

Programme Géothermoval : résultats d'une prospection des ressources géothermiques du Valais, Suisse

par F.-D. Vuataz* , J.-D. Rouiller* , J.-D. Dubois* , G. Bianchetti* et O. Besson*

ABSTRACT

Géothermoval is a research program defined in order to prospect, assess and exploit the potential geothermal resources of the canton of Valais. This program began in 1988, and was carried out by the Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA).

After the preliminary surface exploration phase, during which all the available investigation methods were used, shallow exploration boreholes were drilled during Phase I (1990-92). Four boreholes were made in the Simplon tunnel and two in Epinassey, near St-Maurice. The geothermal potential has been evaluated on 12 sites. For the whole group of thermal spring areas, the total discharge reaches 1500 m³/h and the thermal potential 65 MWt. Nine seismic reflection profiles through the Rhone valley made it possible to identify the shape and the thickness of the alluvial filling. Moreover, permeable sediments were deciphered at the base of the Quaternary filling by a detailed seismo-stratigraphic interpretation.

During Phase II of Géothermoval, deep boreholes are planned in order to tap hot water and use this resource for space heating. The three selected sites for drilling are Saillon, Sion and St-Maurice, and the first borehole should start as early as 1994.

KEY WORDS

Geothermal prospection, Alps, thermal spring, borehole, geothermal potential.

RESUME

Le programme Géothermoval a pour but de rechercher, évaluer et mettre en valeur les ressources géothermiques du canton du Valais. La prospection a débuté en 1988 par une phase préliminaire comprenant deux ans d'investigations à partir de la surface. En 1990, le programme est entré dans sa Phase I, correspondant à la réalisation de sondages de reconnaissance de moyenne profondeur, phase qui s'est achevée au printemps 1992.

Au cours de la Phase préliminaire ont été appliquées l'ensemble des méthodes de prospection de surface connues en géologie, géophysique, pétrophysique, hydrogéologie, et hydrochimie.

* Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées, rue de l'Industrie 45, CH-1951 Sion.

Pendant la phase suivante, quatre forages ont été réalisés dans le Haut-Valais (tunnel du Simplon) et deux dans le Bas-Valais (Epinassey), parallèlement à la poursuite des investigations de surface.

L'ensemble des investigations menées sur les différents sites retenus a permis d'obtenir des résultats dont certains sont prometteurs :

Les sources thermales de **Val d'Illiez** émergent des flysch tertiaires paraautochtones helvétiques. L'apparition des sources sous leur forme actuelle est récente (fin 1953). Leur température maximum est de 30°C et le débit total des divers exutoires est de 72 m³/h. Le chimisme est de type [Ca>Mg ; SO₄]. La température de l'eau en profondeur ne devrait pas dépasser 35°C, toutefois, l'important débit disponible devrait permettre de compter sur un potentiel thermique de l'ordre de 2,1 MWt. L'interprétation de l'ensemble des données acquises (géologie, hydrochimie et sismicité) tend à démontrer l'existence d'une liaison hydraulique entre les sources thermales et le bassin du lac artificiel de Salanfe.

L'essentiel des circulations thermales de la région de **St-Maurice-Lavey** est en relation très étroite avec le socle cristallin des Aiguilles Rouges, qui est le siège d'un aquifère fissuré dont la composante profonde a une température maximum d'environ 100°C. Cette dernière, de type [Na; SO₄>Cl], se mélange en proportion variable avec des eaux froides de type [Ca ; HCO₃] ou tièdes de type [Ca>Na ; SO₄>HCO₃]. On ne peut exclure complètement pour l'instant un mélange avec une composante provenant de circulations dans les roches du Trias. L'un des forages d'Epinassey, qui a intercepté de l'eau thermale à 22°C dans le socle cristallin, démontre l'existence dans cette région de la plaine du Rhône, de circulations d'eau chaude aussi bien sur rive gauche que sur rive droite.

L'étude de la source thermale de **Bovernier**, près de Martigny, a montré que la région était le siège de circulations profondes, notamment dans les formations granitiques du Massif du Mont-Blanc. L'évaluation des températures en profondeur indique que les eaux souterraines de type [Ca>Na ; SO₄>HCO₃] pourraient atteindre 30 à 40°C. Un profil de sismique-réflexion, réalisé dans la plaine du Rhône à l'est de Martigny a mis en évidence une profondeur du substratum rocheux de l'ordre de 900 m sous la plaine du Rhône, ainsi que la présence probable à la base du remplissage quaternaire de niveaux graveleux qui pourraient constituer un réservoir favorable au stockage d'eau thermale.

Deux émergences subthermales liées aux évaporites du Trias ont été observées dans le **Val de Bagnes**. Les eaux sont de type [Ca ; SO₄] et le débit total varie de 3,6 à 6,6 m³/h. La température en profondeur des eaux de la source du Châtelard (18°C) ne devrait pas dépasser 25°C, et la puissance thermique disponible estimée est de 0,21 MWt. Les investigations menées ont permis de définir l'implantation d'un site de forage de reconnaissance en fond de vallée.

Les eaux subthermales et thermales du site de **Saillon** sont essentiellement de type [Ca>Mg ; SO₄], ce qui indique un contact marqué avec les formations évaporitiques du Trias. Les études menées laissent entrevoir que ce site présente deux systèmes hydrogéologiques relativement indépendants l'un de l'autre en profondeur. Le système le plus favorable du point de vue géothermique est celui qui alimente le captage des Anciens-Bains. Les eaux qui y émergent montrent une grande stabilité de leurs paramètres et la température du réservoir profond devrait atteindre 30 à 40°C. Un profil de sismique-réflexion transversal à la Vallée du Rhône a permis de

mettre en évidence, à la base du remplissage quaternaire d'une épaisseur totale de 700 m, des niveaux graveleux vraisemblablement perméables.

Deux profils de sismique-réflexion, réalisés de part et d'autre de la ville de Sion, ont mis en évidence une profondeur du substratum de l'ordre de 600 m sous la plaine du Rhône. L'interprétation des sismo-faciès des sédiments quaternaires souligne ici aussi la présence à la base du remplissage quaternaire de dépôts graveleux semblables à ceux observés à Martigny et à Saillon, qui pourraient constituer un réservoir d'eau thermique complémentaire au réservoir potentiel dans le substratum rocheux sous-jacent.

De nombreuses anomalies thermiques sont observées dans la nappe phréatique dans la zone de Brigerbad-Visp. Elles sont certainement liées au Massif de l'Aar qui est le lieu de circulations thermales remontant de la profondeur et qui se déverseraient partiellement dans la nappe. Les sources de Brigerbad émergent à une température maximum de 52°C avec un débit de 150 m³/h. L'eau thermominérale est de type [Na>Ca ; SO₄>Cl], résultant d'un mélange entre des eaux thermales profondes et des eaux froides. La température des eaux thermales devrait atteindre 100°C environ en profondeur.

L'étude menée dans le tunnel du Simplon a permis de mettre en évidence un gradient géothermique variant entre 2,8 et 4,0°C/100 m et de confirmer ainsi le caractère anormalement chaud de ce site, ainsi que son intérêt pour une utilisation de la ressource géothermique. Les eaux thermales interceptées dans le tunnel sont principalement de type [Ca ; SO₄] en raison de la dissolution des évaporites du Trias. La température de ces émergences qui se situe entre 12 et 45°C et les mesures de débit et de température de l'eau qui s'écoule par gravité, en direction de chaque portail du tunnel, permettent de calculer un potentiel disponible total de 11 MWt uniquement à partir de ses canaux d'évacuation.

A proximité d'Oberwald, les émergences liées au tunnel de la Furka (Massif du Gotthard) montrent l'existence de deux types d'eau : une eau thermique (21,7°C) de type [Ca>Na ; SO₄>HCO₃] et une eau froide (6,8°C) de type [Ca ; HCO₃]. La résultante du mélange de toutes les sources dans le collecteur atteint 15°C avec un débit de 324 m³/h, ce qui donne un potentiel géothermique de 3,6 MWt. La commune a d'ailleurs installé une conduite amenant l'eau au village et plusieurs bâtiments sont chauffés avec cette ressource.

Les investigations effectuées ont montré que les principaux réservoirs d'eau chaude sous la vallée du Rhône sont liés d'une part aux sédiments fluvio-glaciaires sis à la base du remplissage quaternaire, d'autre part aux évaporites du Trias ainsi qu'au socle cristallin fissuré des Massifs du Mont-Blanc, des Aiguilles Rouges et de l'Aar. Dans les zones correspondant à des émergences thermales, les températures peuvent atteindre 100°C en profondeur. Le débit global de chaque zone est dans la plupart des cas supérieur à 50 m³/h. Le chimisme des eaux est principalement de type [Ca>Mg ; SO₄>HCO₃] pour les aquifères du Trias et [Na ; SO₄>Cl] pour les aquifères du cristallin. Quant à la minéralisation totale des eaux, elle reste faible, entre 1 et 3 g/l pour la majorité d'entre elles. Une évaluation du potentiel géothermique a été effectuée sur une douzaine de sites. Il en résulte pour l'ensemble des zones d'émergences thermales un potentiel thermique de 65 MWt, pour un débit total de 1500 m³/h.

Les études techno-économiques entreprises ont démontré que les ressources géothermiques pourraient sur certains sites être utilisées à un coût proche de celui des énergies traditionnelles.

Dans cette optique, un dossier scientifique et technique a été établi pour réaliser les forages profonds de la Phase II, laquelle est prévue sur trois ans et commencera au cours de 1994 avec le forage de Saillon.

MOTS-CLES

Prospection géothermique, Alpes, source thermique, forage, potentiel géothermique.

1. Motivations et objectifs

Le programme Géothermoval est un projet intégré qui vise à rechercher, évaluer et mettre en valeur les ressources géothermiques potentielles du canton du Valais en tant que source d'énergie de substitution, notamment pour le chauffage de bâtiments et de l'eau sanitaire. Ce programme de prospection géothermique qui a débuté en 1988, est réalisé par le Centre de Recherches Scientifiques Fondamentales et Appliquées de Sion (CRSFA), avec la collaboration scientifique et financière d'organismes et de collectivités publiques et notamment sous l'égide de l'Office fédéral de l'énergie (OFEN) et du Département cantonal de l'énergie (CRSFA/88.08). Dès 1990, un projet de recherche financé par le Fonds national suisse de la recherche scientifique et réalisé sous l'égide du CRSFA, du Centre d'hydrogéologie de Neuchâtel et de l'Institut de géophysique de l'Ecole polytechnique fédérale de Zürich, a constitué le support scientifique du programme Géothermoval (BIANCHETTI, en préparation).

Avant le démarrage du programme Géothermoval, un certain nombre d'études avaient été menées qui concernaient essentiellement l'hydrogéologie et l'hydrochimie des zones thermales connues par le biais de sources ou de captages de faible profondeur (VUATAZ 1982; DUBOIS 1983; FLÜCK 1984). Jusqu'au démarrage de Géothermoval, quelques forages à caractère "géothermique" ont été effectués dans le but de capter de l'eau pour des établissements thermaux ou des sociétés d'exploitation d'eau minérale.

Après deux ans de recherches effectuées au moyen de diverses méthodes d'investigation à partir de la surface et basées sur les données des forages préexistants (Phase préliminaire), le programme Géothermoval est entré en 1990 dans la Phase I qui correspondait à la réalisation de sondages de reconnaissance (tableau 1) et qui s'est achevée au printemps 1992 (CRSFA/92.02).

Rappel des motivations

Alors qu'au Nord de la Suisse existent des gisements plus ou moins prouvés (Figure 1), plusieurs raisons ont motivé le CRSFA à débiter une recherche géothermique globale en Valais :

- Un potentiel thermique localement élevé, pouvant être évalué grâce à la présence de sources, d'ouvrages de captage et de tunnels.

VUATAZ & AL. : PROGRAMME GÉOTHERMOVAL

	PREPARATION DU PROJET	
	- Choix des zones à étudier	fin 1987-88
	- Modèles géothermiques	
	- Modèles hydrogéologiques	
	- Recherche bibliographique	ETUDE DE
	- Programme de travail	FAISABILITE
	- Evaluation des coûts du projet	
	⇓	
	choix de zones favorables	
PHASE PRELIMINAIRE	- Etude hydrogéologique détaillée	1988-89
	- Géologie et tectonique	PROSPECTION
	- Géophysique	EN
	- Hydrochimie	SURFACE
	- Sondages peu profonds et piézomètres	
	- Diagraphies de température et conductivité	
	- Evaluation des températures en profondeur	
	⇓	
	choix de sites favorables	
PHASE I	- Forages de reconnaissance de petit diamètre	1990-92
	- Diagraphies de température et conductivité	
	- Essais de pompage	FORAGES DE
	- Hydrochimie	RECONNAISSANCE
	- Evaluation de l'énergie géothermique potentielle	DE MOYENNE
	- Etude techno-économique des besoins des utilisateurs potentiels	PROFONDEUR
	⇓	
	débits et températures suffisants	
PHASE II	- Forages profonds	1994-96
	- Essais de pompage	
	- Diagraphies	FORAGES
	- Evaluation de l'énergie géothermique disponible	PROFONDS
	⇓	
	utilisation de la ressource	
PHASE III	- Equipement des puits	1996-98
	- Essais de pompage de longue durée	
	- Mise en valeur de l'énergie géothermique	INSTALLATION
	- Raccordement aux réseaux de chauffage	PILOTE

Tableau 1 : Déroulement du programme Géothermoval (CRSFA 192.02).

