est révélée pratiquement improductive. La faible perméabilité du Bajocien est liée à la lithologie rencontrée : au lieu des calcaires oolitiques reconnus dans les affleurements de la chaîne du Jura et dans le forage pétrolier de Treycoyagnes, situé 3 km à l'Ouest du Centre

thermal, ont été traversées des formations le plus souvent marno-calcaires et marneuses. Celles-ci ont tendance à colmater les fissures des très nombreuses failles rencontrées. De plus, la section non tubées risque de se boucher partiellement par de l'argile qui tombe des parois du trou de forage.

Dans l'état actuel d'équipement du forage, deux niveaux producteurs profonds ont été identifiés. Le premier se situe à 784 m et se manifeste par un écoulement provenant du Séquanien, qui sort dans l'annulaire entre deux tubages. Le second est localisé vers 1'117 m, à la base du tubage, et l'eau provient du Bathonien. Ces deux niveaux permettent de pomper un débit d'environ 260 l/mn d'une eau à 39°C, ce qui représente un potentiel thermique brut de 0.6 MW_{th}. La minéralisation et le chimisme de l'eau ne devraient pas poser de problème d'exploitation : la minéralisation reste toujours faible (< 1 g/l), ainsi que la teneur en hydrogène sulfuré (H₂S). Cependant, le rabattement provoqué par le pompage est important, de l'ordre de 140 m. L'exploitation de ces venues d'eau n'est donc pas économiquement rentable.

En fonction des critères définis par la garantie du risque géologique pour déterminer le succès ou l'échec du forage F5, les résultats démontrent que l'opération géothermique n'a pas atteint ses objectifs, malgré un potentiel géothermique important mis en évidence dans les aquifères supérieurs (>10 MW_{th}). Il a été renoncé à une stimulation par fracturation hydraulique des deux niveaux producteurs profonds, cette opération comportant un risque d'échec non négligeable. L'investissement global pour la réalisation géothermique par forage profond d'Yverdon-les-Bains se monte à un peu moins de 2 Mio CHF.

3.5.2 Projets dans la région du Sud-Ouest lausannois et à Payerne

Projet de forage géothermique profond dans le Sud-Ouest lausannois

Ce projet, qui date de 1987 (donc à l'époque du doublet de Riehen), concerne la région à l'Ouest de Lausanne (Roux & Büchi 1987, cf. annexe 3.1). Il est arrivé au stade de l'avant-projet d'installation-pilote de géothermie, phase qui permettait de demander un cofinancement de la Confédération. Il a été préparé par deux membres de la KGS (un ingénieur et un géologue), à la demande de M. Berthoud, délégué à l'Energie de l'Etat de Vaud de l'époque, et de l'OFEN. Il concerne 5 agglomérations de plus de 5'000 habitants : Crissier, Ecublens, Bussigny, Chavannes et Renens. L'étude a analysé d'une part les aspects géologiques et géophysiques, et d'autre part a permis d'identifier et de caractériser les utilisateurs potentiels de chaleur dans la région.

Ce sont en premier lieu les calcaires du Crétacé et du Malm qui entrent en ligne de compte pour une exploitation d'énergie géothermique dans l'Ouest lausannois. Bien que la porosité primaire de ces roches soit insignifiante, la circulation des eaux est possible s'il y a présence de zones fissurées et surtout de zones karstifiées liées à des structures profondes (failles). Toutefois, on ne peut que supposer l'existence de ces zones à perméabilité élevée. En effet, il est difficile d'établir un schéma structural précis de l'Ouest lausannois, à cause du manque de données (sismique, gravimétrie, etc.) et des mauvaises conditions d'affleurements. Tout au plus, on peut supposer l'existence d'accidents de type failles de décrochement orientés N-S (l'accident de St-Sulpice en est un élément important) et SO-NE. Quelques rares linéaments NO-SE ont pu être observés.

Pour établir un profil géologique présumé du forage de Lausanne-Ouest, il a été tenu compte des forages pétroliers voisins (Savigny, Chapelle sur Moudon, Essertines). Selon les auteurs du rapport, des aquifères poreux sont possibles dans les formations suivantes : grès de la Molasse, calcaires urgoniens (Crétacé) et dolomies du Portlandien (Malm), ces dernières représentant le but principal d'exploration. Pour obtenir la quantité d'eau nécessaire, il est fort probable qu'il ne faille compter que sur les aquifères de fissuration, éventuellement en combinaison avec des aquifères karstiques. Cette fissuration est avant tout possible avec des calcaires fragiles se cassant facilement et des dolomies qui peuvent être karstifiées. Pour cette raison, la prospection géothermique d'aquifères intéressants n'a de sens que jusqu'à la base des calcaires du Malm. L'aquifère supposé de l'Urgonien a une épaisseur faible, de l'ordre de

40 m au maximum et se situe à une profondeur d'au moins 1'000 m. L'aquifère du Malm est plus épais (au moins 400 m) et se situe au-delà de 1'400 m de profondeur.

Une expertise indépendante concernant le risque de forage a été établie par le Dr Hauber de Bâle, qui a dirigé par la suite les travaux du doublet de Riehen, et a été intégrée au rapport de Roux et Büchi. La Molasse n'entre pas en considération comme aquifère suffisant. En effet, la Molasse inférieure d'eau douce est composée principalement de marnes et il n'y a pas de porosité primaire significative. Le Crétacé montre quelques niveaux qui pourraient être fissurés ou karstifiés. Toutefois, leurs épaisseurs ne sont pas suffisantes, prises individuellement, pour donner un but de prospection. Le Jurassique supérieur (Malm), avec plus de 400 m de calcaires, représente un bon objectif d'exploration pour une circulation par fissuration. Hauber conclut donc que le projet doit viser des circulations d'eau vers 1'500 m de profondeur dans les calcaires et dolomies fissurés du Malm, et, de manière accessoire, dans les calcaires du Crétacé situés au-dessus. Toutefois, les forages pétroliers effectués dans le canton de Vaud n'ont donné aucune indication d'amenée d'eau dans ces formations. Il faut donc espérer que dans le secteur exploré des zones de fissuration ouverte assez considérables existent.

Quant au gradient géothermique, il a été extrapolé à partir des mesures de température du forage Savigny-1. Avec une valeur de 26.5° C/km, des valeurs de température de 55 à 60°C pour l'aquifère calcaire du Malm sont avancées à une profondeur de 1'500 m. A notre avis, ces valeurs sont optimistes et non justifiées si l'on tient compte du gradient précité.

Les sites de forage potentiels ont été définis sur la base de critères de fissuration basés sur l'analyse des profils sismiques, assez lacunaire. Huit sites de forages ont été retenus, repartis en 5 zones (cf. plan de situation à l'annexe 3.1). Parmi ces zones, quatre ont une priorité élevée (= zones de cassure et de fissuration de la partie haute du Mésozoïque mises à jour par la sismique) et une a une priorité moins grande (= zones de structures de plissement, anticlinaux et synclinaux repérés par la sismique et la cartographie de surface).

Quant aux utilisateurs potentiels et à l'analyse technoéconomique, l'application la plus intéressante semble être celle d'une injection d'eau chaude dans le réseau de chauffage à distance des Services Industriels de Lausanne à Malley. Toutefois, pour que le projet soit économiquement compétitif par rapport à l'utilisation de combustibles fossiles, il faudrait non seulement obtenir un débit de 20 l/s avec une température du fluide de 55°C, mais aussi une minéralisation de l'eau suffisamment faible pour éviter un mode de fonctionnement de l'installation géothermique en doublet.

Projet de forage géothermique profond à Payerne

Une étude préliminaire a été mandatée par la commune de Payerne en 1989 (ABA-Geol et al. 1989, cf. annexe 3.1). Les dépôts quaternaires de la plaine broyarde reposent sur la Molasse du Plateau suisse qui est formée d'une alternance de grès et de marnes, d'âge tertiaire. Ces couches molassiques sont disposées de façon tabulaire ou légèrement ondulée. Sous cette puissante série d'origine détritique (> 1'000 m) se développent d'épaisses couches de calcaires, de dolomies et de marnes d'âge secondaire (Mésozoïque). Ces séries reposent sur un socle cristallin gneisso-granitique.

Selon l'étude, la Molasse possède une porosité d'interstices entre les grains sableux et peut être un excellent réservoir, selon le degré de cimentation ou d'altération de ces grès. Les marnes bigarrées aquitaniennes et les marnes à gypse de la région de Pomy sont également aquifères. Les roches carbonatées forment aussi un réservoir intéressant. Dans ce cas, la porosité est essentiellement liée à la fracturation ou encore à la dissolution karstique. Les eaux d'Yverdon-les-Bains proviennent des calcaires du Malm, affectés à cet endroit par un décrochement tectonique (accident du Mont Chamblon). Un gradient géothermique de 40° C/km, puis de 30° C/km à partir de 460 m de profondeur est proposé.

La coupe géologique prévisionnelle du forage de Payerne a été établie sur la base de cartes définissant le toit des différentes formations établies par Büchi et d'après les données du forage de Courtion, distant de 11 km. Le toit du Mésozoïque (Urgonien karstifié) doit se situer à une

profondeur de 1'150 m, avec des températures estimées entre 45 et 53°C. Le toit du Malm est à environ -1'450m de profondeur et la température de l'aquifère a été estimée à 60°C. Ces prévisions contrastent avec celles de Rigassi, tirées de la sismique pétrolière, qui indiquent des profondeurs encore plus importantes, supérieures de 200 m.

Parmi cinq formations géologiques aquifères profondes susceptibles de contenir de l'eau chaude en quantité suffisante, pour des raisons techniques et économiques uniquement trois ont été retenues comme cibles du forage géothermique de Payerne :

- La Molasse (Chattien et Aquitanien), formée d'une alternance de grès et de marnes. L'eau se rencontre dans les lentilles sableuses (chenaux) d'extension limitée, à porosité d'interstices et de bonne perméabilité. Elle devrait avoir une température comprise entre 35 et 40°C.
- L'Urgonien (toit du Crétacé), que l'on sait fortement karstifié et fracturé à Courtion sur plus de 100 m. Ce réservoir possède une porosité de fractures et de conduits karstiques de dissolution, et une bonne perméabilité régionale. La température de l'eau est estimée entre 45 et 53°C à une profondeur d'environ 1'200 m.
- Le Malm (Jurassique), constitué de calcaires massifs, peut présenter une porosité de fractures, susceptible de contenir de l'eau. La perméabilité régionale de cette formation est aussi bonne. L'eau devrait avoir une température d'environ 60°C à une profondeur de l'ordre de 1'500 m.

En fonction des perméabilités de fractures et de dissolution karstique, un débit de l'ordre de 10 à 20 l/s paraît tout à fait raisonnable pour les aquifères du Crétacé et du Jurassique. Quelques indications sont données quant à la qualité chimique des eaux. Celles-ci devraient être moyennement minéralisées (env. 1 g/l) pour les marnes aquitaniennes de la Molasse et assez minéralisées pour les marnes à gypses du Chattien. L'aquifère de l'Urgonien devrait délivrer des eaux chlorurées sodiques avec teneurs en fer, alors que le Malm devrait contenir des eaux faiblement minéralisées (< 0.5 g/l), du même type que celles captées à Yverdon-les-Bains.

L'analyse des formations lithologiques sous la ville de Payerne montre donc trois aquifères potentiels, avec des températures probables de l'eau de 35 à 60°C, captés à des profondeurs situées entre 900 et 1'600 m. Selon les auteurs du rapport, des débits de l'ordre de 10 à 20 l/s paraissent possibles pour l'ensemble de ces trois aquifères captés par un forage implanté au Nord de Payerne. La puissance géothermique pourrait varier ainsi, pour une température en tête de puits de 55°C et un rejet à 4°C, entre 2.1 et 4.2 MW_{th}. L'utilisation de pompes à chaleur est envisagée pour élever la température du fluide géothermal : la puissance totale installée est ainsi estimée entre 8 MW_{th} (10 l/s) et 16 MW_{th} (20 l/s). Le potentiel de consommation pour l'ensemble des secteurs retenus représente environ 31 MW_{th}. L'investissement total (forage + réseau de chauffe) est estimé entre 16.5 Mio CHF pour un forage unique débitant 10 l/s et 27.5 Mio CHF pour un fonctionnement en doublet avec un débit de 20 l/s. En regard des investissements consentis à Riehen, ces prévisions apparaissent nettement sous-estimées.

3.6 Evaluation des ressources géothermiques AP du canton de Vaud

3.6.1 Données à disposition

Les réalisations géothermiques AP dépendent étroitement de la connaissance des formations et des structures géologiques profondes. Celles-ci peuvent être extrapolées de manière indirecte à partir des observations de surface (cartographie géologique et structurale) et de moyens d'investigation faisant appel à la physique des terrains (géophysique), qui permettent d'appréhender la profondeur et l'épaisseur des différentes couches géologiques et de localiser les grandes cassures. Les deux chapitres qui suivent, rédigés par le Prof. M. Weidmann constituent une synthèse des connaissances géologiques, hydrogéologiques et géothermiques

profondes au niveau du territoire vaudois apportées par les cartes géologiques, les forages profonds et l'interprétation des lignes sismiques réalisées lors des prospections pétrolières. Les publications et documents utilisés sont cités et commentés dans l'annexe 3.2. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais d'un choix plus ou moins arbitraire qui tente de cerner tous les aspects du problème envisagé. Les informations concernant les forages profonds réalisés sur le territoire du canton de Vaud et dans les régions limitrophes ont été compilées dans l'annexe 3.3.

3.6.2 Géologie régionale

Mieux que des pages de texte, une carte générale (figure 3.6.1) et quelques profils tirés de la littérature spécialisée permettront d'avoir une vision simple de la géologie du canton de Vaud. Lequel s'étend sur trois entités morphologiques et structurales principales (Jura, Bassin molassique, Préalpes-Alpes), qui reposent toutes sur le même Substratum. On les décrira brièvement ci-après.

Substratum ou « Socle »

Il s'agit de très vieilles roches métamorphiques, granitiques ou gneissiques, sises normalement en profondeur, mais qui remontent en surface dans certains massifs alpins, notamment dans la région de Lavey-les-Bains. Localement (régions de La Côte, d'Yverdon, de la Broye, etc), le Substratum comprend à sa surface une couverture souvent épaisse de roches sédimentaires détritiques (grès, conglomérats, argilites, etc.) datant du sommet de l'Ere primaire.

Jura

Cette chaîne plissée est principalement formée de calcaires et de marnes d'origine marine, datant du Jurassique et du Crétacé (= Ere secondaire ou Mésozoïque), reposant sur un coussin parfois très épais d'évaporites (anhydrite, gypse, sel) datant du Trias (début du Mésozoïque). Pour certains auteurs, toute la chaîne du Jura a glissé sur les évaporites, se désolidarisant de son Substratum plus ancien et se déplaçant de plusieurs dizaines de km du SE vers le NW. Pour d'autres auteurs, les terrains plissés de l'Ere secondaire sont restés solidaires du Substratum et il n'y a pas eu de déplacement important.

Bassin molassique

Il a été rempli d'un ensemble de roches détritiques d'origine marine et terrestre, datant de l'Ere tertiaire, épais de 3-4 km au SE, du côté alpin, et passant à seulement quelques dizaines de m au NW, du côté jurassien. Le bassin molassique est également plissé, mais beaucoup plus modérément que le Jura ou les Alpes dans sa partie externe, alors que sa partie interne (ou Molasse subalpine) est affectée par de nombreux chevauchements.

Préalpes-Alpes

Elles sont constituées d'un empilement complexe et fort épais de nappes plissées faites de roches marines très diverses, datant principalement des Eres secondaire et tertiaire. Ces nappes ont été sédimentées dans des bassins marins situés plus ou moins loin au SE de leur position actuelle. Telles des vagues successives, elles sont ensuite venues s'empiler en direction du NW, au-dessus de la partie interne du bassin molassique.

Structures géologiques

De grands accidents (failles et surtout décrochements) affectent les trois entités, ainsi que, semble-t-il, leur Substratum. Ces cassures sont pour la plupart récentes et postérieures aux principales phases de plissement, liées à la formation des Alpes. Simultanément ou peu après, des mouvements verticaux ascendants ont soulevé certains secteurs et motivé ainsi l'érosion, au cours des derniers 4-5 millions d'années, d'énormes volumes de roches. Ces processus d'érosion ont été accélérés lors des invasions glaciaires de l'Ere quaternaire, il y a moins de 1 million d'années.

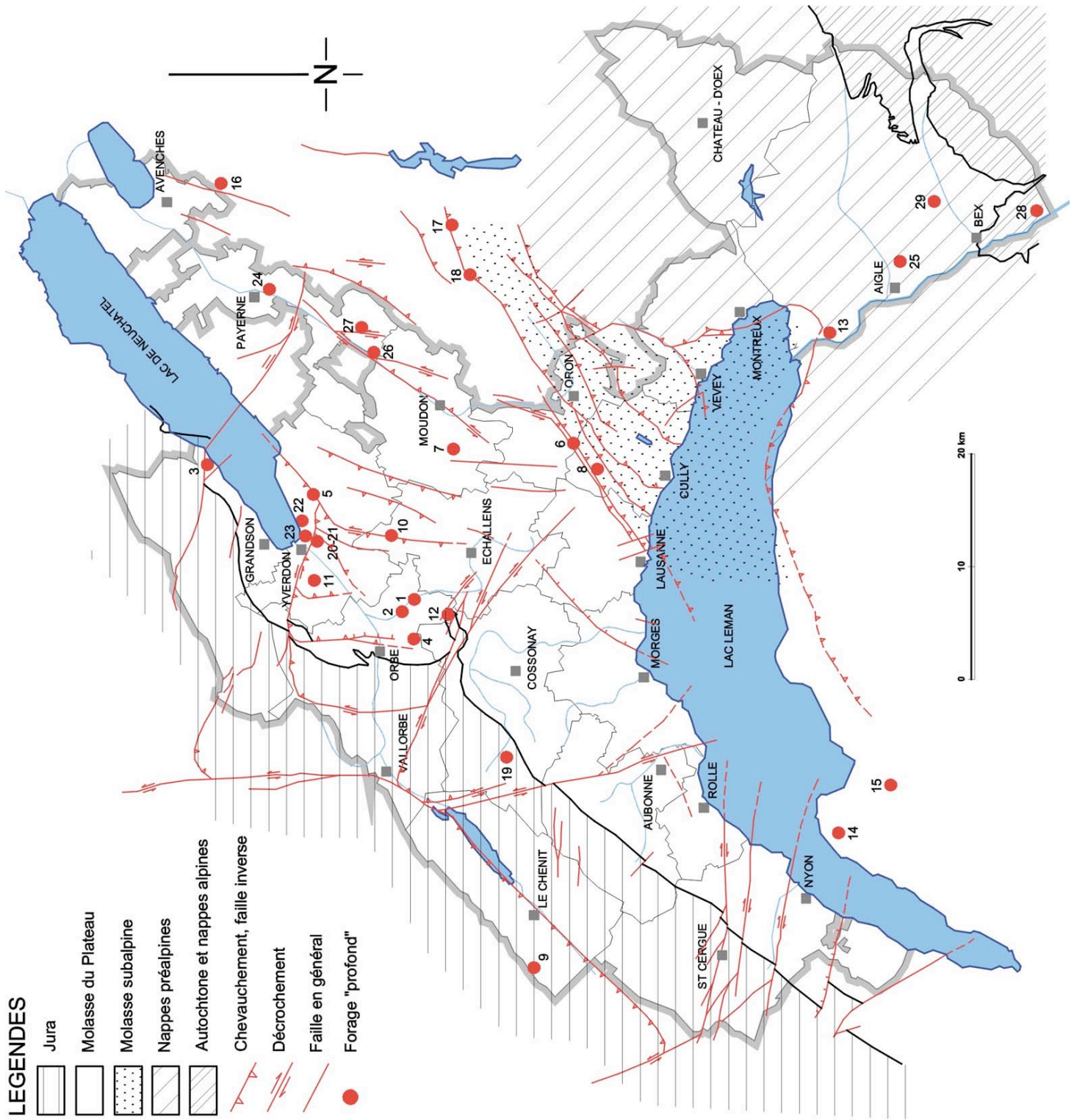


Figure 3.6.1 : Carte géologique synthétique du canton de Vaud, avec localisation des principaux accidents tectoniques et des forages profonds (Weidmann 2002, inédit). Les grandes cassures (décrochements) qui affectent le pied du Jura déterminent des zones fissurées où des circulations d'eau profonde chaude sont possibles. La région d'Yverdon-les-Bains en est un exemple.

Liste des forages profonds

1. Chavornay-1
2. Chavornay-2
3. Concise-1
4. PréBertrand/Arnex
5. Cuarny-1
6. Servion-1
7. Chapelle-1
8. Savigny-1
9. Risoux-1
10. Essertines-1
11. Treykovagnes-1
12. Eclepens-1
13. Chessel-1001
14. Messery-1
15. Mont de Boisy-1
16. Courtion-1
17. Sorens-1
18. Romanens-1
19. Morand/Montricher
20. Yverdon - F4
21. Yverdon - F5
22. Noréaz-1
23. La Grève-1
24. Payerne / SMA
25. Ollon / ON-9
26. Henniez-50
27. Pra-Tsérère
28. Lavey-les-Bains - P600
29. Mines de Bex
30. Epinassey - E2

Carte géologique synthétique du canton de Vaud

Cette carte montre la répartition des trois entités géologiques dans le canton de Vaud et les régions voisines, ainsi que la localisation des sondages « profonds » répertoriés et des principaux accidents tectoniques (figure 3.6.1). L'existence et la position de ces derniers peuvent varier selon les sources consultées, si bien que l'interprétation présentée ici est parfois assez hypothétique. S'il s'agit de données tirées de la sismique, les accidents sont montrés au niveau du premier réflecteur qui les révèle clairement, à savoir la base de la Molasse ou surface sous-tertiaire. Dans le Jura et dans les Préalpes-Alpes, on n'a pas détaillé tous les accidents connus, trop nombreux et trop complexes pour pouvoir figurer sur une carte schématique. On les trouvera dans les documents cités dans l'annexe 3.2.

Le profil général Jura-Alpes ou « cross-section » (Sommaruga 1997) est complété par une « restored section » qui supprime les effets des plissements et chevauchements et replace les ensembles rocheux dans leurs positions primitives, antérieures à la formation des Alpes et du Jura (figure 3.6.2).

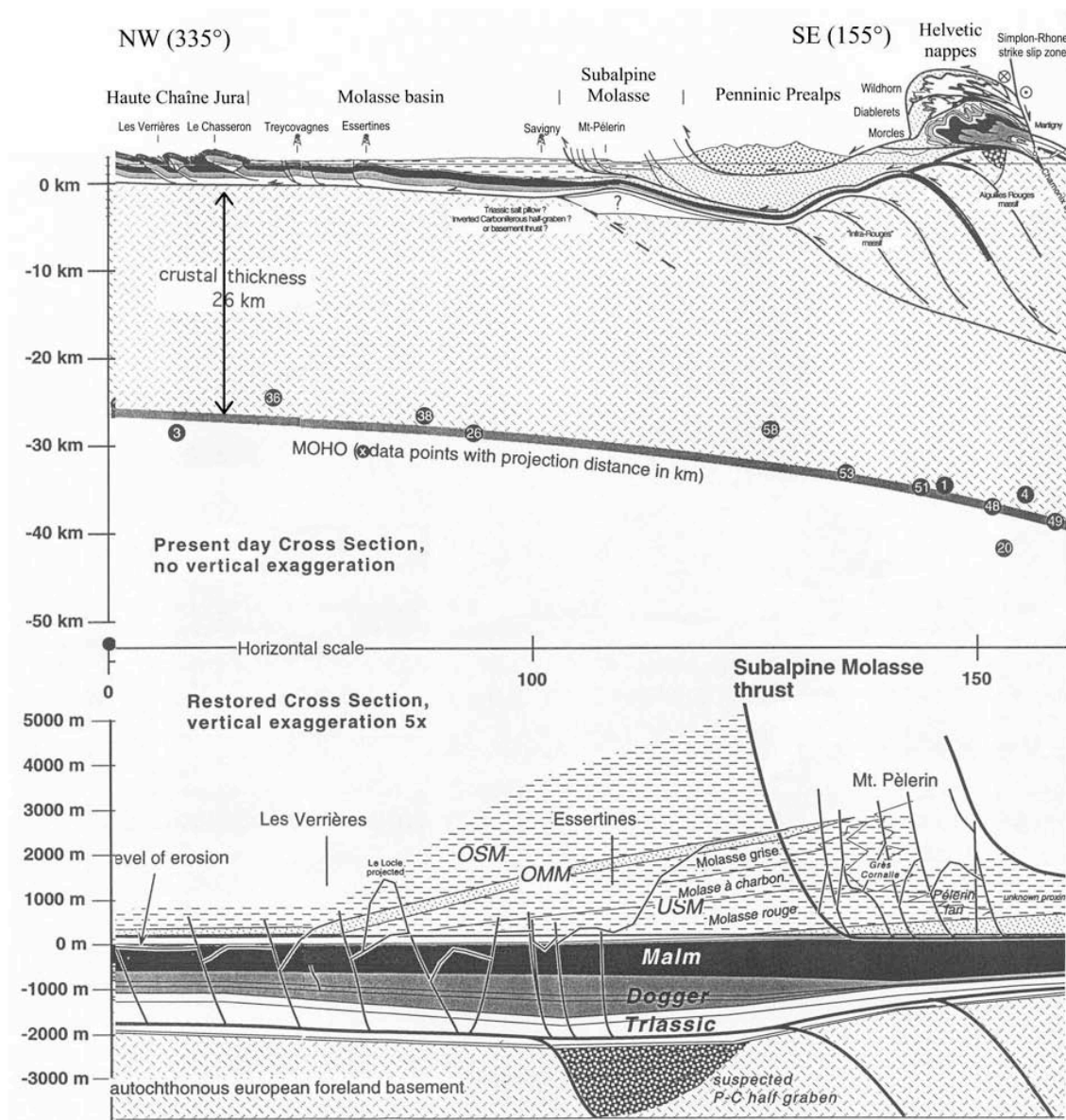


Figure 3.6.2 : Profil géologique NW-SE qui montre l'enfouissement des formations mésozoïques du Jura en direction du bassin molassique (Sommaruga 1997, modifié). On remarque aussi l'approfondissement des sédiments molassiques en direction des Préalpes et la structure complexe des Alpes, où différentes nappes s'empilent.

Le profil à travers les Alpes-Préalpes vaudoises (Escher et al. 1987), montre la complexité de l'édifice des nappes, la position en profondeur du Substratum ou Socle, ainsi que le raccord avec le bassin molassique interne, en partie recouvert et laminé sous les nappes préalpines (figure 3.6.3). La position projetée du site géothermique de Lavey-les-Bains y est indiquée.

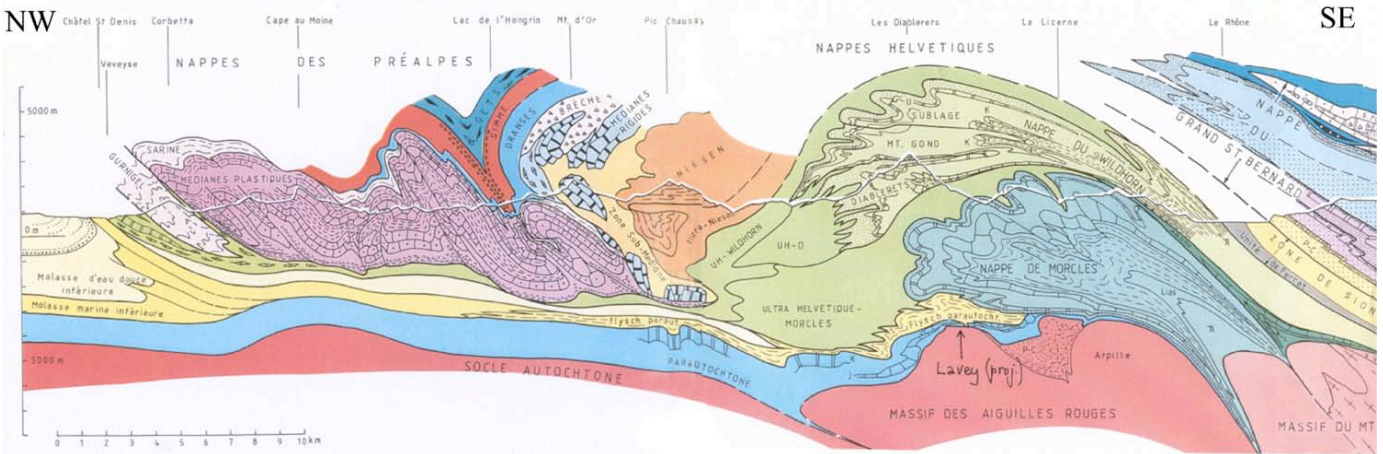


Figure 3.6.3 : Profil géologique NW-SE à travers les Préalpes et les Alpes vaudoises (Escher et al. 1987). L'emplacement projeté du site thermal de Lavey-les-Bains y figure, où des eaux thermales avec une température de 69°C ont été captées dans les gneiss du Massif des Aiguilles Rouges. On remarque la structure complexe des nappes des Préalpes et des nappes Helvétiques (Alpes).

La carte et les profils du bassin molassique sont tirés de GORIN et al. (1993) et reposent sur l'analyse de quelques profils sismiques caractéristiques. La carte (figure 3.6.4) montre la position de trois profils géologiques, ainsi que les lignes d'égale altitude (ou isohypses) de la surface sous-tertiaire ou base de la Molasse, en mètres par rapport au niveau de la mer.

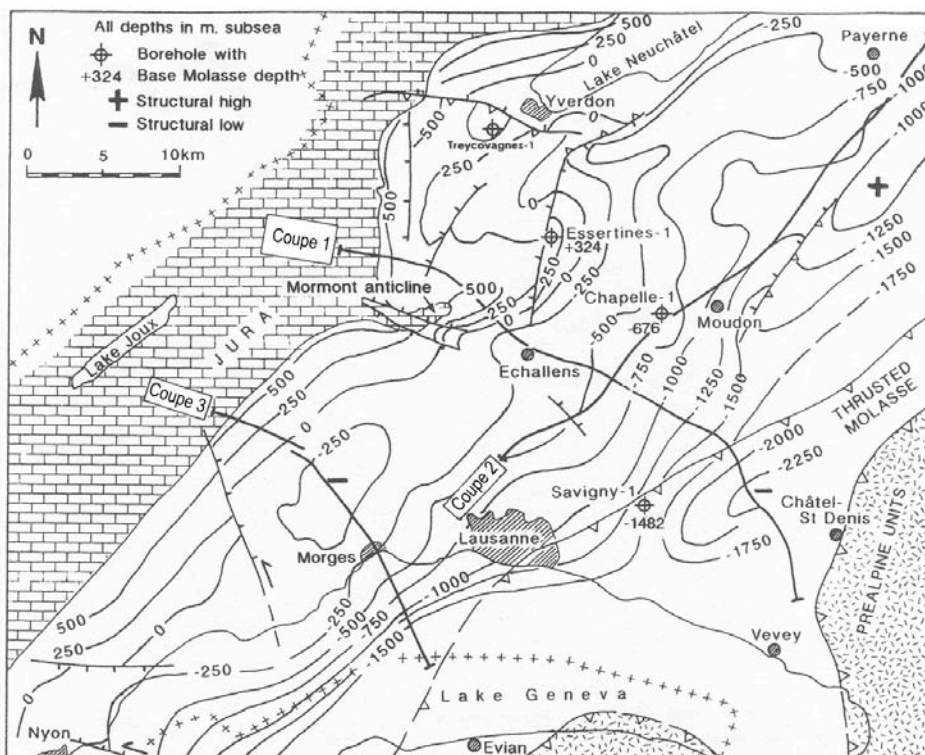


Figure 3.6.4 : Carte du bassin molassique entre Payerne et Nyon (Gorin et al. 1993). Les isohypses de la base de la Molasse indiquent par exemple que celle-ci se situe à une altitude d'environ -500 m.s.m. sous Payerne et de -1'000 m.s.m. sous Lausanne. L'épaisseur de la Molasse augmente du NW vers le SE.

Les trois profils géologiques (figure 3.6.5), dont la trace est représentée sur la figure 3.6.4, illustrent la variation d'épaisseur du prisme molassique du NW au SE, mais aussi celle des terrains plus anciens de l'Ere secondaire. On y voit également la couverture localisée (P-C), d'âge primaire, du Substratum, ainsi que de nombreuses fractures qui ne sont pas systématiquement dessinées à travers la Molasse, car les enregistrements sismiques ne les y montrent pas clairement.

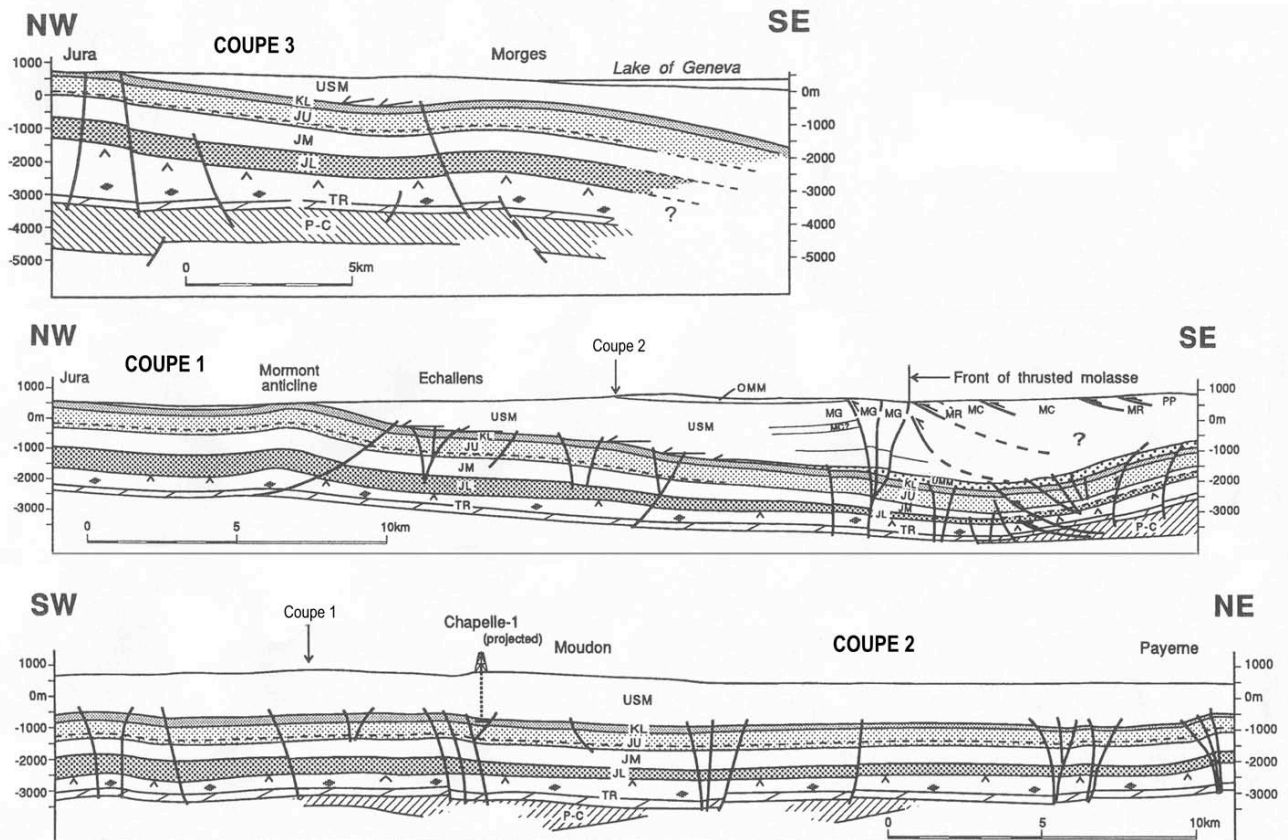


Figure 3.6.5 : Profils géologiques à travers le bassin molassique vaudois, de direction NW-SE (coupes 1 et 3) et NE-SW (coupe 2), dessinés à partir des informations fournies par la sismique pétrolière (Gorin et al. 1993). Les formations géologiques du Malm (JU) et du Dogger (JM) représentent les principaux aquifères susceptibles de fournir de l'eau chaude, à condition de rencontrer une perméabilité de fissures.

3.6.3 Aspects hydrogéologiques et géothermiques

La carte des flux de chaleur publiée par Medici & Rybach en 1995 demeure la seule synthèse valable à ce jour au niveau du territoire suisse qui localise des zones relativement plus chaudes, notamment au niveau des régions de Bâle et de Baden. Les rares sondages plus récents que sa publication n'en modifieraient pas les grandes lignes, sauf peut-être dans la vallée de la Broye. Au niveau du territoire vaudois, les données fournies par les forages profonds sont rares et trop dispersées pour pouvoir donner une image régionale du flux de chaleur. La seule anomalie positive de flux, qui culmine à $> 90 \text{ mW/m}^2$ est celle comprise entre Yverdon et Eclépens, région qui compte une plus grande concentration de forages profonds (figure 3.6.6). Dans cette région, le forage d'Eclépens a recoupé des venues d'eau thermale à 110°C dans le Keuper (Trias) à une profondeur de 2'150m !

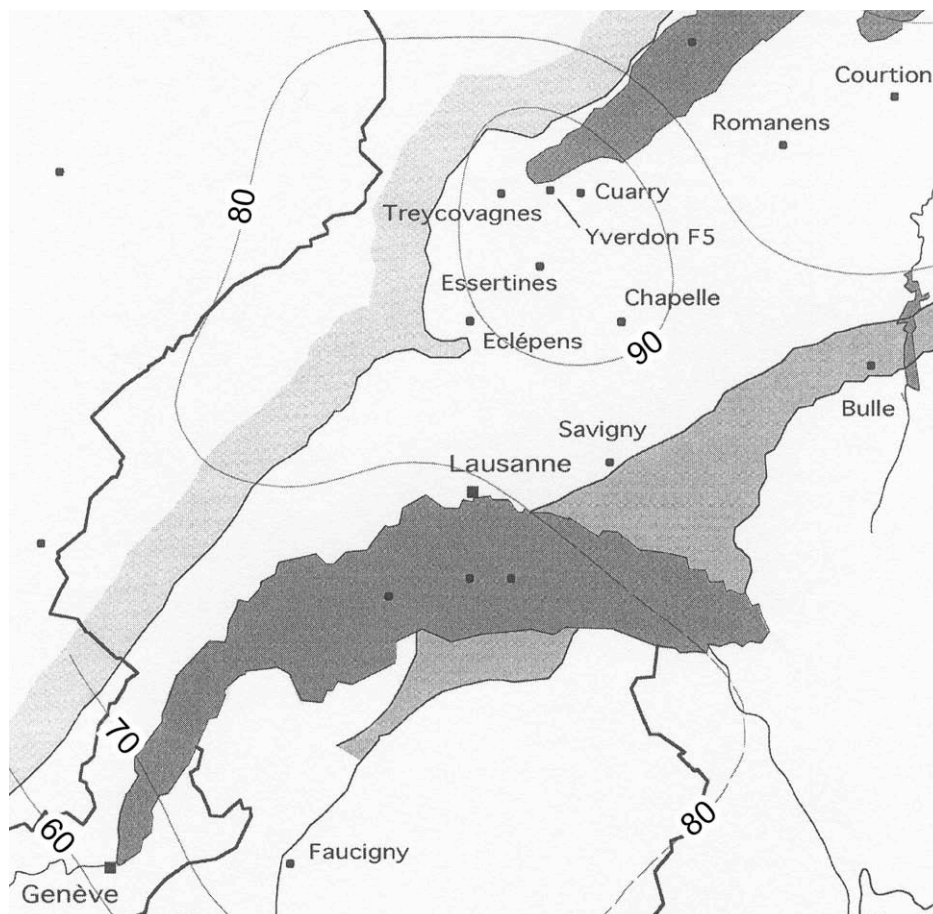


Figure 3.6.6 : Carte du flux de chaleur au pied du Jura entre Genève et le lac de Neuchâtel (extrait de Medici & Rybach 1995). Les seules données représentatives sont concentrées dans la région centrée autour du forage d'Essertines et caractérisée par une anomalie positive de flux.

Ainsi, force est de constater qu'au niveau du territoire vaudois deux secteurs seulement sont relativement bien connus pour les circulations thermales profondes et par ailleurs déjà exploités pour l'énergie géothermique AP : Yverdon-les-Bains et Lavey-les-Bains. Le pied du Jura et les zones de plaine affectées par les grandes cassures qui le découpent et qui furent plus ou moins karstifiées au cours du Plio-Quaternaire demeurent un objectif préférentiel pour la recherche d'eau thermale, comme l'a d'ailleurs mis en évidence une étude régionale des ressources géothermiques réalisée entre 1982 et 1985 pour le compte du NEFF (Burger & Gorhan 1986). Ailleurs, les données sont trop dispersées pour permettre de faire des hypothèses.

Dans le Jura vaudois, on ne dispose pas de données bien précises sur les températures en profondeur, et encore moins sur les conditions hydrogéologiques des diverses formations présentes en profondeur. De nombreux forages profonds existent cependant dans les cantons voisins (NE, JU, BE) et pourraient fournir d'utiles indications. Toutefois, du fait des faibles gradients thermiques engendrés par le massif montagneux, les températures en profondeur sont sûrement moins élevées que celles atteintes par un forage de même profondeur réalisé en plaine.

