

CANTON DE FRIBOURG

DIRECTION DE L'ÉCONOMIE ET DE L'EMPLOI
SERVICE DES TRANSPORTS ET DE L'ÉNERGIE
SECTION ENERGIE

RAPPORT FINAL – JANVIER 2005

Evaluation du potentiel géothermique du canton de Fribourg

Géostructures énergétiques (GE)

Implantation des sondes géothermiques verticales (SGV)

Ressources en aquifères profonds (AP)

Géothermie haute énergie (HE)

Préparé par

Groupement PGF

François-D. Vuataz, CREGE, Neuchâtel

Frédéric Bossy, Univ. Neuchâtel

Bastien Colliard, Univ. Neuchâtel

Jules Wilhelm, Ing.-conseil, Pully

c/o Centre d'Hydrogéologie
Université de Neuchâtel
Rue Emile-Argand 11
2007 Neuchâtel

SOMMAIRE

Résumé	v
Zusammenfassung	vii
1. INTRODUCTION	1
1.1 Cadre général - Définitions	1
1.1.1 <i>Définition du mandat</i>	1
1.1.2 <i>Exploitation des ressources géothermiques - But de l'étude</i>	1
1.2 Démarche de l'étude	2
1.2.1 <i>Démarche générale</i>	2
1.2.2 <i>Contexte énergétique - Distribution et consommation</i>	2
1.3 Présentation du rapport	2
1.4 Organisation de l'étude	3
2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)	5
2.1 Introduction	5
2.2 Les géostructures énergétiques	5
2.2.1 <i>Concept général</i>	5
2.2.2 <i>Projet et caractérisation thermique</i>	8
2.2.3 <i>Avantages d'un système à géostructures énergétiques</i>	11
2.2.4 <i>Aspects économiques</i>	11
2.2.5 <i>Exemples de réalisations</i>	14
2.2.6 <i>Références</i>	16
2.3 Evaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Fribourg à l'horizon 2015	16
2.3.1 <i>Introduction</i>	16
2.3.2 <i>Evaluation du volume annuel de production de géostructures</i>	16
2.3.3 <i>Production de chaleur et de froid en 2015</i>	18
2.4 Secteurs potentiels de géostructures énergétiques - Répartition géographique	20
2.4.1 <i>Introduction</i>	20
2.4.2 <i>Méthodologie</i>	20
2.4.3 <i>Secteurs concernés</i>	23
2.4.4 <i>Répartition des zones potentielles</i>	29
2.5 Conclusions et recommandations	31
2.6 Références	32
Annexe 2.1 Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des secteurs comportant des zones constructibles à potentiel de géostructures	35

3. IMPLANTATION DE SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES (SGV)	39
3.1 Démarche générale et buts de l'étude	39
3.2 Les sondes géothermiques verticales	39
3.2.1 <i>Introduction</i>	39
3.2.2 <i>Impacts sur l'environnement</i>	40
3.2.3 <i>Prescriptions cantonales</i>	41
3.2.4 <i>Bilan actuel sur le développement des sondes géothermiques</i>	41
3.2.5 <i>Localisation des zones étudiées</i>	44
3.3 Contexte géologique, structural et hydrogéologique des zones étudiées	45
3.3.1 <i>Région Bulle et La Tour-de-Trême</i>	45
3.3.2 <i>Région Guin-Tavel</i>	46
3.4 Implantation des sondes géothermiques verticales	47
3.4.1 <i>Introduction et principe de base</i>	47
3.4.2 <i>Critères d'implantation</i>	48
3.4.3 <i>Evaluation du potentiel thermique</i>	49
3.5 Présentation des résultats	51
3.5.1 <i>Région Bulle-La Tour-de-Trême</i>	51
3.5.2 <i>Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)</i>	56
3.6 Interprétation des résultats	60
3.6.1 <i>Région Bulle-La Tour-de-Trême</i>	60
3.6.2 <i>Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)</i>	61
3.7 Discussion et conclusion	61
3.7.1 <i>Autres démarches</i>	61
3.7.2 <i>Conclusion de l'étude</i>	61
3.8 Recommandations	62
3.8.1 <i>Demande d'autorisation</i>	62
3.8.2 <i>Protocole de forage</i>	62
3.9 Synthèse et perspectives	65
3.10 Références	66
 Annexe	 Outil de décision et de quantification du potentiel géothermique pour l'implantation de sondes géothermiques verticales - Bastien Colliard - Janvier 2005 - Volume séparé
 4. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)	 67
4.1 Introduction – Méthode de travail	67
4.2 Exploitation des aquifères profonds (AP)	67
4.2.1 <i>Définitions</i>	67
4.2.2 <i>Modes d'exploitation</i>	68

4.3 Opérations géothermiques AP	69
4.3.1 Phases de réalisation	69
4.3.2 Chantier et aspects environnementaux	70
4.3.3 Techniques de perforation et tests hydrauliques	71
4.3.4 Equipement des forages géothermiques et exploitation par pompage	73
4.3.5 Potentiel géothermique, utilisateurs et besoins énergétiques	75
4.3.6 Coûts et aspects économiques	75
4.4 Développements AP à l'étranger et en Suisse	78
4.4.1 Développements AP dans les pays européens limitrophes	78
4.4.2 Développements AP en Suisse	79
4.5 Réalisations et projets AP dans le canton de Fribourg et aux environs	83
4.5.1 Forage géothermique de Bulle	83
4.5.2 Projet de forage géothermique profond à Payerne	84
4.6 Contexte géologique, géothermique et hydrogéologique du canton de Fribourg	84
4.6.1 Géologie de surface	84
4.6.2 Géologie profonde	86
4.6.3 Documents géologiques	87
4.6.4 Conditions géothermiques	94
4.6.5 Conditions hydrogéologiques des AP	98
4.7 Potentiel de projets AP pour le canton de Fribourg à l'horizon 2020	101
4.7.1 Evaluation du potentiel géothermique par aquifère	101
4.7.2 Potentiel de consommation et calendrier de réalisation	103
4.7.3 Aspects techniques et économiques	104
4.8 Conclusions	105
4.9 Références	105
Annexe 4.1 Bibliographie commentée de publications et documents relatifs à la géologie et à la géothermie du canton de Fribourg (liste non exhaustive)	109
Annexe 4.2 Compilation des informations concernant les forages profonds situés sur les cantons de Fribourg, Vaud et Berne	115
5. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)	125
5.1 Introduction	125
5.2 Production d'électricité géothermique dans le monde	125
5.3 Technique d'exploitation des roches chaudes profondes	127
5.3.1 Extraction de la chaleur du sous-sol	127
5.3.2 Méthodes de géophysique et technologie de forage	128
5.3.3 Création d'un réservoir fissuré profond	128
5.3.4 Conversion de la chaleur géothermique en électricité	129

5.4 Projets EGS dans le monde	130
5.4.1 <i>Bref historique de la technologie des Roches Chaudes Fracturées</i>	130
5.4.2 <i>Projet européen SGS de Soultz-sous-Forêts</i>	130
5.5 Programme suisse Deep Heat Mining (DHM)	132
5.5.1 <i>Projet DHM de Bâle</i>	132
5.5.2 <i>Réalisation de la centrale pilote DHM à Bâle</i>	134
5.5.3 <i>Evaluation d'autres sites en Suisse</i>	135
5.5.4 <i>Projet Géothermie de Grande Profondeur Genève (GGP)</i>	136
5.6 Evaluation des ressources géothermiques de haute énergie du canton de Fribourg	136
5.6.1 <i>Données à disposition</i>	136
5.6.2 <i>Conditions géologiques et hydrogéologiques</i>	137
5.6.3 <i>Conditions géothermiques</i>	138
5.7 Potentiel de projets SGS pour le canton de Fribourg	140
5.7.1 <i>Sites potentiels</i>	140
5.7.2 <i>Potentiel géothermique</i>	141
5.7.3 <i>Potentiel de consommation</i>	143
5.7.4 <i>Aspects économiques</i>	143
5.7.5 <i>Aspects environnementaux</i>	145
5.8 Programme et planification d'une installation géothermique SGS	146
5.8.1 <i>Liste des travaux à exécuter</i>	146
5.8.2 <i>Synergie avec la géothermie des aquifères profonds</i>	148
5.8.3 <i>Etapas et calendrier de réalisation</i>	148
5.9 Conclusions et recommandations	151
5.10 Références	151
5.10.1 <i>Littérature</i>	151
5.10.2 <i>Sites Internet</i>	153

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS **155**

Annexe CD-ROM contenant le rapport, l'annexe et les bases de données et documents y afférents

RESUME

Les investigations conduites entre janvier 2004 et janvier 2005 en vue de déterminer le **potentiel géothermique** sur le territoire du canton de Fribourg dans le domaine des géostructures énergétiques (GE), de l'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV), des aquifères profonds (AP) et de la géothermie haute énergie (HE) ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces quatre technologies offre d'**intéressantes perspectives de valorisation**.

Dans le secteur des **géostructures énergétiques**, des calculs basés sur les résultats d'une enquête du marché de la construction des géostructures ont permis d'estimer le potentiel de développement dans le canton de Fribourg. Il est apparu que dans dix ans, les GE seraient à même de produire annuellement 1'600'000 kWh de chaleur et 120'000 kWh de froid, ce qui permettrait de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 50 tonnes par an.

Le développement des **sondes géothermiques verticales** (SGV) connaît un véritable boom en Suisse depuis plus de 10 ans et pour la Suisse Romande, le canton de Fribourg est en tête. Dans l'ensemble, les caractéristiques du Plateau suisse sont favorables pour l'implantation des SGV, avec toutefois des différences régionales. Deux zones-tests ont été sélectionnées et étudiées dans le détail: Bulle – La Tour-de-Trême et Düdingen – Tafers. Un système d'information géographique a été réalisé, à partir de bases de données permettant de relier les aspects géologiques, hydrogéologiques, thermiques et d'occupation du territoire. Un programme de calcul donne une estimation rapide de la puissance thermique de toute nouvelle SGV, en fonction des connaissances lithologiques locales. Pour faciliter la permission et l'implantation de nouvelles SGV, un formulaire de demande d'autorisation et un protocole de forage ont été préparés. Le potentiel d'installations de SGV dépend surtout du développement du secteur de la construction. Dans le cas de champs de sondes multiples pour le chauffage et le rafraîchissement de grands bâtiments, quelques réalisations phares auront un effet promotionnel important.

L'impulsion donnée il y a une quinzaine d'année en Suisse dans le domaine de la valorisation des **aquifères profonds** a fortement 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, il est apparu que des possibilités de capter des circulations d'eau chaude en profondeur existent en dessous de la Molasse, entre 1 et 3.6 km, dans les calcaires fracturés du Mésozoïque. La Molasse par contre ne semble a priori pas intéressante pour la géothermie de type AP, en raison d'une température trop basse ou d'une productivité trop faible. Les formations calcaires potentiellement productives atteignent des températures de 35 à 100° C, selon leur profondeur. La prospection des AP devra néanmoins passer par des investigations géologiques détaillées et une étude économique précise en fonction des consommateurs potentiels. Une première évaluation montre que la puissance thermique pourrait atteindre 0.7 à 4 MW_{th} par forage, pour une présélection de zones destinées à du chauffage à distance.

En ce qui concerne la géothermie **haute énergie**, la technologie des systèmes géothermiques stimulés (SGS) doit prochainement arriver à un stade pré-industriel avec la première centrale pilote en 2006 à Soultz-sous-Forêts (Alsace), puis à Innamincka (South Australia) en 2008, suivie vraisemblablement par Bâle, vers 2009. 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 Fribourg en particulier est surtout limité par le potentiel de consommation de chaleur. En effet, une telle installation doit être de préférence couplée à un réseau de chauffage à distance existant ou créé pour l'occasion. Dans le canton, les formations de socle cristallin se trouvent à des profondeurs croissantes d'ouest en est. A proximité des Préalpes par contre, le cristallin se trouve à des profondeurs trop importantes. Dans un laps de temps de 15 à 20 ans, on pourrait envisager la construction de deux centrales SGS, produisant chacune 10 MW d'électricité et 60 MW de chaleur, dans les centres urbains de Morat et Fribourg.

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 **geothermische Potential** des Kantons Freiburg wurde zwischen Januar 2004 und Januar 2005 untersucht, wobei vier mögliche Nutzungsformen in Betracht gezogen wurden: energetische Geostrukturen (EG), vertikale Erdwärmesonden (EWS), tiefe Aquifere (TA) und Hochenergie Geothermie (HE). Es zeigte sich, dass unter bestimmten Bedingungen jede der vier Technologien **interessante Möglichkeiten** bietet.

Das Entwicklungspotential für **energetische Geostrukturen** (EG) im Kanton Freiburg konnte durch Berechnungen auf Grundlage einer Marktanalyse abgeschätzt werden. Demnach könnten in 10 Jahren jährlich 1'600'000 kWh Wärme und 120'000 kWh Kälte produziert werden, wodurch die CO₂ Emissionen um etwa 50 Tonne pro Jahr reduziert werden könnten.

Die Entwicklung **vertikaler Erdwärmesonden** (EWS) erlebt in der Schweiz seit 10 Jahren einen Boom; der Kanton Freiburg liegt innerhalb der Westschweiz an der Spitze. Insgesamt sind die Eigenschaften des Mittellandes günstig für die Einrichtung von EWS, allerdings mit regionalen Unterschieden. Zwei Testgebiete wurden ausgewählt und im Detail untersucht: Bulle – La Tour-de-Trême und Düdingen – Tafers. Es wurde ein Geographisches Informationssystem mit einer Datenbank eingerichtet, womit Aspekte der Geologie, Hydrogeologie, Temperatur und Landnutzung miteinander verknüpft werden können. Ein Rechenprogramm liefert eine rasche Abschätzung der Leistungsfähigkeit neuer EWS in Abhängigkeit von den lokalen lithologischen Kenntnissen. Um die Genehmigung zur Installation neuer EWS zu erleichtern, wurden ein Antragsformular und ein Bohrprotokoll erstellt. Das Potential zur Nutzung dieser Technologie hängt vor allem von Fragen der Konstruktion ab. Im Falle von Multisondenfeldern zur Heizung und Kühlung grosser Gebäude wären einige Modellprojekte werbewirksam.

Während sich vor etwa 15 Jahren die Nutzung **tiefer Aquifere** (TA) in der Schweiz lebhaft zu entwickeln schien, haben die Anstrengungen während der letzten Jahre nachgelassen, v.a. aus finanziellen Gründen. Daher bleibt die Kenntnis des geothermischen Potentials des Untergrundes unvollständig. Die Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Studie haben gezeigt, dass die Möglichkeit besteht, tiefe Warmwasserzirkulationen zu nutzen. Diese befinden sich in geklüfteten mesozoischen Kalken unterhalb der Molasse in 1 bis 3,6 km Tiefe. Die Molasse selbst erscheint dagegen für TA Geothermie nicht interessant, da die Temperatur und/oder die Produktivität zu gering sind. Die potentiell produktiven Kalkformationen erreichen Temperaturen von 35 bis 100° C, je nach Tiefe. Die Prospektion der TA erfordert detaillierte geologische Untersuchungen, sowie eine präzise ökonomische Analyse in Abhängigkeit der möglichen Verbraucher. Für ausgewählte Zonen, die für eine Heizung mit Fernwärme prädestiniert sind, wurde die thermische Leistung abgeschätzt. Demnach könnten pro Bohrung 0,7 bis 4 MWh erreicht werden.

Was die **Hochenergie Geothermie** (HE) angeht, so sollte die Technik der stimulierten geothermischen Systeme (SGS) bald das Stadium der industriellen Nutzung erreichen, mit einer erste Pilotanlage ab 2006 in Soultz-sous-Forêts (Elsass), gefolgt von Innamincka (Südaustralien) ab 2008 und wahrscheinlich Basel ab etwa 2009. Ein laufendes Projekt in Genf könnte einige Jahre später in Betrieb genommen werden. Zur Zeit ist das Potential zur Produktion der HE Geothermie in der Schweiz und im Kanton Freiburg durch den potentiellen Wärmeverbrauch limitiert. Tatsächlich sollte eine solche Installation wenn möglich mit einem existierenden oder neu zu schaffenden Fernwärmenetz gekoppelt sein. Im Kanton befindet sich der kristalline Sockel in von W nach E zunehmender Tiefe. In der Nähe der Voralpen befindet sich der Sockel dagegen in zu grosser Tiefe. In 15 bis 20 Jahren könnte man die Konstruktion zweier SGS Zentralen in Murten und Freiburg ins Auge fassen, die jeweils 10 MW Elektrizität und 60 MW Wärme produzieren könnten.

Um eine erfolgreiche Entwicklung der hier identifizierten geothermischen Ressourcen sicherzustellen, werden dem Kanton energiepolitische **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 des transports et de l'énergie du canton de Fribourg, en vue d'évaluer le potentiel géothermique exploitable sur le territoire cantonal, par quatre technologies particulières, en partie nouvelles. Il s'agit des échangeurs en géostructure, appelées *géostructures énergétiques (GE)*, des *sondes géothermiques verticales (SGV)*, 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)*.

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 formes d'exploitation géothermiques suivantes :

- Sources d'eaux chaudes
- Nappes phréatiques
- Collecteurs horizontaux enterrés
- Sondes géothermiques verticales
- Champs de sondes géothermiques
- Sondes géothermiques profondes
- Géostructures énergétiques
- Eaux chaudes des tunnels
- Aquifères profonds
- Géothermie de grande profondeur et de haute énergie

Les méthodes d'exploitation liées à la plupart de ces ressources sont aujourd'hui bien connues. Parmi les quatre domaines retenus pour 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. Les sondes géothermiques verticales connaissent un véritable boom en Suisse depuis dix ans, essentiellement pour le chauffage de villas familiales. Elles représentent une technologie sûre avec un taux de succès très élevé, pour un coût concurrentiel avec les autres énergies de chauffage sur le marché. L'exploitation des *aquifères profonds* a débuté, en Suisse il y a une quinzaine d'années et plusieurs réalisations de ce genre existent à ce jour. Enfin, l'utilisation des ressources à grande profondeur, dites de *haute énergie*, très prometteuse, se trouve actuellement encore en phase de développement tant en Suisse qu'à l'étranger. A l'exception des sondes géothermiques verticales très développées, les trois autres formes d'utilisation de la géothermie 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 qu'un mode d'exploitation de la géothermie à l'échelle du territoire du canton de Fribourg : les sondes géothermiques verticales. Celles-ci connaissent un fort

développement à Fribourg depuis 1997 surtout. Les autorités cantonales ont décidé de procéder d'une part à l'optimisation du développement des sondes géothermiques et d'autre part à l'évaluation des potentialités des différentes technologies disponibles ou en cours de développement.

1.2 Démarche de l'étude

1.2.1 Démarche générale

L'étude du potentiel a été conduite en parallèle dans les quatre domaines intéressés. De par leur nature, les géostructures énergétiques (GE) et les sondes géothermiques verticales (SGV) ont été traitées indépendamment des deux autres ressources. En revanche l'examen des potentiels des aquifères profonds (AP) et de la géothermie haute énergie (HE) ont été réalisés de manière conjointe 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 et les SGV, 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 et 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 une centrale électrique géothermique (type Deep Heat Mining Bâle) peut être assurée en tous points du canton, moyennant la construction d'une ligne de raccordement de longueur limitée, dont le coût 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.

D'après le Plan sectoriel du canton de Fribourg (Service des transports et de l'énergie, 2002), il existe déjà un certain nombre de réseaux de chauffage à distance (CAD). Les deux principaux sont PLACAD à Fribourg, alimenté par un système de couplage chaleur-force combiné à une chaudière à gaz, et celui de Charmey équipé d'une centrale de chauffe à bois visant à valoriser les richesses forestières de la commune. Il s'agit de petits réseaux locaux, associés à des installations de production de faible puissance, ne dépassant pas l'ordre de quelques mégawatts.

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 des installations AP et HE a été concentrée sur les *ressources géothermiques*, avec prise en compte des zones potentielles de consommation, situées dans les principales zones urbaines du canton.

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 quatre chapitres traitant respectivement les quatre domaines cibles.

Le chapitre 2 est consacré aux *géostructures énergétiques* (GE), le chapitre 3 à l'implantation des *sondes géothermiques verticales* (SGV), le chapitre 4 aux ressources en *aquifères*

profonds (AP) et le chapitre 5 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 quatre chapitres suivent le même plan, c'est-à-dire 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 6 synthétise les conclusions et les recommandations des quatre chapitres précédents.

Une annexe sous forme d'un rapport séparé présente l'ensemble de l'étude effectuée pour les sondes géothermiques verticales (Chapitre 3), étude qui a pris la forme d'un travail de diplôme en hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

1.4 Organisation de l'étude

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

- **Dr. François-D. VUATAZ**, Centre de Recherche en Géothermie (CREGE), c/o CHYN, Université de Neuchâtel,
- **M. Frédéric BOSSY**, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Univ. de Neuchâtel,
- **M. Bastien COLLIARD**, Centre d'Hydrogéologie (CHYN), Univ. de Neuchâtel,
- **M. Jules WILHELM**, Ingénieur-conseil, Pully.

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

- *F.-D. Vuataz* : Direction du projet, chapitre HE et collaboration aux chapitres AP et SGV,
- *F. Bossy* : Chapitre AP et collaboration aux chapitres SGV et HE,
- *B. Colliard* : Chapitre SGV et mémoire de diplôme d'hydrogéologie du CHYN (en annexe),
- *J. Wilhelm* : Chapitre GE et collaboration au chapitre HE.

Les personnes et organismes suivants ont collaboré aux études :

- **Dr. Marc Weidmann**, Géologue, Jongny
- **Bureau d'études ABA Géol**, Fribourg
- **Stéphane Cattin**, Centre de recherche en Géothermie (CREGE), c/o CHYN, Université de Neuchâtel

Le *Dr. M. Weidmann* a apporté une importante contribution à l'étude des AP. Il a rédigé en grande partie les paragraphes concernant la géologie régionale et les aspects hydrogéologiques et géothermiques (4.6.2 et 4.6.3), a préparé une bibliographie commentée des documents géologiques et a compilé les informations disponibles sur les forages profonds du canton et des régions limitrophes (Annexe 4.1).

Le *Bureau d'études ABA Géol* a collaboré à l'identification des secteurs comportant des zones constructibles à potentiel de géostructures et en a défini les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques.

S. Cattin a réalisé la mise en pages et l'édition du rapport ainsi que la finition des illustrations.

Les travaux ont en outre bénéficié de l'appui et des conseils des services cantonaux concernés, en particulier la **Direction de l'Aménagement, de l'Environnement et des Constructions**, la **Coordination en matière de système d'information du Territoire (SIT) cantonal**, et finalement du **Service des transports et de l'énergie**.

En cours de réalisation de l'étude PGF, l'Etat de Fribourg a demandé au Groupement PGF d'assurer le suivi du dimensionnement du champ de sondes géothermiques prévu pour le chauffage et le rafraîchissement de la future Ecole des Métiers devant être reconstruite sur le plateau de Pérolles à Fribourg. Cette étude étant décalée dans le temps, elle fera l'objet d'un rapport séparé.

2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)

2. GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES (GE)

2.1 Introduction

Le présent chapitre 2 est consacré à l'évaluation du potentiel géothermique exploitable sur le territoire du canton de Fribourg dans le domaine des géostructures énergétiques. La première partie, soit le point 2.2, comprend une présentation générale de la technologie des pieux et autres géostructures 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 économiques 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 du canton à l'horizon 2015 (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.

Dans la troisième partie, soit au point 2.4, on décrit les travaux de recherches entrepris dans le but de localiser, sur le plan cantonal, les régions dans lesquelles des géostructures énergétiques sont susceptibles d'être réalisées. Sur la base du plan d'affectation cantonal et en collaboration avec les services cantonaux concernés, on a identifié les zones de construction potentielles, puis on a procédé à un examen des conditions géologiques et géotechniques (Annexe 2.1), ce qui a finalement permis d'identifier les régions incriminées. Cette démarche reprend pour l'essentiel la méthodologie élaborée dans le cadre d'un travail de recherche réalisé au Laboratoire de géologie de l'ingénieur et de l'environnement de l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne (Joliquin, 2002).

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.

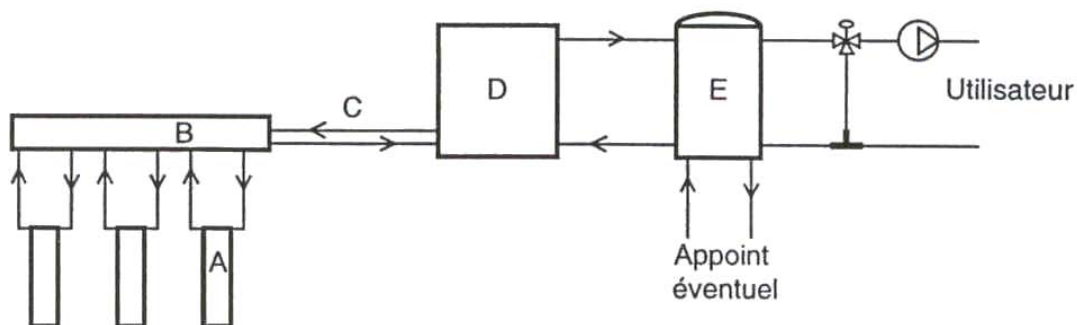


Figure 2.2.3 : Schéma de principe d'une installation de pieux énergétiques avec pompes à chaleur. A : pieux énergétiques, B : collecteur, C : conduites de liaison, D : pompe à chaleur, E : stockage tampon (Pahud, 2002).



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, Rötthis).



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.

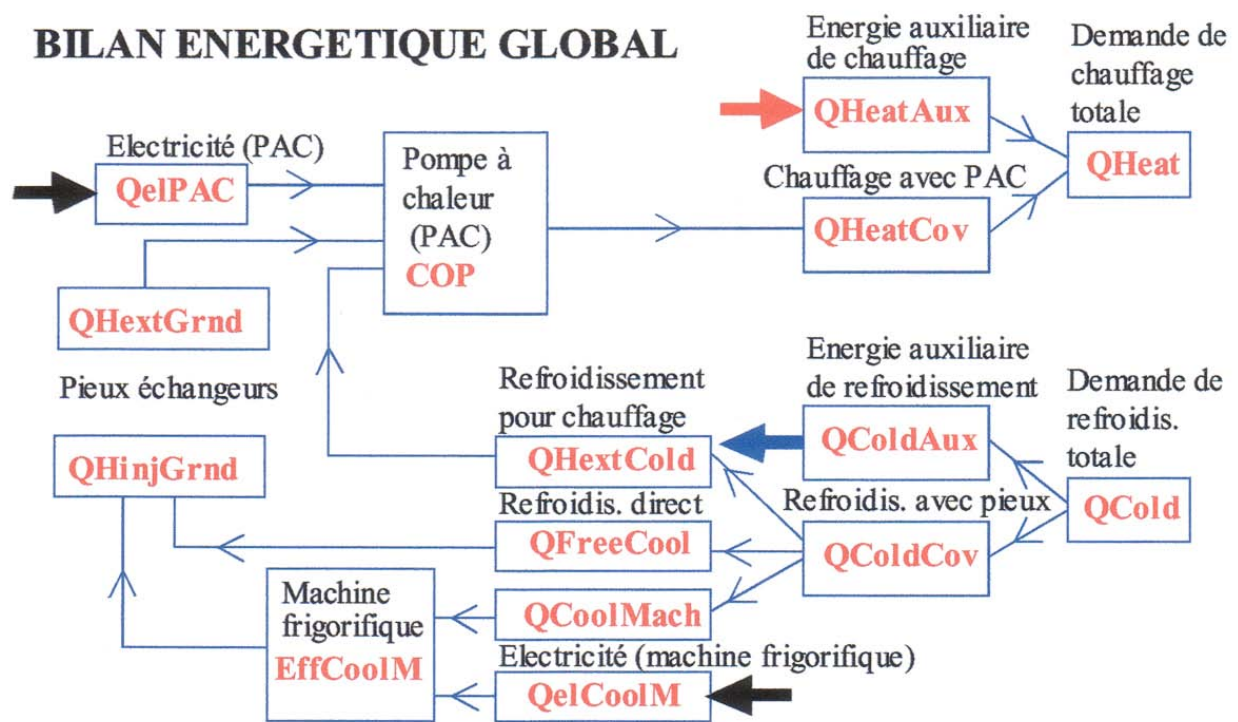
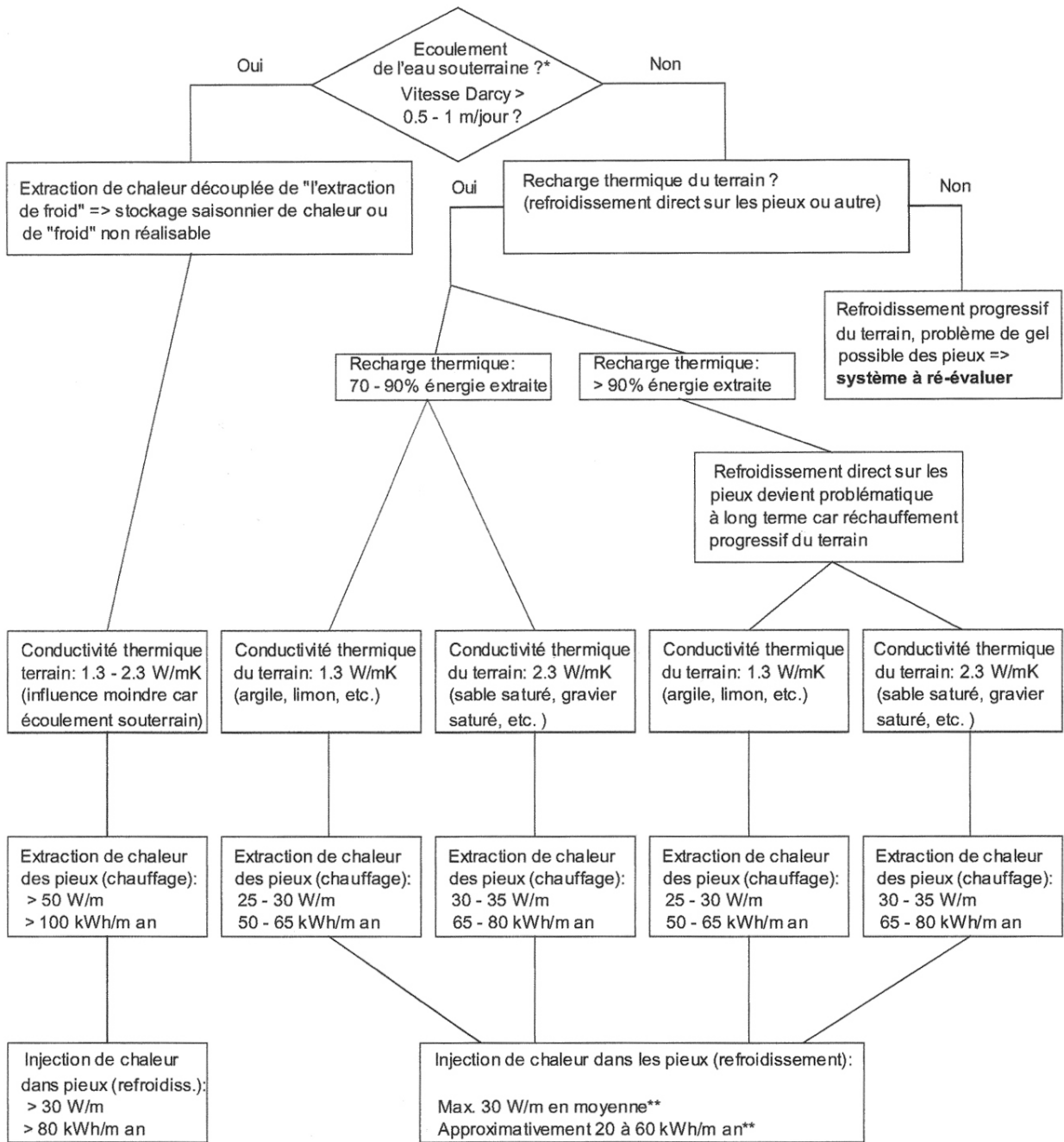


Figure 2.2.7 : Etablissement du bilan énergétique global d'un système à pieux énergétiques à l'aide de PILESIM (Pahud, 2002).



* 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 Aspects économiques

Généralités

La rentabilité économique des installations techniques d'un bâtiment se calcule par la méthode des charges annuelles, conformément aux directives de la Société suisse des ingénieurs en chauffage et climatisation (SWKI – SICC), et compte tenu des spécifications des normes SIA 480, en faisant intervenir les charges suivantes :

- charges financières des montants investis pour les installations techniques et pour l'aménagement des locaux ;

- coût de l'énergie utilisée (électricité consommée par la PAC et/ou par les appareils auxiliaires, etc.) ;
- frais d'exploitation et d'entretien (surveillance, réparations, etc.) ;
- autres frais (administration, assurances, etc).

Les charges financières sont constituées par les coûts annuels, soit les intérêts sur le capital investi et son amortissement sur la durée d'utilisation (annuités). Le coût de l'énergie utilisée dépend de son prix d'achat et de la quantité consommée.

On démontre la rentabilité économique d'une installation d'énergie alternative en comparant les charges annuelles avec celles d'une installation de chauffage conventionnelle.

Exemple de calcul économique d'une installation à pieux énergétiques

Bases de départ

Nous prenons comme exemple un bâtiment locatif neuf comportant 12 appartements.

L'installation de chauffage est constituée par des pieux énergétiques couplés à une pompe à chaleur, permettant en période estivale de tempérer les locaux par refroidissement direct (free-cooling), au moyen du réseau de tubes posé dans le plancher. Une telle disposition favorise la régénération thermique du champ des pieux, et contribue ainsi à l'amélioration du coefficient de performance. L'énergie utilisée est limitée à celle consommée par la seule pompe de circulation.

Cette solution est comparée à une installation de chauffage au mazout.

Le calcul est effectué en faisant intervenir les coûts externes environnementaux (CEE), selon la norme SIA 480. A titre de comparaison, un deuxième cas est calculé sans CEE.

Données techniques

Surface du bâtiment :	env. 600 m ² (30 m x 20 m)
Surface de référence énergétique :	env. 2'500 m ²
Nombre d'appartements :	24
Puissance de chauffage :	70 kW
Consommation de chaleur (y compris ECS) :	215 MWh/a (énergie utile)
Longueur active des pieux énergétiques :	1'200 m
Nombre de pieux énergétiques :	78 (longueur 15.4 m)
Taux d'utilisation de la chaudière :	88 %
Coefficient de performance de la PAC :	3.2

Prix admis des énergies consommées

Mazout de chauffage (extra léger) :	CHF 45.00 / 100 litres
Electricité Hivers TH :	16.8 cts / kWh
Hivers TB :	9.0 cts / kWh
Tarif de puissance en hiver :	CHF 12.00 / kW mois

Au niveau des investissements, seules les installations de production sont prises en compte dans les deux variantes, donc sans les réseaux de distribution et sans les installations de diffusion de la chaleur.

Investissements pour l'installation de chauffage au mazout

Chaudière avec brûleur	11'000.00	
Cheminée	7'000.00	
Citerne	10'000.00	
Total installation de chauffage conventionnelle au mazout		28'000.00

Investissements pour une installation de pieux énergétiques (PE) avec PAC

Pompe à chaleur, complète	38'000.00	
Pieux – Aménagements	19'200.00	
Remplissage au glycole	2'900.00	
Collecteurs entre pieux	6'000.00	
Conduites de liaison	11'000.00	
Total installation de pieux énergétiques avec PAC		77'100.00

On ne prend en considération que l'équipement des pieux en échangeur. Les pieux eux-mêmes, exécutés pour des raisons de stabilité du bâtiment, font partie du coût de la construction de l'ouvrage.

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à chaudière, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Entretien, exploitation, réparations	1'760.00	
Coût de l'énergie	13'720.00	
Total des coûts de fonctionnement	15'480.00	
Total des charges financières	1'770.00	
Total du coût externe environnemental (CEE)	10'980.00	
Total des dépenses annuelles		28'230.00

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à PE et PAC, avec prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Entretien, exploitation, réparations	1'300.00	
Coût de l'énergie	13'130.00	
Total des coûts de fonctionnement	14'430.00	
Total des charges financières	3'770.00	
Total du coût externe environnemental (CEE)	3'400.00	
Total des dépenses annuelles		21'600.00

Malgré un coût d'investissement de 2.75 fois celui de l'installation conventionnelle, les dépenses annuelles restent inférieures de 20 % à celles de l'installation conventionnelle au mazout, si l'on tient compte des coûts externes environnementaux.

Sans les coûts externes environnementaux, la comparaison donne les résultats suivants :

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à chaudière, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Total des dépenses annuelles 17'250.00

Dépenses annuelles de l'installation de chauffage à PE et PAC, sans prise en compte des coûts externes environnementaux (CEE)

Total des dépenses annuelles 18'200.00

On constate que dans la comparaison sans CEE, les dépenses annuelles de la solution PE/PAC dépassent légèrement celles de la variante avec chaudière. Les dépenses annuelles sans CEE de la variante avec chaudière deviennent supérieures à celles de la solution PE/PAC avec un prix du mazout au-delà de CHF 50.00 / 100 l.

2.2.5 Exemples de 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 construite et en fonction 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). Un autre exemple récent est 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).

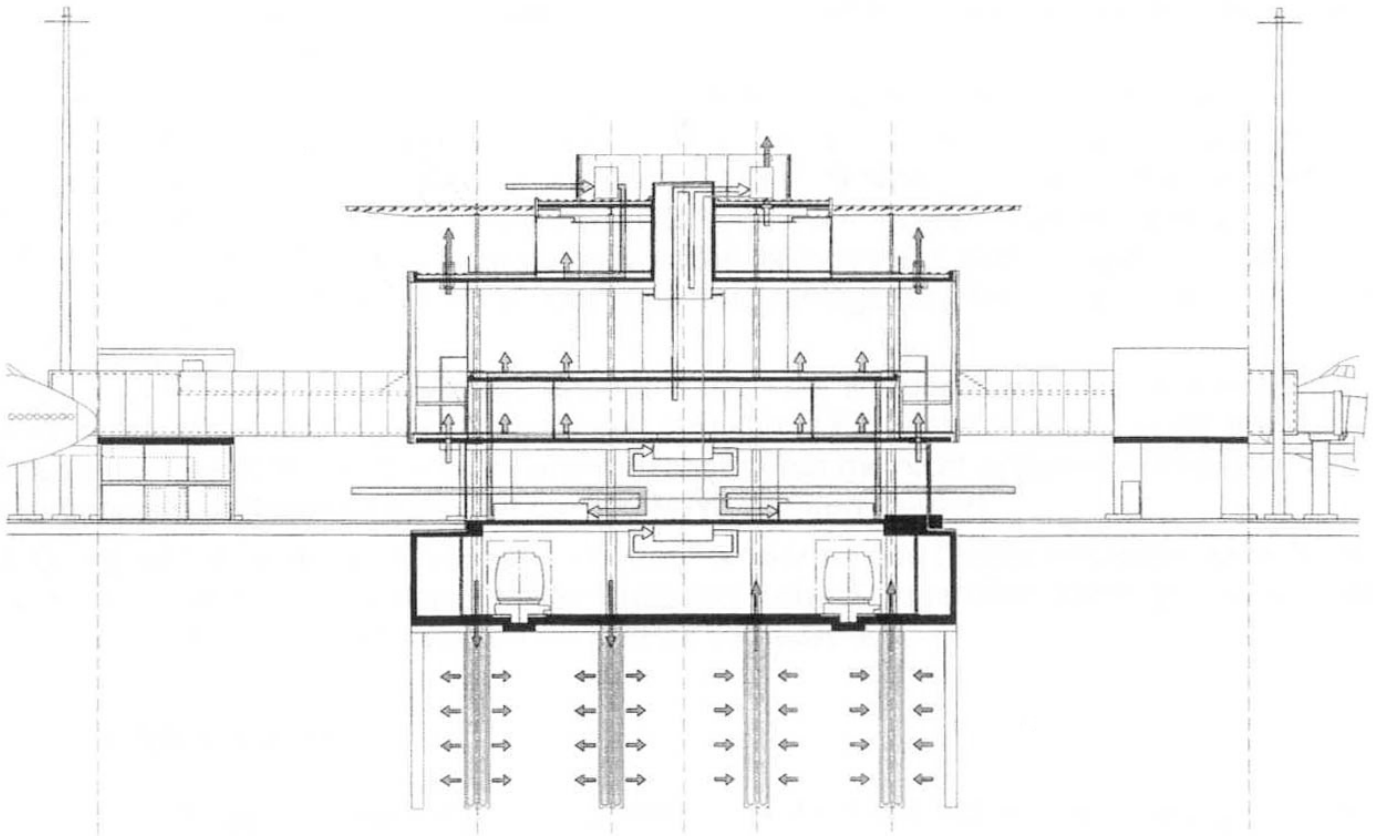


Figure 2.2.10 : Coupe en travers de la nouvelle jetée à l'aéroport de Kloten indiquant la disposition des pieux énergétiques (Hubbuch, 2001).



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).

2.2.6 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 Evaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques dans le canton de Fribourg à l'horizon 2015

2.3.1 Introduction

L'évaluation du potentiel thermique des géostructures énergétiques se base sur une estimation 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 Evaluation du volume annuel de production de géostructures

Enquête auprès des entreprises de travaux spéciaux

En mars 2004, 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 2001 à 2003, selon les catégories d'ouvrages suivantes :

- Pieux de fondation moulés ou battus, PF (longueur totale, mètres)
- Rideaux de pieux moulés 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.

Une seule entreprise (Marti Travaux Spéciaux SA) n'a pas répondu, les neuf autres ont fourni des renseignements exploitables en retournant le formulaire d'enquête dûment rempli.

Le résultat de la consultation figure au tableau 2.3.1.

*Tableau 2.3.1 : Production annuelle de géostructures 2001-2003
Résultat de l'enquête auprès des entreprises (Mars 2004)*

Entreprise	2001	Année 2002	2003	Total
Pieux battus et pieux moulés [m]				
1	-	-	-	-
2	-	-	1'680	1'680
3	1'000	-	-	1'000
4	1'340	-	-	1'340
5	300	2'136	241	2'677
6	3'000	3'000	3'400	9'400
7	2'400	-	-	2'400
8	-	-	-	-
9	300	400	250	950
Total	8'340	5'536	5'271	19'447
Rideaux de pieux battus ou moulés dans le sol [m²]				
Néant				
Parois en tranchée (moulées ou préfabriquées) [m²]				
9	-	1'000	1'500	2'500

En valeur annuelle moyenne, les chiffres sont les suivants :

- Pieux de fondation (PF) : 6'482 m
- Rideaux de pieux (RP) : -
- Parois en tranchées (PT) : 833 m²

Ajustement des quantités

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

Quantités totales :	PF :	12'964 m
	PT :	1'666 m ²

Ces données incluent l'ensemble des constructions de ce type, élément de fondation ou de soutènement, ouvrage de génie civil, etc, sans égard à leur destination. On part de l'hypothèse que la moitié est réalisée à proximité ou dans le cadre d'une construction consommatrice de chaleur. On aura ainsi :

Quantités théoriques	PF :	6'482 m
	PT :	833 m ²

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

Quantités actives	PF :	5'834 m
	PT :	750 m ²

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

Estimation des quantités en 2015

On admet qu'en partant de zéro en 2005, en l'espace de 10 ans, soit à l'horizon 2015, on parviendra à équiper en échangeur thermique la moitié des géostructures potentiellement disponibles.

Quantités de GE en 2005	PF :	2'917 m
	PT :	375 m ²

Avec un accroissement annuel de 2 % du volume de construction, on arrive à une augmentation de l'ordre de 24 %, ce qui donne en 2015 les chiffres suivants :

Quantités de GE en 2015 (accroissement annuel 2 %)		
	PF :	3'617 m
	PT :	465 m ²

2.3.3 Production de chaleur et de froid en 2015

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 (PF) : 100 kWh/m · an

- Production annuelle de froid par mètre de pieu (PF) : 60 kWh/m · an
- Production annuelle de chaleur par mètre carré de paroi (PT) : 70 kWh/m² · an
- Production annuelle de froid par mètre carré de paroi (PT) : 50 kWh/m² · 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., mais elles peuvent être considérées comme représentatives pour le but recherché. On admettra que seule la moitié des géostructures énergétiques sera équipée pour la production de froid.

Avec ces hypothèses, les quantités de chaleur et de froid produites en 2015 se présentent comme suit.

- Production de chaleur par les pieux énergétiques en 2015 (PF) : 361'700 kWh
- Production de froid par les pieux énergétiques en 2015 (PF) : 108'510 kWh
- Production de chaleur par les parois dans le sol en 2015 (PT) : 33'250 kWh
- Production de froid par les parois dans le sol en 2015 (PT) : 11'625 kWh

Ainsi la quantité totale de chaleur et de froid produites en 2015 par l'ensemble des géostructures énergétiques sera, en chiffres ronds, de :

- Chaleur : 395'000 kWh
- Froid : 120'000 kWh

Les mesures effectuées sur des constructions récentes montrent, que le coefficient de performance annuelle totale d'une installation dépasse aujourd'hui déjà 3.0. Grâce à des améliorations attendues au cours des prochaines années, ce coefficient devrait, à l'horizon 2015, se situer aux alentours de 4.0, ce qui signifie que les installations de GE, couplées à une pompe à chaleur, délivreront alors quelques 1'600'000 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 2015 sont représentées, en chiffres ronds, dans le tableau 2.3.2.

Tableau 2.3.2 : Quantités annuelles de chaleur et de froid produites en 2015

Quantité annuelle de chaleur :	1'600'000 kWh
Quantité annuelle de froid (free cooling) :	120'000 kWh

2.4 Secteurs potentiels de géostructures énergétiques – Répartition géographique

2.4.1 Introduction

Afin d'évaluer la répartition géographique des lieux susceptibles de voir se réaliser des géostructures énergétiques, on a procédé au recensement des surfaces constructibles dans des zones où la nature du sous-sol pourrait conduire à l'exécution de tels ouvrages.

2.4.2 Méthodologie

Première étape : Sélection des zones de construction

Dans un premier temps, on a défini les types de zones constructibles où, selon le plan d'affectation cantonal, des constructions d'importance, nécessitant la réalisation de géostructures, peuvent être envisagées. Après analyse et discussion avec les instances concernées, les zones suivantes, répondant à ce critère, ont été retenues. Elles englobent notamment les zones industrielles.

- Zone centre ou zone village (ZV)
- Zone résidentielle à moyenne densité (ZRMD)
- Zone résidentielle à haute densité (ZRHD)
- Zone mixte (ZM)
- Zone d'intérêt général (ZIG)
- Zone d'activité (ZACT)

Ces zones sélectionnées apparaissent sur l'exemple de la région Morat-Sugiez, visible à la figure 2.4.1.

Deuxième étape : Etudes des conditions du sous-sol

Dans la phase suivante, on a procédé à une évaluation de la nature du sous-sol dans les zones considérées et on a retenu, parmi celles identifiées ci-dessus, les zones à sous-sol défavorable du point de vue des fondations des bâtiments et de la protection des eaux souterraines.

Dans l'exemple ci-dessus, c'est-à-dire dans la région Morat-Sugiez, ces zones apparaissent en rouge sur la figure 2.4.2.