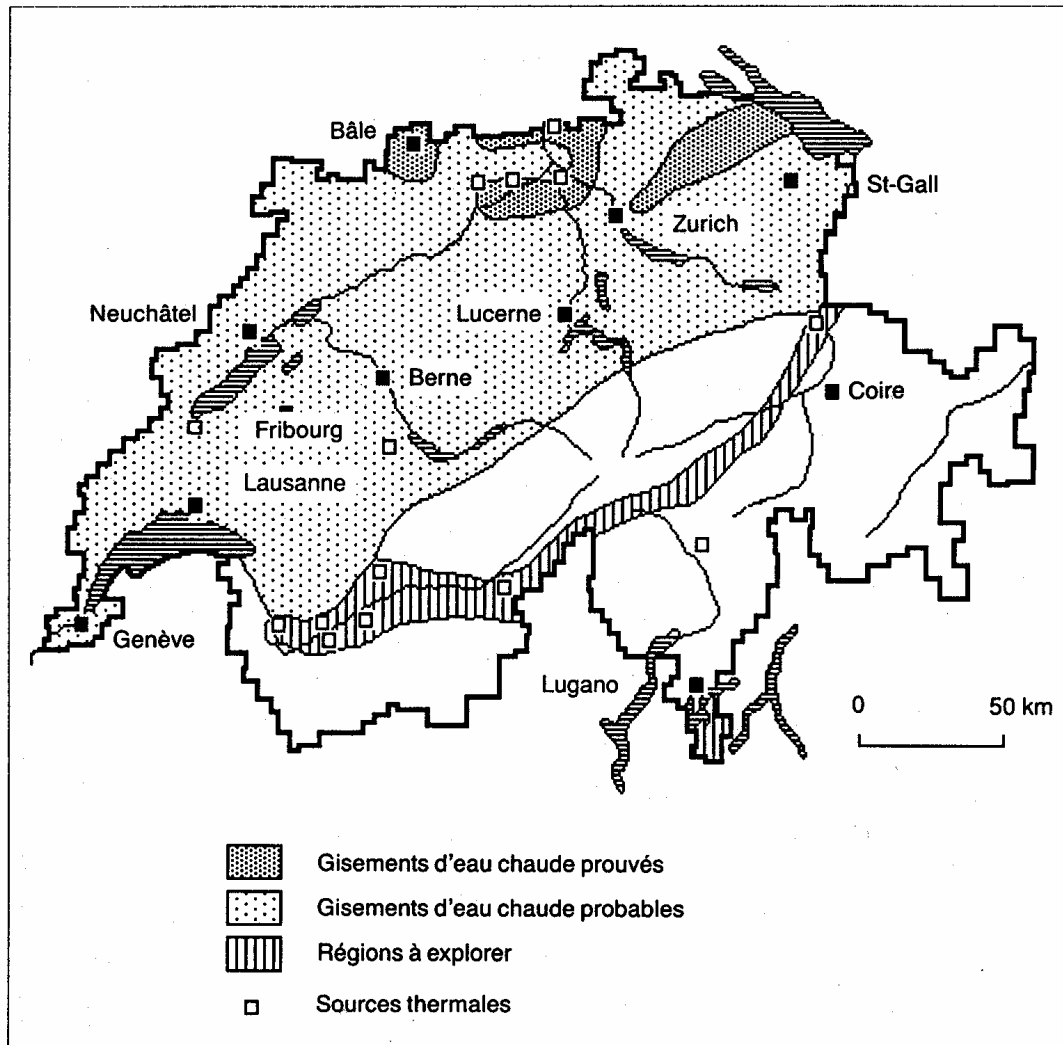


Figure 1 : Les ressources géothermiques en Suisse (Weber 1990)

- L'absence d'une étude exhaustive des ressources géothermiques à l'échelle du canton, malgré l'importante concentration de sources thermales et leur distribution géographique (Figure 2);
- Le système d'écoulement des circulations profondes lié à la morphologie de régions de montagne;
- Le contexte géologique et structural propre aux régions alpines;
- Une conjoncture favorable à la recherche d'énergies de substitution.

De nombreuses remontées d'eau thermale sont réparties de part et d'autre de l'arc Chamonix-Martigny-Brigue (Figure 2), qui ne sont que la manifestation de surface de systèmes géothermiques divers dont la nature, la profondeur, la température et le volume étaient en

grande partie inconnus avant le début du programme Géothermoval. Le potentiel réel de ces systèmes profonds ne pourra d'ailleurs être effectivement évalué que lors de la réalisation de forages de prospection.

Les effets de la tectonique cassante sur les massifs cristallins externes et leur couverture, la répartition des niveaux triasiques à l'intérieur de ces unités, comme d'ailleurs la morphologie propre aux régions montagneuses, sont autant de facteurs très favorables au développement de circulations thermales en profondeur. Dans la vallée du Rhône, les indices géothermiques apparaissent étroitement liés aux soulèvements de compartiments de certains massifs et peut-être, dans une moindre mesure, à l'activité sismique de la région.

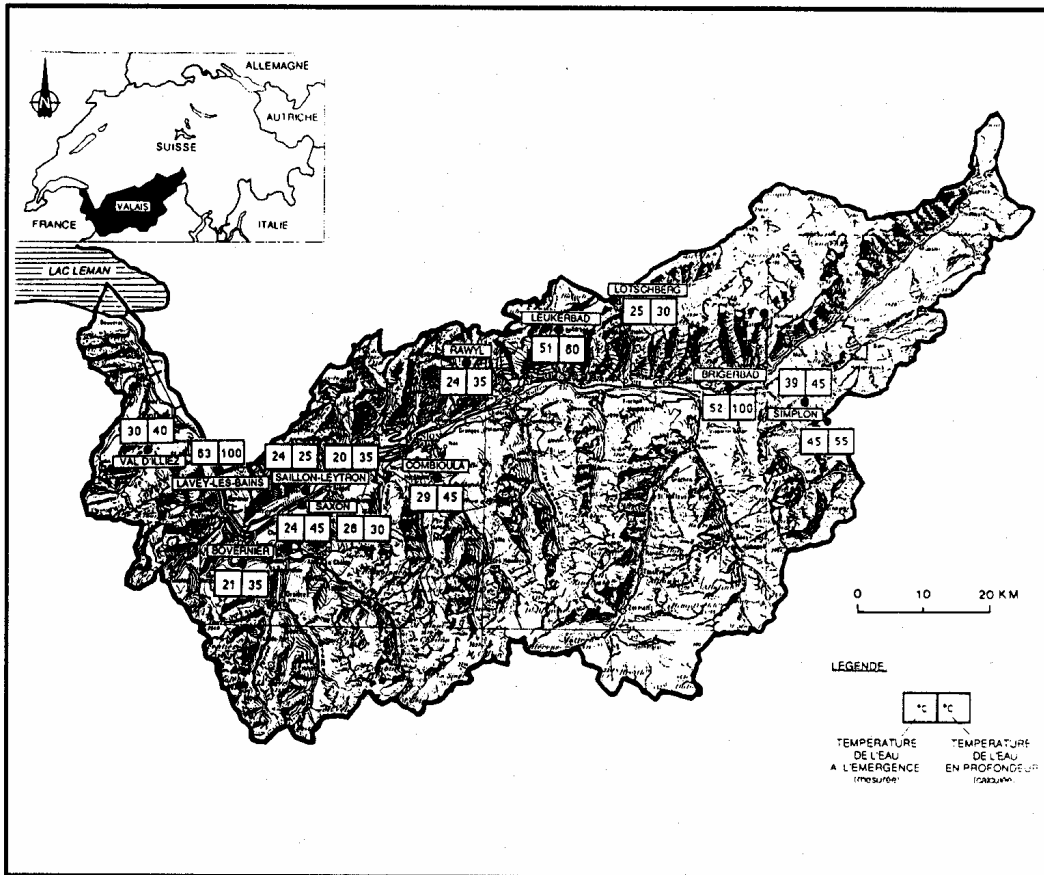


Figure 2 : Localisation des manifestations thermales de surface en Valais (CRSFA/92.02)

Modèles conceptuels de références

Trois modèles ont été formulés pour servir d'hypothèses de base au programme Géothermoval (CRSFA/88.08) :

- Le massif chaud : le gradient géothermique à l'intérieur de certains massifs cristallins serait plus élevé que la normale (ex. Simplon);

- Les structures tectoniques profondes : dans un environnement à gradient géothermique normal, l'eau chaude remonterait rapidement de la profondeur par des failles verticales, des zones tectonisées de contact ou des couches redressées très perméables (ex. Val d'Illiez, Bovernier);
- L'ensellement des massifs cristallins : l'eau météorique s'infiltrerait le long des couches triasiques qui bordent les massifs cristallins externes et se réchaufferait dans la partie déprimée de ceux-ci avant de remonter de chaque côté de l'ensellement (ex. Saillon, Saxon et Leukerbad).

Choix des sites d'étude

L'ensemble des données existantes sur les caractéristiques hydrogéologiques des émergences thermales du Valais ont été compilées, élargies et largement interprétées. Toutefois, le programme Géothermoval s'est focalisé sur la mise en valeur des ressources géothermiques de la plaine du Rhône où sont concentrés les principaux utilisateurs potentiels de chaleur. C'est l'une des raisons pour lesquelles le site de Leukerbad n'a pas été abordé dans le présent programme. Il y a lieu toutefois de préciser que cette zone a été étudiée dans le cadre de l'étude de l'impact possible du tunnel de base du Lötschberg sur les sources de Leukerbad et Brigerbad (CRSFA/91.17 et CRSFA/93.13). Une étude détaillée du comportement des sources thermales dans la gorge de la Dala (Leukerbad) a été réalisée parallèlement (MURALT 1991; MURALT & VUATAZ 1993, ce volume). Pour la même raison, les eaux thermales qui sortent dans le tunnel du Rawyl ont été étudiées en marge du programme Géothermoval et les résultats sont publiés par BIANCHETTI (1993, ce volume).

2. La phase préliminaire (1988-89)

2.1. Méthodes d'investigation

Au cours de la Phase préliminaire, de nombreuses méthodes de prospection de surface ont été utilisées (CRSFA/89.15; 89.22; 89.36 et 89.37; BIANCHETTI, en prép.).

En géologie, la démarche d'approche classique a été appliquée avec notamment :

- L'établissement de coupes géologiques prévisionnelles;
- L'interprétation des photos aériennes et photos satellite;
- L'étude de la fracturation;
- L'examen à l'affleurement des roches susceptibles de servir de "réservoir" au fluide géothermal en profondeur.

En géophysique, quatre méthodes ont été principalement utilisées : l'électricité, la gravimétrie, la sismique-réfraction et la sismique-réflexion. Elles ont permis d'obtenir des informations sur :

- L'épaisseur et la composition du remplissage glaciaire de la vallée du Rhône;
- Les limites structurales entre unités géologiques, notamment les massifs cristallins et leur couverture sédimentaire;

- Les zones de failles et de broyage qui sont souvent le lieu de circulations importantes des fluides géothermiques;
- Les niveaux perméables en profondeur pouvant servir de "réservoir" pour un aquifère thermal.

En collaboration avec le Projet National de Recherche 20 (FREI *et al.* 1988 et 1992), une étude par sismique-réflexion du soubassement de la Vallée du Rhône entre St-Maurice et Sion a été réalisée. Cinq profils ont été exécutés perpendiculairement à la vallée sur les sites de St-Maurice, Martigny, Saillon, Sion-ouest et Sion-est (BESSON *et al.* 1991).

En pétrophysique, il s'est agi d'établir, par des mesures thermiques dans des tunnels et forages le gradient géothermique. Les études de thermographie aéroportée (Air-Géodétection, Prof. Levêque) qui existaient localement ont été utilisées, avec cependant peu de succès.

En hydrogéologie, les méthodes suivantes ont été appliquées sur l'ensemble des zones investiguées :

- Mesure périodique du débit, de la température et de la conductivité électrique dans les sources, les forages et les piézomètres, afin de suivre le comportement thermal de l'eau au cours d'un ou de plusieurs cycles hydrologiques;
- Etablissement de cartes d'anomalies de température et de conductivité;
- Pompages d'essai dans les forages existants et évaluation de la ressource en eau chaude.

En hydrochimie, le programme a eu recours à diverses méthodes telles que la géothermométrie, les modèles de mélange, la géochimie isotopique et la modélisation des équilibres chimiques, cela dans le but :

- D'estimer la température maximale atteinte en profondeur par le fluide géothermal;
- De calculer le pourcentage de mélange éventuel entre le fluide géothermal chaud et les eaux froides peu profondes;
- D'extrapoler les paramètres physico-chimiques et isotopiques de l'eau thermale non mélangée (composante profonde);
- D'évaluer le système global de circulation (altitude moyenne de la zone de recharge, profondeur de circulation atteinte, type des roches percolées par le fluide et durée du transit souterrain);
- D'estimer les interactions chimiques eau-roche et d'évaluer les phénomènes de précipitation ou de dissolution des minéraux.

2.2. Résultats obtenus

L'ensemble des travaux réalisés, lors de la phase préliminaire, ont apporté un certain nombre d'arguments qui ont conforté les hypothèses de base formulées sur les circulations profondes. De nouvelles idées ont vu le jour et ont permis de préciser les directions à prendre pour la poursuite du programme.

Un certain nombre de vérifications et constats ont été faits pour l'ensemble des zones étudiées :

- Malgré des similitudes sur l'origine et le mode de circulation des systèmes hydrothermaux, chacune possède des caractéristiques qui lui sont propres. En effet, en l'absence de forages profonds et en raison de la complexité géologique et structurale des Alpes, il n'est pour l'instant guère possible d'imaginer des connexions hydrauliques entre les différentes zones géothermiques étudiées. Il semble que nous sommes en présence d'une série de systèmes thermaux indépendants les uns des autres. L'appareillement à l'intérieur de ceux-ci de deux ou plusieurs types de fluides géothermiques semble d'abord dépendre des conditions géologiques, hydrodynamiques et thermiques.
- Les travaux ont confirmé l'importance régionale des formations carbonatées à niveaux évaporitiques du Trias aussi bien pour le circuit descendant que pour la remontée des circulations thermales.
- L'interface cristallin-sédimentaire, c'est-à-dire la limite entre les massifs cristallins (granite, gneiss) et leur couverture sédimentaire (grès, carbonates, évaporites), joue aussi un rôle de premier ordre dans le transport des fluides hydrothermaux. Dans leur grande majorité, les eaux thermales contenues dans les fissures des massifs cristallins ont également circulé, à un moment ou à un autre, dans des niveaux triasiques.
- L'existence de dépôts torrentiels sous-glaciaires à la base du remplissage quaternaire de la vallée du Rhône constitue, au cas où leur perméabilité est suffisante, un aquifère géothermique potentiel de grande extension. Ces dépôts ont été mis en évidence par sismique-réflexion de Sion jusqu'à Martigny (BESSON *et al.* 1993, ce volume).