En ce qui concerne le Bassin molassique, il faut se rappeler que les circulations d'eau sont nulles dans la Molasse d'eau douce inférieure (USM), la seule qui occupe d'importantes surfaces et une grande épaisseur sur territoire vaudois. Les niveaux détritiques grossiers (Grès de Method, Grès de Suscévaz, Grès de Cuarry, Grès de la Cornalle, Poudingues du Pèlerin, etc), sur lesquels on a pu fonder quelques espoirs, se sont toujours révélés en sondage peu poreux et sans perméabilité. Les circulations d'eau qui existent en profondeur dans la Molasse

marine supérieure (OMM) plus au NE, dans les cantons FR, BE et au-delà, demeurent assez superficielles et peu importantes dans le canton de Vaud, où cette formation n'est pas très épaisse.

Le paléokarst perforant les calcaires mésozoïques, sur lesquels repose la Molasse est, semble-t-il en ce qui concerne le territoire vaudois, partout colmaté par les dépôts du Sidérolithique éocène qui empêche toute circulation d'eau.

Sous le bassin molassique, les formations marines plus anciennes, crétacées et jurassiques traversées par les forages profonds en dehors des zones fissurées associées aux grands décrochements du Jura, ne se sont jusqu'ici jamais révélées suffisamment poreuses et perméables pour constituer de bons réservoirs exploitables pour les fluides qu'ils pourraient contenir, qu'il s'agisse de calcaires oolithiques, de récifs ou de formations gréseuses. Il importerait toutefois d'étudier soigneusement, à ce point de vue, les diagraphies des sondages pétroliers. On devrait pouvoir ainsi disposer de meilleures valeurs de perméabilité et de porosité pour d'éventuels réservoirs, et mieux connaître leurs épaisseurs.

En ce qui concerne ces zones fracturées, dont l'existence et la localisation sont souvent mal connues, il demeure essentiel de reprendre toutes les lignes sismiques, ainsi que les interprétations disponibles réalisées par les compagnies pétrolières. Ce travail a été entrepris assez en détail par Jordi (1990 et 1993) sur la feuille d'Yverdon, mais ailleurs, on en est resté à une analyse souvent sommaire de quelques lignes choisies (Gorin et al. 1993, Sommaruga 1997, travaux de la NAGRA, etc.). Plusieurs études sont en cours ou en projet dans ce domaine, avec des objectifs variés, mais on n'en connaît pas encore les résultats (travaux de thèse dirigés par les Prof. F. Marillier, Institut de Géophysique-UNIL, et par le Prof. G. Gorin, Département des Sciences de la Terre, UNI-GE).

Dans le domaine préalpin-alpin, les données sismiques sont peu étendues, de qualité médiocre et d'autre part elles demeurent confidentielles (ceci devrait toutefois être vérifié auprès du Département concerné). Quant aux valeurs géothermiques et à l'hydrogéologie profonde, les données sont inexistantes à ce jour, sauf en un seul secteur, celui de Lavey-les-Bains.

3.6.4 Cibles géothermiques favorables et conditions thermiques

Les forages profonds réalisés sur territoire vaudois et dans les régions limitrophes ont démontré de manière claire que la Molasse dans son ensemble ne pouvait pas être considérée comme un aquifère susceptible de fournir des débits intéressants pour une exploitation géothermique économiquement rentable. Pour cette raison, nous allons considérer, jusqu'à preuve du contraire apportée par un nouveau forage, le bassin molassique comme une « couche aquifère improductive ». Cette épaisseur stérile à traverser par d'éventuels futurs forages géothermiques profonds peut être extrapolée de manière approximative à partir de la carte des isohypses de la base de la Molasse publiée par Gorin et al. (1993). On retiendra que l'épaisseur des formations improductives augmente du NW au SE en s'éloignant du pied du Jura. Ainsi, un forage implanté à Morges, n'aura qu'environ 700 m de Molasse à traverser, alors que cette épaisseur sera d'environ 1'100 m à Payerne et plus de 1'500 m à l'est de Lausanne !

Au-dessous de la Molasse, les deux formations suivantes du Jurassique pourraient constituer des aquifères intéressants (figure 3.6.7) :

- Les calcaires massifs et lités du Portlandien et du Kimméridgien (Malm) ;
- Les calcaires à entroques et les calcaires récifaux du Bajocien (Dogger).

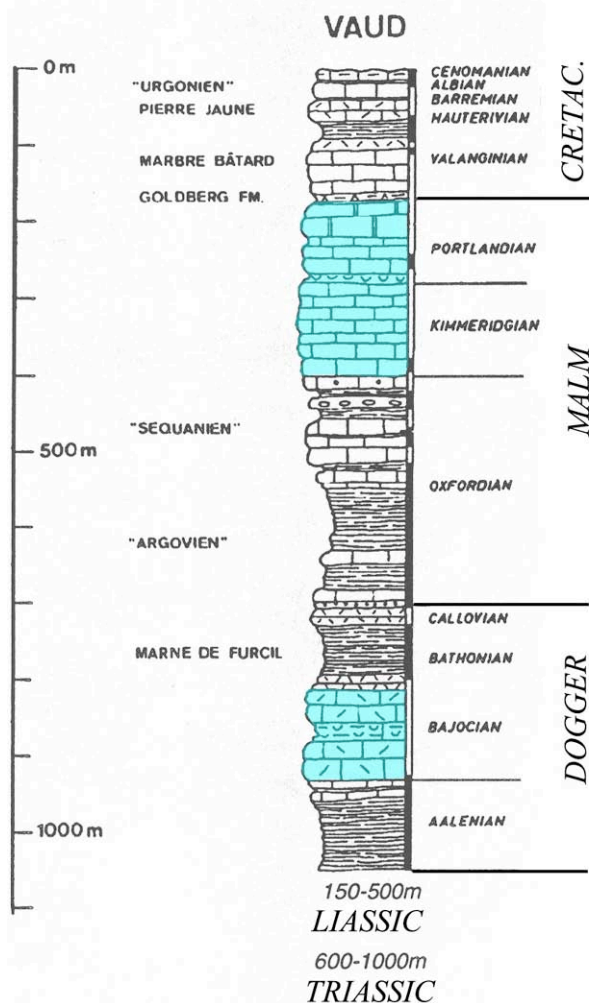


Figure 3.6.7 : Profil litho-stratigraphique des formations du Mésozoïque au niveau du canton de Vaud (extrait de Trümpy 1980, in Sommaruga 1997). Les aquifères potentiels au sein du Malm et du Dogger sont représentés en bleu-clair.

Toutefois, les forages profonds ont montré que, en dehors des zones à fissuration élevée associées aux grands décrochements du Jura, ces formations n'étaient pas suffisamment perméables (absence de porosité primaire et faible perméabilité de fissures). Quant à la partie la plus profonde des formations mésozoïques, l'aquifère potentiel représenté par les dolomies, gypses et calcaires du Muschelkalk (Trias), n'a pas été considéré dans notre choix des cibles géothermiques potentielles pour des raisons économiques, liées essentiellement à leur profondeur trop importante (> 3'000 m), mais aussi au chimisme particulier des eaux qui pourraient être captées (minéralisation très élevée, agressivité).

En dehors des cibles géothermiques représentées par les **formations du Jurassique supérieur et moyen dans les zones traversées par les grands décrochements du Jura**, qui constituent la priorité en cas de prospection géothermique dans le canton de Vaud, nous avons voulu encore considérer, de manière accessoire, un autre type d'aquifère potentiel jusqu'à ce jour inexploré. Il s'agit de la **base du remplissage quaternaire de la Vallée du Rhône**.

Formations calcaires fissurées du Jurassique situées au pied du Jura

Ces formations, qui affleurent dans la chaîne du Jura, s'approfondissent du NE au SW en raison du plongement progressif des couches, qui disparaissent sous la Molasse. Il en résulte une augmentation progressive de la température des eaux profondes des aquifères du Malm et du Dogger au fur et à mesure qu'on s'éloigne du pied Sud du Jura. En termes de systèmes d'écoulement, la chaîne du Jura détermine une zone d'alimentation. La composante verticale des gradients hydrauliques est orientée vers le bas et les flux froids « descendant » (Geister-Frantz 1987). Le pied Sud du Jura, par contre, se trouve plutôt en position de zone d'exutoire,

avec des gradients dirigés vers le haut, entraînant une remontée d'eaux qui se sont réchauffées en profondeur. On aura ainsi une mise en pression des eaux profondes, avec des niveaux hydrostatiques artésiens (niveau d'eau situé au-dessus du toit de l'aquifère) et même jaillissants (l'eau remonte jusqu'en surface). Cette situation est favorable pour deux raisons :

- Des eaux plus chaudes que celles engendrées uniquement par le gradient géothermique peuvent être captées à des profondeurs relativement faibles (< 1'000 m) ;
- L'exploitation du puits de pompage ne nécessite pas d'installer la pompe immergée à des profondeurs trop importantes.

Quatre grands décrochements affectent le pied Sud du Jura (figure 3.6.8) :

1. Le système décrochant dextre de St-Cergue, d'orientation E-W, qui affecte la région de Nyon, Gland et Begnins (ci-après « domaine décrochant de Nyon ») ;
2. Le décrochement senestre de Vallorbe-Pontarlier, d'orientation NNW-SSE, qui intéresse la région d'Aubonne et St-Prex (ci-après « domaine décrochant d'Aubonne ») ;
3. Le système décrochant dextre de Vaulion-Mormont, d'orientation NW-SE, qui passe par Eclépens et Echallens et semble se poursuivre jusqu'à Epalinges (ci-après « domaine décrochant du Mormont ») ;
4. Le décrochement complexe dextre de Pipechat–Chamblon–Chevressy (PCC), d'orientation WNW-ESE, qui affecte la région d'Yverdon-les-Bains (ci-après « domaine décrochant d'Yverdon »).

Ces grandes cassures affectent les formations du Mésozoïque et notamment les séries calcaires compétentes du Malm et du Dogger. Elles déterminent quatre zones à fissuration élevée, où peuvent se développer des circulations d'eau thermique en profondeur. Ces zones ont fait l'objet d'une analyse détaillée par le projet de prospection géothermique régionale N° 165 entrepris pour le compte du NEFF entre 1982 et 1985 (Burger & Gorhan 1986). La géologie locale a été revue en fonction de la réinterprétation des lignes de sismique pétrolière (cf. rapport technique IB 052, Büchi et al. 1984). Des cartes d'isohypses du toit du Mésozoïque et du Dogger dans ces zones particulières ont été construites. Elles ont permis, en combinaison avec la carte du gradient géothermique, de prévoir approximativement la température des différents aquifères (cf. rapports techniques NEFF IB 009, 024, 025, 043, 055 et 058). Les caractères lithologiques des séries stratigraphiques ont été décrits de manière détaillée (NEFF IB 042). Les principales données sur les perméabilités mesurées dans les forages qui ont recoupé ces calcaires ont été résumées par Burger (1983). On retiendra de bonnes perméabilités régionales pour le Malm (de 10^{-3} à 10^{-4} m/s) et pour le Dogger (10^{-4} m/s).

Aquifères du Malm au pied du Jura

Dans le canton Vaud, l'épaisseur totale des couches aquifères du Malm, représentées principalement par les séries à calcaires massifs et lités du Portlandien et du Kimméridgien, atteint en moyenne 370 m (Burger & Gorhan 1986). Ces formations, en plus d'être fissurées, peuvent être aussi karstifiées.

Les circulations d'eau dans le Malm sont maintenant relativement bien connues dans la région d'Yverdon, affectées par la zone de failles décrochantes de PCC (Muralt 1999 ; Vuataz et al. 1999). Les forages du centre thermal (F4 et F5) ainsi que le forage d'eau minérale d'Arkina (La Grève) ont recoupé les séries calcaires, qui sont densément fissurées et karstifiées. Les eaux qui s'infiltrent à l'Ouest dans la chaîne du Jura circulent dans l'aquifère du Malm qui est confiné en profondeur par l'aquiclude représenté par les marnes de l'Oxfordien (figure 3.6.9). Les eaux se mettent en pression de part et d'autre de l'accident de PCC, qui détermine deux systèmes aquifères différents : celui du centre thermal au Sud et caractérisé par des températures du fluide géothermal de l'ordre de 28°C (forage F4 et F5), et celui d'Arkina dans le compartiment au Nord, dont les eaux atteignent des températures d'au moins 32°C (forages La Grève-1 et Noréaz-1). Les débits sont considérables et peuvent dépasser 100 l/s. La minéralisation est faible (< 0.5 g/l).

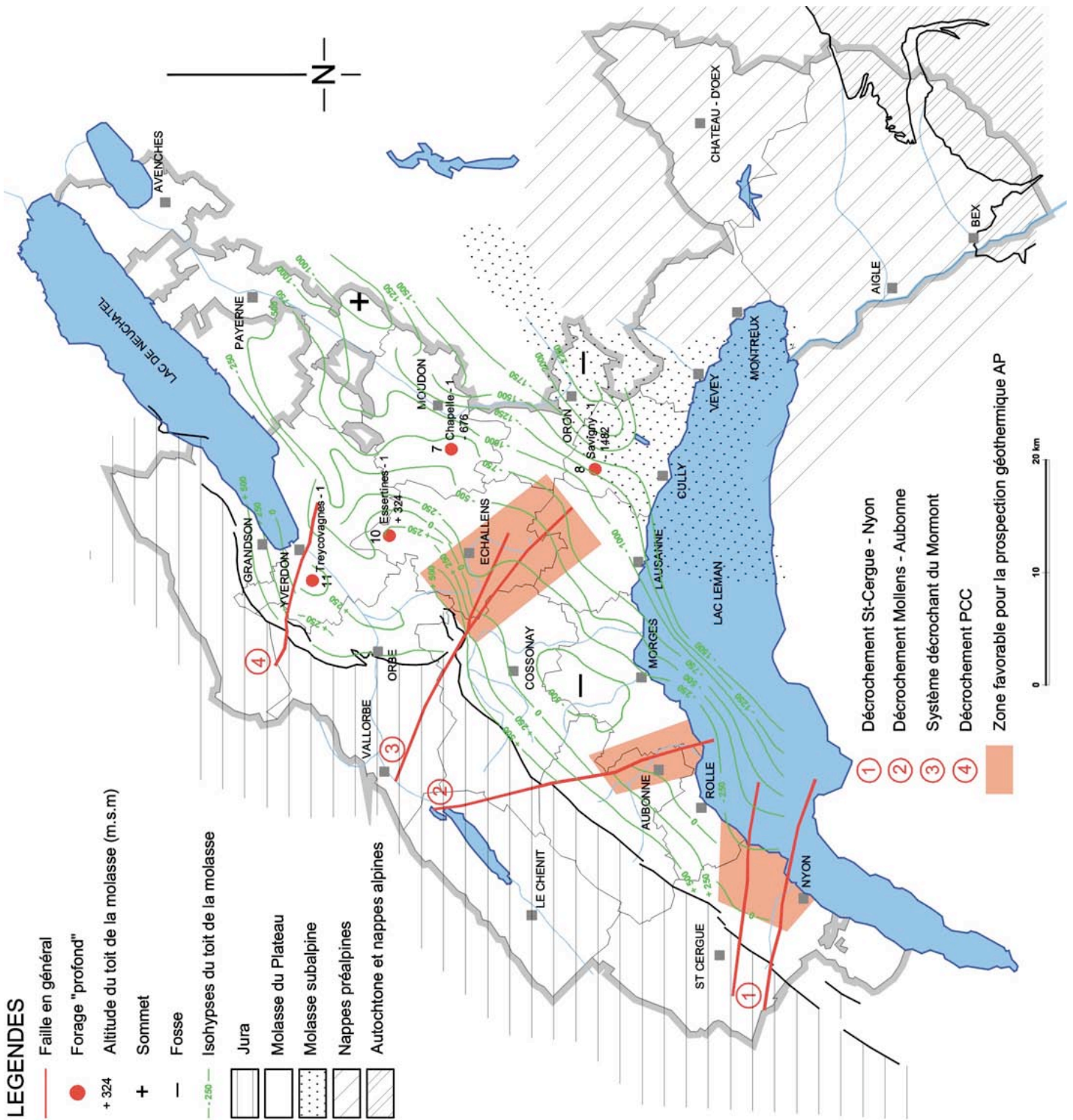


Figure 3.6.8 : Situation des quatre grands décrochements qui affectent le pied du Jura sur territoire vaudois (Gorin et al. 1993, modifié). Sur cette carte figurent les trois zones à prospecter pour une exploitation géothermique des aquifères profonds du Jurassique. La perméabilité en profondeur y est bien développée, en raison d'une densité de fissuration liée aux grands systèmes décrochant du pied du Jura.

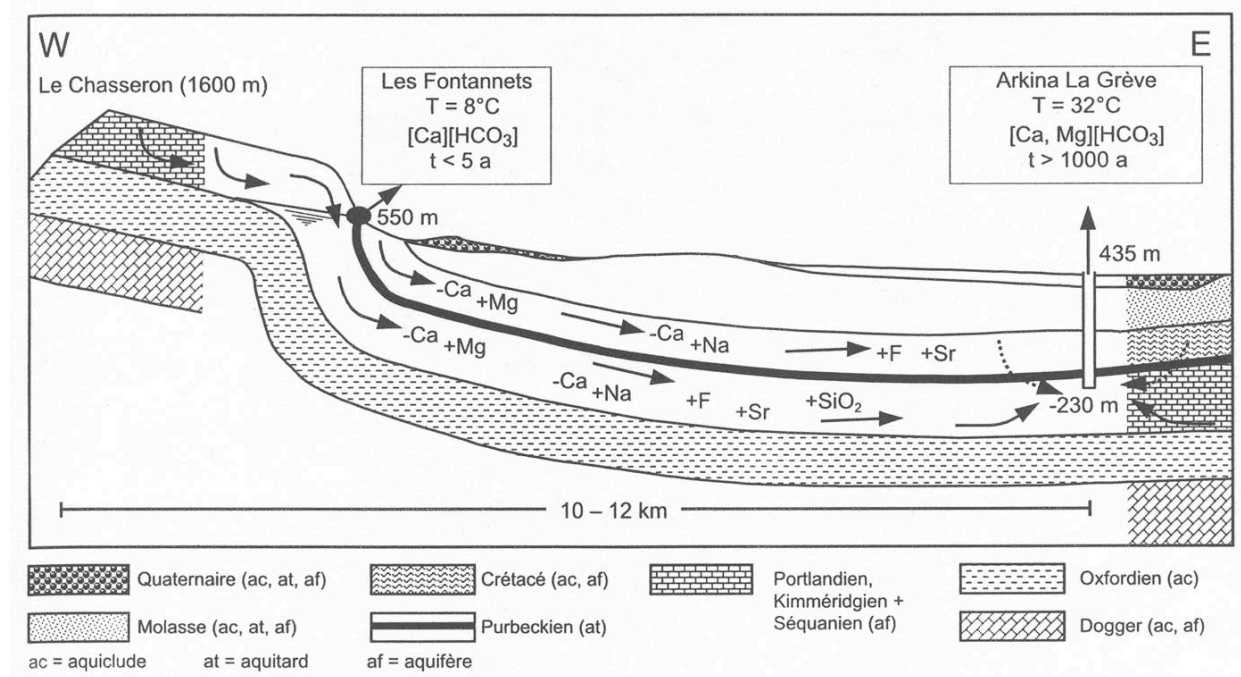


Figure 3.6.9 : Modèle conceptuel des écoulements souterrains de l'eau thermique du système aquifère Arkina (Portlandien/Crétacé) à Yverdon-les-Bains (Muralt 1999). La coupe n'est pas à l'échelle. L'eau thermique est captée entre 600 et 666 m de profondeur.

Près du village de Moiry, situé à proximité du pied du Jura à quelques 5 km à l'Ouest d'Eclépens, la source subthermale de la Cressonnière indique aussi des circulations profondes dans les calcaires fissurées du Malm (Lavanchy 1986 ; Muralt 1999). Cette émergence se situe non loin du domaine décrochant du Mormont.

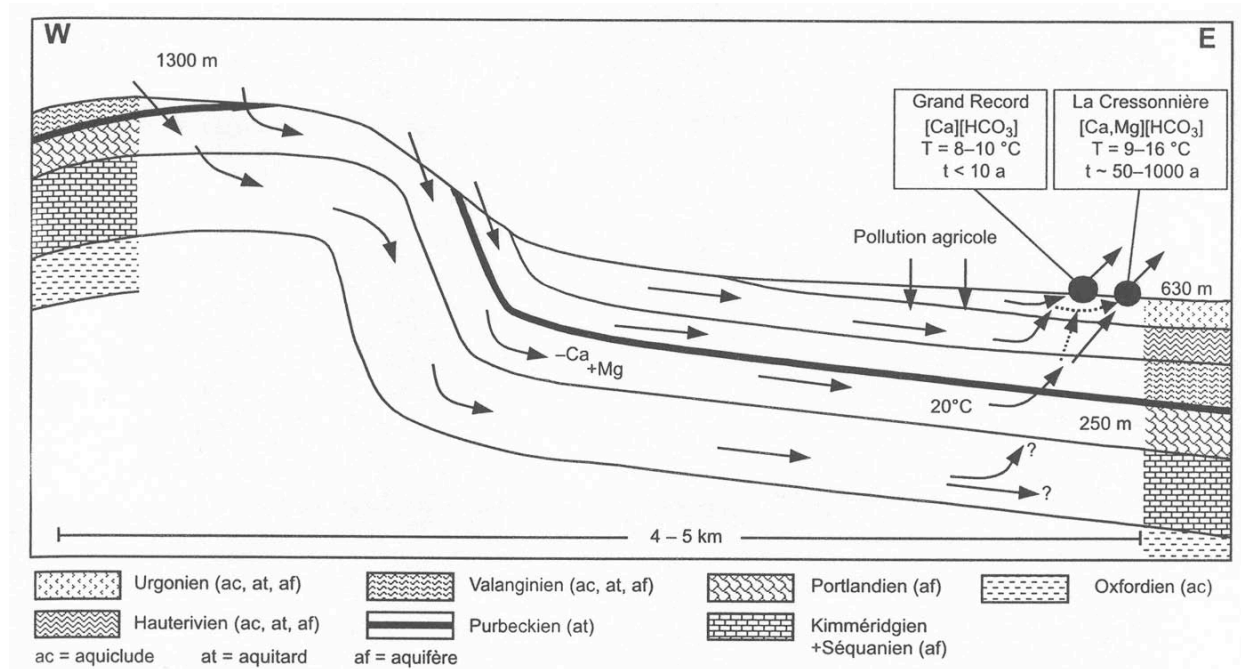


Figure 3.6.10 : Modèle conceptuel des écoulements souterrains et de l'évolution chimique des eaux de Moiry (Muralt 1999). La coupe n'est pas à l'échelle. La température supposée de l'eau thermique profonde n'est pas très élevée (environ 20°C), mais il ne faut pas oublier qu'on se trouve assez proches du pied du Jura. Plus à l'Est, dans la région du forage d'Eclépens, l'approfondissement de l'aquifère du Malm doit permettre un réchauffement des eaux jusqu'à des températures de l'ordre de 45°C.

Les débits très élevés (jusqu'à > 150 l/s) témoignent d'une très bonne perméabilité de fissures et les eaux doivent atteindre une température de l'ordre de 20°C dans l'aquifère du Portlandien (figure 3.6.10). Quelques kilomètres à l'Est du même village, le forage pétrolier d'Eclépens a traversé les formations calcaires du Malm entre environ 200 et 800 m de profondeur. Le profil de température semble indiquer une zone aquifère avec des eaux dont la température est comprise entre 40 et 45°C (cf. annexe 3.3). Cette hypothèse doit être confirmée par une analyse des informations effectuées lors de la perforation (pertes de boue ?).

Dans les deux autres zones caractérisées par une fissuration profonde du Malm (domaines décrochants de Nyon et d'Aubonne) nous ne disposons pas d'informations directes (forages) ou indirectes (sources subthermales) qui permettraient d'indiquer des circulations d'eaux profondes. Toutefois, par analogie avec les domaines décrochants d'Yverdon et du Mormont, il est très probable que des conditions de perméabilité similaires règnent en profondeur.

En conclusion, l'aquifère du Malm doit être bien développé au niveau du Portlandien et du Kimméridgien dans les régions affectées par les grands accidents décrochants du pied du Jura. Ces séries compétentes se caractérisent par une lithologie calcaire assez uniforme, sans variations latérales importantes. Une karstification permettant une perméabilité encore meilleure est tout à fait possible. Le toit du Malm doit se situer à des profondeurs variant entre ~200 m à la Sarraz et ~1'000 m à Echallens (tableau 3.6.1). Des débits d'au moins 20 l/s sont à prendre en considération. Les températures moyennes devraient varier, selon la profondeur, entre 25 et 50°C. La minéralisation faible des eaux (< 0.5 g/l) permettrait d'exploiter l'aquifère sans devoir utiliser un doublet.

Aquifères du Dogger au pied du Jura

L'aquifère principal est représenté par les calcaires récifaux du Bajocien, série qui se trouve à la base du Dogger. En raison de leur position profonde, ce sont les moins connus. Leur épaisseur probable est de l'ordre de 110 m. En direction du bassin molassique, les faciès de plate-forme (calcaires massifs) sont remplacés par des faciès de bassin plus marneux, et par conséquent la qualité des réservoirs aquifères s'y dégrade (Geister-Frantz 1987). Le forage de Courtion, distant de 20 km du Jura en est une illustration. Dans le canton de Vaud, les calcaires de l'Hauptrogenstein et les calcaires à Entroques rencontrés dans le forage d'Essertines sont totalement étanches. Toutefois ce forage se situe très probablement dans un compartiment peu fissuré situé à mi-chemin entre les domaines décrochants du Mormont et celui d'Yverdon. Le forage de Risoux, réalisé dans le Jura vaudois, est tombé en pertes dans le Dogger, ce qui peut être interprété comme un indice de fissuration importante et donc de bonne perméabilité.

Le Bajocien a été traversé par le forage F5 à Yverdon-les-Bains entre environ 1'200 et 1'450 m de profondeur. Les lithologies sont peu semblables à celles du log du forage de Treycovagnes, sur lequel était fondé principalement le modèle géologique. Les roches très marneuses indiquent des faciès de sédimentation en domaine profond se rapprochant des logs d'Essertines et de Courtion. Pour cette raison, les débits captés sont relativement faibles, de l'ordre de 4-5 l/s, avec un fort rabattement des niveaux piézométriques, de l'ordre de 150 à 200 m. Toutefois, le forage était pratiquement vertical lorsqu'il a traversé le réservoir du Dogger, pour rester dans la zone du décrochement principal. Si une zone de fissuration existait de part et d'autre de cet accident, un forage dévié aurait peut-être permis de recouper des fissures subverticales aquifères. L'eau a une minéralisation moyenne de 850 mg/l et une température de l'ordre de 45°C.

D'après le log thermique du forage d'Eclépens, il semblerait aussi que le Dogger ne soit pas aquifère. Toutefois, cette hypothèse doit être confirmée par une analyse détaillée des informations de ce forage, qui n'ont jamais été publiées. Dans les deux domaines décrochants de Nyon et d'Aubonne, on ne dispose d'aucune information sur l'aquifère profond du Dogger.

En conclusion, le Dogger pourrait représenter un aquifère thermal intéressant dans les régions affectées par les grands accidents décrochants du pied du Jura. Toutefois, les formations aquifères du Bajocien peuvent se caractériser par d'importantes variations latérales de faciès, avec apparition de séries marneuses peu perméables en s'éloignant du pied du Jura.

L'incertitude de rencontrer des réservoirs favorables est donc plus grande que pour l'aquifère du Malm. Cet aquifère potentiel devrait se situer à une profondeur estimée entre 1'100 m (la Sarraz) et 1'900 m (Echallens). Des débits de l'ordre de 10 l/s sont à prendre en considération. Les températures moyennes devraient varier, selon la profondeur, entre 55 et 80°C. La minéralisation des eaux devrait rester faible (< 1 g/l), permettant comme pour l'aquifère du Malm, une exploitation en puits unique.

Tableau 3.6.1 : Profondeurs estimées du toit du Crétacé, du Malm et du Dogger pour un choix de localités vaudoises. Les valeurs pour le Crétacé sont données à titre indicatif pour avoir une idée de l'épaisseur des niveaux « stériles » du Quaternaire et de la Molasse. Par contre, les deux formations du Jurassique constituent des aquifères géothermiques potentiels, avec une probabilité élevée de trouver de bonnes perméabilités dans les zones affectées par les systèmes décrochants du pied du Jura (localités avec soulignement). Les localités en italique se situent complètement en dehors de ces grands décrochements. La probabilité de trouver une perméabilité de fissures y est faible. Les profondeurs ont été extrapolées à partir des cartes d'isohypses figurant dans les travaux de Gorin et al. (1993) et de Sommaruga (1997), ou ont été reprises des études de prospection géothermique mandatées par le NEFF (Burger & Gorhan 1986 ; Geister-Frantz 1987).

Localité	Altitude (m.s.m.)	CRETACE'		MALM		DOGGER		Forage le plus proche
		Toit (m.s.m.)	Profond. (m)	Toit (m.s.m.)	Profond. (m)	Toit (m.s.m.)	Profond. (m)	
Nyon ou Gland	400	-200	600	-300	700	-1300	1700	
Aubonne ou Etoy	510	-50	560	-100	610	-900	1410	
Echallens	610	-250	860	-350	960	-1300	1910	Eclépens-1
Eclépens +La Sarraz	480	480	0	250	230	-600	1080	Eclépens-1
Morges	380	-300	680	-500	880	-1600	1980	
Cossonay +Penthalaz	500	-100	600	-250	750	-1100	1600	Eclépens-1
Payerne	450	-700	1150	-900	1350	-1600	2050	Courtion-1
<i>Ecublens (EPFL)</i>	400	-700	1100	-1100	1500	-1650	2050	<i>Savigny</i>
<i>Moudon</i>	510	-1000	1510	-1200	1710	-1900	2410	<i>Chapelle</i>

Sédiments quaternaires poreux à la base du remplissage de la vallée du Rhône (Chablais)

La vallée du Rhône a été profondément creusée par le glacier. L'auge glaciaire atteint une profondeur maximale de l'ordre de 1'000 m dans la région de l'embouchure du Rhône (Finckh & Frei 1991 ; Finckh & Klingelé 1991). Une carte assez précise du fond rocheux de la vallée dans le Chablais a été dessinée (Finger & Weidmann 1988, cf. figure 3.6.11). Dans cette région, le remplissage quaternaire est principalement constitué de sédiments lacustres : alternances d'argile, de silt et de sable fin, en partie aussi de sable grossier. Ces dépôts sont peu perméables et ne constituent pas un réservoir aquifère exploitable. En surface, des graviers fluviatiles avec de bonnes perméabilités, dont l'épaisseur peut atteindre 80 m, représentent un aquifère poreux froid de vastes dimensions.

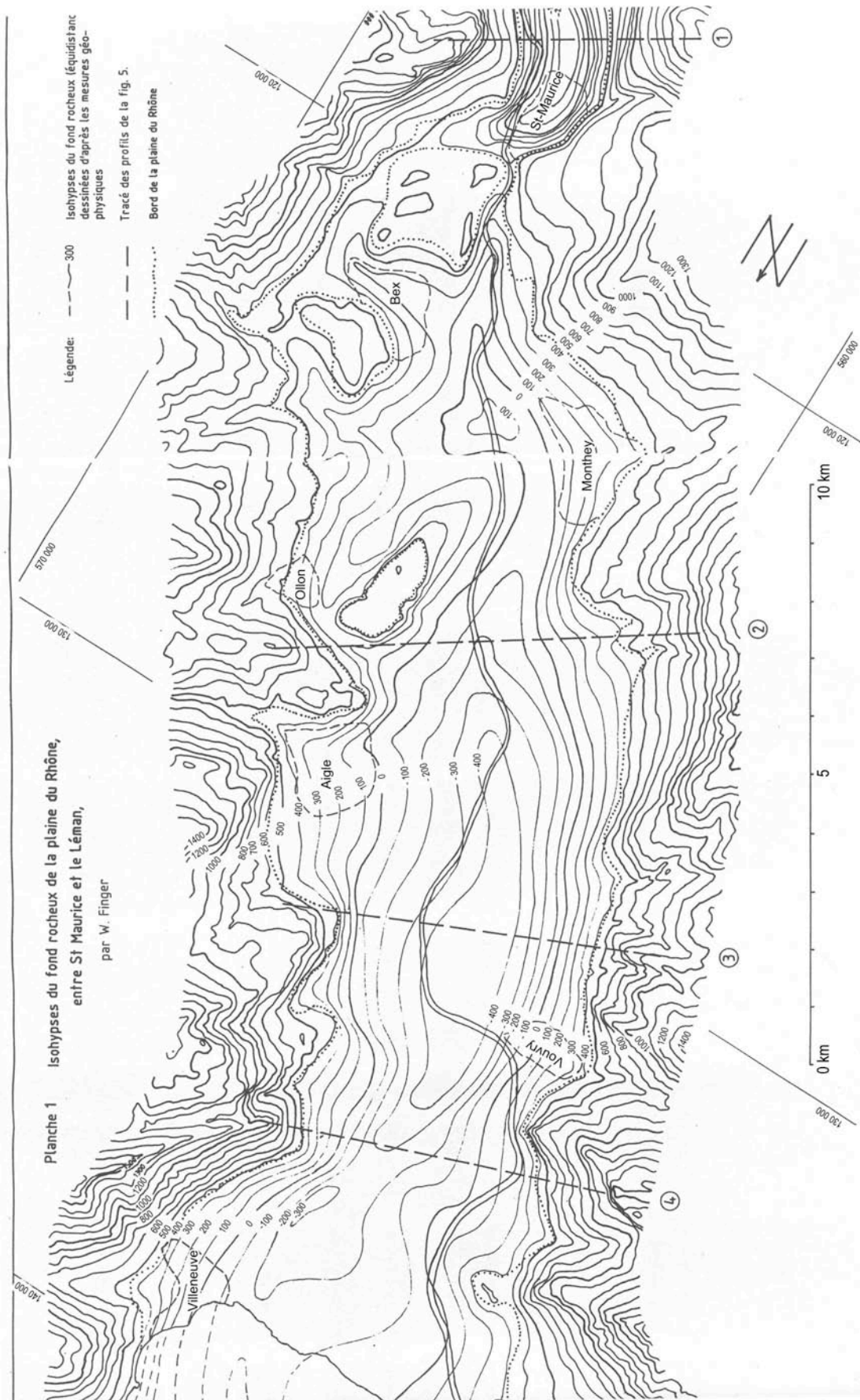


Figure 3.6.11 : Carte des isohysses du fond rocheux de la plaine du Rhône, entre St-Maurice et le Léman (Finger & Weidmann 1988). La profondeur du remplissage quaternaire atteint environ 1'000 m dans la zone de l'embouchure du Rhône.

Plusieurs profils sismiques réalisés dans la vallée du Rhône en amont de St-Maurice (canton du Valais), montrent, à la base du remplissage quaternaire, des sédiments plus grossiers, qui ont été interprétés comme une moraine de fond (Besson et al. 1991). Celle-ci pourrait avoir une perméabilité suffisante pour constituer un aquifère géothermique intéressant. En effet, les eaux profondes et chaudes provenant de zones fissurées du substratum rocheux, pourraient être drainées par cet aquifère. Il en résulterait des températures des fluides plus élevées que celles dérivées du seul gradient géothermique.

Pour l'instant, la présence de ce type de sédiments perméables ne peut pas être exclue dans la région du Chablais (Weidmann, comm. pers.). De plus, il faut relever que l'axe de la vallée a été déterminé par un accident décrochant majeur qui entaille profondément le substratum rocheux. La perméabilité de fissures associée à ce décrochement devrait permettre le développement de zones aquifères thermales dans les roches compétentes (calcaires, grès, dolomies, etc.). Celles-ci devraient faire l'objet d'une prospection géothermique, avec pour cibles l'aquifère poreux du fond de vallée et le substratum rocheux fissuré. Des températures d'au moins 30 °C sont tout à fait probables avec des forages de l'ordre de 700 à 800 m de profondeur.

3.7 Potentiel de projets AP pour le canton de Vaud à l'horizon 2010

3.7.1 Sites potentiellement intéressants

Trois sites potentiellement intéressants pour une prospection géothermique AP dans le canton de Vaud ont été retenus entre le pied du Jura et le Léman (figure 3.6.8), ainsi qu'un site dans le Chablais vaudois. Il s'agit des régions suivantes :

- Région de Nyon – Gland ;
- Région d'Aubonne – Etoy ;
- Région d'Eclépens – Penthalaz – Echallens ;
- Région du bout du Léman entre le Rhône et Villeneuve – Rennaz.

La région d'Yverdon, bien que très intéressante du point de vue géothermique, n'a pas été sélectionnée en raison de conflits d'intérêt qu'un nouveau forage profond engendrerait avec les exploitations commerciales actuelles des eaux chaudes (Bains thermaux et eau minérale). En effet, il existe un risque élevé de perturber les pressions hydrauliques des aquifères exploités de part et d'autre du système décrochant PPC. Un projet de nouveau forage géothermique se heurterait à l'opposition des exploitants actuels.

Les trois premières zones se caractérisent par un bon développement de la fissuration en profondeur, qui s'étend sur quelques centaines de mètres, voire plus d'un kilomètre de part et d'autre des décrochements majeurs du Jura (Burger & Gorhan 1986). Il existe une probabilité élevée de capter des eaux chaudes (température entre 25 et 80°C) dans les aquifères profonds du Malm et du Dogger, à des profondeurs comprises entre ~400 et 2'000 m.

A remarquer, que la zone du SW lausannois n'a pas été retenue, essentiellement pour des raisons d'incertitude hydrogéologique, dans les priorités d'exploration géothermique des AP, malgré un potentiel de consommation très important. Par contre, cette région serait assez favorable pour un projet de Haute Energie (cf. chap. 4). En cas de prospection géothermique de ce type, lors de la réalisation des forages préliminaires, il serait hautement souhaitable de prévoir des tests hydrogéologiques lors de la traversée des formations sédimentaires qui surmontent le Socle, pour évaluer la productivité d'éventuels AP rencontrés.

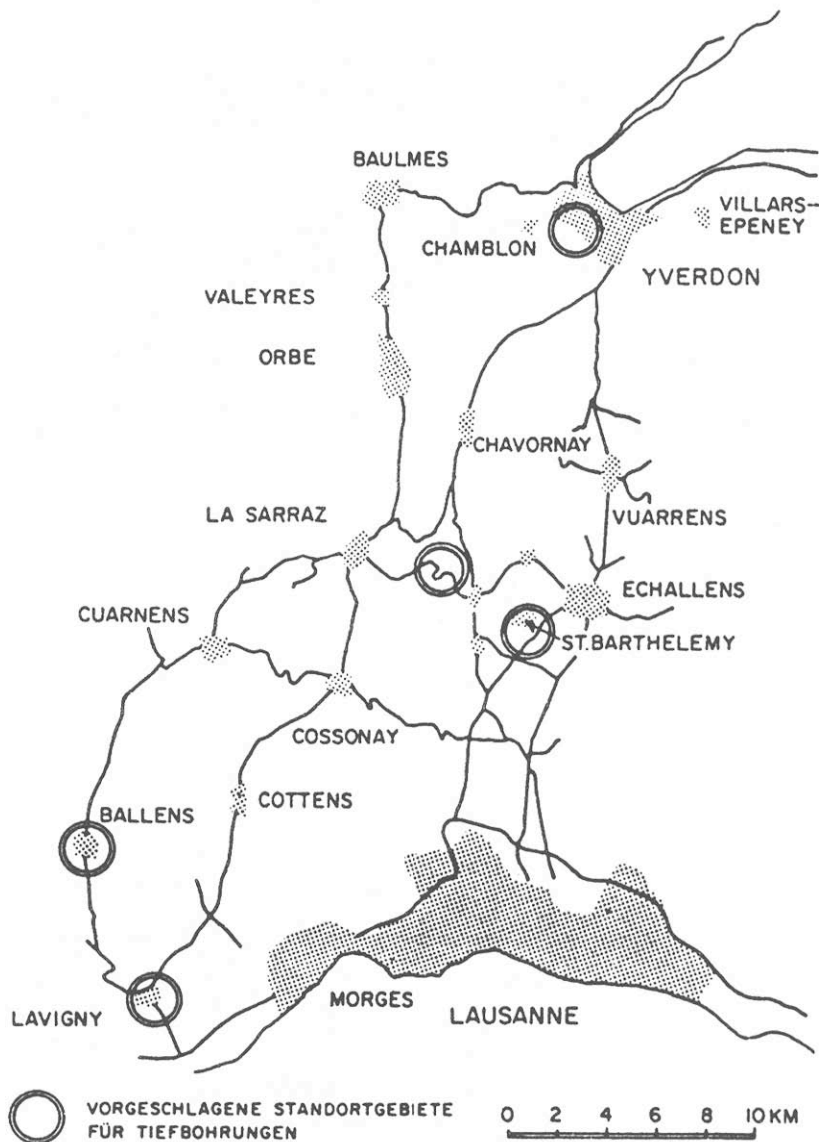


Figure 3.7.1 : Implantations proposées en 1986 pour des forages profonds dans les régions traversées par les grands décrochements du pied du Jura (Burger & Gorhan 1986).