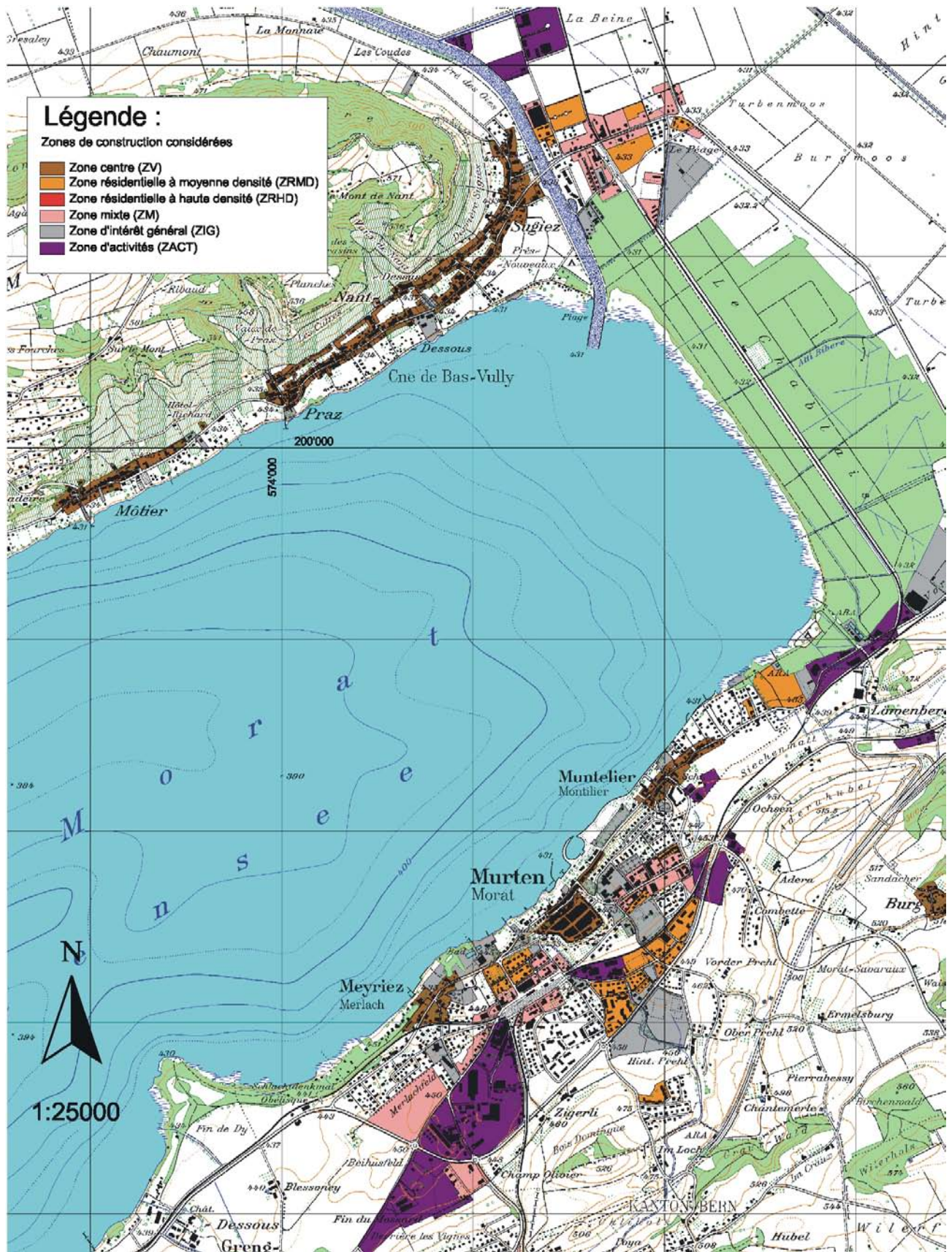


Figure 2.4.1 : Localisation des zones pouvant recevoir des constructions d'importance, à l'exemple de la région Morat-Sugiez

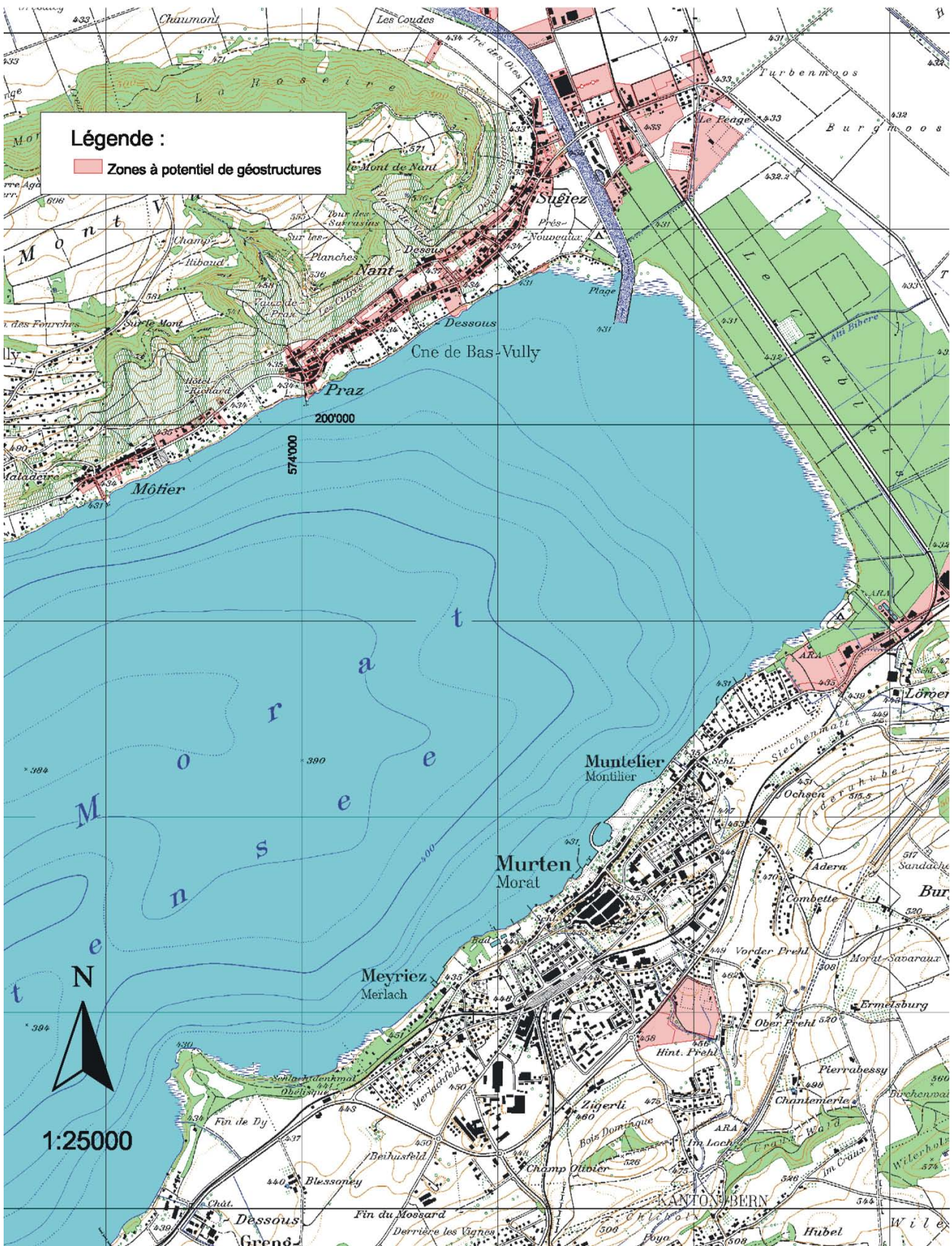


Figure 2.4.2 : Zones à potentiel de géostructures, à l'exemple de la région Morat-Sugiez

Dans les critères de sélection, il a également été tenu compte des aspects de la protection des eaux souterraines (exclusion des zones S, à l'exception des zones S3), et des périmètres de protection des eaux.

Les surfaces retenues sont principalement des plaines alluviales et d'anciens marais. Seules les zones comportant des terrains défavorables d'une épaisseur supérieure à environ 8 mètres ont été prises en compte.

L'Annexe 2.1 récapitule les principales caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des huit secteurs identifiés.

2.4.3 Secteurs concernés

Il est apparu, que ces zones sont regroupées dans huit secteurs assez bien délimités du canton, qui sont les suivants :

1. Morat-Kerzers
2. Courtepin
3. Schmitten
4. Tavel
5. Fribourg agglomération
6. St. Aubin - Domdidier
7. Romont région
8. Bulle région

Les figures 2.4.3 à 2.4.6 indiquent la localisation des secteurs identifiés, ainsi que le périmètre de la zone ou du groupe de zone concerné. Elles concernent respectivement les quarts nord-ouest, nord-est, sud-ouest et sud-est du canton.



Figure 2.4.3 : Secteurs comportant des zones à potentiel de géostructures. Région nord-ouest

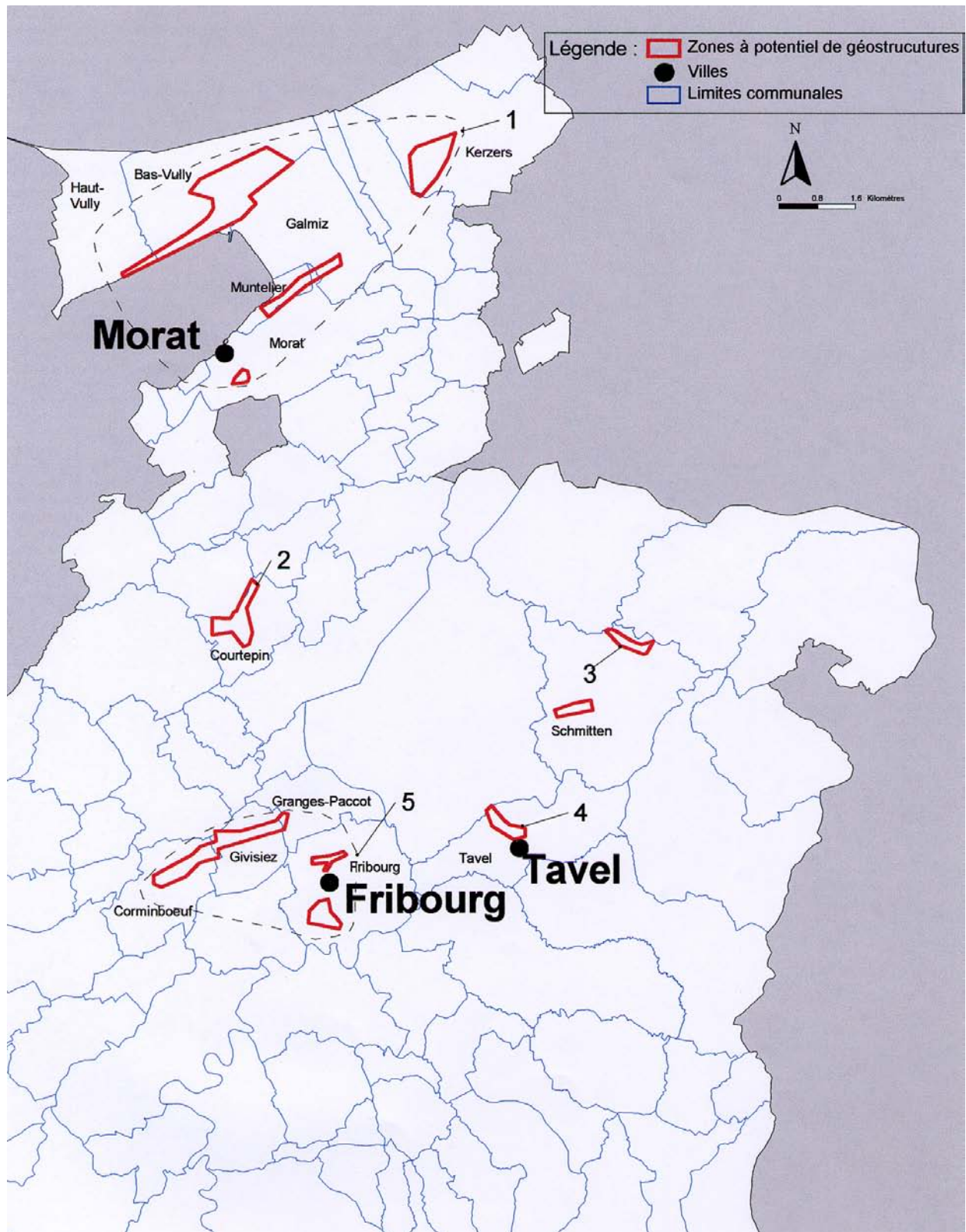


Figure 2.4.4 : Secteurs comportant des zones à potentiel de géostructures. Région nord-est

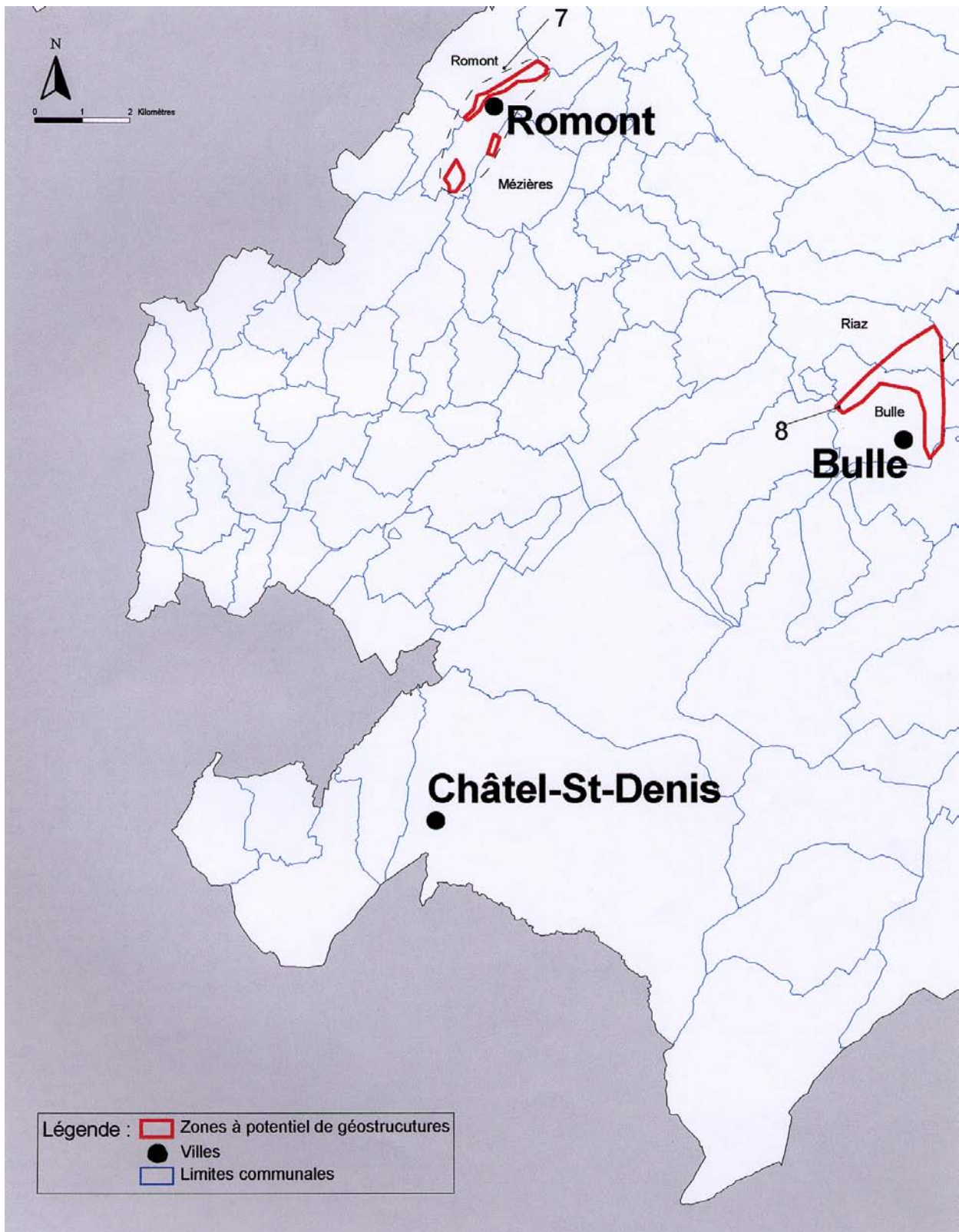


Figure 2.4.5 : Secteurs comportant des zones à potentiel de géostrucures. Région sud-ouest.

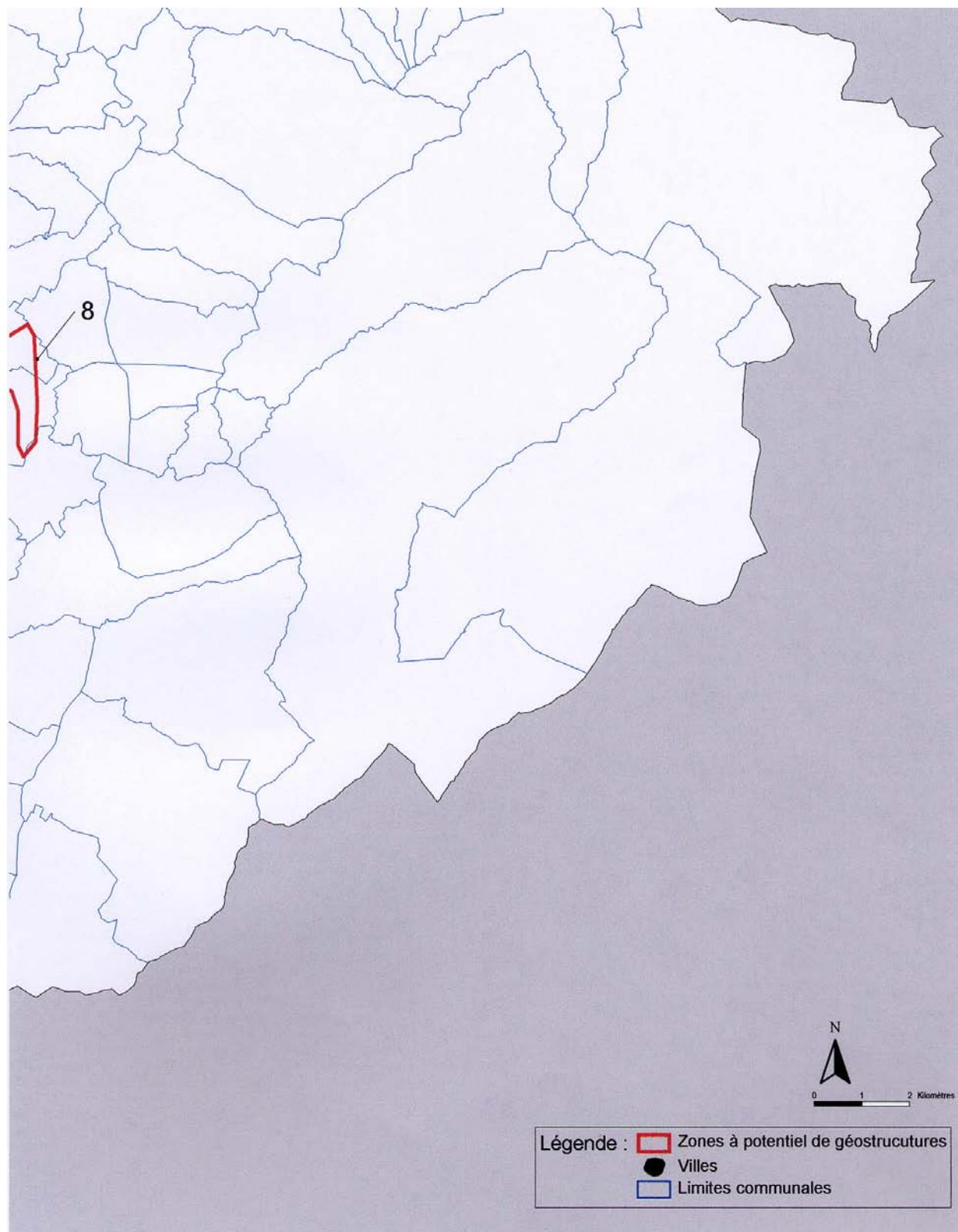
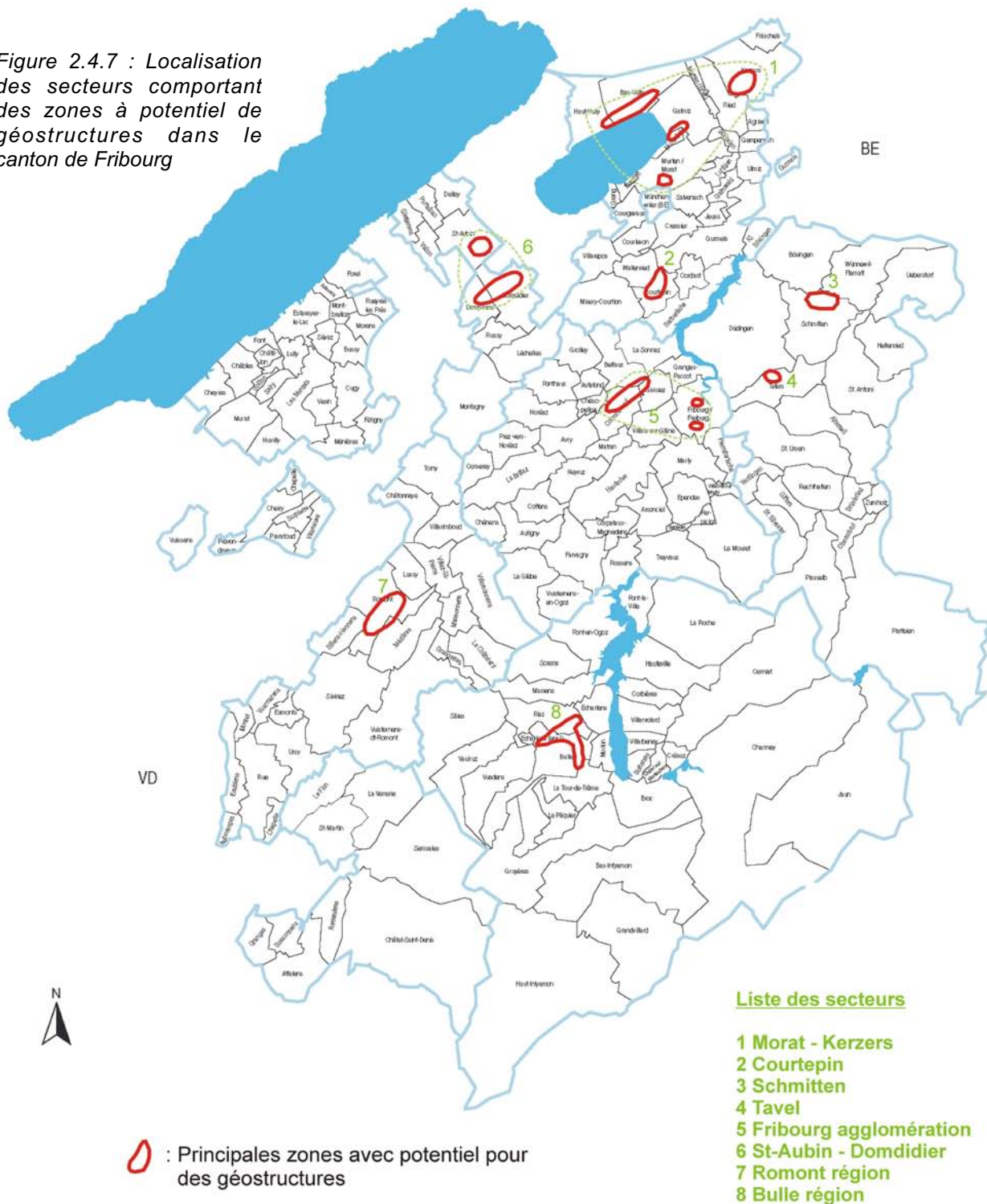


Figure 2.4.6 : Secteurs comportant des zones à potentiel de géostructures. Région sud-est.

La figure 2.4.7 est un plan d'ensemble montrant la distribution des secteurs sur le territoire du canton.

Figure 2.4.7 : Localisation des secteurs comportant des zones à potentiel de géostructures dans le canton de Fribourg



Source: Office fédéral de la topographie, Berne, Office fédéral de la statistique: GEOSTAT, Neuchâtel / Service de la statistique du canton de Fribourg
 Quelle: Bundesamt für Landestopographie, Bern, Bundesamt für Statistik: GEOSTAT, Neuenburg / Amt für Statistik des Kantons Freiburg

On constate que les secteurs identifiés se trouvent majoritairement dans le nord et dans le centre du canton.

2.4.4 Répartition des zones potentielles

Les indications de la banque de données du plan cantonal d'affectation ont également permis de calculer, région par région, l'étendu des surfaces incriminées. Elles sont récapitulées, par secteur et par commune, dans le tableau 2.4.1.

Tableau 2.4.1 : Récapitulation des surfaces potentielles de géostructures énergétiques

Secteur	Communes	Zone / surface [ha]					Total	
		ZV	ZRMD	ZRMH	ZM	ZACT		ZIG
1. Morat		25,8	11,5		17,5	31,7	51,9	138,4
	Morat						9,5	9,5
	Muntelier		4,5			6,2	10,9	21,4
	Galmiz	3,2						3,2
	Bas-Vully	19,6	7,2		12,9	8,1	27,8	75,6
	Kerzers				4,6	17,4	3,1	25,1
	Haut-Vully	3,0					0,6	3,6
2. Courtepin		5,4		4,6	4,6	29,5	9,7	53,8
	Courtepin	5,4		4,6	4,6	29,5	9,7	53,8
3. Schmitten			0,9		2,0	20,6		23,5
	Schmitten		0,9		2,0	20,6		23,5
4. Tavel		0,9	1,5		1,0	10,5	2,8	16,7
	Tavel	0,9	1,5		1,0	10,5	2,8	16,7
5. Fribourg		3,6	4,9		5,8	53,9	12,3	80,5
	Fribourg	2,1	1,8		5,8	10,0	2,1	21,8
	Givisiez					36,4		36,4
	Granges-Paccot						2,4	2,4
	Corminboeuf	1,5	3,1			7,5	7,8	19,9
6. St-Aubin-Domdidier		17,8	1,6		7,3	84,5	16,9	128,1
	St-Aubin				7,3	43,2		50,5
	Domdidier	17,0	1,6			41,4	10,4	70,3
	Dompièrre	0,8					6,5	7,3
7. Romont région		2,4				50,9	3,1	56,4
	Romont	1,4				49,9	2,2	53,5
	Mézières	1,0				1,0	0,9	2,9

Secteur	Communes	Zone / surface [ha]					ZIG	Total
		ZV	ZRMD	ZRMH	ZM	ZACT		
8 Bulle région		3,9	2,4	0,7		56,1	14,4	77,5
	Bulle Riaz	3,9	2,4	0,7		51,6 4,5	14,4	69,1 8,4
Totaux		59,8	22,8	5,3	38,2	337,7	111,1	574,9

Il apparaît de cette récapitulation, qu'une proportion prépondérante des sites potentiels se trouvent dans les zones ZACT (zones d'activité) et ZIG (zones d'intérêt général), dont font partie les zones industrielles. Des vues photographiques de deux d'entre elles, celle de Givisiez et celle de Bulle-Palud sont présentées sur la figure 2.4.8.

Figure 2.4.8 : Vues partielles des zones industrielles de Givisiez et de Bulle-Palud



D'autres secteurs, de moindre importance, se répartissent de manière hétérogène dans le reste du canton, ils se situent surtout au pied des Préalpes, le long d'un arc allant de Châtel-St. Denis à Bulle, au départ de la vallée de l'Intyamont et proche de Gurmels.

2.5 Conclusions et recommandations

Les *géostrucures énergétiques* sont des constructions enterrées équipées en échangeur de chaleur, 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 géostrucures énergétiques dans le canton de Fribourg à l'horizon 2015, 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 géostrucures, en admettant que dans 10 ans la moitié des géostrucures 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.

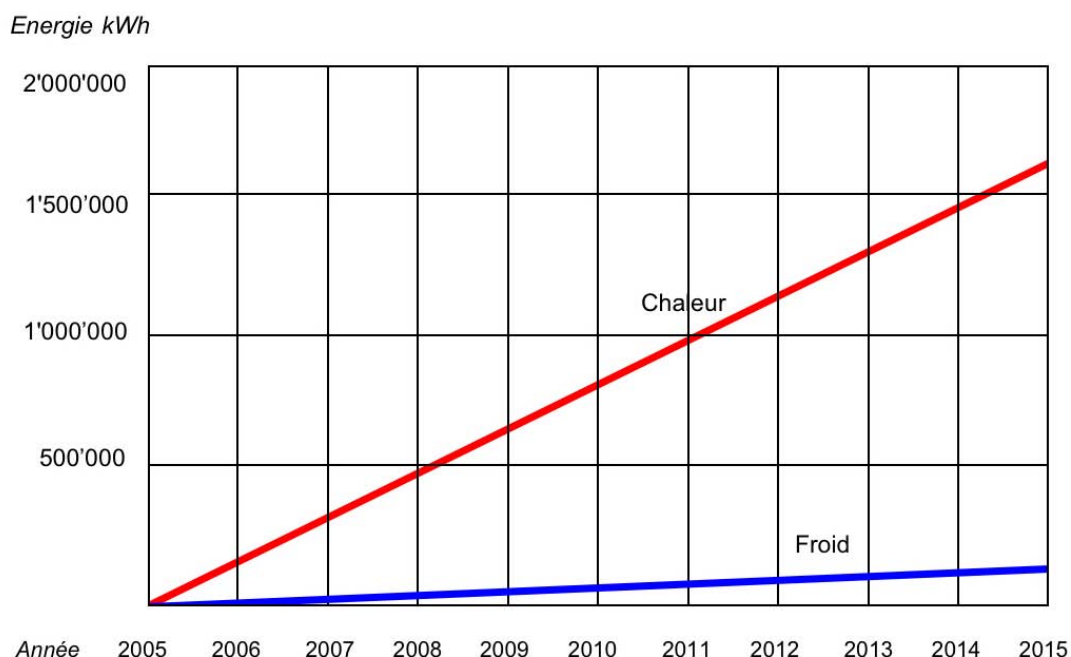


Figure 2.5.1 : Evolution de l'énergie produite annuellement par les géostrucures [kWh] (accroissement moyen).

On constate qu'en l'espace de dix ans, les géostrucures énergétiques seraient à même de produire annuellement 1'600'000 kilowattheures de chaleur et 120'000 kilowattheures de froid. Ceci permettrait de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 50 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
- Roby 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
- SIA (à paraître en 2005). Géostrucures énergétiques exploitant la chaleur et le froid du sol à faible profondeur. Guide pour la conception, la réalisation et la maintenance. SIA Zurich, OFEN Berne, SSG Bienne
- SSG (2001). Fiches techniques 1 à 3, Les sondes géothermiques, Champs de sondes géothermiques et sondes profondes, Géostrucures et pieux énergétiques ; 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
- Wilhelm J., Bianchetti G. & Vuataz F.D. (2003). Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Géostructures énergétiques (GE), Aquifères profonds (AP), Géothermie haute énergie (HE). Rapport préparé par le groupement PGV pour le Service de l'environnement et de l'énergie (SEVEN), canton de Vaud, non publié, 171 pp.

Annexe 2.1

Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des secteurs comportant des zones constructibles à potentiel de géostructures

Annexe 2.1 - Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des secteurs comportant des zones constructibles à potentiel de géostructures

SECTEUR 1 : MORAT-KERZERS	Surfaces retenues : 138,4 ha
<p>Ce secteur, le plus important en terme de surfaces potentielles retenues, est divisé en 2 régions. Il comprend les communes de Morat, Muntelier, Galmiz, Bas-Vully, Haut-Vully et de Kerzers.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques La région au pied du Vully qui comporte un soubassement rocheux en molasse aquitaniennne sur lequel repose une terrasse lacustre (sables fins plus ou moins limoneux). Le niveau de la nappe d'eau souterraine se situe légèrement au-dessus du niveau du Lac de Morat.</p> <p>La région proche de Morat et celle du Grand Marais qui possède un soubassement rocheux, identique à celle du Vully, sur lequel reposent des dépôts quaternaires composés d'alluvions de la Bibera, d'autres cours d'eau et de dépôts palustres (sables fins plus ou moins limoneux avec parfois de la matière organique) et lacustres. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol dans les dépôts palustres et lacustres. Des nappes d'eau souterraine plus profondes, d'extension limitées, existent dans les anciennes alluvions de la Bibera et sont parfois interconnectées avec les nappes superficielles.</p>	

SECTEUR 2 : COURTEPIN	Surfaces retenues : 53,8 ha
<p>Ce secteur est d'importance moyenne en terme de surfaces potentielles retenues et comprend uniquement des terrains proches de la localité de Courtepin.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux en molasse burdigalienne. La couverture de cette molasse est composée de dépôts quaternaires meubles, ce sont des alluvions fines et des dépôts palustres compressibles. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol.</p>	

SECTEUR 3 : SCHMITTEN	Surfaces retenues : 23,5 ha
<p>Ce secteur est de relativement faible importance en terme de surfaces potentielles retenues et comprend uniquement des terrains sur la commune de Schmitten.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux en molasse burdigalienne et aquitaniennne. La couverture de cette molasse est composée de dépôts quaternaires meubles, ce sont des alluvions fines et des dépôts palustres. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol.</p>	

SECTEUR 4 : TAVEL	Surfaces retenues : 16,7 ha
<p>Ce secteur est de relativement faible importance en terme de surfaces potentielles retenues et comprend uniquement des terrains sur la commune de Tavel.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux en molasse aquitaniennne. La couverture de cette molasse est composée de dépôts quaternaires meubles. Il s'agit de dépôts palustres. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol.</p>	

SECTEUR 5 : FRIBOURG AGGLOMÉRATION	Surfaces retenues : 80,5 ha
<p>Ce secteur est d'importance moyenne à élevée en terme de surfaces potentielles retenues. Celui-ci est divisé en 2 régions. Il comprend des terrains sur les communes de Fribourg, Givisiez, Granges-Paccots et Corminboeuf.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques La région, au centre même de la Ville de Fribourg, comporte un soubassement rocheux en molasse burdigalienne sur lequel repose en général de la moraine et/ou des alluvions. Les alluvions et la moraine sont surmontées, dans les zones retenues, par des remblais importants (vallon de Pérolles et des Pilettes). Le niveau de la nappe d'eau souterraine est difficile à situer vu la présence de remblais et de ruisseaux mis sous tuyaux.</p> <p>La seconde région au Nord-Ouest de la Ville de Fribourg possède un soubassement rocheux, identique à celle décrite ci-dessus. Sur ce soubassement reposent des dépôts quaternaires palustres et des alluvions fines. Le niveau des eaux souterraines dans cette région peut varier mais est souvent à moins de 5 m de la surface du sol.</p>	

SECTEUR 6 : ST-AUBIN – DOMDIDIER	Surfaces retenues : 128,1 ha
<p>Ce secteur est d'importance élevée en terme de surfaces potentielles retenues et comprend uniquement des terrains sur les communes de St-Aubin, Domdidier et Dompierre.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux en molasse aquitaniennne. La couverture de cette molasse est composée de dépôts quaternaires meubles. Il s'agit de dépôts palustres, lacustres et d'alluvions fines. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol dans les dépôts lacustres et palustres et parfois plus profond dans les alluvions. Les nappes souterraines superficielles dans les dépôts palustres et lacustres, souvent non connectées entre elles, surmontent la nappe principale de la Broye se trouvant dans les sables et graviers de ses alluvions anciennes et plus récentes.</p>	

SECTEUR 7 : ROMONT RÉGION	Surfaces retenues : 56,4 ha
<p>Ce secteur est d'importance moyenne en terme de surfaces potentielles retenues et comprend des terrains sur les communes de Romont et quelques surfaces sur la commune de Mézières.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux en molasse burdigalienne qui forme notamment la colline où se situe la localité de Romont. La couverture de cette molasse est composée de dépôts quaternaires meubles. Ce sont des dépôts palustres et des alluvions fines de la Glâne et du Glaney. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est proche de la surface du sol, la nappe d'eau souterraine principale s'écoulant aux abords de la Glâne.</p>	

SECTEUR 8 : BULLE RÉGION	Surfaces retenues : 77,5 ha
<p>Ce secteur est d'importance moyenne à élevée en terme de surfaces potentielles retenues et comprend des terrains sur les communes de Bulle et Riaz.</p> <p>Données géologiques et hydrogéologiques Ce secteur comporte un soubassement rocheux complexe comprenant des grès, marnes et calcaires de la Molasse subalpine, du Mélange infrapréalpin frontal et de la Nappe supérieure des Préalpes. La couverture de ce soubassement est composée de dépôts quaternaires meubles, souvent d'épaisseur importante (> 15m). Ce sont essentiellement des alluvions fines et aussi quelques dépôts palustres. Le niveau des eaux souterraines dans cette région est variable mais généralement à moins de 5 m de la surface du sol.</p>	

Bibliographie sommaire

- Atlas géologique de la Suisse au 1 :25'000 : Feuille 1184 Payerne, 1185 Fribourg, 1204 Romont, 1205 Rossens, 1224 Moudon, 1225 Gruyères, 1244 Châtel-St-Denis.
- Carte hydrogéologique de la Suisse, feuille « Sarine ».
- Carte d'inventaire des terrains instables, DTP/CCDN/ECAB, 1993-1999
- Aurèle Parriaux, 1981, Thèse de doctorat : Contribution à l'étude des ressources en eau du bassin de la Broye.
- Jean-Claude Boegli, 1972, Thèse de doctorat : Géologie de la région au SE de Romont.
- Roger Sieber, 1959, Thèse de doctorat : Géologie de la région occidentale de Fribourg.
- Charles Crausaz, 1958 : Géologie de la région de Fribourg.
- Archives ABA-Géol SA.

3. IMPLANTATION DE SONDES GEOOTHERMIQUES VERTICALES (SGV)

3. IMPLANTATION DE SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES (SGV)

3.1 Démarche générale et buts de l'étude

Ce chapitre constitue un résumé du travail de diplôme réalisé au Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel (CHYN) dont l'intégralité se trouve dans le volume d'Annexe de ce présent rapport. L'engouement pour les sondes géothermiques se développe surtout dans le domaine de l'habitation familiale et dans une moindre mesure pour des installations de plus grande envergure. Pour assurer le développement harmonieux de ces installations de chauffage, il est nécessaire de pouvoir bénéficier d'un outil de cartographie pour l'évaluation des sites favorables en vue d'implantation de sondes géothermiques verticales.

Le but initial était de réaliser une cartographie multiparamètres à l'aide d'un support SIG (Système d'informations géographiques). Ce choix s'est imposé afin de pouvoir disposer d'un outil interactif et évolutif contrairement à l'élaboration d'une carte imprimée qui traduit une situation à un temps donné. La réalisation de ce SIG permet la mise en relation des données géographiques (topographie, emplacement des sondes installées), géologiques, hydrogéologiques (zones et secteurs de protection), géothermiques, géotechniques (zones instables) et la localisation des zones contaminées afin d'obtenir un outil pour la gestion de l'exploitation de la chaleur au moyen des sondes géothermiques. Il permet également d'améliorer la prise de décision lors de l'examen des demandes d'implantation de sondes géothermiques verticales. Les différentes cartes ont été réalisées à l'aide du logiciel ArcView et la base de données associée, a quant à elle, été réalisée à l'aide du programme Excel.

L'accent a été mis sur la convivialité de son utilisation et sur sa compatibilité de la base de données, en vue d'une future cartographie de l'ensemble du canton de Fribourg.

Le second outil créé est un programme de calcul permettant d'évaluer la puissance thermique spécifique de soutirage et donc à quantifier le potentiel géothermique selon la lithologie rencontrée. Ces deux outils ont pour objectifs communs de:

- Faciliter la prise de décision en matière d'autorisation et de gestion des données.
- Limiter la nécessité des expertises géologiques préliminaires aux cas les plus délicats.
- Quantifier si nécessaire, la puissance thermique spécifique soutirable minimum et maximum de la future installation, selon les conditions lithologiques et hydrogéologiques afin d'en optimiser le dimensionnement.
- Evaluer le potentiel géothermique d'un secteur dans une optique de développement urbain et de gestion quantitative.
- Permettre la promotion et l'utilisation des sondes géothermiques pour les besoins en chauffage.

3.2 Les sondes géothermiques verticales

3.2.1 Introduction

On parle de ressources géothermiques peu profondes pour des forages d'une profondeur inférieure à 400 m (Figure 3.2.1). Les conditions géologiques et climatiques du Plateau suisse sont favorables à l'implantation de sondes géothermiques verticales.

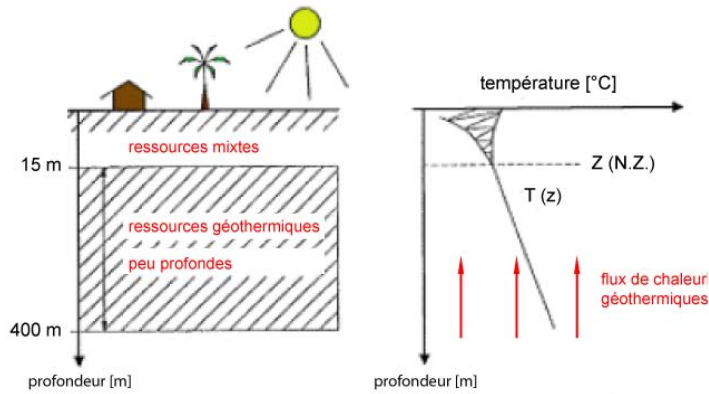


Figure 3.2.1 : Ressources géothermiques de faible profondeur-basse énergie (Rybach & Sanner, 2000)

Les sondes géothermiques verticales sont utilisées aujourd'hui aussi bien pour l'habitation familiale que pour de plus grands bâtiments, principalement pour les besoins en chauffage mais aussi pour le refroidissement estival et l'accumulation d'énergie. Le dimensionnement d'une telle installation nécessite une connaissance précise des qualités thermiques du sous-sol. Les sondes géothermiques verticales (SGV), parfois aussi appelées collecteurs forés, sont des échangeurs de chaleur à circulation dite lente où circule un fluide caloporteur. Elles sont disposées le plus souvent verticalement, mais peuvent être aussi forées obliquement si nécessaire.

Il existe plusieurs types de sondes, mais le type le plus fréquemment utilisé est celui formé par deux tubes en « U » (Figure 3.2.2). La puissance thermique spécifique calculée pour une villa familiale de dimension moyenne (volume SIA d'environ 600 m³) sont d'environ 40 à 80 W par mètre de sonde selon le type de terrain.

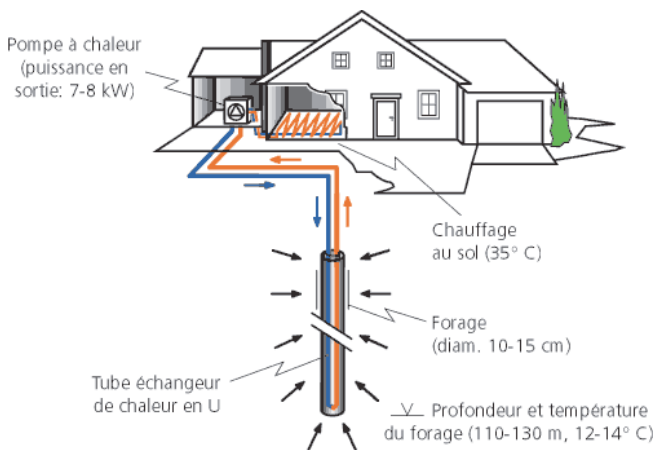


Figure 3.2.2 : Schéma d'une installation avec sonde géothermique verticale (SSG, 2001)

3.2.2 Impacts sur l'environnement

L'expérience est limitée concernant les risques éventuels et l'impact sur l'environnement des sondes géothermiques verticales. Un point délicat est l'interaction potentielle de la sonde avec les eaux souterraines. Les recommandations publiées par l'OFEP (1994) mentionnent deux types de risques majeurs.

Risques directs

Ils sont essentiellement dus à la propagation éventuelle dans le sous-sol, à la suite d'une rupture de la sonde par exemple, d'antigels glycoliques, fréquemment utilisés à l'heure actuelle

comme additifs dans le fluide caloporteur. Il en résulte un risque accru de contamination des écoulements souterrains et des exutoires (source ou puits). Il est donc important d'évaluer la composition de ces fluides caloporteurs (majeurs ou traces), leur sorption et leur dégradation dans un sous-sol donné, leur toxicité, les conditions de mélanges dans les systèmes d'écoulement et les causes possibles de rupture des sondes (zones géologiquement instables).

Certains fluides frigorigènes utilisés auparavant dans les pompes à chaleur (CFC R12 et R502) ont été interdits car ils sont responsables de la destruction de la couche d'ozone. Ils concourent également d'une manière significative à l'effet de serre. Leur manipulation et autorisation sont réglées par l'Ordonnance sur les matières dangereuses pour l'environnement. Les réfrigérants de substitution actuellement utilisés sont le R134a (HFC) et le R407c (HFC). Il existe aussi des réfrigérants naturels comme le *propane* R290 (HC) et l'*isobutane* mais très rarement utilisés pour des systèmes de pompe à chaleur pour des habitations.

Risques indirects

Ils sont générés par le forage réalisé pour accueillir la sonde, qui peut créer des court-circuits entre aquifères. Un phénomène d'équilibrage des potentiels peut être induit par les écoulements souterrains et des réserves d'eau de qualité pourraient être contaminées par des arrivées de fluides indésirables.

D'autres risques existent tels que :

- La perturbation des écoulements souterrains et des températures du sous-sol ;
- La contamination à partir de la surface (aucune sonde implantée en zone contaminée) ;
- Les incidences mécaniques et chimiques (l'étanchéité de la sonde peut être rompue par des glissements de terrain qui risquent de sectionner la sonde) ;
- Certaines eaux agressives ou fortement minéralisées peuvent attaquer chimiquement la paroi de la sonde ;
- Les formations contenant du gaz (radon) rencontrées lors du forage ne doivent pas être sous-estimées.

3.2.3 Prescriptions cantonales

Des enquêtes réalisées dans le cadre de ce travail ont été menées auprès d'administrations cantonales ainsi qu'auprès d'entreprises spécialisées. Elles montrent que le cadre législatif régissant l'implantation des sondes géothermiques diffère fortement selon les cantons.

Bien qu'aucun accident significatif ne soit à déplorer jusqu'à aujourd'hui, suite à l'installation ou à l'utilisation de sondes géothermiques, beaucoup d'experts cantonaux restent très prudents quant à la sécurité et au risque d'impact sur l'environnement de ce type d'installation, notamment concernant les conditions de mise en place des sondes et leur suivi géologique et hydrogéologique. Beaucoup d'interrogations subsistent également quant à leur vieillissement et à la variation de densité du matériau PE.

3.2.4 Bilan actuel sur le développement des sondes géothermiques

Les conditions lithologiques du Plateau molassique suisse sont très favorables pour l'implantation de SGV. Ces dernières représentent la plus forte contribution de l'énergie géothermique en Suisse, en terme de nombre d'installations et de production de chaleur. La figure 3.2.3 montre la distribution des SGV dans le canton de Fribourg ainsi que le flux de chaleur moyen.

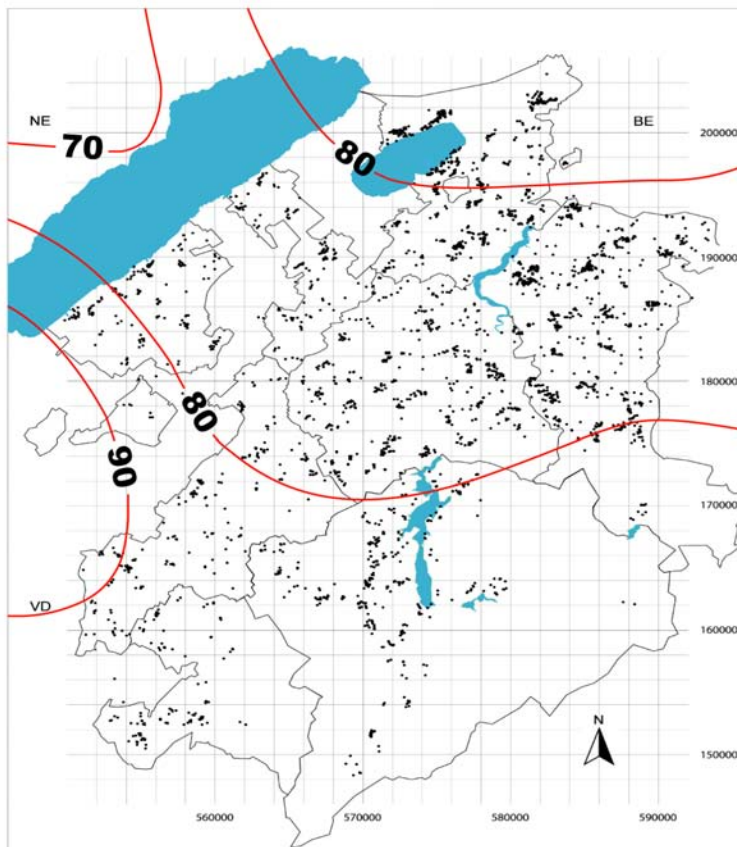


Figure 3.2.3 : Carte des isolignes de densité de flux de chaleur [mW/m^2] et localisation des forages de sondes géothermiques verticales dans le canton de Fribourg (Extrait BD, 2004)

Le rythme de développement des installations équipées de sondes géothermiques dans le canton de Fribourg est le plus élevé de Suisse romande. Ceci est dû à un certain nombre de facteurs techniques et économiques :

- conditions climatiques (longues périodes d'hiver avec une température proche de $0^{\circ}C$) ;
- conditions géologiques favorables (Plateau suisse), flux thermique favorable (Fig. 3.2.3) ;
- terrains souvent saturés en eau à faible profondeur ;
- choix du positionnement relativement libre et espace requis minimum ;
- contribution à réduire l'émission des gaz à effet de serre ;
- suppression des risques et des coûts de transport et de stockage de combustible ;
- dans la plupart des cas, la régénération thermique naturelle du sous-sol est suffisante.

Sur les 15 dernières années, la progression moyenne des pompes à chaleur est d'environ 300 unités par année pour le canton de Fribourg (Figure 3.2.4). Il en existe plus de 5000, ce qui représente une puissance électrique installée de 20'000 kW (60'000 kW de puissance thermique). Aujourd'hui, c'est 105 GWh qui sont fournis annuellement sous forme de chaleur dont les deux tiers, soit plus de 70 GWh par an, sont extraits du sous-sol fribourgeois.

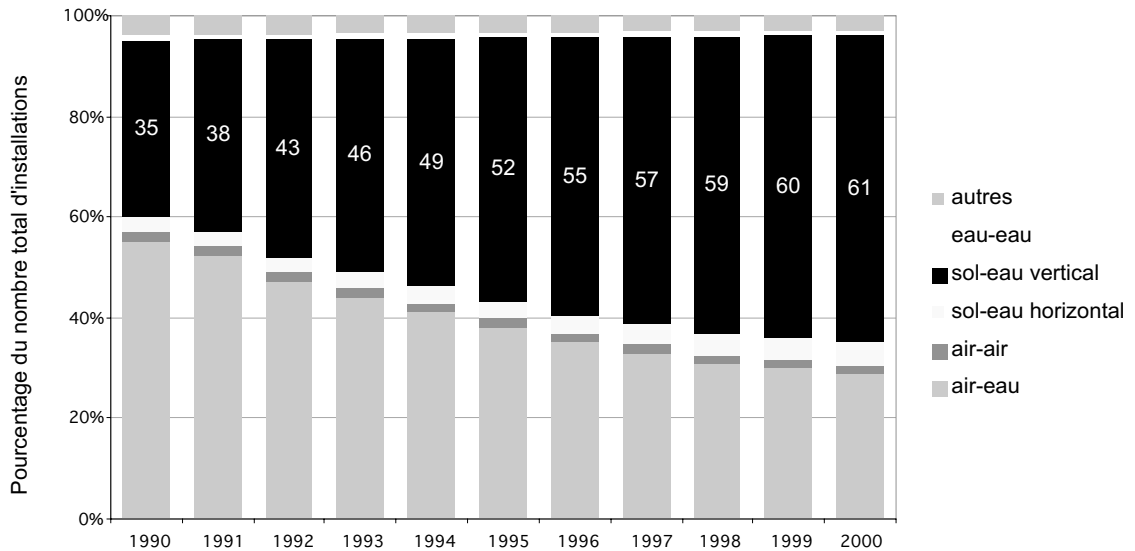


Figure 3.2.4 : Evolution du type de pompe à chaleur installée sur le canton de Fribourg (<http://www.fr.ch>)

La figure 3.2.5 décrit l'évolution de la longueur totale des SGV installées en Suisse depuis 1993. Celle-ci totalise jusqu'à aujourd'hui environ 5 millions de mètres de forage !