Du point de vue de la méthodologie d'investigation, les résultats ont démontré l'efficacité de la méthode de sismique-réflexion pour mettre en évidence le contact terrains meubles/substratum rocheux d'une vallée alpine. L'interprétation sismostratigraphique permet de mettre en évidence une succession de sédiments quaternaires (dépôts fluviaux - glacio-lacustre - moraine de fond et/ou dépôts torrentiels sous-glaciaires) qui se retrouve tout au long de la vallée du Rhône entre Sion et Martigny. Quelques structures favorables au drainage ou au stockage d'eau thermale ont pu être identifiées. Il s'agit principalement de failles dans le substratum pour le drainage, et de zones plus perméables dans la roche ou dans les terrains meubles pour le stockage.

La connaissance, aussi bien de l'épaisseur totale des alluvions que de la distribution de la perméabilité à l'intérieur de celles-ci et de la forme de l'auge glaciaire, est dans ce cas primordiale tant pour le choix de la stratégie de foration/équipement que pour celui des cibles géothermiques. En effet, le postulat selon lequel une colonne de sédiments comportant des perméabilités différentes devrait permettre la constitution, à la base des sédiments quaternaires, d'un ou plusieurs aquifères alimentés par de l'eau chaude provenant du substratum sous-jacent, paraît des plus plausibles. L'ensemble des profils sismiques et leur interprétation sismostratigraphique sont présentés par BESSON *et al.* (1993, ce volume).

3. La phase I (1990-91)

3.1. Objectifs de la phase

Après avoir obtenu le maximum d'informations à partir des méthodes d'investigations indirectes, le programme Géothermoval est entré en 1990 dans la Phase I correspondant

principalement à la réalisation de forages de reconnaissance de moyenne profondeur (50-250 m) (CRSFA/92.02). En bordure de la vallée du Rhône, le but de ces ouvrages était notamment de traverser rapidement les dépôts quaternaires pour pénétrer dans le substratum et y réaliser des observations et des mesures en relation avec d'éventuelles circulations thermales. Quatre forages ont ainsi été réalisés en Haut-Valais et deux dans le Bas-Valais.

- Dans le tunnel du Simplon, quatre forages ont été exécutés en 1990 afin de cerner les phénomènes thermiques qui s'y développent, d'estimer le gradient géothermique sur la plus grande tranche de roche possible, et d'évaluer le rayon de refroidissement autour des deux galeries depuis leur mise en service au début du siècle. Ces forages ont été implantés dans des environnements géologiques et thermiques différents tout au long du tracé du tunnel.
- Dans la région de St-Maurice, deux forages verticaux ont été réalisés au cours de l'hiver 1991-92. Ils sont situés à proximité du village d'Epinassey, en bordure du versant gauche de la vallée à environ 1,5 km à l'ouest du site thermal de Lavey-les-Bains. Le but de ces forages était de confirmer les données géologiques et géophysiques acquises sur cette zone et, dans la mesure du possible, de démontrer l'existence de circulations d'eau thermale sur rive gauche du Rhône.

3.2. Résultats obtenus

Dans le tunnel du Simplon (tableau 2), deux forages ont été exécutés dans des zones sèches. Les deux autres ont recoupé des fissures aquifères et sont artésiens. Le plus profond a mis en évidence à 148 m au-dessous du tunnel, une température de la roche de 57°C, qui est supérieure à la température maximum mesurée lors du percement du tunnel (HAYOZ & ZUBER 1990). Les résultats confirment que le Simplon est un massif chaud, et que l'eau qui s'infiltré se réchauffe progressivement de haut en bas. Le gradient géothermique varie entre 2,8 et 4,0°C/100 m, ce qui est de loin beaucoup plus élevé que dans les autres tunnels alpins (tableau 3).

Des deux forages réalisés à Epinassey (tableau 4), le premier a touché le substratum à 13 m et a été arrêté à 101 m. Les fissures des gneiss contenaient un peu d'eau froide sans aucune composante hydrothermale. Le deuxième forage a touché le substratum à 120 m et a été arrêté à 216 m. Un aquifère thermal de 22°C occupe les fissures des gneiss et produit quelque 11 m³/h d'eau de caractéristiques chimiques très proches de celles du forage P14 de Lavey-les-Bains.

Il faut noter que, d'une façon générale, la plupart des forages qui ont été réalisés à proximité des sources thermales existantes (Saxon, Combioula, Saillon) ont toujours démontré la présence d'un potentiel géothermique en profondeur notablement supérieur à celui connu par les seuls exutoires naturels. D'autre part, les piézomètres et autres puits installés dans la nappe alluviale confirment la présence d'anomalies thermiques qui disparaissent au fur et à mesure que l'on s'écarte des versants.

N° FORAGE	F1	F2	F3	F4
Km depuis portail nord	10,4	12,5	6,8	7,8
Date d'exécution	9-12 mai 90	16-18 mai 90	8-12 oct. 90	13-17 oct. 90
Unité géologique	Zone Veglia	Nappe Lebedun	Nappe Berisal	Nappe Mt-Leone
Pétrographie	marbres et calcschistes	micaschistes	gneiss	gneiss
Profondeur (m)	91	108	65,5	148,5
Niveaux productifs (m)	~ 22 ~ 87	-	28,5 - 50,0 52,0 - 65,5	(4)
Débit pompé (m ³ /h)	9	-	pas testé	-
Rabattement (m)	5			
Débit artésien (m ³ /h)	3,6	-	0,54	~ 6x10 ⁻³ (4)
Pression (bar)	> 25		~ 12	
Type chimique	Ca ; SO ₄	-	Na ₂ SO ₄ >HCO ₃	Na>Ca;SO ₄ >HCO ₃
Conductivité élect. (µS/cm)	1440	-	850	7320
pH	7,15	-	9,01	6,06
Température en tête (°C)	45,0	32,7 (à 30 m)	38,4	29,3
Température au fond (°C)	45,5	42,5	42,5 (à 50 m)	57,2
Gradient géoth. (°C/100m) - brut (1)		5,3	-	6,6
Intervalle de profondeur (m)	-	80 - 108	-	110-148
- corrigé (2)	-	4,0 ± 0,5	-	2,8 ± 0,7
Équipement du forage (ø pouces)	tubé ø 6" de 0 à 6 m + vanne et trou nu ø 4" de 6 à 91 m	tubé ø 6" de 0 à 3 m trou cimenté ø 4" de 3 à 108 m + 11 thermocouples (3)	tubé ø 6" de 0 à 3 m trou nu ø 4" de 3 à 65,5 m	tubé ø 6" de 0 à 3 m trou nu ø 4" de 3 à 148,5 m + rempli d'eau
Mode de foration	marteau fond-de-trou			

Tableau 2 : Caractéristiques principales des forages exécutés dans le tunnel du Simplon (CRSFA/92.08).

(1) Gradient géothermique brut mesuré in situ.

(2) Gradient géothermique corrigé par modélisation du refroidissement du massif (PAHUD *et al.* 1993).

(3) Il s'agit d'une colonne de thermocouples posés chaque 10 m et noyés dans le ciment.

(4) Suintement artésien constaté, mesuré et analysé un an et demi après le forage.

Sites	Massifs	Gradient géothermique (°C/100 m)	Références
Collecteur est d'Emosson	Mt-Blanc	1,3	JAMIER (1975)
Tunnel du Mt-Blanc	"	1,5	GUDEFIN (1967)
Tunnel de l'Albula	Nappe Err-Bernina	2,1	CLARK & NIBLETT (1956)
Tunnel du Gotthard	Gotthard	2,2	"
Tunnel du Lötschberg	Aar	2,7	"
Tunnel du Simplon	Simplon	3,6	"
Tunnel du Simplon	"	2,8 - 4,0	PAHUD <i>et al.</i> (1993)

Tableau 3 : Les gradients géothermiques mesurés dans différents tunnels alpins (CRSFA/92.08).

Le tableau 5 donne pour chaque zone d'investigation les paramètres géothermiques les plus importants qui ont été mis en évidence par le programme. Il en résulte à l'échelle du canton du Valais une puissance thermique disponible de quelques 65 MWt. Si l'on considère séparément chaque zone d'investigation, on constate que les températures élevées sont généralement associées à des débits faibles ou vice-versa, mais rarement ces deux paramètres montrent simultanément des valeurs élevées. Font exception Brigerbad et Leukerbad, qui sont les zones d'émergences hydrothermales possédant le plus grand potentiel géothermique connu actuellement en Valais.

En comparaison avec les eaux thermales des grands bassins sédimentaires, les fluides étudiés possèdent une minéralisation faible (0,2 à 5 g/l); ils contiennent rarement des sulfures et sont à première vue peu entartrants ou corrosifs. Ces qualités auront une importance économique capitale au moment de l'exploitation de ces eaux, puisqu'il n'y aura pas ou du moins peu d'effets néfastes pour les conduites d'adduction de l'eau thermale et le milieu de restitution (réseau hydrographique de surface).

4. Investigations et résultats par région

4.1. Val d'Illiez

Les sources thermales de Buchelieule dans le Val d'Illiez (Bas-Valais) sont situées sur la rive gauche de la Vièze, dans le flysch tertiaire parautochtone helvétique. Toutes les eaux thermales et subthermales de la zone d'étude ont été mesurées, échantillonnées et analysées à de nombreuses reprises entre 1988 et 1991 (CRSFA/92.25). Elles ont une température maximale de 30°C et le débit total des divers exutoires est de 72 m³/h. Le chimisme, de type [Ca>Mg ; SO₄] avec une minéralisation totale moyenne de 1,8 g/l, est caractérisé par de

N° FORAGE	E1	E2
Coordonnées	586.825/115.640	566.500/116.110
Date d'exécution	décembre 1991	décembre 1991 - mars 1992
Epaisseur du Quaternaire (m)	13	120
Pétrographie du substratum	gneiss du Massif des Aiguilles Rouges	
Profondeur (m)	101	216
Niveaux productifs (m)	73 à 75	159, 166, 177, 189, 201
Débit (m ³ /h)	< 0,01	11,4
Rabattement (m)	--	25
Température eau (°C)	9,8	22,0
Type chimique	Ca, HCO ₃	Na>Ca ; SO ₄ >HCO ₃
Conductivité électrique (µS/cm)	320	577
pH	-	7,9
Température en tête (°C)	8,0	10,3
Température au fond (°C)	11,4	21,6 à 180 m
Gradient géoth. brut (°C/100m)	3,5	
intervalle de mesure (m)	30 - 100	pas testé
Equipement du forage (ø mm)	tubé ø 176 : 0-19,5 m	tubé ø 125 : 0 - 118,5 m
Mode de foration	marteau fond-de-trou et rotary	

Tableau 4 : Caractéristiques principales des forages exécutés à Epinassey (CRSFA/92.03).

faibles teneurs en éléments alcalins et en chlorure. La température et le débit de ces eaux thermales varient au cours du temps. Celles-ci subissent au cours de leur remontée une dilution par une eau plus froide et peu minéralisée, vraisemblablement originaire d'un aquifère karstique du Malm. Le calcium et le sulfate présents dans l'eau proviennent essentiellement de la dissolution de gypse et d'anhydrite présents dans les cornieules triasiques de la couverture autochtone du Massif des Aiguilles Rouges (VERGAIN 1991).

L'interprétation des données, aussi bien géologiques qu'hydrogéologiques et isotopiques, laisse envisager l'existence d'une liaison hydraulique entre ces sources thermales et le bassinversant de Salanfe, et plus particulièrement les pertes (~ 3600 m³/h) du lac artificiel

Site étudié	Tempér. max. mesurée à l'exutoire (°C)	Température estimée du réservoir profond (°C)	Débit prouvé (m ³ /h) (1)	Minéralis. totale (g/l)	Puissance thermique (MWt) (2)	Roche-réservoir	Profondeur probable de la ressource (m)
BAS-VALAIS	Val d'Illicz	29	70	1,8	2,6	carbonates + évaporites (Trias)	3 200
	Lavey-les-Bains	62	27	1,4	3,0	gneiss, (évaporites du Trias?)	> 500
	Epinassey	22	12	0,7	0,4	gneiss, (évaporites du Trias?)	> 200
VALAIS CENTRAL	Bovernier	21	13	0,3	0,5	granite	3 100
	Val de Bagnes	18	9	1,0	0,2	évaporites, quartzites (Trias)	3 100
	Saxon	26	220	0,7-3,2	8,2	gneiss, schistes + évaporites (Trias)	3 400
	Saillon	24	100	1,4	2,9	carbonates + évaporites (Trias)	150 - 800
	Combioula	28	240	2,9-5,2	8,4	grès + évaporites (Trias)	3 400
	Tunnel du Rawyl	30	65	0,4	2,4	calcaires (Malm)	> 100 (dans le tunnel)
HAUT-VALAIS	Leukerbad	51	180	2,0	11	carbonates + évaporites (Trias/Dogger)	400 - 600
	Brigerbad	52	150	1,3	18	gneiss (Massif de l'Aar)	3 800
	Tunnel du Simplon Total des sources (sortie à Brigue)	45 13	43 (3) 83	1,5-7,9 0,5	3,2 0,8	carbonates, granites, gneiss, schistes (Nappes penniques)	3 200 canal
	Tunnel de la Furka (sortie Oberwald)	15	324	0,15	3,8	gneiss (Massif du Gotthard)	canal
TOTAL	-	-	> 1500	-	65		-

Tableau 5 : Caractéristiques géothermiques des zones thermales étudiées par le programme Géothermoval (CRSFA/92.02)

(1) Débit total de la zone thermique: correspond parfois à plusieurs types d'eau d'origine différente.

(2) La puissance thermique a été calculée avec le débit indiqué, la température évaluée en profondeur et une température de rejet fixée à 5°C : $P(\text{MWt}) = Q (\text{m}^3/\text{h}) * [T(°\text{C}) - 5]/861$.