La probabilité de drainer des eaux thermales en profondeur au niveau du Chablais vaudois est tout à fait hypothétique. En effet, les connaissances géologiques du remplissage quaternaire profond de la vallée du Rhône sont quasiment inexistantes, tout comme celles indiquant la présence de zones fissurées dans le substratum rocheux. Toutefois, de nombreux auteurs s'accordent à faire passer un décrochement majeur dans l'axe de la vallée.

3.7.2 Potentiel géothermique et potentiel de consommation

Evaluation du potentiel géothermique

L'étude régionale réalisée pour le compte du NEFF entre 1982 et 1985 (Burger & Gorhan 1986) avait estimé le potentiel géothermique des trois zones du pied du Jura mentionnées au début du chapitre 3.7.1. Les valeurs calculées pour chaque site proposé et pour chaque aquifère sont présentées sans commentaires dans la table 3.7.1.

Tableau 3.7.1 : Evaluation du potentiel géothermique de forages implantés dans les trois zones au pied du Jura sélectionnées par l'étude régionale du NEFF (Burger & Gorhan 1986).

Zone géothermique	Nyon-Gland		Aubonne-Etoy		Eclépens-Echallens	
	Malm	Dogger	Malm	Dogger	Malm	Dogger
Aquifère						
Epaiss. aquifère (m)	400	175	370	220	370	220
Profond. forage (m)	700-850	1750-1800	750-1100	1400-2000	200-500	1100-1500
Temp. toit aquif. (°C)	40	70	45	75	25	55
Potentiel (MWth)	2.4	1.9	3.3	3.4	1.7	2.5

Les épaisseurs des aquifères sont estimées

Pour notre part, nous avons aussi essayé d'évaluer le potentiel géothermique de forages implantés sur territoire vaudois. Pour les aquifères du Malm et du Dogger, nous avons retenu les sites suivants (tableau 3.7.2) :

- 4 localités situées dans des zones affectées par les grands décrochements du pied du Jura. Les probabilités d'atteindre des zones à perméabilité bien développées et donc aquifères sont élevées ;
- 3 localités situées en marge des systèmes décrochants précités. Il est possible qu'une fissuration secondaire se soit développée dans ces zones périphériques. Les chances de rencontrer des aquifères suffisamment perméables sont moyennes.
- 2 localités sises en dehors du rayon d'influence des grands décrochements précités, qui de plus sont assez éloignées de la chaîne du Jura. Dans le Dogger, des faciès plus marneux apparaissent, et par conséquent la qualité des réservoirs peut être médiocre. Les probabilités de recouper des fissures aquifères sont faibles.

Tableau 3.7.2 : Evaluation du potentiel géothermique des aquifères du Malm et du Dogger pour divers forages implantés sur territoire vaudois. Les forages de Nyon/Gland, Aubonne/Etoy, Echallens et Eclépens/La Sarraz ont de réelles chances de rencontrer des venues d'eaux thermales avec des débits importants.

Localité	Habitants	Gradient (°C/km)	AQUIFERE DU MALM			AQUIFERE DU DOGGER			Potentiel (MWth)	Profond. forage (m)	Potentiel total
			Profond. moy. (m)	Temp. moy. (°C)	Potentiel (MWth)	Profond. moy. (m)	Temp. moy. (°C)	Potentiel (MWth)			
			Epaiss. totale de la série: 500 m Epaiss. cumulé aquifère: 370 m Débit estimé : 20 l/s			Epaiss. totale de la série: 300 m Epaiss. cumulé aquifère: 120 m Débit estimé : 10 l/s					
Nyon ou Gland	8'200 5'000	33	850	38	2.3	1'000	1'850	71	2.6	2'000	4.9 MWth
Aubonne ou Etoy	1'350	35	750	36	2.2	900	1'550	64	2.3	1'700	4.5 MWth
Echallens	2'250	35	1'100	49	3.2	1'250	2'050	82	3.0	2'200	6.2 MWth
Eclépens +La Sarraz	1'350	35	400	24	1.2	550	1'250	54	1.8	1'400	3.0 MWth
Morges	7'300	35	1'050	47	3.1	1'200	2'150	85	3.1	2'300	6.2 MWth
Cossonay +Penthalaz	2'500	35	900	42	2.6	1'050	1'750	71	2.6	1'900	5.2 MWth
Payeme	3'800	30	1'860	66	4.7	2'010	2'200	76	2.8	2'350	7.4 MWth
<i>Ecublens (EPFL)</i>	4'850	29	1'650	58	4.0	1'800	2'200	74	2.7	2'350	6.7 MWth
<i>Moudon</i>	2'200	34	1'500	61	4.3	1'650	2'550	97	3.6	2'700	7.9 MWth

Quant à la région de plaine dans le Chablais vaudois, deux sites ont été retenus pour une évaluation du potentiel géothermique des aquifères du fond de la vallée du Rhône et du substratum rocheux (tableau 3.7.3). En l'absence de connaissances géologiques détaillées de cette région, le choix a été opéré sur la base de critères économiques (potentiel de consommation probable) plutôt que géologiques. Les valeurs de potentiel présentées sont à prendre à titre indicatif, car l'estimation des divers paramètres pris en compte pour les calculs (profondeurs, températures et débits) reposent sur deux hypothèses qui doivent être vérifiées : l'existence d'un aquifère poreux dans des sédiments grossiers à la base du remplissage quaternaire de la vallée du Rhône et la fissuration du substratum rocheux permettant des écoulements d'eaux thermales. Le gradient géothermique de 35° C/km, légèrement supérieur à la moyenne suisse, se justifie par la probabilité de rencontrer des remontées d'eau thermale profonde.

Tableau 3.7.3 : Evaluation du potentiel géothermique des aquifères du fond de la vallée du Rhône et du substratum rocheux. Il s'agit de valeurs spéculatives en absence de connaissances géologiques détaillées de la région du Chablais vaudois.

Localité	Habitants	Gradient (°C/km)	AQUIFERES DU QUATERNAIRE			AQUIFERES DU SUBSTRATUM			Potentiel total		
			Profond. moy. (m)	Temp. moy. (°C)	Potentiel (MWth)	Profond. forage (m)	Profond. moy. (m)	Temp. moy. (°C)		Potentiel (MWth)	Profond. forage (m)
Villeneuve (Rennaz)	2'100	35	600	31	1.3	650	700	35	1.5	800	2.9 MWth
Aigle	3'900	35	500	28	1.1	550	600	31	1.3	700	2.4 MWth

En synthèse, on peut s'attendre à un potentiel géothermique de l'ordre de 3 à 6 MWth en captant les aquifères du Malm et du Dogger dans les régions entre le pied du Jura et le Léman, avec des forages profonds entre 1'400 et 2'200 m. Dans le Chablais vaudois, entre 2 et 3 MWth pourraient être soutirés avec des forages moins profonds, de l'ordre de 700 à 800 m. Toutefois, les connaissances hydrogéologiques des aquifères profonds sont inexistantes dans cette région.

Potentiel de consommation

Une première estimation du potentiel de consommation permet déjà de se rendre compte que les besoins en chauffage des localités retenues dépassent très probablement les potentiels géothermiques à disposition, même si l'on considère que la puissance totale installée peut être modulée en fonction de l'installation de pompes à chaleur et de groupes chaleur-force permettant de doubler, voire tripler la puissance fournie par la géothermie. Dans le cas d'une utilisation directe de l'énergie géothermique, uniquement avec des échangeurs de chaleur et sans PAC, les besoins de chaleur d'un centre commercial ou d'un nouveau quartier d'habitation pourraient constituer à elles seules un objectif pour une exploitation des aquifères profonds.

A titre indicatif, on retiendra que la réalisation géothermique de Riehen (deux PAC + centrale de cogénération chaleur-force), avec une puissance totale installée de 15 MWth dont 4 MWth fournis par la géothermie, couvre les besoins en chauffage d'au moins 160 immeubles. A Lavey-les-Bains (uniquement échangeurs de chaleur), les besoins en chauffage et eau chaude sanitaire du centre thermal, qui comprend un hôtel, ainsi que le maintien en température de l'eau des bassins, représentent environ 3MWth. La puissance géothermique est de ~4MWth, de sorte que 1MWth reste encore à valoriser.

L'évaluation du potentiel de consommation devra être effectuée par un bureau d'ingénieurs possédant déjà une expérience de la mise en valeur de l'énergie géothermique, sur la base d'un concept d'exploitation de la chaleur privilégiant l'utilisation directe de la géothermie pour les besoins de chauffage des bâtiments et la valorisation ultérieure en cascade de l'énergie résiduelle dans des domaines innovateurs (serres, piscicultures, centres de loisirs aquatiques).

3.7.3 Aspects techniques et économiques

Parmi les aspects techniques à retenir au niveau des forages géothermiques profonds, sept doivent faire l'objet d'une attention particulière :

- **Techniques slimhole** : la prospection des aquifères par des forages de prospection de faible diamètre, pouvant être aménagés en cas de succès en puits de production, doit permettre de réduire les coûts de perforation. Dans ce domaine, des efforts doivent être consentis par les entreprises de forage et par les géologues pour trouver des solutions

innovatrices, quitte à rechercher à l'étranger le savoir faire pour mettre en place de telles techniques. La conception du forage doit permettre, malgré les faibles diamètres de perforation, de soutirer des débits suffisants dans les zones productives.

- **Inclinaison du forage** : il faut impérativement dévier le forage au passage des aquifères profonds, de sorte à recouper un maximum de venues d'eau thermique et d'augmenter ainsi les chances d'obtenir un débit d'exploitation élevé. La solution idéale consisterait à dévier progressivement le forage débuté avec une inclinaison de 5 à 10° par rapport à la verticale, en agissant sur la géométrie des tiges et les paramètres de perforation (vitesse de rotation, pression sur l'outil). Cette technique n'entraîne pas de surcoûts. Une déviation à la turbine ne doit être envisagée qu'en dernier recours, mais le coût de cette opération doit être inclus dans le budget du forage.
- **Equipement du forage** : les tubes en INOX pour le chemisage du forage de prospection devront être achetés après la perforation et les premiers tests de production. La partie profonde du forage sera laissée en trou nu si la tenue des parois le permet.
- **Chambre de pompage** : sa profondeur doit être limitée à un maximum de l'ordre de 100 m, car au-delà des surcoûts importants sont à prévoir pour la manutention des pompes immergées (pose et retrait par une entreprise de forage). Le diamètre final du chemisage doit être assez grand pour installer une pompe immergée suffisamment puissante, pour cette raison, il n'est pas possible d'utiliser les techniques slimhole jusqu'à la profondeur précitée. Pour terminer, la chambre de pompage ne doit pas être trop inclinée (au maximum 10°) pour permettre un fonctionnement adéquat des pompes immergées.
- **Pompes immergées** : il faut impérativement prévoir un surdimensionnement du moteur, même pour des températures de l'eau proches de 30°C, pour en assurer un refroidissement adéquat. On privilégiera un fonctionnement en continu, avec un débit de fuite minimum choisi en fonction des caractéristiques de la pompe. La présence d'un variateur de fréquence permettra d'optimiser la consommation électrique. L'installation d'une soupape de sécurité est à prévoir pour éviter des dégâts en cas de fermeture accidentelle d'une vanne d'approvisionnement. Pour terminer, des chutes de tension du réseau trop importantes doivent être évitées, celles-ci pouvant entraîner un surchauffement du moteur des pompes. Il va sans dire que tous les éléments de la partie électrique immergée (câble, raccords, etc.) doivent être parfaitement étanches et résister aux pressions hydrostatiques.
- **Singlet / doublet** : il faut privilégier l'exploitation d'aquifères dont la minéralisation soit suffisamment faible pour permettre un rejet des eaux profondes, après utilisation thermique, dans le réseau hydrographique. En cas d'eaux réduites, des techniques simples et bon marché doivent être recherchées pour précipiter les sulfures (par exemple oxygénation naturelle de l'eau par cascade et décantation des eaux dans des bassins). La température de rejet des eaux doit être abaissée en dessous de 30°C, voire nettement moins, par une valorisation en cascade de l'énergie géothermique. Si un fonctionnement en doublet ne peut pas être évité, il faut absolument réaliser le puits d'infiltration à partir de la même plateforme de forage en déviant le puits dans la direction opposée à celle du forage de production. Dans la mesure du possible, l'eau doit être réinjectée dans l'aquifère le moins profond.
- **Profondeur des forages** : des températures de l'eau en tête de puits > 50°C doivent être visées. Cela permettra une exploitation directe de la chaleur (échangeurs) et réduira ainsi considérablement les coûts de l'énergie fournie, à condition naturellement de disposer d'utilisateurs avec des systèmes de chauffage à basse température. Pour cette raison, la profondeur des forages doit être dimensionnée de manière à atteindre les aquifères les plus profonds. Il serait toujours possible par la suite de modifier le programme de perforation en arrêtant le forage à des profondeurs moindres si des circulations profondes d'eau plus chaudes que celles prévues sont rencontrées dans les aquifères supérieurs. Pour l'alimentation d'un établissement thermal ou d'un centre aquatique ludique, la température des eaux captées ne doit pas être inférieure à 35-40°C pour en permettre une exploitation économiquement rentable.

Quant aux aspects économiques liés à la distribution de chaleur, la proximité puits de production – utilisateurs est un point essentiel à prendre en considération. Le futur puits doit se situer le plus proche possible de l'utilisateur principal, de manière à réduire au minimum les coûts pour la conduite à distance. L'implantation précise d'un forage de prospection ne se justifie pas sur la base de critères géologiques. En effet, la connaissance des structures géologiques profondes se base le plus souvent sur des informations indirectes (projection des observations de surface, sismique réflexion), qui sont entachées d'une certaine marge d'erreur. Le site de forage sera donc déterminé dans un rayon de plusieurs centaines de mètres et l'emplacement exact du chantier sera défini à l'intérieur de cette zone sur la base de critères économiques (proximité des utilisateurs, propriété et affectation des parcelles, etc.).

3.7.4. Concept pour l'exploration et la mise en valeur des ressources AP du canton de Vaud

Depuis 1998, aucun forage géothermique profond n'a été réalisé en Suisse. Sans un soutien financier de la Confédération permettant de couvrir le risque d'échec géologique, aucun promoteur, soit-t-il public ou privé, ne prendrait la décision, dans la situation économique actuelle, d'investir des montants de plusieurs Mio CHF dans une opération définie à risque. Des initiatives sont actuellement en cours au niveau de l'OFEN pour relancer la prospection géothermique profonde en Suisse. Toutefois, les objectifs visés tendent à se concentrer sur les techniques DHM, visant à une production mixte d'électricité et de chaleur à partir de forages profonds plus de 5 km (cf. chapitre 4). Les réalisations en AP risquent de faire les frais de cette stratégie à moyen terme dont la première centrale est prévue à Bâle à l'horizon 2010. Des réalisations de ce type sont prévues ensuite dans le canton de Genève et dans le canton de Vaud avec une mise en production vers 2012-2015.

Pourtant, dans le canton de Vaud les conditions pour une réussite de nouvelles réalisations en AP existent bel et bien. L'opération géothermique de Lavey-les-Bains, bénéficiant il est vrai de conditions locales exceptionnelles (nombreux forages de reconnaissance, température élevée des fluides à une profondeur relativement faible) a démontré que l'énergie géothermique, utilisée de manière directe, pouvait être hautement concurrentielle par rapport aux énergies fossiles, et non seulement du point de vue environnemental. Un know-how certain a été acquis lors de cette opération par des géologues et des ingénieurs et ne demande qu'à être valorisé. D'autre part, des indices intéressants pour la prospection géothermique se dégagent de diverses études réalisées dans la région entre le pied du Jura et le Léman : De plus, le forage pétrolier réalisé à Eclépens indique de manière claire la présence d'aquifères profonds avec des températures élevées (110°C à 2'150 m de profondeur !). L'idée de nouveaux projets pour exploiter des AP dans le canton doit être soutenue ! Reste à trouver l'essentiel, le financement permettant de démarrer une nouvelle phase de prospections géothermiques en AP.

Le concept que nous proposons pour redémarrer la géothermie en AP au canton de Vaud se résume paradoxalement de la manière suivante :

La géothermie subventionne la géothermie

Mais de quelle manière ? L'idée est la suivante : un **fond cantonal pour la prospection et la valorisation de l'énergie géothermique sur territoire vaudois** (abrégié Fond Cantonal pour la Géothermie, FCG) sera alimenté par les revenus provenant de la vente de l'eau thermique produite par les forages de Lavey-les-Bains. Ceux-ci pourraient être gérés par une société anonyme à but non-lucratif, Chaleur des Eaux Souterraines de Lavey S.A. (CESLA), dont le Président est M. René Vuilleumier, Chef de la division Energie du canton de Vaud. L'eau thermique produite par les puits est fournie aux Bains de Lavey S.A., société qui gère l'établissement thermal.

Le FCG financerait donc des projets dont l'objectif est la prospection géothermique des AP, la réalisation de forages de reconnaissance, qui sont transformés en puits de production en cas de succès, ainsi que l'installation du système de pompage et la pose des conduites à distance.

Des sociétés du même type que CESLA gèreraient alors la vente de l'eau thermale aux utilisateurs. Les bénéfices de ces sociétés seraient alors reversés au FCG et réinvestis dans de nouveaux projets de prospection géothermique en AP.

C'est le principe du « contracting », un nouveau modèle de financement et d'exploitation des installations énergétiques (www.geothermal-energy.ch). Le consommateur d'énergie n'achète plus de mazout, de gaz ou d'électricité, il acquiert de la chaleur géothermique, c'est-à-dire une prestation énergétique.

Dans notre cas, on parlera alors de « contracting géothermique vaudois » (CGV), qui n'est rien d'autre que la prestation d'un tiers compétent, le « contractor », qui finance et exploite les puits de production. Le consommateur de chaleur lui garantit la prise en charge d'énergie de chauffage à un prix fixé dans le contrat pour une durée déterminée. Dans le cadre du CGV, le concepteur, le constructeur et l'exploitant des puits géothermiques sont normalement identiques. C'est pourquoi la tendance à investir dans une optimisation de l'utilisation de la ressource énergétique s'amplifie et l'incitation à surdimensionner un projet disparaît d'elle-même.

Pour le consommateur, le CGV est intéressant dans la mesure où il transfère les coûts et les risques d'investissement pour les forages de prospection qui sont élevés, permettant de libérer ses propres ressources financières en faveur d'autres investissements plus sûrs. Le CGV doit aboutir à des frais de chauffage plus bas que ceux des énergies fossiles : le contractor ne réalisera que des installations assurant un rendement élevé (utilisation directe de la chaleur géothermique) : ses connaissances techniques de même que son expérience conduisent à de meilleurs résultats.

Pour terminer, il ne faut pas oublier que le financement des opérations géothermiques en AP dans le canton de Vaud doit aussi bénéficier de financements complémentaires de la part de l'OFEN, notamment dans les phases d'avant-projet, d'étude détaillée et de réalisation du projet (cf. chapitre 3.3). C'est surtout le financement du forage, étape la plus risquée de l'opération, qui devra être entièrement couverte par le FCG.

3.7.5. Projets prioritaires et calendrier de réalisation

Pour que le concept de CGV réussisse et puisse se poursuivre, il faut dans un premier temps qu'au moins une opération géothermique sur deux soit une réussite. Pour cette raison, les deux premiers sites retenus pour les forages de prospection doivent donner un maximum de garanties quant à la possibilité de recouper des aquifères profonds. Dans ce choix dicté en premier lieu par des critères géologiques, il ne faut toutefois pas oublier les consommateurs et le potentiel de consommation. La valorisation de l'eau thermale dans le cadre d'un nouveau centre thermal ludique constituerait une plus-value intéressante pour augmenter les bénéfices annuels du contractor.

Sur la base de ces considérations, deux sites d'implantation pour les premiers forages de prospection sont proposés pour démarrer le CGV :

- **Le site d'Aubonne / Etoy** : les consommateurs potentiels sont représentés par le centre commerciale d'Aubonne (IKEA, COOP, etc.) ou celui d'Etoy (PFISTER, HORNBACH, etc.). Ces deux pôles commerciaux sont très bien fréquentés et en constante expansion. La réalisation d'un centre aquatique ludique avec piscines d'eau thermale dans cette région apparaît comme une solution réaliste. En effet, il se situerait approximativement à mi-chemin entre Lausanne et Genève et le bassin d'utilisateurs potentiels serait tout à fait considérable. La géothermie serait utilisée en premier lieu pour le chauffage des bâtiments. Une utilisation en cascade de la chaleur permettrait d'alimenter les bassins du complexe ludique.
- **Le site de Nyon / Gland** : les consommateurs potentiels sont représentés par des quartiers d'habitation dans les localités de Nyon ou Gland. Une évaluation préliminaire des besoins en chaleur doit être entreprise pour cibler les utilisateurs les favorables à une

mise en valeur de l'énergie géothermique (p.ex. groupes d'immeubles récents avec chauffage au sol).

Le calendrier d'exécution prévisionnel de ces deux opérations géothermiques est présenté dans le tableau 3.7.4.

Tableau 3.7.4 : Programme prévisionnel des premiers projets AP dans le canton de Vaud.

Activités	Années											
	2004			2005			2006			2007		
AUBONNE / ETOY												
Contacts utilisateurs	■											
Etudes préliminaires	■			■			■			■		
Avant-projet, soumissions	■			■			■			■		
Forage de reconnaissance	■			■			■			■		
Equipement puits / tests production	■			■			■			■		
Construction ouvrages en surface	■			■			■			■		
Production	●			●			●			●		
NYON / GLAND												
Contacts utilisateurs	■											
Etudes préliminaires	■			■			■			■		
Avant-projet, soumissions	■			■			■			■		
Forage de reconnaissance	■			■			■			■		
Equipement puits / tests production	■			■			■			■		
Construction ouvrages en surface	■			■			■			■		
Production	●			●			●			●		

La première phase du projet prévoit l'établissement de contacts préliminaires avec les utilisateurs potentiels, pour présenter le concept de l'opération géothermique et pour évaluer l'intérêt à une mise en valeur de la géothermie en cas de succès des forages. Pour le site d'Aubonne ou d'Etoy, on contactera aussi des promoteurs susceptibles d'être intéressés par le développement et la gestion d'un nouveau centre thermal (Eurothermes, IKEA, COOP, ?).

Les études préliminaires doivent permettre d'évaluer le potentiel de consommation, de cibler des utilisateurs potentiels et d'obtenir un modèle géologique le plus fiable possible (profondeur des aquifères, structures majeures, etc.). La réinterprétation des lignes sismiques constituera une étape incontournable de cette phase du projet.

La préparation d'un avant-projet et la mise en soumission des travaux de perforation, la réalisation du forage de prospection en slimhole, son chemisage et les tests de production du puits équipé ne devraient pas durer plus d'une année. La pose de la conduite à distance jusqu'aux utilisateurs ferait rapidement suite à cette étape. En moins de trois ans, une production de chaleur d'origine géothermique pourrait être envisagée.

3.8 Conclusions et recommandations

Partis au début de cette étude avec l'idée préconçue que le canton de Vaud était, en dehors des zones d'Yverdon-les-Bains et de Lavey-les-Bains, un territoire pauvre en ressources géothermiques en AP, nous avons progressivement découvert que de réelles possibilités de capter des circulations d'eau chaude en profondeur existent, notamment dans la région entre le pied du Jura et le Léman. L'exploitation des aquifères profonds du Malm et du Dogger pourrait représenter des potentiels géothermiques de l'ordre de 4 à 5 MWth par site de production. De plus, un potentiel de consommation non négligeable, représenté par de grands centres commerciaux groupés et par des quartiers d'habitation récents, existe dans cette région.

La proposition de financer la prospection et la mise en valeur des ressources géothermiques en AP du canton mentionnée précédemment peut sembler utopique dans le contexte économique actuel. Nous croyons fermement qu'il s'agit de la seule solution au stade actuel pour démarrer rapidement de nouvelles réalisations de géothermie en AP, le financement initial étant assuré par un Fonds cantonal pour la géothermie. Celui-ci serait alimenté par les bénéfices dégagés par CESLA S.A. grâce à la vente de l'eau thermale des puits de Lavey-les-Bains. De plus, si le premier projet proposé sur le site d'Aubonne / Etoy devait se concrétiser, avec à la clé la réalisation d'un nouveau centre aquatique ludique alimenté par l'eau thermale, de nouveaux bénéfices pourraient alors s'accumuler pour poursuivre le concept de développement de la géothermie profonde dans le canton.

Pour toutes ces raisons, nous recommandons aux responsables du Service de l'environnement et de l'énergie de l'Etat de Vaud d'examiner et de développer le concept « *la géothermie subventionne la géothermie* » en vue de la création d'un Fonds cantonal pour la géothermie

3.9 Références

- ABA-Geol SA, Fehlmann Travaux Hydrauliques SA, Sulzer Energie Consulting SA et Conrad Zschokke SA (1989). Utilisation du potentiel géothermique profond dans la région payernoise. Etude préliminaire pour la commune de Payerne, env. 80 pp., inédit.
- Berli S. & Pingel R. (1994). Anwendung der modernen Tiefbohrtechnik in der Schweiz. Bull. Schweiz. Ver. Petroleum-Geol. U. -Ing., 61 : 45-66.
- Besson O., Rouiller J.-D., Frei W. et Masson H. (1991). Campagne de sismique-réflexion dans la vallée du Rhône (entre Sion et Martigny, Suisse). Bull. Murithienne, 198 : 45-63.
- Bianchetti G. (2001). Mise en production des forages géothermiques de Lavey-les-Bains (Vaud) et Saillon (Valais). Bull. Géothermie CH, mars 2001, 29 : 2-7.
- Bianchetti G. (2002). Opération géothermique de Lavey-les-Bains (VD). CESLA S.A. - Réalisation du forage géothermique profond P600 et exploitation de la ressource énergétique par pompage dans les puits P600 et P201 (juin 1997 – décembre 2002). Rapport final, OFEN, 46 pp.
- Büchi U.P., Bodmer P.H. et Benglen (1984). Interpretation der Reflexionsseismik Kanton Waadt. Rapp. technique NEFF 165 IB 052.
- Burger A. (1983). Prospection et captage des eaux souterraines des roches carbonatées du Jura. Gaz-Eaux-Eaux usées, 63^{ème} année, 9 : 533-583.
- 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.
- Cappetti G., Passaleva G. et Sabatelli F. (2000). Italy country update report 1995-1999. Proc. Word Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000 : 109-116.
- Escher A., Masson H. et Steck A. (1987). Coupes géologiques des Alpes occidentales suisses. Rapports géol. SHGN, 2.

- Fehlmann Travaux Hydrauliques S.A. (1992). Impact d'un chantier de forage géothermique. Notice interne, 3 pp.
- Finckh P. & Frey W. (1991). Seismic reflection profiling in the Swiss Rhone valley. Part 1 : Seismic reflection field work, seismic processing and seismic results of the Roche-Vouvry and Turtmann and Agarn lines. *Eclogae geol. Helv.*, 84/2 : 345-357.
- Finckh P. & Klingelé E. (1991). Seismic reflection profiling in the Swiss Rhone valley. Part 2 : Gravimetric and geological interpretation of the Roche-Vouvry line. *Eclogae geol. Helv.*, 84/2 : 359-368.
- Finger W. & Weidmann M. (1988). Quelques données géologiques nouvelles sur la vallée du Rhône entre Sierre et le Léman. *Bull. de géologie Uni. Lausanne*, 296 . 27-40.
- Geister-Frantz M. (1987). Données géothermiques des aquifères du Dogger au pied Sud du Jura suisse. *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 7 : 31-47.
- Goldbrunner J. (2001). Geothermieprojekt Simbach-Braunau (D/A). *Bull. Geothermie CH*, 30 : 10-11.
- Gorhan H.L. & Griesser J.C. (1988). Geothermische Prospektion im Raume Schinznach Bad - Baden. *Rapp. de recherches NEFF*, in *Mat. Géol. Suisse, sér. Hydrol., Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser.*, 76, 73 pp.
- Gorin G.E., Signer C. et Amberger G. (1993). Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data. *Eclogae geol. Helv.*, 86 : 693-716.
- Hadorn J.-C. (1996). Centre thermal cantonal de Lavey-les-Bains – Projet de forage géothermique. Etude technico-économique de l'utilisation de la ressource. Variantes d'avant-projet à l'appui de la demande de garantie au risque de forage de l'OFEN. Dossier pour la requête auprès de l'OFEN pour la couverture du risque de forage géothermique, 56 pp., non publié
- Jaffé F., Benoit F. et Roux D. (1976). Low enthalpy geothermal energy in Switzerland : the thermal spring of Lavey an dits utilisation. *Int. Congr. Thermal Waters, Geothermal Energy, Vulcanism Mediterranean Area, Athens*, 1 : 268-274.
- Jordi H.A. (1990). Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, 56.
- Jordi H.A. (1993). Tectonique du bassin molassique et de son substratum jurassique-crétacé dans la région Orbe-Yverdon-Grandson. *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.*, 82.
- Laplaige P., Jaudin F., Desplan A. et Demange J. (2000). The french geothermal experience : review and perspectives. *Proc. Word Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000* : 283-295.
- Lavanchy Y. (1986). La source de la Cressonnière à Moiry : une source hypertherme peu connue. Premières observations. *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 6 : 27-41.
- Medici F. & Rybach L. (1995). Geothermal map of Switzerland (Heat flow density). *Mat. Géol. Suisse, Géophysique*, 30, 36 pp.
- Muralt R. (1999). Processus hydrogéologiques et hydrochimiques dans les circulations profondes des calcaires du Malm de l'arc Jurassien (zones de Delémont, Yverdon-les-Bains, Moiry, Genève et Aix-les-Bains). *Mat. Géol. Suisse, Géotechnique*, 82, 236 pp.
- 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*.
- OFEN (1982). Etude du marché potentiel de la géothermie en Suisse. *Cahier N° 29*.

- 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.
- Oppermann G. (2001). Riehen exporte la chaleur terrestre. Bull. Géothermie CH, mars 2001, 29 : p. 16.
- Roux D. & Büchi U.P. (1987). Avant-projet d'installation-pilote de géothermie SW de Lausanne. Rapport final pour l'OFEN et l'Etat de Vaud, env. 100 pp., inédit.
- Rybach L., Büchi U.P., Bodmer Ph., Griesser J.-C., Israng L., Kappeler S., Rellstab W., Schlanke S. et Weiss H.P. (1981). Geothermische Datensynthese des Schweiz. Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft, 26, Bern, 122 pp. + 24 annexes (cartes)
- Schellschmidt R., Clauser C. et Burkhard S. (2000). Geothermal energy use in Germany at the turn of the millennium. Proc. World Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000 : 427-431.
- 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.
- SSG (2002). La chaleur de la terre : une énergie propre et durable. Utilisation de la géothermie profonde chez nos voisins. Infos – Géothermie , Société suisse pour la géothermie, N°4, 4 pp.
- Thierrin J. (1990). Contribution à l'étude des eaux souterraines de la région de Fribourg (Suisse occidentale). Thèse de doctorat, Univ. Neuchâtel, 306 pp.
- Umgemach P. (2001). Insight into geothermal reservoir management district heating in the Paris Basin, France. Geo-Heat Center Bulletin, june 2001 : 3-13.
- Vollmayr T. (1983). Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. U. -Ing., vol. 49, 116 : 15-27.
- Vuataz F.-D. (1992). Rapport interne sur l'analyse des coûts de forages géothermiques en Suisse. Note au dossier pour le CREALP, 3 pp. et 1 tableaux, non publié.
- Vuataz F.-D., Rouiller J.-D., Dubois J.-D., Bianchetti G. et Besson O. (1993). Programme Géothermoval : résultats d'une prospection des ressources géothermiques du Valais, Suisse. Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel, 12 : 1-37.
- Vuataz F.-D. (1995). Analyse des coûts des forages géothermiques en Suisse. Etat de la situation en 1995. Note au dossier pour le CREALP, 3 pp. et 2 tableaux, non publié.
- Vuataz F.-D. (1997). Applications des techniques de forage slimhole pour la prospection des aquifères profonds. Eclogae geol. Helv., 90 : 497-512.
- Vuataz F.-D., Gusset R., Rodriguez A. et Schönborn G. (1999). Forage géothermique F5 à Yverdon-les-Bains. Rapport final, OFEN, 43 pp.
- Vuataz F.-D. & Fehr A. (2000). 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. Bull. Géothermie CH, mars 2000, 26 : 2-10.
- Weber R. & Fehr A. (1990). La géothermie en Suisse. Gisements et possibilités d'utilisation. Brochure de l'OFEN, 40 pp.
- Wilhelm J. (1995). Les forages géothermiques en zone urbaine. Brochure de Zschokke S.A., 4 pp.

Annexe 3.1

Synthèse de quelques documents relatifs à la géologie et à la géothermie du canton de Vaud - Avril 2003

OFFICE FEDERAL DE L'ENERGIE (KGS) ET ETAT DE VAUD**AVANT-PROJET D'INSTALLATION-PILOTE DE GÉOTHERMIE
SW DE LAUSANNE**

RAPPORT FINAL

par

Dr D. Roux, Ingénieur-Conseil – Presinge (GE)**Dr U.P. Büchi, Géologue-Conseil – Benglen (ZH)**

Avril 1987

Rapport N°2037 du Dr. U.P. Büchi „Lausanne West, Pilotprojekt Geothermische Bohrung Phase II, Geologisch-Geophysikalische Standort-evaluation, 15 mars 86.

Géologie :

Ce sont en premier lieu les calcaires du Crétacé et du Malm qui entrent en ligne de compte pour une exploitation d'énergie géothermique dans l'Ouest lausannois. Les roches de ces formations ne présentent qu'une porosité primaire insignifiante. La circulation des eaux n'est possible que grâce à la présence de zones de fissuration et surtout de zones karstiques, si elles existent (p. 1).

Il a été difficile d'établir un schéma structural précis de l'Ouest lausannois, à cause du manque de données (sismique, gravimétrie, etc.) et des mauvaises conditions d'affleurements. Tout au plus nous pouvons affirmer l'existence d'accidents du type failles de décrochement orientés nord-sud (l'accident de St-Sulpice en est un élément important) et SO-NE. Quelques rares linéaments NO-SE ont pu être observés.

Pour établir un profil géologique présumé de Lausanne-Ouest (p. 15), il a été tenu compte des forages voisins de la recherche pétrolière suisse (Savigny, Chapelle sur Moudon, Essertines). Des aquifères poreux sont possibles dans les formations suivantes :

- Grès de la molasse
- Calcaires urgoniens
- Dolomies du Portlandien

Le but principal d'exploration reste les calcaires et dolomies du Crétacé et du Malm, dans lesquels des porosités secondaires et de bonnes perméabilités sont possibles grâce aux régions à lignes de dislocation tectonique. La perméabilité risque pourtant de ne pas être très bonne, et pour obtenir la quantité d'eau nécessaire, **il est fort probable qu'il ne faille compter que sur les aquifères de fissuration**, éventuellement en combinaison avec des aquifères karstiques. Cette fissuration est avant tout possible avec des calcaires fragiles se cassant facilement et des dolomies : calcaires de l'Urgonien, calcaires et dolomies du Malm.

Conclusions :

La prospection géothermique d'aquifères intéressants n'a de sens que jusqu'à la base des calcaires du Malm. La prospection doit se limiter aux formations dans lesquelles peut se développer une porosité secondaire potentielle.

**Rapport d'expertise indépendante concernant le risque de forage,
par le Dr L. Hauber, Bâle, 7 janvier 1987.****Géologie :**

La molasse n'entre pas en considération comme aquifère suffisant. La molasse inférieure d'eau douce est composée principalement de marnes. Il n'y a pas de porosité primaire significative.

Le Crétacé montre quelques couches karstiques (Cénomaniens, Aptien, Urgonien, Hauteriviens et Valanginiens). Elles pourraient toutes permettre une circulation par fissuration. Mais il ne faut pas s'attendre dans ce cas à une porosité primaire utilisable. Leurs puissances ne sont pas suffisantes pour, prises individuellement, donner un but de prospection.

Le Jurassique supérieur (Malm) avec plus de 400 m de calcaires représente un bon objectif d'exploration pour une circulation par fissuration.

Il se fait donc que dans la région de Lausanne-Ouest, il faut compter tout d'abord avec une circulation d'eau dans des systèmes fissurés dans les calcaires du Malm et ensuite avec les calcaires du Crétacé superposés. Les forages pétroliers effectués dans le canton de Vaud n'ont par contre donné aucune indication d'amenée d'eau dans les « grès » du Crétacé ou du Jurassique. Il faut donc chercher des zones de fissuration ouverte assez considérables.

La région de Lausanne-Ouest appartient à un bloc qui est limité à l'ouest par le décrochement de Pontarlier-Vallorbe-Aubonne et au nord-est par la structure faillée Vallorbe-Eclépens. Une autre structure faillée nord-sud passant depuis Sainte-Croix vers le sud par Orbe délimite ce bloc. La vallée de la Venoge et la structure de Saint-Sulpice se situent dans ce prolongement.

En direction SO-NE, c'est-à-dire parallèle au Jura, des axes de plis existent aussi dans la molasse, comme l'anticlinal de Morges et les plus petits plis dans la région de Saint-Sulpice. Les recherches sismiques indiquent que dans les synclinaux entre ces plis existent des « bourrelets de compression », ce qui semble indiquer une fissuration supplémentaire SO-NE. Dans la sismique pétrolière, on peut identifier à l'ouest de Lausanne la zone fissurée correspondante à l'élément structural Sainte-Croix-Orbe. Dans cette région, on peut donc compter sur une direction nord-sud des fissures.

Il résulte que dans la région Lausanne-Ouest, on peut compter avec des fissures orientées nord-sud et NE-SO.

Géothermie :

Les seules mesures de température disponibles dans la région de Lausanne sont celles du forage Savigny 1. De ces valeurs, on peut déterminer un gradient de température de 26.5° C/km. Il en résulte des températures de 55-60°C pour les calcaires du Malm.

Emplacement du forage :

Il n'existe pas de carte détaillée pouvant donner des renseignements sur des zones de fissuration. Seule la sismique entre en ligne de compte. Celle-ci donne des indications générales positives en ce qui concerne la possibilité d'obtenir de l'eau chaude.

Le projet Lausanne-Ouest devrait retenir les calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur comme aquifères. Les données géologiques disponibles suffisent pour établir un pronostic de forage satisfaisant.

Reconnaissance des sites de forages potentiels (Chapitre 5)

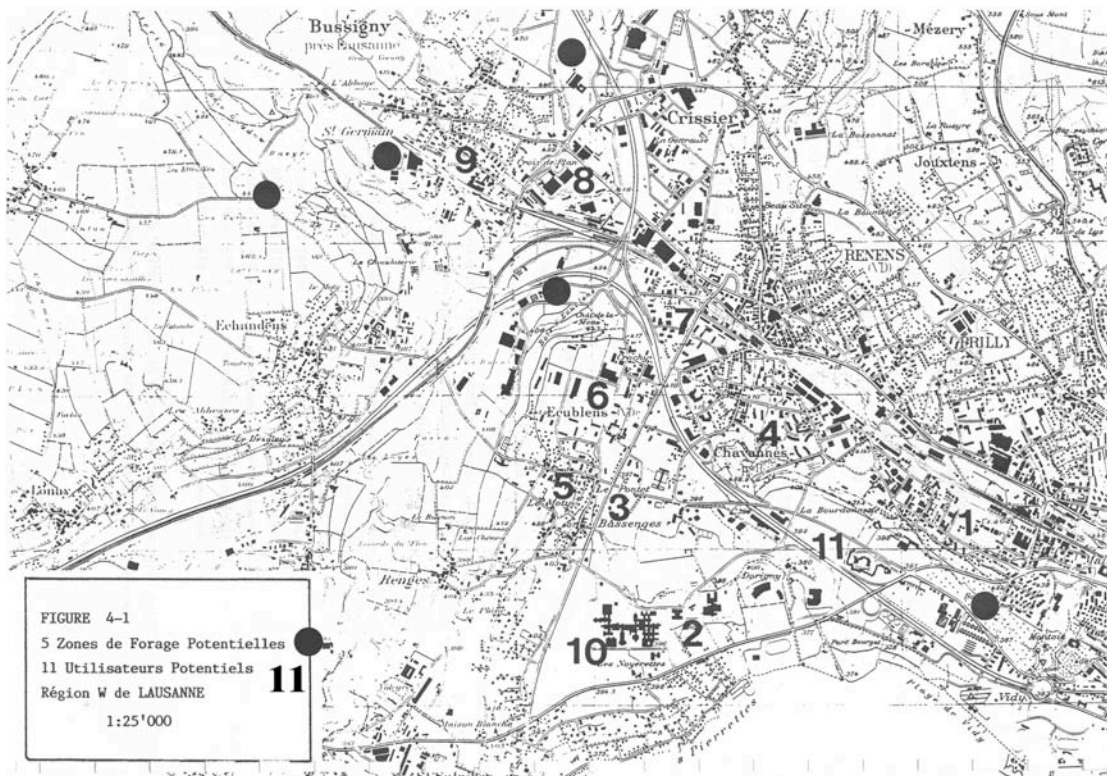
Sur le plan géologique et tectonique, 8 sites de forages sont prévus. Ils sont répartis en 5 zones. Il y a :

- 4 zones de priorité 1 (= zone de cassures et de fissuration de la partie haute du Mésozoïque mises à jour par la sismique, c'est-à-dire calcaires du Crétacé et du Malm).
- 1 zone de priorité 2 (= zones de structures de plissement (anticlinaux et synclinaux repérés par la sismique et cartographiés en surface)).