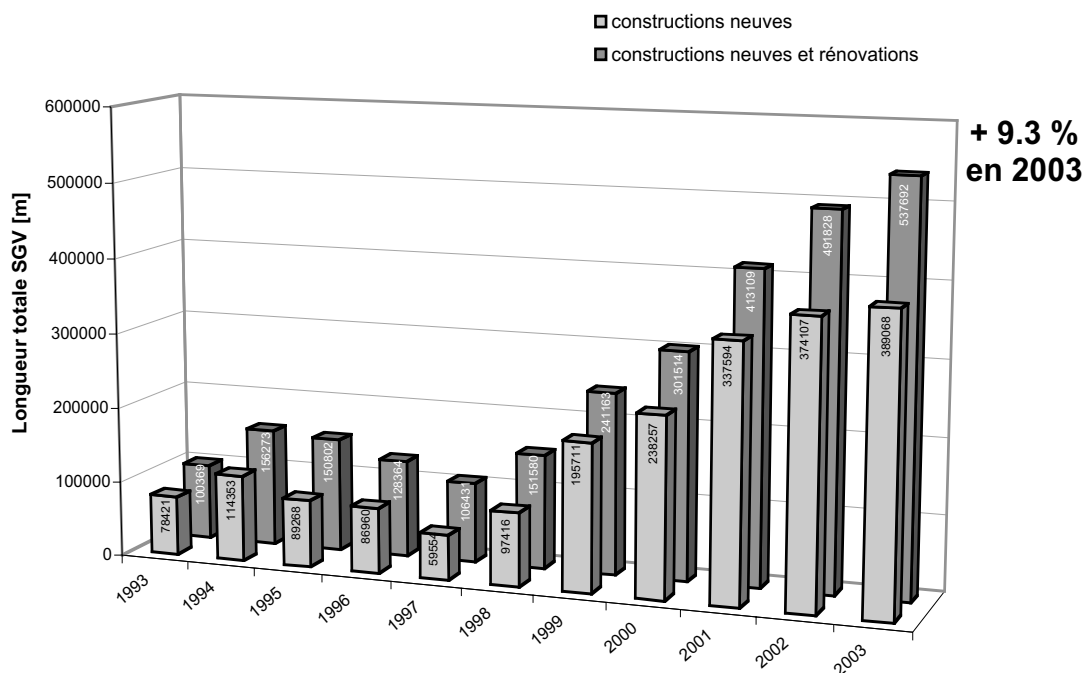
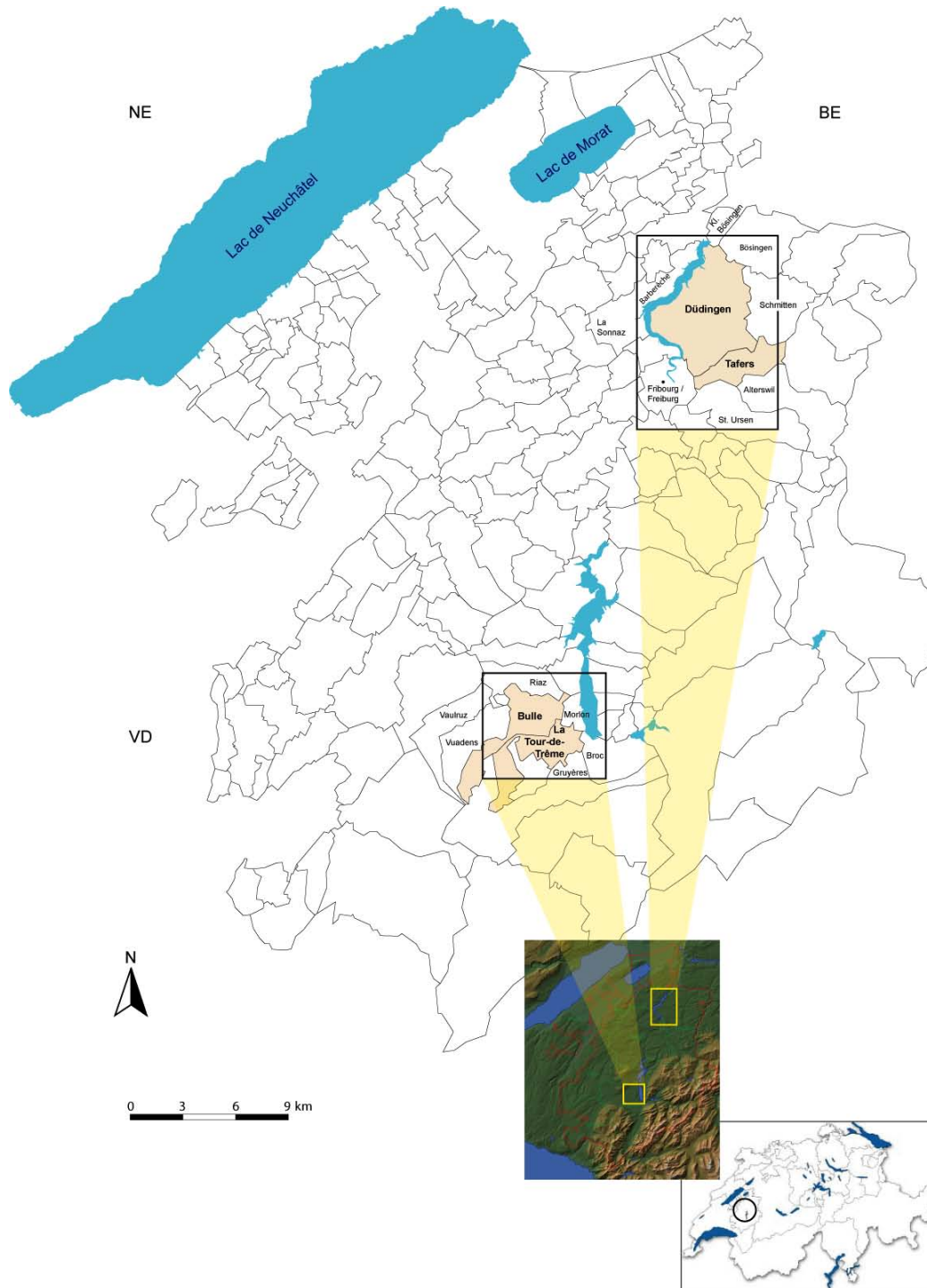


Figure 3.2.5 : Evolution de la longueur totale des sondes géothermiques en Suisse. http://www.pac.ch/stat_05.html

3.2.5 Localisation des zones étudiées

En raison du nombre important d'installations existantes dans le canton, seules deux zones d'étude ont été choisies avec le mandataire. La première zone d'étude, d'une superficie de 16 km², se situe en Gruyère et regroupe les communes de Bulle et La Tour-de-Trême. La deuxième, d'une superficie de 54 km², comporte les communes de Guin (Düdingen) et Tavel (Tafers) en Singine (Figure 3.2.6).



Source: Office fédéral de la topographie, Berne, Office fédéral de la statistique: GEOSTAT, Neuchâtel / Service de la statistique du canton de Fribourg
 Quelle: Bundesamt für Landestopographie, Bern, Bundesamt für Statistik: GEOSTAT, Neuenburg / Amt für Statistik des Kantons Freiburg

Figure 3.2.6 : Localisation des régions étudiées dans le canton de Fribourg.

3.3 Contexte géologique, structural et hydrogéologique des zones étudiées

Le canton de Fribourg est composé de deux régions géologiquement différentes : le *Plateau molassique* qui appartient à la partie de l'avant-pays "autochtone" des Alpes, ainsi que les *Préalpes* qui sont constituées d'un empilement de nappes alpines charriées sur l'avant-pays. Celles-ci sont constituées de plusieurs unités géologiques de nature lithologique très différentes, leur arrangement ainsi que leur répartition restent fort complexes malgré les nombreux travaux effectués en géologie structurale et en sédimentologie.

Les sédiments détritiques d'âge tertiaire (Oligocène et Miocène) que constituent la Molasse sont abondamment représentés par d'épaisses couches de grès intercalés avec des marnes. Le tableau 3.3.1 décrit les subdivisions habituellement reconnues ainsi que leur nomenclature locale pour les régions étudiées.

Tableau 3.3.1 : Subdivisions de la Molasse (Labhart T. & Decrouez D., 1997 ; Bertrand J (Hydrap), 1992)

PRESENCE REGIONALE	SUBDIVISION CLASSIQUE DE LA MOLASSE	DESIGNATION LOCALE	EPAISSEUR [M]		AGE (MA)	ECHELLE INTERNATIONALE		
	Molasse d'eau douce			Molasse subalpine	5	MIOCÈNE	Tortonien Serravallien Langhien	" Tortonien "
Bulle et Guin	Molasse marine supérieure (OMM)				16.3		« Helvétien » supérieur	
					22.5		Burdigalien	
Guin	Molasse d'eau douce inférieure (USM)	Couche de Gérignoz	2500				Aquitarien	
		Couches de Chaffa	400			24		
		Couches de passage	0-30			30	OLIGOCÈNE	Chattien
Bulle et Guin	Molasse marine inférieure (UMM)	Grès de Vaulruz Marnes de Vaulruz	25-30 250		36	Rupélien		
		Formation de Cucloz					Lattorfien	

3.3.1 Région Bulle et La Tour-de-Trême

La géomorphologie du paysage actuel de la région de Bulle-La Tour-de-Trême est le résultat de l'action érosive des glaciers quaternaires associée à leurs dépôts morainiques, glaciolacustres ou fluvioglaciaires. La région de Bulle et La Tour-de-Trême se situe entre la bordure externe des Préalpes et la zone de contact avec le Plateau molassique. De manière générale, l'empilement des nappes allochtones, d'origine interne, chevauchent la Molasse autochtone en direction du NW.

La stratigraphie de la région de Bulle et la Tour-de-Trême est composée de :

- Quaternaire
- Molasse marine supérieure (OMM)
- Molasse marine inférieure (UMM)
- Ultrahelvétique (HEV : abréviation utilisée lors de cette étude)

L'histoire quaternaire de la région est principalement documentée par des observations, émanant du développement économique de la région et provenant notamment de l'implantation de sondes géothermiques, l'exploitation de gravières, de prospections géophysiques, de sondages destinés à la construction d'infrastructures routières (route de contournement de Bulle A189) qui fournissent de précieuses connaissances du sous-sol. Ces données sont collectées par différents bureaux privés ou collectivités publiques et leur existence n'est malheureusement pas toujours connue. Les sédiments quaternaires occupent une grande superficie de cette région, sous forme de dépôts glaciolacustres, fluvio-glaciaires, glaciaires ou alluviaux qui sont d'épaisseurs très variables, de 10 à 70 m environ. La complexité de leur géométrie et l'absence de datation rendent l'interprétation des terrains quaternaires très problématique.

Les géologues ont reconnu depuis longtemps les alternances de molasse marine et d'eau douce, qui sont le résultat des fluctuations du niveau marin et du mouvement vertical du paléobassin molassique. La molasse marine (OMM, UMM présentes dans cette étude) se caractérise généralement par des couches relativement épaisses de grès, d'argiles et de marnes bien stratifiées qui recèlent quelques fossiles (gastéropodes, bivalves).

Les principales informations concernant l'hydrogéologie de la région étudiée proviennent des synthèses de Pasquier & al. (1999) et sont présentes dans la notice explicative de la carte hydrogéologique au 1 : 100'000 de la feuille Sarine. En règle générale, tous les terrains à perméabilité élevée à moyenne, scellés par des couches imperméables, peuvent receler une nappe. C'est surtout le cas pour des dépôts fluvio-glaciaires et glaciolacustres, des alluvions anciennes, des cônes de déjection et dans une moindre mesure la moraine graveleuse. On notera la présence particulière d'une nappe d'eau souterraine s'écoulant vers le nord, au sein de la terrasse de Vuadens. Celle-ci est formée par la partie distale d'un ancien bras du cône de déjection de la Trême.

3.3.2 Région Guin-Tavel

Morphologiquement, on distingue les culminations qui sont en général des collines molassiques orientées généralement SW-NE, tandis que les dépressions appartiennent à des terrains quaternaires. Suite aux derniers mouvements orogéniques pliocènes, s'installe une longue période de pénéplation au cours duquel se forme un réseau fluvial. Les vallées se surcreusent et atteignent de grandes profondeurs estimées par endroit à 200 m. Au cours de la glaciation du Riss, le matériel sous-glaciaire colmate ces thalwegs. Puis, au cours de l'interglaciaire Riss-Würm, la Sarine et la Singine ont coulé dans des lits larges de centaines de mètres en confluant dans le bassin de Guin. Quant au bassin de Tavel, tout montre que les alluvions préwürmiennes sont contemporaines de celles de Fribourg. Simultanément, il se forme un lac dans le bassin de Tavel.

Les dépôts molassiques sont d'âge burdigalien pour la molasse marine supérieure (OMM) où les divers types pétrographiques diffèrent assez peu les uns des autres (grès avec intercalations de marnes). L'Aquitainien est représenté par la molasse d'eau douce (USM). De nature très variable, ces sédiments recèlent tous les termes pétrographiques compris entre les grès et les marnes. Les grandes assises gréseuses possèdent de grandes bigarrures, ce qui en fait leur particularité. Les variations latérales de ce faciès rendent malaisé l'interprétation de profils stratigraphiques, même sur de faibles distances.

L'hydrogéologie de cette région recèle essentiellement des aquifères constitués de dépôts fluvioglaciaires, semblables aux alluvions mais se différenciant par le fait que ce sont d'anciennes vallées périglaciaires qui ont été comblées et qui sont en grande partie sèches ou non exploitables pour l'eau potable. Les perméabilités sont élevées à moyennes en dehors des fonds de vallées. Souvent recouverte de moraine peu perméable, la nappe peut être mise en charge et présente par endroit un caractère artésien. Les eaux sont en général stockées en profondeur et de ce fait bien protégées contre une pollution de surface. Les roches molassiques constituent le deuxième type d'aquifère présent dans cette région. Seuls les grès appartenant à la Molasse d'eau douce inférieure et les grès de la Molasse marine supérieure peuvent contenir de l'eau en suffisance. L'altération superficielle provoque la dissolution du ciment calcaire sur une dizaine de mètres d'épaisseur, conférant ainsi à la roche une porosité d'interstices favorisant le stockage d'eau souterraine.

3.4 Implantation des sondes géothermiques verticales

3.4.1 Introduction et principe de base

Le potentiel géothermique des premières couches géologiques dépend fortement de la conductivité thermique du sous-sol et de la présence d'eau. Or, il n'existe de manière générale que peu de données précises disponibles en raison notamment de la difficulté des mesures. Lors de cette étude, l'ensemble des données (localisation des SGV existantes, géologie, hydrogéologie) ont été exploitées pour construire les différentes cartes visant à évaluer le potentiel géothermique régional. Les informations concernant les SGV existantes ainsi que la délimitation des zones de protection des eaux souterraines proviennent du Service de l'environnement du canton de Fribourg. L'extrait des cartes géologiques utilisées ont été délivrées par l'OFEG. La carte hydrogéologique est un extrait de la feuille « Sarine » à l'échelle 1 : 100'000.

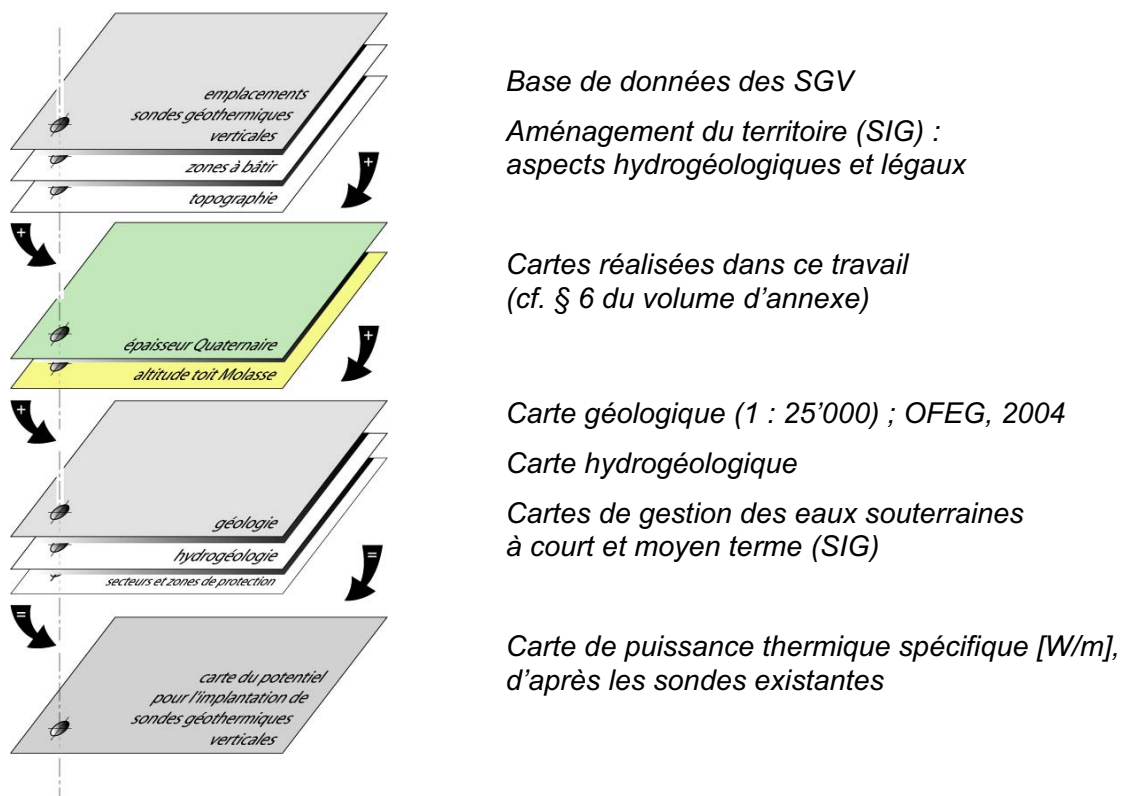


Figure 3.4.1 : Structure du SIG et superposition des critères sélectionnés par couches (layers)

Cette cartographie multiparamètres, appelé Système d'informations géographiques (SIG) a été réalisée avec le logiciel *ArcView*. Ce SIG se trouve sur le CD-R joint avec le rapport. Il constitue un outil d'aide à la décision, notamment en matière d'évaluation des demandes ainsi que pour la délimitation des zones favorables, respectivement défavorables lors de l'implantation de sondes géothermiques verticales. En comparaison d'une carte classique imprimée, ce type d'outil offre une plus grande souplesse d'utilisation, notamment dans le choix d'affichage des différentes couches (Figure 3.4.1) et permet une mise à jour des données quasi instantanée. Les cartes (layers) géologique et hydrogéologique sont, à l'heure actuelle, sous un format de type « image », c'est-à-dire, que l'utilisateur n'a pas la possibilité d'effectuer des requêtes au sein des différents horizons géologiques par exemples. Sitôt les versions digitalisées disponibles, il sera très aisé de les remplacer afin de pouvoir disposer d'un outil encore plus efficace.

3.4.2 Critères d'implantation

Plusieurs critères sont à prendre en considération avant toute démarche pour l'implantation d'une SGV. Ils peuvent être classés en deux catégories.

Critères imposés : contraintes dictées par les aspects législatifs

- Hydrogéologie La loi sur la protection des eaux souterraines (LEaux) ainsi que la loi sur l'environnement (LPE) interdisent toute implantation dans les zones de protection S1 et S2. Concernant la zone de protection S3, une étude géologique complémentaire peut être exigée par le Service de l'environnement afin d'estimer les risques éventuels encourus par l'implantation de ce type d'installation. Les critères diffèrent de manière très importante suivant le type d'aquifère présent, dépendant notamment de la perméabilité de celui-ci. S'il y a risque de court-circuit entre aquifères lors de la phase de forage, l'implantation de SGV est strictement interdite.
- Géotechnique La loi interdit de la même manière, toute implantation de SGV dans des zones classées comme instables. Ceci afin de prévenir tout risque de rupture de la sonde pouvant entraîner une pollution des eaux souterraines.
- Géologie S'il y a présomption de couches contenant du gaz (par ex. radon), ce qui est fréquent dans les grès molassiques subalpins. Aucune restriction particulière ne devrait restreindre l'autorisation d'exploiter des sondes géothermiques dans les formations pouvant contenir des couches gonflantes. Néanmoins, leur présence peut mettre en danger l'étanchéité de la sonde par écrasement du tube.
- Occupation du sol Contraintes liées à la surface de la parcelle (quartiers résidentiels, affectation du terrain).

Critères naturels : paramètres favorables à la performance d'une SGV

- Hydrogéologie La présence d'eau est un facteur très intéressant si la vitesse de migration de celle-ci n'est pas trop importante. Une perméabilité faible sera plus intéressante du point de vue thermique.
- Géologie Sous l'hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau, la puissance thermique spécifique de la Molasse est beaucoup plus importante que celle du Quaternaire (critère lithologique).

Autre outil d'aide à la décision : l'organigramme de décision

Il existe différents outils d'aide à la décision, notamment sous forme d'organigrammes, permettant l'évaluation des sites pour l'implantation de sondes géothermiques. Ce type de procédure tient compte de plusieurs critères permettant d'apprécier les caractéristiques du milieu où pourraient être implantés des SGV, ainsi que les impacts qu'auraient de telles installations sur les eaux souterraines. A ces paramètres viennent s'ajouter les lois et règlements visant à protéger les captages et les eaux souterraines (cf. Figure 5.2, volume d'Annexe).

3.4.3 Evaluation du potentiel thermique

Données lithologiques

Les unités géologiques rencontrées dans les zones étudiées forment les trois groupes suivants : **Quaternaire**, **Molasse** (divisée en Molasse marine supérieure, OMM ; Molasse marine inférieure, UMM et Molasse d'eau douce, USM) et **Ultrahelvétique** (seulement pour la région de Bulle-La Tour-de-Trême). Les différentes classes lithologiques sont basées sur des critères granulométriques. Cette classification est inspirée des travaux de Leu & al. (1999) et notamment du programme de calcul des propriétés thermiques du bassin molassique suisse SwEWS des mêmes auteurs.

Les données lithologiques sont issues des profils de forages, de qualité variable, interprétés par différents bureaux. Au total, 53 logs de forages pour la région de Bulle-La Tour-de-Trême et 164 logs de forages pour la région de Guin-Tavel, ont été dépouillés, interprétés et informatisés, soit au total 217 levés de forages. Pour chaque profil, la position des marqueurs principaux, soit l'altitude de la topographie, la base du Quaternaire qui est par définition égale à l'altitude du toit de la Molasse a été relevée.

Les dépôts quaternaires sont caractérisés par une granulométrie très variable et sans grande continuité latérale. Les dépôts molassiques sont souvent décrits de façon très approximative sans aucune indication granulométrique. Dans ce cas, il est difficile de distinguer différentes catégories. Le tableau 3.4.1 souligne les différences géologiques des deux régions étudiées.

Tableau 3.4.1 : Comparaison pour chaque commune des épaisseurs des trois grandes classes lithologiques définies

	QUATERNAIRE [m]			MOLASSE [m]			ULTRAHELVETIQUE [m]		
	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX	MIN	MOY	MAX
Bulle	10	48	117	0	65	168	0	46	76
Tour-de-Trême	2	63	104	0	49	53	26	47	69
Guin (Düdingen)	0	27	74	0	90	220			
Tavel (Tafers)	0	12	90	0	89	182			

La première étape fut donc de réinterpréter l'ensemble des logs lithologiques des forages en suivant cette classification et en s'inspirant de la littérature (Figure 3.4.2). Ceci constitue la base de données lithologiques comprenant pour chaque horizon, son épaisseur et son code lithologique correspondant (Q : Quaternaire ; OMM, UMM et USM : Molasse ; UHV : Ultrahelvétique). Les différentes étapes citées précédemment sont expliquées de façon plus détaillée dans le volume d'Annexe.

Commune: Bulle	N°: Bu_35
Coordonnées: 570'390/163'510/770	
Caractéristiques de la sonde	: 2 x 85 m
Année du relevé géologique	: 2003

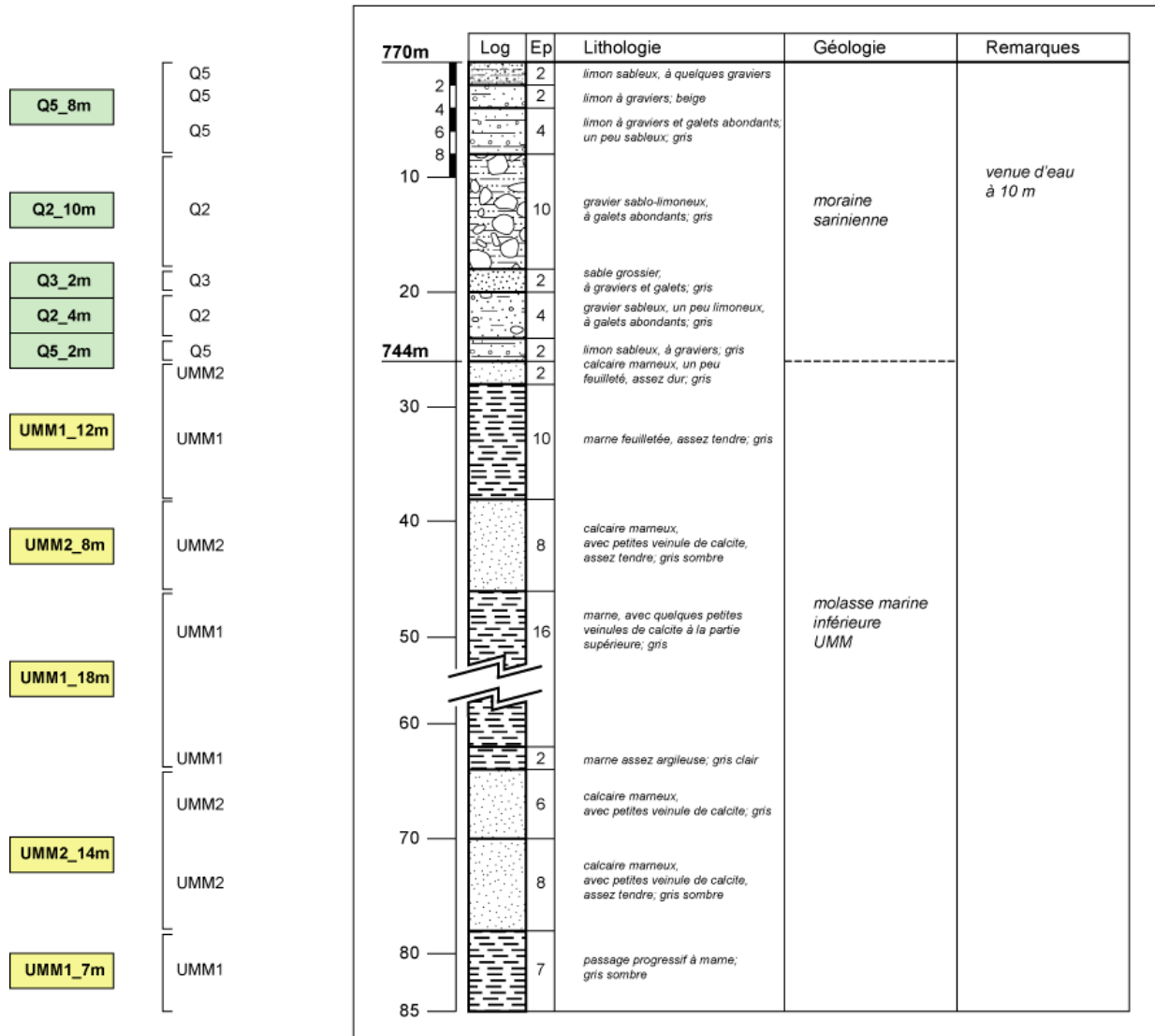


Figure 3.4.2 : Levé lithologique Bu_35 informatisé (échelle 1 : 500 ; ici réduite)

Conductivité thermique et puissance thermique de soutirage

Les valeurs de puissance thermique spécifique proposées sont tirées en partie de la littérature et d'autre part des mesures de Leu & al. (1999) dans la base de données du programme SwEWS. Il ressort que les valeurs des propriétés thermiques sont nettement plus élevées en présence d'eau dans le terrain. A noter que les valeurs au sein de la Molasse, les écarts de conductivité thermique sont très faibles.

La figure 3.4.3 montre la relation quasi linéaire qui existe entre la puissance thermique spécifique en [W/m] et la conductivité thermique en [W/mK] pour les roches habituellement rencontrée sur le bassin molassique suisse. La granulométrie des marnes étant faible à très faible, les circulations d'eau au sein de celles-ci sont très réduites et par conséquent la puissance thermique spécifique soutirable peu élevée.

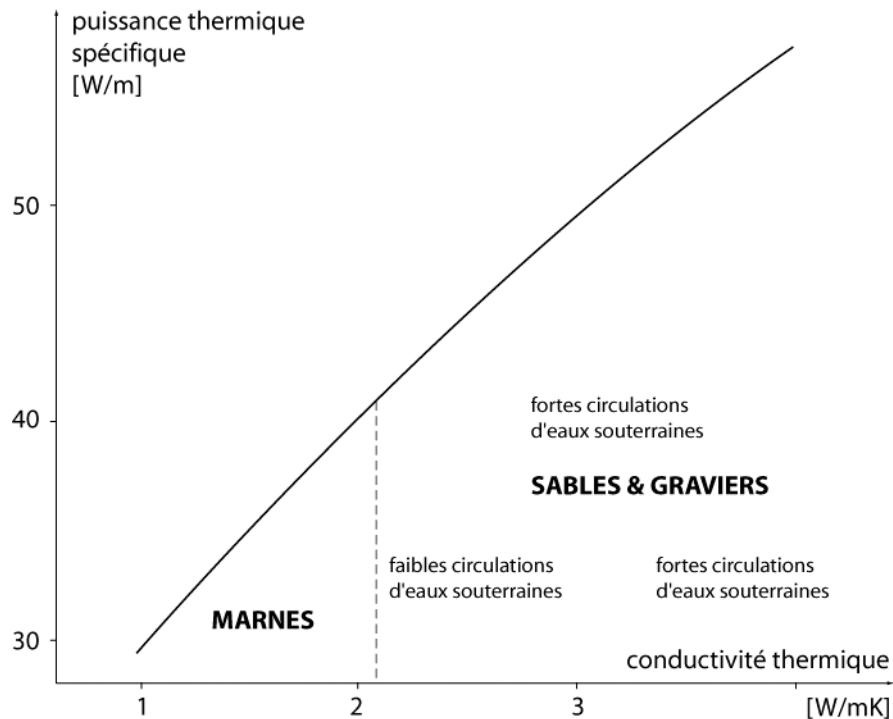


Figure 3.4.3 : Relation puissance thermique de soutirage-conductivité thermique (Sanner, 1999).

Comme mentionné précédemment, pour mieux caractériser le potentiel géothermique d’une région ou d’une future implantation de SGV, il est primordial d’estimer avec la plus grande précision possible, la puissance thermique spécifique de soutirage exprimée en [W/m] des horizons composant le sous-sol. Dans cette optique, un programme de calcul a été élaboré pour estimer ce paramètre, en tant qu’outil d’aide à la décision pour la planification et le dimensionnement d’installations géothermiques à faible profondeur.

Ce nouveau programme calcule de manière automatique les valeurs estimées de la puissance thermique spécifique [W/m] minimum et maximum. Il est possible d’évaluer ce paramètre soit pour l’ensemble des forages existants soit dans le but de dimensionner une future installation dont on connaît la lithologie (cf. § 5.3.3, volume d’Annexe).

3.5 Présentation des résultats

3.5.1 Région Bulle-La Tour-de-Trême

Le périmètre de la région Bulle-Tour-de-Trême initialement délimité par les coordonnées 568’000-575’000 et 160’000-166’000, a été réduit aux coordonnées 569’000-573’000 et 161’000-165’000 par souci de précision quant à l’extrapolation des différentes cartes réalisées. Ce nouveau domaine représente une surface de 16 km² totalisant 37 forages interprétés pour la commune de Bulle et 15 pour la commune de la Tour-de-Trême. La profondeur des forages varie entre 50 et 150 m et leur position est représentée sur la figure 3.5.1.

La carte des puissances thermiques spécifiques installées exprimées en [W/m] a été obtenue avec le programme de calcul réalisé dans cette étude. Le modèle est basé sur les valeurs de puissance minimale normalisées avec l’hypothèse d’horizons secs. En effet, le choix de ne pas intégrer les paramètres hydrogéologiques (venue d’eau dans le forage, niveau d’eau,..) est dû

au fait que ceux-ci ne sont malheureusement que rarement mentionnés sur le levé lithologique de forage, et seulement 30 % possèdent une information hydrogéologique.

Avec les seules données lithologiques prises en compte, il a été possible d'établir la carte de l'altitude du toit de la Molasse et celle de l'épaisseur du Quaternaire. En effet, la lithologie rencontrée au sein de la Molasse possède une conductivité thermique plus élevée et donc on cherchera à mettre en évidence les zones où l'épaisseur du Quaternaire est la plus faible possible (cf. § 5.4.2, volume d'Annexe).

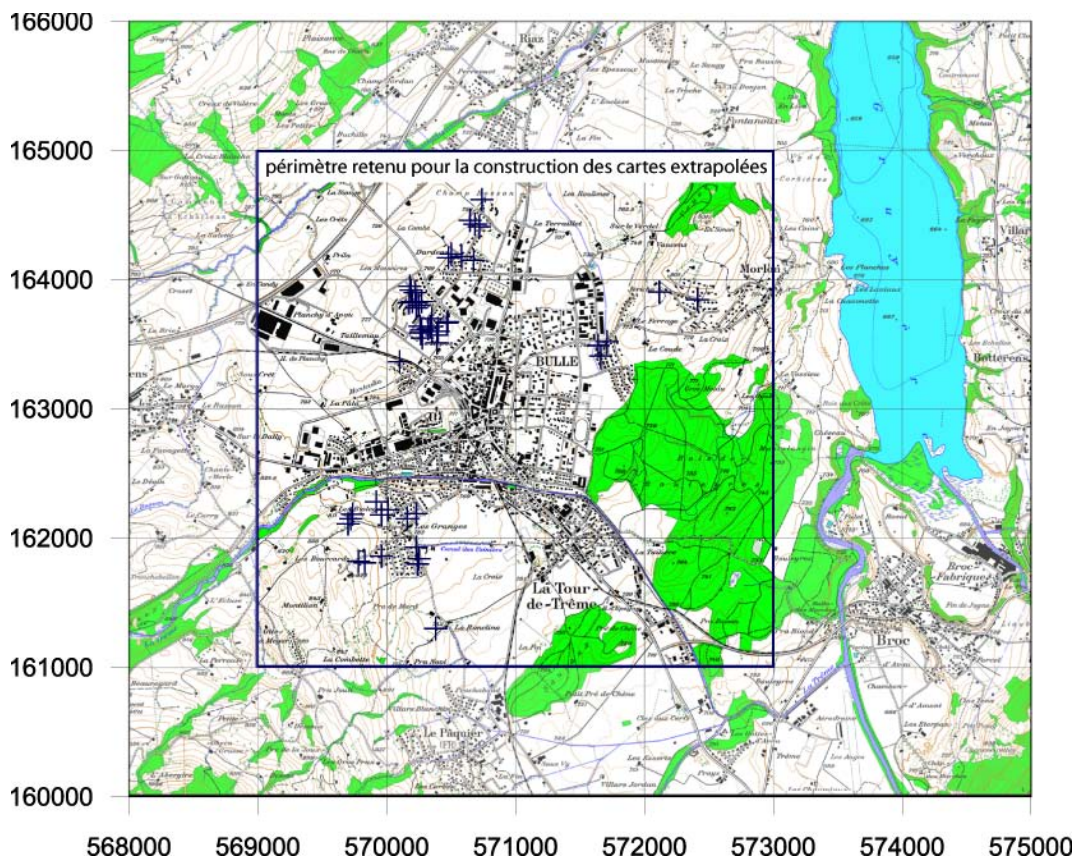


Figure 3.5.1 : Localisation des SGV existantes dans le périmètre retenu de Bulle - La Tour-de-Trême

Evaluation du potentiel thermique

Une première approximation du potentiel géothermique peut être déduite de l'influence de l'épaisseur du Quaternaire. Sur la figure 3.5.2, les zones de couleur rouge indiquent une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 35 m) et au contraire, les zones de couleur bleue symbolisent une épaisseur de Quaternaire plus importante (supérieure à 55 m). Selon les hypothèses mentionnées précédemment, de grandes épaisseurs de sédiments quaternaires sont nettement moins intéressantes du point de vue du potentiel thermique. De manière générale, cette région possède une couverture de Quaternaire assez importante (cf. Tableau 3.4.1) mais reste intéressante pour le développement de la géothermie de basse température, du fait que ces terrains quaternaires ont généralement un taux de saturation en eau élevé. Néanmoins, il serait préférable, de pouvoir forer à des profondeurs de l'ordre de 150 m afin d'assurer une bonne efficacité des SGV.

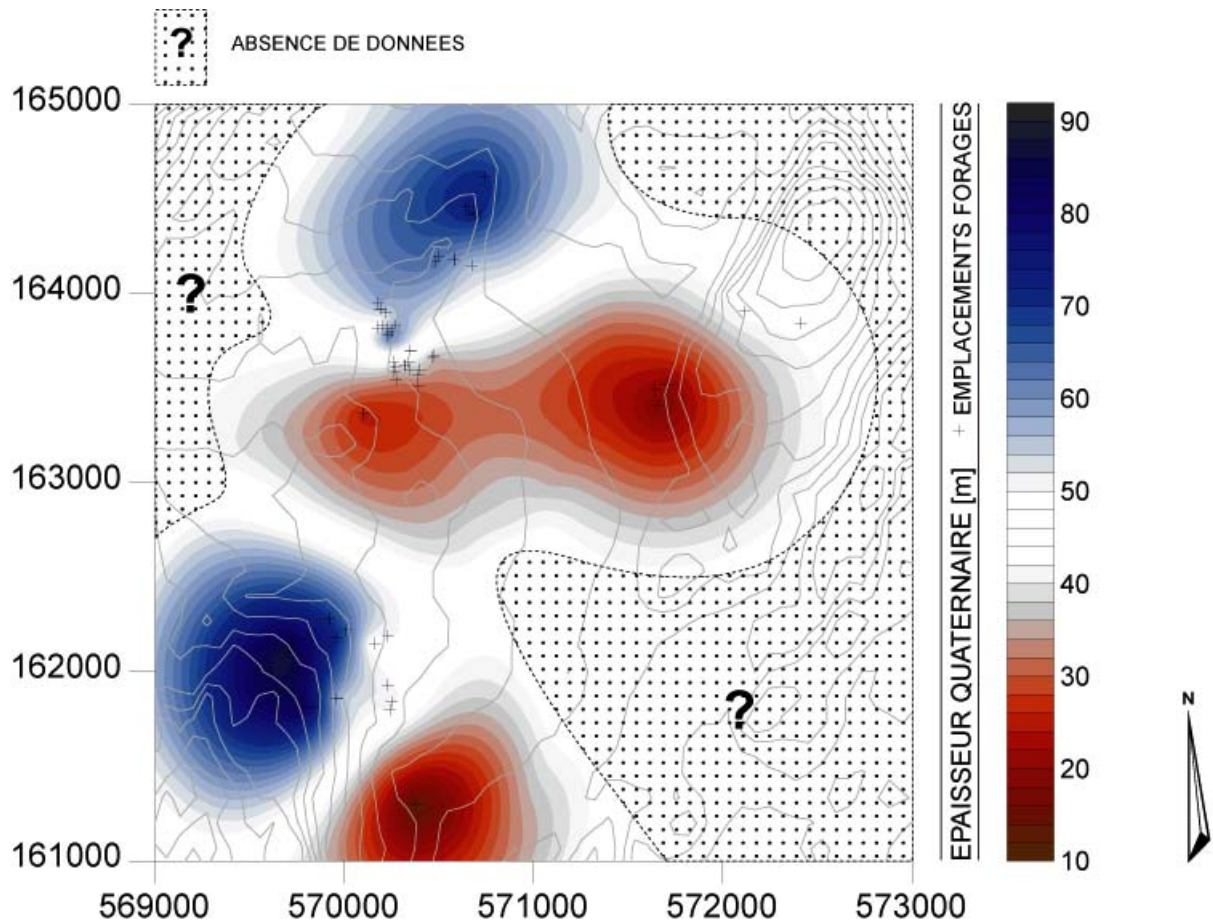


Figure 3.5.2 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : épaisseurs du Quaternaire

La figure 3.5.3 servant à l'évaluation du potentiel thermique à partir des épaisseurs du Quaternaire est similaire à celle de la figure 11 et représente les isolignes des épaisseurs. De manière générale, le variogramme obtenu reproduit bien les variations des données, à l'exception des données correspondant au lag compris entre 1'000 et 1'200. Ce « pic » peut être expliqué par le fait que les groupes de forages appartenant aux communes de Bulle et La Tour-de-Trême sont distants d'environ 1'000 m et qu'il n'y a aucun forage compris entre les latitudes 162'300 et 163'300. L'extrapolation dans ce secteur n'est donc pas de bonne qualité.

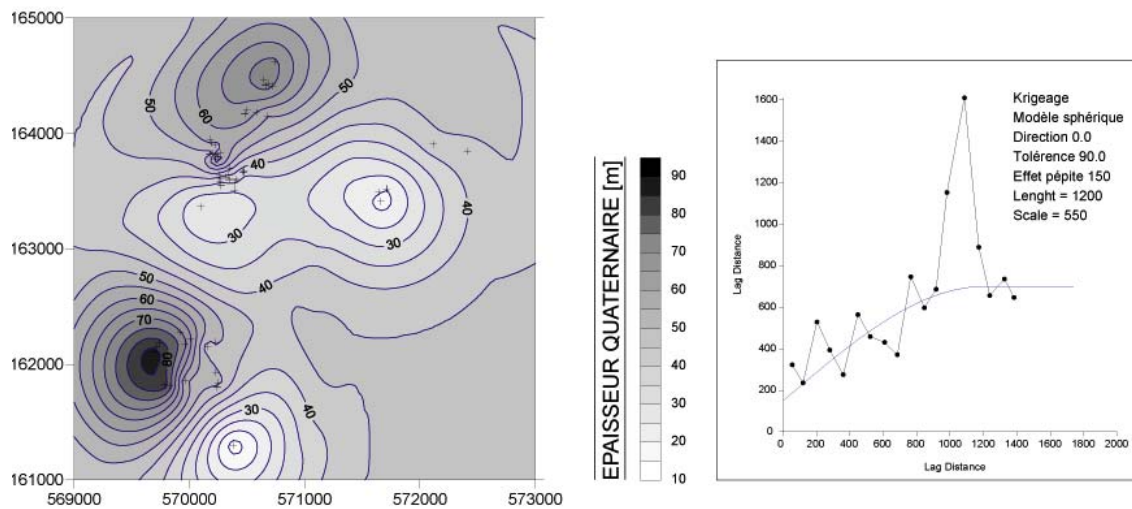


Figure 3.5.3 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire

Finalement, la carte représentant la puissance thermique spécifique installée par forage a également été construite à l'aide de l'outil géostatistique du krigeage (Figure 3.5.4). Deux paramètres importants sont à souligner concernant la construction de cette carte : la longueur de la sonde installée et la puissance thermique soutirée. Dans le but de réaliser une carte d'évaluation du potentiel thermique de cette région, les deux paramètres cités précédemment devraient être normalisés, ce qui est difficilement concevable, d'autant plus que l'on ne dispose jamais d'information sur la puissance thermique de chaque installation. Un formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation des SGV est proposé dans le chapitre 3.8 dans le but de disposer à l'avenir de cette information.

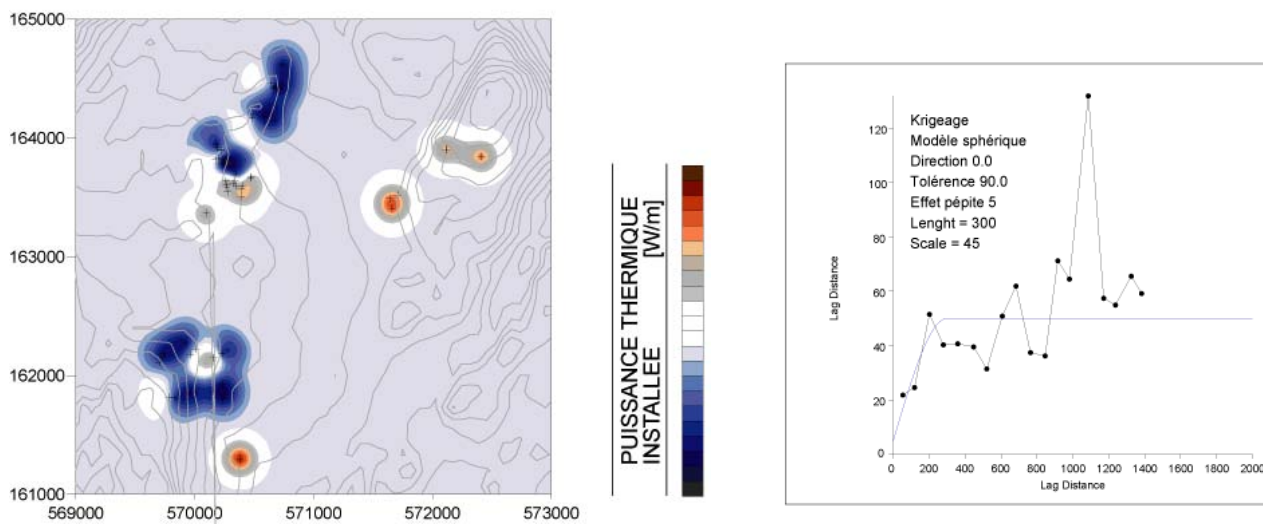


Figure 3.5.4 : Carte de la puissance thermique spécifique installée [W/m]

Cartes des contraintes liées aux eaux souterraines et à l'affectation des terrains

La carte des zones de protection (S0, S1, S2 et S3) représente une contrainte importante pour l'implantation de sondes géothermiques verticales (Figure 3.5.5). A ce jour, aucune SGV installée dans la région de Bulle - La Tour-de-Trême n'entrave les prescriptions en matière de protection des eaux souterraines. Néanmoins, une grande vigilance est nécessaire afin d'assurer le bon développement de ce type d'installations.

La carte d'évaluation du potentiel thermique est à mettre en relation avec la carte d'affectation du sol afin de délimiter les zones susceptibles d'être intéressantes pour le développement de cette forme d'énergie telles que les zones résidentielles ou industrielles.

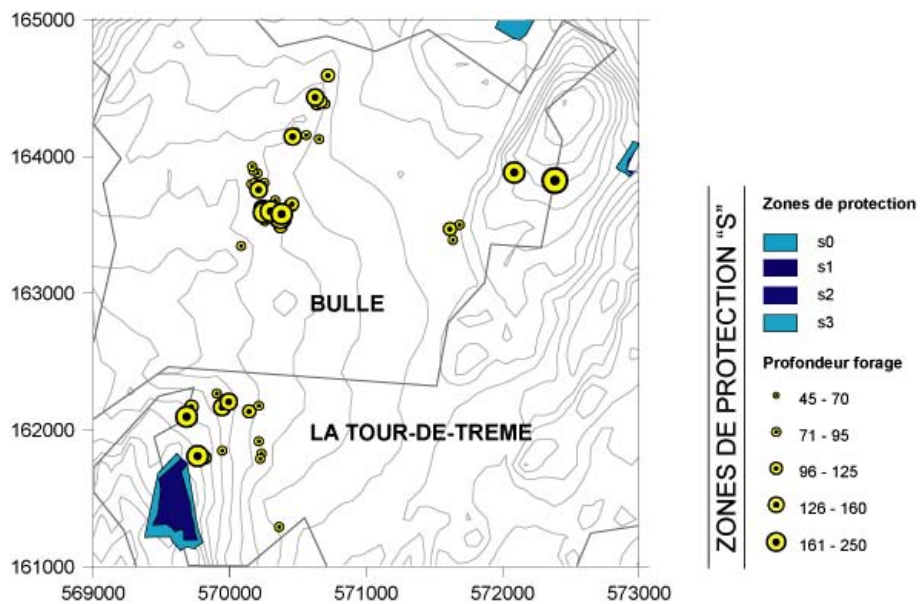


Figure 3.5.5 : Carte des contraintes liées aux zones de protection des eaux souterraines et emplacement des SGV

3.5.2 Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)

Le périmètre de la région étudiée Guin-Tavel (Düdingen-Tafers) initialement délimitée par les coordonnées X-577'000-585'000 et Y-185'000-193'000 a été réduite aux coordonnées X-579'000-585'000 et Y-183'000-192'000 pour construire les différentes cartes d'extrapolation. Ce nouveau domaine représente une surface de 54 km² totalisant 109 forages interprétés pour la commune de Guin et 55 pour la commune de Tavel. La profondeur des forages varie de 75 à 250 m et leur position spatiale est représentée sur la figure 3.5.6.

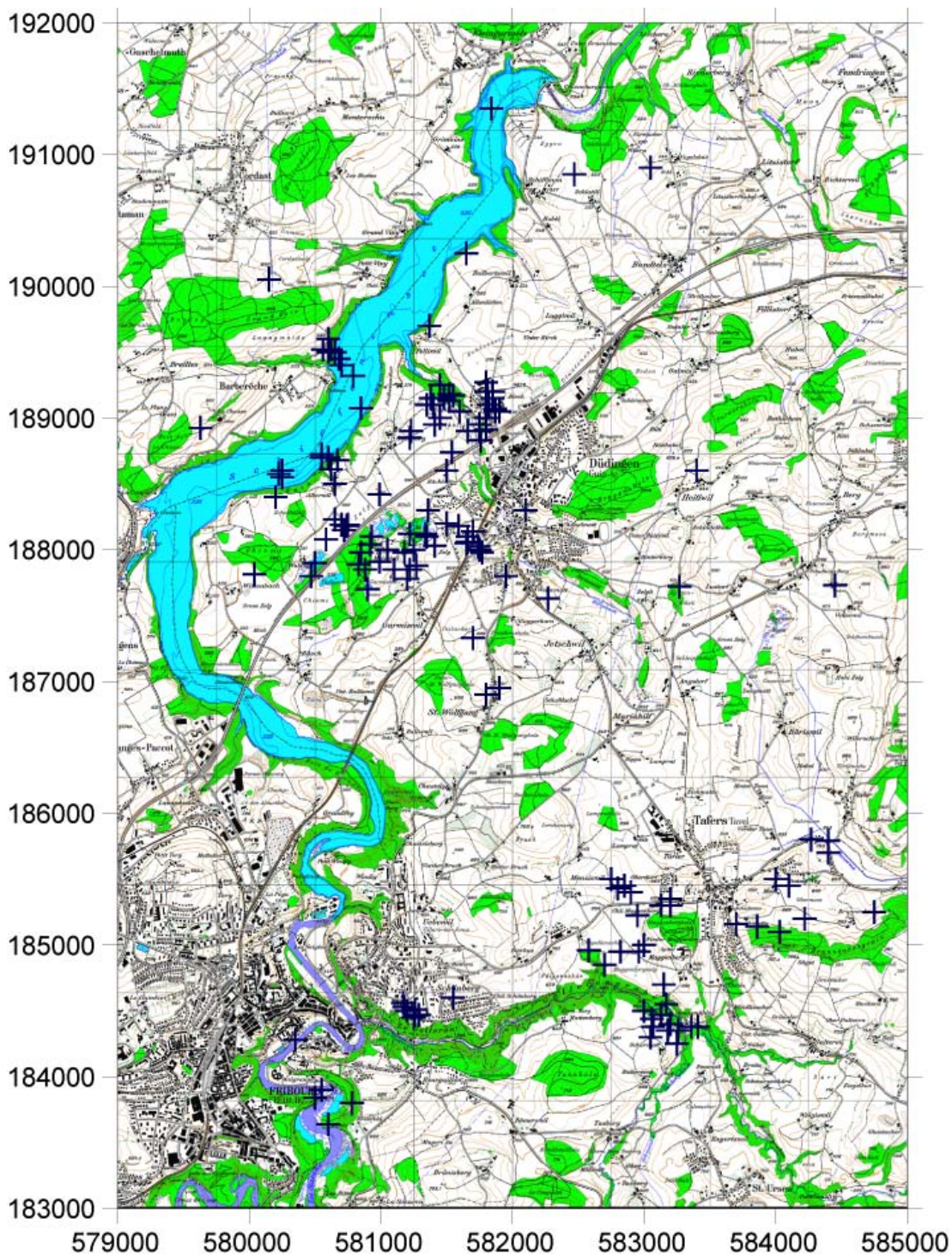


Figure 3.5.6 : Localisation des SGV existantes dans la région de Guin-Tavel

Evaluation du potentiel thermique

Comme discuté précédemment, l'épaisseur du Quaternaire est liée au potentiel thermique (cf. § 5.3, volume d'Annexe). Sur la figure 3.5.7, les zones de couleur rouge indiquent une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 20 m) et au contraire, les zones de couleur bleue symbolisent une épaisseur de Quaternaire plus importante (supérieure à 35 m). De manière générale, cette région possède une couverture de Quaternaire relativement peu importante, ce qui est très favorable pour le développement des sondes géothermiques verticales.