(3) Le débit indiqué correspond à la somme des débits des exutoires $\geq 30^\circ\text{C}$.

du même nom qui est situé environ 9 km au sud-est des sources (Figure 3). En effet, on n'a pas retrouvé de trace de ces pertes jusqu'à ce jour, d'autre part la géométrie des couches géologiques favorise l'écoulement de ces pertes en direction de Buchelièvre et les analyses isotopiques, comme d'ailleurs les événements sismiques dans le Val d'Illiez concomitants à la mise en charge du barrage en 1953, sont autant d'éléments qui semblent corroborer cette hypothèse (BLANCHETTI *et al.* 1992).

L'interprétation des données géochimiques ne permet pas d'envisager que la température de l'eau thermale en profondeur soit supérieure à 35°C. Néanmoins, en raison du débit élevé (~ 72 m³/h) qui s'écoule en surface dans la zone d'émergence, un potentiel thermique non négligeable (2,1 MWt) est disponible à faible profondeur pour une éventuelle exploitation de la chaleur à proximité de la zone thermale.

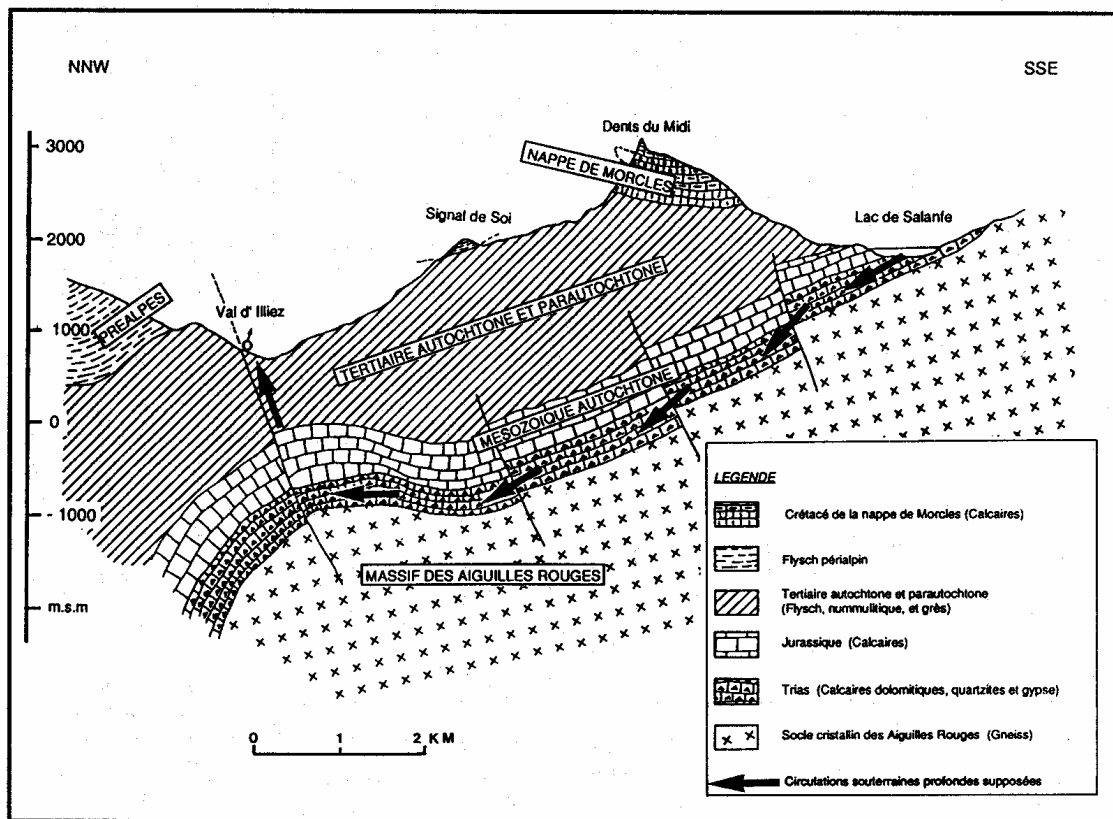


Figure 3 : Coupe géologique schématique de la région de Val d'Illiez et de Salanfe et trajet probable des circulations souterraines profondes (CRSFA/92.25).

4.2. St-Maurice - Lavey

La géologie de la région de St-Maurice est issue du complexe formé par le Massif cristallin des Aiguilles Rouges, sa couverture autochtone et la couverture mésozoïque paraautochtone appartenant à l'Helvétique. Nous sommes en présence d'une tectonique relativement

complexe : on suppose qu'un chevauchement affecte le socle en passant en surface par les torrents St-Barthélémy et Avançon. Les dépôts quaternaires sont essentiellement représentés par les cônes de déjection du St-Barthélémy et du Mauvoisin (CRSFA/92.03).

L'hydrogéologie de la zone est caractérisée par des aquifères à porosité d'interstice et de fissure plus ou moins connectés entre eux. Les premiers sont situés dans le Quaternaire de la vallée du Rhône, les seconds dans les roches fissurées et karstifiées du substratum cristallin et sédimentaire. Sur rive droite, plusieurs forages allant de 100 à 250 m de profondeur captent l'eau thermale dans les gneiss du Massif des Aiguilles Rouges au profit de l'établissement de Lavey-les-Bains.

Le programme Géothermoval a effectué de nombreuses investigations pour préciser les structures profondes de la région. Il s'agit notamment de l'établissement d'un cadastre et d'un réseau d'observation hydrogéologique, d'une cartographie géologique, de campagnes de géophysique ainsi que des mesures physico-chimiques des eaux souterraines. De plus, une cartographie détaillée a permis de faire ressortir des structures chevauchantes, dont l'interprétation fournit une explication simple à la "dysharmonie" tectonique de cet endroit où les deux versants de la vallée rhodanienne se rejoignent.

Une campagne de sismique-réflexion a fourni des résultats intéressants malgré des contraintes topographiques importantes (resserrement de la vallée et cônes de déjection). Quatre profils soulignent clairement l'interface "substratum/dépôts meubles". L'épaisseur du Quaternaire atteint un maximum de 600 m, à environ 1 km au sud de St-Maurice (Figure 4). Le surcreusement glaciaire, esquissé préalablement par les mesures gravimétriques effectuées entre Evionnaz et St-Maurice (MARCHANT & BESSON 1986), a ainsi été confirmé et précisé par la sismique. Une interprétation sismo-stratigraphique plus fine a permis de distinguer différents niveaux dans ce Quaternaire : on rencontre de haut en bas une succession de dépôts post-lacustres (30-100 m), lacustres (200-400 m) et morainiques (40-150 m). Ces épaisseurs se corrèlent assez bien avec celles relevées dans le forage réalisé en 1980 au Bois-Noir. Quelques structures chevauchantes, dont une passant par le torrent St-Barthélémy, ont été localisées dans le substratum, confirmant ainsi l'hypothèse émise par la cartographie géologique. Ces discontinuités du socle cristallin pourraient être le siège de remontées thermales, alors que jusqu'à présent l'on accordait ce rôle majeur aux couches triasiques.

Sur le plan de la chimie des eaux, le fluide thermal du forage d'exploitation (P201) de Lavey-les-Bains est de type $[Na ; SO_4 > Cl]$ et sa minéralisation est peu élevée (1,4 g/l). On constate la présence d' H_2S et la température de l'eau en tête de puits atteint 62°C. Ce chimisme reflète une circulation principalement intracristalline. En effet, la présence de sulfates, longtemps expliquée par la dissolution des terrains évaporitiques (passage de l'eau dans le Trias), est attribuée aujourd'hui plutôt à l'oxydation des sulfures disséminés dans les gneiss (Bianchetti, à paraître). L'eau du captage P201, bien que proche de la composition chimique du fluide thermal profond, est encore faiblement mélangée avec des eaux superficielles. Les autres eaux captées à Lavey-les-Bains représentent toutes des mélanges progressifs entre la composante thermale profonde et un ou plusieurs types d'eaux superficielles qui, tièdes ou froides, sont en général bicarbonatées-calciques.

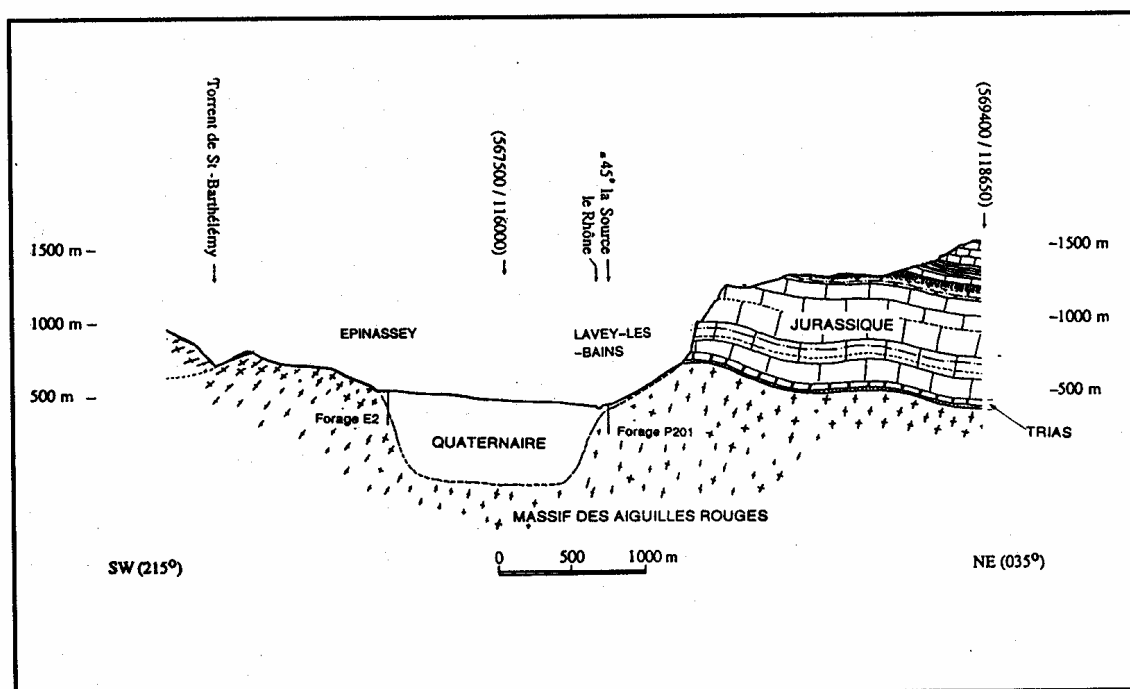


Figure 4 : Coupe géologique à travers la vallée du Rhône à 2 km au sud de St-Maurice (CRSFA/92.03)

Les forages de Lavey-les-Bains ont révélé une très forte variabilité spatiale des caractéristiques physico-chimiques des eaux. Ceci est une conséquence de l'hétérogénéité de la distribution des fractures dans les gneiss, qui permet un mélange à de multiples degrés entre la composante thermique profonde et l'eau de la nappe phréatique. Les variations temporelles sont par contre très faibles : la compilation des principaux paramètres hydrogéologiques (température, conductivité et débit) du captage P201, mesurés chaque semaine depuis 1981, a permis de déterminer un domaine de variation de ces paramètres que l'on peut considérer actuellement comme représentatif. La température de l'eau en tête de puits varie de 60,5 à 63,1°C, alors que la conductivité passe de 1690 à 1865 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La détermination de la zone d'infiltration des eaux souterraines a été estimée sur la base de l'interprétation des données isotopiques (oxygène-18 et deutérium) : elle se situe entre 1700 et 2000 m. L'estimation de la température de l'eau thermique en profondeur a été réalisée par l'étude des géothermomètres de la calcédoine, potassium/magnésium et sodium/potassium. Les résultats convergent sur une température probable en profondeur de l'ordre de 100°C. Une première perte de température de 30°C, liée à un phénomène de conduction, s'effectue lors de la remontée en surface des eaux thermales profondes. Elle témoigne de la lenteur des écoulements au sein des discontinuités qui affectent le socle cristallin.

Une deuxième perte de température, de l'ordre de 5 à 30°C selon les forages et leur profondeur, intervient dans la zone d'émergence et est liée à des phénomènes de mélange entre la composante thermique profonde et la nappe phréatique. Les mesures de l'activité du

tritium contenu dans les eaux souterraines, ont notamment permis de confirmer le phénomène de mélange des eaux thermales profondes (anciennes) par des eaux superficielles (récentes).

Deux forages de reconnaissance, l'un de 101 m (E1) et l'autre de 216 m (E2), ont été exécutés en hiver 1991-1992 à proximité du village d'Epinassey (CRSFA/92.18). Ils avaient pour but de vérifier la stratigraphie, l'état de fissuration et la présence de circulations dans le substratum sur la rive gauche du Rhône, ainsi que de confirmer éventuellement les hypothèses émises lors de la Phase préliminaire (tableau 4 et figure 5). Le forage le plus profond (E2) a intercepté des venues d'eau thermique à 22°C dont les caractéristiques chimiques [Ca>Na ; SO₄>HCO₃] s'apparentent aux eaux captées par le forage P14 à Lavey-les-Bains. Les essais de pompage ont révélé des débits relativement importants pour ce type de forage et d'aquifère (12 m³/h pour 25 m de rabattement), et l'analyse des résultats de pompage donne un domaine de transmissivité de 10⁻⁶ à 10⁻³ m²/s. Au cours de ces essais aucune interférence n'a été constatée avec les forages de l'établissement thermal. Par contre, des variations quotidiennes du niveau piézométrique ont été enregistrées dans les forages E2 et P14, qui semblent liées aux marées terrestres (TACHER *et al.* 1993, ce volume).