Conclusions :

Les études de géologie et de géophysique montrent qu'il faut rechercher un aquifère à environ 1'500 m de profondeur dans les séries calcaires du Crétacé inférieur et du Jurassique supérieur, dans des zones de fissurations ouvertes conductrices d'eau.

L'application la plus intéressante est sans conteste l'injection d'eau chaude dans le réseau de chauffage à distance des Services Industriels de Lausanne à Malley. Il faudrait obtenir un débit de 1'200 l/mn (20 l/s).



6.4. Profil géologique présumé Lausanne Ouest (annexe 6)

Divisions stratigraphiques et lithofacielles		Lithologie	Puissance m
Chattien sup.	Molasse calcaro-gypsienne	marnes, grès, gypses, calcaires	85 ± 10
Chattien inf.	Marnes bariolées inf.	marnes et grès	800 ± 150
Chattien profond et ev. Rupélien	Couches de Chaffa Baustein-schichten Grisigermergel	grès de la plage, marnes sableuses saumâtres grès et marnes rouges	20 ± 10
Eocène	Sidérolithique	argiles, sables, minerais	0 - 20
Crétacé	Cénomanién	calcaires, marno-calcaires	15 ± 5
	Albien	grès et marnes argileuses	20 ± 5
	Aptien	calcaires dessus, marnes dessous	15 ± 5
	Barrémién	calcaires urgoniens	70 ± 20
	Hauterivién	calcaires	80 ± 20
	Valanginién	calcaires et marno-calcaires	110 ± 20
Malm	Purbéckien	calcaires, dolomies, marno-calcaires	60 ± 30
	Portlandien et Kimmerdigien	calcaires	320 ± 50
	Séquanien	calcaires	110 ± 30

COMMUNE DE PAYERNE**UTILISATION DU POTENTIEL GÉOTHERMIQUE PROFOND DANS LA
RÉGION PAYERNOISE**

ETUDE PRÉLIMINAIRE

par

ABA-Geol SA - Payerne**Fehlmann Travaux Hydrauliques SA - Lausanne****Sulzer Energie Consulting SA - Lausanne****Conrad Zschokke SA - Lausanne**JUIN 1989

Introduction :

Le sous-sol de la région payernoise est susceptible de renfermer des nappes d'eau géothermiques exploitables.

La géothermie profonde :

Généralement, la température des roches augmente de manière linéaire avec la profondeur (en moyenne de 3° C/100 m). *Explications générales sur le principe de la géothermie profonde (p. 2-1)*

Géologie :

Les sédiments de la plaine broyarde reposent sur la Molasse du Plateau suisse qui est formée d'une alternance de grès et de marne, d'âge tertiaire. Ces couches molassiques sont disposées de façon tabulaire ou légèrement ondulées. Sous cette puissante série d'origine détritique se développent d'épaisses couches de calcaires, de dolomies et de marnes, d'âge secondaire (Mésozoïque). Cette série essentiellement carbonatée repose sur un socle cristallin gneisso-granitique.

La structure géologique générale et les gradients géothermiques prévisionnels du plateau entre Lausanne et Berne sont représentés (p. 3-1) ainsi que la coupe du forage de Courtion.

Stratigraphie :

Le sous-sol de la région de Payerne est constitué de haut en bas par (selon forage de Courtion situé à 11 km de Payerne) environ :

- 70 m de matériel quaternaire.
- 1'000 m de molasse aquitanienne et chattienne (composée d'une alternance de grès et de marnes d'âge tertiaire).
- 1'900 m de calcaires, dolomies et marnes d'âge secondaire.
- Le socle cristallin gneisso-granitique à -2'700 m.s.m.

Un gradient géothermique de 40° C/km, puis de 30° C/km à partir de 460 m de profondeur est proposé.

Hydrogéologie :

La molasse possède une porosité d'interstices entre les grains sableux et peut être un excellent réservoir, selon le degré de cimentation ou d'altération de ces grès. Les marnes bigarrées aquitaniennes et les marnes à gypse de la région de Pomy sont également aquifères.

Les roches carbonatées forment aussi un réservoir intéressant. Dans ce cas, la porosité est essentiellement liée à la fracturation ou encore à la dissolution karstique. Les eaux d'Yverdon-les-Bains proviennent des calcaires du Malm, affectés à cet endroit par un décrochement tectonique (accident du Chandon).

Coupe géologique prévisionnelle :

Sur la base des cartes de BUECHI (1981) définissant le toit des différentes formations et d'après les données du forage de Courtion (distant de Payerne de 11 km), il a été possible d'établir un profil géologique prévisionnel sous la ville de Payerne. Celui-ci montre que le toit du Mésozoïque (Urgonien karstifié) se situe à une altitude d'environ -700 m, c'est-à-dire à une profondeur de 1'160 m de la surface (RIGASSI, 1973) ; en se basant sur la sismique pétrolière (-500 m) pour le sommet du Mésozoïque.

Description des aquifères :

Sous la plaine de la Broye, il existe 5 formations géologiques susceptibles de contenir de l'eau chaude en quantité suffisante (aquifère) :

- La Molasse (Chattien et Aquitaniens), formée d'une alternance de grès et de marnes. L'eau se rencontre dans les lentilles sableuses (chenaux) d'extension limitée, à porosité d'interstices et de bonne perméabilité (1×10^{-7} m/s). L'eau devrait y avoir une température comprise entre 35 et 40°C au niveau de Payerne.
- L'Urgonien (toit du Mésozoïque), que l'on sait fortement karstifié et fracturé à Courtion sur plus de 100 m. Ce réservoir possède une porosité de fractures et de conduits karstiques de dissolution, et une bonne perméabilité régionale de l'ordre de (1×10^{-6} m/s). L'eau devrait y avoir une température comprise entre 45 et 53°C au niveau de Payerne.
- Le Malm (Mésozoïque), constitué de calcaires massifs, présente une porosité de fractures, susceptible de contenir de l'eau. La perméabilité régionale de cette formation est de l'ordre de (1×10^{-6} m/s). L'eau devrait y avoir une température d'environ 60°C au niveau de Payerne.
- Le Muschelkalk (base du Mésozoïque) possède également une porosité de fractures et de dissolution, avec de bonnes perméabilités de l'ordre de (1×10^{-6} m/s), dans ces calcaires dolomitiques. L'eau devrait y avoir une température d'environ 95°C au niveau de Payerne.
- Enfin le contact entre le socle cristallin et le Bundsandstein, montre une porosité d'interstices dans les grès et les produits d'altération du granite fracturé avec une perméabilité de l'ordre de (1×10^{-9} m/s) dans le Nord de la Suisse. L'eau devrait y avoir une température d'environ 120°C au niveau de Payerne.

Sur ces 5 aquifères potentiels, sous la ville de Payerne, seulement les trois premières formations seront retenues pour des raisons techniques et économiques liées à la profondeur de ces couches dans le sous-sol. Malgré les bons débits obtenus dans le Muschelkalk (CEDRA, Riehen), à Payerne cet aquifère ne présente pas des conditions économiquement favorables, en raison de la trop grande profondeur du gisement (plus de 2.7 km de forage). Par contre **l'Urgonien paraît un réservoir très favorable à Payerne avec une température comprise entre 45 et 53°C** et à une profondeur de forage (estimation) de l'ordre de 1.2 km. En fonction des perméabilités de fractures et de dissolution karstique, un débit de l'ordre de 10 à 20 l/s paraît tout à fait raisonnable pour cet aquifère. L'aquifère du Malm est également très prometteur dans le contexte de Payerne, à une profondeur de forage d'environ 1.4 km (température de 60°C).

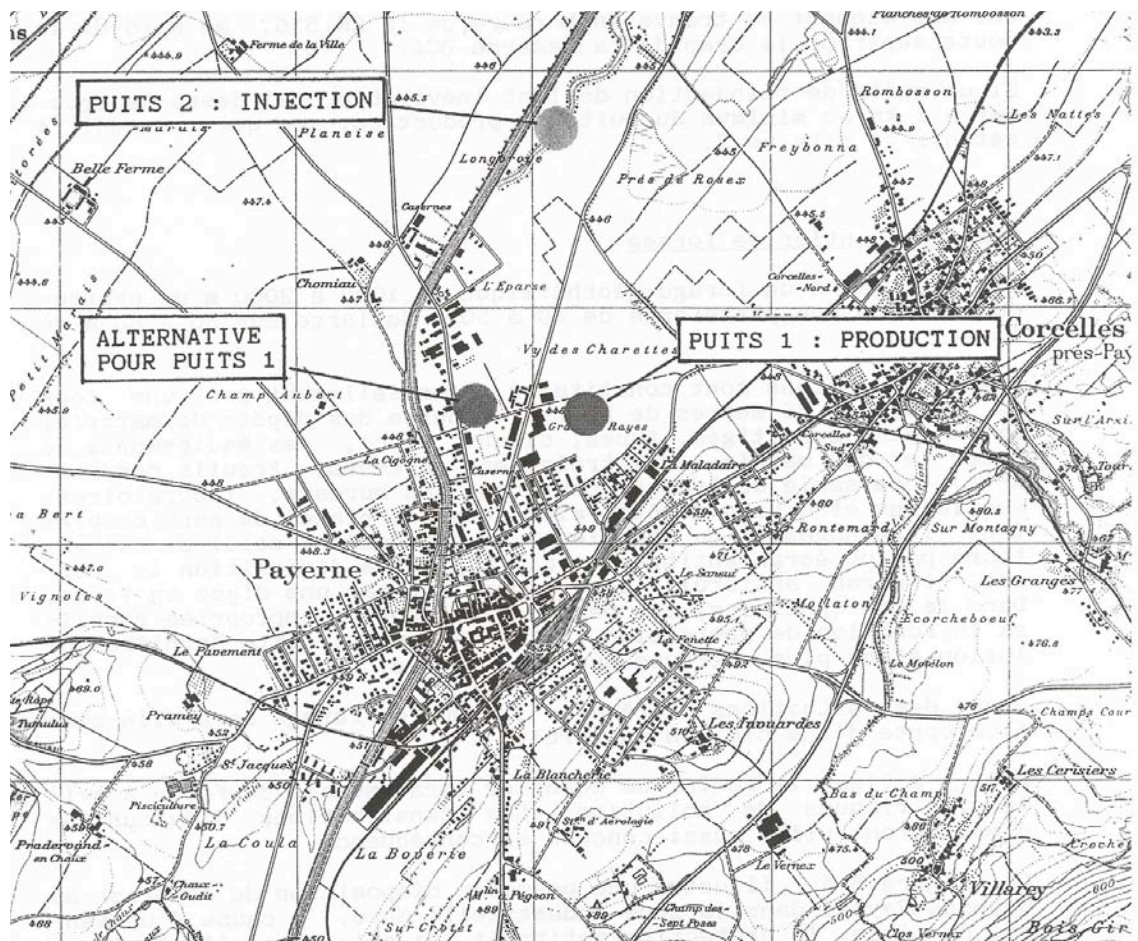
Les gradients géothermiques régionaux sont de l'ordre de 40° C/km dans la molasse. Le gradient dans le Mésozoïque est de 30° C/km.

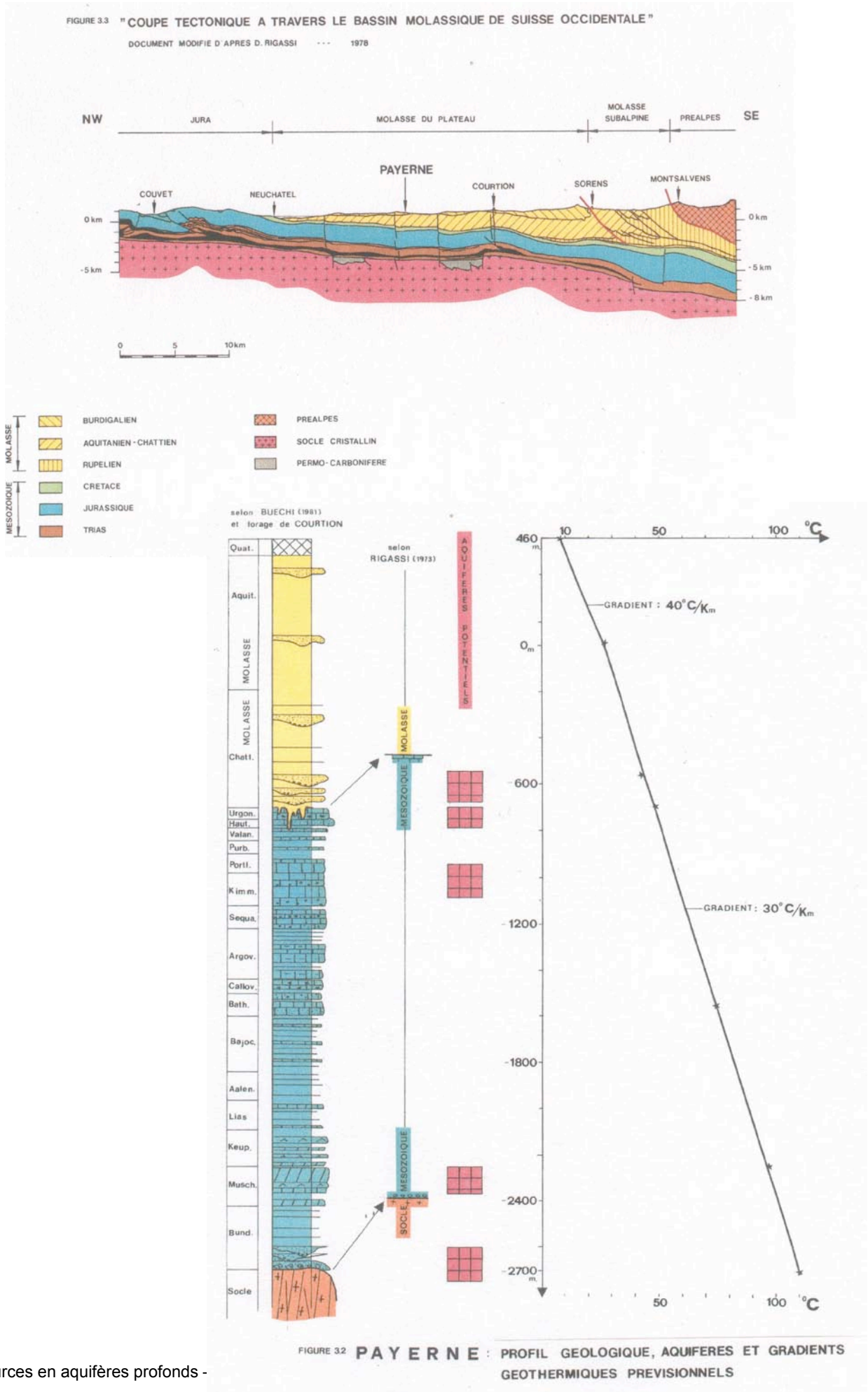
Qualité chimique des eaux :

Voir page 4-3.

Potentiel estimé :

L'analyse des formations lithologiques sous la ville de Payerne montre donc trois aquifères potentiels, à des températures probables de 35 à 60°C, pour des profondeurs situées entre 900 et 1'560 m. Des débits de l'ordre de 10 à 20 l/s paraissent possibles pour l'ensemble de ces trois aquifères.





Immeuble Commercial ICS SA

PROJET DE FORAGE GÉOTHERMIQUE DE ST-AUBIN

par
CSD, 1992

6 pages

Position approximative du forage de St-Aubin (jamais réalisé) : 565'800 / 192'500

Position approximative du forage de Courtion : 572'750 / 189'500

Profil géologique prévisionnel du forage de St-Aubin.

Rédacteurs : Burger A. & Gorhan H.L. - 1986

PROSPECTION GÉOTHERMIQUE LE LONG DU PIED SUD DU JURA

(Rapport de Recherches NEFF, No 165, 1985)

par le Groupe de Recherches sur la Géothermie

Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel - N°6 – pp. 91-198

Stratigraphie des aquifères :

- A Lostorf, près d'Oltén (SO), l'eau thermale peut être exploitée du Hauptmuschelkalk (Trias moyen) à environ 575 m de profondeur (p. 100).
- Dès Hermrigen (BE), à environ 20 km au nord-ouest de Berne, cet aquifère se rencontre à une profondeur de 2000 m.
- A partir d'Hermrigen et plus vers le sud-ouest, apparaissent successivement des aquifères stratigraphiquement plus jeunes que sont les calcaires du Dogger et du Malm qui sont potentiellement économiques pour y exploiter des eaux thermales. A Yverdon, l'eau thermale en exploitation est extraite uniquement des calcaires du Malm, les venues d'eau qui permettent l'écoulement étant localisées à une profondeur de 450 à 480 m (p. 100).

Dans le canton de Vaud, l'épaisseur du Malm est de 370 m. Le Portlandien et le Kimméridgien présentent les meilleures qualités aquifères. L'épaisseur du Dogger est de 160 m. Le Muschelkalk supérieur (Trias moyen supérieur) est susceptible d'être aquifère (dolomies calcaires). A Nyon, le cristallin se trouve à 4 km de profondeur.

- **Zone d'Yverdon-les-Bains (p. 117) :**

Description de la géologie structurale et de la stratigraphie du secteur (p. 117). Le Malm présente d'excellentes propriétés aquifères. Une épaisseur de 380 m de Malm a été mise en évidence dans le forage d'Yverdon.

Réinterprétation de la sismique dans cette zone : rapport technique IB 052 (projet de la NEFF – Nationaler Energie-Forschungs-Fonds).

- **Zone du Mormont (p. 120) :**

Présence du système décrochant de Vaulion-Mormont. Le toit de l'aquifère du Malm s'y trouverait à une profondeur de 730 m environ. Le toit du Dogger se situe à une altitude comprise entre -600 et -1'500 m.s.m. Le Muschelkalk se situerait entre -3'000 et -3'300 m.s.m. La situation stratigraphique et hydrogéologique est identique à celle de la zone d'Yverdon-les-Bains.

- **Zone de Mollens-Aubonne (p. 121) :**

Présence du grand décrochement de Pontarlier-Vallorbe-Mollens-Aubonne. Le toit du Mésozoïque se trouve à -200 m.s.m, celui du Dogger est à -1'500 m.s.m et celui du Muschelkalk à -3'600 m.s.m à Aubonne.

- **Zone de St-Cergue-Nyon :**

Présence d'un décrochement dextre est-ouest. Le toit du Mésozoïque se situe à -100 m.s.m, celui du Dogger est à -1'400 m.s.m, et celui du Muschelkalk est à -3'600 m.s.m.

Structure des aquifères :

A côté des éléments stratigraphiques, un rôle important est joué par la tectonique régionale. Les accidents géologiques les plus importants, tels des fractures majeures, des failles verticales ou des décrochements, sont le plus souvent accompagnés de larges zones à fracturation élevée qui permettent une remontée des eaux issues du cristallin et éventuellement aussi du Permo-Carbonifère (p. 100).

De grands décrochements coupent la partie Sud du Jura à des angles de 60° de l'axe des plis. Il y a notamment les décrochements suivants :

- Décrochement dextre de St-Cergue, de direction est-ouest
- Décrochement sénestre de Vallorbe-Pontarlier, de direction nord-sud
- Système décrochant dextre du Mormont, de direction ONO-ESE

Présence d'une karstification sur quelques mètres ou décimètres de la partie supérieure du Mésozoïque, juste sous la molasse (p. 122).

Origine des eaux thermales :

La majorité des eaux thermales étudiées est jeune et a son origine dans le Jura.

Implantation de forages :

L'implantation de forages profonds est proposée dans les localités de Hermrigen - Bienne, Yverdon-les-Bains, Mormont et Aubonne. Les aquifères sont constitués par les formations du Malm et du Dogger. Les profondeurs approximatives des forages seraient respectivement de 1'800 m, 1'400 m, 1'200 à 1'500 m et 1'800 m.

Les zones susceptibles d'être intéressantes se situent à proximité de grands accidents structuraux (grands décrochements et flexures) car la fissuration des calcaires mésozoïques augmente, et la perméabilité devient plus importante (p. 109).

Chimie des eaux aquifères :

Informations sur les caractéristiques géochimiques et isotopiques des eaux froides et thermominérales (p. 131).

Champ régional de température (p. 44) :

D'une manière générale, le gradient décroît continuellement du N vers les Alpes. Cette observation peut être corrélée avec l'augmentation de l'épaisseur de la croûte terrestre sous les Alpes. Le gradient géothermique décroît avec la profondeur et les valeurs établies pour la Suisse sont très comparables à celles de l'Allemagne (p. 149).

Remarque : On parle d'**indice de thermalisme** positif lorsque la température moyenne de l'eau est supérieure à la température moyenne annuelle de l'air. Les sources hypothermes sont des sources dont la température moyenne dépasse de 4°C celle de l'air.

Forage d'Yverdon :

Informations en page 150.

Conclusions (p. 172) :

Dans les calcaires du Jurassique (Trias – Crétacé inférieur), la porosité d'interstices est négligeable en terme de porosité efficace. La porosité efficace est presque exclusivement celle que développe la karstification qui est associée dans le Jura aux zones de fractures. Les failles normales constituent des zones de perméabilité préférentielles.

L'Urgonien est formé de 30 à 100 m de calcaires en bancs massifs ou finement oolithiques. Il repose sur l'Hauterivien (« Pierre jaune » de Neuchâtel), constitué de calcaires lités zoogènes, avec lequel il forme un même aquifère. Cet aquifère possède une porosité d'interstices non

négligeable. Sa perméabilité va de 1×10^{-6} à 4×10^{-6} [m/s] selon les forages, mais la perméabilité régionale doit être bien supérieure.

Les 400 m de calcaire du Malm représentent l'aquifère le plus important dans le Jurassique. Le Dogger est également un bon aquifère du Jurassique. Il est formé de calcaires et de calcaires marneux.

Le Lias inférieur calcaire ne semble pas constituer un aquifère suffisamment épais pour être pris en considération.

Les calcaires du Muschelkalk supérieur qui sont situés entre 1'400 et 3'900 m de profondeur constituent encore un aquifère potentiel intéressant.

Le Permo-Carbonifère ou le socle altéré n'ont pas été explorés au pied du Jura. Ils sont situés à une profondeur de 2'000 à 4'000 m de profondeur et devraient donc contenir une eau de 70°C à 130°C. Il n'existe cependant pas d'indication entre Bienne et Genève.

Bibliographie éventuellement à consulter (p. 187 et 194) :

- Bodmer H.P. (1982). Beiträge zur Geothermie der Schweiz. – Diss. Nr. 7034
- Burger A. & Schär J.P. (1980). Etude géologique du pied du Jura vaudois et français en vue de l'implantation de forages géothermiques. – Office féd. De l'Economie énergétique, Rapport non publié, pp. 1-34
- Saugy B., Bonnard D. & Lebet J. (1983a). Analyse des systèmes énergétiques régionaux. A. Synthèse des options énergétiques. – IENER, Lausanne-Martigny.
- Liste des rapports techniques de la NEFF – Document : Büchi & Bodmer, Benglen – März 1984 - NEFF 165 IB 052 - Interpretation der Reflexionsseismik Kanton Waadt.

Geister-Frantz M. - 1987

DONNÉES GÉOTHERMIQUES DES AQUIFÈRES DU DOGGER AU PIED SUD DU JURA SUISSE

Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel - N°7 – pp. 31-47

Aquifères :

Les principaux aquifères sont les formations du Malm, du Dogger et du Muschelkalk supérieur. Le long du Jura, plus on se déplace vers le SW, plus ces formations s'approfondissent, et plus l'eau qui s'y trouve est susceptible d'être exploitée à une température élevée.

Stratigraphie du Dogger :

Le Dogger ne peut pas être considéré comme un aquifère unique en raison d'intercalations marneuses et de variations latérales de faciès. La lithostratigraphie des différents aquifères du Dogger se présente ainsi (de haut en bas) :

- La dalle nacrée d'âge Callovien. C'est un calcaire à texture de type « grainstone ». L'épaisseur maximale observée est de 45 m à Neuchâtel.
- Le « Hauptrogenstein » (Bathonien ?) dont l'épaisseur maximale (200 m) a été observée dans le canton de Soleure.
- Les calcaires à Entroques et les calcaires récifaux du Bajocien. Ces calcaires sont mal connus mais bien développés dans les cantons de Vaud et de Genève où ils atteignent une épaisseur probable de 110 m. Ils s'amenuisent en direction du nord-est.

En direction du bassin molassique, les faciès de plate-forme sont remplacés par des faciès de bassin plus marneux, et par conséquent la qualité des réservoirs s'y dégrade. Exemple : le forage de Courtion (p. 37). Quand on se rapproche du pied Sud du Jura, les faciès du Dogger se présentent plus favorablement.

Le Dogger dans le canton de Vaud :

Dans le canton de Vaud, au forage d'Essertines, la situation lithologique peut être résumée comme suit :

- Dalle nacrée absente.
- Le Bathonien, le Bajocien et les Couches à Murchisonae :
 - 165 m de marnes et marno-calcaires
 - 275 m de calcaires
- Marnes à Opalinus, 100 m.

Selon les diagraphies, les calcaires du Hauptrogenstein et les calcaires à Entroques sont totalement étanches. Les épaisseurs approximatives cumulées des différentes formations aquifères du Dogger sont :

- à Yverdon : 275 m
- à Nyon : 120 m

Perméabilités du Dogger :

Dans le Jura suisse plissé, les perméabilités de l'ensemble des formations du Dogger sont de l'ordre de 10^{-6} à 10^{-7} m/s. A proximité d'accidents structuraux, la perméabilité de la formation est susceptible d'être plus importante (aquifère de fissures) (p. 39).

Dans le canton de Vaud, le forage du Mont Risoux a dévoilé des complications tectoniques, signes peut-être d'une perméabilité accrue.

Conclusions (canton de Vaud) :

Entre Yverdon et la région du Mormont, les logs et diagraphies confidentielles des deux forages pétroliers récents de Treycovagnes et Eclépens apporteront les compléments d'information nécessaires à la décision de poursuivre des recherches géothermiques au pied du Jura vaudois.

Thierrin M. J. - 1988

L'EAU DE LA MOLASSE MARINE SUPÉRIEURE (OMM) EN SUISSE OCCIDENTALE

Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel - N°8 – pp. 93-120

Stratigraphie :

La stratigraphie grossière de la molasse du plateau se présente comme suit (de haut en bas) :

- OSM (molasse d'eau douce supérieure)
- OMM (molasse marine supérieure)
- USM (molasse d'eau douce inférieure)
- UMM (molasse marine inférieure)

La molasse marine supérieure (OMM) est un niveau aquifère formé à sa base par les grès du Burdigalien et au sommet par les grès et poudingue de l'Helvétien. Les grès du Burdigalien ont une puissance de 300 à 900 m. Les eaux de cet aquifère proviennent de systèmes d'écoulement régionaux.

Chimie des eaux :

Informations sur la chimie de l'eau dans divers forages faits dans la molasse (p. 99).

Hydrogéologie :

Les grès du Burdigalien ont une perméabilité de l'ordre de 10^{-7} m/s (p. 110). Les caractéristiques hydrogéologiques de cette formation semblent être à peu près identiques pour tout l'aquifère du Burdigalien selon les données de Matran (FR) ou de Wabern (BE).

L'exploitation de cet aquifère par des puits ne permettrait pas de soutirer des débits supérieurs à 1'200 l/mn (p. 115).

Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft – Studie Nr. 26

GEOthermISCHE DATENSynTHESE DER SCHWEITZ

Liste des forages profonds du canton de Vaud :

Nom du forage	Abré- viation	Coordonnées	Cote (m)	Prof. (m)	Géologie au fond	Mesure des tempé- ratures	température à (°C)			gradient (°C/km)	
							500 m	1000 m	2000 m	non- corrigé	corrigé
Chapelle	CHL	547306 / 168360	764	1531	crétacé	BHT non corr. + plusieurs points de mesure	31	47	77.5	32.3	34.3
Courtion	COU	572415 / 189420	599	3084	muschel- kalk moy.	idem	26	41	68	27.4	28.3
Cuarny	CUA	543550 / 180425	560	2229	Lias						
Essertines	ESS	539775 / 173490	661	2635	crétacé	T-Log	38.5	57	93.5	36.5	39.7
Mont Risoux	RIS	500000 / 161000	1350	1958	Lias						
Savigny 1	SAV	546271 / 155312	839	2486	crétacé	BHT non corr. + plusieurs points de mesure	26	42	68.5	27.5	29.4
Servion	SER	549000 / 157900	765	1433	USM						
Treyco- vagnes	TRE	536136 / 180273	474	3220	Bunt- sand- stein	BHT corrigé + plusieurs points de mesure	32	52	84	34.5	34.9
Yverdon (Belair)	YVE	540700 / 180575	529	159	oligo- cène	T-Log					

Contient encore :

- Plan avec position de tous les forages profonds de Suisse (Beilage 2)
- Carte des isolignes des gradients géothermiques non-corrigés (Beilage 3). Dans le canton de Vaud, le gradient géothermique se situe aux alentours de 35° C/km.
- Carte des isolignes des gradients géothermiques corrigés (Beilage 4). **Dans le canton de Vaud, le gradient géothermique se situe aux alentours entre 30 et 40° C/km.** A Lausanne, le gradient serait de 38° C/km.
- Carte des températures à 500 m de profondeur (Beilage 5). Dans le canton de Vaud, environ 30 à 35°C. A Lausanne, environ 32°C.
- Carte des températures à 1000 m de profondeur (Beilage 6). Dans le canton de Vaud, environ 50°C.

- Carte des températures à 2000 m de profondeur (Beilage 7). Dans le canton de Vaud, environ 80°C.
- Carte des sources (Beilage 8).
- Carte des isohypses de la couverture de l'USM (Beilage 13).
- Carte des isopaques de l'USM (Beilage 14).
- Carte des porosités et des perméabilités de l'USM d'après forages (Beilage 15).
- Carte des isohypses de la couverture mésozoïque sous la molasse (Beilage 17).
- Carte des températures de la couverture mésozoïque (Beilage 18).
- Carte des isohypses de la couverture du Muschelkalk (Beilage 19).
- Carte des isopaques de la formation carbonatée du Muschelkalk supérieur (Beilage 20).
- Carte des températures de la couverture du Muschelkalk (Beilage 21).
- Carte des isohypses du cristallin (Beilage 23).
- Carte des températures au toit du cristallin (Beilage 24).

R. Muralt - 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 – Lieferung 82

Région de Moiry (p. 127) :

Le village de Moiry se trouve à quelque 5 km à l'ouest de La Sarraz et 20 km au sud-ouest d'Yverdon-les-Bains dans le canton de Vaud. Son altitude est de 625 m environ comme Yverdon.

Moiry est situé au pied du Jura où les roches du Mésozoïque plongent vers le sud-est et disparaissent sous la couverture molassique. La stratigraphie est essentiellement la même qu'à Yverdon-les-Bains.

2 sources ont été étudiées :

- La source subthermale de La Cressonnière qui émerge un peu à l'amont du village de Moiry, à peu près au contact du calcaire urgonien avec la couverture morainique (p. 127). L'eau est faiblement minéralisée. La température varie entre 9.4 et 15.7°C et le débit de 20 à 600 m³/h. En période de hautes à moyennes eaux, des petites venues d'eau subthermale moins chaude que La Cressonnière s'écoulent de 2 tuyaux au pied du captage.
- La source froide du Grand Record, qui est captée à quelque 200 m au sud-ouest de La Cressonnière.

Comme pour toutes les eaux des aquifères carbonatés du Malm, les interactions eau-roche des eaux de Moiry sont assez restreintes à cause de la minéralogie très monotone des calcaires et dolomies du Malm.

Le gradient géothermique à Moiry est admis à environ 3.0 – 3.5° C/100 m (p. 135). Le chimisme de l'eau profonde extrapolée et le rapport isotopique du strontium dans l'eau de La Cressonnière indiquent très clairement le Portlandien comme aquifère. Celui-ci se trouve à une profondeur entre 200 et 370 m (épaisseurs des différentes couches d'après Petch, 1970).

Alimentation :

En raison de la situation géographique de la source de La Cressonnière au pied du Jura, encore légèrement sur le versant sud-est de la première chaîne, il est évident que les différentes eaux subthermales et froides de Moiry s'infiltrent dans ce même versant, plus en amont (p. 136).

En résumé, on peut conclure que l'eau profonde subthermale de la source de La Cressonnière s'infiltré directement dans les couches du Portlandien à une altitude moyenne de 1'100 m au nord-ouest de Moiry, ou indirectement à travers les affleurements du Valanginien au-dessus du Portlandien à une altitude moyenne de 1'200 m.

Le chimisme de l'eau profonde de la source de La Cressonnière indique un temps de séjour souterrain prolongé (entre 80 ans et quelques siècles) : l'enrichissement en magnésium et l'appauvrissement en calcium par dissolution incongruente de la dolomite, un léger

enrichissement en strontium, fluorure, silice et en éléments traces, la dénitrification et la disparition de l'oxygène dissous.

Modèle conceptuel de l'écoulement souterrain en p. 141.

Finger W. & Weidmann M. – 1988

**QUELQUES DONNÉES GÉOLOGIQUES NOUVELLES
SUR LA VALLÉE DU RHÔNE ENTRE SIERRE ET LE LÉMAN**

Bulletin de géologie de Lausanne – N°296

A l'aide de forages et des méthodes de sismique, il a été possible de déterminer une carte d'isohypses du fond rocheux de la plaine du Rhône entre St-Maurice et le Léman (p. 32). Quatre profils ont été tracés. D'amont en aval, la profondeur du substratum est la suivante :

- Un peu en amont de St-Maurice, la profondeur maximale du substratum atteint environ 650 m sous la surface de la plaine.
- A peu près à la hauteur d'Ollon, juste en aval des collines de St-Triphon, la profondeur du substratum atteint au maximum environ 650 m sous la surface de la plaine.
- Un peu en aval d'Yvorne, la profondeur du substratum atteint au maximum environ 700 - 750 m sous la surface de la plaine.
- A 1.5 km en aval de Vouvry, la profondeur du substratum atteint au maximum un peu plus de 800 m sous la surface de la plaine.

L'ensemble du document parle principalement de la qualité du matériel de remplissage quaternaire de la plaine du Rhône.

Vollmayr T. - 1983

TEMPERATURMESSUNGEN IN ERDÖLBOHRUNGEN DER SCHWEITZ

Bull. Ver. schweitz. Petroleum-Geol. u. -Ing., Vol. 49116, April 1983, S. 15 - 27

Résumé :

La température sur le plateau suisse s'accroît rapidement avec la profondeur lors que l'on est près de la surface. Sous cette zone, le gradient de température dans les sédiments tertiaires est approximativement de 25° C/km. Dans les sédiments du Mésozoïque, la température s'accroît à nouveau, mais modérément.

- Forage de CHAPELLE 1 : gradient géoth. linéaire constant de 3.5° C/100 m (43°C à 1'000 m)
- Forage de SAVIGNY : gradient géoth. linéaire constant de 3.1° C/100 m (40°C à 1'000 m)
- Forage d'ESSERTINES 1 :
 - gradient géoth. linéaire constant de 8.2° C/100 m de 0 à 330 m de profondeur
 - gradient géoth. linéaire constant de 2.8° C/100 m de 330 m à plus de 2'000 m (56°C à 1'000 m)
- Forage de TREYCOVAGNES 1 : gradient géoth. diminuant légèrement et progressivement jusqu'à plus de 3'000 m. Gradient passant de 5.4° C/100 m à 2.8° C /100 m (52°C à 1'000 m)
- Forage d'ECLEPENS :
 - gradient géoth. linéaire constant de 13.0° C/100 m de 0 à 200 m de profondeur
 - gradient géoth. croissant passant de 1.9° C/100 m à environ 9° C/100 m de 200 m à plus de 2'000 m (52°C à 1'000 m)

Profils de température et carte de position des forages disponibles en page 24 et suivantes.

Annexe 3.2

Bibliographie commentée de publications et documents relatifs à la géologie et à la géothermie du canton de Vaud (liste non exhaustive)

Introduction

Les publications et documents cités ci-après sont classés par région ou par sujet. Ils sont accompagnés de quelques commentaires analytiques ou critiques. Il ne s'agit pas d'une liste exhaustive, mais d'un choix plus ou moins arbitraire qui tente de cerner tous les aspects du problème envisagé.

Etudes géologiques générales

Il n'existe pas, à ce jour, de travail récent exposant dans ses grandes lignes la géologie du canton. Une vision générale simplifiée et déjà ancienne se trouve dans l'Encyclopédie illustrée du Pays de Vaud, vol. 2 : Une terre..., (1971), Ed. Feuille d'Avis de Lausanne. Dépassant largement les frontières cantonales, des introductions plus ou moins fouillées aux trois secteurs principaux (Jura, Bassin molassique, Préalpes-Alpes) se trouvent dans les plus récents guides : Guide géologique de la Suisse : édition de 1967 (Wepf & Co, Basel) ; An outline of the Geology of Switzerland, livret-guide G10 du 26^{ème} Congrès géologique international de Paris, 1980 (Wepf & Co, Basel).

Jura

Rigassi (1977, Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 73). Analyse structurale détaillée du Jura vaudois et de son prolongement en France voisine.

Aubert, Badoux & Lavanchy (1979, Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 74). Carte structurale et synthèse hydrogéologique du Jura vaudois.

Sommaruga (1997, Mém. Soc. neuch. Sci. nat., 12). Excellente synthèse moderne, couvrant le Jura vaudois et neuchâtelois, ainsi qu'une bonne partie du bassin molassique.

Bassin molassique

Homewood & al. (1989, Le bassin molassique suisse. In : B. Purser éditeur : Méthodes d'étude des bassins sédimentaires. Ed. Technip, Paris). Introduction générale à l'ensemble du bassin.

Strunck (2001, Inaug.-Diss. Uni Bern). Strunck & Matter (2002, Eclogae geol. Helv., 95,2). Deux synthèses stratigraphiques, sédimentologiques et structurales ; concernent la Molasse uniquement, dans le Gros-de-Vaud, le N-vaudois et la Broye.

Préalpes-Alpes

Il n'y a pas de présentation synthétique récente concernant ce secteur ; par contre, une synthèse cartographique mise à jour et un profil général se trouvent dans les travaux suivants :

Escher, Masson & Steck (1987, Rapports géol. SHGN, 2). Profil à travers les Préalpes et Alpes vaudoises.

Steck et al. (1999). Carte tectonique des Alpes occidentales au 1 : 100'000, feuille 41. Office fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), Ittigen-Berne.

Cartes géologiques détaillées

Le territoire vaudois est presque entièrement couvert par les feuilles au 1 : 25'000 publiées par la Commission géologique suisse (Bâle), puis par l'OFEG (Ittigen-Berne). Certaines feuilles déjà anciennes sont épuisées ; on pourra les consulter dans la bibliothèque de la Section des Sciences de la Terre de l'Université de Lausanne (B.F.S.H. 2, UNIL-Dorigny). Les notices explicatives de ces feuilles fournissent sous une forme condensée toutes les données stratigraphiques et structurales concernant chaque feuille, de même qu'une bibliographie souvent exhaustive. Il s'agit des feuilles suivantes :

1165-Murten, 1182-Ste Croix, *1184-Payerne, 1185-Fribourg, 1202-Orbe, 1203-Yverdon-les-Bains, 1204-Romont, 1221-Le Sentier, 1222-Cossonay, 1223-Echallens, 1224-Moudon, 1241-Marchairuz, 1242-Morges, 1243-Lausanne, 1244-Châtel-St-Denis, *1261-Nyon, 1264-Montreux, 1265-Les Mosses, 1281-Coppet, 1284-Monthey, 1285-Les Diablerets, 1305-Dent-de-Morcles.

* = feuilles terminées, disponibles auprès de l'OFEG, mais pas encore imprimées.

Etudes concernant la structure et la profondeur du substratum

SISMIQUE. De nombreux rapports, issus des sociétés pétrolières et conservés pour la plupart au Musée géologique cantonal (Lausanne), analysent les campagnes sismiques des 50 dernières années. Ces rapports ne sont pas tous accessibles, la qualité des résultats, ainsi que les interprétations sont très variables. Ils offrent néanmoins une assez bonne image de la structure profonde dans les secteurs jurassien et molassique. On a utilisé une partie de cette documentation disponible pour le dessin de la carte jointe au présent rapport. Dans les secteurs préalpin et alpin, l'information sismique est trop sommaire et il n'y a pas de sondage profond.

Rigassi (1987). Tectonique de l'Ouest vaudois. Volume des résumés des communications, Swiss Tectonic Group, Fribourg, p. 37. Grands traits de la tectonique entre le pied du Jura et le Léman.

Jordi (1990). Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. Bull. Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 56.

Jordi (1993). Tectonique du bassin molassique et de son substratum jurassique-crétacé dans la région Orbe-Yverdon-Grandson. Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 82.

Ces deux travaux recouvrent une bonne partie du territoire molassique vaudois ; ils sont basés sur la sismique pétrolière.