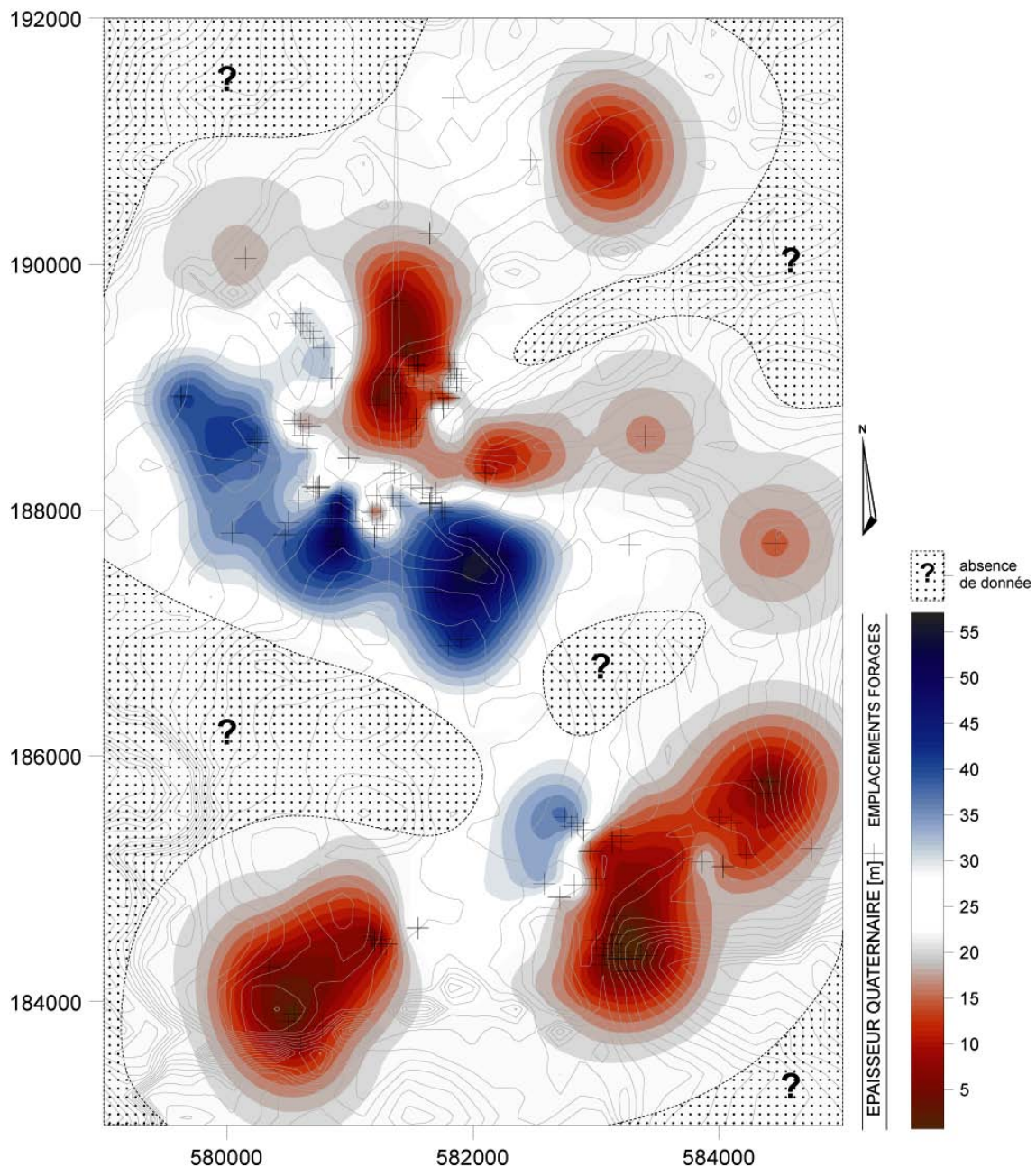


Figure 3.5.7 : Carte d'épaisseur du Quaternaire dans la région de Guin-Tavel

La figure 3.5.8 servant à l'évaluation du potentiel thermique est similaire à la carte de la figure 3.5.7 et représente les isolignes des épaisseurs de Quaternaire. Le variogramme obtenu reproduit bien les variations des données.

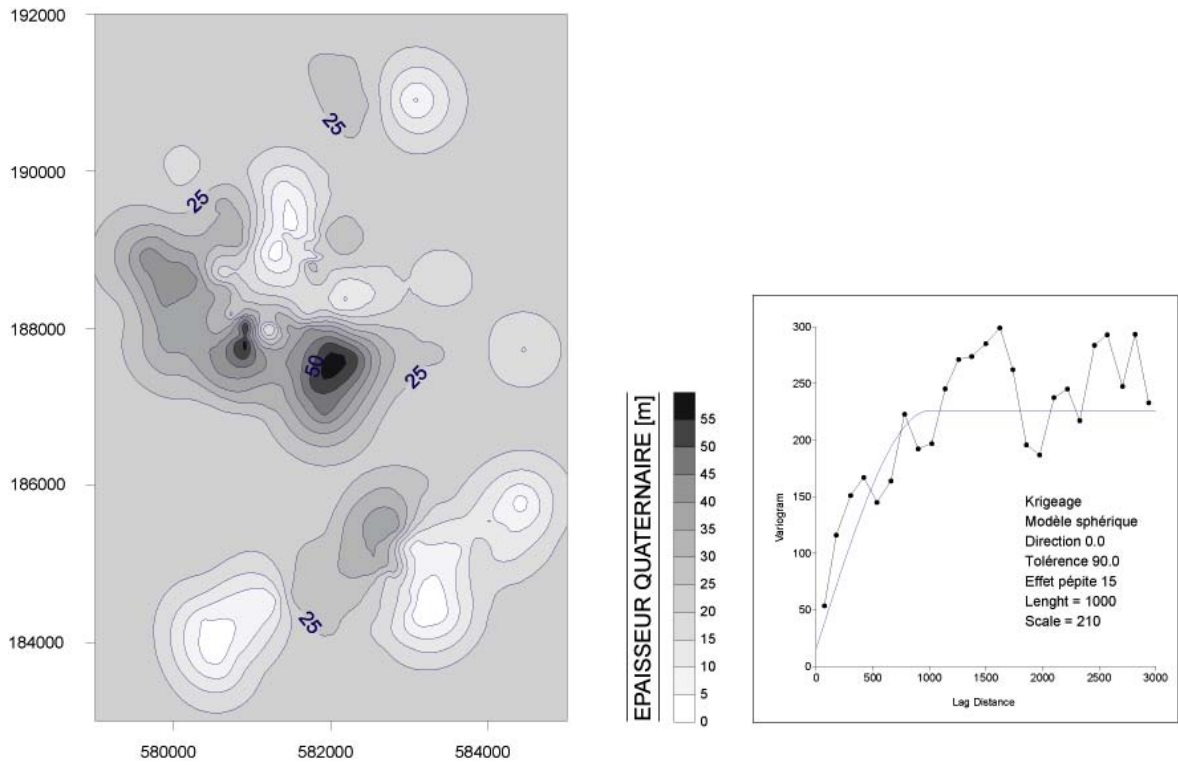


Figure : 3.5.8 : Carte servant à l'évaluation du potentiel thermique : isolignes des épaisseurs du Quaternaire

La carte des épaisseurs de Quaternaire (Figure 3.5.8) se corrèle bien avec la carte de la puissance thermique installée (Figure 3.5.9). Une épaisseur importante (> 45 m) de Quaternaire, symbolisée par les teintes bleues est apparemment moins intéressante thermiquement. Ceci est en accord avec la description géologique que l'on dispose sur cette région.

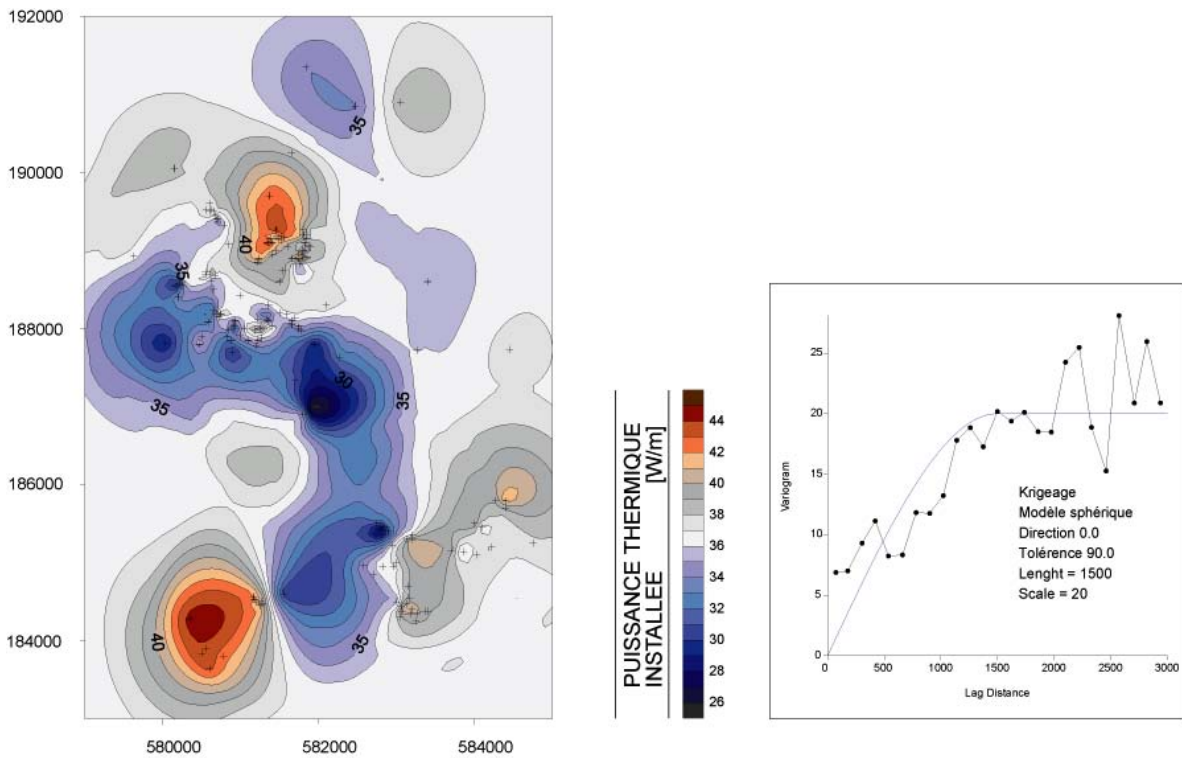


Figure 3.5.9 : Carte de la puissance thermique spécifique installée [W/m]

En effet, au cours de l'interglaciaire Riss-Würm, la Sarine et la Singine ont coulé dans des lits larges déposant plusieurs mètres d'alluvions préwürmiens. Malgré le manque d'informations hydrogéologiques, il est raisonnable d'évoquer la présence d'horizons saturés en profondeur qui redonne de l'intérêt au potentiel géothermique de cette zone.

Les cartes des zones de protection des eaux souterraines et d'affectation du sol sont utilisées dans le but de délimiter les zones (zones résidentielles ou industrielles) susceptibles d'être intéressantes pour le développement des sondes géothermiques verticales (Figure 3.5.10).

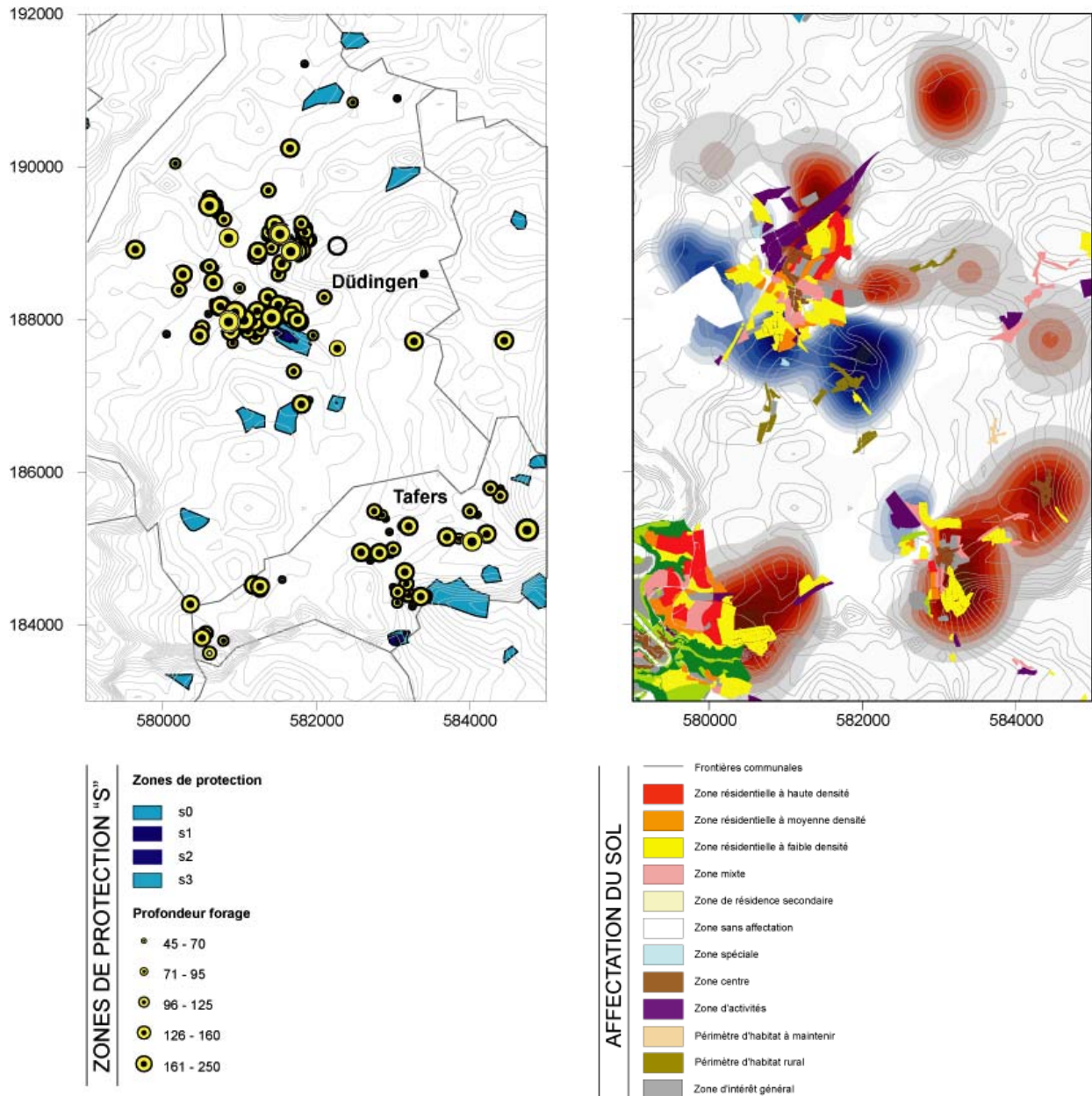


Figure 3.5.10 : Cartes des zones de protection et d'affectation du sol

3.6 Interprétation des résultats

La première étape de recherche des zones thermiquement favorables pour l'implantation de sondes géothermiques verticales est la construction de cartes représentant l'épaisseur du Quaternaire. En effet, les valeurs de puissance thermique spécifique sont plus faibles que dans la Molasse, en faisant l'hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau. Un variogramme a préalablement été réalisé pour chaque carte afin de déterminer le ou les modèles à appliquer à la méthode d'extrapolation utilisée, en principe le krigeage.

Les cartes représentant la puissance thermique spécifique installée [W/m] ont été réalisées en prenant comme hypothèse simplificatrice que toutes les formations sont dépourvues d'eau. En effet, nous ne disposons pas suffisamment de données hydrogéologiques. Celles-ci sont non seulement éparses mais de qualité très discutable et l'erreur ainsi engendrée a été minimisée en choisissant de les écarter du calcul. De ce fait, les valeurs de puissance thermique spécifique correspondent à des grandeurs minimum que l'on peut qualifier de valeurs conservatrices. Une étude plus approfondie sur le plan hydrogéologique permettrait de préciser ces puissances. Le tableau 3.6.1 présente la puissance thermique obtenue par le programme de calcul pour chaque unité géologique (Quaternaire, Molasse et Ultrahelvétique) et pour chaque commune.

Tableau 3.6.1 : Comparaison par commune des puissances thermiques spécifiques extractibles [W/m]

	QUATERNAIRE		MOLASSE		ULTRAHELIVETIQUE	
	MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
Bulle	20.0	21.7	42.2	45.6	41.5	45.4
Tour-de-Trême	20.3	22.0	40.4	43.9	41.8	45.2
Guin (Düdingen)	20.2	21.6	42.3	46.3	-	-
Tavel (Tafers)	19.7	21.0	41.0	44.9	-	-

Les valeurs de puissance thermique spécifique ne présentent pas de différence significative entre les deux zones étudiées. Les résultats obtenus sur la base des données disponibles montrent de bonnes corrélations entre l'épaisseur du Quaternaire et le potentiel thermique. L'utilisation d'un outil géostatistique (krigeage) pour construire les différentes cartes permet, dans une certaine mesure, de réduire l'effet des variations spatiales des données. Néanmoins, pour l'interpolation de la puissance thermique spécifique installée, le modèle ne semble pas tenir compte de la répartition spatiale de cette propriété. Cette remarque concerne principalement la région d'étude de Bulle-La Tour-de-Trême. En effet, l'interpolation des épaisseurs de Quaternaire reproduit bien les variations proches des données, mais au fur et à mesure que l'on s'éloigne des forages, on tend vers une valeur moyenne extrapolée (pic prononcé au lag = 1100). Ces zones sont mentionnées sur les différentes cartes par un « ? » et ne doivent en aucun cas prises en considération.

3.6.1 Région Bulle-La Tour-de-Trême

De manière générale, les données sont bien corrélées hormis pour la carte de « puissance thermique spécifique » qui montre une forte variabilité aux environs du Lag = 1000. Ceci correspond à la demi-distance qui sépare les deux communes, par conséquent la localisation des forages. En effet, on distingue une zone sans forage, pour la zone de latitude 163'000.

Deux zones se distinguent par une épaisseur de Quaternaire relativement faible (inférieure à 30 m). La première se situe à la latitude 163'400 environ et couvre la partie sud de la commune de Bulle et la deuxième se situe au sud-ouest de la commune de la Tour-de-Trême.

Le fait que la carte du toit de la Molasse est très similaire à la carte d'épaisseur du Quaternaire, peut signifier que le remplissage quaternaire est plus important dans les vallées creusées au sein de la Molasse et vice-versa.

Les périmètres des zones de protection des eaux souterraines sont relativement restreints dans cette région et n'entravent que très légèrement l'implantation des SGV.

En disposant des informations précédentes et de la carte d'affectation du sol, cela permet de cibler les zones où la promotion des sondes géothermiques verticales serait la plus prometteuse. Une zone résidentielle à faible densité située à l'extrême est de Bulle est notamment très propice pour leur implantation.

3.6.2 Région Guin-Tavel (Düdingen-Tafers)

De la même manière, on a cherché à mettre en évidence l'épaisseur du Quaternaire afin de décrire le potentiel géothermique de cette région. Une zone relativement bien définie apparaît au sud de Guin, qui se corrèle bien avec la géologie actuelle ainsi que l'histoire quaternaire de cette région. La densité de forages est plus importante pour cette région et le variogramme utilisé permet d'affirmer que la corrélation des données est de bonne qualité.

Les zones de protection sont, pour cette région, beaucoup plus importantes et nécessitent une attention particulière lors des demandes d'autorisation pour l'implantation de nouvelles SGV. On remarquera qu'un forage (coordonnées 581'900/186'800) est situé en zone S3, ce qui peut être autorisé sous certaines conditions.

Les zones résidentielles situées au sud de la commune de Tavel sont des zones où l'épaisseur du Quaternaire est faible (de 0 à 20 m) et donc potentiellement plus intéressantes thermiquement. La même remarque peut être faite pour les quartiers situés au NE de Guin.

3.7 Discussion et conclusion

3.7.1 Autres démarches

Les données disponibles et intégrées dans ce travail montrent une corrélation intéressante entre l'épaisseur du Quaternaire et la puissance thermique spécifique. Une modélisation basée sur un modèle lithologique permettrait de préciser cette corrélation.

Dans cette optique, un programme de recherche géothermique, mandaté par l'Office fédéral de l'énergie est actuellement mené dans le nord de la Suisse (Andermatten & Kohl, 2003). Ce projet vise à développer des instruments pour évaluer le potentiel géothermique en recensant toutes les données disponibles comme les forages existants (avec tests, mesures et analyses effectuées), les données sismiques et les campagnes de géophysique. Le but de ce projet est notamment de construire un modèle 3D de la conductivité thermique à faible profondeur (300 m) dérivé d'un modèle lithologique.

3.7.2 Conclusion de l'étude

Le but initial du travail à savoir, la mise au point d'un système d'informations géographiques a été réalisé et permet à l'utilisateur de disposer d'un outil d'aide à la décision pour l'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV). Néanmoins, son utilisation reste limitée concernant le domaine des requêtes spatiales, car les cartes utilisées ne sont à l'heure actuelle pas encore numérisées. La carte géologique au 1 : 25'000, en préparation à l'OFEG, devrait être sous format SIG au début de l'année 2005.

La création du programme de calcul permettant d'évaluer la puissance thermique spécifique soutirable en W/m comme outil de quantification du potentiel géothermique et de dimensionnement des SGV offre des perspectives intéressantes. Son développement, en collaboration avec les principaux intéressés, permettrait une optimisation du coût d'une SGV en fonction du rendement et de son fonctionnement.

Les recommandations données au chapitre 3.8 font état du manque flagrant de données hydrogéologiques. En effet, seuls 30 % des forages réalisés dans la région de Bulle-La Tour-de-Trême possèdent une information hydrogéologique et seulement 4 % pour ceux réalisés dans la région de Guin-Tavel. Il est donc souhaitable de combler cette lacune afin d'améliorer la valeur des décisions en matière d'implantation, mais aussi de dimensionnement des SGV pour garantir leur développement durable.

3.8 Recommandations

3.8.1 Demande d'autorisation

La première recommandation est la création et l'utilisation d'un formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation de sondes géothermiques verticales. Son but est d'améliorer la qualité des données et de pouvoir les utiliser comme outil d'aide à la décision en se basant sur l'expérience des installations existantes et de pouvoir ainsi disposer des informations nécessaires pour évaluer, de façon plus précise, le dimensionnement des installations futures en tenant compte des besoins recherchés. Ce formulaire pourrait être mis en liaison avec la fiche d'information du forage (cf. § 5.3.4, volume d'Annexe) via la base de données générales, afin que l'utilisateur puisse accéder directement à la totalité des informations concernant le forage de la SGV installée.

Cette proposition de formulaire devrait être discutée avec l'ensemble des personnes et des services concernés afin de disposer des informations nécessaires et utiles. Un exemple de formulaire de demande d'autorisation pour l'implantation d'une SGV est proposé dans la figure 3.8.1.

3.8.2 Protocole de forage

La seconde recommandation est la création et l'utilisation généralisée d'un protocole de forage basé sur l'automatisation du codage de la lithologie. Ce fichier a spécialement été conçu sur *Excel* afin de lier ces informations à la base de données lithologiques. Il pourrait être mis à disposition du foreur, respectivement du géologue et complété par ses propres soins (Figure 3.8.2).

La classification étant basée principalement sur la granulométrie, on distingue immédiatement le profil granulométrique. Un accent pourrait être mis sur la nécessité de mentionner le maximum d'informations hydrogéologiques lors de la phase de forage.

FORMULAIRE DE DEMANDE D'AUTORISATION POUR L'IMPLANTATION DE SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES


SERVICE RESPONSABLE
SERVICE DE L'ENVIRONNEMENT DU CANTON DE FRIBOURG

> **REQUERANT**
NOM [] COMMUNE []
ADRESSE [] TELEPHONE []

> **LIEU D'INSTALLATION**
PROPRIETAIRE [] TELEPHONE []
COMMUNE [] PARCELLE []
COORDONNEES X [] Y [] Z []

> **INSTALLATEUR CHAUFFAGE**
NOM []
ADRESSE [] TELEPHONE []

> **BUREAU GEOLOGUE**
NOM []
ADRESSE [] TELEPHONE []



UNIVERSITE
de Fribourg

NOV [] TELEPHONE []
ADRESSE []

> **RENDIMENT PREVU (COP)** []

> **PUISSANCE/METRE COURANT** [W/m] []

> **TYPE LIQUIDE CALOPORTEUR** [] PROPYLENE GLYCOL

> **TYPE DE SONDE** []

> **NOMBRE DE SONDES** []

> **LONGUEUR SONDE** [m] []

> **DIAMETRE SONDE** [mm] []

SECURITE ET INSTALLATION DE LA POMPE A CHALEUR

> **FURNISSEUR PAC** []

> **TYPE DE PAC** []

> **PUISSANCE POUR CHAUFFAGE** [kW] []

> **PRODUCTION EAU CHAUDE** OUI []

> **PUISSANCE POUR EAU CHAUDE** [kW] []

> **CONSOMMATION ANNUELLE** [MWh] []

> **RENDIMENT ANNUEL** [-] []

> **COMBUSTIBLE POUR LA PAC** []

> **QUANTITE DE LIQUIDE REFRIGERANT** [l] []

> **PLAN DE SITUATION AU 1:25000 (EXTRAIT DE PLAN CADASTRAL) AVEC LOCALISATION DE L'INSTALLATION PREVUE**

PIECES JUSTIFICATIVES JOINTES A LA DEMANDE

> **PREAVIS DE L'AUTORITE CANTONALE**

> **NO REQUETE** []

> **DECISION** []

> **JUSTIFICATION** []

> **PLAN DE SITUATION AU 1:25000 (EXTRAIT DE PLAN CADASTRAL) AVEC LOCALISATION DE L'INSTALLATION PREVUE**

DONNEES GENERALES

> **ETAT DU BATIMENT** [] ANCIEN []

> **TYPE DE BATIMENT** [] PUBLIC []

> **VOLUME CONSTRUIT (SIA)** [m³] []

> **ANNEE DE CONSTRUCTION** []

CHAUFFAGE

> **BESOIN EN CHALEUR** [kW] [] SELON NORMES SIA

> **% PREVU DES BESOINS** [%] []

> **CHAUFFAGE APOINT** []

EAU CHAUDE SANITAIRE

> **% PREVU DES BESOINS** [%] []

> **ENTREPRISE FORAGE**

NOM [] TELEPHONE []

ADRESSE []

DONNEES SUR LE LIEU D'IMPLANTATION DE LA SONDE

Figure 3.8.1 : Présentation de la feuille « Excel » du formulaire de demande d'autorisation

3.9 Synthèse et perspectives

Le développement des différents outils mentionnés dans ce travail ainsi que les recommandations citées précédemment permettent d'atteindre les buts visés par ce travail. Néanmoins, la détermination des zones favorables à l'implantation de SGV s'avère plus complexe que prévue, notamment en ce qui concerne la validation des données. Cette étude réalisée dans le domaine de l'utilisation de la géothermie de basse énergie et plus précisément de l'implantation de sondes géothermiques verticales en est encore à un stade préliminaire. Les différentes étapes suivies lors de ce travail sont résumées dans un organigramme (Figure 3.9.1). Les liaisons des différentes étapes réalisées dans ce travail sont symbolisées sur cet organigramme par des flèches pleines alors que les liaisons projetées ou recommandées sont en traits interrompus.

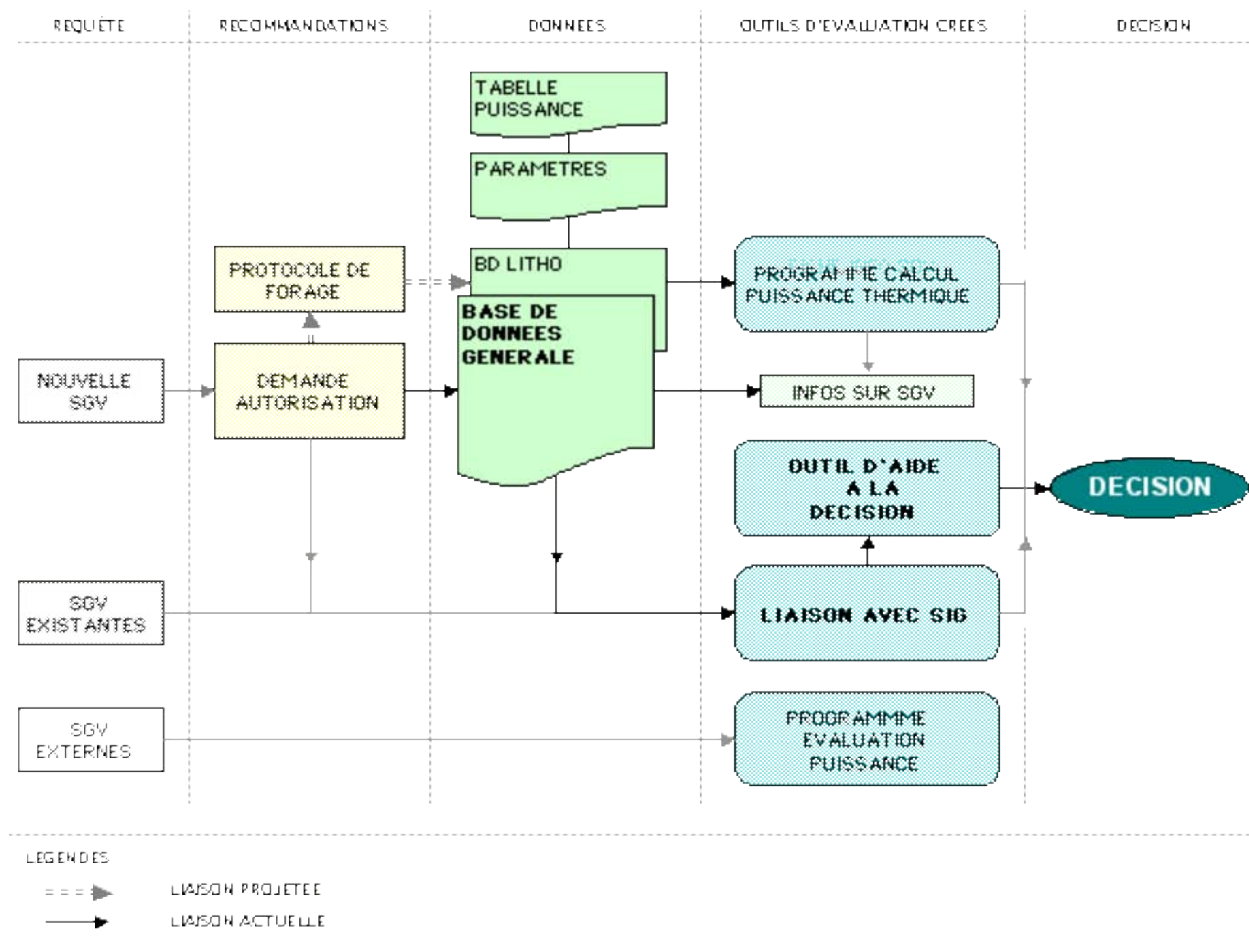


Figure 3.9.1 : Organigramme de synthèse des liaisons entre les différentes étapes traitées dans ce travail (SGV = sonde géothermique verticale ; BD = base de données ; SIG = Système d'informations géographiques)

L'élaboration d'une carte de potentiel thermique et plus précisément d'une carte de puissance spécifique nécessite de disposer de plusieurs paramètres indispensables, aussi bien lithologiques qu'hydrogéologiques.

Perspectives à l'échelle du canton

Le fort développement des installations de sondes géothermiques destinées à chauffer des habitations démontre l'intérêt grandissant porté à cette technologie. Or, cette forme de ressource géothermique n'est pas dépourvue de tout risque pour l'environnement. De plus, un certain nombre d'interrogations quant à la durée de vie de ce type d'installations ne sont, à l'heure actuelle, que partiellement élucidées. Néanmoins, des simulations sur la base de données réelles mesurées ont été entreprises, notamment concernant le risque de refroidissement du sous-sol après une certaine durée d'exploitation et sont disponibles dans la littérature. Conjointement, l'impact d'une densité trop importante d'installations par unité de surface met en évidence la problématique de la régénération du flux de chaleur en profondeur (recharge thermique du sous-sol pendant l'été).

L'assurance d'un développement durable des sondes géothermiques verticales nécessite l'application de certains outils, notamment un protocole de forage visant à homogénéiser la description lithologique pour assurer la qualité des données géologiques et hydrogéologiques. L'accent devrait être également mis sur l'utilisation d'un formulaire de demande d'autorisation précis, comprenant toutes les informations nécessaires concernant l'implantation de l'installation projetée. Finalement, l'assurance de ce développement n'est possible que par la mise à jour régulière des données lithologiques et hydrogéologiques acquises lors des forages, soit lors d'études diverses (travaux de diplôme, thèses, cartographie). Cette base de données est une source d'informations nécessaires qui constitue, non seulement un outil de décision mais également de quantification pour l'implantation optimale des sondes géothermiques verticales et le développement durable des futures installations géothermiques de basse température dans le canton de Fribourg.

Lors de la réalisation de cette évaluation du potentiel géothermique, le projet de reconstruction de l'Ecole des Métiers sur le plateau de Pérolles à Fribourg a été attribué à un bureau d'architectes et les travaux devraient commencer au deuxième semestre 2005. L'Etat de Fribourg a décidé qu'il s'agirait d'un bâtiment de type Minergie et une étude des besoins en chaleur et en froid de cette future école a démontré l'intérêt d'utiliser le sous-sol pour produire la chaleur pendant la saison de chauffage et le froid pour la période de rafraîchissement. Par conséquent, c'est un champ de sondes géothermiques verticales qui sera réalisé dans ce but. Le groupement PGF a proposé d'évaluer le potentiel d'une première sonde géothermique afin de dimensionner avec précision l'ensemble du champ de sondes. Un programme comprenant un test de réponse thermique et une simulation de l'ensemble du champ de sondes a été établi. Le Laboratoire de mécanique des sols de l'EPFL exécutera le test de réponse thermique et le Laboratoire Energia Ecologia Economia de la HES tessinoise SUPSI se chargera de la simulation.

3.10 Références

- Andenmatten N. & Kohl T., 2003. Assessment and evaluation of geothermal potential in Switzerland – Rapport annuel, Commission Suisse de Géophysique, 70 pp.
- Bertrand J., 1992. Sondage géothermique à Bulle, résultats et enseignements. Rapport Hydrap, 16 pp.
- Rybach L. & Sanner B., 2000. Ground-source heat pump systems, the European experience. GHC Bulletin, March 2000, 11 pp.
- Labhart T. & Decrouez D., 1997. Géologie de la Suisse. Ed. Delachaux et Niestlé. 211 pp.
- Leu W., Keller B., Matter A., Schärli U. & Rybach L., 1999. Geothermische Eigenschaften Schweizer Molassebecken (Tiefenbereich 0-500 m) – Datenbank Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Gesteinsdichte und Porosität. – Bericht Bundesamt für Energie, 79 pp.

Pasquier F., Bouzelboudjen M. & Zwahlen F., 1999. Notice explicative de la carte hydrogéologique de la Suisse - feuille Sarine au 1 :100'000.

Sanner B., 1999. Kann man Erdwärmesonden mit Hilfe von spezifischen Entzugsleistungen auslegen? Geothermische Energie, 26/27, 1-4.

- http://www.fr.ch/ste/plan_sectoriel.pdf
- <http://www.fr.ch>
- <http://www.geothermal-energy.ch/fr/svg/svg.htm><http://www.geoheat.oit.edu/>
- <http://www.pac.ch>

4. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)

4. RESSOURCES EN AQUIFERES PROFONDS (AP)

4.1 Introduction – Méthode de travail

Si des remontées d'eau thermale (> 25° C) existent par exemple dans le canton de Vaud ou en Valais, aucune manifestation de ce genre n'est connue dans le canton de Fribourg et aucun forage n'exploite actuellement cette ressource profonde. Cette situation n'a donc jamais, jusqu'à maintenant, motivé l'évaluation et l'exploration systématiques des ressources géothermiques dans le sous-sol fribourgeois. Pour répondre aux nouveaux objectifs énergétiques du canton et afin de palier à ce manque d'information, l'évaluation des ressources géothermiques en aquifères profonds (AP) présentée ici constitue une approche préliminaire et minimaliste. Elle est uniquement basée sur les données à disposition, très lacunaires à l'échelle du canton. Malgré quelques interprétations de la géologie profonde, liées aux explorations pétrolières et à la réinterprétation des lignes sismiques dans le cadre de recherches scientifiques, aucun but géothermique ou hydrogéologique n'était jusqu'alors considéré dans ces projets.

La méthodologie de travail utilisée dans cette étude est largement inspirée du rapport correspondant pour le canton de Vaud (PGV), réalisé en 2003. Elle a suivi les points suivants :

- compilation de la documentation existante : caractéristiques des projets AP, géologie, hydrogéologie, données pétrolières, forages profonds (≥ 250 m) situés sur le territoire cantonal et dans les régions limitrophes ;
- élaboration de cartes synthétiques sur la géologie et la tectonique du canton, sur la localisation des données pétrolières ainsi que sur certains résultats liés au traitement de ces données ;
- évaluation des ressources géothermiques sur la base des connaissances acquises lors des étapes précédentes et potentiel de projets AP à l'horizon 2020.

4.2 Exploitation des aquifères profonds (AP)

4.2.1 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 diverses fins de chauffage selon le principe de l'utilisation en cascade thermique.

Par définition et de manière arbitraire, on limitera les ressources des AP du canton de Fribourg à un domaine de **profondeur compris entre 300 et 3'000 m**. En considérant un gradient géothermique moyen de 3° C/100 m, la profondeur de 300 m permet d'atteindre des températures de l'ordre de 20° C alors qu'elles seront d'environ 100° C à 3000 m. Des températures supérieures peuvent parfois être rencontrées dans les milieux fissurés encore plus profonds si des remontées d'eau chaude sont interceptées par un forage.

Le but d'une opération géothermique en AP est donc de capter de l'eau au sein d'aquifères suffisamment perméables et chauds pour en permettre une exploitation économiquement rentable.

4.2.2 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 électrique immergée placée dans le forage. La profondeur de la pompe dépend du rabattement maximal du niveau d'eau dans le puits lors des phases de pompage. Elle n'excède que rarement 200 m. La pompe et tous les éléments de la colonne de pompage sont en INOX ou d'autres alliages spéciaux pour résister à la corrosion de l'eau géothermale.

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 et éviter ainsi tout impact sur l'environnement. Ce mode de fonctionnement est appelé doublet géothermique (Figure 4.2.1). Un forage de production amène l'eau chaude à la surface au moyen de la pompe immergée, vers un échangeur de chaleur permettant de transmettre l'énergie géothermique à un circuit secondaire, ce qui évite la corrosion des conduites du réseau de chauffage par l'eau géothermale. Si nécessaire, une pompe à chaleur (PAC) peut être utilisée afin de soutirer encore plus d'énergie à l'eau. Une pompe de circulation alimente ensuite les utilisateurs par une conduite isolée de chauffage à distance. L'eau refroidie est enfin restituée à l'aquifère profond par un forage d'injection. 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, selon le type d'aquifère et d'installation.

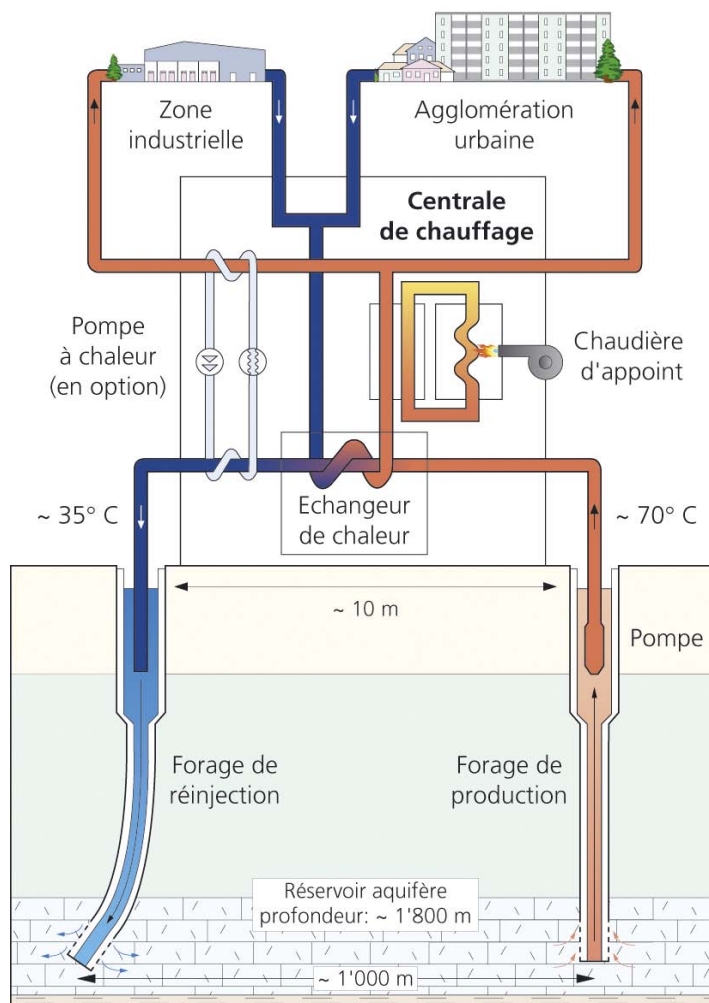


Figure 4.2.1 : Schéma d'un doublet géothermique (Infos-Géothermie n°3, septembre 2002).

Afin d'éviter un court-circuit thermique provoqué par une circulation trop rapide entre le forage de pompage et le forage d'injection (refroidissement de l'eau pompée), la base des puits doit se situer à une distance suffisante, généralement de l'ordre de 1 km. Depuis les premières réalisations géothermiques, la typologie des doublets a évolué. Si dans les années 1970 on utilisait des puits verticaux espacés en surface, actuellement 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.

4.3 Opérations géothermiques AP

4.3.1 Phases de réalisation

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

1. **Etudes préliminaires** : elles 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 un montant de l'ordre de 10'000 CHF, à la charge du promoteur.
2. **Avant-projet** : il 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.

3. **Réalisation du (des) forage(s)** : dans cette phase, il y a un risque d'échec non négligeable selon l'état des connaissances du sous-sol profond. 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 5 à 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, 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.
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 thermique de la ressource, etc.).

- 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 peut être 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.

4.3.2 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 4.3.1). 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 d'une 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. Maintenues en circulation entre le forage et les installations de traitement en surface, ces boues transitent par des bassins et des tamiseurs où elles sont débarrassées des débris de roche. Les résidus solides sont déchargés dans des bassins de décantation (« bourbiers ») pourvus d'un revêtement étanche. Les fluides subissent un traitement adéquat (décantation, floculation, etc.) avant d'être évacués 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 si nécessaire 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 peuvent représenter jusqu'à 20 % du coût total d'un chantier de forage. A titre indicatif, quelques coûts de chantiers sont cités dans le tableau 4.3.1.

Tableau 4.3.1 : 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 chantiers de forage indépendants en milieu urbain

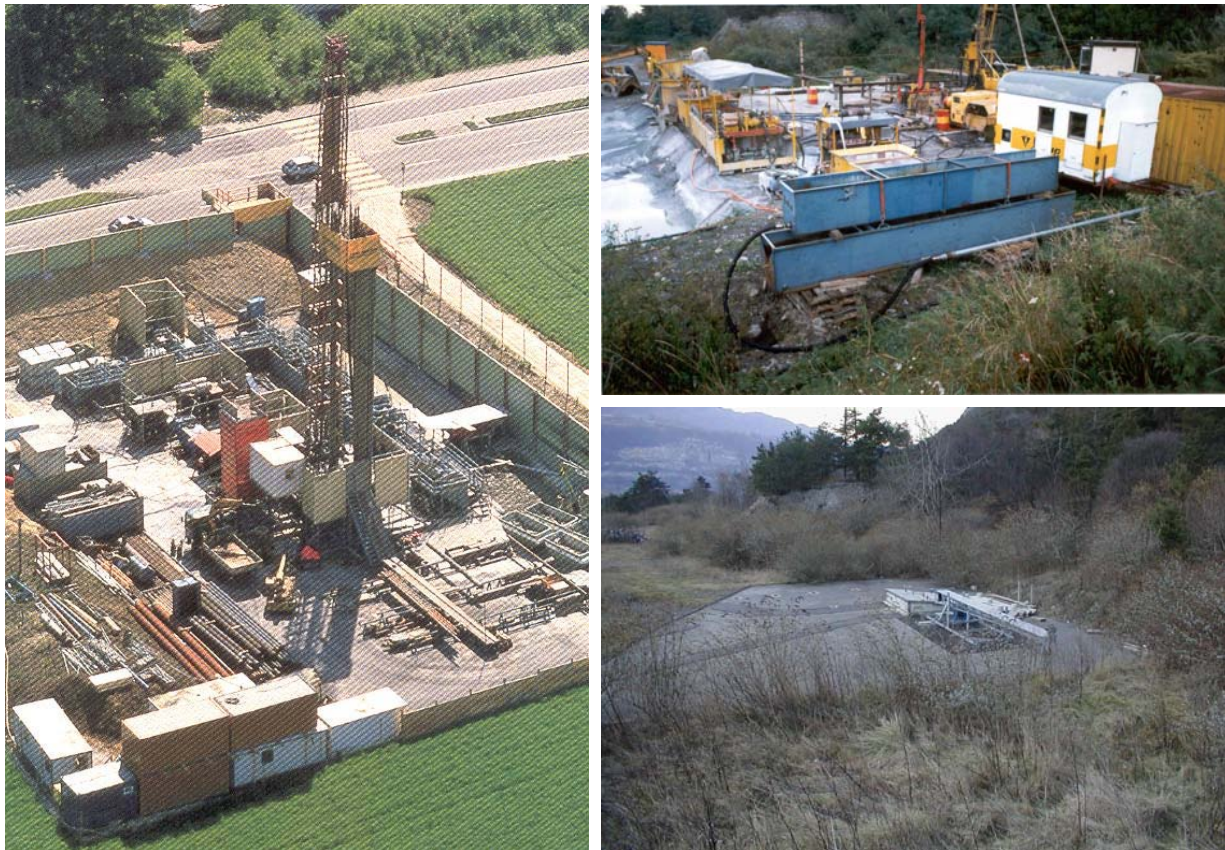


Figure 4.3.1 : Exemples de chantiers de forages géothermiques. A gauche, celui du forage de Reinach (profondeur 1'793 m), muni d'une protection phonique. A droite, le chantier du forage P600 de Lavey-les-Bains, situé en pleine nature. La photo du bas montre l'emprise au sol du puits géothermique en exploitation. Outre la cave de forage et le radier asphalté, un treuil pour ressortir la pompe immergée a été laissée sur place (Weber, 1990 et Bianchetti, 2002).

4.3.3 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 venues d'eau sous pression en jouant sur la densité de la boue.

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 en dosant les vitesses de rotation et les pressions sur l'outil. Cette technique n'entraîne pas de surcoûts. Une autre méthode consiste à utiliser une pièce coudée spéciale et une turbine à boue 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. Ce type d'opération est très coûteux (jusqu'à CHF 20'000 par jour) et peut durer 1 à 2 semaines. Il peut représenter ainsi jusqu'à 10 % du budget total du forage.

Lorsque le forage a traversé la zone aquifère à exploiter, des essais de pompage de plusieurs jours, voire semaines, sont entrepris afin d'évaluer la productivité du puits et de déterminer les

caractéristiques physico-chimiques des eaux. Des diagraphies doivent aussi être réalisées afin de mettre en évidence les différentes arrivées d'eau et leurs caractéristiques (débit, température et minéralisation). Ces tests permettront enfin de définir la géométrie du chemisage à installer et, dans le cas d'un doublet, les conditions du futur puits de réinjection.

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. Le suivi de ces travaux doit être réalisé par un bureau spécialisé, qui prendra soin de reporter et d'interpréter toutes les données acquises dans un rapport de fin de forage (Figure 4.3.2).

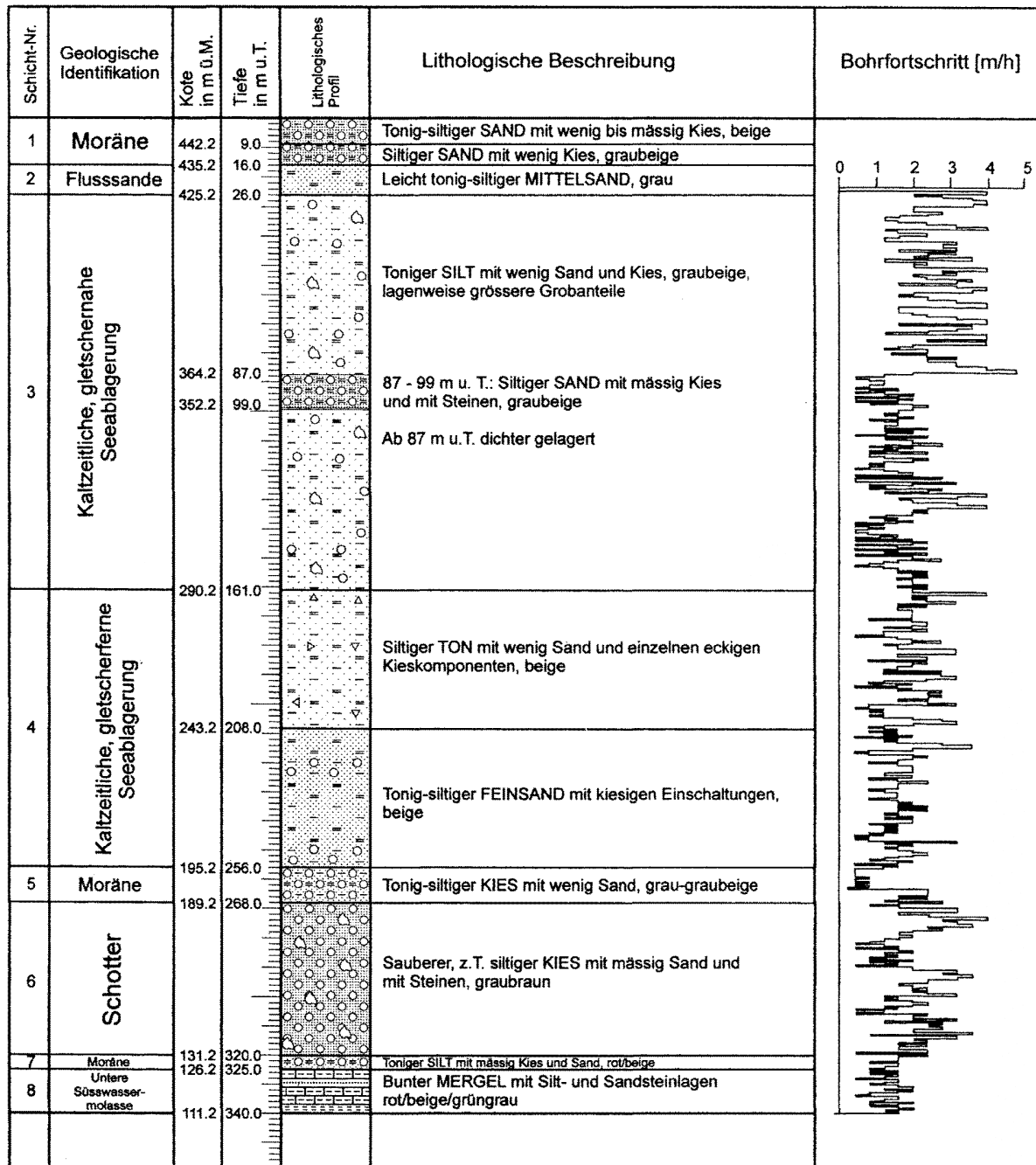


Figure 4.3.2 : Coupe lithologique du puits de pompage de Hallenbad à Seon (Matousek et Graf, 1998)

Dans les années 1990, tous les forages géothermiques ont été réalisés dans l'optique d'obtenir directement un puits de production de gros diamètre, ce qui a malheureusement entraîné des coûts importants pour les forages qui ont rencontré un échec. Pour les futurs projets AP en Suisse, il est donc préconisé de procéder d'abord à un forage dit d'exploration géothermique, de faible diamètre appelé slimhole (Vuataz, 1997) afin de reconnaître la ressource potentielle. 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 ensuite un forage de production, dans le cas où un aquifère profond serait 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.