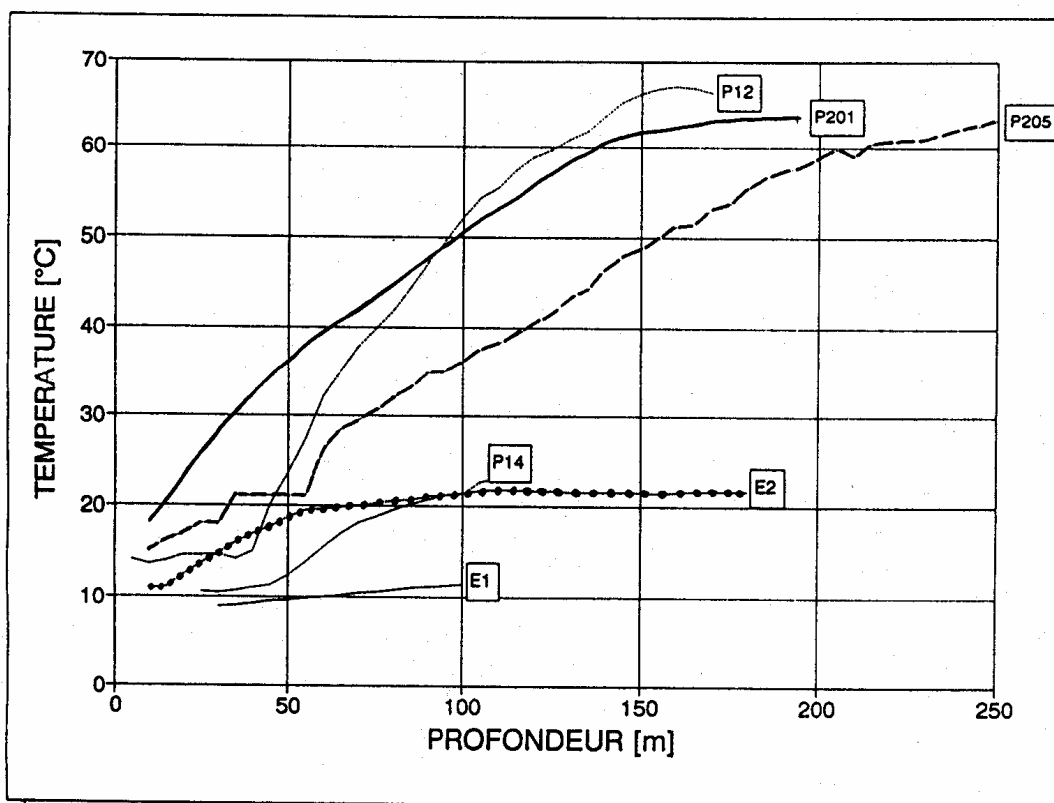


Figure 5 : Profils de température dans les forages d'Epinassey (E1 et E2) et de Lavey-les-Bains (P12, P14, P201, P205) (CRSFA/92.03).

La synthèse des connaissances actuelles permet d'établir un modèle conceptuel des circulations thermales de la région. L'essentiel de celles-ci s'effectue dans les gneiss fissurés, les terrains évaporitiques du Trias étant éventuellement traversés dans la branche descendante du circuit. Il est par contre possible que sous St-Maurice - secteur où le Trias n'a pas été raboté par le glacier du Rhône - le Trias serve accessoirement de réservoir secondaire pour le fluide thermal ascendant. Les forages effectués démontrent que l'aquifère thermal n'est pas limité au seul soubassement de Lavey-les-Bains, mais qu'il s'étend régionalement sous la vallée du Rhône. Par conséquent, l'absence de sources thermales sur sol valaisan est due vraisemblablement à l'épaisse "couverture" quaternaire pratiquement imperméable qui recouvre le substratum sur rive gauche.

L'exécution d'un forage géothermique profond de 1000 m environ et dévié à partir d'une certaine profondeur est projeté dans le cadre de la Phase II du programme Géothermoval. Le forage vise deux aquifères, tout d'abord celui du Trias, dont la présence est incertaine, puis celui des gneiss fissurés. La température de l'eau recherchée est estimée à 50°C avec un débit attendu de l'ordre de 50 m³/h.

4.3. Martigny

Du point de vue géologique, Martigny se trouve au coeur des Massifs cristallins externes. Comme pour Sion, la présence de structures triasiques redressées à proximité du cristallin et celle des sources thermales de Bovernier et Saillon constituent un environnement favorable aux circulations de fluides en profondeur. Des coupes géologiques faites à partir de la cartographie de surface ont servi de base à l'interprétation des contacts et structures profondes décelées par sismique-réflexion et réfraction (CRSFA/92.04).

Les Massifs cristallins du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges englobent les formations mésozoïques du Synclinal de Chamonix, dont les niveaux évaporitiques ou calcaires pourraient être aquifères. D'autres possibilités de circulations profondes existent au contact entre le gneiss et le granite intrusif du Massif du Mont-Blanc. La source thermale de Bovernier résulte probablement de ce type d'écoulement.

Des mesures physico-chimiques et des analyses géochimiques de la source de Bovernier ont été effectuées pendant deux ans, afin de caractériser les circulations thermales profondes dans le Massif cristallin du Mont-Blanc. L'interprétation des données chimiques montre que ces eaux, de type [Ca>Na ; SO₄>HCO₃] prouvent des aquifères granitiques du Mont-Blanc (DUBOIS 1992). La température maximale du réservoir profond est estimée entre 30-40°C. La zone de recharge est située entre 1500 et 2000 m dans la région du Catogne. Le temps de transit des eaux semble relativement rapide et inférieur à 35 ans. L'étude technico-économique a démontré que l'exploitation de la ressource géothermique de Bovernier au moyen d'un forage de 300 m pourrait être rentabilisée.

A Martigny, les résultats de la sismique-réflexion mettent en évidence la forme de l'auge glaciaire et la stratigraphie des dépôts quaternaires de remplissage dont l'épaisseur maximale atteint 920 m au droit de l'autoroute. Comme dans les régions de Sion et de Saillon, des dépôts torrentiels ont été décelés au fond de la vallée, entre la moraine de fond et le substratum. Ils pourraient constituer des aquifères de stockage secondaire pour le fluide

thermal ascendant provenant des formations mésozoïques pincées du synclinal de Chamonix. Deux forages profonds déviés, de 1200 à 1300 m, recoupant les zones aquifères quaternaires et triasiques sont proposés. L'évaluation de la température des fluides à cette profondeur varie entre 40 et 50°C et le débit pourrait être de l'ordre de 70 m³/h.

4.4. Val de Bagnes

La commune de Bagnes possède deux émergences subthermales liées aux évaporites du Trias. Ces niveaux, principalement gypseux et quartzitiques, sont rattachés géologiquement à la zone Houillère. L'analyse chimique des eaux, complétée par des mesures in situ, montre que ces sources sont de type [Ca ; SO₄], avec un débit total de 3,6 à 6,6 m³/h et une minéralisation totale variant entre 1 et 2 g/l. La source de Châtelard (18°C) est la plus chaude, mais son réservoir profond ne possède pas, selon les indices géothermométriques, une température supérieure à 25°C. La puissance thermique disponible est estimée à 0,21 MWt (CRSFA/92.25A).

Une campagne sismique-réflexion a permis de déterminer l'épaisseur du recouvrement quaternaire, le long de la vallée, entre Montagnier et Villette. Des structures triasiques, favorables aux écoulements, ont été mises en évidence sous les dépôts du remplissage quaternaire, d'après la position des affleurements et au droit des zones surcreusées visibles sur le profil sismique-réflexion longitudinal. Des forages de reconnaissance de 100-200 m de profondeur ont été proposés en tenant compte de la proximité des utilisateurs potentiels.

4.5. Saillon

Saillon se situe dans la vallée du Rhône entre Martigny et Sion. Cette région est caractérisée par la présence de nombreux indices géothermiques de surface tels que la source thermale de Leytron et les forages de la Société des Bains de Saillon (CRSFA/92.05).

Des levés géologiques de détail complétés par des profils prévisionnels, des mesures géophysiques et surtout des analyses géochimiques et isotopiques des eaux ont permis d'implanter un forage sur le site des Anciens Bains. Celui-ci a débuté en novembre 1990, mais il a dû être stoppé à 41m de profondeur pour des raisons administratives. La présence d'eau thermale (20°C) pompée en grande quantité à une si faible profondeur a confirmé les hypothèses de travail et laisse augurer des caractéristiques très favorables pour l'ouvrage prévu à 250 m de profondeur.

Le contexte géologique est formé principalement de l'Helvétique, des Massifs cristallins et de leur couverture autochtone. Représenté par le flanc renversé de la Nappe de Morcles, l'Helvétique se pince en profondeur entre les socles cristallins des Aiguilles Rouges et du Mont-Blanc. Cette zone est traversée par une discontinuité tectonique majeure (faille de Saillon) qui affecte en profondeur toutes les unités précitées.

L'étude hydrogéologique et géochimique a permis une classification des eaux dans l'optique de l'implantation d'un forage profond (Tableau 6). De type sulfaté-calcique et magnésien, ces eaux proviennent d'un mélange de fluides chauds du Trias avec des eaux froides de type "source de la Sarvaz", cette dernière étant un exutoire karstique froid dans le Bajocien, situé

à l'ouest de Saillon (MANDIA 1991). Au moyen des données isotopiques et géochimiques, deux systèmes d'écoulement bien distincts ont été caractérisés : le premier, dénommé "site de la Basse-Salentse", comprend la source thermale de Leytron et les forages P2 et P3. Ce système d'écoulement résulte d'un mélange entre une composante récente froide et une composante thermale infiltrée probablement après 1953. Le second système, dénommé "site des Anciens Bains", comprend les forages P1 et P4 (DUBOIS ET AL., 1993, ce volume). La présence des éléments alcalins et du chlorure en quantité plus importante impliquerait pour ce système d'écoulement une composante profonde cristalline qui se mélange aux eaux triasiques (BIANCHETTI, en prép.). Le faible contenu en tritium des eaux du forage P1 dénote d'une infiltration probablement antérieure à 1953. La zone d'infiltration, définie par les méthodes isotopique et de traçage pour l'ensemble des eaux étudiées, se situe vraisemblablement dans la région des lacs de Fully et du Grand-Pré (DUBOIS 1983).

Points d'eau	Débit (m ³ /h)	Température (°C)	TSD* (mg/l)	Type chimique
Source thermale de Leytron	5,8 - 13,3	23,5 - 25,1	900 - 1100	Ca>Mg ; SO ₄ >HCO ₃
Forage P1 (35 m)	11,9	19,0 - 19,8	1300 - 1400	Ca>Na>Mg ; SO ₄ >HCO ₃
Forage P2 (75 m)	5,4 - 11,9	23,0 - 23,7	900 - 1100	Ca>Mg ; SO ₄ >HCO ₃
Forage P3 (448 m)	11,9 - 360	16,7 - 24,0	500 - 900	Ca ; SO ₄ >HCO ₃
Forage P4 (41 m)	36	19,6	1550	Ca>Na>Mg ; SO ₄ >HCO ₃
Source subthermale des gorges de la Salentse	0 - 10,8	11,3	370	Ca>Mg ; SO ₄ >HCO ₃
Source de la Sarvaz**	1000 - 22600	6,9 - 7,6	190 - 320	Ca ; HCO ₃

* TSD : Total Solides Dissous

** DUBOIS (1983)

Tableau 6 : Caractéristiques physiques et chimiques des eaux souterraines de la zone de Saillon (CRSFA/92.05)

Une campagne de sismique-réflexion a mis en évidence, à la base des dépôts quaternaires de la vallée du Rhône [épaisseur maximale 710 m au droit de l'autoroute], des dépôts torrentiels sous-glaciaires apparemment très perméables, du même type que ceux relevés à Sion et Martigny. Le stockage possible d'eau thermale en provenance des formations triasiques ou des failles sous-jacentes, en fait un objectif géothermique très intéressant.

Un forage géothermique dévié d'une profondeur de 1000 m, localisé au pied de la colline de Saillon devrait être réalisé en 1994. Comme le prévoyait d'ailleurs aussi le forage interrompu aux Anciens Bains, il devrait recouper les structures triasiques subverticales pincées entre les massifs cristallins (Figure 6). La température des eaux captées devrait atteindre 35 à 40°C et le débit 70 m³/h environ.

VUATAZ & AL. : PROGRAMME GÉOTHERMOVAL

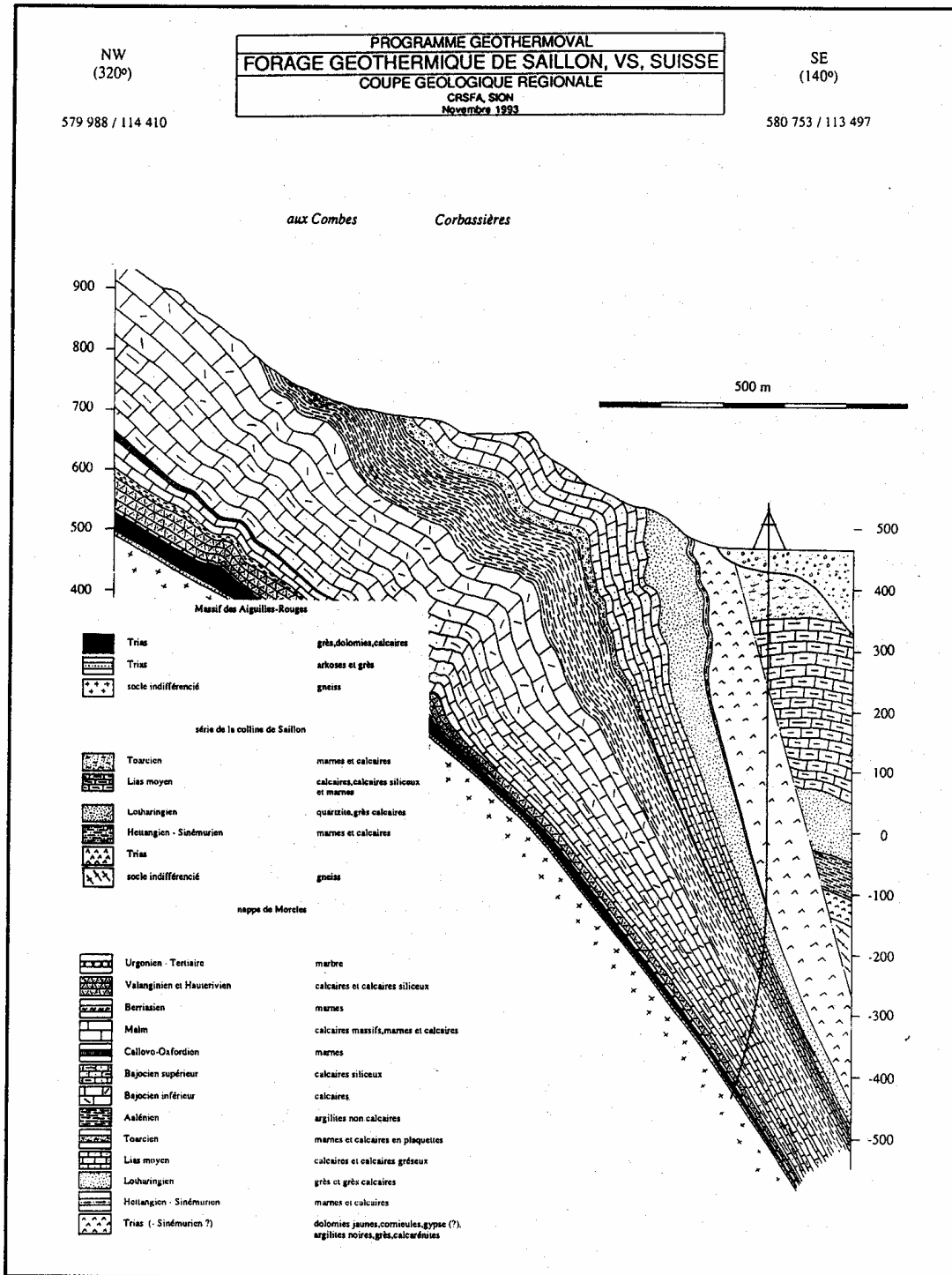


Figure 6 : Coupe géologique de la zone de Saillon et tracé prévisionnel du forage profond (CRSFA/92.05).