Gorin, Signer & Amberger (1993). Structural configuration of the western Swiss Molasse Basin as defined by reflection seismic data. Eclogae geol. Helv., 86. Excellente synthèse de tout le territoire molassique vaudois et de son substratum.

NAGRA (1994). Sedimentstudie. Zusammenfassende Übersicht der Arbeiten von 1990 bis 1994 und Konzept für weitere Untersuchungen. Nagra Technischer Bericht 94-10. Etude de quelques lignes sismiques dans la région broyarde.

Sommaruga (1997). Geology of the central Jura and the Molasse basin. Mém. Soc. neuch. Sci. nat., 12. Présente et analyse de façon détaillée les lignes sismiques récentes, tous les sondages ainsi que les données de surface couvrant le Jura (VD, NE, F) et la plus grande partie du bassin molassique vaudois ; donne pour chaque formation géologique des cartes d'isopaques et d'isohypses.

Burkhard & Sommaruga (1998). Evolution of the western Swiss Molasse basin : structural relations with the Alps and the Jura belt. Geol. Soc. London, Spec. publ. 134. Synthèse présentant les relations entre les trois domaines.

Etudes concernant le régime thermique

Zahner, Mautner, Badoux (1974). Etude hydrogéologique des sources thermominérales de Lavey, d'Yverdon et de Saxon. Mém. Soc. vaud. Sci. nat., 95/15.

Vuataz (1982). Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. Mat. Géol. Suiss, sér. Hydrol., 29.

Vollmayr (1983). Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. Bull. Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 49.

Vollmayr (1985). Temperature in the subsurface of the Swiss and German alpine foreland. J. of Geodynamics, 4.

Excellentes synthèses des données profondes disponibles à l'époque.

Burger & Gorhan (1986). Rapport NEFF 165 : prospection géothermique le long du pied sud du Jura. Résumé dans Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 6.

Nombreuses études régionales et locales, notamment dans le canton de Vaud.

Büchi (1986). Lausanne West. Pilotprojekt geothermische Bohrung, Phase II. Geologisch-geophysikalische Standortevaluation. Etat de Vaud et Office fédéral de l'Energie.

Dernier rapport d'une série concernant l'Ouest lausannois et ses possibilités quant à une exploitation de l'énergie géothermique. Conclusions bien trop optimistes...

C.S.D. Fribourg (1992 et 1996). Projet de forage géothermique à St Aubin (Fribourg).

Etude de faisabilité d'un sondage profond (non réalisé) situé près de la frontière Vaud-Fribourg, dans la plaine de la Broye. Rapport non publié.

Schegg (1993). Maturité et histoire thermique des sédiments de l'avant-pays alpin (Suisse, France). Publ. Dépt. Géol.-Paléont. Univ. Genève, 15.

Met notamment en évidence une anomalie thermique ancienne (et toujours actuelle ?) le long de la vallée de la Broye, anomalie axée sur une faille et peut-être due à des remontées d'eau chaude.

Medici & Rybach (1995). Geothermal map of Switzerland 1995 (Heat flow density). Mat. Géol. Suisse, sér. Géophysique, 30.

Synthèse la plus à jour sur la question.

Muralt (1996). Circulations profondes des calcaires du Malm... Thèse Univ. Neuchâtel.

Lavanchy (1986). La source de La Cressonnière à Moiry (Vaud) : une source hypertherme peu connue. Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 6.

Lavanchy (1988). Observations concernant des circulations d'eau profondes dans les calcaires en relation avec le décrochement de Saint-Cergue (région de La Côte, canton de Vaud, Suisse). Ann. scient. Univ. Besançon, Géol., Mém. hors série 6.

Lavanchy (1990). Les circulations d'eau profondes et froides en relation avec un accident majeur du Jura vaudois (Suisse). Mém. 22nd Congress IAS, 22, part 1.

Ces travaux décrivent les divers types de circulation d'eaux chaude et (ou) froide entre le Jura et le bassin molassique.

Muralt et al. (1997). Intégration des méthodes hydrochimiques, géologiques et géophysiques pour la prospection d'une nouvelle ressource en eau thermominérale. Cas d'Yverdon-les-Bains, pied du Jura. Eclogae geol. Helv., 90.

Bilan des connaissances actuelles sur le site d'Yverdon-les-Bains.

Jaboyedoff & Pastorelli (1999). Le régime thermique des Alpes. Bull. Soc. suisse géothermie, 25

Marc Weidmann. géologue, Dr ès Sc.

Jongny, le 15 novembre 2002

Annexe 3.3

Compilation des informations concernant les forages profonds situés sur le canton de Vaud et régions limitrophes

Par le qualificatif de « profond », on désigne ici les sondages qui ont dépassé 200 m.

Les données figurant ci-dessous sont parfois imprécises et incomplètes : par manque de temps et de moyens, elles n'ont pas pu être systématiquement vérifiées sur les documents originaux conservés en archives. De plus, nous ne connaissons pas tous les sondages « profonds » exécutés à ce jour dans le canton de Vaud, personne ne se souciant de les répertorier. La liste ci-dessous n'est donc pas exhaustive.

Les dossiers concernant les sondages pétroliers forés sur territoire vaudois dès 1935 se trouvent au Musée de Géologie de Lausanne (B.F.S.H. 2, UNIL-Dorigny) ; certains dossiers sont incomplets. En ce qui concerne les autres sondages anciens ou récents, les données proviennent soit des publications citées, soit d'archives publiques ou privées.

Pour chaque sondage, les indications suivantes sont données : *numéro de référence* (voir la carte) - **nom** - profondeur totale (p.t.) - coordonnées (parfois approximatives) - maître de l'oeuvre - date d'exécution - données géophysiques - température en fond de trou (t°), d'après Vollmayr 1983 ou Medici & Rybach 1995 - log sommaire - références bibliographiques.

1. Sondages pétroliers vaudois

1 - Chavornay-1 - p.t.=246,4 m - env. 533'830/172'040 - Consortium du pétrole vaudois - 1912 - pas de diagraphie - t°= ?

0-35 m : Quaternaire ; 35-166 m : Chattien inf. ; 166-195 m : Sidérolithique ; 195-246 m : Urgonien.

Heim (1919) : Beitr. Geol. Schweiz, geotech. Ser. 6 ; Jordi 1995 : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

2 - Chavornay-2 - p.t.=202,5 m - env. 532'680/172'960 - Consortium du pétrole vaudois - 1912 - pas de diagraphie - t°= ?

0-26 m : Quaternaire ; 26-175 m : Chattien inf. ; 175-202 m : Urgonien.

Heim (1919) : Beitr. Geol. Schweiz, geotechn. Ser. 6 ; Jordi 1995 : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

3 - Concise-1 - p.t.=240 m - env. 546'340/189'900 - Val-de-Travers Asphalt Paving Cy - 1926 - pas de diagraphie - t°= ?

0-10 m : Quaternaire ; 10-220 m : Chattien ; 220-240 m : Urgonien.

ACV, Dossier KXC 2019 ; Weidmann (1991) : Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 80.

4 - Pré Bertrand/Arnex - p.t.=302 m - env. 530'780/171'490 - Bourquin, Müller & Cie - 1929 - pas de diagraphie - t°= ?

0- env. 10 m (?) : Quaternaire ; env. 10 (?) - 194 ou 212 m : Chattien ; 194 ou 212-221 m : Urgonien ; 221-250 m : Hauterivien calcaire ; 250-302 m : Hauterivien marneux, puis Calcaire Roux. Log très approximatif !

Aubert (1963) : Notice explic. feuille Orbe, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000 ; Weidmann (1991) : Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 80.

5 - **Cuarny-1** - p.t.=2228 m - 543'540/180'380 - Pétroromand-Neuchavaud S.A. - 1936-1939 - pas de diagraphie - $t^{\circ}=79^{\circ}$ à 2000 m

Log : voir photocopie de Sommaruga (1997), p. 159.

Jordi (1993) : Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 82 ; Jordi (1995) : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

6 - **Servion-1** - p.t.=1433 m - 549'010/157'900 - Pétroromand-Neuchavaud S.A. - 1938-1939 - pas de diagraphie - $t^{\circ}= ?$

0-120 m : OMM ; 120-1100 m : Aquitanien ; 1100-1433 m : Molasse à charbon, Chattien.

Weidmann & Rigassi (1988) : Notice explic. feuille Lausanne, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

7 - **Chapelle-1** - p.t.=1531 m - 547'305/168'359 - SAdH-Elwerath - 1958 - diagraphie - $t^{\circ}= 47^{\circ}$ à 1000 m

0-17 m : Quaternaire ; 17-70 m : Burdigalien ; 70-850 m : Aquitanien ; 850-1440 m : Chattien ; 1440-1531 m : Crét. inf.

Lemcke (1959) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 30.

8 - **Savigny-1** - p.t.=2486 m - 546'271/155'312 - SAdH-Elwerath - 1960 - diagraphie - $t^{\circ}=\text{env. } 85^{\circ}$.

0-env. 600 m : Chattien subalpin ; 600-1042 m : Aquitanien ; 1042-1550 m : Molasse à charbon ; 1550-2307 m : Chattien inf. ; 2307-2321 m : UMM ; 2321-2367 m : Cénom.-Alb.-Apt. ; 2367-2435 m : Urgonien blanc ; 2435-2486 m : Urgonien jaune, puis Pierre Jaune hauterivienne.

Lemcke (1963) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 30 ; Weidmann & Rigassi (1988) : Notice explic. feuille Lausanne, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

9 - **Risoux-1** - p.t.=1958 m - 500'310/161'020 - PREPA - 1960 - diagraphie - $t^{\circ}= ?$

Log : voir Sommaruga (1997), p. 160.

Winnock (1961) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 28.

10 - **Essertines-1** - p.t.=2936 m - 539'775/173'490 - SAdH-Elwerath - 1962-1963 - diagraphie - $t^{\circ}=\text{env. } 100^{\circ}$

Log : voir Sommaruga 1997, p. 159.

Büchi et al. (1965) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 32.

11 - **Treycovagnes-1** - p.t.=3221 m - 536'100/180'260 - Shell - 1978 - diagraphie - $t^{\circ}=120^{\circ}$

Log : voir Sommaruga (1997), p. 160.

Jordi (1995) : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000 ; - Schegg et al. (1997) : Eclogae geol. Helv., 90 ; Sommaruga (1997) : Mém. Soc. neuch. Sci. nat., 12.

12 - **Eclépens-1** - p.t.=2150 m - 533'220/168'370 - SAdH-BEB - 1981 - diagraphie - $t^{\circ}=\text{env. } 100^{\circ}$.

Log : voir Vollmayr (1983) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 49 ; Sommaruga (1997) : op. cit.

13 - Chessel-1001 - p.t.=615 m - 557'420/133'510 - Petrosvibri - 1987 – diagraphie : oui, mais pas de mesure de t°

Log : 0-env. 130 m : Quaternaire ; env.130-159 : dolomie (Norien) ; 159-275 m : anhydrite, dolomie et grès siliceux (Carnien) ; 275-337 : calcaires et dolomies (Ladinien) ; à 337 m : chevauchement ; 337-406 : Aalénien UH ; 406 m : chevauchement ; 406-458 anhydrite (Carnien) ; 458 m : chevauchement ; 458-599 : Aalénien UH ; 599 : chevauchement ; 599-615 m anhydrite et dolomie (Carnien).

Non publié.

2. Sondages pétroliers proches du territoire vaudois

14 - Messery-1 - p.t.=738 m - 904'732/157'523 (coord. Lambert) - PREPA - 1958 - diagraphie - t°= ?

0-18 m : Quaternaire ; 18-589 m Chattien ; 589-655 m : Crét. sup.-Albien-Aptien ; 655-737 m : Urgonien.

Non publié.

15 - Mont de Boisy-1 - p.t.=1954 m - 908'360/152'670 (coord. Lambert) - PREPA - 1959 - diagraphie - t°= ?

0-10 m : Quaternaire ; 10-748 m : Aquitanien ; 748-1696 m : Chattien ; 1696-1720 : Rupélien sup. ; 1720-1768 : Rupélien inf. ; 1768-1807 m : Crét. sup. ; 1807-1954 m : Urgonien.

Non publié.

16 - Courtion-1 - p.t.=3084 m - 572'415/189'420 - BP Expl. Cy. - 1960 - diagraphie - t°=68° à 2000 m.

Log : voir Sommaruga 1997, p. 159.

Perry (1960) : Rapport interne BP London.

17 - Sorens-1 - p.t.=3165 m - 568'470/169'180 - BP Expl. Cy. - 1961 - diagraphie - t°= ?

0-20 m : Quaternaire ; 20-460 m : Chattien sup. alpin ; 460-1500 m : Aquitanien ; 1550-3100 m : Chattien ; 3100-3165 m : UMM, Eocène, Crétacé. Log très approximatif !

Perry (1961) : Rapport interne BP London.

18 - Romanens-1 - p.t.=4022 m - 564'200/167'400 - Elf-Aquitaine - 1977 - diagraphie - t°=77° à 2000 m

0-120 m : Chattien subalpin ; 120-1230 m : OMM + Aquitanien ; 1230-2857 m : Chattien + UMM ; 2857- ? m : Crétacé inf. ; ?-3617 m : Malm ; 3617-3785 m : Dogger ; 3785-3986 m : Lias ; 3986-4022 : Trias. Log. approximatif, voir les Rapports internes de Elf-Aquitaine, non publiés.

3. Autres sondages profonds

19 - Morand/Montricher - p.t.=400 m - 520'025/162'180 - Commune de Morges - 1968 (?) - diagraphie (?) - t°= ?

0-env. 37 m : Quaternaire ; env. 37-117 m : Urgonien ; 117-215 m : Hauterivien ; 215-327 m : Valanginien ; 327-400 m : Purbeckien-Portlandien.

Mornod (1969) : Rapport non publié ; Burger & Gohran (1986) : Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 6.

20 - Thermal-1 ou F4 - p.t.=598 m - 539'670/180'290 - Centre thermal Yverdon - 1980 - diagraphie - t°=29°.

0-35 m : Quaternaire ; 35-250 m : Crétacé inf. ; 250-598 m : Malm.

Burger & Gorhan (1986) : Bull. Centre Hydrogéol. Neuchâtel, 6 ; Muralt et al. (1997) : Eclogae geol. Helv., 90/2.

21 - Thermal-2 ou F5 - p.t.=1479 m – 539'683/180'220 - Centre thermal Yverdon - 1998 - diagraphie - t°=59°

0-17 m : Quaternaire ; 17-188 m : Crétacé inf. ; 188-734 m : Malm (Portlandien-Argonien) ; 734 m : chevauchement ; 734-1'022 m : Malm (Séquanien) ; 1'022-1'247 : Bathonien ; 1'247-1'479 m : Bajocien.

Vuataz (1998) : Bull. Soc. suisse géothermie, nov ; Vuataz (1999) : Rapport final pour OFEN.

22 - Noréaz-1 - p.t.=571 m - 541'098/181'322 - Arkina S.A. - 1984 - diagraphie - t°= ?

0-12 m : Aquitanien ; 12-408 m : Chattien ; 408-413 m : Sidérolithique ; 413-571 m : Crétacé inf.

Jordi (1995) : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

23 - La Grève-1 - p.t.=666 m - 540'020/181'450 - Arkina S.A. - 1987 - diagraphie - t°=33° -

Log imprécis. 0-100 m : Quaternaire ; 100-300 m : Chattien ; 300-600 m : Crétacé inf. ; 600-666 m : Malm.

Schmassmann (1988) : Rapport non publié ; Jordi (1995) : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000.

24 - SMA/Payerne - p.t.=258 m - env. 562'200/184'900 - Office des Constructions fédérales - 1989 - diagraphie sommaire - t°=16,3°

0-258 m : Aquitanien.

Eugster (1993) : Diplôme inédit, Inst. f. Geophysik, ETH-Z ; INFO-ENERGIE (1992) : Wärmepumpen mit geothermischer Brunnenanlage heizen SMA-Payerne. Document B33/92-AFB.

25 - ON-9/Oillon - p.t.=.... m - - CEDRA S. A. - 1991 - diagraphie (?) - t°=.....

0-160 m (?) : Quaternaire ; 160-..... : Trias (gypse-anhydrite). Log incomplet à préciser : voir Zahner.

Zahner (1993) : Rapport Cedra, NIB-93-55.

26 - Henniez-50 - p.t.=486 m - 566'660/175'855 - 2000 - Sources minérales Henniez S.A. - pas de diagraphie - t°= ?

0-74 m : Quaternaire ; 74-486 m : Aquitanien.

Juillard (2001-2002) : Rapports inédits.

27 - « Pra Tsérère » - p.t.=250 m - env. 558'4/176'6 - 2001 - Sources minérales Henniez S.A. - diagraphie - t°=16,5° à 240 m -

0-env. 10 m : Quaternaire ; env. 10-250 m : Burdigalien peu épais, puis Aquitanien. Log très approx.

Juillard (2001-2002) : Rapports inédits.

28 - P600/Lavey-les-Bains - p.t.=517 m – forage incliné et dévié long 595 m - 1997 - Etat de Vaud - diagraphie - $t^\circ = 72^\circ$

0-43 m : Quaternaire ; 43-595 m : gneiss du Massif des Aiguilles Rouges

Bianchetti & Vuataz (1997) : Bull. Soc. suisse géothermie ; Bianchetti (1998) : Bull. Soc. suisse géothermie ; Bianchetti (2002) : Rapport final pour OFEN.

29 - Mines de Bex - p.t.=200 à 820 m - env. 570/126 - Salines de Bex S.A. - nombreux forages verticaux ou inclinés forés depuis la cote 620 environ - pas de diagraphies - $t^\circ = ?$

Quasiment tous les forages restent dans la formation salifère, à savoir le Trias de la nappe de Bex-Launhorn (anhydrite surtout).

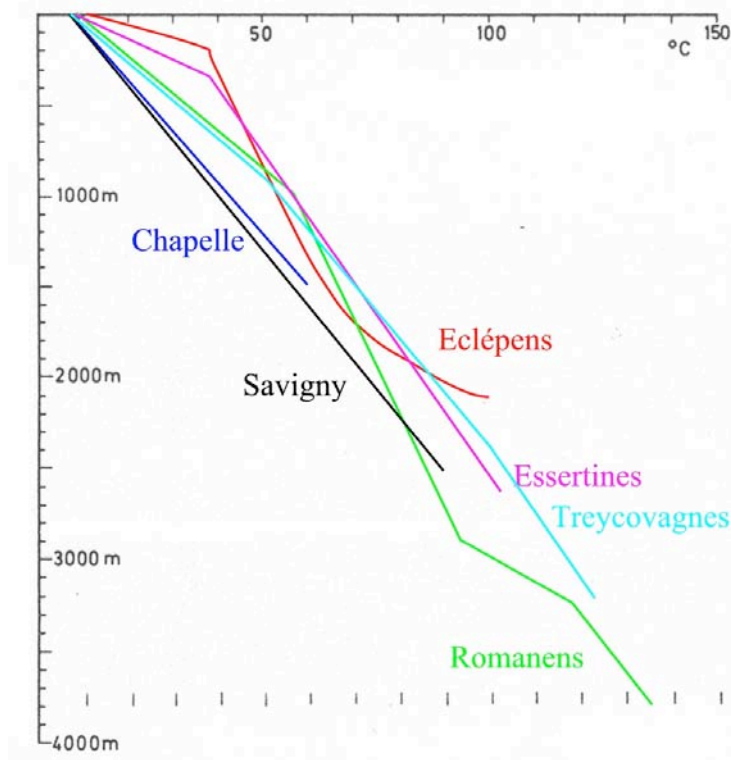
Badoux puis Weidmann (1960 à 2002) : Rapports inédits.

30 – E2/Epinassey - p.t.=216 m - env. 566'500/116'110 - 1992 – CREALP (VS) - diagraphie - $t^\circ = 22^\circ$

0-120 m : Quaternaire ; 120-216 m : gneiss du Massif des Aiguilles Rouges.

CRSFA (1992), rapport inédit ; Vuataz et al. (1993) : Bull. N° 12 du CHYN.

Marc Weidmann. géologue, Dr ès Sc. - Jongny, le 15 novembre 2002



Profils de température dans les forages profonds situés sur territoire vaudois et régions limitrophes (compilation d'après Vollmayr 1983).

	N°	Appellation	Cote (m.s.m.)	Coordonnées suisses	Année de réalisation	Profond. atteinte	Températures à			Gradient (°C/km)	Remarques
							500 m	1'000 m	2'000 m		
Forages pétroliers sur territoire vaudois	1	Chavornay-1	~450	~533'830 ~172'040	1912	246 m					
	2	Chavornay-2	~440	~532'680 ~172'960	1912	203 m					
	3	Concise-1	~440	~546'340 ~189'900	1926	240 m					
	4	Pré Bertrand/Annex	~450	~530'780 ~171'490	1929	302 m					
	5	Cuarny-1	562	543'440 180'360	1936-1939	2'229 m		45°C	79°C	34	
	6	Servion-1	765	549'010 157'900	1938-1939	1'433 m					
	7	Chapelle-1	764	547'305 168'359	1958	1'531 m	31°C	47°C	78°C	34	
	8	Savigny-1	839	546'227 155'312	1960	2'486 m	26°C	42°C	69°C	29	Env. 85°C au fond
	9	Risoux-1	1'350	500'310 161'020	1960	1'958 m					
	10	Essertines-1	660	539'775 173'490	1962-1963	2'936 m	39°C	57°C	94°C	40	Env. 100°C au fond
	11	Treycovagnes-1	473	536'100 180'260	1978	3'221 m	32°C	52°C	84°C	35	Env. 120°C au fond
	12	Eclepens-1	~540	533'220 168'370	1981	2'150 m	42°C	52°C	88°C	>35	Env. 100°C au fond
	13	Chessel-1001	~380	557'420 133'510	1987	600 m					
Forages pétroliers sur territoire limitrophe	14	Messery-1	524	502'200 133'600	1958	738 m					Cristallin au fond du trou
	15	Mont de Boisy-1		908'360 152'670	1959	1'954 m					Coordonnées Lambert
	16	Courtion-1	599	572'415 189'420	1960	3'084 m	26°C	41°C	68°C	28	
	17	Sorens-1	~1'010	568'470 169'180	1961	3'165 m					Log très approximatif
	18	Romanens-1	945	564'200 167'400	1977	4'022 m	29°C	45°C	77°C	33	
Autres forages sur territoire vaudois	19	Morand/Montricher	~670	520'025 162'180	1968 (?)	400 m					Débit pompage : 85 l/mn Rabatt. 11 m, °T = 16°C
	20	Yverdon -F4	435	539'698 180'299	1980	598 m	29°C				
	21	Yverdon -F5	435	539'683 180'220	1997-98	1'479 m	37°C	43°C			59°C au fond du trou
	22	Noréaz-1	~480	541'098 181'322	1984	571 m					
	23	La Grève-1	~430	540'020 181'450	1987	666 m					Env. 33°C au fond
	24	SMA/Payerne	~500	~562'200 ~184'900	1989	258 m					Env. 16°C au fond
	25	ON-9/Ollon			1991	306 m					Forage CEDRA
	26	Henniez-50	~650	566'660 175'855	2000	486 m					Forage Henniez SA
	27	Pra-Tsérère	~570	~558'400 ~176'600	2001	250 m					Env. 17°C au fond
	28	P600/Lavey-les-Bains	432	568'080 116'482	1997	517 m	69°C				72°C à 375 m
	29	Mines de Bex		~570'000 ~126'000	1960-2002	< 820 m					Divers forages
	30	E2/Epinassey	~450	566'500 116'110	1992	216 m					22°C au fond du trou

Liste des forages profonds réalisés dans le canton de Vaud et régions limitrophes avec indications sur l'emplacement, la profondeur atteinte et les températures mesurées à différentes profondeurs.

5) Cuarny Vingerhoets, 1940 T.D. = 2229m

elevation		x	y
562m		543'540m	180'380m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Tertiary	0	562	480
Cretaceous	-480	82	240
Malm	-720	-158	1240
Dogger	-1960	-1398	269
T.D.	-2229	-1667	

Althaus & Rickenbach 1947

7) Chapelle SADH, 1958 T.D. = 1540m

elevation		x	y
764m		547'305m	168'359m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Tertiary	0	764	1506
Cretaceous	-1506	-742	25
T.D.	-1531	-767	

Lemcke 1959

8) Savigny SADH, 1960 T.D. = 2486m

elevation		x	y
839m		546'271m	155'312m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Tertiary	0	839	2331
Cretaceous	-2331	-1492	155
T.D.	-2486	-1647	

Lemcke 1963

9) Risoux PREPA, 1960 T.D. = 1958m

elevation		x	y
1350m		500'310m	161'020m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Upper Malm	0	1350	123
Argovian	-123	1227	205
Dogger	-328	1022	125
Argovian	-453	897	129
Dogger	-582	768	160
Aalenian	-742	608	15
Lias	-757	593	218
Lias	-975		259
Malm	-1234	116	265
Argovian	-1499	-149	417
Dogger	-1916	-566	42
T.D.	-1958	-608	

Winnock 1961

10) Essertines SADH, 1963 T.D. = 2936m

elevation		x	y
660m		539'775m	173'490m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Tertiary	0	660	337
Cretaceous	-337	323	194
Malm	-531	129	501
Argovian	-1032	-372	314
Dogger	-1346	-686	406
Aalenian	-1752	-1092	153
Liassic	-1905	-1245	397
Keuper	-2302	-1642	634
T.D.	-2936	-2276	

Büchi et al. 1965b

11) Treycovagnes Shell, 1978 T.D. = 3221m

elevation		x	y
473m		536'135m	180'273m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Cretaceous	0	473	177
Malm	-177	296	514
Argovian	-691	-218	203
Dogger	-894	-421	404
Aalenian	-1298	-825	66
Liassic	-1364	-891	308
Keuper	-1672	-1199	858
MK dolom.	-2530	-2057	30
MK evap.	-2560	-2087	121
Buntsandstein	-2681	-2208	62
Permian	-2743	-2270	478
T.D.	-3221	-2748	

Report deposited at the Musée géologique du Canton de Vaud in Lausanne; Schegg et al. 1997

16) Courtion exploration company BP, 1960 T.D. = 3083m

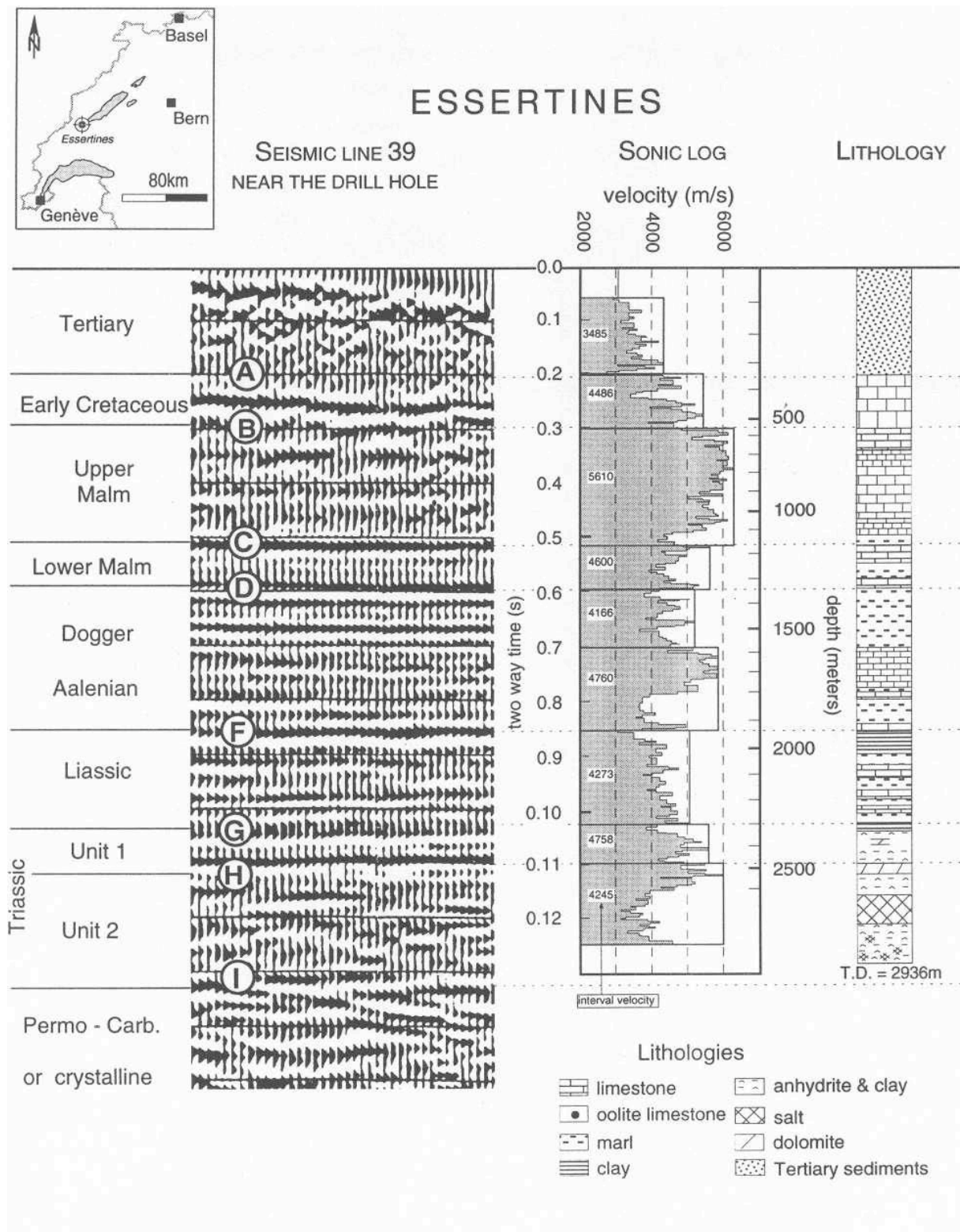
elevation		x	y
599m		572'415m	189'420m
top of ...			
Formation	depth	elevation	thickness
	m	m	m
Tertiary	0	599	1322
Cretaceous	-1322	-723	112
Malm	-1434	-835	388
Argovian	-1822	-1223	216
Dogger	-2038	-1439	400
Aalenian	-2438	-1839	152
Liassic	-2590	-1991	100
Keuper	-2690	-2091	180
MK dolom.	-2870	-2271	63
MK evap.	-2933	-2334	150
T.D.	-3083	-2484	

Fischer & Luterbacher 1963

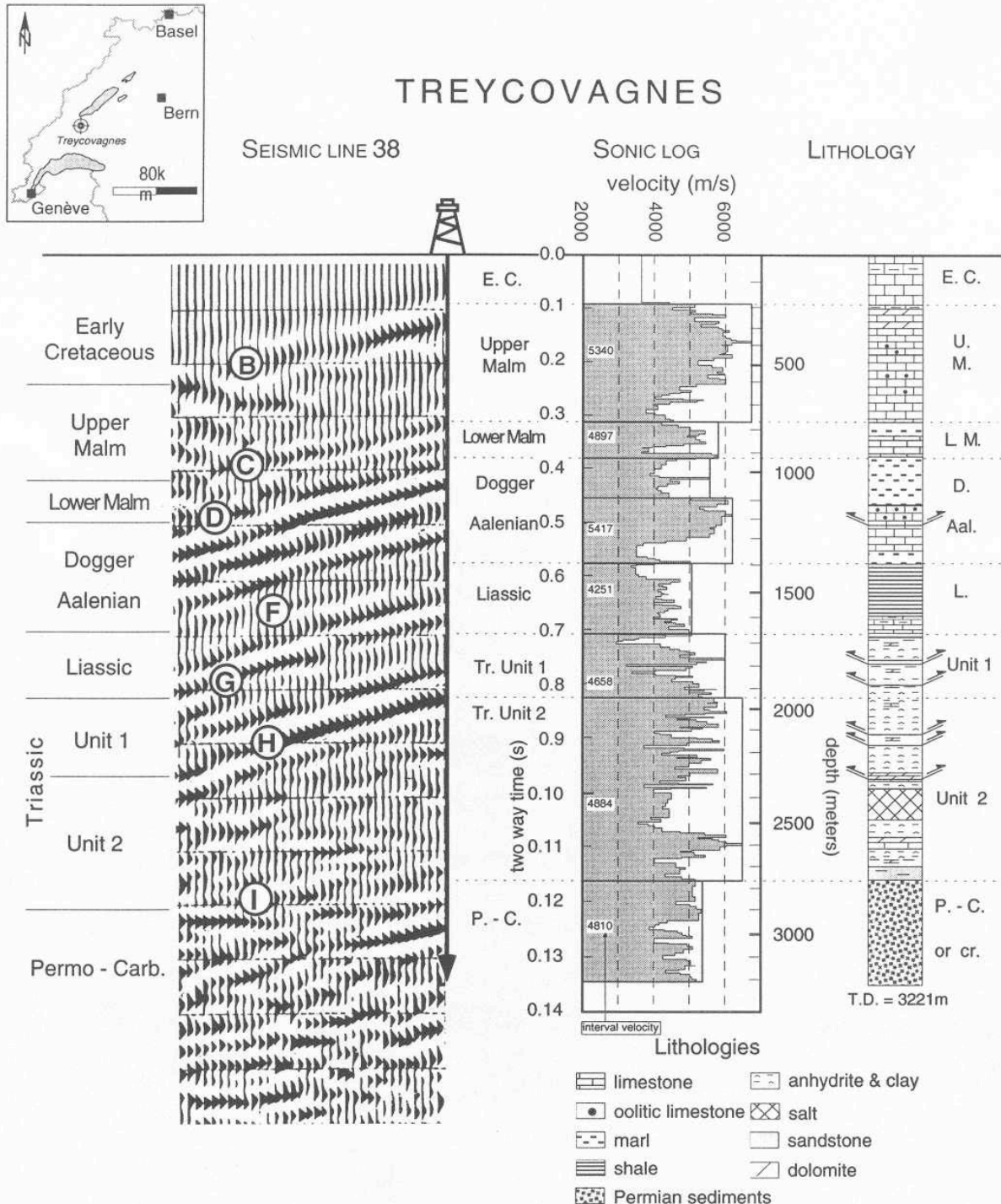
Lithologie de quelques forages profonds réalisés dans le canton de Vaud et régions limitrophes (Sommaruga 1997).

	N°	Appellation	Cote (m.s.m.)	Epaisseur Quaternaire +Tertiaire	Profondeur top Crétacé	Profondeur top Malm	Profondeur top Dogger
Forages pétroliers sur territoire vaudois	1	Chavornay-1	~450	195 m	195 m	-	-
	2	Chavornay-2	~440	175 m	175 m	-	-
	3	Concise-1	~440	220 m	220 m	-	-
	4	Pré Bertrand/Arnex	~450	~220 m	~220 m	-	-
	5	Cuarny-1	562	480 m	480 m	720 m	1'960 m
	6	Servion-1	765	>1'433 m	>1'433 m	-	-
	7	Chapelle-1	764	1'506 m	1'506 m	-	-
	8	Savigny-1	839	2'331 m	2'331 m	-	-
	9	Risoux-1	1'350	0	-	0 m	328 m
	10	Essertines-1	660	337 m	337 m	531 m	1'346 m
	11	Treycovagnes-1	473	0 m	0 m	177 m	894 m
	12	Eclepens-1	~540	~0 m	~0 m	~220 m	~1'190 m
Forages pétroliers sur territoire limitrophe	16	Courtion-1	599	1'322 m	1'322 m	1'434 m	2'038 m
	17	Sorens-1	~1'010	~3'100 m	~3'100 m	-	-
	18	Romanens-1	945	>2'857 m	>2'857 m	3'617 m	3'785 m
Autres forages sur territoire vaudois	19	Morand/Montricher	~670	37 m	37 m	375 m	-
	21	Yverdon -F5	435	18 m	18 m	178 m	940 m
	22	Noréaz-1	~480	413 m	413 m	-	-
	23	La Grève-1	~430	300 m	300 m	600 m	-
	24	SMA/Payerne	~500	>258 m	>258 m	-	-
	26	Henniez-50	~650	>486 m	>486 m	-	-
27	Pra-Tsérére	~570	>250 m	>250 m	-	-	

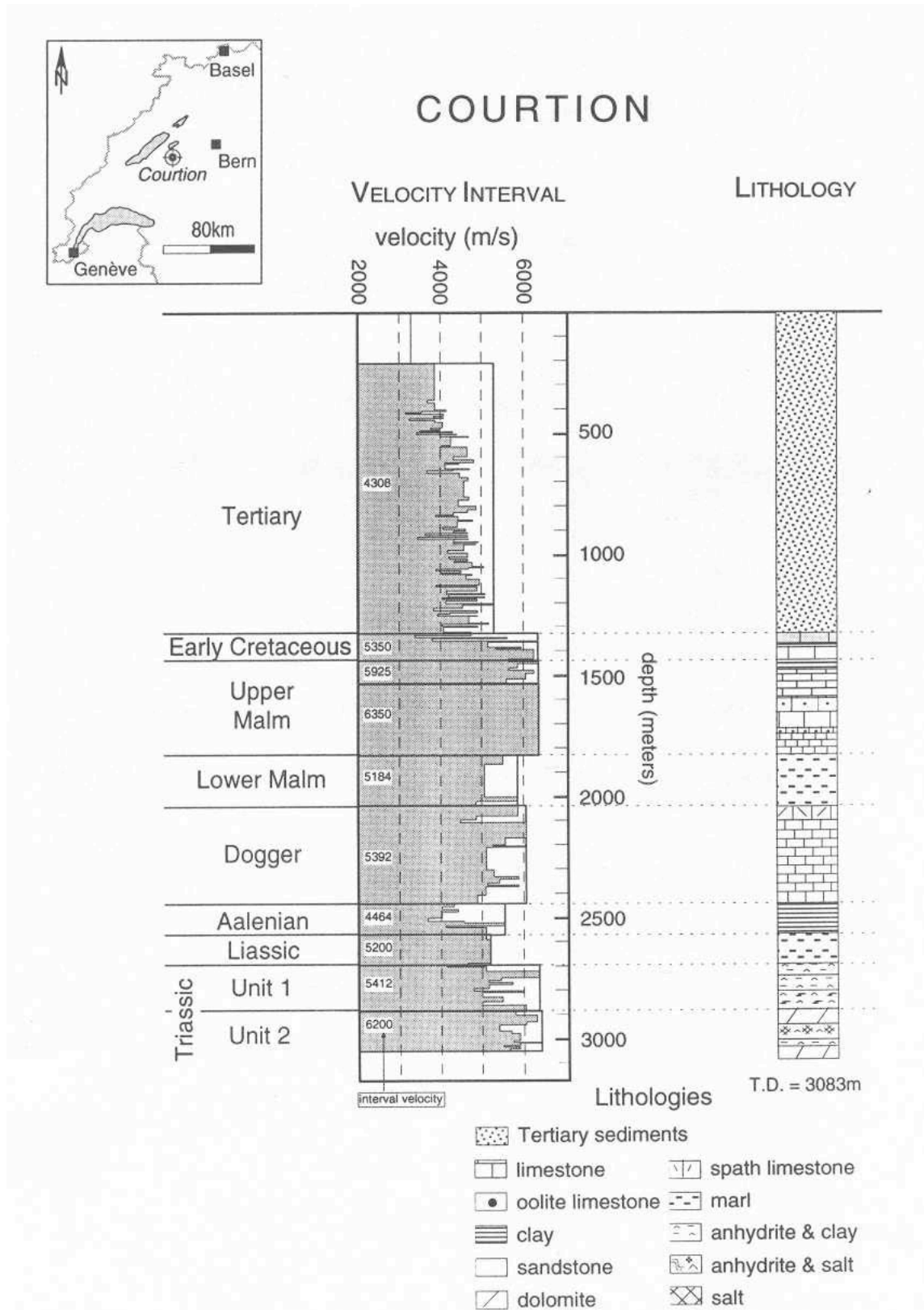
Lithologie sommaire des forages profonds réalisés dans le canton de Vaud et régions limitrophes (Sommaruga 1997, Vollmayr 1983, Weidmann, comm. pers.).