4.3.4 Equipement des forages géothermiques et exploitation par pompage

Sur une profondeur de 10 à 30 m environ, un avant-puits avec tubage technique en acier (diamètre entre 40 et 50 cm) est mis en place puis cimenté entre le terrain et le tube, au début du percement pour protéger le trou des terrains meubles de surface. Ensuite, le forage se poursuit par étapes, avec des trépan et un diamètre de plus en plus réduits. A chaque étape, les parois de la zone en trou nu sont consolidées par la mise en place d'un tubage en acier noir et par l'injection de ciment dans l'espace annulaire. La partie terminale du forage, censée capter les eaux souterraines, est laissée en trou nu si la tenue des parois est bonne. Dans le cas contraire, elle est équipée avec des crépines (Figure 4.3.3).

Localisée dans le chemisage (tubage plein), la chambre de pompage doit être suffisamment profonde pour permettre un rabattement important du niveau d'eau et doit avoir un diamètre correspondant au débit que l'on va pomper et donc à la pompe à installer. A titre indicatif, les diamètres minimums en fonction de plusieurs débits de pompage sont donnés dans le tableau 4.3.2. Le dimensionnement de la pompe d'exploitation se base sur les résultats des tests hydrauliques (production de l'aquifère). 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 données dans le tableau 4.3.2. 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 4.3.2 : Diamètre minimum de la chambre de pompage en fonction des débits d'exploitation. La puissance du moteur est donnée en fonction de deux 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 les déclencher en fonction de la demande de débit. Pour terminer, une attention particulière doit être apportée aux chutes de tension du réseau, qui peuvent causer une surchauffe du moteur des pompes et entraîner des dégâts importants.

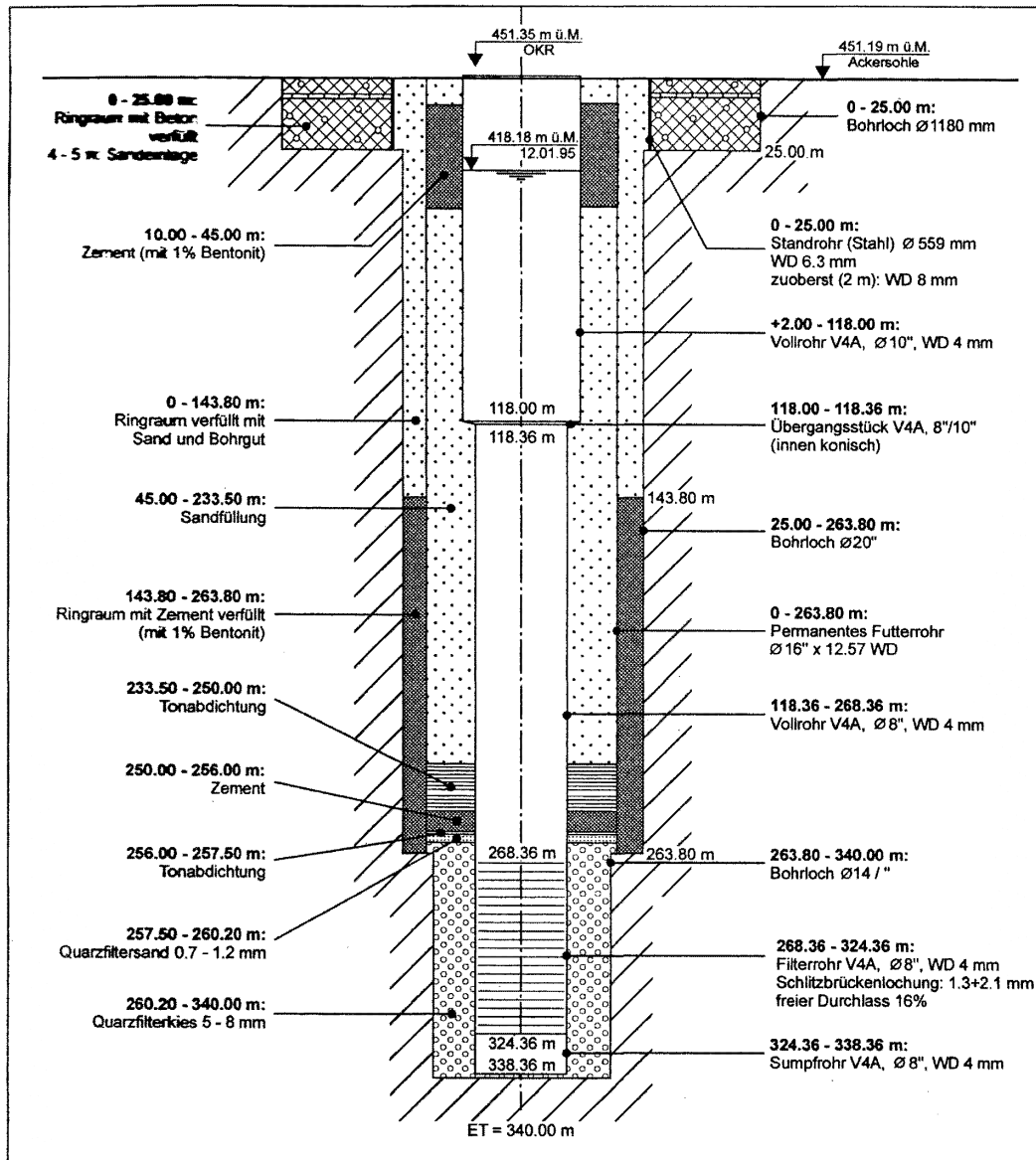


Figure 4.3.3 : Coupe technique du puits de pompage de Hallenbad à Seon (Matousek et Graf, 1998)

4.3.5 Potentiel géothermique, utilisateurs et besoins énergétiques

La puissance du potentiel géothermique $Q_{géo}$ d'un forage représente la puissance thermique maximale pouvant être fournie par l'eau chaude en tête de puits. Elle peut être calculée à l'aide de l'équation suivante (OFEN 1992) :

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

avec D = débit en l/s ; T_s = température de la source (° C); T_r = température de rejet (° C)

La température de 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, autrement 20 à 30° C selon le type d'installation.

A titre indicatif, pour des forages géothermiques exploités actuellement en Suisse, les puissances thermiques en tête de puits calculées avec un refroidissement théorique à 10° C varient entre 0.2 MW_{th} (Kloten) et 5.5 MW_{th} (Lavey-les-Bains). La géothermie est utilisée essentiellement pour des bains thermaux ou des quartiers d'habitations. 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 MW_{th}).

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 évaluer 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 et refroidissement de l'eau de 20° C avant rejet, l'apport de la géothermie est de 1 MW_{th}. La puissance totale disponible à l'aide d'une PAC avec un COP de 3.5 sera de 1.4 MW_{th} (OFEN 1992).

4.3.6 Coûts et aspects économiques

On constate par expérience que les coûts des forages géothermiques profonds augmentent en principe de manière plus ou moins exponentielle en fonction de la profondeur. En réalité, si l'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. Sur la base de cette règle empirique et en ne considérant que les prix des quatre forages couronnés de succès (Figure 4.3.4), le tableau 4.3.3 permet d'estimer de manière approximative le coût probable d'un nouveau forage géothermique en Suisse.

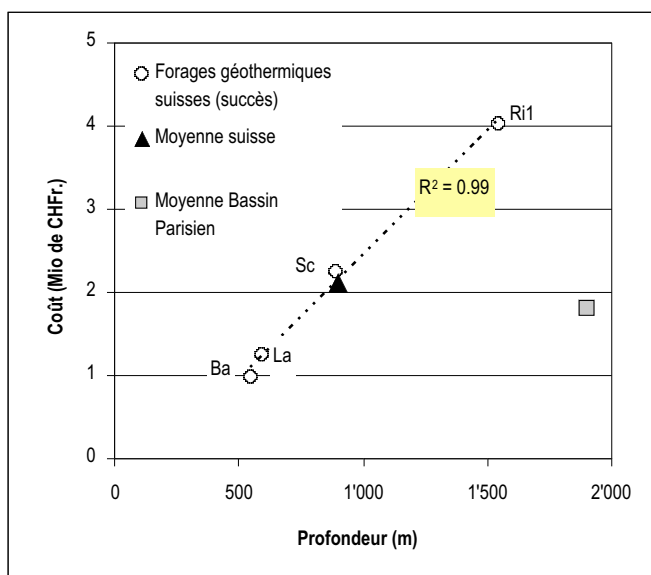


Figure 4.3.4 : Coûts des forages géothermiques de production complètement équipés réalisés en Suisse entre 1988 et 1998 en fonction de leur longueur (source : VUATAZ 1997). Seuls les quatre forages couronnés de succès ont été considérés pour tracer la droite de corrélation. On observe que le coût des forages géothermiques en France est nettement plus bas qu'en Suisse.

Tableau 4.3.3 : Coût estimé d'un forage géothermique d'exploitation réalisé en Suisse et complètement équipé, estimé sur la base du prix des quatre forages couronnés de succès. Les montants présentés sont probablement largement comptés, car depuis quelques années le prix des perforations ont baissé en raison de nouvelles technologies.

Profondeur du forage (m)	Coût estimé 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 sept forages géothermiques uniques 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 de l'aquifère profond du Dogger 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. Le manque d'expérience en forages profonds et la faible connaissance géologique à grande profondeur, sans oublier le coût élevé des services et des équipements permettent d'expliquer ces différences de coûts entre la Suisse et ses voisins.

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 équivalent-habitants (eq-hab), 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 données récentes sur des centrales géothermiques de chauffage urbain fonctionnant en Allemagne ou en Autriche.

Pour le transport de l'eau thermique, 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 4.3.4. Sur la base des données fournies dans ce tableau, 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, où 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 certains montants indicatifs de ce tableau soient aussi sous-estimés.

Tableau 4.3.4 : 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	Centrale chaleur-force
Echangeur de chaleur à plaques installé et raccordé	CHF 10'000 CHF 15'000	Unité de 500 kW _{th} Unité de 1'000 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	

4.4 Développements AP à l'étranger et en Suisse

4.4.1 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. 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 fin 1999, la puissance totale installée était de 328 MW_{th} (Laplaige et al., 2000).

Plus aucun forage n'a été réalisé depuis 1988, principalement en raison du coût très bas des énergies fossiles. Depuis 1986, 19 centrales géothermiques ont été fermées dans le Bassin parisien, pour des raisons économiques et financières mais aussi pour des 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 des serres agricoles. Les températures des eaux exploitées varient entre 26 et 108° C, les débits 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 ces dernières années en Allemagne une forte progression de la géothermie AP, avec plusieurs nouvelles centrales qui devaient permettre d'atteindre une puissance installée supérieure à 90 MW_{th} en 2003 (Schellschmidt et al., 2000). 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). Une récente loi sur l'énergie favorise les énergies renouvelables et la géothermie notamment par le rachat à des prix fixés de l'électricité produite par des centrales éoliennes, photovoltaïques ou géothermiques.

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 depuis l'entrée de l'Autriche dans l'Union européenne. 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}.

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 ne recense qu'une seule installation avec réseau de chauffage à distance à Ferrare. On peut estimer qu'à fin 1999, la puissance totale installée de type AP était de 232 MW_{th} (Cappetti, 2000).

4.4.2 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 de 200 m 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. Un manuel spécifique fut conçu pour aider les réalisateurs d'installations et les promoteurs à mettre en œuvre des projets (OFEN, 1992).

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. Dans le bassin molassique, dont l'épaisseur varie de quelques mètres à plus de 3'000 m, les grès de la Molasse marine supérieure 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 Zurzach 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-Forschungs-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 prospection réalisés dans le N-W 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 1997, couvrant à titre d'encouragement jusqu'à 25 % de ces coûts. L'octroi de la couverture du risque, de la subvention et le paiement des montants étaient effectués sur recommandation de la KGS, après une évaluation préliminaire 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 4.4.1). 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 4.4.1). 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 calculées en tête de puits sont comprises entre 0.3 et 5.5 MW_{th}.

Tableau 4.4.1 : 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
Thônex	GE	2650	Crétacé infér., Jurass. supér.	88.5 f	3.1	765	~1	Aucune	1993
Weissbad	AI	1618	Molasse continent. 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

La fin de la couverture du risque a eu pour effet de stopper les nouveaux projets géothermiques visant à exploiter les aquifères profonds. Il serait pourtant souhaitable de poursuivre l'exploration géothermique du sous-sol profond, grâce à de nouveaux forages notamment dans les niveaux aquifères peu connus des roches sédimentaires du Trias et dans ceux, moins profonds, du Malm et du Dogger, ainsi que dans les zones à forte densité de peuplement du 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 par ex.) et, en cas de succès, laisser l'entier du financement des puits de production aux promoteurs.

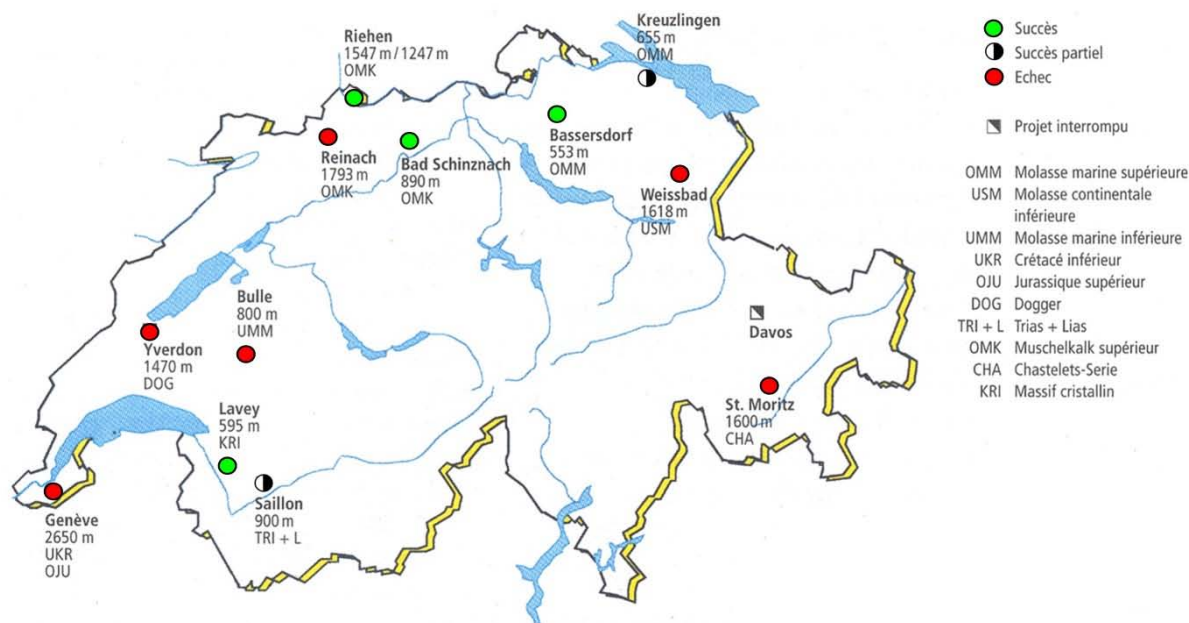


Figure 4.4.1 – Situation, profondeur et état des projets de forages géothermiques profonds en Suisse effectués entre 1987 et 1998 avec l'aide de la Confédération (modifié d'après OFEN 1998).

La première 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). L'installation exploitant l'énergie géothermique est équipée des deux pompes à chaleur électriques 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, par 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 (env. la moitié de celle de l'eau de mer) ne peut pas être rejetée directement en surface. La puissance installée atteint 15 MW_{th}, dont environ le tiers est fourni par la géothermie, et l'investissement total a atteint 40 Mio CHF. Quelques 160 immeubles sur territoire suisse sont chauffés par cette centrale et une zone étendue de nouvelles constructions située de l'autre côté de la frontière, à Lörrach (Allemagne), est approvisionnée en énergie depuis fin 2000. 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).

Mentionnons enfin deux réalisations géothermiques plus modestes, celles de Seon (Argovie) et d'Itingen (Bâle), où des forages « peu » profonds permettent l'exploitation de la ressource géothermique. A la recherche d'une nouvelle alimentation en eau potable, le village de Seon a mis en exploitation en 1997 un forage dans un aquifère graveleux, situé entre 268 et 320 m de profondeur et correspondant au remplissage d'un ancien surcreusement glaciaire de la molasse (USM). Pompée avec un débit maximum de 1'500 l/min, l'eau est légèrement minéralisée, dépourvue d'oxygène et possède une température de 19.6° C. En raison du refroidissement nécessaire de l'eau pour la consommation, il a été décidé de tirer partie de cette énergie en couplant le système d'alimentation à une pompe à chaleur. Ainsi, en abaissant

la température à 10° C, une puissance thermique de 1450 kW est disponible en sortie de forage ce qui permet de chauffer à distance une soixantaine d'habitations (Matousek & Graf, 1998). En 1998, seule la moitié de cette énergie était utilisée, ce qui représentait déjà une économie de 200'000 kg de mazout par année.

A Itingen, l'exploitation de l'énergie géothermique se fait par un doublet foré dans les calcaires du Muschelkalk supérieur du Jura tabulaire. Le premier forage, vertical, exploite une eau à 22° C (24° C en fond de trou), entre 262 et 291 m (3 venues d'eau), avec un débit maximum de 300 l/min. Le deuxième forage, incliné de 28°, distant de 3 m en surface et de 185 m à la base, sert à la réinjection des eaux pompées, trop minéralisées (5.3 g/l). Avec un refroidissement de 12° C, le potentiel de puissance fournie par ce forage est de 250 kW. Cette ressource permettrait de subvenir aux besoins d'environ 50 appartements à basse énergie construits suivant le standard Minergie. En 2000, six habitations de la « Cité Solar One » fonctionnaient grâce à ce doublet géothermique (Häring et al., 2002).

4.5 Réalisations et projets AP dans le canton de Fribourg et aux environs

Actuellement, aucune installation AP n'est utilisée pour la géothermie dans le canton de Fribourg. Le seul projet AP réalisé à Bulle en 1992 fut un échec sur le plan du débit d'eau. A proximité du canton, à Payerne, un avant-projet géothermique profond existe depuis 1989 mais n'a jamais été réalisé.

4.5.1 Forage géothermique de Bulle

Un forage géothermique de 500 m de profondeur a été projeté en 1991 par le bureau CSD pour le chauffage du nouveau Collège du Sud à Bulle, sous mandat du Département de l'Instruction publique du canton de Fribourg. Une pompe à chaleur sur le forage ou sur un doublet à faible profondeur (60 m) était initialement prévue. Les ressources géothermiques visées étaient celles contenues dans les grès de Vaulruz (Rupélien) de l'UMM (Molasse marine inférieure) en position subalpine.

Les travaux ont été réalisés du 18 février au 26 mars 1992. Initialement prévu à 500 m, le forage de reconnaissance a finalement été prolongé jusqu'à la profondeur de 800 m. A 500 m, la productivité de l'ouvrage était nettement insuffisante et la formation cible n'avait pas été atteinte. Le prolongement n'a malheureusement pas donné de meilleurs résultats. Après un développement du puits sous pression, le meilleur débit que l'on pouvait pomper était de 5 l/min. Le forage a donc été considéré comme échec puisqu'il aurait fallu obtenir de l'ordre de 4 à 6 l/s, selon les températures disponibles, pour répondre à l'objectif géothermique fixé à 500 kW.

Les températures suivantes ont été mesurées à la fin des travaux (16.03.1992) : 30° C à 500 m et 36° C à 785 m. En prenant une valeur de référence à 10° C, vraisemblable pour la température près de la surface, les gradients géothermiques seraient respectivement de 42° C/km entre 50 et 500 m et de 35.4° C/km entre 50 et 785 m. Ces valeurs semblent indiquer une certaine anomalie géothermique positive dans le secteur du forage (Bertrand, 1992).

Bien que ce forage fut un échec pour le chauffage du collège du Sud, Hadorn (1992) a suggéré son utilisation comme source froide de la pompe à chaleur d'une sonde géothermique profonde. En effet, avec une température moyenne d'environ 28° C de 0 à 800 m, une puissance maximum de 48 kW à disposition (extraction maximale de 60 W/m) et une pompe à chaleur avec un COP de 4, il serait possible de fournir une puissance de chauffage de 192 kW au maximum. Ce potentiel n'est pas négligeable et pourrait tout à fait répondre aux besoins d'un bâtiment (ou groupe de bâtiments) nécessitant une puissance de chauffage de l'ordre de 100 à 150 kW, pour autant qu'il se situe dans le voisinage immédiat du puits, dans un rayon d'environ 100 m.

Le forage profond de Bulle a bénéficié du soutien et de la couverture du risque de l'OFEN. Basés sur un total subventionnable de 741'322.-, les montants suivants ont été versés par l'OFEN : une subvention de soutien de 185'330.- (25 %) et une couverture du risque de 546'725.- (65 %).

4.5.2 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 4.1) pour un projet de forage géothermique profond. Les auteurs du rapport proposent trois aquifères potentiels pour la géothermie (Molasse d'eau douce inférieure, Crétacé et Malm), avec des températures probables de l'eau de 35 à 60° C, captés à des profondeurs situées entre 900 et 1'600 m. Selon eux, 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, avec 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 chauffage à distance) 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 sous-estimées.

4.6 Contexte géologique, géothermique et hydrogéologique du canton de Fribourg

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 comme les méthodes géophysiques (sismiques, électriques, électromagnétiques) qui permettent d'appréhender la profondeur, l'épaisseur des différentes couches géologiques et de localiser les grandes fractures. Les chapitres qui suivent, rédigés en grande partie par le Dr. M. Weidmann, constituent une synthèse des connaissances géologiques, hydrogéologiques et géothermiques profondes au niveau du territoire fribourgeois. Les données sont tirées des cartes géologiques, des forages profonds et de l'interprétation des lignes sismiques réalisées lors des prospections pétrolières. Une partie des publications et documents utilisés sont cités et commentés dans l'annexe 4.2. Les informations concernant les forages profonds réalisés sur le territoire du canton de Fribourg et dans les régions limitrophes ont été compilées dans l'annexe 4.3.

Actuellement, il n'existe pas, à notre connaissance, une étude générale de la géologie du canton de Fribourg qui prenne en compte tous les acquis récents de la recherche. Les quelques lignes qui suivent ne prétendent pas combler cette lacune. Mieux que des pages de texte, une carte générale et quelques profils tirés de la littérature spécialisée permettront d'avoir une vision simple de la géologie fribourgeoise.

On présentera d'abord les faits les mieux connus, étudiés depuis fort longtemps et facilement accessibles, à savoir la géologie de la surface. Puis on tentera une approche de la géologie profonde, beaucoup plus conjecturale.

4.6.1 Géologie de surface

Les deux régions naturelles fondamentales du Canton de Fribourg, le Plateau molassique (qui fait partie de l'avant-pays « autochtone » des Alpes) et les Préalpes (empilement de nappes alpines charriées sur cet avant-pays) sont constituées de plusieurs unités géologiques dont la nature et la répartition sont fort complexes dans le détail. De façon très schématique, ces unités

peuvent se regrouper en trois ensembles, ayant des particularités lithologiques et structurales qui leur sont propres. Ces ensembles sont (voir carte géologique de la Figure 4.6.1) :

- la région molassique,
- les flyschs des Préalpes,
- les Préalpes « calcaires ».

A ces trois ensembles de valeur régionale, il convient de rajouter les formations quaternaires et actuelles, partout présentes.

La région molassique

Elle s'étend depuis les frontières N et W du canton jusqu'aux environs d'une ligne passant par Châtel-St-Denis, La Roche, Plasselb.

Du point de vue lithologique, elle est essentiellement constituée par les puissantes assises de la Molasse, sédiment détritique d'âge « tertiaire » (Oligocène et Miocène) dans lequel les grès prédominent souvent sur les conglomérats et les marnes. Provenant de l'érosion de la jeune chaîne alpine, la Molasse s'est accumulée dans le sillon périalpin subsident, en milieu tantôt marin peu profond, tantôt fluviatile ou lacustre, d'où la subdivision lithostratigraphique en Molasse marine inférieure (Untere Meeres Molasse - UMM), Molasse d'eau douce inférieure (Untere Süswasser Molasse - USM), Molasse marine supérieure (Obere Meeres Molasse - OMM) et Molasse d'eau douce supérieure (Obere Süswasser Molasse - OSM).

Du point de vue structural, la plus grande partie de la région est constituée par la « Molasse du Plateau », représentée ici par le sommet de la Molasse d'eau douce inférieure (Aquitaniens) et la Molasse marine supérieure (Burdigaliens et Helvétien), dont les couches, peu tectonisées, ne sont affectées que par des ondulations à grand rayon de courbure. Dessinant une étroite bande à la limite SE de la région molassique et assurant la transition structurale au domaine préalpin, la « Molasse subalpine » présente, quant à elle, des pendages plus fortement redressés et un empilement d'écaillages tectoniques qui font affleurer la Molasse marine inférieure (Rupéliens) et la base de la Molasse d'eau douce inférieure (Chattien) en plusieurs alternances complexes.

Les flyschs des Préalpes

On désigne par « flyschs » de puissantes formations détritiques déposées dans des bassins marins profonds et alimentées par les nappes alpines en formation ou en mouvement, puis à leur tour incorporées à ces nappes ou formant des nappes indépendantes. Elles sont constituées d'alternances indéfiniment répétées de grès, de marnes et d'argilites, ce qui leur confère généralement une lithologie d'ensemble peu résistante, d'où les nombreux problèmes de stabilité qui leur sont liés.

Une première zone de flyschs d'âge « tertiaire » (Paléocène-Eocène), formant la nappe du Gurnigel, détermine l'essentiel de la chaîne des « Préalpes externes », jalonnée par les massifs suivants : Corbetta, Niremout, Alpettes, Berra, Schwyberg et Ättenberg. D'origine très interne, la nappe du Gurnigel se trouve actuellement en position externe au front des Préalpes. Malgré cela, sa structure, encore assez mal connue il est vrai, paraît relativement simple dans l'ensemble (larges cuvettes synclinales), mais peut se compliquer localement par des écaillages. Ajoutons qu'elle est associée, de manière fortuite semble-t-il, à des éléments d'origine relativement externe tels que les massifs « ultrahelvétiques » du Montsalvens et des Pléiades (voir plus loin).

Une autre zone de flyschs, moins développée sur territoire fribourgeois, forme une bande étroite et allongée allant du Gros-Mont jusqu'à la frontière cantonale à l'E de Jaun. Il s'agit de flyschs d'âge crétacé supérieur, de complexité tectonique bien plus grande (empilement de plusieurs unités ou « sous-nappes », formant les « Préalpes supérieures ») et pouvant englober de petits massifs ou lames de roches plus anciennes (Jurassique à Crétacé inférieur).

Enfin, quelques lambeaux de flysch de moindre importance subsistent dans la grande vallée synclinale de la Haute-Gruyère (Montbovon, Estavannens).

Les Préalpes « calcaires »

Ce terme assez général recouvre l'ensemble montagneux s'étendant d'une ligne Gros Plané – Gruyères – Charmey - Lac Noir, jusqu'à la frontière SE du canton (Vanil Noir, Dent de Ruth). Il englobe surtout la nappe des « Préalpes Médiannes Plastiques », qui en constitue l'essentiel, mais aussi un tronçon de la chaîne des Gastlosen qui appartient déjà aux « Préalpes Médiannes Rigides » et le petit massif du Montsalvens (auquel il convient de rajouter les affleurements de la Plaine de Bulle et le prolongement N des Pléiades) dans les Préalpes Externes.

Ces terrains d'appartenance paléogéographique diverse ont pour point commun d'avoir été déposés pendant l'ouverture des bassins marins durant le « Mésozoïque » (= Ere Secondaire : Trias, Jurassique, Crétacé), à des profondeurs variables. Il en résulte des séries tantôt à alternances calcaires et marneuses, favorisant une structure fortement plissée (Préalpes Médiannes Plastiques, Montsalvens), tantôt à prédominance carbonatée, entraînant un style tectonique plus « cassant » (Gastlosen).

Terrains meubles

L'importance des terrains superficiels (formations quaternaires et récentes) dans tout problème de géologie appliquée n'est certes plus à démontrer. Leur présence est quasi générale sur l'ensemble du territoire cantonal.

Sans vouloir entrer dans les détails, citons ici simplement pour mémoire :

- les terrains d'altération superficiels,
- les formations de pente (éboulis, éboulements, glissements),
- les recouvrements morainiques et périglaciaires,
- les remplissages alluvionnaires de vallées interglaciaires (ex. Plaffeien) et post-glaciaires (ex. Broye, Grand Marais),
- etc...

4.6.2 Géologie profonde

Le canton de Fribourg s'étend, comme on vient de le dire, sur deux entités morphologiques et structurales principales : le Bassin molassique et les Préalpes, qui reposent toutes deux sur le même Substratum composé d'un Socle ancien et de sa Couverture mésozoïque. On les décrira brièvement ci-dessous de bas en haut (voir coupe géologique de la Figure 4.6.2).

Socle : très vieilles roches métamorphiques, granitiques ou gneissiques, sises entre 2'500 et > 4'000 m de profondeur. Localement, le Socle comprend à sa surface des dépressions remplies d'une série parfois épaisse de roches sédimentaires détritiques (grès, conglomérat, argillite, charbon) datant du sommet de l'Ere primaire (Permien, Carbonifère). Dans le canton de Fribourg, le Socle n'a pas encore été étudié, ni par des sondages, ni par des méthodes géophysiques.

Couverture mésozoïque : les roches sédimentaires marines datant de l'Ere secondaire (ou Mésozoïque), qui forment le Jura plissé, se suivent en profondeur sous le bassin molassique et sous les Préalpes. Il s'agit surtout de calcaire, de marne et d'argile reposant sur une épaisse couche d'évaporites (anhydrite, gypse et localement sel gemme). Leur épaisseur est variable, entre 1'000 et 2'500 m. Cette couverture est affectée de faibles ondulations à grands rayons de courbure. Elle est découpée par de nombreuses cassures, failles ou décrochements. Dans le canton de Fribourg, les sondages pétroliers profonds, ainsi que les données sismiques ont relativement bien exploré cet ensemble, mais seulement sous le bassin molassique.

Bassin molassique : il est comblé par des roches détritiques d'origine marine et terrestre, datant de l'Ere tertiaire, épais de près de 3 km au SE, du côté alpin, et passant à environ 1'000 m vers le lac de Neuchâtel. Le bassin molassique est lui aussi peu plissé dans sa partie

externe, beaucoup plus modérément que le Jura ou les Préalpes, alors que sa partie interne (ou *Molasse subalpine*) est affectée par de nombreux chevauchements.

Préalpes : 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. La stratigraphie des terrains affleurant et la structure des nappes préalpines du canton de Fribourg sont bien connues en surface, comme on l'a vu au chapitre précédent. Par contre, il n'y a pas eu jusqu'ici d'exploration en profondeur par sondage et les méthodes géophysiques n'y ont pas fourni de renseignements fiables.

Grands accidents : diverses failles et surtout des décrochements affectent les terrains sédimentaires, ainsi que, semble-t-il, le Socle. Ces cassures sont pour la plupart récentes et postérieures aux principales phases de plissement, liées à la formation des Alpes *s. l.* Certaines sont encore actives, d'où d'assez fréquents tremblements de terre de faible intensité (faille de Fribourg par exemple). Bien connue dans les Préalpes, la présence de ces grands accidents sous le Plateau fribourgeois est par contre encore mal connue.

Erosion : au cours des derniers 4-5 millions d'années, des mouvements verticaux ascendants ont soulevé certains secteurs et motivé ainsi l'érosion 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.

4.6.3 Documents géologiques

La géologie du territoire fribourgeois est presque entièrement couverte par les **feuilles au 1 : 25'000** publiées par la Commission géologique suisse (Bâle), puis par l'Office Fédéral des Eaux et de la Géologie OFEG (Berne). Toutes ces feuilles sont consultables auprès du Département des Géosciences de l'Université de Fribourg. Les notices explicatives de ces feuilles fournissent sous une forme plus ou moins condensée toutes les données stratigraphiques et structurales concernant chaque feuille, de même qu'une bibliographie souvent exhaustive. Il s'agit des feuilles suivantes :

*1164-Neuchâtel, 1165-Murten, *1184-Payerne, 1185-Fribourg, 1186-Schwarzenburg, 1203-Yverdon-les-Bains, 1204-Romont, *1205-Rossens, 1206-Guggisberg, 1223-Echallens, 1224-Moudon, *1225-Gruyères, 1244-Châtel-St-Denis, 1264-Montreux, 1265-Les Mosses.*

* = feuilles terminées, disponibles auprès de l'OFEG, mais la carte et (ou) la notice explicative ne sont pas encore imprimées.

Le territoire des feuilles pas encore réalisées (*1226-Boltigen, 1245-Château d'Oex, 1246-Zweisimmen*) a cependant déjà été cartographié, souvent à diverses reprises, dans le cadre de travaux de diplôme, de thèses ou d'autres travaux de recherche. Ces documents sont également disponibles auprès du Département des Géosciences de l'Université de Fribourg.

La **carte géologique synthétique** du canton (Figure 4.6.1), modifiée d'après Plancherel (1982, inédit) et Weidmann (2004, inédit) montre la répartition de la Molasse du Plateau et subalpine, des unités préalpines, ainsi que la localisation des sondages profonds répertoriés et des principaux accidents tectoniques. L'existence et la position de ces derniers peut varier selon les sources consultées, si bien que l'interprétation présentée ici est parfois assez hypothétique.

La **coupe géologique générale Jura-Préalpes fribourgeoises**, dessinée par Rigassi (1978, inédit) est présentée dans la figure 4.6.2. Elle passe par le forage pétrolier de Sorens et tient compte, par projection, des données du forage profond de Courtion.

La **coupe géologique générale Jura-Alpes**, tirée de Sommaruga (1997), est complétée par une « restored section » qui supprime les effets de la tectonique et replace les ensembles rocheux dans leurs positions primitives, avant la formation des Alpes et du Jura (Figure 4.6.3).

La **coupe géologique à travers les Alpes-Préalpes vaudoises** (Escher et al. 1987, modifiée par Mosar 1993), montre la complexité de l'édifice des nappes, la position supposée en profondeur du Substratum, ainsi que le raccord avec le bassin molassique interne, en partie recouvert et laminé sous les nappes préalpines (Figure 4.6.4). La comparaison de ces trois profils révèle de fortes divergences d'interprétation des structures profondes, surtout sous les Préalpes, ce qui illustre un criant manque d'information à ce niveau.

La carte des **lignes sismiques** réalisées lors des récentes campagnes de prospection pétrolière sur le canton de Fribourg est présentée à la Figure 4.6.5. Cette carte montre la grande densité d'informations disponibles pour le plateau molassique fribourgeois, comparée au manque de données sismiques pour la partie préalpine.

La réinterprétation de toutes ces lignes sismiques a permis d'établir la **carte des isohypses** (lignes d'égale altitude) de la base de la Molasse (Figure 4.6.6), en mètres par rapport au niveau de la mer. Basée sur la carte des temps sismiques, ces isohypses ont été calculés en prenant une vitesse moyenne de 4000 m/s pour l'ensemble du canton. Cette valeur correspondant plus ou moins à celle observée au niveau du forage de Courtion. Elle tend à augmenter en direction du sud-ouest. En se rapprochant du canton de Vaud, les courbes de niveau de la base de la Molasse sont donc plus sujettes à des erreurs. Ces données encore préliminaires ont été mises à disposition par le Prof. G. Gorin du Département de Géologie et de Paléontologie de l'Université de Genève. Elles proviennent du travail de doctorat de S. Paolacci sur la configuration structurale du bassin molassique à l'ouest de la Suisse. Actuellement en cours de rédaction, le document final tiendra compte de la variabilité des vitesses sismiques pour le calcul des isohypses de la base de la Molasse. Malgré ses imprécisions, la première carte présentée ici met, tout de même, bien en évidence l'épaisseur croissante du bassin molassique en direction des Préalpes.

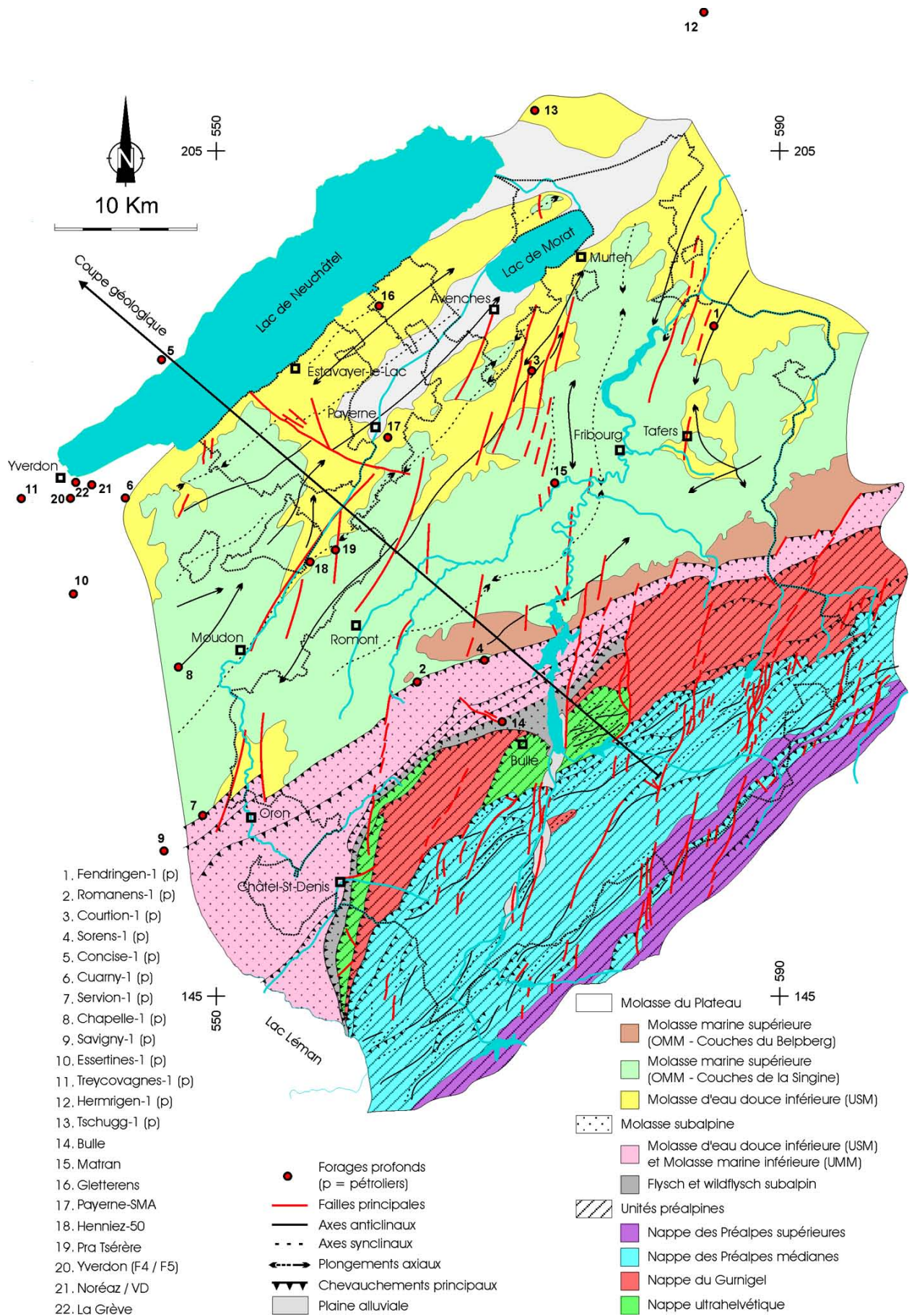


Figure 4.6.1 : Carte géologique synthétique du canton de Fribourg, avec localisation des principaux accidents tectoniques et forages profonds (modifiée d'après Plancherel, 1982, et Weidmann, 2004 inédit)

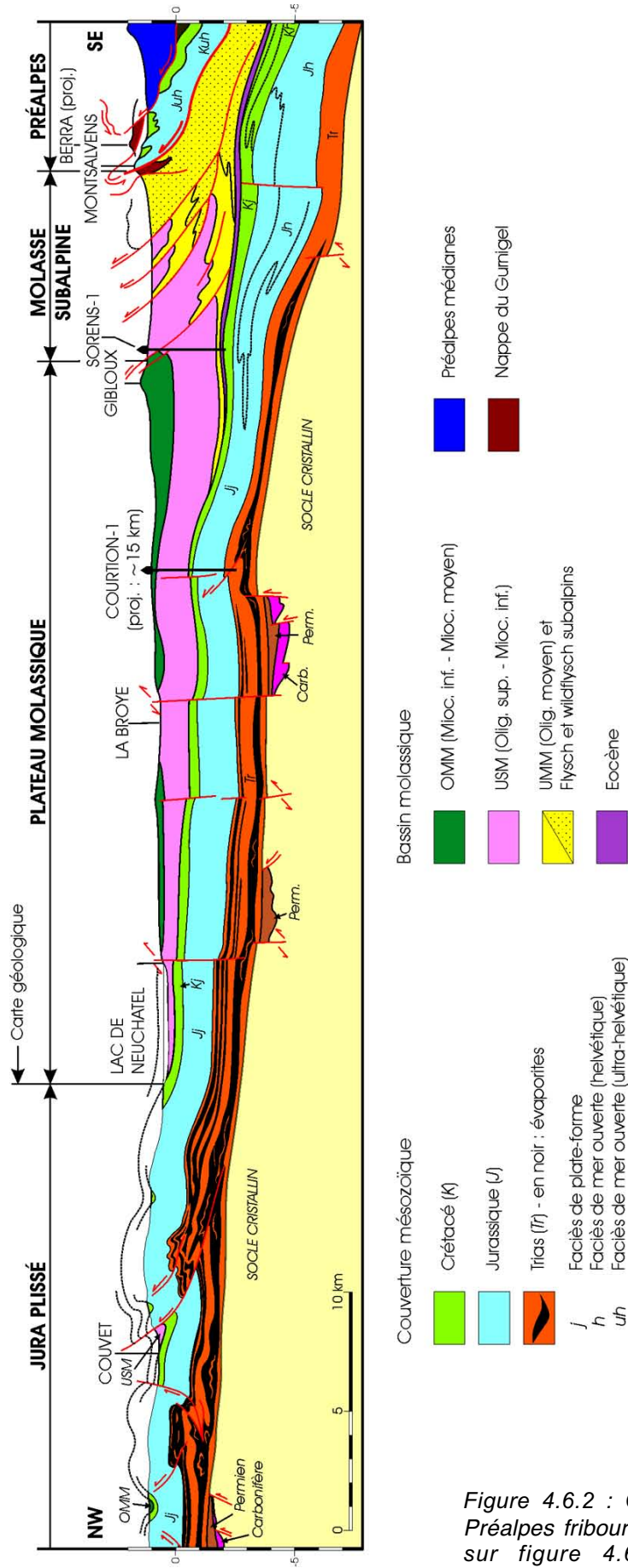


Figure 4.6.2 : Coupe géologique Jura-Préalpes fribourgeoises (voir localisation sur figure 4.6.1, modifiée d'après Rigassi, 1978, inédit)

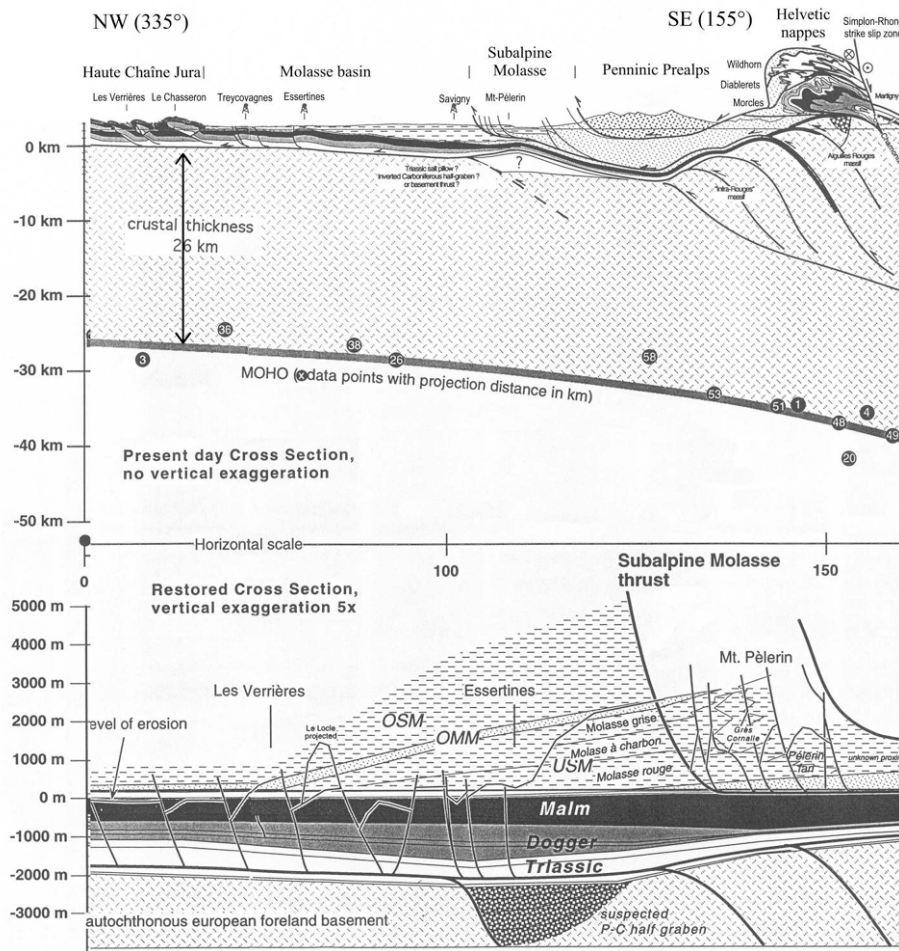


Figure 4.6.3 : Profil géologique NW-SE montrant l'enfouissement des formations mésozoïques du Jura en direction du bassin molassique (modifié d'après Sommaruga, 1997)

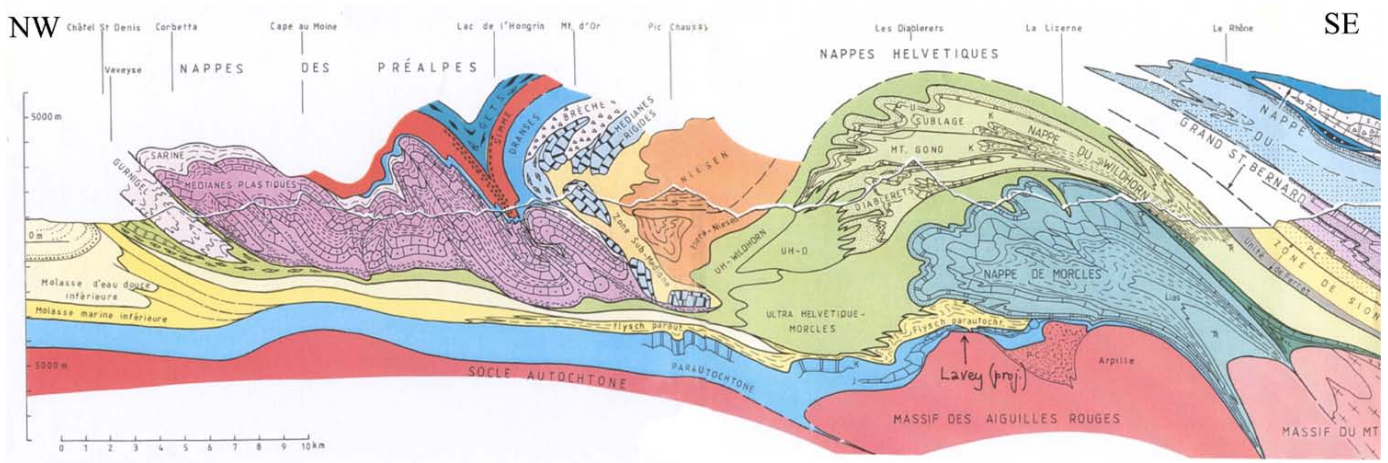


Figure 4.6.4 : Profil géologique NW-SE à travers les Préalpes et les Alpes vaudoises (Escher et al., 1987). On remarque la structure complexe des nappes des Préalpes et des nappes Helvétiques (Alpes).