4.6. Sion

Il n'y a pas d'émergence thermique dans la plaine du Rhône au niveau de Sion et le concept des circulations de fluide en profondeur a été élaboré par extrapolation à partir des sources chaudes de Combioula et du tunnel du Rawyl, où ont été effectuées des mesures physico-chimiques et des analyses géochimiques et isotopiques. Trois coupes géologiques prévisionnelles ont permis d'exploiter au mieux la cartographie géologique et ont servi de base à l'interprétation des profils sismique-réflexion réalisés à l'est et à l'ouest de Sion (CRSFA/92.06).

Du point de vue géologique, la région est rattachée aux domaines de l'Helvétique (Nappe du Sublage) et du Pennique, ce dernier étant composé de quatre sous-ensembles tectoniques : la Zone de Sion-Courmayeur, la Zone Houillère, la Nappe des Pontis et la Nappe de Siviez-Mischabel. La position structurale des formations triasiques de ces unités, ainsi que leur perméabilité sont autant d'éléments favorables à la présence de circulations thermales profondes.

Les profils sismique-réflexion montrent nettement la forme de l'auge glaciaire de la vallée du Rhône ainsi que l'épaisseur (870 m à Vétroz, 560 m à Bramois et 600 m à Vissigen) et la stratigraphie des dépôts quaternaires. Comme à Martigny et Saillon, des dépôts torrentiels sous-glaciaires sont décelés à la base du remplissage quaternaire. Ils définissent ainsi l'extrémité est d'un sillon graveleux allant de Martigny à Sion. Si les perméabilités sont suffisantes, ces dépôts pourraient constituer un aquifère géothermique à l'échelle régionale de première importance (BESSON *et al.* 1993, ce volume).

Les levés de coupes géologiques - qui ont permis de situer les différentes structures aquifères dans l'espace - démontrent qu'il n'existe pas, à prime abord, de liaison hydraulique entre les eaux thermales de Combioula et du Rawyl avec celles qui devraient être captées par un forage dans le substratum rocheux à Sion. Un autre projet de forage géothermique dans le quartier de Vissigen est en cours d'élaboration : pour une profondeur totale de 600 m, il devrait intercepter des eaux thermales contenues dans les formations quaternaires situées à la base du remplissage de l'auge glaciaire. Les températures attendues en profondeur sont de l'ordre de 25 à 35°C pour un débit total de 60 m³/h environ.

4.7. Brigerbad - Visp

L'étude s'est déroulée dans la plaine du Rhône, entre la commune de Baltschieder et la station thermique de Brigerbad. La compilation des données géologiques a permis de réaliser une carte géologique et structurale au 1:10'000 ainsi qu'un profil géologique. Des mesures et analyses ont aussi été effectuées sur la nappe phréatique et les sources subthermales (CRSFA/92.07).

La région étudiée se situe entre deux grandes unités tectoniques, le Massif de l'Aar et le Domaine Pennique. Le remplissage quaternaire de la vallée du Rhône contient un aquifère multicouches, alimenté dans sa partie supérieure par les infiltrations du Rhône. Au niveau des versants, les sources proviennent de circulations en milieu fissuré dans le Massif de l'Aar.

Un forage de 111 m de profondeur, réalisé près de Brigerbad dans le cadre de l'étude pour le passage de l'autoroute N9, a permis de mettre en évidence une anomalie de température dans les alluvions et de déterminer à 100 m l'épaisseur du remplissage quaternaire à cet endroit.

Des anomalies thermiques ont été mises en évidence à divers endroits dans la nappe phréatique : à proximité du versant, on trouve des températures de 12-15°C, alors que la température annuelle moyenne de l'air atteint 8,5°C et que les infiltrations du Rhône sont de 7-8°C. Des sources subthermales ont été observées le long du canal de Brigerbad. Elles sont de type [Ca ; SO₄] et ont des températures comprises entre 10 et 18°C.

Les sources thermales de Brigerbad émergent des gneiss du Massif de l'Aar, au pied du versant. Leur température (au maximum 52°C) et leur débit (~ 150 m³/h) en font l'une des émergences thermales les plus importantes du Valais. Il s'agit d'eaux de type [Na>Ca ; SO₄>Cl] résultant d'un mélange entre des eaux thermales profondes de type [Na ; SO₄>Cl] et des eaux d'origine plus superficielle, froides et peu minéralisées de type [Ca ; HCO₃]. La température de la composante thermique devrait atteindre en profondeur 100°C environ (VUATAZ 1982). La zone d'infiltration est vraisemblablement située dans le Massif cristallin de l'Aar, à une altitude moyenne de l'ordre de 2900 m. L'accès à ces sources n'a malheureusement pas été autorisé lors des campagnes d'échantillonnage du programme Géothermoval, et par conséquent il n'a pas été possible de mener des investigations détaillées pour confirmer les hypothèses émises sur les écoulements souterrains (tableau 7).

L'ensemble des informations et des résultats obtenus montre que la région de Brigerbad-Visp est caractérisée par une anomalie thermique régionale qui affecte le Massif de l'Aar. La cause de cette anomalie n'est pas encore connue avec certitude : il peut s'agir d'un massif chaud qui transmet par conduction sa chaleur aux circulations souterraines même à faible profondeur. Il peut s'agir aussi d'un système de convection profond dont les sources thermales de Brigerbad seraient le seul exutoire connu à ce jour (Figure 7).

Processus	Géologie	Altitude (+) Profondeur (-)	Température. (°C)	Groupe géochimique	Temps de transit	Mélange
Zone d'infiltration	Granites et gneiss (Massif de l'Aar)	+ 2900	1-3	Ca ; HCO ₃		
Aquifère profond	Granite et gneiss	~ - 3000	~ 100	Na ; SO ₄ > Cl	> 40 ans (hypothèse)	Aucun
Remontée	Granite, gneiss et contact avec les formations sédimentaires des racines de l'Helvétique (y compris Trias)			Na>Ca ; SO ₄		Possible avec les eaux d'aquifères liés aux formations sédimentaires des racines de l'Helvétique (y compris Trias)
Emergence : Sources de Brigerbad	Gneiss, éboulis	+ 655	37 - 52	Na>Ca ; SO ₄ (TSD max. = 1290 mg/l)	âge "apparent" 10-15 ans	Eaux froides ou subthermales de faible profondeur

Tableau 7 : Modèle conceptuel des écoulements des eaux thermales de Brigerbad (CRSFA/91.17).

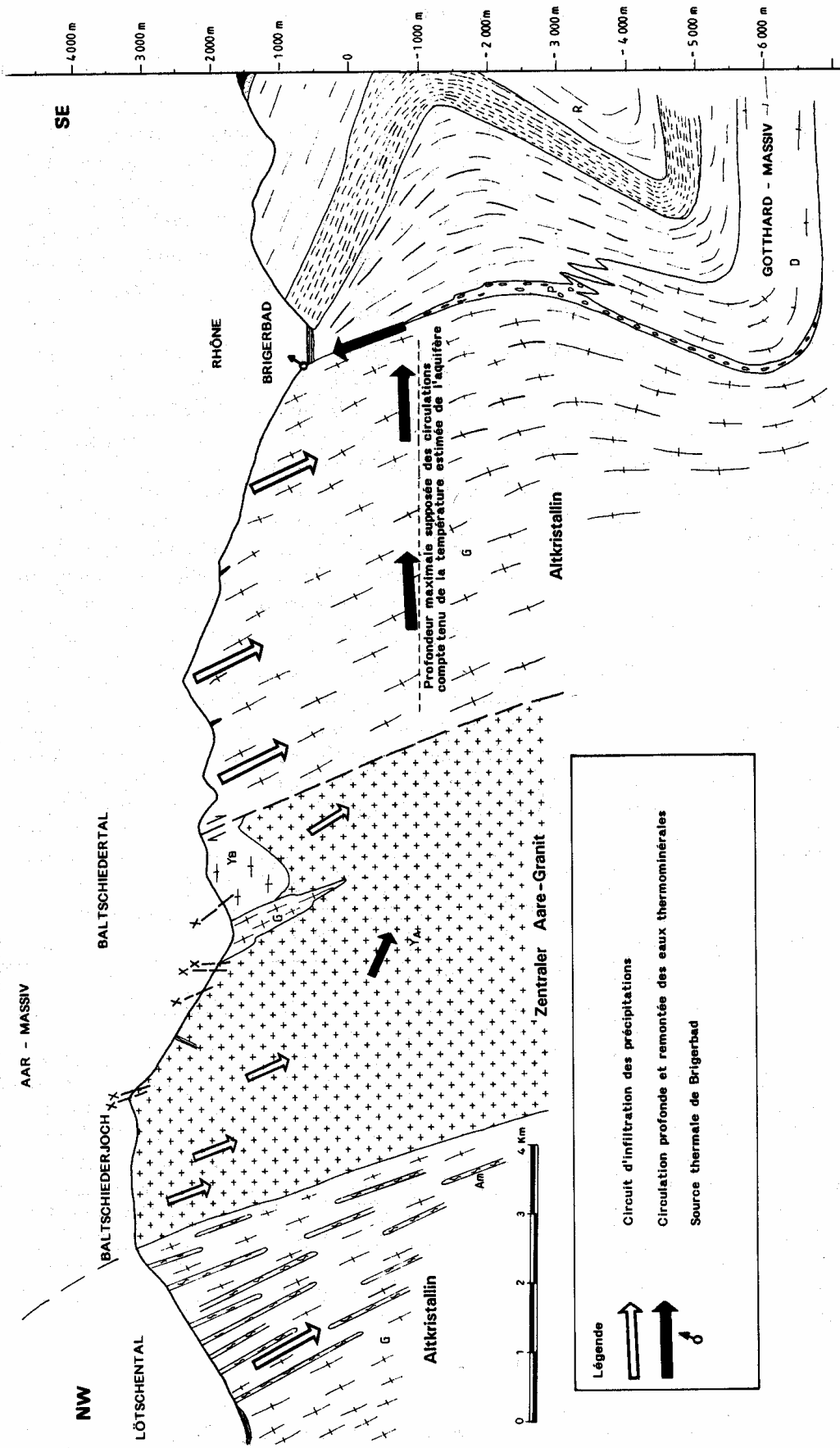


Figure 7 : Coupe géologique de la zone de Brigebad et représentation schématique des écoulements souterrains profonds (CRSFA/92.07).

Dans le cadre de la Phase II du programme Géothermoval, un projet de forage géothermique profond a été préparé. Ce forage, dont l'implantation est avant tout basée sur des critères technico-économiques, a été positionné sur les rives du Rhône à Visp. Il est dévié en direction du versant NW avec une longueur totale de 1300 m. Il devrait recouper les gneiss fracturés du Massif de l'Aar. Un débit de 70 m³/h est attendu pour une température de 70 à 80°C. En cas de réalisation cependant, ce forage devrait être encore précédé d'une série d'études complémentaires, comme cela a été le cas sur les autres sites.

4.8. Simplon

Les études menées entre 1987 et 1992 ont porté sur le tunnel ferroviaire du Simplon. Les deux galeries d'environ 20 km traversent un massif dont les caractéristiques géologiques et tectoniques sont très variées. Une succession de nappes plissées et fissurées, comportant des noyaux paléozoïques cristallins (gneiss plus ou moins schisteux) et des couvertures mésozoïques sédimentaires (schistes carbonatés, marbres, dolomies, gypses et quartzites), se succèdent tout au long du tracé (CRSFA/92.08).

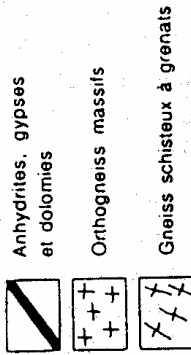
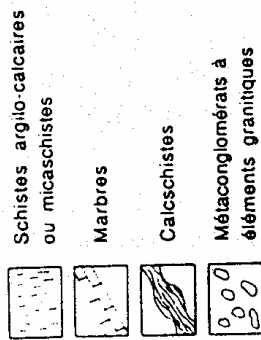
Lors du percement des deux galeries au tout début du 20^e siècle, de nombreuses venues d'eau furent rencontrées avec des températures allant jusqu'à 55°C (en équilibre avec la roche) et des débits considérables (jusqu'à 4200 m³/h à proximité du km 15,4 depuis Brigue). Des essais de traçage ont démontré une liaison avec les eaux de surface (torrent Cairasca). Depuis le creusement jusqu'à aujourd'hui, on constate un refroidissement de la roche de l'ordre de 15-30°C et de l'eau de 10-35°C. Le débit total drainé par les galeries s'est stabilisé à environ 3600 m³/h.