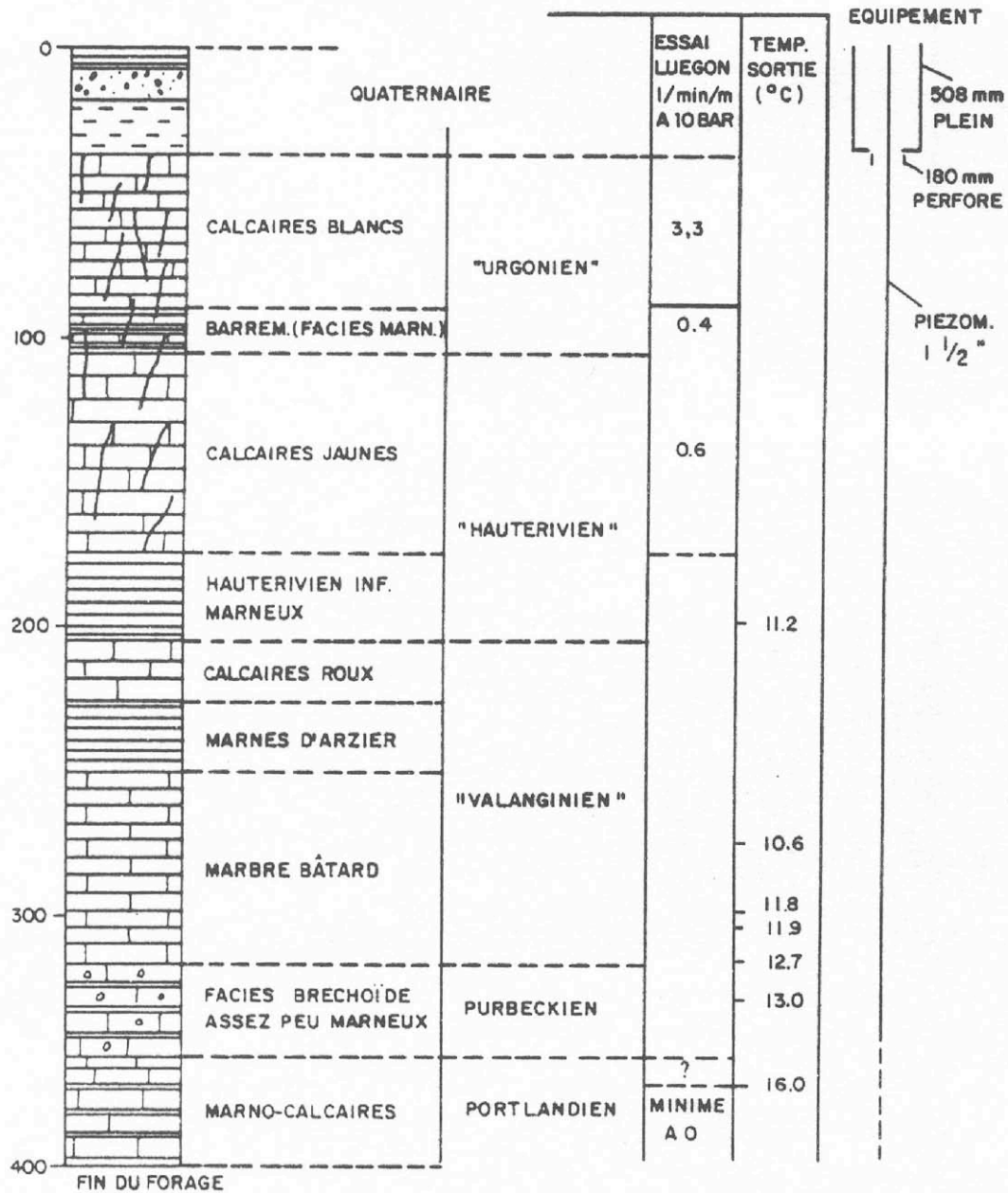
Corrélation entre le profil lithologique du forage d'Essertines, le log sonique et un profil sismique voisin (Sommaruga 1997).



Corrélation entre le profil lithologique du forage de Treycovagnes, le log sonique et un profil sismique voisin (Sommaruga 1997).

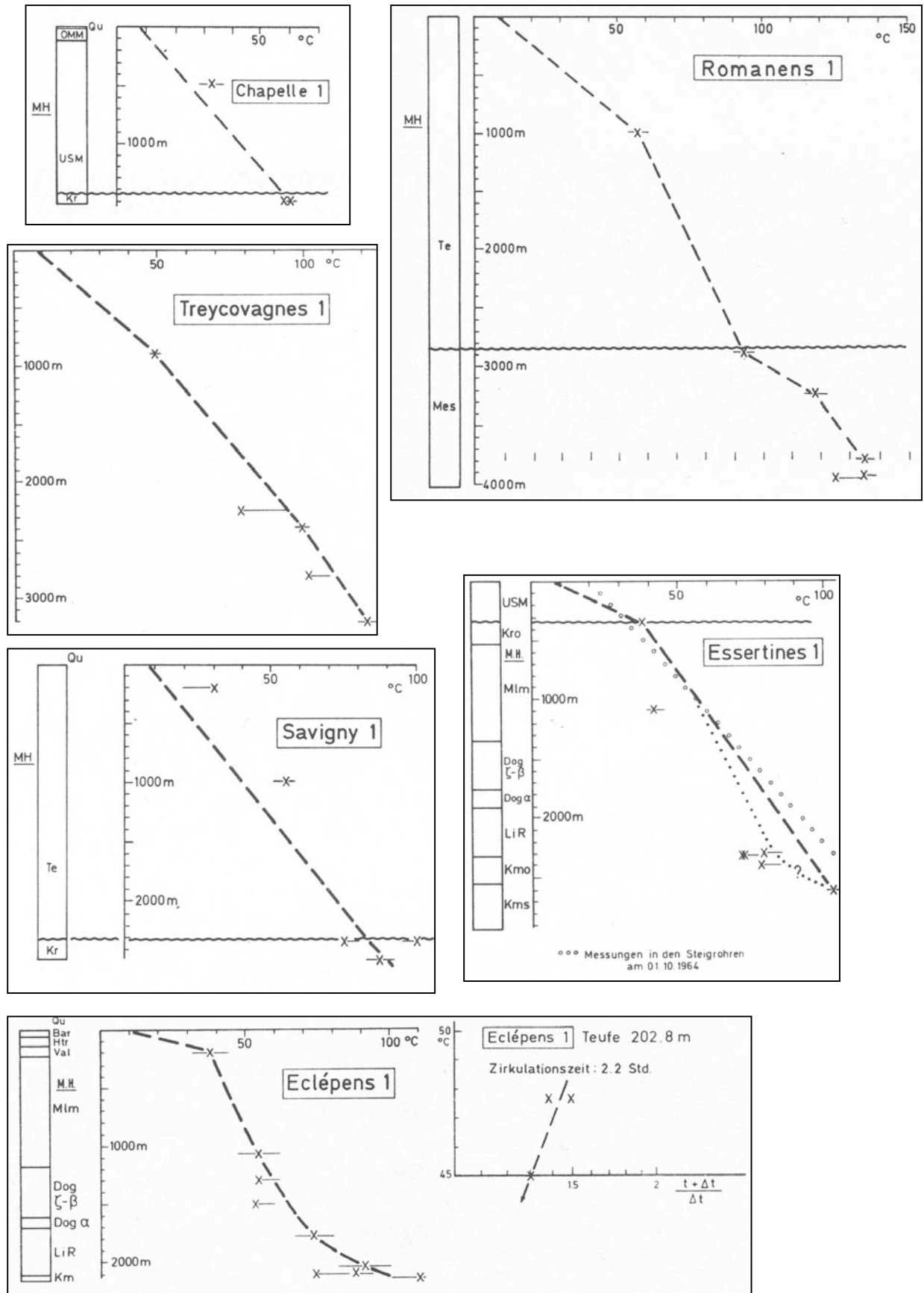


Corrélation entre le profil lithologique du forage de Courtion et le log sonique (Sommaruga 1997).

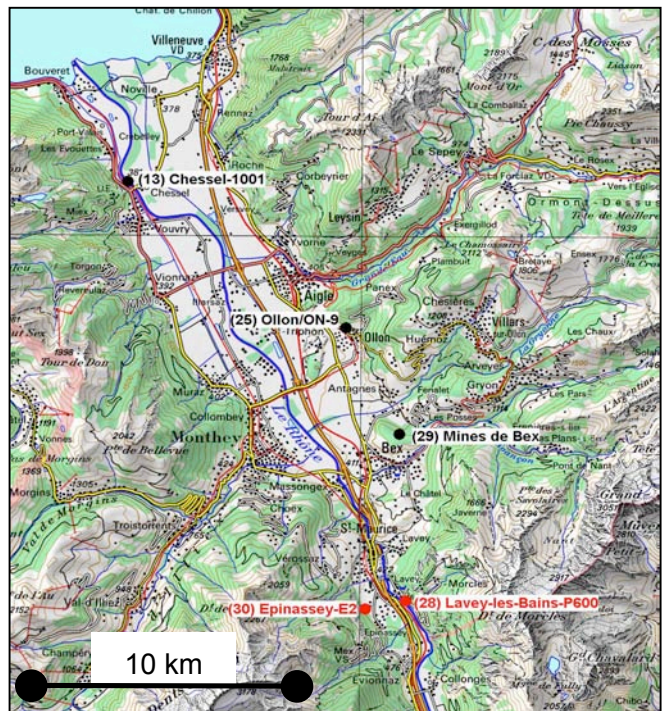
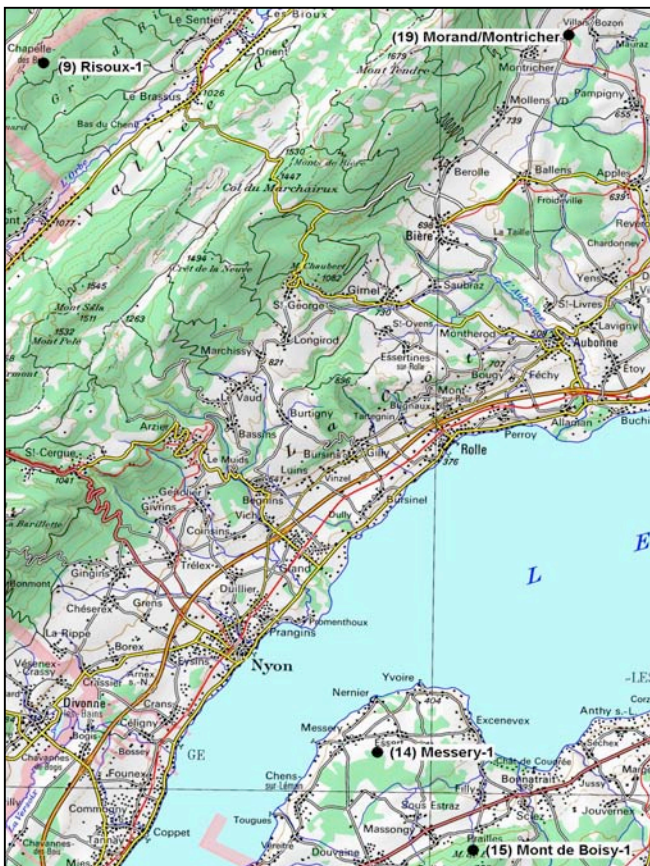
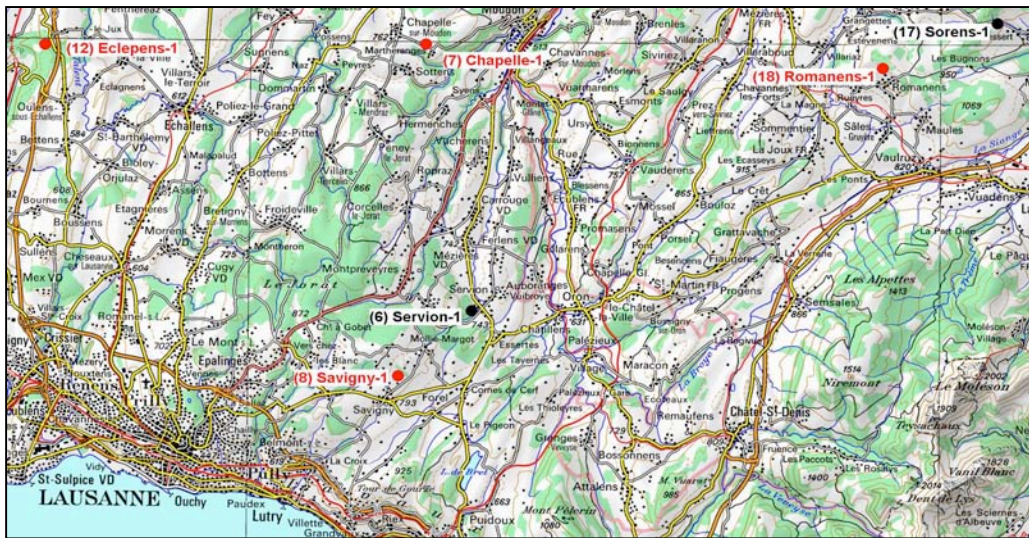


LEGENDE: ZONES PERMEABLES FISSUREES NON KARSTIFIEES
 DEBIT ARTESIEN: 10L/MIN.
 EAU FERRUGINEUSE A CARACTERE REDUIT, PRESENCE DE NITRITE D'AMMONIAQUE
 $K = 3.6 \cdot 10^{-7}$ M/SEC S = 0.1 A 0.01 ‰
 DEBIT MAX. POMPE: 85 L/MIN, RABATTEMENT = 11 M DANS LE TUBAGE 508 MM

Forage de Morand-Montricher : log lithostratigraphique, profil d'équipement et indications concernant la perméabilité des formations et les températures en profondeur (NEFF 1986).



Profils lithologiques simplifiés et profils thermiques dans quelques forages profonds du canton de Vaud et régions limitrophes (Vollmayr 1983).



Situation des forages profonds situés dans le canton de Vaud et régions limitrophes.

Annexe 3.4

Liste de définitions techniques

Gradient géothermique : variation de la température des roches en fonction de la profondeur. Dans des conditions normales, on observe sur le Plateau suisse un gradient moyen de 32°C par km d'approfondissement.

Aquifère : terrain perméable contenant une nappe d'eau souterraine (=formation aquifère).

Aquiclude : couche très peu perméable.

Nappe d'eau souterraine : ensemble des eaux comprises dans un aquifère.

Nappe captive (artésienne) / jaillissante : nappe d'eau souterraine limitée au-dessus par une couche imperméable (aquiclude), qui provoque une mise en pression. Au sens large, le niveau d'eau mesuré dans un forage monte plus haut que là où les premières venues d'eau ont été rencontrées lors de la perforation. Si le niveau d'eau dépasse le niveau topographique, on parle de nappe jaillissante. Avec un forage, on observe un écoulement naturel, sans besoin de pomper.

Niveau piézométrique : niveau supérieur de la colonne statique qui équilibre la pression hydrostatique. C'est le niveau d'eau mesuré dans un forage.

Eau thermale / subthermale : eau dont la température est supérieure à 20°C / comprise entre 12 et 20°C.

Forage : trou de petit diamètre creusé mécaniquement en profondeur destiné à la reconnaissance du sous-sol (sondage) ou à l'exploitation d'une nappe d'eau (puits).

Casings : tubages techniques mis en place et cimentés au fur et à mesure de la progression de la perforation. Ces tubes sont le plus souvent en acier noir et ne résistent pas à la corrosion des eaux thermales.

Puits : en général on parle de puits lorsque le forage a été revêtu (chemisage) par des tubages résistants à la corrosion, permettant d'installer une pompe immergée et d'exploiter les aquifères.

Chemisage (équipement) du forage : revêtement interne du forage avec des tubes pleins et des crépines, le plus souvent en acier INOX, permettant la tenue des parois du trou. Il est alors possible d'installer une pompe immergée et d'éviter l'effondrement du trou dans les zones aquifères durant les pompages.

Chambre de pompage : zone supérieure tubée d'un puits, permettant d'installer la pompe immergée.

Colonne de pompage : ensemble de tubes auquel est suspendue la pompe immergée et qui permet de remonter l'eau exploitée en surface.

Tubes pleins : tubes lisses, non perforés.

Crépines : partie du chemisage du puits qui est perforé (trous, fentes) pour permettre de capter les eaux souterraines. Cette partie drainante peut être laissée en trou nu si les parois du trou de forage montrent une bonne tenue (p.ex. calcaires massifs fissurés).

Doublet : mode d'exploitation qui comprend un ensemble de deux puits, dont l'un sert pour pomper l'eau thermale et l'autre permet de réinjecter le fluide refroidi dans l'aquifère profond après en avoir exploité l'énergie thermique.

Diagraphies : appelées aussi « logging », elles consistent en un enregistrement continu des valeurs d'un paramètre physique donné (p.ex. température et conductivité de l'eau) lorsqu'on descend une sonde de mesure dans un forage. Elles permettent d'obtenir des renseignements sur les lithologies (porosité, présence d'argiles, etc.) et sur la présence d'eau (fissuration, débits, caractéristiques physico-chimiques).

Conductivité électrique : ce paramètre, directement proportionnel au total des sels dissous dans l'eau (minéralisation) permet d'apprécier la facilité d'une eau à laisser passer un courant électrique. Ainsi, une eau de pluie aura une minéralisation très faible et sera peu conductrice.

Par contre, une eau profonde, en raison du temps de séjour et de la température dans l'aquifère, aura tendance à dissoudre des éléments chimiques (ions) en fonction du degré de solubilité des roches (du gypse est nettement plus soluble qu'un granite) et va acquérir une minéralisation élevée : sa conductivité sera donc aussi élevée. La conductivité se mesure de manière simple avec des appareils portables (conductivimètres) et s'exprime en $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microSiemens par centimètre). A titre indicatif, une conductivité de 1'400 $\mu\text{S}/\text{cm}$ indiquera une eau avec une minéralisation totale de l'ordre de 1 g/l.

Perméabilité : ce paramètre définit la facilité d'une roche, plus ou moins poreuse ou fissurée, à laisser transiter de l'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique. Elle est mesurée par le coefficient de perméabilité, qui a la dimension d'une vitesse et s'exprime en m/s. C'est le volume d'eau gravitaire en m^3 traversant en une unité de temps (seconde), sous l'effet d'une unité de gradient hydraulique, une unité de section en m^2 perpendiculaire à la direction de l'écoulement. Une perméabilité de 10^{-2} à 10^{-3} m/s indiquera un aquifère très perméable, alors que des valeurs inférieures à 10^{-9} m/s indiquent des formations pratiquement imperméables.

Pompe à chaleur (PAC) : une PAC transfère de l'énergie d'un niveau à basse température vers un niveau à température plus élevée. Ce transfert consomme de l'électricité, mais grâce à l'apport de la géothermie, l'énergie sortant de la PAC est supérieure à l'énergie électrique fournie au système.

4. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)

4. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)

4.1 Introduction

Plus de 99 % de la masse de la Terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 0.1 % de la masse de la Terre, c'est-à-dire les 3 kilomètres superficiels sont plus froids que 100° C. A la surface de la Terre, la chaleur rayonne avec un flux moyen de 0.065 Watt par m². (Ferrandes 1998). Pour la seule superficie de la Suisse, cela représente une puissance quasiment inutilisée de 3'000 Mégawatts. A ce flux de chaleur ne correspond pas uniquement un processus de refroidissement, mais aussi un flux de chaleur permanent, qui se maintient grâce à la décroissance radioactive naturelle des isotopes Potassium-40, Uranium et Thorium contenus dans les roches. Sur le Plateau suisse, les conditions thermiques rencontrées en profondeur sont considérées comme normales et la température augmente plus ou moins régulièrement de 32±2° C par kilomètre, même si localement, des variations horizontales et verticales significatives sont constatées (Figure 4.1.1).

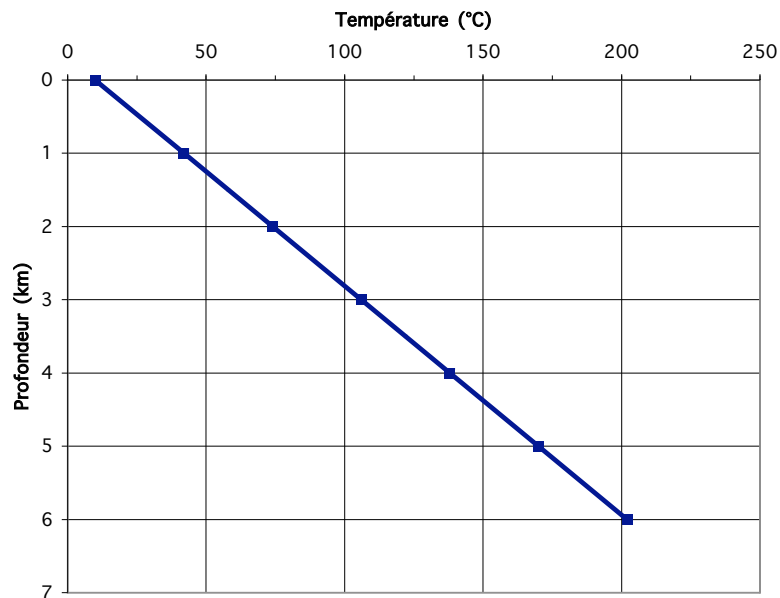


Figure 4.1.1 : Valeurs de température en profondeur obtenues avec un gradient géothermique moyen de 32° C/km.

4.2 Production d'électricité géothermique dans le monde

Historiquement, les premières expériences de conversion de la vapeur géothermale en électricité ont eu lieu plus ou moins simultanément en Italie et au Japon, au début du 20^e siècle. Le développement industriel moderne de la géothermie de haute énergie a réellement pris son envol dans les années 1960 simultanément aux USA et en Nouvelle-Zélande (Lemale & Jaudin 1998).

La production d'électricité à partir d'aquifères profonds situés dans des roches perméables très chaudes a pris une place importante dans l'approvisionnement énergétique de nombreuses régions du monde. L'utilisation rentable de ce type de géothermie s'est déjà imposée avec succès dans 21 pays possédant des conditions favorables, notamment aux Etats-Unis, aux Philippines, en Italie, au Mexique et en Indonésie, pour les principaux d'entre eux. La puissance

totale installée de toutes les centrales géothermiques électriques atteint actuellement quelques 8500 MWe. Pour certains pays en voie de développement, cette énergie indigène représente un pourcentage non négligeable (5 à 25 %) de leur production d'électricité, diminuant d'autant la charge financière liée à l'achat de combustible fossile (Figure 4.2.1). Ces installations géothermiques sont basées sur l'existence de réservoirs aquifères profonds (500 à 3000 m) et à haute température (150 à 350° C), dans des régions où les conditions géologiques sont particulièrement favorables.

Production d'électricité géothermique dans le monde en 2000 (MW électr.)

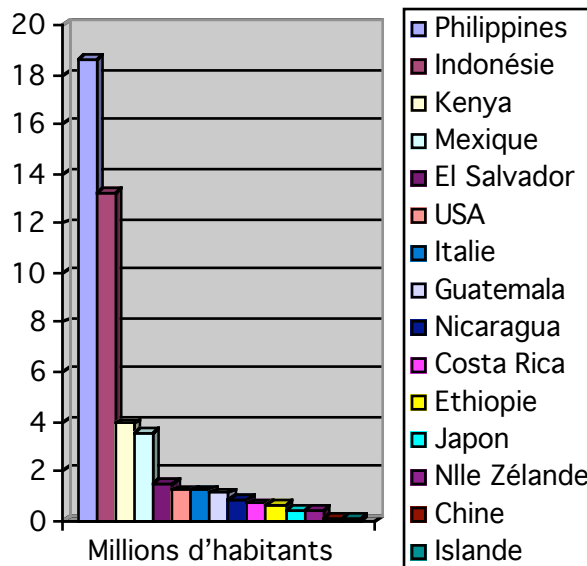
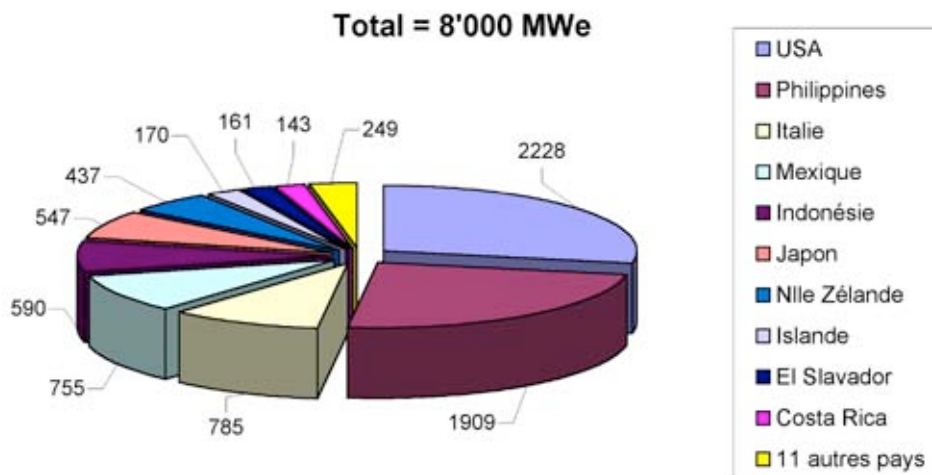


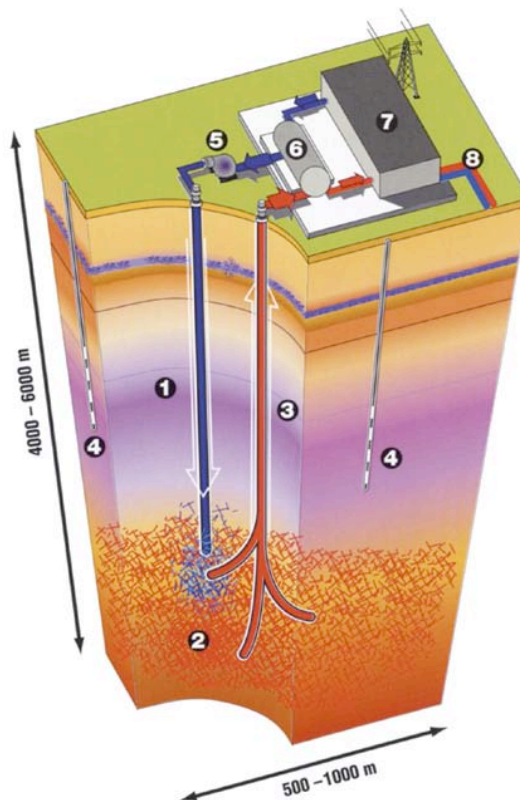
Figure 4.2.1 : Production d'électricité géothermique dans le monde et population alimentée par de l'électricité d'origine géothermique.

Dans de nombreuses régions du monde, on trouve des températures élevées en profondeur, mais les réservoirs rocheux ne sont souvent pas assez perméables pour obtenir des forages économiquement productifs. En Europe continentale, à l'exception de quelques régions

particulières comme la Toscane ou les îles de la Mer Egée, on ne rencontre que rarement des aquifères productifs à plus de 150° C et à moins de 3 km de profondeur.

Depuis les années 1970, plusieurs projets de recherche scientifique aux Etats-Unis, au Japon et en Europe ont tenté de mettre au point une technologie permettant de créer et d'exploiter des réservoirs artificiellement fissurés dans des massifs rocheux granitiques plus ou moins imperméables et chauds, à l'intérieur desquels on fait circuler un fluide après stimulation. Cette technologie a été appelée « Hot Dry Rock » (HDR), roches chaudes sèches en français.

Au fur et à mesure des expériences, le principe a beaucoup évolué et le terme générique de HDR a maintenant été remplacé par celui de « Enhanced Geothermal Systems » (EGS), Systèmes Géothermiques Stimulés en français (SGS), qui convient mieux à la réalité des systèmes géothermiques profonds. Pour différentes raisons, essentiellement liées au mode de financement à 100 % de fonds publics des divers projets SGS et à la politique énergétique, aucune centrale de production d'électricité basée sur cette technologie n'existe actuellement. Le programme le plus avancé est un projet européen dont le site se trouve à Soultz-sous-Forêts (Alsace, France). Il est prévu qu'une première centrale pilote soit construite et produise de l'électricité dès 2005. D'autres projets en Europe, en Australie et en Suisse sont en cours avec un démarrage de la production électrique d'ici 2010 (Figure 4.2.2).



① Forage d'injection	⑤ Pompe de circulation
② Réservoir rocheux fracturé	⑥ Echangeur de chaleur
③ Forage de production	⑦ Centrale électrique
④ Forage d'observation et de contrôle	⑧ Réseau de chauffage à distance

Figure 4.2.2 : Schéma conceptuel d'un système géothermique de type SGS.

4.3 Technique d'exploitation des roches chaudes profondes

4.3.1 Extraction de la chaleur du sous-sol

La quantité d'énergie contenue dans les roches en profondeur est énorme mais trop diffuse pour être directement extraite de manière économique. Il est donc nécessaire d'avoir à disposition un fluide caloporteur, généralement de l'eau, pour transporter la chaleur vers la surface.

Ce fluide peut être naturellement présent dans le sous-sol, si les roches sont perméables ; on exploite alors des aquifères profonds, qui sont moins fréquents et moins perméables que ceux que l'on trouve à proximité de la surface. Par contre, plusieurs forages très profonds effectués dans le socle cristallin ont mis en évidence la présence d'eau dans des fissures ouvertes jusqu'à 5 km de profondeur (Stober & Bucher 2000).

En l'absence de nappes d'eau souterraine, d'autres techniques existent, pour donner à un fluide la chaleur contenue dans les roches. De nombreuses techniques permettent d'exploiter la géothermie en fonction de la température de la ressource et du type d'utilisation de l'énergie (cf. chap. 2 : géostructures énergétiques). Pour extraire la chaleur contenue à grande profondeur dans les roches, c'est la technique de création d'un échangeur de chaleur en roche fissurée qui est utilisée (Abé et al. 1999).

4.3.2 Méthodes de géophysique et technologie de forage

Au niveau mondial, l'exploration des ressources pétrolières et géothermiques de ces 20 dernières années a conduit à des progrès très significatifs dans le domaine de la prospection géophysique et de la technique des forages profonds.

La représentation spatiale en trois dimensions des limites entre les différents horizons géologiques à l'aide des méthodes de la sismique-réflexion est maintenant une réalité. De même, l'exécution de forages inclinés ou même horizontaux dans des directions précises pour atteindre des réservoirs à grande profondeur est du domaine de la routine. Finalement, les coûts de forages profonds réalisés dans des roches cristallines dures et à haute température baissent régulièrement. Les outils de diagraphies géophysiques sont de plus en plus nombreux et performants, permettant notamment d'obtenir une imagerie des parois des puits forés, avec une représentation précise des roches et des fissures rencontrées.

Ainsi, les principaux outils pour la prospection des ressources géothermiques profondes sont aujourd'hui disponibles.

4.3.3 Création d'un réservoir fissuré profond

C'est la technique de la stimulation hydraulique qui a été développée pour créer des échangeurs de chaleur souterrains en milieu granitique fissuré. Sous l'effet de la pression d'injection dans un forage profond, l'eau froide élargit et connecte des fissures existantes dans le massif rocheux qui déclenche le processus de cisaillement. Celles-ci restent ouvertes et une circulation en continu peut alors être instaurée entre un puits d'injection et un puits de production. Cette stimulation peut être exécutée dans chaque forage atteignant le réservoir (Ferrandes 1998).

Des travaux de recherche ainsi que des expériences en laboratoire et en vraie grandeur sur le terrain se poursuivent pour optimiser la stimulation des fractures des systèmes rocheux, la création et le contrôle d'un réservoir fissuré. Des équipes de chercheurs mettent au point des outils et méthodes dans les domaines suivants : hydraulique, géophysique, hydrochimie, modélisation.

Dans un réservoir exploité, la résistance à l'écoulement de l'eau (impédance) dans les roches fissurées ne doit pas être excessive, pour éviter une pression d'injection par trop élevée ; mais

cette impédance ne doit pas non plus être trop faible, afin de conserver la meilleure capacité d'échange calorifique possible entre la roche et l'eau et éviter des pertes en fluide de circulation. Pour inclure ces paramètres propres à chaque site, la géothermie a repris et modifié des techniques très avancées de fracturation déjà développées par l'industrie pétrolière (contrôle de la pression et de l'ouverture de fissures dans les réservoirs de pétrole et de gaz).

4.3.4 Conversion de la chaleur géothermique en électricité

Basées sur la technologie des nombreuses centrales géothermiques à fluide binaire (Organic Rankine Cycle) existant dans le monde, les futures centrales de type EGS qui produiront électricité et chaleur seront très fiables et relativement simples. Le fluide géothermique diphasique sous pression (170 - 200° C) est produit par un ou plusieurs forages profonds : il est conduit dans un échangeur de chaleur (évaporateur) et donne son énergie calorifique à un deuxième fluide organique à bas point de vaporisation (par ex. isobutane ou isopentane). Ce dernier, sous forme de vapeur pressurisée, alimente une turbine, laquelle entraîne un générateur. A la sortie de la turbine, le fluide organique est refroidi dans un deuxième échangeur de chaleur (condensateur) qui transmet à son tour son pouvoir calorifique à un réseau de distribution de chaleur pour du chauffage à distance. Quant au fluide géothermique refroidi, il est intégralement réinjecté en profondeur par un autre forage (Figure 4.3.1 et 4.3.2).

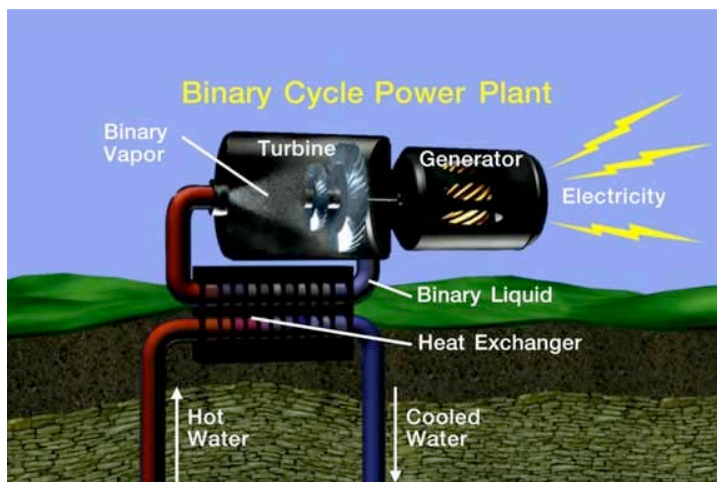


Figure 4.3.1 : Schéma de principe d'une centrale géothermique ORC à fluide binaire (Geothermal Education Office, USA).

Figure 4.3.2 : Centrale géothermique ORC : exemple de Puna (30 MWe), Hawaii, USA (Geothermal Education Office, USA).



4.4 Projets EGS dans le monde

4.4.1 Bref historique de la technologie des Roches Chaudes Fracturées

Depuis 30 ans, de nombreux projets ont tenté de mettre au point la technologie des Roches Chaudes Fracturées. Certains de ces programmes sont presque arrivés au stade de la réalisation industrielle de production d'électricité, mais la plupart ont été stoppés avant ce terme. En effet, le type de financement de ces projets est très lié aux aspects conjoncturels de la politique énergétique et du prix du baril de pétrole. C'est pourquoi les sources de financement public se sont taries avant que des investissements privés n'aient pris le relais. Par conséquent, aucune centrale géothermique n'a encore pu voir le jour. Actuellement, le projet le plus avancé et le plus certain d'aboutir à une centrale pilote est le projet européen de Soultz-sous-Forêts (Tableau 4.4.1)

Plusieurs termes ont servi pour dénommer ces projets, et on les trouve tous dans la littérature. Le plus ancien et le plus utilisé reste *Hot Dry Rock (HDR, Roches chaudes sèches)*, mais il ne représente en fait qu'un cas d'exception dans la nature, car les roches vraiment sèches et imperméables sont rares. A l'autre extrémité, on trouve des réservoirs géothermiques naturellement exploitables. Entre les deux, il y a l'ensemble du domaine des massifs rocheux fracturés et naturellement peu perméables sans stimulation hydraulique. D'autres termes tels que *Hot Wet Rock (HWR)*, *Hot Fractured Rock (HFR)* sont aussi utilisés. En Suisse, c'est la terminologie *Deep Heat Mining (DHM)* qui a été choisie, alors qu'aux USA et en Europe, on considère maintenant la terminologie *Enhanced Geothermal System (EGS)*. A Genève, le projet Deep Heat Mining a pris le nom de Géothermie de Grande Profondeur (GGP).

Dans ce rapport, pour faciliter la compréhension, le terme correspondant à EGS en français est utilisé, à savoir : Systèmes Géothermiques Stimulés ou SGS.

Tableau 4.4.1 : Liste des principaux projets SGS dans le Monde.

Projet	Pays réservoir	Profondeur réservoir (m)	Température d'activité (° C)	Période
Fenton Hill	USA	3500	327	1970-1994
Bad Urach	Allemagne	3300	143	1977-1990
Rosemanowes	Grande-Bretagne	2000	100	1977-1992
Hijiori	Japon	2200	250-270	1987-2002
Soultz-sous-Forêts	France	4500	200	1987 - en cours
Cooper Basin	Australie	4400	Estimé à 250	1996 - en cours
Bâle	Suisse	4500	Estimé à 200	1996 - en cours

4.4.2 Projet européen SGS de Soultz-sous-Forêts

Depuis 1987, des équipes scientifiques françaises, allemandes, italiennes mais aussi suisses, anglaises, suédoises et américaines travaillent à Soultz-sous-Forêts, 50 km au nord de Strasbourg (Alsace, France). Leurs résultats fournissent des perspectives attrayantes pour le développement de la technologie SGS.

Après une stimulation hydraulique massive, un premier réservoir à 3.6 km et 165° C a été créé puis mis en production en 1997, sur la base de deux puits forés verticalement dans le socle granitique du Fossé rhénan (Figure 4.4.1).

Un Groupement Européen d'Intérêt Economique (GEIE) dénommé Exploitation Minière de la Chaleur a été constitué en 1996 et regroupe des acteurs internationaux de l'énergie (EDF, Electricité de Strasbourg, Enel Green Power, Pfalzwerke et Shell International). Son objectif est maintenant de réaliser dans les plus brefs délais un pilote de production d'électricité basé sur un nouveau réservoir fissuré, plus profond et donc plus chaud.

L'exploitation de ce pilote scientifique débutera en 2004 avec l'installation temporaire d'une mini-centrale électrique de 1.5 MWe. Ensuite, une puissance de 6 MWe sera atteinte à l'horizon 2006 et ce pilote préfigurera les futurs prototypes industriels de production électrique basés sur la technologie SGS (Tableau 4.4.2).

Depuis plusieurs années, des études du potentiel géothermique des installations SGS sont réalisées au niveau européen et des atlas géothermiques ont été édités par la Commission des Communautés Européennes (Hurtig et al., 1992, Hurter & Haenel, 2002).

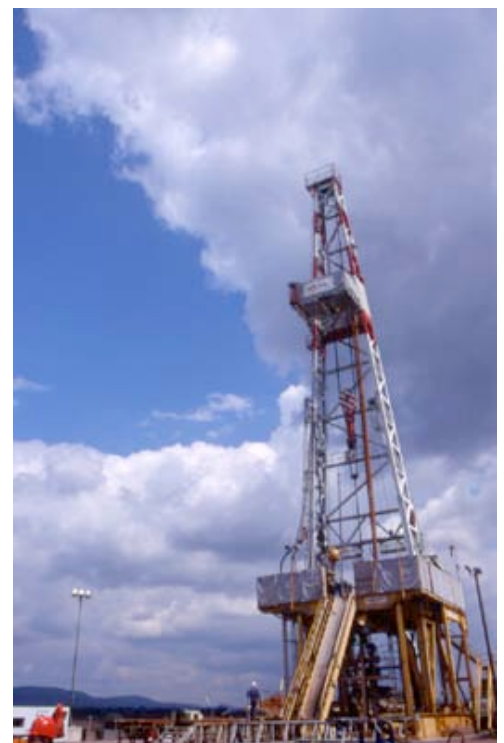


Figure 4.4.1 : Appareil de forage pour l'approfondissement du forage GPK2 à 5 km et vues du site du programme SGS à Soultz-sous-Forêts, Alsace.

Tableau 4.4.2 : Caractéristiques prévues pour la centrale pilote SGS à Soultz-sous-Forêts.

Puits d'injection	1 forage dévié, profondeur de 5 km
Puits de production	1 forage vertical (5 km) 1 forage dévié (5 km)
Ecartement à la base entre chaque puits	600 m
Température de production	180 - 190° C
Température de réinjection	40 - 70° C
Débit de fluide	80 - 100 kg/s
Centrale électrique	Centrale à fluide binaire (ORC)
Puissance électrique installée	5.0 - 6.5 MWe
Puissance électrique consommée par la centrale	1.0 - 1.5 MWe
Puissance nette disponible	4.0 - 5.0 MWe

4.5 Programme suisse Deep Heat Mining (DHM)

Après des études préliminaires scientifiques et techniques importantes, le projet Deep Heat Mining (DHM) a été initié au début de 1996 par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN). Dès le début du projet, le concept d'une centrale pilote pour la production conjointe d'électricité et de chaleur en Suisse a été élaboré, ceci sur la base des expériences réalisées sur des systèmes SGS à l'étranger depuis plus de 20 ans, et de la connaissance des conditions régionales. Les résultats de ces études préliminaires ont montré d'une manière séduisante la faisabilité et le potentiel économique de ce projet. Celui-ci a d'ailleurs déjà obtenu une considération certaine dans le milieu spécialisé international.

Le principe du « Deep Heat Mining », en français Exploitation de la Chaleur de grande Profondeur, reprend l'essentiel de la technologie SGS. Cela consiste à créer des connexions hydrauliques dans un massif de roches fissurées, afin de faire circuler de l'eau pour la réchauffer. Dans ce but, on injecte sous forte pression de l'eau froide dans un forage, à une profondeur où la roche atteint une température d'environ 200° C. En Suisse, cela correspond à des profondeurs de l'ordre de 5 à 6 km, selon les conditions géologiques et thermiques connues (Figure 4.5.1).

Une organisation a été créée dans le but de réaliser ce programme : l'Association Deep Heat Mining (ADHM) est formée par un groupe d'ingénieurs et de scientifiques provenant de bureaux privés et de hautes écoles, conseillée par des experts internationaux (Hopkirk 1999).