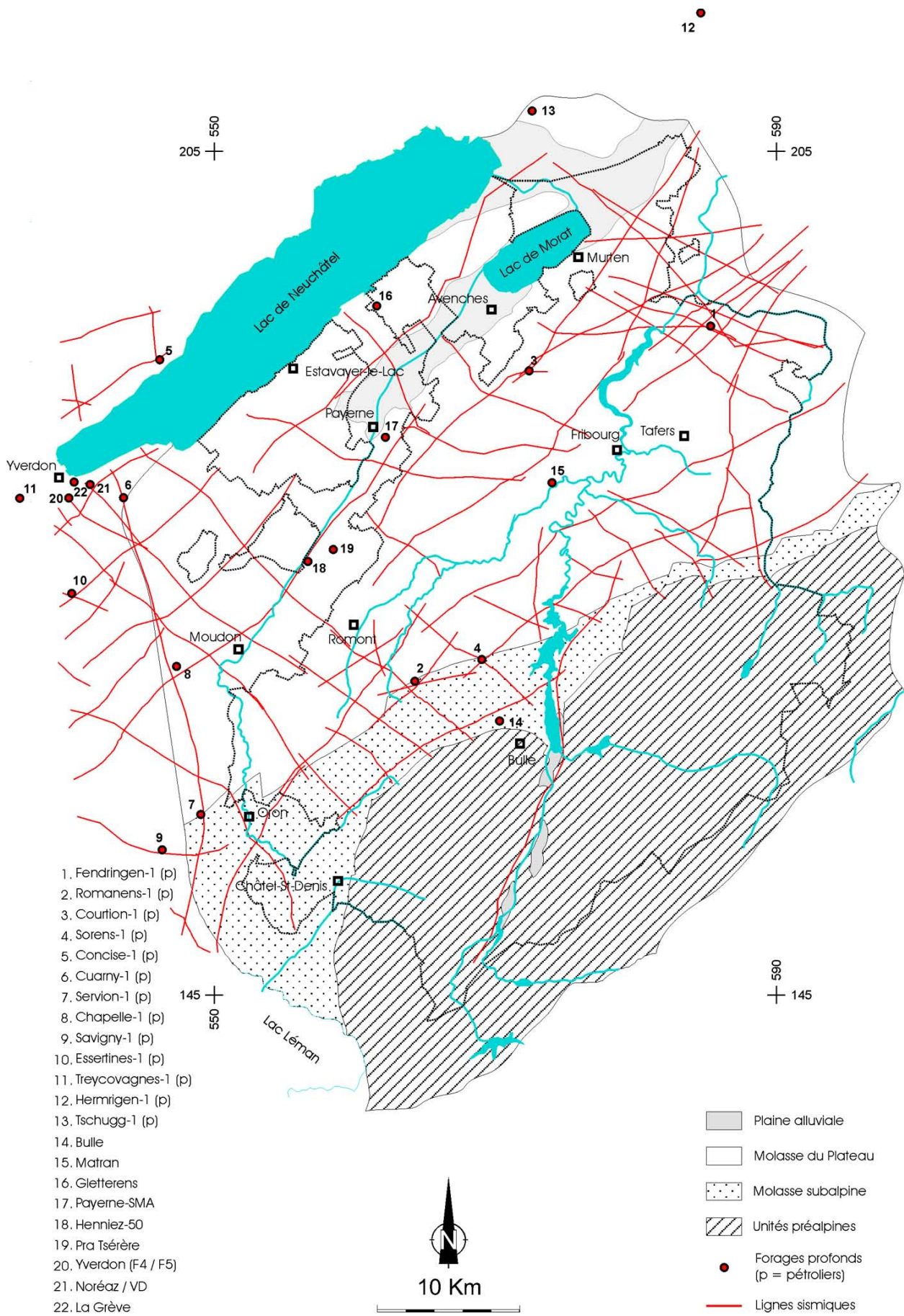


Figure 4.6.5 : Carte de localisation des lignes sismiques récentes réalisées dans le canton de Fribourg (modifiée d'après Paolacci, en prép.)

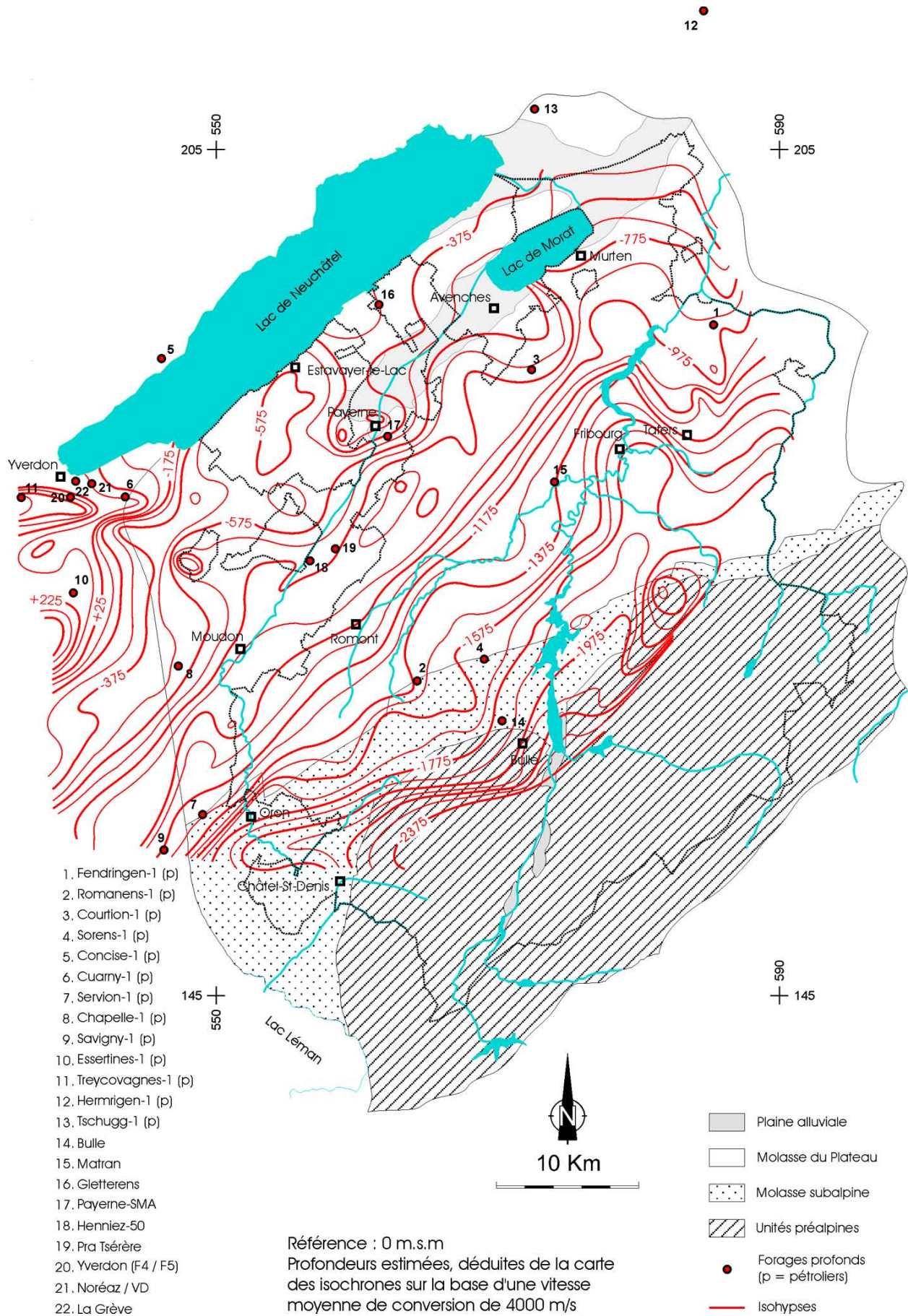


Figure 4.6.6 : Carte des isohypses de la base de la Molasse (modifiée d'après Paolacci, en prép.)

4.6.4 Conditions géothermiques

Construite grâce aux données des forages profonds, la carte générale du flux de chaleur en Suisse, publiée par Medici & Rybach en 1995, demeure la seule synthèse à ce jour localisant des zones relativement plus chaudes (Figure 4.6.7). Les rares sondages plus récents que cette publication, qui n'ont pas été portés à notre connaissance ne modifieraient pas les grandes lignes de cette carte, sauf peut-être dans la vallée de la Broye. On constate que seule la région autour d'Yverdon-les-Bains est, en Suisse romande, sujet à une anomalie thermique (anomalie du forage d'Essertines-1). Il n'y a donc pas de secteurs spécifiquement intéressants à signaler dans le canton de Fribourg.

De plus, l'absence de remontée d'eau thermale dans le canton souligne aussi la faible probabilité de rencontrer en profondeur des aquifères « chauds ». Les sources ou forages à plus de 25° C, les plus proches du territoire fribourgeois sont succinctement décrits dans le tableau 4.6.1.

Tableau 4.6.1 : Sites d'émergence d'eau thermale par source ou par forage les plus proches du canton de Fribourg (Bianchetti, 2002 ; Muralt, 1999 ; Muralt et Vuataz, 1994 ; Vuataz, 1982)

Site	Type de captage	Aquifère	Température max. (° C)	Débit total du site (l/s)
Yverdon-les-Bains (VD)	1 source, 3 forages	Malm	31	6-50
Weissenburg (BE)	2 sources	Trias + Malm des Préalpes Médiannes	27	1
Lavey-les-Bains (VD)	2 forages	Gneiss du Massif des Aiguilles Rouges	68	27
Saillon (VS)	1 source, 4 forages	Mésozoïque de la Nappe de Morcle	31	34
Loèche-les-Bains (VS)	sources	Trias + Dogger	51	env. 47

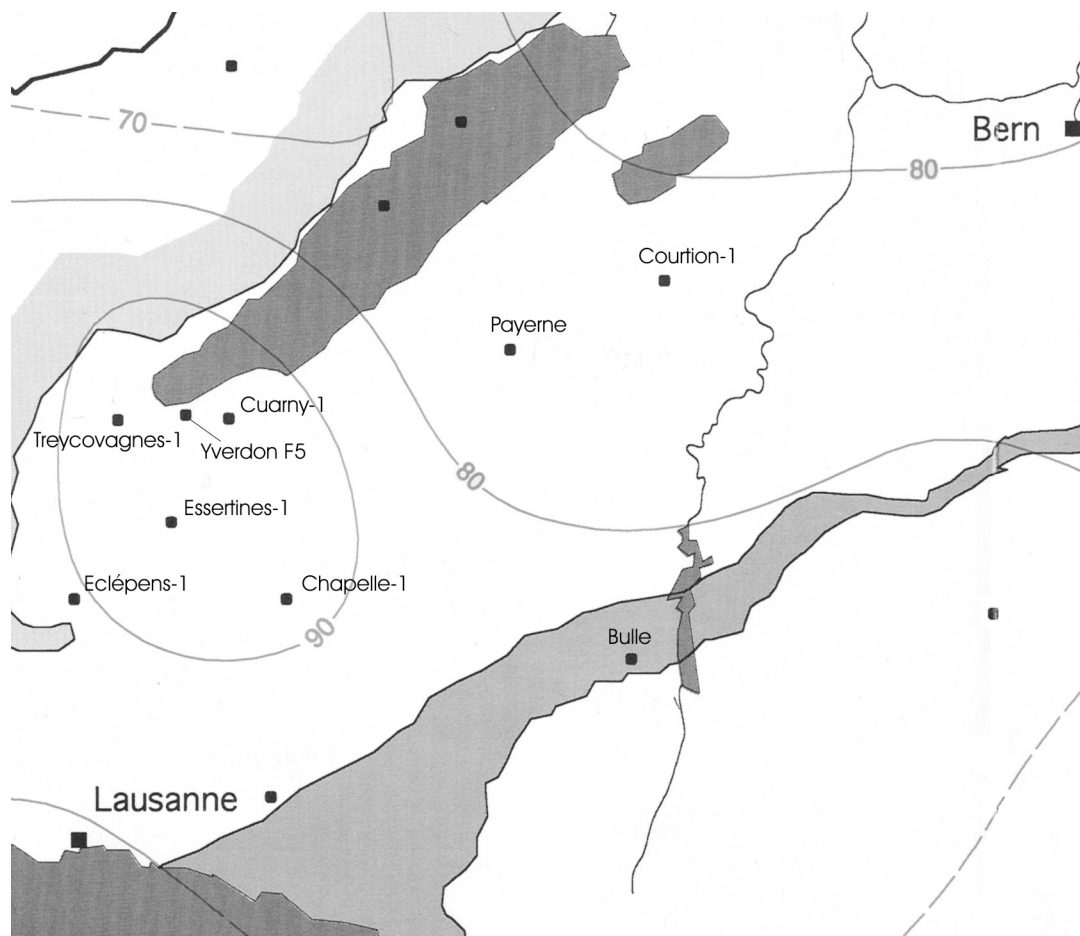


Figure 4.6.7 : Carte du flux de chaleur entre Lausanne et Berne (extrait de Medici & Rybach, 1995). La seule concentration de données se trouvent dans la région centrée autour du forage d'Essertines et caractérisées par une anomalie positive de flux (lignes = égale densité du flux de chaleur terrestre en mW/m^2). Le canton de Fribourg n'est le siège d'aucune anomalie positive du flux de chaleur.

Type de forage	N°	Nom	Côte (msm)	Coordonnées suisses (m)		Année	Prof. (m)	T° 500 m	T° 1000 m	T° 2000 m	T X m	Prof. X m	T° moyenne de l'air	Gradient moyen (C/km)*	Gradient profond (C/km)**	Profondeur top Crétacé	Profondeur top Malm	Profondeur top Dogger	Profondeur top Lias	Profondeur top Trias	Profondeur top substratum	Géologie en fond de trou	
Forages pétroliers sur territoire fribourgeois	1	Fendingen-1	603	585300	192500	1982	1968	--	--	--	--	--	--	--	1805	--	--	--	--	--	--	Crétacé inf.	
	2	Romanens-1	947	564200	167400	1977	4022	29	45	77	135	3800	7.0	33.4	32.1	2857	3617	3785	3986	4022	--	Trias (Keuper)	
	3	Courtion-1	599	572415	189420	1980	3083	26	41	68	--	--	8.0	29.5	27.0	1322	1434	2038	2590	2690	--	Trias (Muschelkalk moyen)	
	4	Sorens-1	1020	568470	169190	1961	3165	--	--	--	--	--	--	--	--	~3100	--	--	--	--	--	--	Crétacé
Forages pétroliers sur territoire voisins (VD et BE)	5	Concise-1 (VD)	440	546340	189900	1926	240	--	--	--	--	--	--	--	220	--	--	--	--	--	--	Crétacé (Urgonien)	
	6	Cuarry-1 (VD)	562	543470	180350	1936-1939	2228	27	44	79	--	--	8.5	34.8	35.0	480	720	1960	--	--	--	Dogger	
	7	Servion-1 (VD)	785	549010	157900	1938-1939	1433	--	--	--	--	--	--	--	>1433	--	--	--	--	--	--	USM (Chatien)	
	8	Chapelle-1 (VD)	764	547305	168359	1958	1531	31	47	--	61	1531	7.5	34.3	26.4	1506	--	--	--	--	--	--	Crétacé (Hauterivien)
	9	Savigny-1 (VD)	839	546271	155312	1960	2486	26	42	69	88	2486	7.5	32.0	31.0	2331	--	--	--	--	--	--	Crétacé (Barrémien-Hauterivien)
	10	Essertines-1 (VD)	661	539775	173490	1963	2936	39	57	94	103	2600	8.0	36.2	28.8	337	531	1346	1905	2302	--	--	Trias (Keuper)
	11	Treycovagnes-1 (VD)	473	536136	180273	1978	3221	32	52	84	122	3221	8.5	34.9	31.5	0	177	894	1364	1672	2681	--	Permien
	12	Herrnigen-1 (BE)	542	584603	214885	1982	2198	39	53	79	--	--	8.5	34.8	26.0	395	403	1078	1550	1727	--	--	Trias (Muschelkalk moyen)
	13	Tschugg-1 (BE)	462	572610	207910	1976	704	--	45.5	--	--	--	8.5	36.0	--	509	638	--	--	--	--	--	Malm (Portlandien)
	14	Bulle	765	570250	164375	1992	800	30	--	--	36	785	7.5	35.0	21.1	>800	--	--	--	--	--	--	UMM (Rupélien) ?
Autres forages sur territoire fribourgeois	15	Matran	590	573910	181360	1990 ?	333	--	--	--	20	333	8.0	33.0	--	>333	--	--	--	--	--	--	OMM (Burdigalien)
	16	Gletterens	480	561518	193961	1996	420	--	--	--	--	--	--	--	>420	--	--	--	--	--	--	--	Molasse indéterminée (USM ?)
	17	Payeme-SMA	480	562220	184680	1991	258	--	--	--	16.3	258	8.5	26.4	--	>258	--	--	--	--	--	--	USM (Aquitarien)
	18	Henniez-50	650	566660	175855	2000	494	--	--	--	--	--	--	--	>494	--	--	--	--	--	--	--	USM (Aquitarien)
Autres forages sur territoire vaudois	19	Pra-Tserère	570	558400	176600	2001	250	--	--	--	16.5	240	8.5	29.2	--	>250	--	--	--	--	--	--	USM (Aquitarien)
	20a	Yverdon-F4	435	539698	180299	1980	598	29	--	--	31.7	597	9.0	36.3	27.8	35	250	--	--	--	--	--	Malm
	20b	Yverdon-F5	435	539683	180220	1998	1479	29.3	43.5	--	59	1436	9.0	34.1	35.6	18	188	1022	--	--	--	--	Dogger (Bajocien)
	21	Noréaz-1	480	541098	181322	1984	571	--	--	--	--	--	--	--	413	--	--	--	--	--	--	--	Crétacé inf.
22	La Grève-1	430	540020	181450	1987	666	--	--	--	33.2	666	9.0	34.8	--	300	600	--	--	--	--	--	Malm	

Tableau 4.6.2 : Liste des forages profonds réalisés dans le canton de Fribourg et dans les régions limitrophes (valeurs de gradients * et **: voir texte pour commentaire)

Le tableau 4.6.2 ci-dessus présente la liste des forages profonds réalisés dans le canton de Fribourg et dans les régions limitrophes. En grande partie tirées de Medici & Rybach (1995), les températures ont été complétées par les valeurs trouvées dans d'autres publications ou rapports. Toutes ces valeurs peuvent être sujettes à de nombreuses erreurs car les conditions de mesures sont souvent inconnues (mesures ponctuelles ou diagraphie de température). Normalement, la prise de température dans un forage doit se faire après un temps suffisamment long (env. 1 mois) suite aux travaux, afin de permettre un ré-équilibre des caractéristiques thermiques naturelles du sous-sol. Cette condition n'a probablement que rarement été respectée pour les forages cités puisque la reconnaissance géothermique n'était, pour la plupart, pas leur objectif.

Sur la base de ces données, deux gradients géothermiques en ° C/km sont proposés :

- le gradient moyen (*), calculé entre la température moyenne annuelle de l'air (estimée d'après les données de Météosuisse pour la période 1961-1990) + 1° C (correspond plus ou moins à la température de l'eau souterraine proche de la surface) et la température maximale mesurée dans le forage ;
- le gradient profond (**), calculé avec la température à 1'000 m (ou 500 m si pas disponible) et la température maximale mesurée.

Des gradients moyens inférieurs à 30° C/km apparaissent dans une zone englobant une partie de la vallée de la Broye (Henniez-Payerne) et Courtion. En direction du pied du Jura, sur une ligne passant par Yverdon, le forage de Tschugg-1 et celui d'Hermrigen-1, le gradient moyen est par contre clairement supérieur : il varie de 34.8 à 36.3° C/km. En direction des Préalpes, les valeurs augmenteraient aussi sensiblement, jusqu'à 35° C/km pour le forage de Bulle.

Une compilation des données de température dans sept forages pétroliers profonds du canton de Fribourg et de régions limitrophes a été réalisée (Figure 4.6.8). On constate que le gradient géothermique régional moyen est de l'ordre de 30 à 32° C/km pour ces forages.

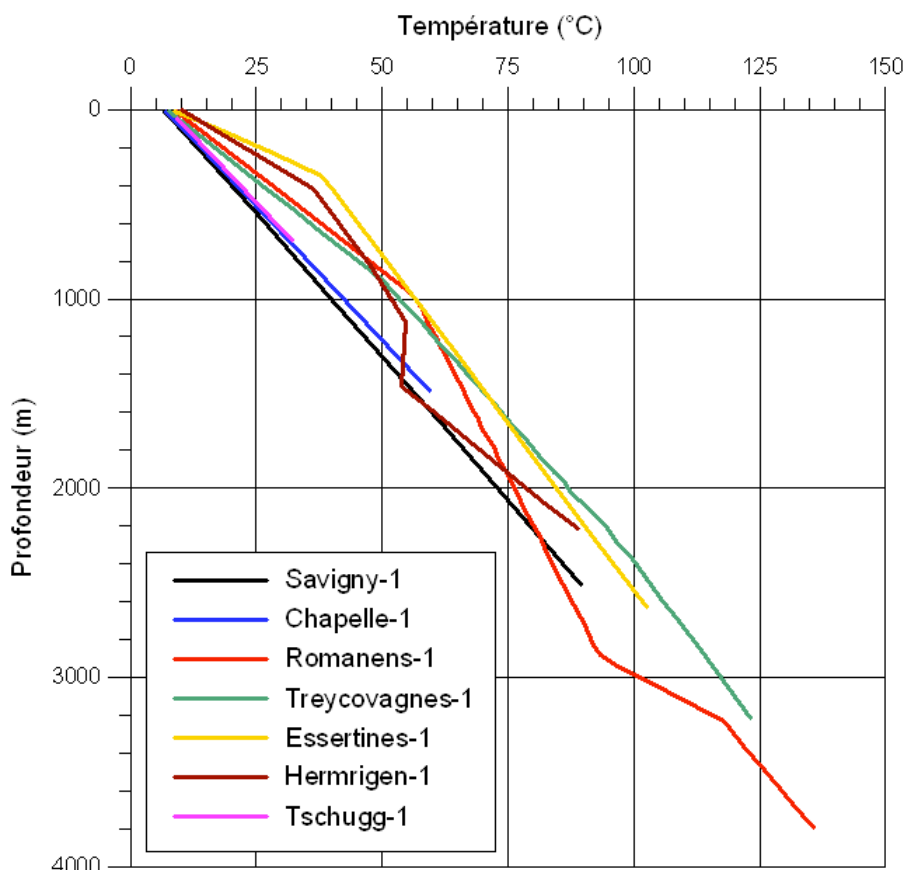


Figure 4.6.8 : Profils de température dans les forages profonds situés sur territoire fribourgeois et régions limitrophes (compilation d'après Vollmayr, 1983).

4.6.5 Conditions hydrogéologiques des AP

Les forages profonds réalisés sur territoire fribourgeois et dans les régions limitrophes ont démontré que la Molasse (molasse du plateau et molasse subalpine) ne pouvait pas être considérée a priori comme un aquifère susceptible de fournir des débits intéressants pour une exploitation géothermique économiquement rentable.

Les circulations d'eau sont quasi nulles dans la Molasse d'eau douce inférieure (USM). Les niveaux détritiques grossiers (Grès de Method, Grès de Suscévaz, Grès de Cuarny, Grès de la Cornalle, Poudingues du Pèlerin, ou leurs équivalents sur territoire fribourgeois) sur lesquels on avait 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) demeurent assez superficielles et peu importantes là où cette formation n'est pas très épaisse. Elles peuvent être intéressantes si l'OMM présente une épaisseur de plusieurs centaines de mètres et si les couches sont suffisamment fracturées. Cependant, vu les faibles profondeurs (300-900 m), il s'agit toujours d'eaux « froides » (~ 20° C à Matran à 333 m). Thierrin (1990) mentionne que l'exploitation de cet aquifère ne permettrait pas de soutirer des débits supérieurs à 1'200 l/min par puits et par secteur.

Ainsi, nous considérerons le Tertiaire, jusqu'à preuve du contraire apportée par un nouveau forage, comme une « couche aquifère improductive » pour la géothermie AP. Cette épaisseur à traverser par de futurs forages profonds peut être extrapolée de manière approximative à partir de la carte des isohypses de la base de la Molasse (Figure 4.6.6, Paolacci, en prép.). On retiendra que l'épaisseur des formations molassiques augmente du NW au SE en s'éloignant du pied du Jura. Ainsi, un forage implanté à Estavayer-le-Lac, n'aura environ que 1'000 m de Molasse à traverser (+ Quaternaire), alors que cette épaisseur se rapprochera des 3'000 m à Bulle !

Sous le bassin molassique, les formations plus anciennes, jurassiques et crétacées, n'ont jamais montré jusqu'à maintenant une porosité et une perméabilité primaire suffisante permettant d'exploiter les fluides qu'elles pourraient contenir (eau, gaz ou pétrole), qu'il s'agisse de calcaires oolithiques, de récifs ou de formations gréseuses. Il importerait 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.

Toutefois, des conditions intéressantes peuvent exister dans les secteurs où les formations à dominante calcaire ont été soumises au phénomène de fracturation. En effet, la fissuration de roches compétentes peut entraîner une augmentation sensible de la perméabilité et favoriser ainsi les circulations d'eau.

Bien connus au pied du Jura, les calcaires aquifères sont localisés dans les formations suivantes : le Crétacé, le Malm (Séquanien, Kimmeridgien et Portlandien), le Dogger (Bajocien et Callovien) et le Trias (Muschelkalk).

Aquifères du Crétacé

Après le retrait de la mer du plateau suisse au début du Tertiaire, le Crétacé alors affleurant est soumis à une intense érosion, beaucoup plus marquée au nord-est de la Suisse qu'au sud-ouest. Cette érosion est accompagnée de phénomènes de karstification qui ont été mis en évidence dans plusieurs forages pétroliers. Ces paléokarsts sont, semble-t-il, partout colmatés par les dépôts sidérolithiques de l'Eocène, ce qui empêche toute circulation d'eau. C'est notamment le cas à Courtion (Figure 4.6.8) où ces dépôts sont visibles dans des fissures jusqu'à une profondeur de 50 m dans l'Hauterivien, sous l'ancienne surface d'érosion (Pasquier & Persoz, 1977). Le meilleur aquifère potentiel du Crétacé se situe donc dans les calcaires du Valanginien plus profonds. De 50 m à Courtion, leur épaisseur augmente en direction du sud-

ouest (71 m à Treycovagnes, env. 100 m à Essertines). Kiraly (1973) propose une valeur de 10^{-4} m/s pour la perméabilité régionale du Valanginien dans le Jura neuchâtelois.

Aquifère du Malm

Dans le Malm, l'importance des calcaires massifs du Séquanien, du Kimméridgien et du Portlandien constitue le meilleur potentiel aquifère du Mésozoïque. Au pied du Jura, plusieurs forages profonds artésiens exploitent déjà cette ressource pour l'alimentation en eau potable, comme par exemple les puits de Saint-Aubin (NE) à 320 et 380 m ($> 2'500$ l/min) ou le puits de Treytel-Bevaix à 300 m ($> 4'500$ l/min). De 345 m à Courtion, l'épaisseur de ces trois formations augmente en direction du sud-ouest (501 m à Essertines) mais diminue en direction des Préalpes (< 150 m à Romanens). La perméabilité de cet aquifère est relativement bonne dans le Jura neuchâtelois avec des valeurs comprises entre 10^{-3} à 10^{-4} m/s (Kiraly, 1973).

Aquifères du Dogger

Les aquifères du Dogger sont représentés par les calcaires récifaux du Bajocien (Dogger inférieur) et dans une moindre mesure par les calcaires du Callovien (Dogger supérieur). De grandes variations latérales de faciès existent au sein de cette formation. Par exemple, en direction du bassin molassique, les faciès de plate-forme (calcaires massifs) présents au pied du Jura 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. Les roches très marneuses indiquent des faciès de sédimentation en domaine profond. Seul peut-être le Callovien (Dogger sup.) semble avoir conservé au niveau de Courtion un faciès calcaire suffisant, lui permettant d'être aquifère. Toutefois son épaisseur ne doit pas dépasser 30 m et il serait hasardeux de fonder trop d'espoir sur l'exploitation de cette ressource.

Aquifère du Trias

Les calcaires du Muschelkalk supérieur dans le Trias constituent enfin un dernier aquifère potentiel au sein des formations du Mésozoïque. Ils sont, par exemple, déjà exploités à Riehen par un forage de 1'547 m avec un débit de 20 l/s (voir § 4.4.2). En raison de leur position profonde, peu d'informations fiables existent quant à leur potentiel de production sous le bassin molassique. A Courtion, ils sont présents à 2'870 m de profondeur avec une épaisseur de 63 m. En raison des fortes minéralisations de l'eau contenue généralement dans ce réservoir liées aux évaporites, une exploitation en doublet devrait être envisagée (18,2 g/l à Riehen). Il est toutefois difficile, au stade actuel des connaissances, d'évaluer les chances de succès et la rentabilité économique d'un ou de deux forages à de telles profondeurs.

Comme on l'a déjà mentionné, **le potentiel aquifère des formations calcaires décrites ci-dessus dépendra fortement du degré de fracturation de la roche**. L'existence et la localisation de ces zones faillées sont cependant souvent hypothétiques et mal connues. Pour préciser ces paramètres, il demeure donc essentiel de reprendre toutes les lignes sismiques, ainsi que les interprétations disponibles réalisées par les compagnies pétrolières. Ce travail n'a pas encore été entrepris en détail sur le territoire fribourgeois. Ailleurs, on en est resté à une analyse de quelques lignes choisies (travaux de Sommaruga, de Gorin et al., 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 recherche dirigés par les Prof. F. Marillier, Institut de Géophysique-UNIL, et G. Gorin, Dépt. de Géologie et Paléontologie, UniGE).

Dans le domaine préalpin, les données sismiques sont peu étendues et de qualité fort médiocre. Nos connaissances sur la structure en profondeur demeurent donc très sommaires. Quant aux valeurs géothermiques et à l'hydrogéologie profonde, les données sont quasi-inexistantes à ce jour.

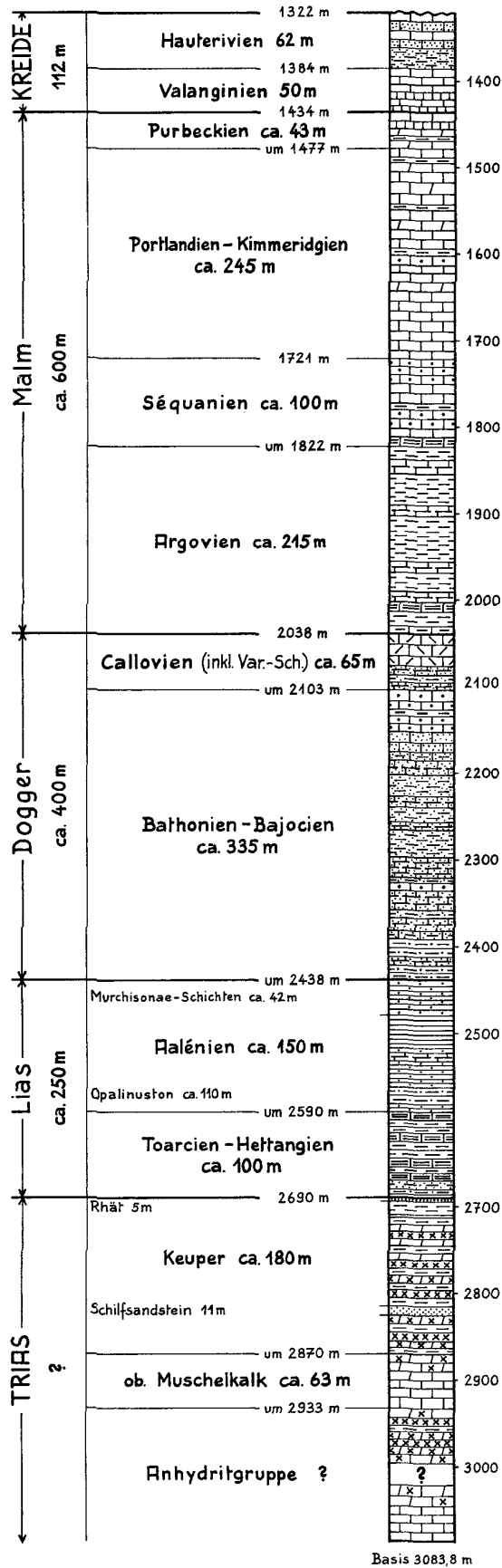


Figure 4.6.8 : Coupe lithologique synthétique du Mésozoïque du forage pétrolier de Courtion (Fischer & Luterbacher, 1963).

4.7 Potentiel de projets AP pour le canton de Fribourg à l'horizon 2020

4.7.1 *Evaluation du potentiel géothermique par aquifère*

Si elles sont fracturées, les formations calcaires du Crétacé inférieur, du Malm et du Trias (Muschelkalk sup.) peuvent être considérées comme de bons aquifères. Sous ces conditions géologiques favorables, il est possible de tenter une estimation du potentiel géothermique du sous-sol fribourgeois. Ne disposant pas d'informations suffisantes et actuelles sur la localisation des accidents tectoniques majeurs, le choix des sites évalués s'est alors porté sur les sept principales villes du canton, grandes consommatrices d'énergie.

Les résultats de cette évaluation sont présentés dans le tableau 4.7.1 ci-dessous. Le gradient géothermique de chacune des localités a été estimé en extrapolant les valeurs calculées des forages profonds (Tableau 4.6.2). La profondeur du toit du Crétacé est tirée de la carte des isohypses de la base de la molasse (Figure 4.6.6). Celles du Malm et du Trias correspondent au Crétacé additionné des épaisseurs des différentes formations, lesquelles ont été évaluées à partir des valeurs reconnues dans les forages alentours. Pour l'estimation des températures, ces profondeurs ont été augmentées pour le Crétacé, le Malm et le Trias de respectivement 100, 200 et 50 mètres, ceci afin de considérer une pénétration suffisante dans la zone aquifère. Le calcul de la température exploitable s'est fait en multipliant par le gradient cette profondeur corrigée, puis en soustrayant à la valeur obtenue une température de réinjection arbitraire fixée à 20° C. Enfin, la formule donnée par l'OFEN (1992) a permis de calculer la puissance d'un forage potentiel et donc d'une opération géothermique dans un aquifère donné, pour un débit choisi à 10 l/s. L'épaisseur importante de l'aquifère du Malm permet probablement d'exploiter un débit deux fois supérieur, ce qui revient à doubler aussi son potentiel géothermique.

De manière synthétique, on peut s'attendre à une puissance géothermique par forage de l'ordre de 0.7 à 3.3 MW_{th} pour le Crétacé, de 1.0 à 3.6 MW_{th} pour le Malm et de 2.5 à 4.0 MW_{th} pour le Trias. Si certaines valeurs proposées sont intéressantes pour une utilisation de cette forme d'énergie, il ne faut toutefois pas oublier de mettre en relation ce potentiel avec la profondeur requise des forages et les coûts résultants. Cette profondeur varie de 1.0 à 2.9 km pour le Crétacé, de 1.1 à 3.0 km pour le Malm et de 2.3 à 3.6 km pour le Trias.

Site de forage	Altitude moyenne (m)	Gradient géothermique moyen estimé (°C/km)	Aquifère du Crétacé				Aquifère du Malm				Aquifère du Trias			
			Profondeur estimée du toit du Crétacé (km)	T° estimée à 100 m dans le Crétacé (°C)	T° exploitable dans le Crétacé (°C)*	Puissance géothermique (MW _{th}) estimée du Crétacé pour un débit de 10 l/s	Profondeur estimée du toit du Malm (km)	T° estimée à 200 m dans le Malm (°C)	T° exploitable dans le Malm (°C)*	Puissance géothermique (MW _{th}) estimée du Malm pour un débit de 10 l/s	Profondeur estimée du toit du Trias (km)	T° estimée à 50 m dans le Trias (°C)	T° exploitable dans le Trias (°C)*	Puissance géothermique (MW _{th}) estimée du Trias pour un débit de 10 l/s
Fribourg	630	31	2.31	75	55	2.3	2.41	81	61	2.5	3.61	113	93	3.9
Tafers	650	31	2.03	66	46	1.9	2.43	82	62	2.6	3.63	114	94	3.9
Bulle	750	33	2.73	93	73	3.1	2.88	102	82	3.4	3.33	112	92	3.8
Morat	430	32	1.21	42	22	0.9	1.31	48	28	1.2	2.51	82	62	2.6
Romont	700	31	1.68	55	35	1.5	1.83	63	43	1.8	3.03	95	75	3.2
Estavayer-le-Lac	430	34	1.01	38	18	0.7	1.11	45	25	1.0	2.31	80	60	2.5
Châtel-Saint-Denis	800	33	2.88	98	78	3.3	3.03	107	87	3.6	3.48	116	96	4.0

* Pour une température de réinjection de 20°C

Tableau 4.7.1 : Evaluation du potentiel géothermique en MW_{th} des aquifères du Crétacé, du Malm et du Trias pour des forages produisant 10 l/s, implantés dans les principales villes du canton de Fribourg

4.7.2 Potentiel de consommation et calendrier de réalisation

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'habitations 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 MW_{th} dont 4 MW_{th} fournis par la géothermie, couvre les besoins en chauffage de plus de 160 immeubles. Rappelons enfin qu'une installation plus modeste comme à Seon (voir § 4.4.2) permet déjà de chauffer à distance une soixantaine d'habitations avec une puissance installée d'env. 1.5 MW_{th} avec une eau de 19.6° C à 300 m dans un aquifère graveleux à un débit de 1'500 l/min. A notre connaissance, aucun aquifère graveleux à cette profondeur n'existe dans le canton de Fribourg. Dans ces conditions de profondeur, seule la Molasse marine supérieure (OMM) pourrait peut-être, avec un peu de chance, être exploitée, si son épaisseur et son degré de fissuration sont suffisants (§ 4.6.5).

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 novateurs (serres, piscicultures, centres de loisirs aquatiques).

Le calendrier d'exécution prévisionnel d'une éventuelle opération géothermique AP sur le canton de Fribourg est présenté dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.7.2 – Calendrier prévisionnel d'un futur projet AP dans le canton de Fribourg

Activités	Années												
	1			2			3			4			
Contacts utilisateurs potentiels			■	■									
Etudes préliminaires				■	■	■							
Avant-projet, soumissions						■	■						
Préparation et réalisation du 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 d'une mise en valeur de la géothermie en cas de succès des forages. 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, fracturation, etc.). La réinterprétation des lignes sismiques constituera une étape incontournable de cette phase du projet. La réalisation de nouvelles lignes sismiques haute-résolution doit être prévue sur le(s) site(s) potentiellement intéressant(s)

afin de préciser l'état de fracturation des roches avant la phase de forage. La préparation d'un avant-projet et la mise en soumission des travaux de perforation, la réalisation du forage de prospection, 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.

4.7.3 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.

- **Technique 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.
- **Inclinaison du forage** : il faut impérativement dévier le forage au passage des aquifères profonds fracturés, de sorte à recouper un maximum de venues d'eau thermale et d'augmenter ainsi les chances d'obtenir un débit d'exploitation élevé.
- **Equipement du forage** : les tubes en alliage spéciaux pour le chemisage du forage de prospection devront être achetés après la perforation et les premiers tests de production selon le type d'eau rencontré. La zone de production 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 à 150 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 la technique slimhole entre la surface et la chambre de pompage. Enfin, celle-ci 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 une surchauffe du moteur des pompes.
- **Singlet / doublet** : il faut privilégier l'exploitation d'aquifères dont la minéralisation est suffisamment faible pour permettre un rejet des eaux profondes, après utilisation thermique, dans le réseau hydrographique ou dans le réseau d'eau potable. 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 réaliser le puits d'infiltration à partir de la même plate-forme de forage en déviant le puits dans la direction opposée à celle du forage de production.
- **Profondeur des forages** : des températures de l'eau en tête de puits > 50° C doivent être visées. Cela permettra une exploitation directe par échangeurs de chaleur 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 possible par la suite de modifier le programme de perforation en arrêtant le forage à des profondeurs moindres si des aquifères productifs intéressants sont rencontrés dans les niveaux 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 entre le puits de production et les utilisateurs est un point essentiel à prendre en considération. Le futur puits doit se situer le plus proche possible du premier utilisateur, de manière à réduire au minimum les coûts de la conduite principale. L'implantation précise d'un forage de prospection ne se justifie pas sur la base des seuls critères géologiques. En effet, la connaissance des structures géologiques profondes est le plus souvent acquise par 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.).

4.8 Conclusions

Dans le canton de Fribourg, l'absence de manifestations géothermiques de surface ainsi que l'échec du forage de Bulle ne permettaient pas, jusqu'alors, d'envisager de nouveaux projets d'exploitation dans des aquifères profonds. Cependant, les différentes investigations menées dans le cadre de cette étude ont montré qu'un réel potentiel géothermique existait, de 0.7 à 4 MW_{th} par forage suivant le site de production et la profondeur de l'aquifère visé, pour autant que ce dernier soit suffisamment fracturé. Sur l'ensemble du canton, les connaissances précises de ces conditions essentielles de fracturation font actuellement défaut. Si la réinterprétation des données pétrolières existantes permettrait déjà de mieux définir ces paramètres à l'échelle régionale, il sera nécessaire, pour tout futur projet AP, de débiter par une phase de prospection locale (nouveaux profils sismiques), afin de caractériser au mieux la géologie et de limiter au maximum les risques inhérents à ce genre d'opération.

Depuis 1998, aucun forage d'une profondeur supérieure à 300 m devant atteindre un aquifère géothermique n'a été réalisé en Suisse. Sans un soutien financier de la Confédération permettant de couvrir le risque d'échec géologique, peu de promoteurs, publics ou privés, prendraient la décision, dans la situation économique actuelle, d'investir des montants de plusieurs millions de CHF dans une opération définie à risque. Des initiatives au niveau de l'OFEN, voire d'autres offices fédéraux seraient bienvenues pour relancer la prospection géothermique profonde en Suisse. D'ici là, nous recommandons au canton de Fribourg, de ne pas écarter a priori l'idée d'exploitation AP lorsque de futurs projets immobiliers d'envergure seront proposés. En effet, suivant l'importance du budget alloué à ces projets, il pourrait être relativement aisé de consacrer un poste à la caractérisation précise du potentiel géothermique du site par une étude hydrogéologique ciblée (données existantes et nouvelle prospection). Si les conditions locales s'avèrent favorables, la prise de risque sera limitée et une discussion objective pourra alors être engagée sur la réalisation ou non d'un forage géothermique profond.

4.9 Références

- ABA-Geol SA, Fehlmann Travaux Hydrauliques SA, Sulzer Energie Consulting SA & Conrad Zschokke SA (1989). Utilisation du potentiel géothermique profond dans la région payernoise. Etude préliminaire pour la commune de Payerne, env. 80 pp., inédit.
- Bertrand J. (1992). Sondage géothermique à Bulle – Résultats et enseignements. Rapport technique, Bureau Hydrap, Broc, non publié.

- 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., Lemcke K., Wiener G. & Zimdars J. (1977). Geologische Ergebnisse der Erdölexploration auf das Mesozoikum im Untergrund des schweizerischen Molassebeckens. ASP/VSP Bulletin, Vol. 32, n° 82.
- 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. & Sabatelli F. (2000). Italy country update report 1995-1999. Proc. World Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000 : 109-116.
- Dubois J.-D., Mazor E., Jaffé F. & Bianchetti G. (1993). Hydrochimie et géothermie de la région de Saillon (Valais, Suisse). Bull. du Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel, 12 : 71-85
- Escher A., Masson H. & 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.
- Fischer H. & Luterbacher H. (1963). Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion 1 und Altishofen 1. Beiträge zur Geologischen Karte der Schweiz, no 145.
- 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.
- Hadorn J.-C. (1992). Suivi du forage géothermique pour le collège du Sud à Bulle (FR). Projet de forage géothermique. Etude technico-économique de l'utilisation de la ressource. Rapport final pour l'OFEN, non publié.
- 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.
- Häring M.O., Leimer Th. & Wahl S. (2002). Wärme-Contracting, Geothermie-Doublette, Siedlung Solar One, Itingen, BL. DIS-Projekt Nr : 26'745, Auftrag des Bundesamtes für Energie.
- Jaffé F., Benoit F. & Roux D. (1976). Low enthalpy geothermal energy in Switzerland : the thermal spring of Lavey and its utilisation. Int. Congr. Thermal Waters, Geothermal Energy, Vulcanism Mediterranean Area, Athens, 1 : 268-274.
- Kiraly L. (1973). Carte hydrogéologique du canton de Neuchâtel. Suppl. du Bull. de la Soc. neuch. des Sc. nat., tome 96.
- Laplaige P., Jaudin F., Desplan A. & Demange J. (2000). The French geothermal experience : review and perspectives. Proc. World Geothermal Congr., Kyushu-Tohoku, June 2000 : 283-295.
- Matousek F. & Graf H. (1998). Trinkwasser und Wärme aus 300 m Tiefe. GWA 1/98.

- 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.
- Muralt R. & Vuataz F.-D. (1994). Emergence d'eau thermale et mélanges avec des eaux souterraines froides dans la gorge de la Dala à Leukerbad (Valais, Suisse). *Bull. du Centre d'Hydrogéologie, Université de Neuchâtel*, 12 : 111-135
- 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.
- Paolacci S. (in prép.): Etude du soubassement de la partie occidentale du bassin molassique suisse sur la base de données sismiques-réflexion. *Thèse Univ. Genève*.
- Pasquier F. & Persoz F. (1977). Oxydation des calcaires mésozoïques sous la molasse du plateau suisse et paléokarst. *ASP/VSP Bulletin*, Vol. 43, n° 105.
- Pasquier F. (1977). Les conditions hydrogéologiques du stockage souterrain d'eau chaude en Suisse. *Bull. du Centre d'Hydrogéologie de Neuchâtel*, 2 : 63-81.
- Rybach L., Büchi U.P., Bodmer Ph., Griesser J.-C., Israng L., Kappeler S., Rellstab W., Schlanke S. & Weiss H.P. (1981). Geothermische Datensynthese der Schweiz. *Schriftreihe des Bundesamtes für Energiewirtschaft*, 26, Bern, 122 pp. + 24 annexes (cartes).
- Schellschmidt R., Clauser C. & 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.
- Vollmayr T. (1983). Temperaturmessungen in Erdölbohrungen der Schweiz. *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. U. -Ing.*, vol. 49, 116 : 15-27.
- Vuataz F.-D. (1982). Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. *Matériaux pour la géologie de la Suisse – Hydrologie* N° 29.
- Vuataz F.-D. (1992). Rapport interne sur l'analyse des coûts de forages géothermiques en Suisse. *Note au dossier pour le CREALP*, 3 pp., non publié.

- 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. & Fehr A. (2000). 25 ans d'activités géothermiques en Suisse. *Bull. Géothermie CH*, 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.
- Wilhelm J., Bianchetti G. & Vuataz F.D. (2003). Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Géostrutures énergétiques (GE), Aquifères profonds (AP), Géothermie haute énergie (HE). Rapport préparé par le groupement PGV pour le Service de l'environnement et de l'énergie (SEVEN), canton de Vaud, non publié, 171 pp.

Annexe 4.1

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

Orientation bibliographique sur la géologie du canton

Les publications et documents cités ci-dessous 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.

Généralités

Dépassant largement les frontières cantonales, des introductions plus ou moins fouillées aux secteurs principaux (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 26ème Congrès géologique international de Paris, 1980* (Wepf & Co, Basel).

Bassin molassique

SOMMARUGA (1997, *Mém. Soc. neuch. Sci. nat.*, 12). Excellente synthèse moderne, couvrant le Jura vaudois et neuchâtelois, ainsi qu'une partie du 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, *Ecolgae geol. Helv.*, 95,2). Deux synthèses stratigraphiques, sédimentologiques et structurales qui concernent la Molasse uniquement, surtout dans le canton de Vaud, mais aussi dans la Broye et la Singine.

Préalpes-Alpes

Il n'y a pas de présentation synthétique récente concernant ce secteur.

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, 1999. Office fédéral des Eaux et de la Géologie (OFEG), Ittigen-Berne*). Cette carte recouvre la partie méridionale des Préalpes fribourgeoises

PLANCHEREL (1979, *Ecolgae geol. Helv.* 72/1). Synthèse structurale des Préalpes VD, FR, BE.

MOSAR (1997, *Bull. Soc. vaud. Sci. nat.* 84/4). Nouvelle synthèse structurale des Préalpes VD, FR, BE.

Etudes concernant la structure et la profondeur du Socle et de sa Couverture mésozoïque

SISMIQUE. De nombreux rapports non publiés, issus des sociétés pétrolières, analysent les campagnes sismiques des 50 dernières années. En principe, ces rapports sont tous accessibles (voir au Département des Géosciences de l'Université de Fribourg). La qualité des résultats, ainsi que les interprétations sont très variables. Ces rapports offrent néanmoins une assez bonne image de la structure profonde dans le secteur molassique. Dans le secteur préalpin, l'information sismique est trop sommaire et il n'y a pas de sondages profonds.

JORDI (1990) : *Tektonisch-strukturelle Übersicht Westschweizerisches Molassebecken. Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, 56. Ce travail recouvre une bonne partie du territoire

molassique vaudois et une petite partie du canton de Fribourg ; il est basé 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; n'aborde presque pas le territoire fribourgeois.

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, mais n'aborde presque pas le territoire fribourgeois ; 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 l'histoire géologique et les relations structurales entre le Jura, le Bassin molassique et les Alpes.

Etudes concernant le régime thermique

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.

Trois excellentes synthèses des données profondes disponibles à l'époque, lesquelles n'ont pas beaucoup progressé depuis.

ASSOCIATION ABA-GEOL, SULZER, FEHLMANN, CONRAD ZSCHOKKE (1989, *Utilisation du potentiel géothermique profond dans la région payernoise*). Etude préliminaire de faisabilité d'un sondage profond (non réalisé) à Payerne, dans la plaine de la Broye. Rapport non publié (voir ci-dessous).

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.

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).

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 Mont Chamblon).

Coupe géologique prévisionnelle

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 (1981) 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. Le toit du Malm est à environ 1'450m de profondeur. Ces prévisions contrastent avec celles de Rigassi (1973), tirées de la sismique pétrolière, qui indiquent des profondeurs encore plus importantes, supérieures de 200 m.

Description des aquifères

Sous la plaine de la Broye, il existe cinq 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 (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 (env. 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 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 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 10^{-9} m/s similaire aux forages dans le Nord de la Suisse. L'eau devrait y avoir une température d'environ 120° C au niveau de Payerne.

Sur ces cinq aquifères potentiels, sous la ville de Payerne, seules 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 favorable à Payerne avec une température comprise entre 45 et 53° C et à une profondeur de forage estimée à 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 raisonnable pour

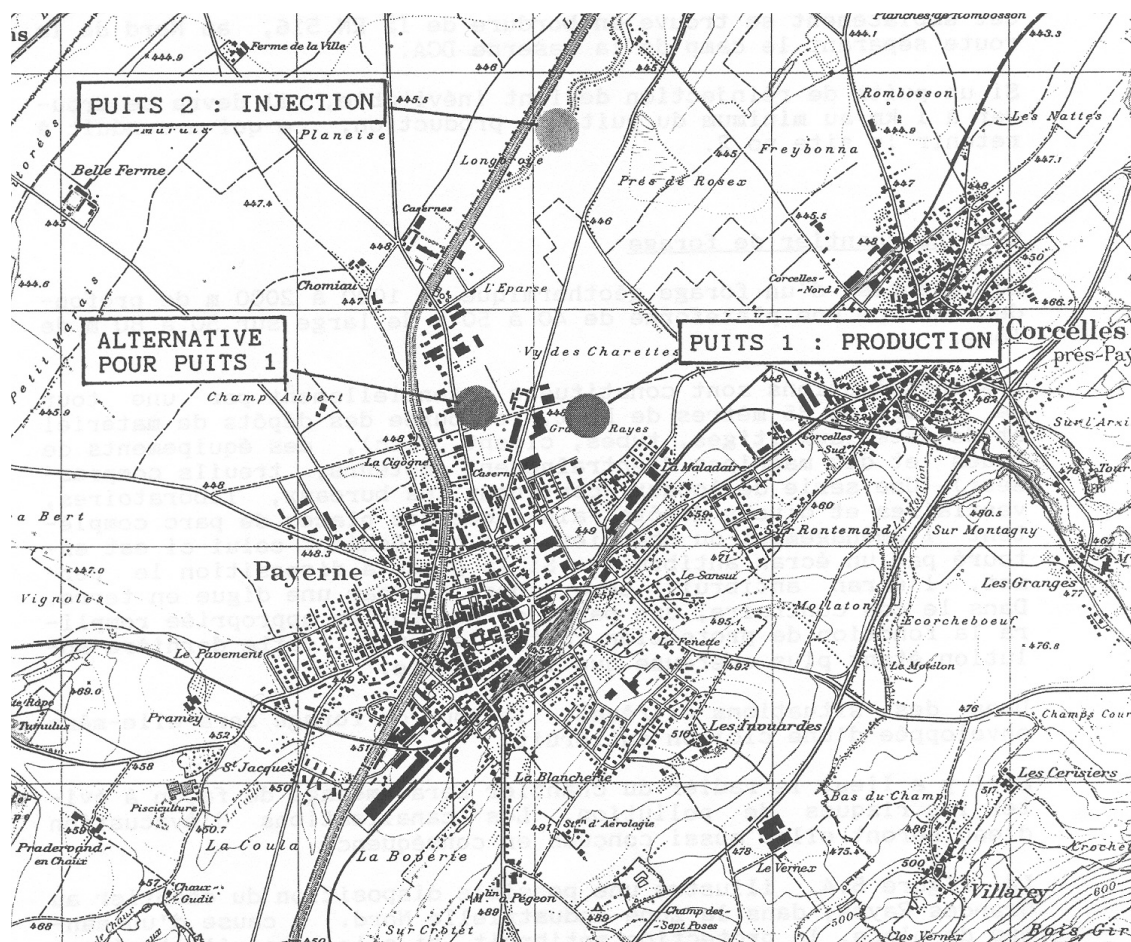
cet aquifère. L'aquifère du Malm est également très prometteur dans le contexte de Payerne, à une profondeur de forage d'environ 1.4 km et une température de 60° C.