Le cadastre des sources du tunnel, réalisé en 1988, a permis de répertorier plus de 150 émergences qui ont été mesurées et analysées à plusieurs reprises. La température varie entre 8 et 45°C et la minéralisation entre 0,2 et 7,9 g/l. Le débit moyen de chaque émergence est généralement inférieur à 3m³/h, excepté dans un cas où il est supérieur à 600 m³/h. Des mesures de température effectuées dans des micro-forages (10 m) ont montré d'une part que l'air du tunnel se mettait en équilibre avec la roche, et d'autre part que chaque source est en équilibre thermique avec la zone rocheuse qui l'entoure (HAYOZ & ZUBER 1990).

En 1990, quatre forages ont été effectués à partir du tunnel (tableau 2 ; Figure 8). Deux d'entre eux, réalisés respectivement dans les marbres et calcschistes (F1) et dans les gneiss (F3), sont artésiens. Les deux autres se sont révélés secs (F2 et F4), avec toutefois l'apparition ultérieure dans le forage F4 de suintements assez fortement minéralisés. La température mesurée au fond des forages varie entre 42°C et 57°C. Les gradients géothermiques bruts calculés dans ces deux forages "secs" sont supérieurs à 5°C/100 m, ce qui s'explique par le fait qu'on se trouve dans la couronne de roche refroidie par la circulation d'air. La modélisation du refroidissement de la roche par le tunnel, sur une période de 80 ans, a permis d'établir le gradient géothermique corrigé (2,8 - 4,0°C/100 m) et d'estimer à 250 m l'épaisseur de la tranche de roche affectée par ce refroidissement (PAHUD *et al.* 1993).

Des analyses chimiques et isotopiques répétées ont été effectuées sur 14 sources et sur les forages productifs. La grande majorité des eaux, avec une minéralisation comprise entre 0,9

LITHOLOGIE



TECTONIQUE

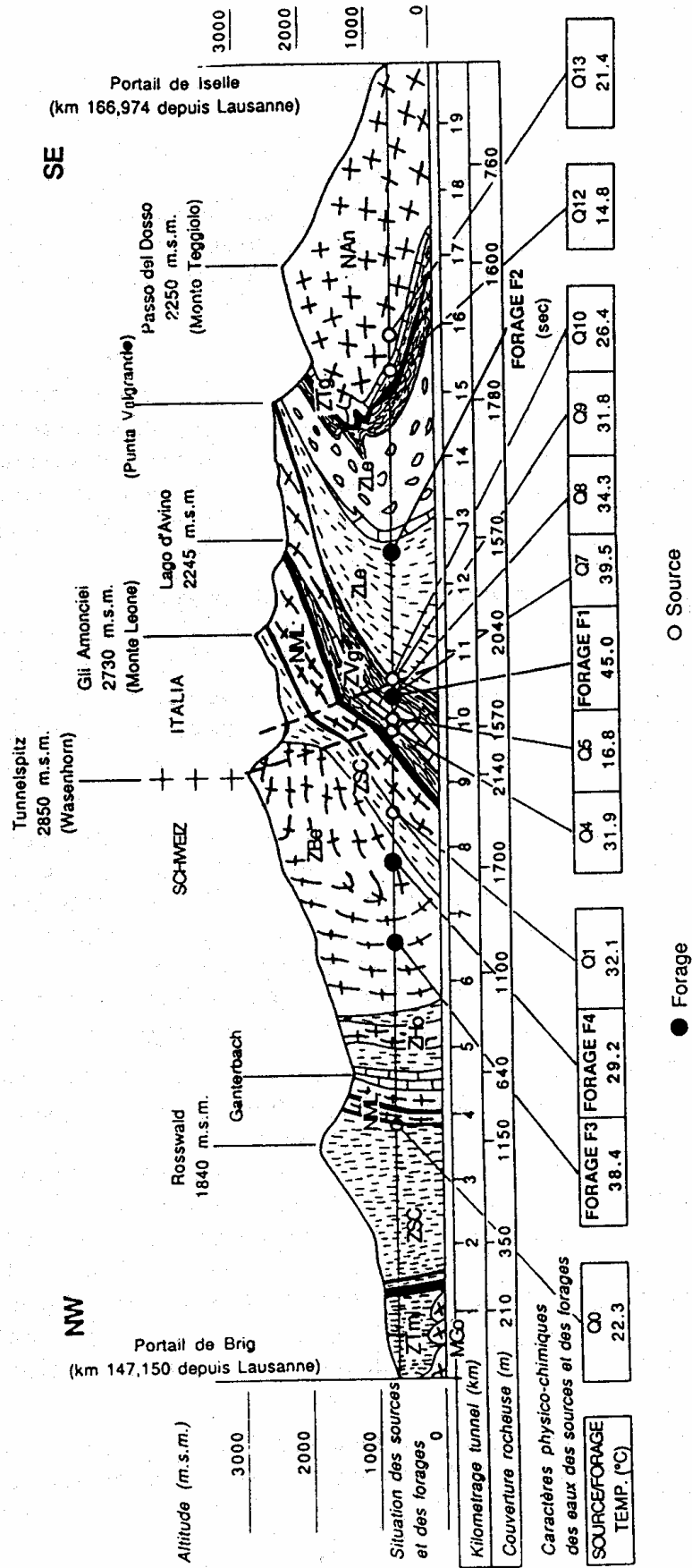
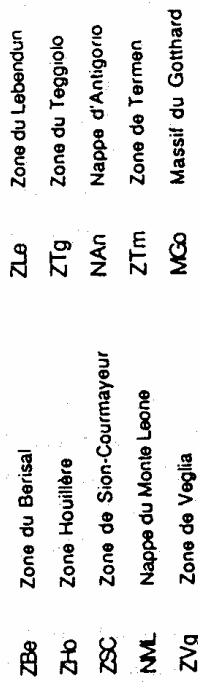


Figure 8 : Coupe géologique du tunnel du simplon et localisation des principales sources et des quatre forages réalisés en 1990 (PAHUD et al. 1993).

et 1,9 g/l, sont de type [Ca ; SO₄], et témoignent d'un écoulement dans des roches carbonatées et évaporitiques. Les eaux chaudes circulant dans les roches cristallines sont de type [Na ; SO₄] avec une minéralisation plus élevée, comprise entre 1,5 et 7,9 g/l, alors que les eaux froides, de type [Ca ; HCO₃], possèdent une minéralisation faible < 0,3 g/l. Toutes les eaux provenant de fissures dans les roches cristallines se caractérisent par des teneurs importantes en éléments alcalins (Na, Li, Rb et Cs) qui les distinguent des autres eaux du tunnel.

Les calculs réalisés à partir des géothermomètres montrent que la température du dernier équilibre chimique eau-roche est du même ordre de grandeur que la température d'émergence. Cela s'accorde bien avec le modèle hydrogéologique des eaux d'infiltration drainées par le tunnel dans leur branche descendante. Par contre, pour la source Q1, située dans les gneiss de la nappe du Monte Leone (km 8,5 depuis Brigue), on obtient des températures d'équilibre chimique en profondeur de l'ordre de 70 ± 10°C, ce qui laisse supposer la présence de venues d'eau thermale ascendantes dans cette zone.

A partir du portail de Brigue on a dénombré six unités hydrogéologiques successives qui montrent des processus thermiques, géologiques et hydrogéologiques distincts (tableau 8). En effet, le débit, la température et le type chimique des eaux du tunnel sont extrêmement variables. Ces variations essentiellement spatiales, mais également temporelles sont induites aussi bien par la perméabilité et la composition des roches aquifères, que par l'épaisseur de recouvrement au-dessus du tunnel et le temps de transit souterrain des eaux.

Unité hydrogéol	Km depuis Brigue	Temp. (°C)	Minéralis. totale (g/l)	Débit total (m ³ /h)	Type chimique	Géologie Pétrographie
1	0 - 3,9	8 - 22	0,4 - 1,6	79 - 94	Ca>Na; SO ₄ >HCO ₃	Zones de Termen et de Sion-Courmayeur <i>Schistes argilo-calcaires</i>
2	3,9 - 9,4	20 - 38	1,5 - 7,9	0,7	Na ; SO ₄	Nappe du Monte Leone et Zone de Berisal <i>Gneiss</i>
3	9,4 - 10,7	15 - 45	1,1 - 1,9	162 - 180	Ca ; SO ₄	Zone de Veglia <i>Schistes calcaires et marbres</i>
4	10,7 - 15,3	—	—	0	—	Zone du Lebendun <i>Micaschistes et méta-conglomérats</i>
5	15,3 - 15,4	9 - 18	0,9 - 1,4	2900-4000	Ca ; SO ₄	Zone du Teggiolo <i>Schistes calcaires et marbres</i>
6	15,4 - 19,8	21 - 28	0,2 - 0,3	1,8	Ca ; HCO ₃ >SO ₄	Nappe d'Antigorio <i>Gneiss</i>

Tableau 8 : Principales caractéristiques des fluides des six unités hydrogéologiques traversées par le tunnel du Simplon (BIANCHETTI et al. 1993)

La géométrie des couches, comme d'ailleurs les résultats isotopiques, corroborent l'idée d'un bassin d'alimentation confiné au Massif du Simplon. Les temps de transit souterrain sont de l'ordre du mois pour les émergences à débit élevé (unité du Teggiolo). Ils sont de l'ordre de 10 à 30 ans pour celles à débit plus faible (unité de Veglia). Par contre, les émergences et forages localisés dans les zones les moins perméables (unité du Bérissal) révèlent des temps de transit souterrain supérieurs à 40 ans, voire beaucoup plus (BIANCHETTI *et al.* 1993).

Une étude techno-économique a porté sur le potentiel thermique disponible directement à partir des canaux d'évacuation nord et sud du tunnel. D'après celle-ci sont disponibles 0,7 MWt au portail de Brigue et 10 MWt au portail d'Iselle. Ce type de ressource à faible température mais avec un débit élevé et régulier se prête très bien au mode d'exploitation par pompe à chaleur (KÄMPFEN 1992).

L'ensemble des méthodes d'investigation appliquées à l'étude du tunnel et du Massif du Simplon a permis de proposer un modèle conceptuel des circulations hydrothermales. Le Massif du Simplon est un "massif chaud", caractérisé par un gradient géothermique élevé (2,8-4,0°C/100 m) en comparaison des autres régions alpines (tableau 3). La quasi-totalité des circulations d'eau est représentée par des infiltrations froides de surface qui se réchauffent au contact avec la roche au fur et à mesure de leur approfondissement. Les eaux circulent à travers des zones fissurées, des joints de stratification et, par endroit, dans des réseaux karstiques. L'interprétation de l'ensemble des résultats permet de conclure à une température de 80°C environ à 1000 m de profondeur sous le tronçon central du tunnel. Si l'on devait effectuer un forage près du portail de Brigue (en périphérie du massif), il faudrait compter avec une température du fluide de 60-75°C pour un ouvrage de 1500 m.

4.9. Oberwald

Le creusement du tunnel de la Furka entre Realp et Oberwald a mis en évidence de très importantes venues d'eau qui s'écoulent par gravité en direction d'Oberwald. L'essentiel du débit provient d'une source chaude sortant au milieu du tunnel (km 8) par des fissures dans le granite de Rotondo (Massif du Gotthard). Lors du percement du tunnel, un débit total de 240 l/s a été mesuré au portail d'Oberwald, alors qu'aujourd'hui, il s'est stabilisé à 90 l/s.

La minéralisation des eaux chaudes et froides est très faible et n'atteint pas 0,2 g/l. Les sources sont de deux types chimiques, [Ca>Na ; SO₄>HCO₃] pour l'eau thermale et [Ca ; HCO₃] pour l'eau froide. Les températures s'échelonnent de 7 à 22°C, alors que les débits de chaque venue d'eau sont extrêmement variables entre 3,6 et 72 m³/h. Le gradient géothermique du Massif du Gotthard à cet endroit est faible (0,8-1,6°C/100 m).

L'étude isotopique montre que l'eau thermale a un temps de transit souterrain supérieur à 30 ans et une altitude moyenne d'infiltration située vers 2100 m, alors que l'eau froide a un temps de transit souterrain plus court (inférieur à 20 ans) et une altitude d'origine plus élevée (2400 m). L'eau collectée par le canal du portail d'Oberwald possède quant à elle des valeurs intermédiaires et résulte du mélange entre ces deux types d'eau (CRSFA/92.25B).

Le potentiel géothermique disponible à la sortie de ce canal atteint 3,6 MWt. En raison du débit très élevé (324 m³/h) et de la température relativement faible (15°C), ce type de ressource convient parfaitement à une utilisation thermique par le biais d'une pompe à

chaleur. La commune d'Oberwald a d'ailleurs installé une conduite d'un kilomètre entre le portail du tunnel et le village, et plusieurs bâtiments collectifs et privés sont chauffés par cette ressource.

5. Synthèse des résultats

Au terme de la Phase I, le programme Géothermoval a réalisé un recensement exhaustif des indices géothermiques du canton du Valais. Les travaux de géophysique (essentiellement la sismique-réflexion) ainsi que les levés de cartes et les coupes géologiques de détail ont souligné l'existence de structures hydrogéologiques profondes favorables aux circulations thermales. Les campagnes de mesure et d'échantillonnage des eaux souterraines au cours de cycles hydrologiques complets, ainsi que les interprétations des caractéristiques hydrochimiques et isotopiques des eaux thermales, ont permis d'une part de mettre en évidence l'origine des fluides et les phénomènes de mélange qu'ils subissent lors de leur remontée, et d'autre part d'estimer la température des aquifères profonds (CRSFA/92.02).