4.5.1 Projet DHM de Bâle

Pour un certain nombre de critères géothermiques, économiques et politiques, c'est la zone urbaine de Bâle qui a été assez rapidement choisie comme site pour l'installation d'une première centrale pilote géothermique fonctionnant sur la technologie SGS. En effet, l'accueil réservé par les autorités et par les Services industriels bâlois (IWB) à ce projet a été déterminant. D'autre part, il existe au centre ville des terrains attribués aux activités industrielles. Finalement, le réseau de chauffage existant permettrait d'absorber la chaleur sortant de la centrale géothermique, évitant ainsi l'utilisation de l'air ou de l'eau comme moyen de condensation du fluide de travail (Vuataz 1999).

Depuis la sélection du site de Bâle pour une première centrale DHM pilote, le canton de Bâle-Ville et les Services Industriels (IWB), ainsi qu'Elektra Baselland se sont fortement engagés dans ce projet, sur les plans financiers et logistiques.

La région de Bâle se trouve à l'extrémité sud du fossé rhénan et possède par conséquent des similitudes géologiques avec le site de Soultz-sous-Forêts. D'autre part le programme SGS européen est suivi avec une grande attention par l'ADHM et un transfert de technologie existe entre les projets de Soultz et de Bâle, notamment en raison de la participation active de scientifiques suisses aux investigations en Alsace (Vuataz & Häring 2001).

Un forage d'exploration de 2.7 km a été réalisé avec succès en 2001 dans le but de localiser et d'atteindre le granite du socle cristallin, d'en mesurer la température et d'équiper ensuite ce puits d'un système de surveillance micro-sismique (Figure 4.5.2).

Depuis 2002, le projet DHM de Bâle se trouve dans la phase finale de préparation du premier forage profond devant atteindre la zone cible à 5 km et 200° C où sera créé l'échangeur de chaleur. En principe, ce premier forage profond devrait débuter dans la deuxième moitié de 2003 sur le site de Kleinhüningen, un dock du port de Bâle. C'est sur ce site que seront réalisés les trois puits et la centrale géothermique de production d'électricité et de chaleur.

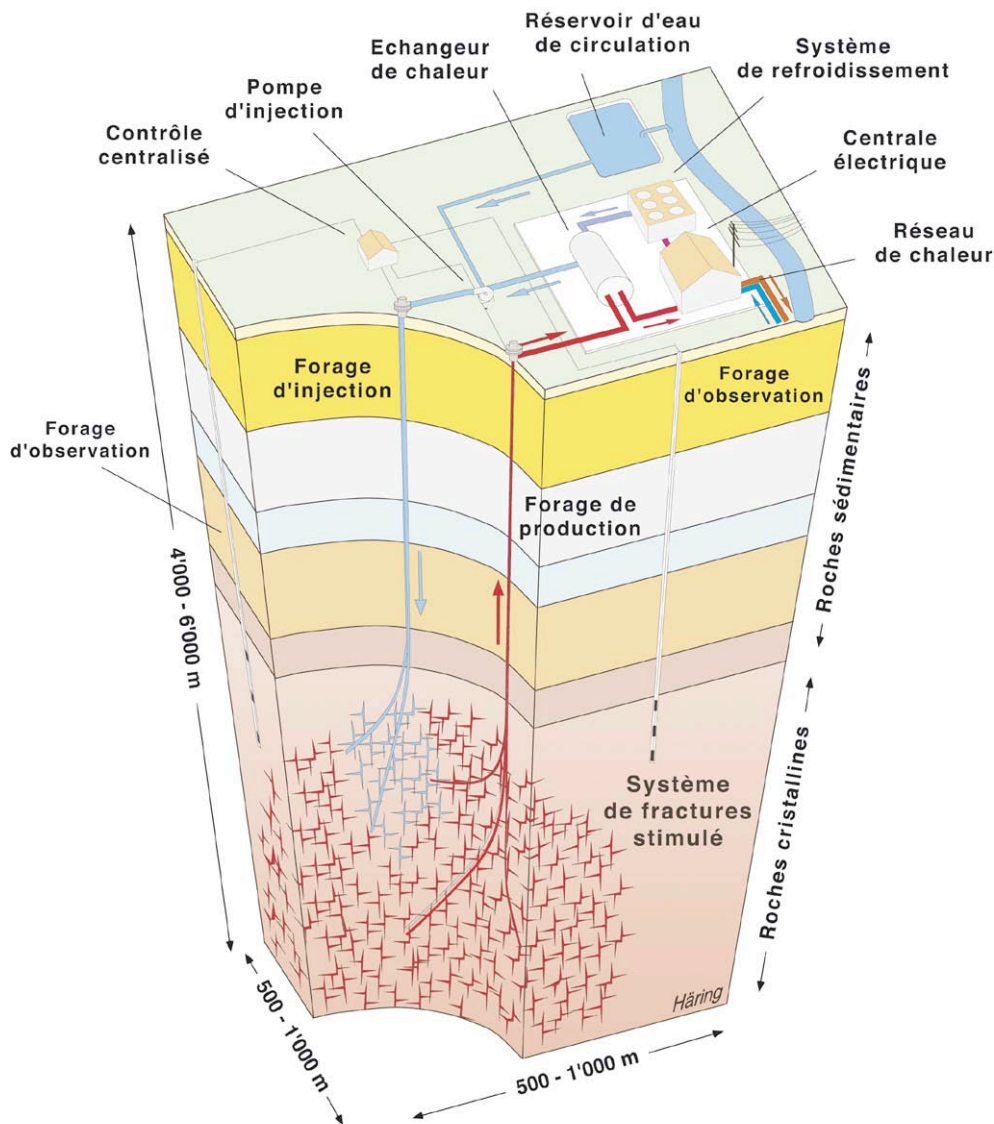


Figure 4.5.1 : Schéma du principe de fonctionnement du système Deep Heat Mining (M. Häring 2002).

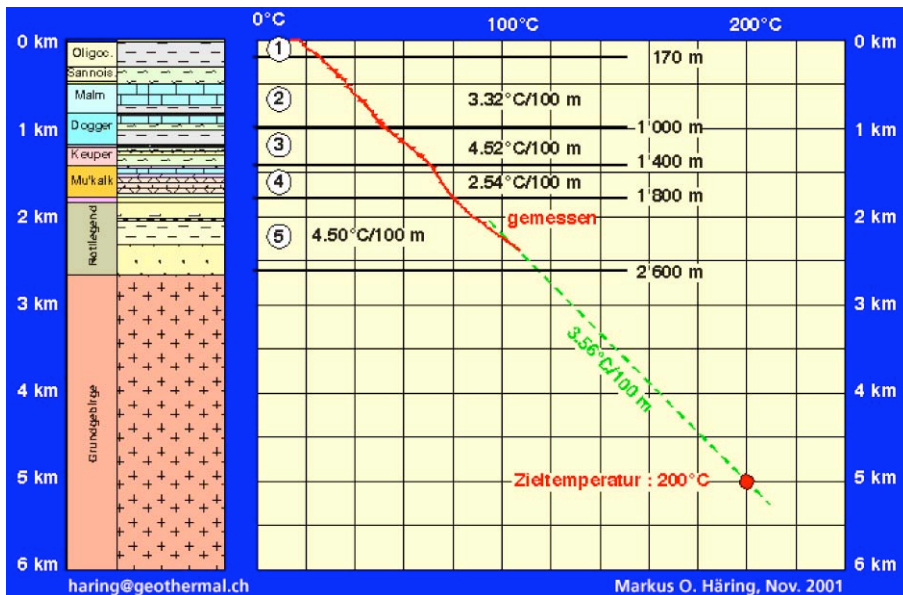


Figure 4.5.2 : Chantier du forage Otterbach-2 à Bâle et résultats des mesures de température dans le puits.

4.5.2 Réalisation de la centrale pilote DHM à Bâle

Le projet DHM prévoit donc la réalisation à Bâle d'une première centrale pilote pour la coproduction d'électricité et de chaleur. Dès 2003, un puits sera foré jusqu'à la profondeur d'environ 5 km dans le granite. Au moyen de plusieurs opérations d'injection d'eau, ce système fissuré naturel sera stimulé et agrandi. La connexion et l'agrandissement des fractures dans le réservoir rocheux engendrent des signaux acoustiques extrêmement ténus, qui seront enregistrés par un réseau de détecteurs très sensibles (géophones) placés dans deux forages d'observation moins profonds (Otterbach-2 et un forage qui reste à exécuter). A l'aide de programmes de calcul performants, les sources des signaux acoustiques peuvent être localisées dans l'espace et visualisées en 3-D par un modèle informatique.

Grâce à la connaissance résultant de ces expériences, un deuxième puits profond sera exécuté dans la zone de plus grande densité de fissures, afin de réaliser une circulation de fluide entre les forages. Pour la phase pilote, seuls un puits d'injection et deux puits de production sont prévus. La localisation des puits sera conçue de manière à pouvoir forer des puits supplémentaires à partir du même site, lors de la phase d'agrandissement progressif de la centrale. Pour la production d'électricité et l'utilisation de la chaleur, on aura recours à une technologie déjà éprouvée dans les centrales géothermiques de nombreux pays, à savoir les systèmes à fluide binaire ORC.

La centrale pilote projetée possèdera une puissance électrique nette de 3 MWe et une puissance thermique de 20 MWth. Cette capacité sera atteinte avec un débit de fluide d'environ 75 litres par seconde avec une température de 170 - 180° C en tête de puits.

4.5.3 Evaluation d'autres sites en Suisse

Le principe de base et également l'un des avantages majeurs de la technologie SGS est de pouvoir s'affranchir d'une grande partie des variations et des hétérogénéités tant horizontales que verticales de la géologie existant à faible profondeur. Par conséquent, il devient possible de reproduire ce mode d'exploitation de la chaleur souterraine là où elle est le plus adaptée aux besoins de la consommation. C'est pourquoi, dès le début du projet Deep Heat Mining, l'évaluation de plusieurs sites potentiels alternatifs ou supplémentaires à celui de Bâle a été engagée. Sur la base d'une série de critères variés, une dizaine de zones ont été sélectionnées sur l'ensemble du territoire suisse (Figure 4.5.3).

En raison de leur gradient géothermique plus élevé que la moyenne, certaines régions du nord de la Suisse sont intéressantes pour la réalisation d'un réservoir profond. D'autres zones proches de grandes villes ont l'avantage d'avoir un important potentiel de consommation de chaleur, voire l'existence d'un réseau de distribution de la chaleur.

Un autre avantage de la région entre Bâle et Zürich est lié à l'abondance des données géologiques en profondeur, ce qui n'exclut d'ailleurs pas d'autres régions de Suisse pour sélectionner des sites potentiels.

Au total, une dizaine de zones ont été considérées sur la base des données existantes du sous-sol et de la distribution potentielle de chaleur. Parmi les zones les plus favorables on trouve la basse vallée de l'Aar (Argovie) et la vallée de la Glatt/Glattbrugg (Zürich). D'autres sites en Suisse occidentale, tels que Genève ont également fait l'objet d'évaluations préliminaires dès 1997.

Les avantages de la technologie SGS pour la Suisse

- Couplage chaleur-force sans production de CO₂
- Source d'énergie autonome par rapport aux cycles journaliers et saisonniers
- Potentiel de la ressource presque inépuisable
- Installations asservies selon les besoins
- Transport des fluides géothermiques en surface réduit au strict minimum
- Incidence minimale sur l'environnement (air, eau, bruit, impact visuel)
- Faible encombrement des installations de surface
- Energie purement indigène
- Création d'un savoir-faire susceptible d'être exporté
- Impulsion novatrice pour la Suisse et création d'emplois qualifiés.

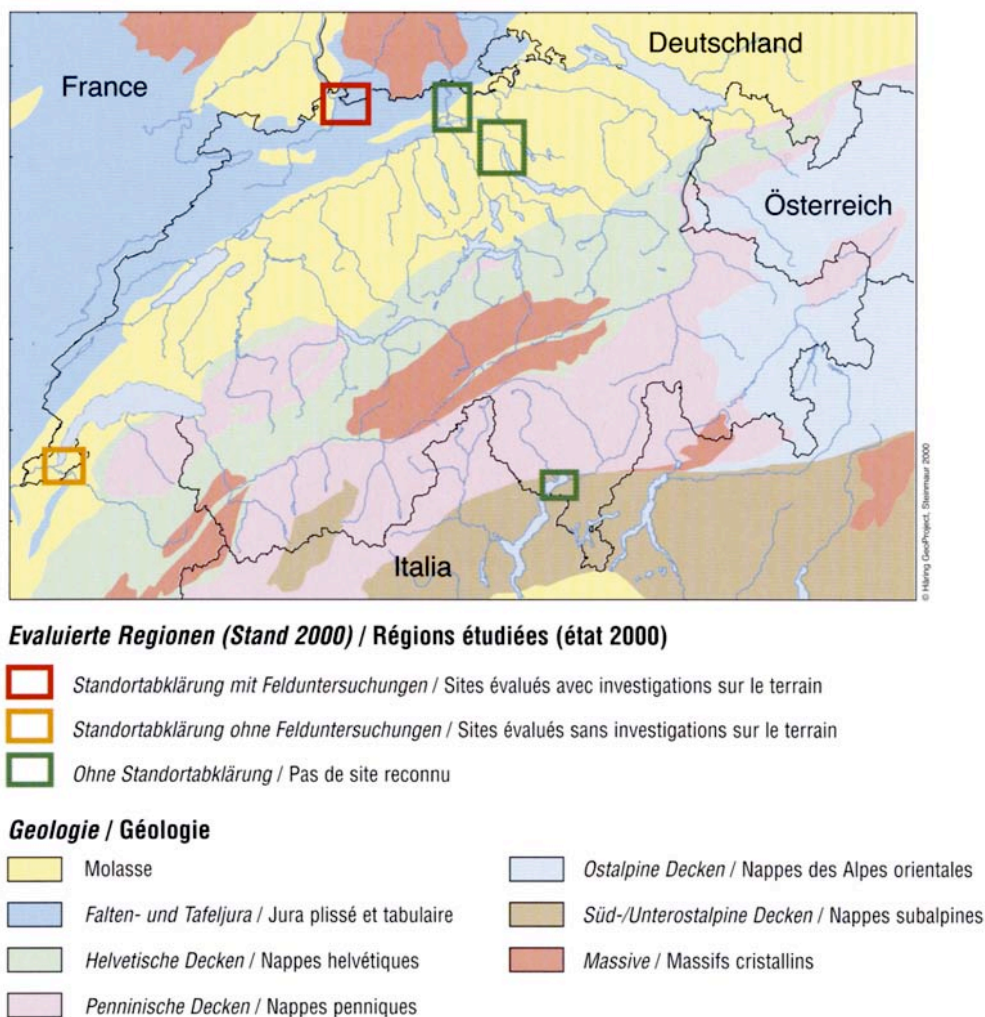


Figure 4.5.3 : Localisation de cinq régions favorables pour une opération Deep Heat Mining (ADHM 2000).

4.5.4 Projet Géothermie de Grande Profondeur Genève (GGP)

Dès 1998, l'ADHM a mené des investigations pour évaluer les possibilités d'implantation d'une centrale DHM dans la région genevoise, à l'initiative de l'Etat de Genève et en collaboration étroite avec le Service de l'énergie Le Plan directeur de l'énergie du canton de Genève (février 2000) a fixé comme objectif la réalisation d'une centrale GGP avec production d'électricité et de chaleur. Déjà deux phases ont été réalisées et des rapports établis sur des aspects de planification du projet, ainsi que sur les aspects environnementaux, énergétiques et géologiques. Dès 2002, les Services industriels genevois (SIG) ont rejoint le groupe et pilotent l'étape 3 menée entre 2002 et 2003, qui représente la dernière étape de la phase préliminaire, qui précède le premier forage d'exploration.

Un site pour l'implantation des forages de production et de la centrale SGS a été présélectionné, ainsi que plusieurs sites pour des forages d'exploration. Sur le plan de l'organisation, les investigations du projet GGP Genève suivent avec un décalage d'environ quatre ans les travaux du projet DHM de Bâle (SIG, SCANE & ADHM, 2003).

4.6 Evaluation des ressources géothermiques de haute énergie du canton de Vaud

4.6.1 Données à disposition

Il faut rappeler que l'un des intérêts majeurs de la technologie SGS et de la stimulation des réservoirs en milieu de roches cristallines fissurées est de s'affranchir de l'hétérogénéité des conditions géologiques, tectoniques et thermiques de la couverture des roches sédimentaires. En effet, dans le socle cristallin à 5 ou 6 km de profondeur, le type de roches, le domaine des températures et les circulations de fluide ne présentent de loin pas l'extraordinaire variété de ce que l'on peut rencontrer dans toutes les formations sédimentaires sises au-dessus. Donc, la sélection de sites et le positionnement précis de forages est beaucoup moins dépendant de la géologie au sens large du terme, comme c'est le cas pour la prospection et l'exploitation des aquifères profonds. Par conséquent, il sera possible d'accorder une importance primordiale aux critères d'occupation du territoire, de sensibilité environnementale et de proximité d'un réseau de distribution de la chaleur pour sélectionner des sites pour de futures installations SGS.

Au nord de Lausanne et à l'est des trois lacs jurassiens de Neuchâtel, Morat et Bienne, dans les cantons de Vaud, Fribourg et Berne, pas moins de 10 forages profonds ont été exécutés dans le cadre de la prospection pétrolière. Sauf pour le cas du forage de Hermrigen (Lyss, Berne), aucun n'a fait l'objet d'une investigation quelconque à des fins géothermiques, si l'on excepte des mesures souvent discontinues de température. D'autre part, aucun de ces 10 forages n'a atteint le socle cristallin *sensu stricto*.

Dans la phase préparatoire de ces forages pétroliers, des campagnes de géophysique profonde ont été réalisées, sous la forme de profils de sismique-réflexion, qui donnent des informations précieuses sur la structure des couches sédimentaires, mais qui ne montrent plus rien lorsque l'on arrive à proximité du socle cristallin. En effet, les roches du socle et les grès triasiques sis au-dessus donnent la même valeur de vitesse sismique et d'autre part, les besoins de la prospection des hydrocarbures se limitaient aux investigations indirectes et directes dans les seules roches sédimentaires.

Les données géologiques, thermiques et rarement hydrogéologiques qui ont pu être interprétées dans les forages profonds sont intéressantes pour la géothermie des niveaux sédimentaires. Elles donnent parfois quelques indications sur l'interface sédimentaire-cristallin et permettent quelques hypothèses sur la partie supérieure du socle cristallin (profondeur, composition, structure, température).

4.6.2 Conditions géologiques et hydrogéologiques

Des hypothèses et interprétations sur la géologie profonde peuvent être réalisées grâce aux informations données par les campagnes de sismique-réflexion et par les forages profonds, presque tous exécutés pour la prospection des hydrocarbures. Par conséquent, la densité d'information de ce type est très variable d'une région à l'autre, et pas forcément disponible dans les zones les plus intéressantes pour la géothermie.

De nombreux travaux sur la structure géologique du territoire vaudois et des régions avoisinantes ont été réalisés depuis le début du 20^e siècle, mais c'est surtout l'interprétation de la géophysique de surface, les diagraphies de forage et l'interprétation des coupes stratigraphiques des forages qui ont permis de mieux visualiser les couches les plus profondes et notamment d'appréhender le toit du socle cristallin. Il faut rappeler qu'aucun de ces forages n'a pénétré le socle cristallin *sensu stricto* et que la sismique-réflexion ne discerne pas bien la limite entre la base des dernières couches sédimentaires (Buntsandstein, Permien) et le sommet du vrai socle cristallin (granite).

De manière générale, on peut dire que le socle cristallin se trouve à plus faible profondeur au pied du Jura, puis s'enfonce progressivement de 1° à 3° en direction du Bassin molassique et

des Préalpes (Figure 4.6.1). Apparemment, les plis et les chevauchements se sont développés au-dessus d'une zone délimitée par les évaporites du Trias moyen et l'ensemble de la couverture sédimentaire a été décollé et s'est déplacé de plusieurs kilomètres vers le NW. Le socle cristallin, quant à lui, n'est pratiquement pas affecté dans sa profondeur et sa structure par tous ces plis, chevauchements et décrochements du Jura central et du Bassin molassique (Figure 4.6.2).

La carte du toit du socle donne l'information approximative de la profondeur à laquelle il faut forer pour atteindre un granite ou des roches similaires, si l'on veut créer un réservoir fissuré dans ce type de roches. On doit encore ajouter l'incertitude liée à la présence et l'épaisseur du Permo-carbonifère, ce qui peut représenter de 0 à 500 m supplémentaires. Dans le Tableau 4.6.1, la profondeur du socle cristallin a été estimée pour un certain nombre de zones urbaines du canton de Vaud. Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'obtenir une meilleure approximation du toit du socle. Pour l'ensemble de la région étudiée, il n'y a pas de preuve de l'existence d'un puissant graben permo-carbonifère qui augmenterait fortement l'épaisseur de la couverture sédimentaire, comme cela a été trouvé dans le Jura français et dans le NW de la Suisse.

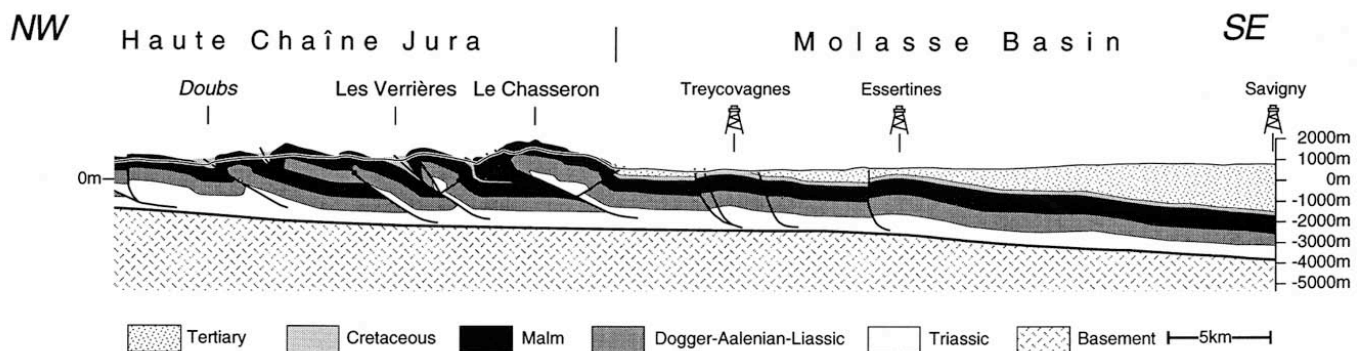


Figure 4.6.1 : Coupe géologique NW - SE du Doubs (Jura) à Savigny (Sommaruga 1997).

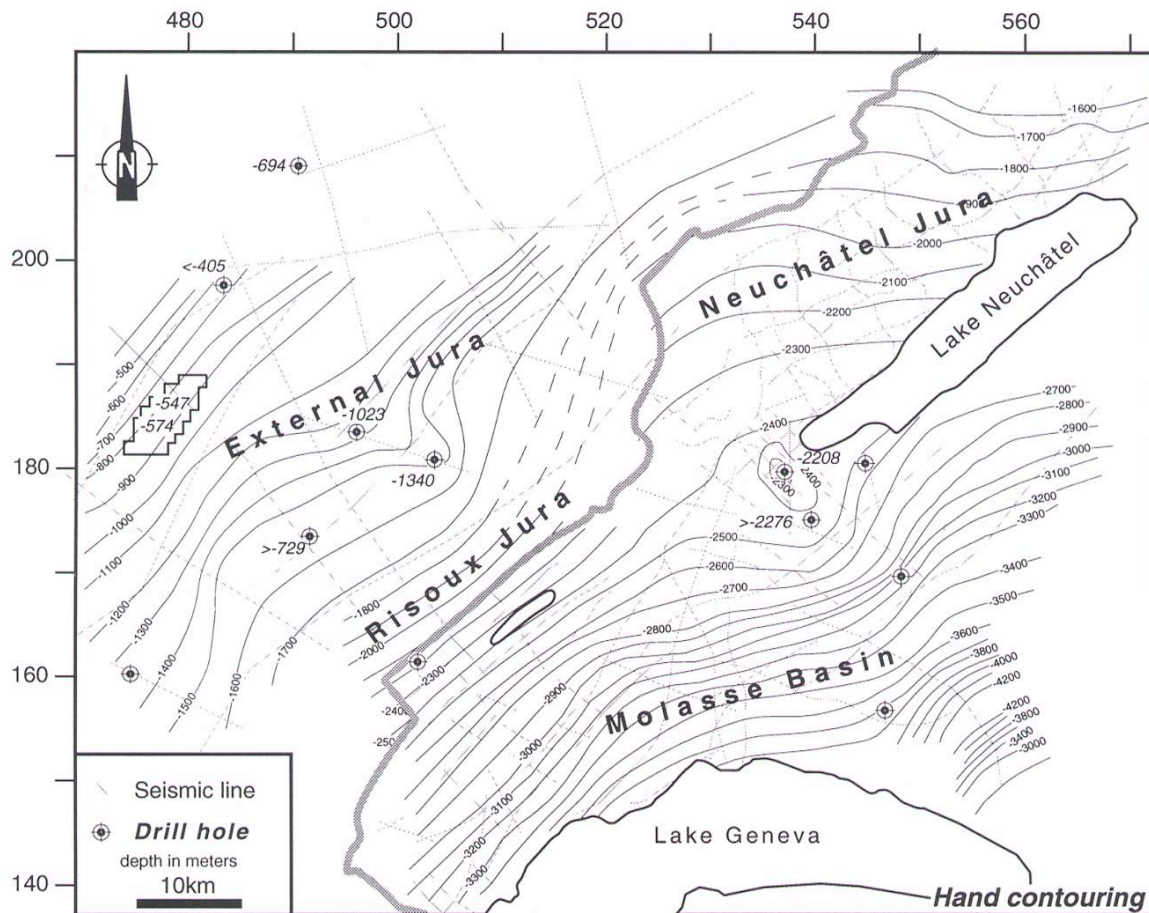


Figure 4.6.2 : Carte du toit du socle du Jura central et du Bassin molassique occidental (Sommaruga 1997). Les profondeurs sont exprimées en mètres par rapport au niveau de la mer. Le toit du socle est représenté soit par les couches du Buntsandstein ou du Permo-carbonifère, soit par le cristallin, sans pouvoir différencier ces formations au moyen de la géophysique.

Tableau 4.6.1 : Profondeurs estimées du toit du socle pour une sélection de zones urbaines du canton de Vaud (d'après la Figure 4.6.2).

Zones (altitude)	Altitude du toit du socle ¹ (m.s.m.)	Profondeur du toit du socle ¹ (m)
Nyon (405 m)	-3500 ± 100	3900 ± 100
Morges (380 m)	-3700 ± 100	4100 ± 100
Région Lausanne (447 m)	-3750 ± 100	4200 ± 100
Vevey (383 m)	-3900 ± 250	4300 ± 250
Montreux (396 m)	-3000 ± 500	3400 ± 500
Orbe (450 m)	-2450 ± 100	2900 ± 100
Yverdon-les-Bains (440 m)	-2400 ± 100	2800 ± 100
Moudon (513 m)	-3150 ± 100	3700 ± 100
Payerne (450 m)	-2950 ± 100	3400 ± 100

¹ Le socle considéré ici inclut le Buntsandstein, le Permo-carbonifère et le cristallin *sensu stricto*.

4.6.3 Conditions géothermiques

Les données de température acquises dans les forages profonds pétroliers ou géothermiques permettent de fixer les conditions thermiques pour l'ensemble des formations sédimentaires jusqu'au toit du socle cristallin. Si l'on ne considère que le territoire vaudois, seuls sept forages profonds permettent de reconnaître les valeurs de température du sous-sol, dont cinq d'entre eux se trouvent relativement proches d'Yverdon-les-Bains. Pour caler ces informations et comprendre ce qui se passe dans le sud et le nord du canton, les forages réalisés dans le Bassin genevois et ceux situés entre Savigny, Bulle et Morat ont été considérés (Tableau 4.6.2). Ces données thermiques sont relativement homogènes sur le plan régional, et l'on obtient un gradient géothermique moyen de 28° C/km pour le canton de Vaud au sens large, et quasiment identique de 29° C/km pour le Bassin genevois.

En calculant les régressions linéaires entre température et profondeur à partir de mesures réalisées dans différents forages, il est possible d'extrapoler la profondeur à laquelle la température de 200° C est atteinte. On obtient respectivement 5300 m pour la région comprise entre Savigny et Morat, et 5700 m pour la région genevoise (figure 4.6.3). Par contre il faut rappeler que les propriétés thermiques des roches sont assez différentes entre des calcaires, des grès ou du granite. D'autre part, la présence d'eau et de circulations très profondes peuvent apporter de la chaleur par convection et modifier ainsi le gradient géothermique local ou régional. Donc, des valeurs mesurées dans un forage unique peuvent montrer des différences assez importantes avec les conditions régionales. C'est par exemple le cas du forage pétrolier d'Eclépens, qui montre un gradient géothermique croissant avec la profondeur et une température de 110° C à seulement 2150 m.

Les flux de chaleur calculés et cartographiés sur l'ensemble de la Suisse montrent pour le canton de Vaud des valeurs entre 60 et 100 mW.m⁻². Les valeurs les plus basses du flux de chaleur se trouvent dans le sud du canton en direction du Bassin genevois, mais entre Genève et Lausanne, il n'y a pas de points de mesure pour le vérifier. Par contre, les valeurs les plus hautes se trouvent toutes dans la région d'Yverdon-les-Bains, qui compte également la plus grande concentration de forages profonds (Figure 4.6.4).

Tableau 4.6.2 : Données de températures et de flux de chaleur dans les forages profonds du Bassin genevois et de la région entre Savigny et Morat (Medici & Rybach 1995, Sommaruga 1997, CHYN 1999).

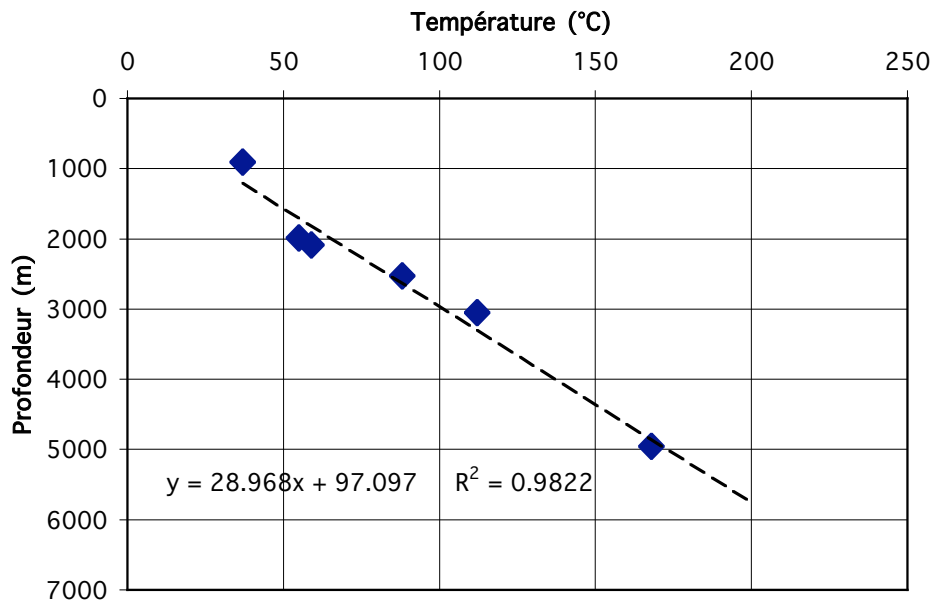
Région Forage	Type ¹	Pays Canton	Temp. ² (° C)	Prof. ³ (m)	Prof. totale (m)	Format. géol. en fond de puits	Flux de chaleur ⁴ (mW.m ⁻²)
Région Bassin genevois							
Humilly 1	P	France	37	905	905	Molasse chattienne	65
Humilly 2	P	France	112	3053	3053	Carbonifère	51
Salève	P	France	55	1985	1985	Urgonien	58
Musiège	P	France	59 ?	2083	2083	Bajocien	
Faucigny	P	France	168	4951	4951	Permo-carbonifère	82
Thônex	G	GE	88	2530	2530	Oxfordien	
Région Savigny – Morat							
Savigny 1	P	VD	88	2486	2486	Barrémien-Hauterivien	86
Chapelle 1	P	VD	61	1531	1531	Hauterivien	92
Eclépens 1	P	VD	110	2150	2150	Keuper	86
Essertines	P	VD	103	2600	2936	Keuper	105
Treycovagnes 1	P	VD	122	3220	3220	Permien	85
Yverdon F5	G	VD	59	1436	1440	Bajocien	-
Cuarny	P	VD	79	2000	2229	Malm	103
Bulle	G	FR	38	800	800	Molasse marine inf.	85
Romanens 1	P	FR	135	3900	4022	Keuper	86
Courtion 1	P	FR	68	2000	3084	Muschelkalk	69

¹ Type de forage : P = pétrolier ; G = géothermique.

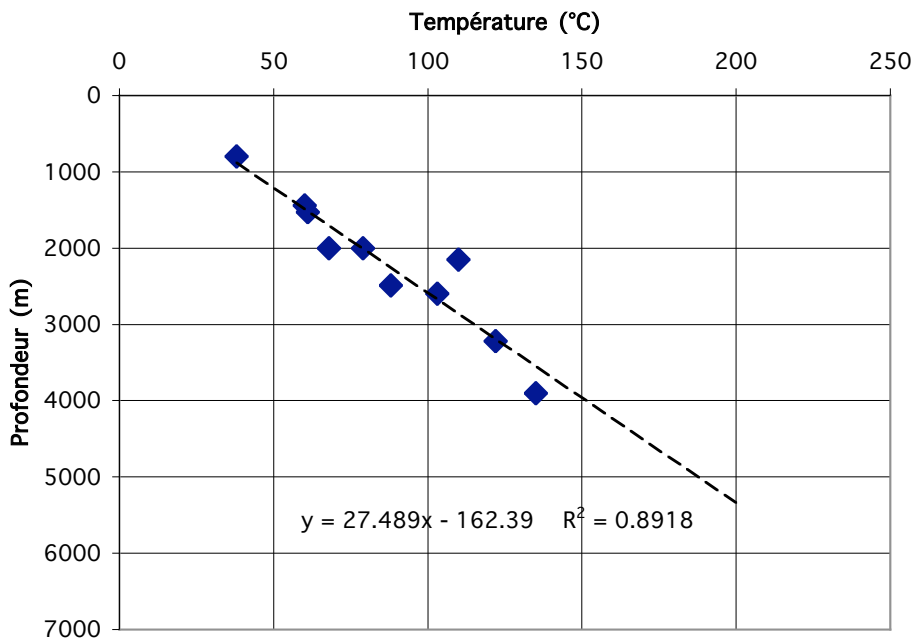
² Température : valeur de température mesurée ou interpolée pour la profondeur indiquée.

³ Profondeur : profondeur pour la température indiquée.

⁴ Flux de chaleur : valeur moyenne de flux, corrigée pour la topographie.



A



B

Figure 4.6.3 : Température dans les forages profonds du Bassin genevois (A), dans la région Savigny – Morat (B) et extrapolation de la profondeur pour 200° C.

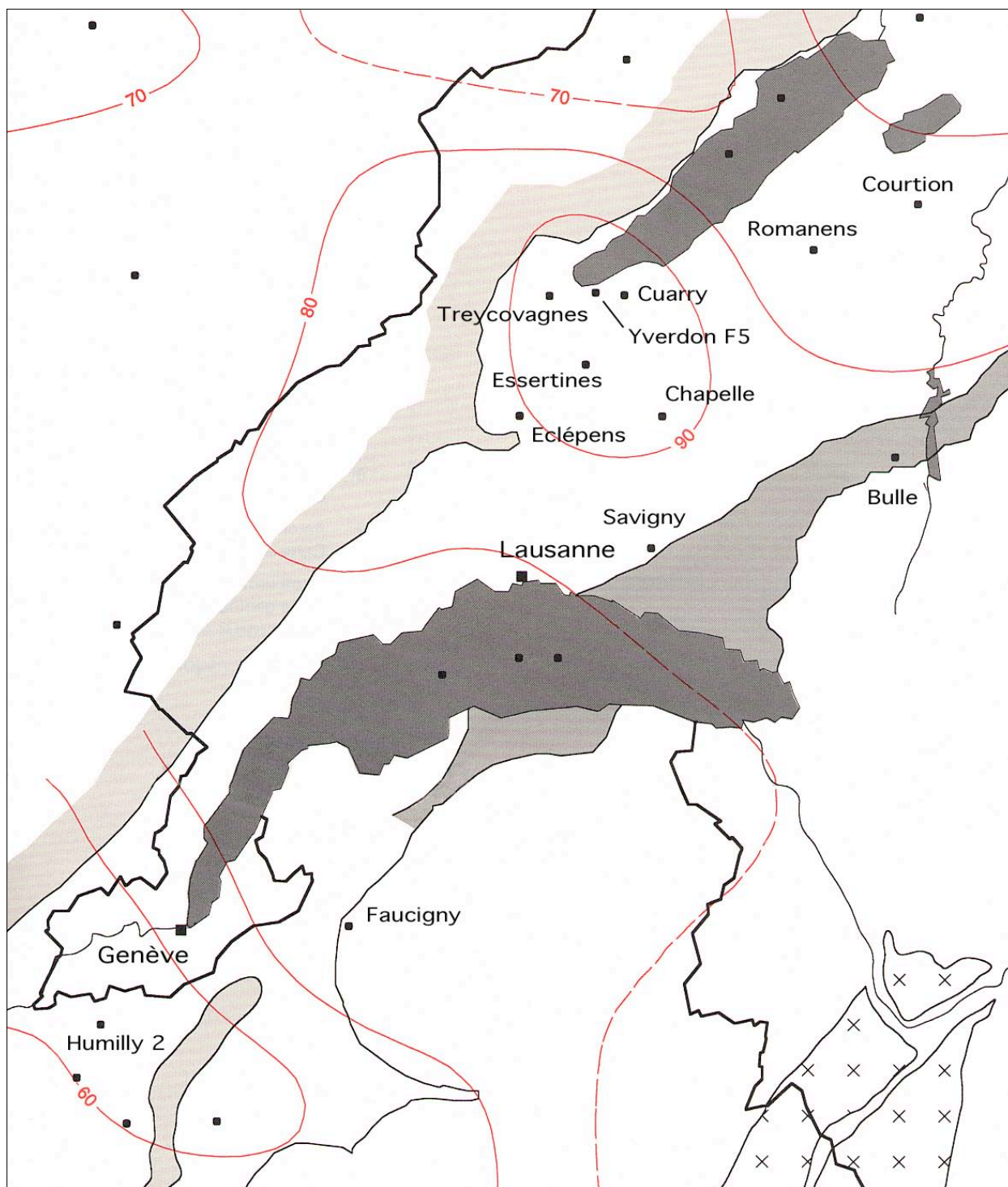


Figure 4.6.4 : Carte du flux de chaleur au pied du Jura entre le Bassin genevois et le lac de Morat (extrait de Medici & Rybach 1995).

4.7 Potentiel de projets SGS pour le canton de Vaud

4.7.1 Sites potentiels

Comme cela a été discuté précédemment, le socle cristallin n'a pas été affecté par les phases de chevauchements et de plis dans la région du Plateau entre Jura et Alpes. Si l'on considère que la température de 200° C peut être atteinte vers une profondeur moyenne de 5300 ± 400 m pour tous les sites potentiels, le socle cristallin aura été pénétré sur une épaisseur de 1000 à 2500 m, ce qui permettrait de créer des réservoirs de grand volume.

Les sites potentiels d'une future exploitation géothermique de type SGS doivent d'abord faire l'objet d'une évaluation sur l'utilisation de la chaleur sortant de la turbine à vapeur. En effet, la distribution de l'électricité ne pose aucun problème, mais pour celle de la chaleur, un réseau de chauffage à distance (CAD) devrait déjà exister, puis être modifié pour accepter les 20 à 40 MWth d'une centrale pilote. A plus long terme, on pourrait envisager la planification d'un CAD puis sa construction en phase avec celle de la centrale géothermique.

En considérant les neuf zones urbaines sélectionnées, un classement peut être fait en fonction de quelques paramètres : le flux de chaleur, la proximité du socle et le potentiel de consommateurs de chaleur (Tableau 4.7.1). Il s'agit d'une évaluation purement qualitative, pour effectuer une tentative de classement entre les différentes zones urbaines. Les trois critères n'ont pas été pondérés et pour chacun des sites, ils peuvent prendre une importance plus ou moins grande. Cette première évaluation de sites potentiels met en évidence l'intérêt de la plaine de l'Orbe et de la région lausannoise.

Tableau 4.7.1 : Evaluation qualitative multicritères d'une sélection de zones potentielles urbaines dans le canton de Vaud pour une future installation de type SGS.

Zones urbaines potentielles	Flux de chaleur	Proximité du socle	Potentiel de consommateurs de chaleur	Classement des zones urbaines ¹
Yverdon-les-Bains	3	3	2	8
Orbe	3	3	1	7
Région Lausanne	2	1	3	6
Montreux	2	2	2	6
Morges	2	1	2	5
Moudon	2	2	1	5
Payerne	2	2	1	5
Vevey	2	1	2	5
Nyon	1	1	2	4

¹ Classement des zones urbaines : somme des points attribués aux trois critères.