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 marquées, alors que le Malm devrait contenir des eaux faiblement minéralisées (< 0.5 g/l), du même type que celles captées à Yverdon-les-Bains.

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

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.



Sites de forage présélectionnés

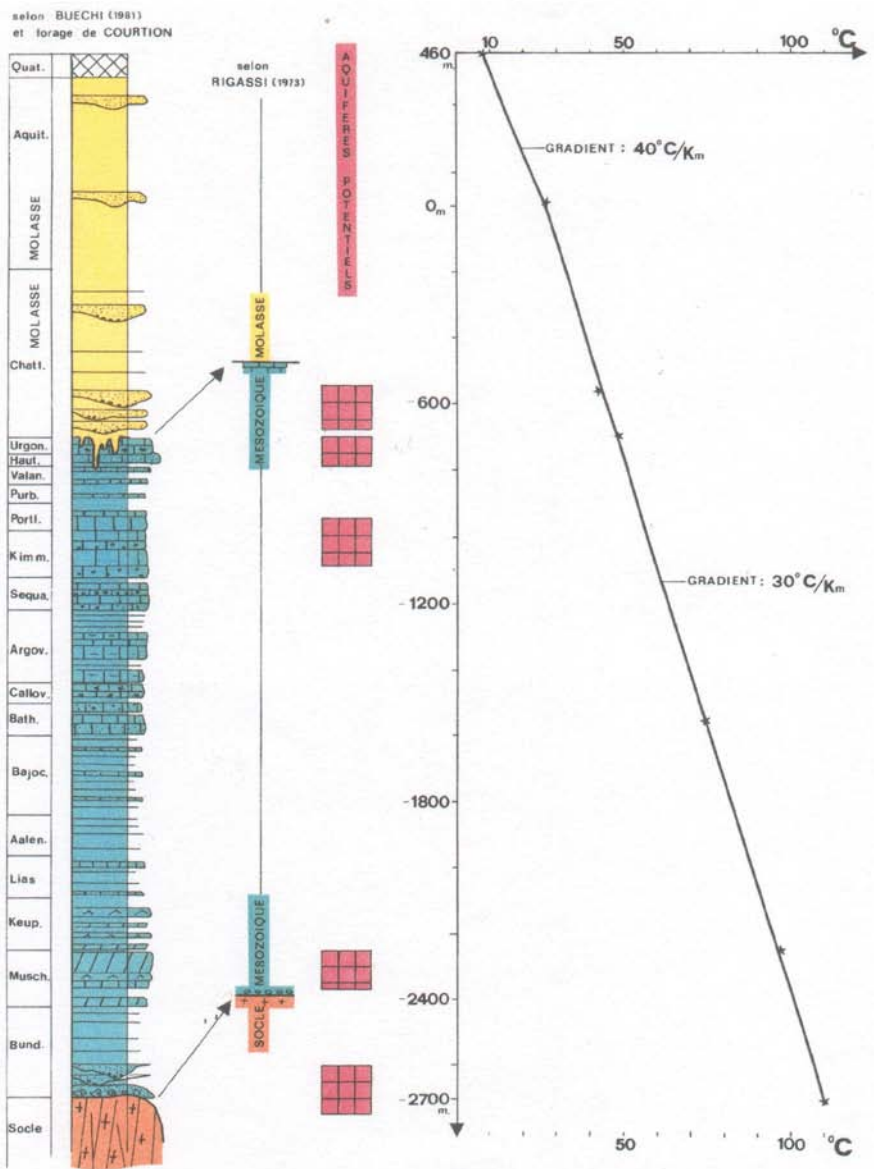
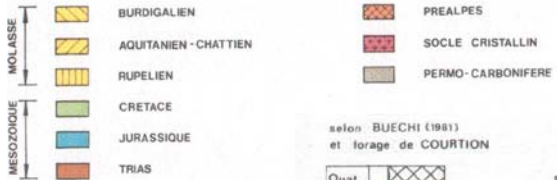
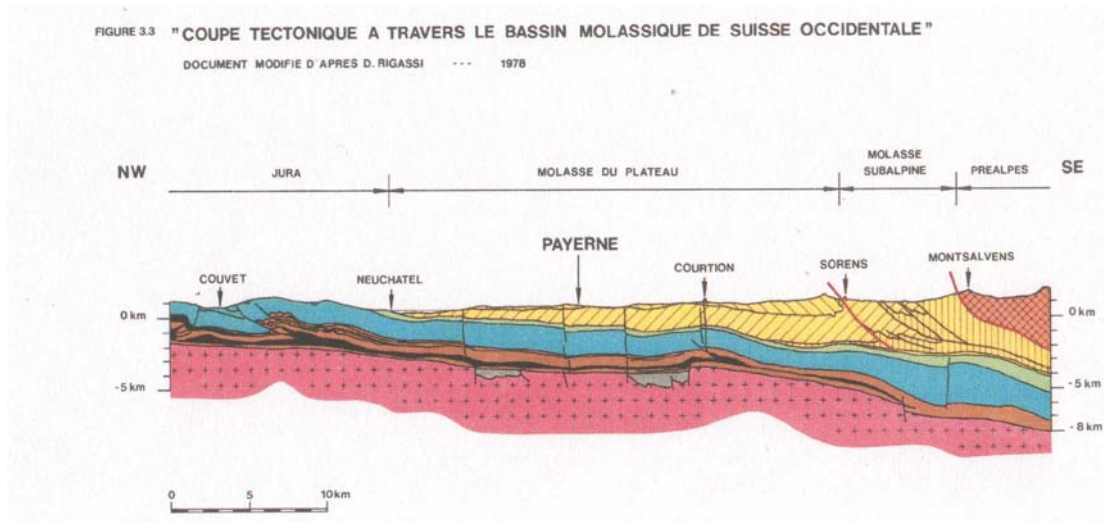


FIGURE 3.2 PAYERNE : PROFIL GEOLOGIQUE, AQUIFERES ET GRADIENTS GEOTHERMIQUES PREVISIONNELS

Annexe 4.2

Compilation des informations concernant les forages profonds situés sur les cantons de Fribourg, Vaud et Berne

Successivement, les informations suivantes seront données : le nom du maître de l'oeuvre (société), la date de forage, la profondeur totale atteinte (p. t.), la référence du rapport descriptif, d'éventuelles données complémentaires.

Sondages pétroliers sur territoire fribourgeois

En principe, tous ces sondages ont fait l'objet d'un logging géophysique complet, y compris mesures de température. Cette documentation est accessible auprès du Département des Géosciences de l'Université de Fribourg, sous réserve de l'accord de la Direction des travaux publics du canton.

1. Fendingen-1 (585'300/192'500/603 msm)

B.P. Petroleum Dev. Overseas Ltd

1982

p. t. = 1968 m

P. J. Townsend (january 1983) : Geological completion report on Fendingen-1, Switzerland. B. P. Exploration Dept.

2. Romanens-1 (564'200/167'400/947 msm)

Elf Aquitaine Intern.

1977

p. t. = 4022 m

Pétrole d'Aquitaine (Berne) SA (janvier 1978) : Rapport de fin de sondage Romanens-1. Dossier complet

3. Courtion-1 (572'415/189'420/599 msm)

B. P. Exploration Cy Ltd

1960

p. t. = 3083 m

J. T. O. B. Perry (December 1960) : Geological completion report for Courtion n° 1. B.P. Geological division.

H. Fischer & H. P. Luterbacher (1963) : Das Mesozoikum der Bohrungen Courtion-1 (Kt. Freiburg) und Altishofen (Kt. Luzern). Mat. Carte géol. Suisse, N.S., 115.

P. Frame et al. (February 1987) : Biostratigraphy of the well Courtion-1. B. P. Research Centre.

4. Sorens-1 (568'470/169'190/1020 msm)

B.P. Exploration Cy Ltd

1961

p. t. = 3165 m

J. T. O. B. Perry (July 1961) : Geological completion report on Sorens n° 1. B.P. Geological division.

Sondages pétroliers sur territoire vaudois proche

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.

5. Concise-1 (546'340/189'900/440 msm)

Val-de-Travers Asphalte Paving Cy

1926

p.t.=240 m

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

Pas de diagraphie / t° = ?

6. Cuarny-1 (543'470/180'350/562 msm)

Pétroromand-Neuchavaud S.A.

1936-1939

p.t.=2228 m

Jordi (1993) : Bull. Soc. vaud. Sci. nat., 82 ; Jordi (1995) : Notice explic. feuille Yverdon, Atlas géol. Suisse 1 : 25'000 / Log : voir Sommaruga (1997), p. 159

Pas de diagraphie / t°=79° C à 2'000 m

7. Servion-1 (549'010/157'900/765 msm)

Pétroromand-Neuchavaud S.A.

1938-1939

p.t.=1433 m

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

Pas de diagraphie / t°= ?

8. Chapelle-1 (547'305/168'359/764 msm)

SAdH-Elwerath

1958

p.t.=1531 m

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

Diagraphie / t°= 47° C à 1000 m

9. Savigny-1 (546'271/155'312/839 msm)

SAdH-Elwerath

1960

p.t.=2486 m

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

Diagraphie / t°=env. 85° C

10. Essertines-1 (539'775/173'490/661 msm)

SAdH-Elwerath

1963

p.t.=2936 m

Büchi et al. (1965) : Ver. schweiz.Petroleum-Geol. u. Ing., 32 / Log : voir Sommaruga 1997, p. 159

Diagraphie / t°=env. 100° C

11. Treycovagnes-1 (536'136/180'273/473 msm)

Shell

1978

p.t.=3221 m

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

Diagraphie / t°=120° C

12. Hermrigen-1 (584'603/214'885/542 msm)

Elf Aquitaine

1992

p.t.=2198 m

Housse (1982) : Forage Hermrigen 1d, Informations intéressant la géothermie recueillies au cours du forage et des essais. Off. de l'économie hydraulique et énergétique du canton de Berne (déposé à l'Université de Neuchâtel : no 82/1534). Log : voir Sommaruga 1997, p. 159
Diagraphie / t°=79° C à 2000 m

13. Tschugg-1 (572'610/207'910/462 msm)

KUS

1976

p.t.=704 m

Schnegg (1992) : Testing a new multichannel controlled-source audio magnetotelluric method (CSAMT) on a borehole. EGH 85, 459-470. Log : voir Sommaruga 1997, p. 159
Diagraphie / t°=29° C à 500 m

Autres sondages profonds sur territoire fribourgeois**14. Bulle** (570'250/164'375/765 msm)

Sondage géothermique, Dépt. Instruction publique FR - voir § 4.5.1

1992

p. t. = 800 m

Rapport CSD FR, n° 1677-3 (25 mai 1992).

F. Ghirlanda (1993) : Diplôme inédit, Inst. Géol. Univ. Fribourg.

Log thermique complet / t°=36° C à 785 m

15. Matran (573'910/181'360/590 msm)

Sondage pour recherche d'eau, Tousfruits SA (?)

1990 (?)

p. t. = 333 m

Rapport inédit J. Thierrin (13.03.1990)

Rapport complémentaire J. Thierrin (05.06.1997)

Données thermiques / t°=21° C

16. Gletterens (561'518/193'961/480 msm)

Sondage pour PAC, Büro für Hydrogeologie P. Angehrn, 6353 Weggis

1996

p. t. = 420 m

Pas de données géothermiques, ni de données géologiques détaillées

Autres sondages profonds sur territoire vaudois proche**17. Payerne-SMA** (562'220/184'680/480 msm)

Sondage pour PAC, Office des Constructions fédérales, Berne

1991

p. t. = 258 m

W. Eugster (1993) : Diplôme inédit, Inst. für Geophysik, ETH-Z.

Log thermique complet

18. Henniez-50 (556'660/175'855/486 msm)

Sondage pour recherche d'eau, Henniez SA
2000

p. t. = 494 m

T. Juillard (2000) : Rapport inédit.

Pas de log de température

19. Pra Tsérère (558'400/176'600/570 msm)

Sondage pour recherche d'eau, Henniez SA
2001

p. t. = 250 m

T. Juillard (2001) : Rapport inédit.

Log thermique: 16.5° C au fond; gradient de 3.5° C/100 m

20a. Yverdon F4 (539'698/180'299/435 msm)

Centre thermal Yverdon

1980

p.t. = 598 m

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

Diagraphie / t°=29° C

20b. Yverdon F5 (539'683/180'220/435 msm)

Centre thermal Yverdon

1998

p.t. = 1479 m

Vuataz (1998) : Bull. Géothermie-CH 22 et 23, Soc. Suisse pour la géothermie ; Vuataz (1999) :
Rapport final pour OFEN.

Diagraphie / t°=59° C

21. Noréaz-1 (541'098/181'322/480 m)

Arkina S.A.

1984

p.t. = 571 m

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

Diagraphie / t° = ?

22. La Grève-1 (540'020/181'450/430 msm)

Arkina S.A.

1987

p.t. = 666 m

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

Diagraphie / t°=33° C

Le tableau 4.6.4 du § 4.6.4 synthétise et complète les informations présentées ci-dessus.

Liste d'une partie de la documentation pétrolière fribourgeoise disponible au Département des Géosciences de l'Université de Fribourg (sous réserve de l'accord du Dépt. Travaux Publics)

Freag, rapport 249.76: « Rapport d'implantation du forage Wünnewil 1 », par Ch. Chenevart, septembre 1976.

Freag, rapport 247.75: « Rapport de fin de campagne vibrosismique Prakla sur la structure de Wünnewil: résultats et interprétation des mesures », par Ch. Chenevart, 24 juillet 1975.

Elf Aquitaine International: « Bilan de 21 ans d'exploration pétrolière sur les permis de Berne et de Fribourg Sud », par J. Choignard, décembre 1989.

BP Exploration, rapport PFW/KAG/1.24: « Switzerland, Fribourg Licence, Summary technical report », 15.3.1989.

BP Petroleum Development Overseas Ltd, Explor. Dpt, Report DOS 20981: « Geological completion report: Fendringen-1, Switzerland », by P. J. Townsend, January 1983.

BP Research Center, Report STR/105/86: « Biostratigraphy of the well Courtion-1: results of micropaleontological analysis of additional core samples (Early Cretaceous-Middle Jurassic only) », by P. Frame, C.C. Ebdon and al., February 1987.

Institut de Géophysique de l'Université de Lausanne: « Villarimboud-Lentigny, étude géophysique », janvier 1987 (avec une lettre du Prof. R. Olivier, datée du 24.02.1987).

Classeur fédéral intitulé « Pétrole », contenant correspondances administrative et technique, actes divers, etc sur les permis de recherche fribourgeois, jusque vers 1989.

Elf Aquitaine International: « Modélisation du motif structural temps de Montsalvens », 12 octobre 1989: 1 lettre et 6 planches annexes.

BP Exploration, Technical Note: « Sedimentology of the Basal Permian and Stephanian, Weiach-1 (Switzerland) ». 15. September 1987.

BP Research Center, Report STR/111/87: « Biostratigraphy of the interval 1488.7-1836.65 m from well Weiach-1, Switzerland ». October 1987.

BP Research Center, Report CGB/179/87: « The geochemistry of Upper Carboniferous sediments from the well Weiach-1, Switzerland ». November 1987.

Prakla Seismos: « Report Fribourg 1985 on a Vibroseis-reflection Survey in the Fribourg area/Switzerland ». Nr 851 309, 31 janvier 1986.

CGG: « Processing report BP Petroleum Development Ltd » Lines FR-85-01 to 08. No 140L200.

Liasse avec note de Géolina, contenant les documents suivants :

- BP Expl. Co Ltd, 23 mars 1989, location diagram 1 : 100'000;
- lignes sismiques Wünnewil 81 FR-81-01 à 08;
- lignes sismiques BP FR-85-01 à 07.

Pétroles d'Aquitaine (Berne) SA: « Rapport de fin de sondage Romanens-1 », janvier 1978. Dossier complet.

Prakla Seismos: « Rapport Fribourg Sud 1974 sur des mesures de sismique réflexion d'après le procédé Vibroseis sur le permis de Fribourg ». Nr 741 046, 15.01.1975.

Prakla Seismos: « Rapport Fribourg Sud 1975 sur des mesures de sismique réflexion d'après le procédé Vibroseis sur le permis de Fribourg ». Nr 751 012, 06.11.1975.

1 dossier de documents divers concernant le dépôt d'hydrocarbures de Grolley - City Carbueroil SA.

1 dossier de documents divers concernant des excursions géologiques-géotechniques dans le cadre de l'autoroute et des gravières (Sieber, Briel, Dorthe, etc).

Nagra : Sondierbohrung Weiach, Untersuchungsbericht. Mat. Carte géol. Suisse, sér. géotechn., 73, 1989.

Documentation BP, env. 1959-1961. Concerne: « Seismic reflection survey, Fribourg prospect », forages de Courtion et de Sorens. Cartes et documents annexes. Le tout selon liste comprenant 20 numéros, datée du 14 janvier 1982 et rédigée par Ch. Chenevart.

Weekly Boring log : Courtion well, July to November 1960, Sorens well, November 1960 to June 1961. BP Exploration S.A. Fribourg, Switzerland

Mud data to accompany Weekly Boring log, Courtion & Sorens well

Field report on a seismic reflection survey in the Canton of Fribourg, for BP Exploration S.A. By Seismograph Service Limited, Keston, England. Dec. 1959.

Seismic reflection survey, Fribourg prospect. BP Exploration SA. By Seismograph Service Limited, Keston England. August 1960.

Seismic reflection survey-Fribourg. Misery-Corserey Area. By C.G.Pickering, BP Geophysical division. April 1960.

Seismic reflection survey-Fribourg. Alterswil and Gibloux area. By C.G.Pickering, BP Geophysical division. November 1960

Geological completion report on Sorens No. 1. By J.T.O.B. Perry, BP Geological division. July 1961.

Report on a well velocity survey of Sorens No. 1. By D.J. Thomas, BP Geophysical division. July 1961.

Geological completion report for Courtion No.1. By J.T.O.B. Perry, BP Geological division. December 1960.

Carottage sismique et carottage de vitesse continu. Courtion No. 1. By C.F.P.S. pour British Petroleum Co. December 1960.

Review of a seismic reflection survey in the Canton of Fribourg, Switzerland. By D.J. Thomas, BP Geophysical division. July 1961.

The prospects of finding productive Lower Marine Molasse in the Alterswil area (S.I.M. Concession, Fribourg) Switzerland. By E. Lehner, for BP Geological division. August 1961.

Notes manuscrites sur Sorens No.1. Sans nom. Sans date.

Sept « Formation testing service Bericht ». By Halliburton, Oil well cementing Co. for BP Company.

Deux Schlumberger logs : Gamma Ray and Microlog Sorens N° 1.

Trois tirés-à-part : Tercier et Mornod, La Molasse de la région de Fribourg. La Molasse de la vallée du Gotteron. Problèmes de sédimentation et de tectonique dans les Préalpes.

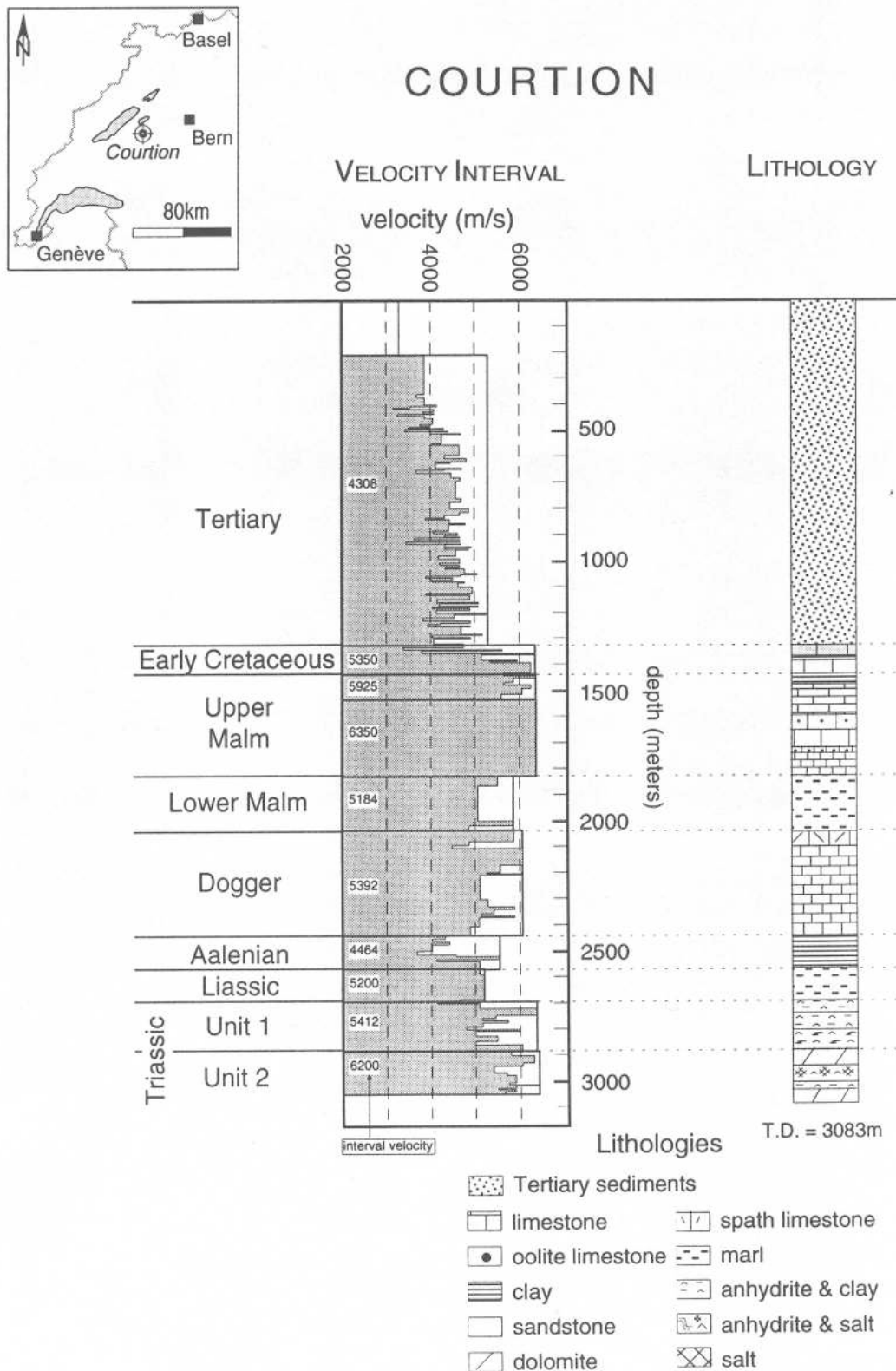
Lignes-sismogrammes, série incomplète, telles qu'elles ont été remises à FREAG en 1975, par l'intermédiaire de Monsieur le Professeur Mayer de Stadelhofen, Institut de géophysique de l'Université de Lausanne, à qui les avait confiées la Direction des Travaux Publics de Fribourg, soit : Sismogrammes No. 1 - 2 - 3 - 6 - (fragment 6) - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15 - 16 - 17 - 18 - 20 - 21 - 22 - 23 - 25 - 26 - 27 - 28 - 29 - 30 - 31 - 32 - 34 - 35 - 36 et 37.

Lettre du 26 février 1963 de BP accompagnant les logs ci-joints From Sorens No.1 well : 2 electric logs - 1 gamma ray log - 2 gamma ray neutron logs - 2 laterologs - 2 temperatur Messung logs - 2 microlaterologs - 4 micrologs-microkaliber. From Courtion N° 1 well : Mud log. Scale 1 : 1'000.

102 cartes au 1 : 25'000 (Atlas topographique de la Suisse) et 8 cartes au 1 : 25'000 (Carte nationale de la Suisse) donc un total de 110 cartes donnant la position des points mesurés le long de diverses lignes sismiques.

<p>1) Courtion</p> <p>exploration company BP, 1960 T.D. = 3083m</p> <p>elevation 599m</p> <p>x 572'415m</p> <p>y 189'420m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>599</td><td>1322</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-1322</td><td>-723</td><td>112</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-1434</td><td>-835</td><td>388</td></tr> <tr><td>Malm</td><td>-1822</td><td>-1223</td><td>216</td></tr> <tr><td>Argovian</td><td>-2038</td><td>-1439</td><td>400</td></tr> <tr><td>Dogger</td><td>-2438</td><td>-1839</td><td>152</td></tr> <tr><td>Aalenian</td><td>-2590</td><td>-1991</td><td>100</td></tr> <tr><td>Liassic</td><td>-2690</td><td>-2091</td><td>180</td></tr> <tr><td>Keuper</td><td>-2870</td><td>-2271</td><td>63</td></tr> <tr><td>MK dolom.</td><td>-2933</td><td>-2334</td><td>150</td></tr> <tr><td>MK evap.</td><td>-3083</td><td>-2484</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Fischer & Luterbacher 1963</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	599	1322	Tertiary	-1322	-723	112	Cretaceous	-1434	-835	388	Malm	-1822	-1223	216	Argovian	-2038	-1439	400	Dogger	-2438	-1839	152	Aalenian	-2590	-1991	100	Liassic	-2690	-2091	180	Keuper	-2870	-2271	63	MK dolom.	-2933	-2334	150	MK evap.	-3083	-2484		T.D.				<p>2) Tschugg</p> <p>exploration company KUS, 1976 T.D. = 704m</p> <p>elevation 463m</p> <p>x 572'610m</p> <p>y 207'910m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>463</td><td>509</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-509</td><td>-46</td><td>129</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-638</td><td>-175</td><td>66</td></tr> <tr><td>Jurassic</td><td>-704</td><td>-241</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Schnegg 1992</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	463	509	Tertiary	-509	-46	129	Cretaceous	-638	-175	66	Jurassic	-704	-241		T.D.																							
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	599	1322																																																																																											
Tertiary	-1322	-723	112																																																																																										
Cretaceous	-1434	-835	388																																																																																										
Malm	-1822	-1223	216																																																																																										
Argovian	-2038	-1439	400																																																																																										
Dogger	-2438	-1839	152																																																																																										
Aalenian	-2590	-1991	100																																																																																										
Liassic	-2690	-2091	180																																																																																										
Keuper	-2870	-2271	63																																																																																										
MK dolom.	-2933	-2334	150																																																																																										
MK evap.	-3083	-2484																																																																																											
T.D.																																																																																													
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	463	509																																																																																											
Tertiary	-509	-46	129																																																																																										
Cretaceous	-638	-175	66																																																																																										
Jurassic	-704	-241																																																																																											
T.D.																																																																																													
<p>3) Hermrigen</p> <p>Elf Aquitaine, 1982 T.D. = 2198m</p> <p>elevation 480m</p> <p>x 587'790m</p> <p>y 214'900m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>480</td><td>395</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-395</td><td>85</td><td>8</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-403</td><td>77</td><td>436</td></tr> <tr><td>Malm</td><td>-839</td><td>-359</td><td>239</td></tr> <tr><td>Argovian</td><td>-1078</td><td>-598</td><td>380</td></tr> <tr><td>Dogger</td><td>-1458</td><td>-978</td><td>92</td></tr> <tr><td>Aalenian</td><td>-1550</td><td>-1070</td><td>177</td></tr> <tr><td>Liassic</td><td>-1727</td><td>-1247</td><td>280</td></tr> <tr><td>Keuper</td><td>-2007</td><td>-1527</td><td>79</td></tr> <tr><td>MK dolom.</td><td>-2086</td><td>-1606</td><td>112</td></tr> <tr><td>MK evap.</td><td>-2198</td><td>-1718</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Housse 1982</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	480	395	Tertiary	-395	85	8	Cretaceous	-403	77	436	Malm	-839	-359	239	Argovian	-1078	-598	380	Dogger	-1458	-978	92	Aalenian	-1550	-1070	177	Liassic	-1727	-1247	280	Keuper	-2007	-1527	79	MK dolom.	-2086	-1606	112	MK evap.	-2198	-1718		T.D.				<p>4) Essertines</p> <p>SADH, 1963 T.D. = 2936m</p> <p>elevation 660m</p> <p>x 539'775m</p> <p>y 173'490m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>660</td><td>337</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-337</td><td>323</td><td>194</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-531</td><td>129</td><td>501</td></tr> <tr><td>Malm</td><td>-1032</td><td>-372</td><td>314</td></tr> <tr><td>Argovian</td><td>-1346</td><td>-686</td><td>406</td></tr> <tr><td>Dogger</td><td>-1752</td><td>-1092</td><td>153</td></tr> <tr><td>Aalenian</td><td>-1905</td><td>-1245</td><td>397</td></tr> <tr><td>Liassic</td><td>-2302</td><td>-1642</td><td>634</td></tr> <tr><td>Keuper</td><td>-2936</td><td>-2276</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Büchi et al. 1965b</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	660	337	Tertiary	-337	323	194	Cretaceous	-531	129	501	Malm	-1032	-372	314	Argovian	-1346	-686	406	Dogger	-1752	-1092	153	Aalenian	-1905	-1245	397	Liassic	-2302	-1642	634	Keuper	-2936	-2276		T.D.			
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	480	395																																																																																											
Tertiary	-395	85	8																																																																																										
Cretaceous	-403	77	436																																																																																										
Malm	-839	-359	239																																																																																										
Argovian	-1078	-598	380																																																																																										
Dogger	-1458	-978	92																																																																																										
Aalenian	-1550	-1070	177																																																																																										
Liassic	-1727	-1247	280																																																																																										
Keuper	-2007	-1527	79																																																																																										
MK dolom.	-2086	-1606	112																																																																																										
MK evap.	-2198	-1718																																																																																											
T.D.																																																																																													
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	660	337																																																																																											
Tertiary	-337	323	194																																																																																										
Cretaceous	-531	129	501																																																																																										
Malm	-1032	-372	314																																																																																										
Argovian	-1346	-686	406																																																																																										
Dogger	-1752	-1092	153																																																																																										
Aalenian	-1905	-1245	397																																																																																										
Liassic	-2302	-1642	634																																																																																										
Keuper	-2936	-2276																																																																																											
T.D.																																																																																													
<p>5) Cuarny</p> <p>Vingerhoets, 1940 T.D. = 2229m</p> <p>elevation 562m</p> <p>x 543'540m</p> <p>y 180'380m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>562</td><td>480</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-480</td><td>82</td><td>240</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-720</td><td>-158</td><td>1240</td></tr> <tr><td>Malm</td><td>-1960</td><td>-1398</td><td>269</td></tr> <tr><td>Dogger</td><td>-2229</td><td>-1667</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Althaus & Rickenbach 1947</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	562	480	Tertiary	-480	82	240	Cretaceous	-720	-158	1240	Malm	-1960	-1398	269	Dogger	-2229	-1667		T.D.				<p>6) Treykovagnes</p> <p>Shell, 1978 T.D. = 3221m</p> <p>elevation 473m</p> <p>x 536'135m</p> <p>y 180'273m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>473</td><td>177</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-177</td><td>296</td><td>514</td></tr> <tr><td>Malm</td><td>-691</td><td>-218</td><td>203</td></tr> <tr><td>Argovian</td><td>-894</td><td>-421</td><td>404</td></tr> <tr><td>Dogger</td><td>-1298</td><td>-825</td><td>66</td></tr> <tr><td>Aalenian</td><td>-1364</td><td>-891</td><td>308</td></tr> <tr><td>Liassic</td><td>-1672</td><td>-1199</td><td>858</td></tr> <tr><td>Keuper</td><td>-2530</td><td>-2057</td><td>30</td></tr> <tr><td>MK dolom.</td><td>-2560</td><td>-2087</td><td>121</td></tr> <tr><td>MK evap.</td><td>-2681</td><td>-2208</td><td>62</td></tr> <tr><td>Buntsandstein</td><td>-2743</td><td>-2270</td><td>478</td></tr> <tr><td>Permian</td><td>-3221</td><td>-2748</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Report deposited at the Musée géologique du Canton de Vaud in Lausanne; Schegg et al. 1997</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	473	177	Cretaceous	-177	296	514	Malm	-691	-218	203	Argovian	-894	-421	404	Dogger	-1298	-825	66	Aalenian	-1364	-891	308	Liassic	-1672	-1199	858	Keuper	-2530	-2057	30	MK dolom.	-2560	-2087	121	MK evap.	-2681	-2208	62	Buntsandstein	-2743	-2270	478	Permian	-3221	-2748		T.D.															
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	562	480																																																																																											
Tertiary	-480	82	240																																																																																										
Cretaceous	-720	-158	1240																																																																																										
Malm	-1960	-1398	269																																																																																										
Dogger	-2229	-1667																																																																																											
T.D.																																																																																													
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	473	177																																																																																											
Cretaceous	-177	296	514																																																																																										
Malm	-691	-218	203																																																																																										
Argovian	-894	-421	404																																																																																										
Dogger	-1298	-825	66																																																																																										
Aalenian	-1364	-891	308																																																																																										
Liassic	-1672	-1199	858																																																																																										
Keuper	-2530	-2057	30																																																																																										
MK dolom.	-2560	-2087	121																																																																																										
MK evap.	-2681	-2208	62																																																																																										
Buntsandstein	-2743	-2270	478																																																																																										
Permian	-3221	-2748																																																																																											
T.D.																																																																																													
<p>7) Chapelle</p> <p>SADH, 1958 T.D. = 1540m</p> <p>elevation 764m</p> <p>x 547'305m</p> <p>y 168'359m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>764</td><td>1506</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-1506</td><td>-742</td><td>25</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-1531</td><td>-767</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Lemcke 1959</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	764	1506	Tertiary	-1506	-742	25	Cretaceous	-1531	-767		T.D.				<p>8) Savigny</p> <p>SADH, 1960 T.D. = 2486m</p> <p>elevation 839m</p> <p>x 546'271m</p> <p>y 155'312m</p> <p>top of ... Formation</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>depth m</th> <th>elevation m</th> <th>thickness m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0</td><td>839</td><td>2331</td></tr> <tr><td>Tertiary</td><td>-2331</td><td>-1492</td><td>155</td></tr> <tr><td>Cretaceous</td><td>-2486</td><td>-1647</td><td></td></tr> <tr><td>T.D.</td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>Lemcke 1963</p>	depth m	elevation m	thickness m	0	839	2331	Tertiary	-2331	-1492	155	Cretaceous	-2486	-1647		T.D.																																																											
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	764	1506																																																																																											
Tertiary	-1506	-742	25																																																																																										
Cretaceous	-1531	-767																																																																																											
T.D.																																																																																													
depth m	elevation m	thickness m																																																																																											
0	839	2331																																																																																											
Tertiary	-2331	-1492	155																																																																																										
Cretaceous	-2486	-1647																																																																																											
T.D.																																																																																													

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



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

5. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)

5. GEOTHERMIE HAUTE ENERGIE (HE)

5.1 Introduction

Plus de 99 % de la masse de la Terre est à une température de plus de 1000° C. Seul le 0.1 % de cette masse, 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 $32 \pm 2^\circ \text{C}$ par kilomètre, même si l'on constate localement des variations horizontales et verticales significatives (Figure 5.1.1).

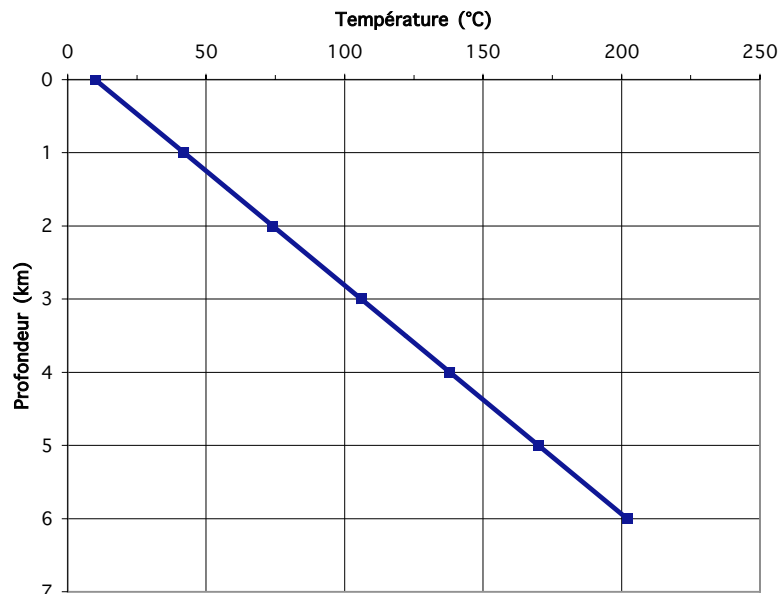


Figure 5.1.1 : Valeurs de température en profondeur obtenues avec un gradient géothermique moyen de 32°C/km .

5.2 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 23 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

9'000 MW_e. Pour certains pays en voie de développement, cette énergie indigène représente un pourcentage non négligeable (2 à 16 %) de leur production d'électricité, diminuant d'autant la charge financière liée à l'achat de combustible fossile (Figure 5.2.1). 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.

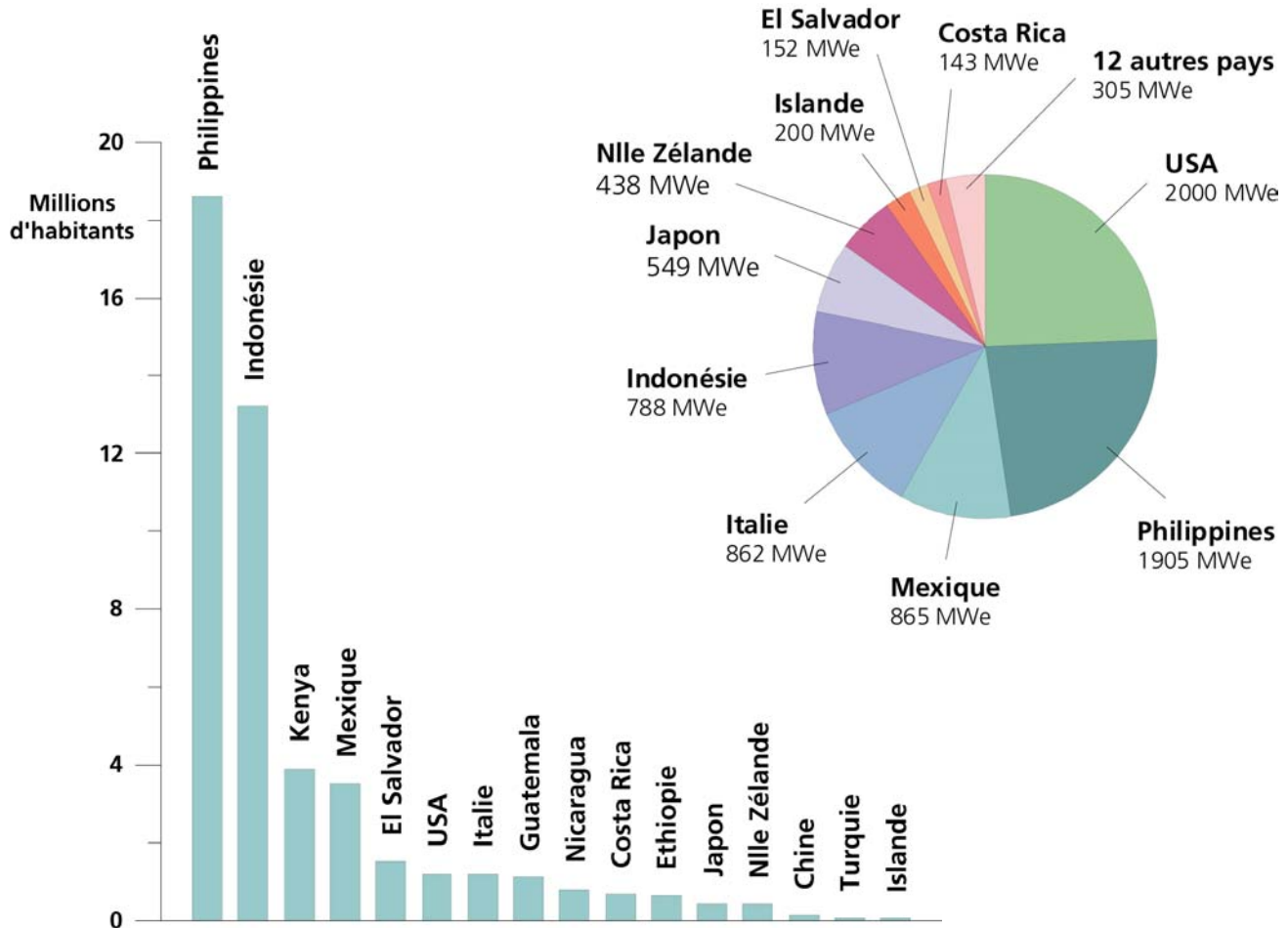


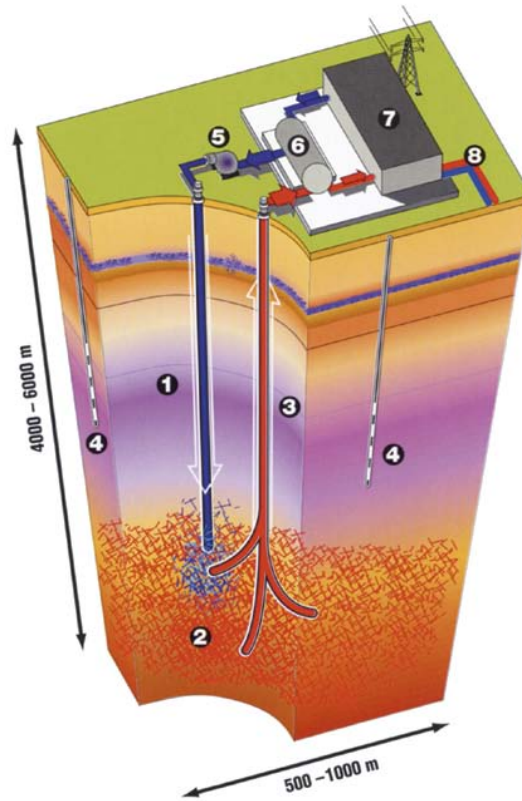
Figure 5.2.1 : Puissance installée pour la production d'électricité géothermique en 2003 dans les principaux pays et distribution des 50 millions de personnes alimentées par de l'électricité d'origine géothermique.

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 par exemple la Toscane ou l'ouest de la Turquie, 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), en français Systèmes Géothermiques Stimulés (SGS), qui convient mieux à la réalité des systèmes géothermiques profonds que l'ancienne dénomination. 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 2006. D'autres projets en Europe, en Australie et en Suisse sont en cours avec un démarrage de la production électrique d'ici 2008 (Figure 5.2.2).



❶ Forage d'injection	❺ Pompe de circulation
❷ Réservoir rocheux fracturé	❻ Echangeur de chaleur
❸ Forage de production	❼ Centrale électrique
❹ Forage d'observation et de contrôle	❽ Réseau de chauffage à distance

Figure 5.2.2 : Schéma conceptuel d'un système géothermique de type SGS.

5.3 Technique d'exploitation des roches chaudes profondes

5.3.1 Extraction de la chaleur du sous-sol

La quantité d'énergie contenue dans les roches en profondeur est énorme, mais trop diffuse pour être extraite directement 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 véritables nappes d'eau souterraine en profondeur, d'autres techniques existent, pour donner à un fluide la chaleur contenue dans les roches. Plusieurs technologies permettent d'exploiter la géothermie en fonction de la température de la ressource et du type d'utilisation de l'énergie (cf. chap. précédents). Pour extraire la chaleur contenue à grande profondeur dans les roches, c'est le système de création d'un échangeur de chaleur en roche fissurée qui est utilisé (Abé et al. 1999).

5.3.2 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.

5.3.3 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, telles que par exemple le contrôle de la pression et de l'ouverture de fissures dans les réservoirs de pétrole et de gaz.

5.3.4 Conversion de la chaleur géothermique en électricité

Basées sur la technologie des nombreuses centrales géothermiques dans le monde qui fonctionnent par le processus du Cycle Organique de Rankine (ORC), c'est-à-dire au moyen d'un fluide binaire à bas point de vaporisation, les futures centrales de type EGS qui produiront électricité et chaleur seront très fiables et relativement simples. Le fluide géothermique sous pression, d'une température $\geq 150^{\circ}\text{C}$ est produit par un ou plusieurs forages profonds : il passe par 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. Après refroidissement du fluide géothermique, ce dernier est intégralement réinjecté en profondeur, au moyen d'un autre forage (Figure 5.3.1 et 5.3.2).

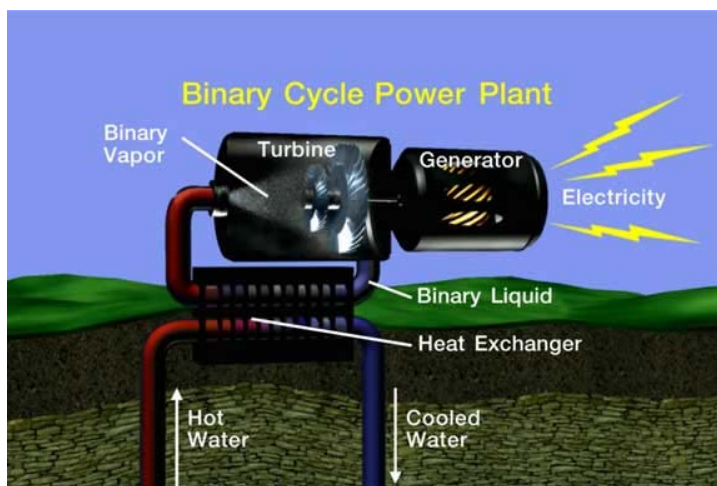


Figure 5.3.1 : Schéma de principe d'une centrale géothermique ORC à fluide binaire (Geothermal Education Office, USA).

Figure 5.3.2 : Centrale géothermique ORC : exemple de Puna (30 MW_e), Hawaii, USA (Geothermal Education Office, USA).



5.4 Projets EGS dans le monde

5.4.1 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 pour produire de l'électricité au moyen d'une centrale pilote est le projet européen de Soultz-sous-Forêts en Alsace (Tableau 5.4.1).

Plusieurs termes ont servi pour dénommer ces projets et cette technologie, termes que l'on retrouve 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 le terme *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 en faciliter la compréhension, le terme correspondant à EGS en français est utilisé, à savoir : Systèmes Géothermiques Stimulés ou SGS.

Tableau 5.4.1 : Liste des principaux projets SGS dans le Monde.

Projet	Pays réservoir	Profondeur réservoir (m)	Température d'activité (° C)	Période
Fenton Hill	USA	3'500	327	1970-1994
Bad Urach	Allemagne	3'300	143	1977-1990
Rosemanowes	Grande-Bretagne	2'000	100	1977-1992
Hijiori	Japon	2'200	250-270	1987-2002
Soultz-sous-Forêts	France	5'000	200	1987 - en cours
Cooper Basin	Australie	4'400	250	1996 - en cours
Bâle	Suisse	5'000	Estimé à 200	1996 - en cours

5.4.2 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, dans le fossé rhénan à 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 fracturé a été créé à 3.6 km et 165° C, puis mis en production en 1997, sur la base de deux puits forés verticalement dans le socle granitique du Fossé rhénan.

Un Groupement Européen d'Intérêt Economique (GEIE) dénommé Exploitation Minière de la Chaleur a été constitué en 1996 et regroupe quatre compagnies de production et de distribution d'électricité (EDF, Electricité de Strasbourg, Pfalzwerke et BESTEC). 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 (5 km) et donc plus chaud (200° C) (Figure 5.4.1).

L'exploitation de ce pilote scientifique débutera en 2006 avec l'installation temporaire d'une mini-centrale électrique de 1.5 MW_e. Ensuite, une puissance de 6 MW_e devrait être atteinte vers 2007 et ce pilote préfigurera les futurs prototypes industriels de production électrique basés sur la technologie SGS (Tableau 5.4.2).

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).

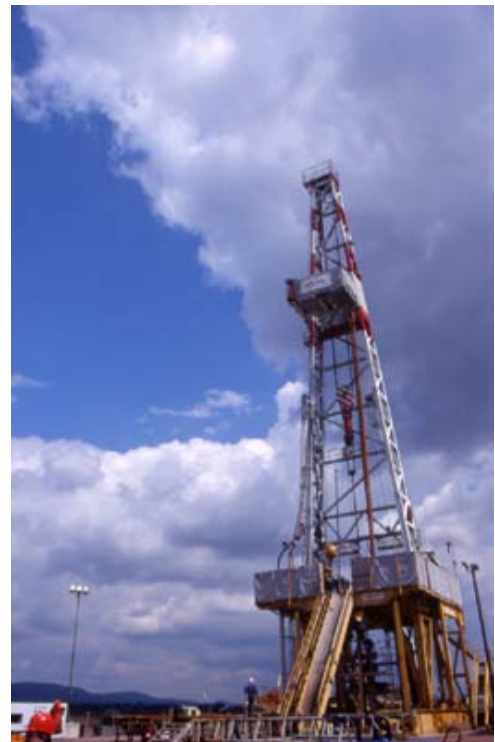


Figure 5.4.1 : Appareil de forage des puits à 5 km, trois pompes d'injection pour la stimulation hydraulique et trois têtes de puits sur le site du programme européen SGS de Soultz-sous-Forêts, Alsace.

Tableau 5.4.2 : 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 initiale de la roche	200° C
Température de production	180 - 190° C
Température de réinjection	40 - 70° C
Débit de fluide	75 - 100 kg/s
Centrale électrique	Centrale à fluide binaire (ORC)
Puissance électrique installée	5.0 - 6.5 MW _e
Puissance électrique consommée par la centrale	1.0 - 1.5 MW _e
Puissance nette disponible	4.0 - 5.0 MW _e

5.5 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 dans un échangeur de chaleur souterrain pour la réchauffer. A cette fin, on injecte sous pression de l'eau froide dans un forage, à une profondeur où la roche atteint une température d'environ 200° C. En Suisse, cette température existe à des profondeurs de l'ordre de 5 à 6 km, selon les conditions géologiques et thermiques connues (Figure 5.5.1).

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).

5.5.1 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, les cantons de Bâle-Ville et de Bâle-Campagne, les Services Industriels (IWB), ainsi qu'Elektra Baselland se sont fortement engagés dans ce projet, sur les plans financiers et logistiques. La compagnie Geopower Basel AG a été créée en 2004 qui a pour but de réaliser d'ici 2009 la première centrale géothermique pilote de production combinée d'électricité et de chaleur en Suisse. Geopower Basel est formé des sociétés suivantes : Services industriels IWB, Elektra Baselland (EBL), Gasverbund Mittelland et Geothermal Explorers. Ltd. L'ensemble des moyens financiers pour réaliser les ouvrages souterrains sont maintenant disponibles.

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, Häring 2004).

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 5.5.2).

Depuis 2002, le projet DHM de Bâle se trouve dans la phase de préparation du premier forage profond devant atteindre la zone cible à 5 km et 200° C où sera créé l'échangeur de chaleur. Ce premier forage profond devrait débuter au deuxième semestre de 2005 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.

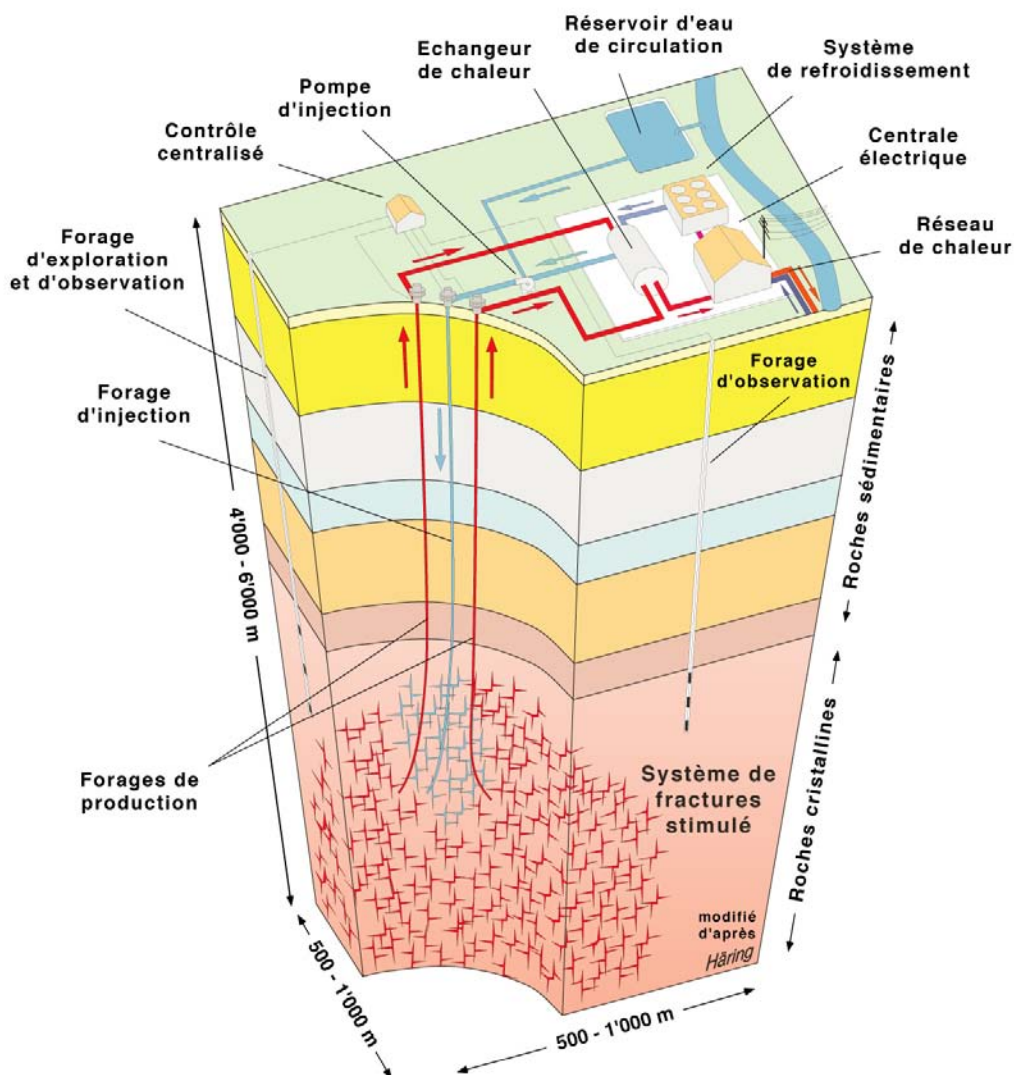


Figure 5.5.1 : Schéma du principe de fonctionnement du système Deep Heat Mining (www.dhm.ch).

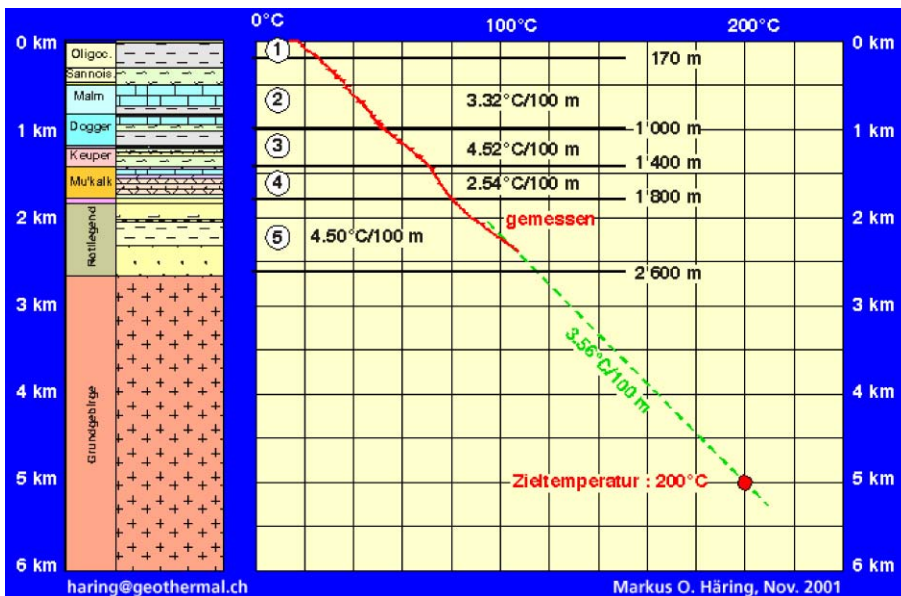
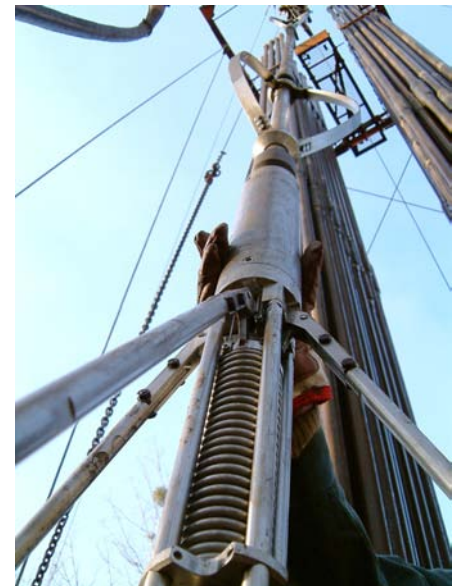


Figure 5.5.2 : Chantier du forage Otterbach-2 à Bâle et résultats des mesures de température dans le puits OT-2

5.5.2 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 2005, 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 installations à fluide binaire ORC.

En fonction des deux puits de production prévus, du débit de fluide estimé (env. 75 l/s) et de la température en tête de puits évaluée (170-180° C), la centrale pilote projetée possèdera une puissance électrique nette d'environ 3 MW_e et une puissance thermique de 20 MW_{th}.

5.5.3 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 géologiques, tant horizontales que verticales existant à faible profondeur. Par conséquent, il devient possible de reproduire ce mode d'exploitation de la chaleur souterraine là où il est le plus adapté 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. En fonction d'une série de critères définis, une dizaine de zones ont été sélectionnées sur l'ensemble du territoire suisse (Figure 5.5.3).

En raison de leur gradient géothermique plus élevé que la moyenne, certaines régions du nord de la Suisse se révèlent 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 au Tessin et 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.

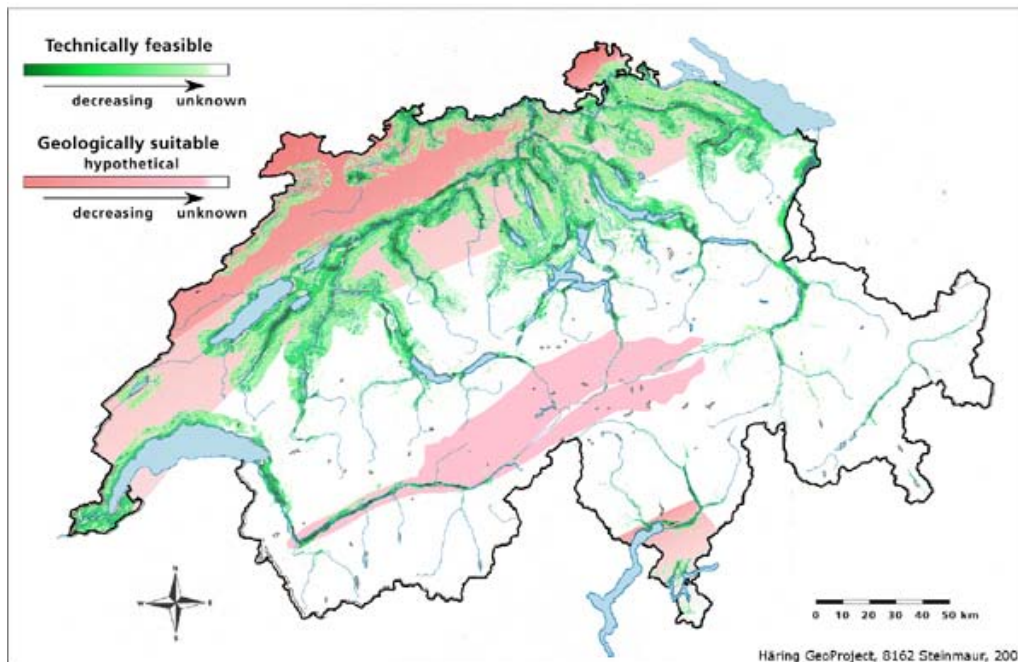


Figure 5.5.3 : Représentation des critères d'évaluation de sites potentiels pour une opération Deep Heat Mining en Suisse (www.dhm.ch)

5.5.4 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. Deux phases ont déjà été réalisées et des rapports ont été 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 2004, qui représente la dernière étape de la phase préliminaire, précédant 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 & 2004). Dès 2005 débuteront les travaux de préparation d'un premier forage d'exploration de 3.7 km de profondeur, devant pénétrer le socle cristallin sur 100 à 200 m.

5.6 Evaluation des ressources géothermiques de haute énergie du canton de Fribourg

5.6.1 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 existant dans 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 la très grande variété que l'on peut rencontrer dans toutes les formations sédimentaires sises au-dessus. Donc, la sélection de sites et le positionnement précis de forages sont beaucoup moins dépendants 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 devient possible d'accorder la priorité aux critères d'occupation du territoire, de sensibilité environnementale et de proximité d'un réseau de distribution de la chaleur afin de sélectionner des sites pour de futures installations SGS.

Dans la région comprise entre les Préalpes et les trois lacs jurassiens de Neuchâtel, Morat et Biemme, dans les cantons de Fribourg, Vaud et Berne, pas moins de 13 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 13 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 permio-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).

5.6.2 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 ont été réalisés sur la structure géologique du territoire fribourgeois et des régions avoisinantes, 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 déchiffrer les couches les plus profondes et notamment d'appréhender le toit du socle cristallin. Il faut rappeler qu'aucun des 23 forages profonds étudiés dans le chapitre Aquifères Profonds 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). Seul le forage de Treycovagnes à proximité d'Yverdon-les-Bains a atteint le Permien, dernière couche sédimentaire avant le cristallin, formée d'ailleurs par l'altération du granite.

De manière générale, on peut dire que le socle cristallin se trouve à une plus faible profondeur au pied du Jura, puisqu'il s'enfonce progressivement en direction du Bassin molassique et des Préalpes (coupe géologique du canton de Fribourg, cf. Figure 4.6.2, Ch. Aquifères Profonds). Posées sur ce socle, les couches d'évaporites du Trias ont permis le décollement et le déplacement de plusieurs kilomètres vers le NW de toute la couverture sédimentaire. Ces mouvements ont eu pour conséquence le développement de plis et de chevauchements. En ce qui concerne le socle cristallin, les connaissances sont très limitées, mais il est possible qu'il

soit aussi affecté dans sa profondeur et sa structure par les décrochements dans le Bassin molassique.

Le peu de données existant sur l'ensemble de la colonne stratigraphique ne permettent pas de dessiner une carte du toit du socle, comme on peut le faire pour la base de la Molasse. Cependant, une première estimation de la profondeur du socle cristallin a pu être tentée pour les zones d'agglomérations de plus de 5'000 habitants du canton de Fribourg (Tableau 5.6.1). Dans l'optique d'utiliser la chaleur résiduelle sortant de la turbine, il est impératif d'avoir des consommateurs de chaleur à proximité de la centrale SGS et donc un réseau de chauffage à distance (CAD). Dans une première évaluation, seules les agglomérations de plus de 5'000 habitants du canton ont été prises en considération, car il faut une certaine densité urbaine pour réaliser un CAD. Dans l'état actuel des connaissances, il est difficile d'obtenir une approximation fiable du toit du socle. Pour l'ensemble de la région étudiée, on ne peut confirmer la présence ou de l'absence de fossés permo-carbonifères, qui changerait sensiblement l'épaisseur de la couverture sédimentaire, comme cela a été démontré dans le Jura français et dans le NW de la Suisse. D'autre part, il y a une incertitude liée à l'épaisseur variable de chaque couche sédimentaire. Par exemple, on voit le Trias s'amincir entre le pied du Jura et les Préalpes.

La profondeur estimée du toit du socle cristallin atteint 3'500 m au NW du canton (Morat), 5'000 m dans la région fribourgeoise et 8'000 m pour Bulle. Ces valeurs pourraient augmenter de plusieurs centaines de mètres si l'on se trouve à l'aplomb d'un fossé permo-carbonifère. Dans l'état actuel de la technologie de forage de grande profondeur, le coût d'un puits au-delà de 6'000 m reste prohibitif pour une opération géothermique. Seuls des forages pour l'industrie pétrolière peuvent se permettre des profondeurs de 6'000 à 8'000 m. Par conséquent, il n'est pas possible de prendre en considération des sites en dessous desquels le toit du socle cristallin ne serait atteint qu'à partir de 5500 m, ce qui exclut d'avance la zone urbaine de Bulle / La Tour-de-Trême et de manière générale la région sise au pied des Préalpes.

Tableau 5.6.1 : Profondeur estimée du toit du socle pour les zones urbaines de plus de 5000 habitants (d'après la coupe géologique de la Figure 4.6.2).

Zone urbaine (altitude)	Population résidente moyenne en 2001	Profondeur du toit du socle ¹ (m)
Morat (460 m)	5'700	3500
Wünnewil-Flamatt (620 m)	5'000	4500
Düdingen (580 m)	6'700	5000
Fribourg (640 m)	34'300	5000
Villars-sur-Glâne (660 m)	9'300	5000
Marly (630 m)	6'900	5000
Bulle / La Tour-de-Trême (760 m)	14'400	8000

¹ La profondeur du socle est considérée ici comme la base du Trias, en raison de l'absence de connaissances sur le Permo-carbonifère.

5.6.3 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 traversées. Sur l'ensemble des 23 forages étudiés dans ce rapport, seuls 16 d'entre eux possèdent des valeurs de température du sous-sol (Tableau 5.6.2). Les données thermiques sont reprises du Tableau 3.6.4 et sont complétées par les valeurs de flux de chaleur, corrigé

pour la topographie, qui ne montrent pas d'anomalies et ne varient qu'entre 80 et 100 mW·m⁻² (Medici et Rybach 1995). On constate que sur le plan régional, on obtient pour les forages de plus de 1'000 m de profondeur un gradient géothermique profond moyen allant de 26 à 36° C/km pour le canton de Fribourg et ses zones limitrophes. Les valeurs de gradients les plus élevées se regroupent dans la région occidentale de la zone d'étude, plus particulièrement vers l'extrémité sud du Lac de Neuchâtel (région autour d'Yverdon-les-Bains).

En calculant la relation linéaire existant entre température et profondeur à partir des mesures disponibles dans les différents forages, il est possible d'extrapoler la profondeur à laquelle la température de 200° C est atteinte. Pour l'ensemble de la région étudiée, on obtient une profondeur de 5'600 m et un excellent coefficient de corrélation (Figure 5.6.3). Cependant, de nombreux paramètres peuvent altérer cette extrapolation de près de 2'000 m et lui donne une incertitude de l'ordre de 500 m dans l'état actuel des connaissances :

- La variation des propriétés thermiques des roches (roches sédimentaires, granite du socle).
- La présence d'eau et de circulations à grande profondeur peuvent transporter la chaleur par convection et modifier ainsi le gradient géothermique local ou régional.
- Certaines valeurs de température mesurées dans un forage donné n'ont pas été réalisées dans les conditions optimales et peuvent montrer des différences assez importantes par rapport aux valeurs régionales.

Pour le canton de Fribourg, les flux de chaleur calculés et cartographiés montrent des valeurs moyennes 80 ± 10 mW·m⁻². La densité des mesures est trop faible pour en tirer des conclusions, mais on constate encore une fois que les valeurs les plus hautes se trouvent dans la région d'Yverdon-les-Bains, qui compte également la plus grande concentration de forages profonds (Figure 3.6.7).

Tableau 5.6.2 : Données de température, calcul du gradient géothermique et valeurs de flux de chaleur dans les forages profonds du canton de Fribourg et des zones limitrophes (d'après Medici & Rybach 1995, Sommaruga 1997, Wilhelm et al. 2003).

N°	Nom (Canton)	Prof. (m)	T° 500 m	T° 1000 m	T° 2000 m	T° X m	Prof. X m	Gradient profond ¹ (°C/km)	Flux de chaleur ² (mW.m ⁻²)	Géologie en fond de puits
2	Romanens-1 (FR)	4022	29	45	77	135	3800	32.1	86	Trias (Keuper)
3	Courtion-1 (FR)	3083	26	41	68	--	--	27.0	69	Trias (Muschelkalk moyen)
6	Cuarny-1 (VD)	2228	27	44	79	--	--	35.0	103	Dogger
8	Chapelle-1 (VD)	1531	31	47	--	61	1531	26.4	92	Crétacé (Hauterivien)
9	Savigny-1 (VD)	2486	26	42	69	88	2486	31.0	86	Crétacé (Barrémien-Hauterivien)
10	Essertines-1 (VD)	2936	39	57	94	103	2600	28.8	105	Trias (Keuper)
11	Treycovagnes-1 (VD)	3221	32	52	84	122	3221	31.5	85	Permien
12	Hermrigen-1 (BE)	2198	39	53	79	--	--	26.0	77	Trias (Muschelkalk moyen)
13	Tschugg-1 (BE)	704	--	45.5	--	--	--	36.0	105	Malm (Portlandien)
14	Bulle (FR)	800	30	--	--	36	785	21.1	85	UMM (Rupélien) ?
15	Matran (FR)	333	--	--	--	20	333	33.0	--	OMM (Burdigalien)
17	Payerne-SMA (VD)	258	--	--	--	16.3	258	26.4	66	USM (Aquitarien)
19	Pra-Tsérère (VD)	250	--	--	--	16.5	240	29.2	--	USM (Aquitarien)
20a	Yverdon-F4 (VD)	598	29	--	--	31.7	597	27.8	96	Malm
20b	Yverdon-F5 (VD)	1479	29.3	43.5	--	59	1436	35.6	--	Dogger (Bajocien)
22	La Grève-1 (VD)	666	--	--	--	33.2	666	34.8	--	Malm

¹ Valeurs de gradient en italique = gradient moyen

² Flux de chaleur corrigé pour la topographie

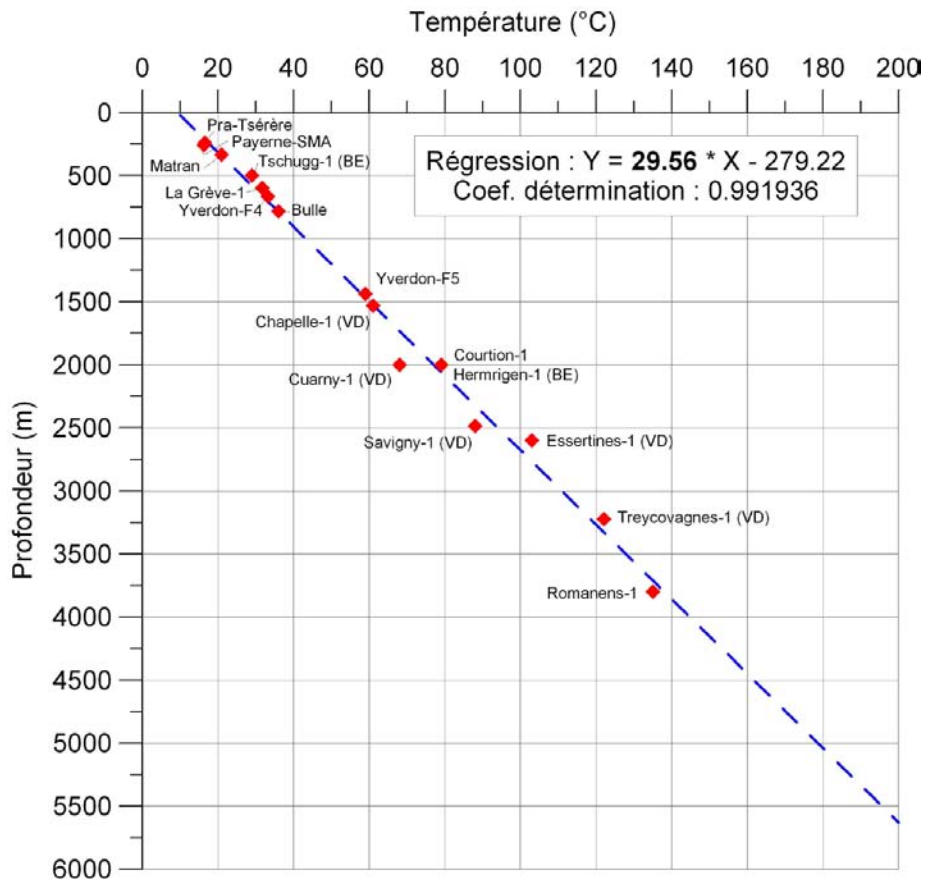


Figure 5.6.3 : Température maximale dans les forages profonds de la région étudiée et extrapolation de la profondeur pour une température de 200° C.

5.7 Potentiel de projets SGS pour le canton de Fribourg

5.7.1 Sites potentiels

Comme cela a été discuté précédemment, on ne sait pas si le socle cristallin a été significativement affecté par les phases de chevauchements et de plis dans la région du Plateau fribourgeois entre Jura et Préalpes. D'autre part, il reste une incertitude importante sur l'épaisseur réelle de la série sédimentaire. Si l'on considère que la température de 200° C peut être atteinte vers une profondeur moyenne de 5'600 ± 500 m pour tous les sites potentiels, le socle cristallin serait alors pénétré sur une épaisseur plus ou moins importante selon la région (Tableau 5.6.1). Dans le but de stimuler une épaisseur de roche suffisante pour créer un réservoir fissuré de grand volume (1-3 km³), il est nécessaire que les puits de production et d'injection pénètrent le granite sur 500 m au minimum.

Dans la phase de sélection des sites potentiels d'une future exploitation géothermique de type SGS, on doit d'abord effectuer une évaluation sur les besoins de chaleur. En effet, si l'on ne souhaite pas dissiper dans l'environnement (air ou eau) la chaleur sortant de la turbine à vapeur, on doit l'utiliser par le biais d'un réseau de chauffage à distance (CAD) existant ou à créer en phase avec la construction de la centrale géothermique.

En considérant les six zones urbaines sélectionnées, un classement peut être fait en fonction de quelques paramètres : conditions thermiques régionales, proximité du socle et potentiel de consommateurs de chaleur (Tableau 5.7.1). Il s'agit d'une évaluation purement qualitative, pour

effectuer une tentative de classement entre les différentes zones urbaines sélectionnées. 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 des zones de Morat et Fribourg. Dans le cas de Bulle, le sommet du socle cristallin est beaucoup trop profond (8 km), donc même les grès du Trias juste au-dessus sont encore trop profonds pour imaginer dans un proche avenir une exploitation géothermique de type SGS.

Tableau 5.7.1 : Evaluation qualitative multicritère d'une sélection de zones potentielles urbaines dans le canton de Fribourg pour une future installation de type SGS. Les trois critères considérés sont évalués de la manière suivante : 1 = peu favorable ; 2 = moyen ; 3 = favorable.

Zones urbaines potentielles	CRITÈRES			Classement des zones urbaines ¹
	Conditions thermiques (flux + gradient)	Proximité du socle cristallin	Potentiel de consommateurs de chaleur	
Morat	3	3	1	7
Wünnewil-Flamatt	2	2	1	6
Düdingen	2	1	1	4
Fribourg	2	1	3	6
Villars-sur-Glâne	2	1	2	5
Marly	2	1	1	4

¹ Classement des zones urbaines : somme des points attribués aux trois critères.

5.7.2 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, par exemple sur le plateau suisse, une profondeur de 5 à 6 km est requise. A cette profondeur, la couverture de roches sédimentaire est généralement traversée et le forage se trouve dans des roches de type granitique, sauf dans la région située au pied des Préalpes, où l'on observe un fort épaissement de la série sédimentaire (Figure 3.6.2).

Dans le futur, il n'est pas exclu d'envisager une exploitation géothermique SGS en milieu sédimentaire, par exemple dans des grès fracturés du Trias (Buntsandstein). Dans ce cas, la profondeur serait moins importante et par conséquent la température plus basse, mais avec l'avantage de coûts de forage sensiblement plus faibles (cf. § 3). Plusieurs projets de ce type sont en cours en Allemagne, grâce notamment au fait que la technologie des centrales de type ORC permet de produire de l'électricité à partir de 100° C environ. Cependant, le taux de conversion de l'énergie augmente nettement plus vite en dessus de 160° C (Figure 5.7.1).

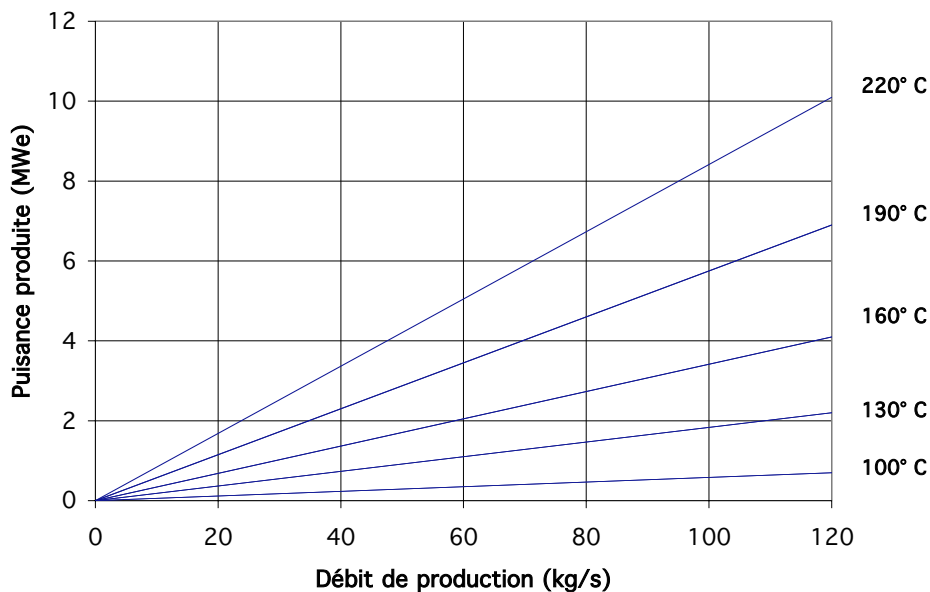


Figure 5.7.1 : Puissance électrique nette fournie par une centrale à fluide binaire, en fonction de la température du réservoir géothermique et du débit total de fluide produit (document de la Banque Mondiale).

Si l'on considère une installation géothermique basée sur un système SGS exploitant une source de chaleur en profondeur constitué par un bloc de granite fissuré de 1 km^3 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, les centrales hydroélectriques de Broc et de Lessoc développent une puissance électrique de 25 MW, respectivement 8.5 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. Un environnement naturel à 5-6 km de profondeur et $180\text{-}220^\circ \text{C}$ de température ne représente plus de barrières technologiques, car les forages à grande profondeur en milieu cristallin ont fait de grands progrès ces 10 dernières années : 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 dépassant 300°C . Par contre, il faut rappeler qu'aucune installation géothermique basée sur la technologie SGS et exploitant un réservoir profond fissuré ne produit d'électricité à ce jour. La première devrait démarrer à Soultz en 2006.

Plusieurs études récentes ou en cours tentent de calculer le potentiel des ressources géothermiques de haute énergie au niveau européen (Genter et al. 2003), ou pour des pays particuliers. En général, les données du sous-sol profond doivent être grandement simplifiées, car en dessous de 1'000 m de profondeur les informations se raréfient drastiquement, pour toutes les régions qui n'ont pas fait l'objet d'une prospection minière ou pétrolière, ou pour le stockage de déchets dans des roches imperméables. En Suisse, une étude du potentiel géothermique général a débuté dans le nord du pays, où la densité de forages est plus importante qu'ailleurs, notamment en raison du programme de la NAGRA (Andenmatten & Kohl 2003). Pour le canton de Fribourg, une évaluation chiffrée du potentiel géothermique des systèmes SGS dans le socle cristallin serait d'une part très théorique et d'autre part très approximative, en raison de la méconnaissance de la profondeur du toit du socle et du domaine précis des températures régnant à 5 km de profondeur.

Une étude menée par Shell International a montré que pour l'ensemble du continent européen, les ressources géothermiques de température $> 200^{\circ}\text{C}$ et localisées à $\sim 5'000\text{ m}$ de profondeur représentent une superficie de $125'000\text{ km}^2$. Si l'on ne considère que 10 % de cette surface, c'est-à-dire $12'500\text{ km}^2$ et qu'on la multiplie par 1 km d'épaisseur, on obtient une ressource primaire de 900 TWh/an, ce qui correspond à la production de l'énergie nucléaire de 1995 en Europe. On se rend bien compte par ce rapide calcul que la ressource est bien supérieure à celle que l'on peut envisager exploiter dans les 20 prochaines années. Donc pour une assez longue période, le potentiel des ressources géothermiques de haute température en Suisse (systèmes SGS) ne sera limité ni par leur accessibilité ni par leur disponibilité, mais bien par le développement de cette technologie et par la politique énergétique.

5.7.3 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 MW_e , ce ne sont pas moins de 20 MW_{th} 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. La réalisation ultérieure de nouveaux puits de production et d'injection ainsi que l'augmentation du volume du réservoir géothermique stimulé verra le débit s'accroître d'un facteur deux, trois ou quatre, ce qui entraînera dans les mêmes proportions une augmentation de la production d'électricité et de chaleur.

Actuellement, les quelques réseaux de chaleur existants dans le canton de Fribourg n'offrent pas les capacités nécessaires 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. § 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 du Grand Fribourg, dans le but de réduire les émissions de gaz à effet de serre liées aux installations de chauffage utilisant des combustibles fossiles.

5.7.4 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. Cette énergie 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 serait possible d'atteindre un coût concurrentiel de production de cette énergie si l'on peut utiliser et vendre également la chaleur disponible à la sortie de la turbine pour un réseau de CAD.

Il existe dans le monde plus de 200 centrales géothermiques de production d'électricité de tailles diverses (0.5 à 110 MW_e) dans 23 pays qui exploitent des réservoirs géothermiques naturels de température (100 à 350°C) et de profondeur (500 à $3'500\text{ m}$) variées. Tout cela montre que la géothermie de haute énergie fonctionne pour une grande variété de conditions géologiques, techniques, environnementales et économiques. Les coûts 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'autres cas ils sont identiques à la production électrique avec

des agents conventionnels et dans certains cas peu favorables, les coûts de la géothermie sont plus élevés que ceux du marché. Dans le Tableau 5.7.2, 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) :

- Conditions choisies pour l'évaluation :
 - Ressource géothermique : profondeur = 4.5 km, température = 150° C,
 - Forages : doublet avec un débit de 100 m³/h,
 - Puissance : électricité = 1 MW_e, chaleur = 2.8 MW_{th}.
- Coûts de la production d'électricité :
 - 20 ct/kWh, sans vente de la chaleur,
 - 17 ct/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 18± 3 ct/kWh a été calculé (sans vente de la chaleur), basé sur les connaissances du premier réservoir testé à 3.5 km et 165° C. A Bâle, un coût de production de la future centrale pilote DHM (avec vente de la chaleur) a été estimé à 15 ct/kWh.

Après avoir acquis les informations techniques et économiques des premières centrales SGS, on pourra aussi évaluer la possibilité d'installer des centrales industrielles de production d'électricité sans utilisation de la chaleur et ceci à un prix concurrentiel.

Tableau 5.7.2 : 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 (MW _e)	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 MW_e basée sur 2 forages de production et 1 forage d'injection, tous atteignant la profondeur de 5 km, ont été progressivement évalués au cours des années, avec un degré de confiance qui s'accroît avec l'expérience acquise. Un devis estimatif est présenté dans le Tableau 5.7.3, qui tient compte des caractéristiques d'une centrale pilote de type SGS, comme elles ont été déterminées dans les cas de Soultz et de Bâle. 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 permettra de faire baisser leur coût 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 avec l'expérience acquise et le développement de nouveaux outils.

Finale­ment, l'augmentation de la taille des installations de type SGS (réservoirs et centrale) aura un effet d'échelle favorable sur les prix du kW installé et du kWh produit, car la variation des coûts d'investissement n'est pas linéaire avec l'accroissement de la taille des installations.

Tableau 5.7.3 : 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	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	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	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

5.7.5 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 évidents en faveur de l'environnement par rapport aux énergies provenant de combustibles fossiles. La

technologie SGS de production d'électricité est encore plus favorable pour l'environnement, car en raison de 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 de gaz à effet de serre ou de gaz acides dans l'atmosphère. 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 sont calculées en équivalents-CO₂ pour chacune des étapes de la vie d'une centrale de production d'électricité : construction, exploitation, démolition (Figure 5.7.2). En ce qui concerne la géothermie, c'est principalement la réalisation des forages (matériel, énergie) qui induit des émissions indirectes de CO₂.

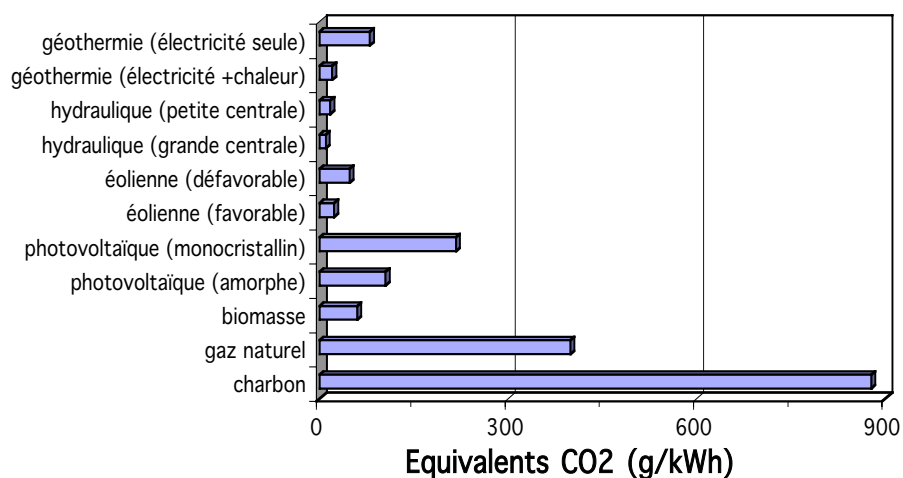


Figure 5.7.2 : Comparaison des valeurs d'équivalents-CO₂ (g/kWh) émis lors de la construction, l'exploitation et la démolition de centrales de production d'électricité pour différents agents énergétiques (d'après Rogge & Kaltschmidt 2002b).

5.8 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 Fribourg pourraient être envisagés de la manière suivante.

5.8.1 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 (y.c. 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 (y.c. 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 auront fonctionné pendant quelques années 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 réalisations suivantes. Actuellement, en l'absence de toute centrale en fonction, le dimensionnement d'une première installation dans le canton de Fribourg, donné ici à titre indicatif, est basé sur celui prévu pour le projet DHM à Bâle (Tableau 5.8.1).

Tableau 5.8.1 : Caractéristiques d'une installation pilote de type SGS dans le canton de Fribourg.

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 50-70° 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

5.8.2 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. § 4). En effet sur territoire fribourgeois, aucune mesure hydrogéologique n'a été réalisée dans les forages pétroliers et à l'exception du forage d'exploration de Bulle, aucun forage géothermique destiné à capter un aquifère profond n'a été réalisé à ce jour dans le canton de Fribourg. 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 qu'environ 50 à 60 % 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. Un financement mixte pourrait être imaginé parmi des partenaires aux intérêts variés (services de l'état, offices fédéraux, hautes écoles, projet Aquifères Profonds, projet SGS, etc.) pour réaliser un forage d'exploration du sous-sol profond pour plusieurs objectifs.

Finalement, la technologie des systèmes géothermiques stimulés (SGS) pourraient également s'appliquer à des réservoirs aquifères sédimentaires de faible perméabilité naturelle et à des profondeurs moindres. 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.

5.8.3 Etapes et calendrier de réalisation

Si l'on tient compte de l'avancement des autres projets suisses et européens, et notamment du projet DHM de Bâle, dont le programme prévisionnel est établi, le planning d'un premier projet SGS dans le canton de Fribourg pourrait démarrer à partir de 2006, en cas de décision favorable et d'un financement assuré des premières étapes. L'ensemble des opérations devrait durer environ 10.5 années et comporter huit étapes d'une durée de 1 ou 1.5 ans chacune, depuis les études préliminaires jusqu'à la mise en production de la centrale géothermique (Tableau 5.8.2).

La première étape, appelée Etudes préliminaires, doit permettre de réaliser les objectifs suivants :

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 2'500 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 MW_e 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 d'exploration, 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 déjà, 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 pour utiliser la chaleur produite doit inclure une évaluation à moyen et long terme des nouveaux quartiers résidentiels 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 (Tableau 5.7.3). La deuxième moitié du financement pourra 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. Les principaux risques liés aux opérations dans le sous-sol seront donc fortement diminués.

Tableau 5.8.2 : Etapes de réalisation et programme prévisionnel d'une centrale SGS pilote

Etapes	Durée (an)	Année
1. ETUDES PRÉLIMINAIRES	1.5	2005-2007
- 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		
2. PRÉPARATION DU FORAGE D'EXPLORATION	1.5	2007-2008
- Aspects domaniaux		
- Investigations géologiques (coupe prévisionnelle)		
- Impacts sur l'environnement		
- Avant-projet		
- Mise à l'enquête		
- Consultation d'entreprises et appel d'offres		
- Financement		
3. RÉALISATION DU FORAGE D'EXPLORATION	1	2009
- Adjudication des travaux		
- Préparation du chantier et exécution du forage		
- Diagraphies, tests et interprétations, station microsismique		
4. PREMIER FORAGE PROFOND	1.5	2010-2011
- Planification, exécution, tests hydrauliques, stimulation du réservoir		
5. DEUXIÈME FORAGE D'OBSERVATION	1	2011
- Planification, exécution, station microsismique		
6. DEUXIÈME FORAGE PROFOND	1.5	2012-2013
- Planification, exécution, tests, stimulation du réservoir		
7. TROISIÈME FORAGE PROFOND	1	2014
- Planification, exécution, stimulation du réservoir, tests de circulation		
8. OUVRAGES EN SURFACE	1.5	2015-2016
- Centrale, conduites entre puits, connexions aux réseaux électrique et de chauffage à distance		
DURÉE TOTALE	10.5	2005-2016

5.9 Conclusions et recommandations

La technologie SGS doit prochainement arriver à un stade pré-industriel avec les premières réalisations de centrales à Soultz-sous-Forêts en Alsace (France), à Innamincka dans le Cooper Basin (Australie) et vraisemblablement à Bâle, dans la période 2006 à 2009. L'installation géothermique DHM suisse sera la première à coupler production d'électricité et de chaleur. Actuellement, le potentiel de production de la géothermie de haute énergie en Suisse en général et dans le canton de Fribourg 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. En effet, 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 (zone urbaine d'habitation, zone industrielle, zone de 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 20 ans, on pourrait envisager l'installation de deux centrales SGS de 10 MW électriques et 60 MW thermiques, dans les centres urbains de Fribourg et Morat, avec une fourniture de la chaleur vers un CAD adapté à la température et au potentiel de la centrale géothermique.

Finalement, ce sera la première installation SGS en Alsace qui fournira les bases principales d'un développement de cette technologie en Suisse et dans le canton de Fribourg en particulier.

5.10 Références

5.10.1 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. Plaquette d'information.
- Andenmatten–Berthoud A. & Kohl Th. (2003). Assessment & evaluation of geothermal potential in Switzerland (Atlas des ressources géothermiques suisses). Rapport annuel 2003 pour l'OFEN. Projet de la Comm. suisse de géophysique, 72 pp.
- 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.
- Genter A., Guillou-Frottier L., Feybesse J-L., Nicol N., Dezayes C. & Schwartz S. (2003). Typology of potential Hot Fractured Rock resources in Europe. *Geothermics*, 32: 701-710.
- Häring M. (2004). Deep Heat Mining: Development of a co-generation power plant from an enhanced geothermal system in Basel, Switzerland. Geothermal Resources Council Transactions, Annual Meeting.
- 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.
- Service des transports et de l'énergie (2002). Plan sectoriel de l'énergie. Rapport, 95 pp.
- SIG, SCANE & ADHM (2003). GGP – Valorisation de la géothermie de grande profondeur. Description générale. Rapport non publié, 33 pp.
- SIG, SCANE & ADHM (2004). Géothermie de Grande Profondeur GGP – Genève. Etape 3. rapport d'étape, non publié, 39 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.
- Wilhelm J., Bianchetti G. & Vuataz F.D. (2003). Evaluation du potentiel géothermique du canton de Vaud. Géosstructures énergétiques (GE), Aquifères profonds (AP), Géothermie haute énergie (HE). Rapport préparé par le groupement PGV pour le Service de l'environnement et de l'énergie (SEVEN), canton de Vaud, non publié, 171 pp.

5.10.2 Sites Internet

Tableau 5.10.1 : 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.
www.petratherm.com.au/	Projets SGS en Australie, Petratherm Co.
hotrock.anu.edu.au/	Programmes SGS, Australian National University, School of Petroleum Engineering, Sydney, Australie.
www.petrol.unsw.edu.au/research_hot.htm	Programme SGS, School of Petroleum Engineering, Australie.
www.nedo.go.jp/chinetsu/hdr/hijiorinow.htm	Projet HDR de Hijiori, NEDO, Japon.

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

6. SYNTHÈSE ET RECOMMANDATIONS

Les investigations conduites entre janvier 2004 et janvier 2005 en vue de déterminer le **potentiel géothermique** sur le territoire du canton de Fribourg dans le domaine des *géostrutures énergétiques (GE)*, de *l'implantation des sondes géothermiques verticales (SGV)*, des *aquifères profonds (AP)* et de la *géothermie haute énergie (HE)* ont permis de conclure que, sous certaines conditions, chacune de ces quatre technologies offre des **perspectives intéressantes de valorisation**. Le présent chapitre synthétise les conclusions et les recommandations détaillées qui figurent à la fin des chapitres consacrés à ces quatre secteurs, soit les chapitres 2, 3, 4 et 5 pour les GE, les SGV, les AP et la HE, respectivement.

GEOSTRUCTURES ENERGETIQUES

Les *géostrutures énergétiques*, pieux, parois et dalles en contact avec le sol, sont des éléments équipés 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 en Valais.

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 Fribourg. On a constaté qu'en l'espace de dix ans, les GE seraient à même de produire annuellement *1'600'000 kilowattheures de chaleur et 120'000 kilowattheures de froid*. Ceci permettrait de réduire les émissions de CO₂ de l'ordre de 600 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 *et tout particulièrement dans le canton de Fribourg*, 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'École 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 le canton 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.

IMPLANTATION DES SONDES GEOTHERMIQUES VERTICALES

Depuis plusieurs années, les sondes géothermiques verticales (SGV) connaissent un grand développement dans le canton de Fribourg, essentiellement pour le chauffage de nouvelles villas. La répartition géographique des SGV couvre presque l'ensemble du territoire, à l'exception des zones de haute montagne, mais leur densité maximale se trouve surtout au nord et à l'est du canton. Actuellement, plus de 5000 SGV produisent annuellement 105 GWh, dont 70 sont fournis par le sous-sol.

L'étude a porté sur deux zones tests, la région de Düdingen-Tafers et celle de Bulle – La Tour-de-Trême. Au total, 215 forages de SGV ont été étudiés et une base de données géologiques a été créée. Les caractéristiques thermiques de l'ensemble des roches pouvant être traversées par les SGV ont été implémentées dans la base de données. Un système d'information géographique (SIG) a été conçu permettant de prévoir les caractéristiques géologiques et de calculer la puissance thermique d'une future SGV, en considérant celles situées à proximité. Afin d'améliorer la connaissance acquise par les futurs forages de SGV, un formulaire d'autorisation et un protocole de forage ont été élaborés.

Des cartes de potentiel de développement sont présentées pour les deux régions étudiées, montrant les zones où les puissances thermiques spécifiques sont les plus élevées pour une future implantation de sonde. Ces cartes sont mises en correspondance avec les zones de protection des eaux souterraines et l'affectation du territoire. De manière générale, le potentiel thermique est d'autant plus favorable que les formations de la Molasse sont proches de la surface et que les sédiments du Quaternaire sont saturés d'eau.

La réalisation en ville de Fribourg d'un grand bâtiment de type Minergie, l'Ecole des Métiers sur le plateau de Pérolles, qui sera chauffé et rafraîchi par un champ de sondes géothermiques, représentera bientôt une vitrine pour le développement de la géothermie de basse température et de faible profondeur, qui facilitera la promotion de nouvelles réalisations.

Deuxième recommandation

Dans le but d'assurer le développement durable et efficace sur le plan énergétique des nouvelles sondes géothermiques verticales (SGV) dans le canton de Fribourg, il est recommandé de finaliser et d'appliquer dès que possible le formulaire de demande d'autorisation et le protocole de forage pour toute nouvelle SGV. D'autre part, le programme de calcul de la puissance thermique représente un outil simple d'aide au dimensionnement des futures SGV. Finalement, l'implémentation régulière de la base de données géologiques et hydrogéologiques à l'échelle du canton sera un appui décisif non seulement pour le développement des sondes géothermiques uniques mais également pour la création des champs de sondes.

GEOOTHERMIE DES AQUIFERES PROFONDS

L'exploitation par forages des aquifères profonds pour la géothermie vise à capter et à mettre en valeur l'énergie thermique des réserves naturelles d'eau chaude emmagasinées dans des couches perméables comprises entre 300 et 3'000 m.

En considérant un gradient géothermique moyen de 3° C/100 m, la profondeur de 300 m permet d'atteindre des températures de l'ordre de 20° C, alors qu'elles seront d'environ 100° C à 3'000 m.

Actuellement, la Suisse compte une douzaine d'installations utilisant des aquifères profonds pour du chauffage et/ou du thermalisme, dont seule la moitié peut être considérée comme de véritables succès. Pour ces derniers, 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}.

Dans le canton de Fribourg, l'absence de manifestations géothermiques de surface ainsi que l'échec du forage de Bulle ne permettaient pas, jusqu'alors, d'envisager de nouveaux projets d'exploitation dans les aquifères profonds. Cependant, les différentes investigations menées dans le cadre de cette étude ont montré qu'un réel potentiel géothermique existait, entre 0.7 et 4 MW_{th} suivant le site de production et la profondeur de l'aquifère visé, pour autant que ce dernier soit suffisamment fracturé et donc productif. Sur l'ensemble du canton, les connaissances précises de ces conditions essentielles de fracturation font actuellement défaut. Si la réinterprétation des données existantes de l'exploration pétrolière permettrait déjà de mieux définir ces paramètres à l'échelle régionale, il sera nécessaire, pour tout futur projet AP, de débiter par une phase de prospection locale, afin de caractériser au mieux la géologie et de limiter au maximum les risques inhérents à ce genre d'opération.

Troisième recommandation

Au vu du potentiel géothermique probable en aquifères profonds sous le territoire fribourgeois, nous recommandons au canton de considérer sérieusement cette option lorsque de futurs projets immobiliers d'envergure seront envisagés. Si le budget alloué à ces projets est suffisant, nous proposons qu'un poste soit réservé à la caractérisation précise du potentiel géothermique du site par une étude hydrogéologique ciblée (données existantes et nouvelles prospections). Ainsi, la prise de risque sera limitée et une discussion objective pourra alors être engagée sur la réalisation ou non d'un forage géothermique de reconnaissance.

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 en Alsace et dans le Cooper Basin en Australie, suivies vraisemblablement de Bâle, vers 2009. 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 Fribourg est surtout limité par le potentiel de consommation de chaleur. En effet, pour des raisons économiques et environnementales, une telle installation doit être couplée de préférence à un réseau de chauffage à distance existant ou à créer.

Dans le canton de Fribourg, les formations de socle cristallin se trouvent à des profondeurs croissantes d'ouest en est. Celles à proximité des Préalpes ne sont pas favorables car trop profondes. Cependant, la connaissance actuelle des critères géologiques autorise l'implantation de centrales SGS à proximité de certains centres de consommation. Dans un laps de temps de 15 à 20 ans, on pourrait envisager la construction de deux centrales de ce type de 10 MW_e et 60 MW_{th} chacune dans les centres urbains de Morat et Fribourg, 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.

Quatrième 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.

SYNTHESE GENERALE

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. *Approbation* du programme d'action par les autorités et mise en place des moyens nécessaires à sa mise en œuvre, 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 PGF, dans le prolongement de son activité d'évaluation du potentiel géothermique.

Cette activité serait susceptible de bénéficier du soutien financier de la Confédération, dans le cadre du programme SuisseEnergie. Ceci conduit à l'ultime recommandation.

Cinquième 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 PGF de sa réalisation en collaboration avec les autorités et les administrations concernées.