4.7.2 Potentiel géothermique

La technologie SGS a été mise au point pour des réservoirs fissurés en milieu cristallin. Tous les projets passés ou en cours sont effectivement dans des roches de type granitiques. D'autre part, pour atteindre un domaine de température proche de 200° C dans des conditions

géothermiques normales, une profondeur de 5 à 6 km est requise. A cette profondeur, la couverture de roches sédimentaire est intégralement traversée et le forage se trouve dans des roches de type granitique.

Cependant, on pourrait également envisager une exploitation géothermique basée sur la technologie SGS en milieu sédimentaire, par exemple dans des grès fracturés du Buntsandstein. Dans ce cas, la température serait moins importante et la profondeur également, mais les coûts de forage seraient sensiblement plus faibles (cf. chap. 3). Des expériences de ce type sont en cours en Allemagne et la technologie des centrales ORC permet de produire de l'électricité à partir de 100° C environ. Cependant, le taux de conversion de l'énergie augmente sensiblement plus vite en-dessus de 160° C (Figure 4.7.1).

Si l'on considère une installation géothermique basée sur un système SGS exploitant un échangeur de chaleur en profondeur constitué par un bloc de granite de 1 km³ à une température de 200° C, l'énergie libérée par ce volume de roche en le refroidissant de 20° C fournirait 10 MW électriques pendant 20 ans. A titre de comparaison, la centrale hydroélectrique d'Aubonne développe une puissance électrique de 7.5 MW, celle des Clées 27 MW.

La possibilité d'atteindre un massif de roche cristalline à 200° C n'est limitée que par la profondeur à laquelle on trouve cette température. Les domaines de 5 km de profondeur et de 200° C ne représentent plus de barrières technologiques, car les forages à grande profondeur en milieu cristallin ont fait ces dernières années de grands progrès : vitesse de pénétration, précision de la déviation du forage, baisse des coûts et développement d'outils de mesure résistants à haute pression et à haute température.

En ce qui concerne le savoir-faire pour créer un réservoir fissuré par stimulation hydraulique, des expériences ont été réalisées avec succès dans plusieurs régions du monde jusqu'à la profondeur de 5 km ou pour des températures excédant 300° C.

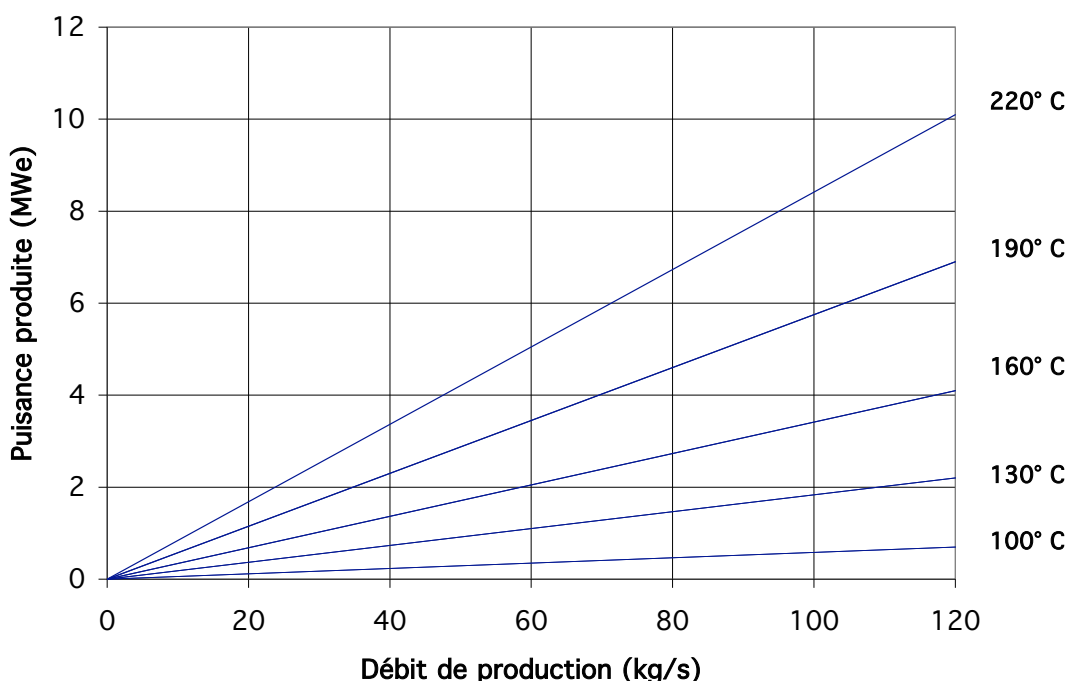


Figure 4.7.1 : Puissance électrique nette fournie par une centrale à fluide binaire, en fonction de la température du réservoir géothermique et du débit total de fluide produit (document de la Banque Mondiale).

4.7.3 Potentiel de consommation

La production d'électricité ne posant pas de problème, tant au niveau de la distribution que celui de la consommation, c'est le problème de l'utilisation de la chaleur qui sera le critère déterminant.

Dans le cas d'une centrale géothermique SGS pilote produisant 3 MWe, ce sont pas moins de 20 MWth d'eau à une température d'environ $90 \pm 10^\circ \text{C}$ qui doivent être absorbés par un réseau de distribution de la chaleur, si l'on ne souhaite pas disperser cette énergie dans l'environnement (air, eau de surface). Une concentration de consommateurs de chaleur susceptibles d'être connectés à un réseau de distribution peut se trouver dans les conditions suivantes : zone urbaine, zone de haute densité d'habitations, bâtiments en zone industrielle, serres en zone agricole. Les puissances mentionnées correspondent à une centrale pilote formée d'un module de trois puits. Il est prévu ensuite d'augmenter le volume du réservoir géothermique stimulé et de capter par davantage de forages un débit deux, trois ou quatre fois supérieur, ce qui entraînera par conséquent une augmentation de la production d'électricité et de chaleur.

Actuellement, les quelques réseaux de chaleur existants dans le canton de Vaud n'offrent pas des caractéristiques propres à une utilisation des rejets thermiques d'une centrale SGS. En effet, ils sont de petite taille, saturés par la fourniture d'énergie et souvent à une température de départ trop élevée (cf. chap. 1.3).

Cependant, il est plausible que dans un laps de temps de 5 à 10 ans, de nouveaux réseaux de distribution de chaleur soient conçus et construits dans la région urbaine lémanique entre Morges et Pully, dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux installations de chauffage à fuel.

4.7.4 Aspects économiques

La chaleur de la Terre se présente comme seule source d'énergie accessible de manière ininterrompue sans production de CO_2 , qui soit modulable en fonction des besoins. Elle est disponible été comme hiver, de jour comme de nuit, et ne nécessite aucun processus de stockage. Elle peut être utilisée en fonction de la demande pendant les 8'760 heures de l'année. Dans le cas d'une installation SGS en Suisse, il sera possible d'atteindre un coût concurrentiel de production de cette énergie si l'on vend également la chaleur existante à la sortie de la turbine à un réseau de CAD.

Il existe dans le monde environ 200 centrales géothermiques de production d'électricité de tailles diverses (0.5 à 110 MWe), ce qui représente une grande variété de conditions géologiques, techniques, environnementales et économiques. Les coûts de d'investissements et d'exploitation de ces centrales sont connus et varient principalement en fonction de la température de la ressource, de la profondeur du réservoir, de la productivité des puits et de la technologie utilisée. Ces coûts sont dans certains cas sensiblement inférieurs à ceux provenant d'autres sources d'énergie, dans d'autre cas identiques à la production électrique avec des agents conventionnels, et dans certains cas peu favorables, les coûts de la géothermie sont plus élevés. Dans le Tableau 4.7.2, une analyse de la Banque Mondiale montre les coûts de la géothermie de haute énergie pour une ressource de qualité moyenne, qui ne représente donc pas les cas les plus favorables ni les plus défavorables.

Il faut également mentionner que les centrales géothermiques produisent de l'électricité avec un taux moyen de fonctionnement $\geq 95\%$, alors que les centrales nucléaires ne fonctionnent qu'avec un taux de 60 à 70 %.

Une récente analyse de sensibilité réalisée en Allemagne pour des projets de petites centrales géothermiques de production couplée d'électricité et de chaleur montre les résultats suivants (Rogge & Kaltschmidt 2002a) :

- Ressource géothermique : profondeur = 4.5 km, température = 150° C
- Forages : doublet avec un débit de 100 m³/h.
- Puissance : électricité = 1 MWe, chaleur = 2.8 MWth.
- Coûts de la production d'électricité :
 - 13 €/kWh, sans vente de la chaleur,
 - 11 €/kWh, avec vente de la chaleur.

Dans le cas de la technologie SGS, étant donné qu'aucune installation de production d'énergie ne fonctionne actuellement, on est réduit à faire des hypothèses et des modèles économiques dont la fiabilité reste incertaine, notamment en ce qui concerne les coûts d'exploitation à long terme. Néanmoins, plusieurs analyses économiques ont été réalisées pour les différents projets SGS. Dans le cas du système de Soultz-sous-Forêts, un coût de production d'électricité de 12 ± 2 €/kWh a été calculé, basé sur les connaissances du premier réservoir testé à 3.5 km et 165° C.

Après avoir acquis les informations techniques et économiques des premières centrales SGS, on pourrait aussi évaluer la possibilité d'installations industrielles de production d'électricité sans utilisation de la chaleur et ceci à un prix concurrentiel.

Tableau 4.7.2 : Coûts d'investissement et de production d'électricité géothermique pour trois tailles de centrales (analyse de la Banque Mondiale)¹.

Puissance de la centrale de production (MWe)	Coûts d'investissement (exploration + réservoir + centrale) (US\$/kW inst.)	Coûts opérationnels et de maintenance (réservoir + centrale) (USc/kWh)	Coût de l'électricité (USc/kWh)
< 5	1800 - 3000	0.8 - 1.4	5.5 - 8.5
5 - 30	1600 - 2500	0.6 - 0.8	4.5 - 7.0
> 30	1350 - 2200	0.4 - 0.7	4.0 - 6.0

¹ Ces coûts sont calculés pour une ressource géothermique haute énergie dite de « qualité moyenne », c'est-à-dire avec une température du réservoir entre 150 et 250° C.

Les coûts d'investissements nécessaires pour concevoir et réaliser une centrale pilote d'une puissance de 3 – 4 MWe basée sur 2 forages de production et 1 forage d'injection de 5 km chacun ont été progressivement évalués au cours des années, avec un degré de confiance qui s'accroît avec l'expérience acquise. Le devis mentionné ci-dessous prend comme base les caractéristiques d'une centrale pilote de type SGS, telles qu'elles ont été déterminées pour Soultz et pour Bâle (Tableau 4.7.3). On arrive à un montant total de 90 millions de CHF pour l'ensemble du projet, depuis les études préliminaires jusqu'à la mise en production. Ces estimations sont valables pour une première centrale pilote. Ensuite, la construction de nouvelles installations de même type verront leur coût baisser progressivement en fonction de la courbe d'apprentissage de la technologie. De même, on constate que le prix des forages profonds dans le socle cristallin baisse en fonction de l'expérience acquise et des nouveaux outils développés.

Finalement, l'augmentation de la taille des installations de type SGS (réservoirs et centrale) aura un effet favorable sur les prix du kW installé et du kWh produit, car la variation des coûts n'est pas linéaire avec l'accroissement de la taille des installations.

Tableau 4.7.3 : Devis estimatif d'une installation pilote de type SGS à trois puits basé sur les données des projets de Soultz et de Bâle.

Phases du projet	Activités	Devis estimatif (10 ⁶ CHF)
PHASE PRÉLIMINAIRE 2003-2004	Etudes préliminaires Recherche de sites	0.5
Total		0.5
VALIDATION DU SITE 2005-2007	Etude et réalisation du premier forage d'exploration	6.0
Total		6.0
PHASE D'EXPLORATION 2007-2011	1 ^{er} puits profond Stimulation du milieu fissuré	16.0
	2 ^e forage d'exploration	7.5
	2 ^e puits profond Stimulation	16.0
	Tests de circulation et de production avec 2 puits	2.5
Total		42.0
PHASE DE DÉVELOPPEMENT 2011-2013	Troisième puits profond Stimulation Tests de circulation et de production	17.0
	Concept de l'installation pilote Construction des installations en surface (centrale + réseaux)	24.5
Total		41.5
Total projet pilote		90.0

DHM-VD/JWIC/Déc. 2002 – FDV26.03.03

4.7.5 Aspects environnementaux

Le développement des énergies renouvelables est une exigence politique actuelle. A court terme, un déficit d'énergie à partir des ressources connues n'est pas prévisible, mais par contre, des scénarios à long terme existent déjà, qui demandent une réduction globale de la production de substances polluantes, en particulier du CO₂.

La géothermie de basse comme de haute énergie possède des avantages notoires sur les énergies provenant de combustibles fossiles. La technologie SGS de production d'électricité est encore plus favorable pour l'environnement, puisque grâce à l'existence de deux circuits fermés, le circuit géothermique et le circuit de la centrale ORC, la totalité des fluides produits par les forages sont réinjectés en profondeur. Il n'y a donc pas d'émissions dans l'atmosphère de gaz à effet de serre ou de gaz acides. D'autre part, la production couplée d'électricité et de chaleur permettra d'éviter la dispersion de chaleur dans l'environnement. L'occupation au sol

d'une centrale géothermique de type SGS est réduite et aucun transport ni stockage d'agents énergétiques n'est requis.

Une analyse comparative des émissions de CO₂ pour différents agents énergétiques a été réalisée et donne des résultats intéressants (Rogge & Kaltschmidt 2002b). L'ensemble des émissions d'équivalents-CO₂ est calculé pour chaque étape d'une installation de production d'électricité : construction, exploitation, démolition (Figure 4.7.2). En ce qui concerne la géothermie, c'est principalement la réalisation des forages (matériel, énergie) qui induit des émissions indirectes de CO₂.

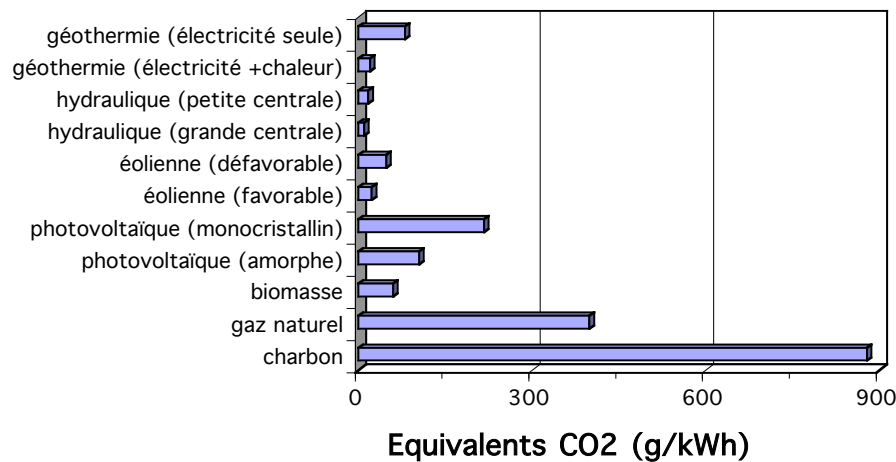


Figure 4.7.2 : Comparaison des valeurs d'équivalents-CO₂ (g/kWh) émis lors de la construction, l'exploitation et la démolition d'installations de production d'électricité pour différents agents énergétiques (d'après Rogge & Kaltschmidt 2002b).

4.8 Programme et planification d'une installation géothermique SGS

En fonction de l'état des connaissances de la technologie SGS, du déroulement des projets internationaux, du transfert de savoir-faire qui s'ensuit et de l'avancement du projet général Deep Heat Mining en Suisse, le programme et la planification prévisionnels d'une première installation de type SGS pour le canton de Vaud pourraient être envisagés de la manière suivante.

4.8.1 Liste des travaux à exécuter

La réalisation d'une installation de production d'énergie géothermique nécessite qu'un certain nombre d'opérations et de constructions techniques soient réalisées selon des étapes définies et dans un ordre logique. Les travaux se décomposent de la manière suivante :

- Etudes préliminaires (géologie générale, sélection de sites, aspects environnementaux, aspects énergétiques, recherche de financement, planification du projet).
- Réalisation d'un premier forage d'exploration (investigations géologiques, hydrauliques, thermiques) et équipement ultérieur de ce forage comme station de mesure microsismique.

- Réalisation des puits de production et d'injection (yc. mesures et tests après chaque forage).
- Création de l'échangeur de chaleur par stimulation hydraulique et connexion du réseau de fissures entre chaque puits.
- Tests de l'ensemble des ouvrages souterrains et du réservoir par des essais de circulation et de production en boucle.
- Conception de la centrale de production d'électricité et de chaleur et de l'ensemble des ouvrages de surface (yc. raccordement au réseau de distribution de la chaleur).
- Construction et réglages de la centrale géothermique.
- Mise en exploitation de la centrale et production couplée d'électricité et de chaleur.

Lorsqu'une ou plusieurs centrales pilotes de type SGS fonctionneront en Europe, il sera possible d'augmenter la taille du réservoir et de la centrale, et par conséquent d'accroître la production d'énergie des projets suivants. En l'absence actuellement de toute centrale en fonctionnement, le dimensionnement d'une première installation dans le canton de Vaud donné ici à titre indicatif, est basé sur celui prévu pour le projet DHM à Bâle (Tableau 4.8.1).

Tableau 4.8.1 : Caractéristiques d'une installation pilote de type SGS.

Objet	Caractéristiques
OUVRAGES SOUTERRAINS	2 forages d'exploration et de contrôle 1 puits d'injection et 2 puits de production, connectés au réservoir Réservoir : massif de roche cristalline fissurée et stimulée
PROFONDEUR DES PUIITS	5'500 à 6'000 m environ
TEMPÉRATURES	200° C au niveau du réservoir fracturé 170-180° C en tête des puits de production 70° C en tête du puits d'injection
DÉBIT DU CIRCUIT GÉOTHERMIQUE	70 kg/sec
INSTALLATIONS DE SURFACE	Centrale de production d'électricité et de chaleur : <ul style="list-style-type: none"> • Pompes de circulation • Echangeurs de chaleur • Turbine à vapeur ORC • Générateur électrique • Système de refroidissement • Raccordement au réseau électrique • Raccordement au réseau de chauffage à distance
PUISSANCES INSTALLÉES	3 MW électriques net 20 MW thermiques
PRODUCTION D'ÉNERGIE	Electricité : 20'000 MWh/an Chaleur : 80'000 MWh/an

4.8.2 Synergie avec la géothermie des aquifères profonds

En cas de réalisation d'une installation SGS, il sera important de préparer les premières phases des travaux en complète coordination avec le domaine de la géothermie des aquifères profonds (cf. chap. 3). En effet sur territoire vaudois, aucune mesure hydrogéologique n'a été réalisée dans les forages pétroliers, et à l'exception des deux stations thermales de Lavey-les-Bains et d'Yverdon-les-Bains, aucun forage géothermique destiné à capter un aquifère profond n'a été réalisé à ce jour dans le canton de Vaud. Par conséquent, les connaissances de

l'hydrogéologie profonde sont très lacunaires. Au cas où un premier forage d'exploration pour un futur système SGS devait être réalisé, il traverserait toute l'épaisseur des couches sédimentaires. Il faudrait alors prévoir les investigations nécessaires pour évaluer qualitativement et quantitativement la présence d'aquifères profonds entre la Molasse tertiaire et le sommet du socle cristallin.

Les progrès de la technologie de forage se sont également appliqués au domaine de la prospection minière. Actuellement, pour un coût n'atteignant que 50 % de celui d'un forage géothermique de production, un forage de prospection en petit diamètre (slimhole), carotté en continu, permettrait d'acquérir une quantité d'informations précieuses pour la géothermie des aquifères profonds et des installations SGS, ainsi que pour tous les domaines des sciences de la terre. Un financement mixte pourrait être imaginé parmi des partenaires aux intérêts variés (services de l'état de Vaud, offices fédéraux, hautes écoles, projet Aquifères Profonds, projet SGS, etc.).

Finalement, la technologie des systèmes géothermiques stimulés (SGS) pourraient également s'appliquer à des réservoirs aquifères de plus faible profondeur et dans des roches sédimentaires. Des travaux dans ce sens ont débuté en Allemagne et l'on constate que la frontière entre les aquifères profonds et les réservoirs stimulés dans le cristallin n'est pas stricte. C'est le domaine de température choisi et l'économie du projet qui dicteront le type de réservoir et les conditions d'exploitation.

4.8.3 Etapes de réalisation et calendrier

Si l'on tient compte de l'avancement des autres projets suisses et européens, et notamment des projets DHM de Bâle et de Genève dont les programmes prévisionnels sont déjà fixés, le démarrage d'un projet SGS sur un premier site dans le canton de Vaud peut être envisagé dès 2004 pour démarrer des études préliminaires (Tableau 4.8.2). L'ensemble des opérations devrait durer environ 10.5 années, depuis les premières études préliminaires jusqu'à la mise en production de la centrale géothermique.

Les étapes sont au nombre de huit, chacune d'une durée de 1 ou 1.5 ans. La première étape consiste en des études préliminaires et doit permettre de réaliser les objectifs suivants (Tableau 4.8.3) :

1. Etude du potentiel de consommation de chaleur et présélection du site de la centrale : Première planification technique et économique du projet.
2. Présélection de 2 à 3 sites pour les 2 forages d'exploration, ceux-ci devant être localisés dans une couronne de diamètre de 1 à 2.5 km autour des puits de production. La superficie nécessaire du chantier de forage doit atteindre 2'000 à 5'000 m² et ensuite il doit rester une plate-forme de 50 à 70 m² accessible par route pour la surveillance des forages.
3. Présélection de 1 à 2 sites pour les 3 puits de production et l'installation de la future centrale géothermique. La superficie nécessaire pour réaliser les puits et construire une centrale de 3 MWe doit atteindre 15'000 à 25'000 m². Une superficie plus importante devrait être envisagée en cas d'agrandissement de l'installation de production d'énergie (nouveaux puits, deuxième centrale ou agrandissement de la première).
4. Investigations géologiques : établissement d'une coupe géologique prévisionnelle des terrains qui seront traversés par le premier forage, notamment pour estimer les profondeurs auxquelles le forage devra être tubé et le niveau du toit du socle cristallin. Evaluation du gradient géothermique et de la température qui sera atteinte à la base du forage, ainsi que du champ régional des contraintes.
5. Investigations hydrogéologiques : évaluation des aquifères potentiels qui seront traversés par le forage ; évaluation des mesures à prendre pour la protection des aquifères superficiels.

6. Investigations environnementales : évaluation des risques d'impacts liés aux travaux, aux chantiers de construction et à la future exploitation géothermique. Une notice d'impact complète ne sera nécessaire que lors de la phase des travaux sur le site de la centrale. Une évaluation socio-économique est également souhaitable à ce stade, en prenant en compte l'acceptabilité du projet. Dans cette optique, un programme d'information doit être mis en place suffisamment tôt.
7. Investigations énergétiques : la recherche de consommateurs potentiels de la chaleur produite doit inclure une évaluation à moyen et long terme des nouveaux quartiers d'habitation et des réseaux de CAD qui seront construits.
8. Recherche de financement : des contacts étroits avec les sponsors potentiels publics et privés doivent être pris dès le début et les montants nécessaires subdivisés en fonction des étapes successives. En effet, les besoins financiers ne sont pas linéaires avec la réalisation du projet. De plus, les investissements de départ doivent être considérés comme des fonds perdus dans toute la phase d'exploration jusqu'à l'étape 6, ce qui représente environ 48 millions CHF, soit plus de la moitié du budget total. La deuxième moitié du financement peut par contre intéresser le secteur privé, car on atteint la phase terminale avant la mise en production, et de nombreux problèmes ont déjà été résolus et les principales hypothèses levées.

Tableau 4.8.2 : Programme prévisionnel de trois projets de centrales SGS en Suisse.

Activités	Années									
	00	02	04	06	08	10	12	14		
BÂLE (DEPUIS 1997)										
Forage d'exploration		■								
Premier puits profond		■	■							
Forage de contrôle			■	■						
Deuxième puits profond				■	■					
Troisième puits profond					■	■				
Construction ouvrages en surface					■	■				
Production						●	●	●	●	
GENEVE (DEPUIS 1998)										
Etudes préliminaires (sites, etc.)	■	■	■							
Avant-projet			■	■						
Forage d'exploration				■	■					
Premier puits profond					■	■				
Forages de contrôle						■	■			
Deuxième puits profond							■	■		
Troisième puits profond								■	■	
Construction ouvrages en surface								■	■	
Production								●	●	●
VAUD										
Etudes préliminaires (sites, etc.)			■	■						
Avant-projet				■	■					
Forage d'exploration					■	■				
Premier puits profond						■	■			
Forages de contrôle							■	■		
Deuxième puits profond								■	■	
Troisième puits profond									■	■
Construction ouvrages en surface									■	■
Production										●

DHM/MOH/JWIC/05.12.02 – FDV26.03.03

Tableau 4.8.3 : Etapes de réalisation et programme prévisionnel d'une centrale SGS pilote dans le canton de Vaud.

Etapes	Durée (an)	Période
1. Etudes préliminaires - Recherche de sites (forages d'exploration, puits profonds et centrale) - Planification énergétique - Géologie, hydrogéologie, géothermie - Evaluation de l'impact sur l'environnement (chantier de forage, constructions, exploitation) - Recherche de financement et plan financier	1.5	janvier 2004 – décembre 2004
2. PRÉPARATION DU FORAGE D'EXPLORATION - Aspects domaniaux - Investigations géologiques (coupe prévisionnelle) - Impacts sur l'environnement - Avant-projet - Mise à l'enquête - Consultation d'entreprises et appel d'offres - Financement	1.5	janvier 2005 – juin 2006
3. RÉALISATION DU FORAGE D'EXPLORATION - Adjudication des travaux - Préparation du chantier et exécution du forage - Diagraphies, tests et interprétations, station microsismique	1	juillet 2006 – juin 2007
4. PREMIER FORAGE PROFOND - Planification, exécution, tests hydrauliques, stimulation du réservoir	1.5	juillet 2007 – décembre 2008
5. DEUXIÈME FORAGE D'OBSERVATION - Planification, exécution, station microsismique	1	janvier 2009 – décembre 2009
6. DEUXIÈME FORAGE PROFOND - Planification, exécution, tests, stimulation du réservoir	1.5	janvier 2010 – juin 2011
7. TROISIÈME FORAGE PROFOND - Planification, exécution, stimulation du réservoir, tests de circulation	1	juillet 2011 – juin 2012
8. OUVRAGES EN SURFACE - Centrale, conduites entre puits, connexions aux réseaux électrique et de chauffage à distance	1.5	juillet 2012 – décembre 2013
DURÉE TOTALE	10.5	

{8} {D} DHM VD – Etapes / JWIC/05.12.02 – Rév.1/10.12.02 – FDV26.03.03

4.9 Conclusions et recommandations

La technologie SGS doit prochainement arriver à un stade pré-industriel avec les premières réalisations de centrales à Soultz-sous-Forêts (Alsace), à Cooper Basin (Australie) et vraisemblablement à Bâle, dans une période entre 2005 et 2009. L'installation géothermique DHM suisse sera peut-être la première à coupler production d'électricité et de chaleur. Actuellement, le potentiel de production d'énergie géothermique de haute énergie en Suisse en général et dans le canton de Vaud en particulier n'est limité ni par la capacité de la ressource en profondeur, ni par son accessibilité, mais bien par le potentiel de consommateurs de chaleur. Pour assurer un rendement économique et éviter de disperser la chaleur résiduelle dans l'environnement, c'est un réseau de chauffage à distance (CAD) qui doit assurer cette distribution vers une concentration de consommateurs (zones d'habitation, zone industrielle, serres agricoles ou zone d'activités mixtes). A plus long terme cependant, et grâce aux connaissances acquises auprès des premières installations de type SGS, on pourra également envisager des centrales ne produisant que de l'électricité.

Dans un laps de temps de 15 à 25 ans, on pourrait envisager l'installation de trois centrales SGS de 10 MWe et 60 MWth chacune, dans trois centres urbains différents tels que les régions de Lausanne, d'Yverdon-les-Bains et de Vevey-Montreux, avec une fourniture de la chaleur vers des CAD adaptés à la température et au potentiel de la centrale géothermique.

Au cours de la première étape des études préliminaires, il faudra d'évaluer l'intérêt de réaliser un forage d'exploration de type slimhole intégralement carotté jusqu'à une profondeur de 4 à 5 km. Cet ouvrage permettrait d'obtenir des informations sur l'ensemble des couches sédimentaires et donc sur les aquifères potentiels profonds, ainsi que sur une section importante du socle cristallin.

Finalement, ce seront les premières installations SGS qui fourniront les bases essentielles d'un développement de cette technologie en Suisse et dans le canton de Vaud en particulier.

4.10 Références

4.10.1 Littérature

- Abé H., Niitsuma H. & Baria R. (eds.) (1999). Hot Dry Rock/Hot Wet Rock academic review. *Geothermics*, 28, 4/5, 679 pp.
- ADHM (2000). Deep Heat Mining. Electricité et chaleur des profondeurs. Plaque d'information.
- CHYN (1999). Forage géothermique F5 à Yverdon-les-Bains. Rapport technique final, non publié.
- Ferrandes R. (1998). La chaleur de la Terre. De l'origine de la chaleur à l'exploitation des gisements géothermiques. Ed. ADEME, Angers, 400 pp.
- Hopkirk R. (1999). Connexion suisse au feu de la Terre. *Les Cahiers de l'électricité, revue suisse de l'énergie*, 42 : 34-37.
- Hurter S. & Haenel R. (eds.) (2002). Atlas of geothermal resources in Europe. European Commission, office for official publ. Of the EC, Luxembourg.
- Hurtig E., Cermak V., Haenel R. & Zui V. (eds.) (1992). Geothermal Atlas of Europe, H. Haack Verlagsges. mbH., Gotha, Germany.
- Lemale J. & Jaudin F. (1998). La géothermie, une énergie d'avenir. Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies Ile-de-France (ARENE).

- Medici F. & Rybach L. (1995). Geothermal map of Switzerland 1995 (heat flow density). Matér. Géol. Suisse, Géophysique, 30,. ETH Zürich, 36 pp.
- Rogge S. & Kaltschmitt M. (2002a). Strom- und Wärmebereitstellung aus Erdwärme – Eine ökonomische Analyse, 12 pp.
- Rogge S. & Kaltschmitt M. (2002b). Geothermische Strom- und Wärmebereitstellung – Ein ökologischer Vergleich, 12 pp.
- SIG, SCANE & ADHM (2003). GGP – Valorisation de la géothermie de grande profondeur. Description générale. Rapport non publié, 33 pp.
- Sommaruga A. (1997). Geology of the central Jura and the Molasse basin : new insight into an evaporite-based foreland fold and thrust belt. Mém. Soc. Neuch. Sci. Nat., Neuchâtel, tome XII, 176 pp.
- Stober I. & Bucher K. (eds.) (2000). Hydrogeology of crystalline rocks. Kluwer Acad. Publ., Dordrecht, 275 pp.
- Vuataz F.-D. (1999). Chaleur naturelle à grande profondeur. Le potentiel géothermique pour la production d'électricité. Bulletin ASE/UCS, 11 : 11-14.
- Vuataz F.-D. & Häring M. (2001). The Swiss Deep Heat Mining (DHM) project : drilling of the first exploration borehole in Basel. IGA News. Newsletter of the Int. Geothermal Assoc., 45 : 9-12.

4.10.2 Sites Internet

Tableau 4.10.1 : Liste des principaux sites Internet concernant la technologie SGS.

Adresse Internet : http://	Description du site
www.dhm.ch/	Projet Deep Heat Mining (DHM), Suisse.
www.geothermal.ch/	Geothermal Explorers Ltd., Suisse.
www.soultz.net/	Projet européen SGS, Soultz-sous-Forêts, France.
www.ees4.lanl.gov/hdr/	Programme Hot Dry Rock de Fenton Hill, Los Alamos Nat. Lab., USA (terminé).
www.mne.ksu.edu/~geocrack/	Geocrack : programme de modélisation de réservoir SGS, Kansas State Univ., USA.
www.geodynamics.com.au/	Projets SGS en Australie, Geodynamics Ltd., Australie.
hotrock.anu.edu.au/	Programmes SGS, Australian National University, School of Petroleum Engineering, Sydney, Australie.
www.petrol.unsw.edu.au/res/hdr.html	Programme de recherche sur les systèmes géothermiques SGS, Australie.
www.nedo.go.jp/chinetsu/hdr/hijiorinow.htm	Projet HDR de Hijiori, Japon.
criepi.denken.or.jp/eng/abiko/pamph/research_index.html	Projet HDR d'Ogachi, Japon, CRIEPI, Abiko research laboratory.

5. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

5. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les investigations conduites entre septembre 2002 et avril 2003 en vue de déterminer le **potentiel géothermique** sur le territoire du canton de Vaud dans le domaine des *géostrutures énergétiques (GE)*, des *aquifères profonds (AP)* et de la géothermie *haute énergie (HE)* ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces trois technologies offre des **perspectives intéressantes de valorisation**. Le présent paragraphe synthétise les conclusions et les recommandations détaillées qui figurent à la fin des chapitres consacrés à ces trois secteurs, soit les chapitres 2, 3 et 4 pour les GE, les AP et la HE, respectivement.

GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES

Les *géostrutures énergétiques*, pieux, parois et dalles en contact avec le sol, sont des éléments équipées en échangeur de chaleur souterrain, dont le rôle s'apparente à celui des sondes géothermiques. Cette technologie, aujourd'hui largement maîtrisée, est bien introduite dans le nord du pays, où des dizaines de bâtiments de diverses natures et de tailles variables en profitent depuis une dizaine d'année. Sur le territoire cantonal, il n'existe à ce jour aucune réalisation de ce genre, et le seul exemple en Suisse romande en est le collège de Fully.

Des calculs basés sur les résultats d'une enquête du marché de la construction des géostrutures a permis d'estimer le potentiel de développement des GE dans le canton de Vaud. On a constaté qu'en l'espace de dix ans, les GE seraient à même de produire annuellement *6'000'000 de kilowattheures de chaleur et 500'000 kilowattheures de froid*. Ceci permettrait de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 2000 tonnes par an, par rapport au chauffage au mazout.

Pour atteindre cet objectif il conviendra de prendre des *mesures* au niveau de la politique énergétique cantonale. Des *mesures incitatives* à mettre en œuvre pourraient être les suivantes :

- Campagne d'information à l'intention du grand public ;
- Information ciblée des divers milieux concernés, autorités politiques, administrations, promoteurs, professionnels de la branche (architectes, planificateurs, ingénieurs CV et ingénieurs civils, géologues et géotechniciens), sous forme d'exposés, de séminaires d'information, de cours de formation, de distribution de documentation, etc. ;
- Conseils aux promoteurs et aux professionnels dans le cadre de projets concrets ;
- Etablissement de cartes des zones potentielles à l'aide de la méthode d'identification développée à cet effet ;
- Soutien financier à des projets de géostrutures énergétiques.

Une *mesure contraignante* pourrait être la demande de justification, au niveau du permis de construire ou à un autre stade de la préparation du projet, de la prise en compte ou non de l'énergie géothermique pouvant être produite par les géostrutures.

Si l'on tient compte du fait qu'il existe en Suisse romande des professionnels, planificateurs et industriels, maîtrisant parfaitement la technologie des GE, si l'on pense que les bases scientifiques et techniques ont été mises au point par des chercheurs de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, et si l'on ajoute que les plus importantes installations du pays ont été et

sont encore aujourd'hui dimensionnées par ces mêmes chercheurs romands, on peut légitimement se demander si l'on est pas en passe de manquer une opportunité d'introduire dans notre région cette nouvelle forme d'énergie aux nombreux avantages. D'où la recommandation qui suit.

Première recommandation

Au vu de l'intérêt représenté par les géostructures énergétiques, il est proposé d'inclure leur développement dans le *plan directeur cantonal* de l'énergie et d'établir un *plan d'action* comprenant une partie ou la totalité des mesures mentionnées ci-dessus.

GEOOTHERMIE DES AQUIFERES PROFONDS

L'impulsion donnée il y a une quinzaine d'année dans le domaine de la valorisation des **aquifères profonds** a quelque peu fléchi au cours des dernières années, essentiellement pour des raisons budgétaires, alors que la connaissance du potentiel géothermique du sous-sol reste très lacunaire. C'est la raison pour laquelle un important travail de compilation des données existantes et un réel effort d'interprétation ont été entrepris dans le cadre de la présente étude pour pouvoir tirer bénéfices des informations précieuses, mais dispersées et souvent encore inexploitées. Au terme de ces investigations il est apparu que de réelles possibilités de capter des circulations d'eau chaude en profondeur existent, notamment dans la région entre le pied du Jura et le Léman, alors que jusqu'à présent le sous-sol du canton était réputé être pauvre en ressources géothermiques. L'exploitation des AP du Malm et du Dogger pourrait représenter des potentiels géothermiques de l'ordre de 4 à 5 MWth par site de production, dans des zones à demande élevée de chaleur.

Ce sont les aspects financiers, découlant surtout du risque d'insuccès, qui freinent les opérations géothermiques de ce type. Pour essayer de lever cette hypothèque, un modèle de financement est proposé en recourant à un *Fond cantonal en faveur de la géothermie*, alimenté par les revenus provenant de la vente de l'eau thermale produite par les forages géothermiques profonds de Lavey-les-Bains. Ce Fond financerait la prospection et les investigations nécessaires à la valorisation des ressources géothermiques identifiées. Un premier projet, dans la région Aubonne-Etoy, pourrait voir le jour en deux ou trois ans, suivi par un deuxième, entre Nyon et Gland. En conséquence, dans le domaine des ressources AP du canton il est proposé de procéder comme suit.

Deuxième recommandation

Au vu du potentiel géothermique probable en aquifères profonds dans des secteurs identifiés, nous recommandons de créer une structure technique et administrative, avec comme but d'élaborer un programme de développement et de valorisation des ressources géothermiques AP du canton. Pour assurer le démarrage d'opérations géothermiques par forages profonds, le concept d'autofinancement par la création d'un Fonds cantonal pour la géothermie, alimenté par la vente de l'eau thermale de Lavey-les-Bains, doit être examiné, ainsi que d'autres modèles complémentaires de financement, tel le contrat de fourniture de chaleur et le subventionnement par l'OFEN.

GEOOTHERMIE HAUTE ENERGIE

La technologie des systèmes géothermiques stimulés (SGS) doit prochainement arriver à un stade pré-industriel avec les premières réalisations, au cours de ces deux à trois prochaines années, de centrales à Soultz-sous-Forêts et en Australie, suivies vraisemblablement de Bâle, vers 2006-2008. Un projet en cours à Genève pourrait entrer en service quelques années plus tard. Actuellement le potentiel de production de géothermie HE en Suisse en général, et dans le canton de Vaud en particulier n'est limité ni par la capacité de la ressource en profondeur, ni par son accessibilité, mais bien par le potentiel de consommation de chaleur. Une telle installation doit être couplée de préférence sur un réseau de chauffage à distance existant.

L'absence de barrière géologique autorise l'implantation de centrales SGS à proximité des centres de consommation. Dans un laps de temps de 15 à 20 ans, on pourrait envisager la construction de trois centrales de ce type de 10 MWél et 60 MWth chacune dans des centres urbains, par exemple Lausanne, Yverdon-les-Bains et la région de Vevey-Montreux, dont la première pourrait entrer en service dans un délai de 10 à 12 ans. Dans le domaine de la géothermie HE, c'est la démarche suivante qui est par conséquent recommandée.

Troisième recommandation

Lancer une étude préliminaire de recherche de site et d'insertion énergétique d'une centrale de type SGS sur le territoire du canton, à l'image de la procédure adoptée dans le canton de Genève.

Pour la mise en œuvre des recommandations ci-dessus, il conviendrait de préparer un plan d'action, devant servir de fil conducteur à un **Programme cantonal de développement de l'énergie géothermique**. Le cadre et les modalités du plan d'action seront à définir compte tenu de la position des autorités face aux recommandations du présent rapport et selon les étapes suivantes :

1. Acceptation des *recommandations* du présent rapport,
2. Elaboration d'un *Programme d'action détaillé et chiffré*, visant à promouvoir l'utilisation de l'énergie géothermique dans le canton,
3. *Approbat*ion du programme d'action par les autorités et mise en place des moyens nécessaires à sa mise en oeuvre, en particulier en ce qui concerne les aspects administratifs, juridiques et financiers,
4. Mise en œuvre du programme

Possédant les connaissances et l'expérience nécessaires à ce travail, la préparation du plan d'action pourrait être confiée au Groupement PGV, dans le prolongement de son activité d'évaluation du potentiel géothermique.

Cette activité est susceptible de bénéficier du soutien financier de la Confédération, dans le cadre du programme SuisseEnergie. Ceci conduit à l'ultime recommandation.

Quatrième recommandation

Intégrer les recommandations ci-dessus dans un Programme cantonal de développement des technologies avancées d'utilisation de l'énergie géothermique et charger le Groupement PGV de sa réalisation en collaboration avec les autorités et les administrations concernées.