Roches réservoirs et types de circulation

L'ensemble des méthodes d'investigation se sont avérées adaptées aux conditions hydrogéologiques des régions étudiées, en permettant notamment d'évaluer quelles sont les principales formations géologiques qui pourraient jouer le rôle de réservoir géothermique :

- Les dépôts torrentiels sous-glaciaires sis à la base du remplissage quaternaire de la vallée du Rhône (Martigny, Saillon, Sion);
- Les évaporites du Trias (Val d'Iliez, Martigny, Val de Bagnes, Saillon, Sion, Leukerbad);
- Le socle cristallin fissuré des Massifs du Mont-Blanc, des Aiguilles Rouges et de l'Aar (Lavey, St-Maurice, Bovernier, Brigerbad).

Les recherches ont montré que les sites hydrothermaux étaient caractérisés par des circulations relativement locales (à une échelle de 1-10 km). En effet, dans l'état actuel des connaissances, la probabilité de l'existence de liaisons hydrauliques entre plusieurs zones thermales - qui impliqueraient des circulations souterraines régionales (à une échelle > 10 km) - reste faible. Une exception cependant, celle du sillon de la base du remplissage quaternaire de la Vallée du Rhône, qui semble représenter une structure régionale mise en évidence de Sion à Martigny par des profils de sismique-réflexion.

Température, débit, chimie

L'évaluation des températures des eaux thermales en profondeur confirme les valeurs obtenues par VUATAZ (1982), à savoir que le maximum se situe à environ 100°C (Lavey-St-Maurice, Brigerbad), alors que la majorité des circulations profondes connues devraient atteindre des températures de l'ordre de 40°C. Les jaugeages systématiques ont montré des débits élevés dans la plupart des zones thermales, la grande majorité de celles-ci dépassant 50 m³/h. La minéralisation des eaux étudiées est faible et ne dépasse pas 3 g/l pour la

grande majorité d'entre elles. Les mesures isotopiques, notamment de l'activité du tritium, soulignent dans presque tous les cas des phénomènes de mélange des eaux thermominérales profondes anciennes (> 40 ans et probablement beaucoup plus dans certains cas) avec des eaux froides superficielles et récentes (0-10 ans).

Caractéristiques des circulations profondes en milieu alpin

La comparaison des systèmes hydrothermaux étudiés dans le cadre du programme Géothermoval - qui se distinguent par une hydrogéologie de caractère alpin - avec ceux du pied sud du Jura (Yverdon, Lostorf, Schinznach, etc.) montrent que :

- Les températures les plus élevées des eaux thermales à l'émergence sont atteintes en milieu alpin (Lavey, Brigerbad, Leukerbad);
- Les débits des sources et des captages de faible profondeur sont souvent plus importants;
- Les gradients hydrauliques sont élevés et par conséquent induisent des circulations plus rapides : les eaux sont donc généralement plus récentes et peu minéralisées;
- Les écoulements souterrains sont apparemment plus confinés en milieu alpin, en raison du caractère souvent redressé des couches géologiques;
- Les caractéristiques pétrographiques des aquifères en milieu sédimentaire sont comparables puisqu'on retrouve, dans une grande partie des régions alpines, le rôle privilégié des formations évaporitiques du Trias. Par contre, les circulations profondes dans les massifs cristallins fissurés sont typiques de la zone alpine.

L'interprétation globale des données montre que les ressources géothermiques du canton du Valais - à l'exception peut-être du Simplon - sont essentiellement, comme ailleurs en Suisse, de basse enthalpie et destinées au chauffage à distance de bâtiments.

Le Massif chaud du Simplon

En comparaison d'autres massifs de l'arc alpin (tableau 3), le Simplon possède un gradient géothermique de 2,8-4,0°C/100 m qui est anormalement élevé dans le contexte topographique et climatique que connaissent les Alpes depuis des dizaines de millénaires. C'est donc apparemment le seul site où l'on pourrait envisager un jour la production d'électricité à partir d'un gisement géothermique. Pour démontrer effectivement cette faisabilité un programme spécifiquement orienté vers les systèmes géothermiques de type Hot Dry Rock devrait prendre le relais.

Utilisation de la géothermie profonde

Les études technico-économiques réalisées à St-Maurice et Saillon (CREM & ROUX 1992a, 1992b et 1992c), ainsi qu'à Brigue (KÄMPFEN 1992) ont démontré que l'utilisation des ressources géothermiques locales pouvait être envisagée de manière rationnelle dans le cadre du chauffage à distance avec des coûts énergétiques légèrement supérieurs à ceux liés aux énergies traditionnelles (gaz, mazout). Dans le cadre de la Phase II du programme Géothermoval, un dossier scientifique et technique a été préparé en vue de la réalisation de

forages profonds de production. Les travaux de dimensionnement des ouvrages montrent que toutes les cibles retenues peuvent être atteintes par des forages de 600 à 1400 m de profondeur.

Bien que les ressources géothermiques valaisannes ne soient pas en mesure de remplacer totalement les énergies traditionnelles, elles pourront cependant contribuer à diminuer la consommation des agents énergétiques fossiles et à restreindre les rejets dans l'atmosphère des résidus de la combustion d'hydrocarbures.

6. Travaux futurs et conclusions

6.1. La phase II du programme Géothermoval

Le but de cette phase est de reconnaître et d'exploiter, au moyen de trois forages profonds, un certain nombre d'aquifères géothermiques, dans la vallée du Rhône, entre St-Maurice et Brigue. Ces forages devront entre autres permettre de tester les caractéristiques hydrodynamiques et thermiques des aquifères au moyen d'essais de pompage de courte durée. En cas de succès, les aquifères seront mis en production lors d'essais de pompage de longue durée, destinés à quantifier les ressources dans la perspective d'une exploitation du potentiel géothermique.

Le programme de sondages profonds fera appel à des techniques couramment utilisées pour la prospection d'aquifères géothermiques ou pour la reconnaissance de structures géologiques profondes, qui mettent en oeuvre des moyens de forage plus légers et moins coûteux que ceux engagés pour la recherche pétrolière.

La faible minéralisation totale (< 5 g/l) des eaux thermales étudiées devrait permettre d'éviter de réaliser un puits de réinjection. Les eaux de rejet devraient se situer entre 5 et 15°C et seront alors directement déversées dans le réseau des eaux de surface, après l'exploitation optimale du potentiel thermique au moyen d'une pompe à chaleur.

Sur les six sites de forage prévus initialement, seuls trois ont été finalement retenus sur la base de critères aussi bien scientifiques que technico-économiques : la concentration des utilisateurs, ainsi que la politique énergétique des communes directement concernées par ces implantations ont été déterminantes pour le choix final des agglomérations de Saillon, Sion et St-Maurice (CRSFA/91.38, 92.22 et 92.24).

6.2. Conclusions

Depuis 1988, le programme Géothermoval a mené des investigations approfondies sur l'ensemble du territoire valaisan, en mobilisant les méthodes de prospection les plus performantes en matière d'hydrogéologie, d'hydrochimie, de géophysique et de reconnaissance par sondages de moyenne profondeur.

Les résultats ont démontré qu'il y a de fortes chances de trouver des réservoirs aquifères chauds et profonds dont le captage pourrait déboucher sur une utilisation de la chaleur pour

le chauffage à distance de bâtiments. Ces chances sont réelles dans le cas des sites de Saillon, Sion et St-Maurice, pour lesquels a été déposée une demande de financement et de couverture du risque de forage géothermique auprès de l'Office fédéral de l'énergie et du Fonds national pour la recherche énergétique. Ces trois forages sont destinés à atteindre des réservoirs aquifères situés à des profondeurs de 600 à 1200 m, et le premier d'entre eux devrait débiter dès 1994 à Saillon.

Remerciements

Les auteurs adressent leur remerciements aux institutions et organismes qui ont contribué à la réalisation du programme Géothermoval par des subventions ou des prestations gratuites : l'Office fédéral de l'énergie à Berne, le Département de l'énergie de l'Etat du Valais, le Fonds national suisse de la recherche scientifique à Berne, le Service hydrologique et géologique national à Berne, le Programme national de recherche PNR20, le Laboratoire cantonal et le Service des routes nationales de l'Etat du Valais, ainsi que le Centre d'hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel.

Les communes de Bagnes, Brigue, Collonges, Evionnaz, Martigny, Naters, Oberwald, Sion et St-Maurice sont également remerciées pour leur appui.

Finalement, des remerciements sont adressés à M. F. Flury du Bureau M.F.R. S.A. à Delémont pour ses remarques judicieuses sur le manuscrit. Mlle J. Frossard du CRSFA a assuré la dactylographie de cet article.

Bibliographie

1. LITTÉRATURE

- BESSON O., ROUILLER J.-D., FREI W. & MASSON H. 1991 : Campagne de sismique-réflexion dans la Vallée du Rhône (entre Sion et Martigny, Suisse). – *Bull. Murithienne* 109 : 45-63.
- BESSON O., MARCHANT R., PUGIN A. & ROUILLER J.-D. 1993 : Campagne de sismique-réflexion dans la Vallée du Rhône entre Sion et St-Maurice: perspectives d'exploitation géothermique des dépôts torrentiels sous-glaciaires. – *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, ce volume*.
- BIANCHETTI G. en préparation : Circulations profondes dans les Alpes : hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de la Haute vallée du Rhône (Valais, Suisse). – *Thèse de doctorat CRSFA/CHYN*.
- BIANCHETTI G. 1993 : Hydrogéologie et géothermie des venues d'eau du tunnel du Rawyl (Valais, Suisse). – *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, ce volume*.
- BIANCHETTI G., ROTH P., VUATAZ F.-D. & VERGAIN J. 1992 : Deep groundwater circulation in the Alps : relations between water infiltration, induced seismicity and thermal springs. The case of Val d'Illicz, Wallis, Switzerland. – *Ecol. geol. Helv.*, 85/2, 291-305.
- BIANCHETTI G., ZUBER F., VUATAZ F.-D. & ROUILLER J.-D. 1993 : Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel (Wallis, Schweiz und Ossola, Italien). – *Mat. Géol. Suisse, sér. Géotechnique*, 88, 75 p.

- CLARK S.P. JR. & NIBLETT E.R. 1956 : Terrestrial heat flow in the Swiss Alps. – *M.N. Royal Astron. Soc., Geophys. Suppl.*, 7/4, 176-195.
- CREM⁽¹⁾ & ROUX D. 1992 a : Utilisation de la géothermie à St-Maurice. – *Etude technico-économique préliminaire. Rapport inédit CRSFA.*
- CREM & ROUX D. 1992 b : Utilisation de la géothermie à St-Maurice. – *Etude technico-économique complémentaire. Rapport inédit CRSFA.*
- CREM & ROUX D. 1992 c : Utilisation de la géothermie à Saillon. – *Etude technico-économique préliminaire. Rapport inédit CRSFA.*
- DUBOIS J.-D. 1983 : Etude hydrogéologique et géothermique de la région de Saillon (Valais). – *Dipl. Univ. Genève. non publié.*
- DUBOIS J.-D. 1992 : Typologie des aquifères du cristallin : Exemples des Massifs du Mont-Blanc et des Aiguilles Rouges (Suisse, France, Italie). – *Thèse EPFL⁽²⁾ N° 950.*
- DUBOIS J.-D., MAZOR E., JAFFÉ F. & BIANCHETTI G. 1993 : Hydrochimie et géothermie de la région de Saillon (Valais, Suisse). – *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, ce volume.*
- FLÜCK J. 1984 : Etude hydrogéologique et géothermique des sources de Combioula, Val d'Hérens (Valais). – *Dipl. Univ. Genève. non publié.*
- FREI W., LEHNER P. & VALASEK P. 1988 : Nationales Forschungsprogramm 20 (NFP20): Geologische Tiefenstruktur der Schweiz. – *Schweizer Ing. und Arch.*, 47.
- FREI W., HEITZMANN P. & LEHNER P. 1992 : NFP20 Geologische Tiefenstruktur der Schweiz. Ein Bericht der Programmleitung. – *Bull. Ver. schweiz. Petroleum-Geol. u. Ing.*, Vol. 58, Nr. 133, 45-74.
- GEOTERMICA ITALIANA 1989 : Valutazione delle potenzialità geothermiche della zona dell'Ossola (Alpi Occidentali). – *Relazione finale, C.N.R., Pisa. non publié.*
- GUDEFIN H. 1967 : Observations sur les venues d'eau au cours du percement du tunnel du Mont-Blanc. – *Bull. BRGM*, 4 : 96-107.
- HAYOZ P. & ZUBER F. 1990 : Das Simplon Massiv. Hydrogeologische Untersuchungen der unterirdischen thermalen Wasserzirkulationen und ihrer Zusammenhänge mit dem Eisenbahntunnel. – *Dipl. spécialisation hydrogéologie, CHYN/CRSFA. non publié.*
- JAMIER D. 1975 : Etude de la fissuration, de l'hydrogéologie et de la géochimie des eaux profondes des Massifs de l'Arpille et du Mont-Blanc. – *Thèse Univ. Neuchâtel, 153 p. non publié.*
- KÄMPFEN E. 1992 : Nutzung des geothermischen Energiepotentials im Simplontunnel. – *Dipl. in Energie, EPFL-CRSFA. non publié.*
- MANDIA Y. 1991 : Typologie des aquifères évaporitiques du Trias dans le Bassin lémanique du Rhône (Alpes occidentales). – *Thèse EPFL N° 948.*

(1) Centre de recherche énergétique et municipale de Martigny.

(2) Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.

- MARCHANT R. & BESSON O. 1986 : Etude gravimétrique des collines de Chiètres. – *Dipl. Université Lausanne, non publié.*
- MURALT R. 1991 : Die Quellen der Dalaschlucht in Leukerbad (Wallis). Untersuchungen über die Mischung zwischen thermomineralen Tiefenwasser und oberflächennahem Grundwasser. – *Dipl. spécialisation hydrogéologie, CHYN/CRSFA, non publié.*
- MURALT R. & VUATAZ F.-D. 1993 : Emergence d'eau thermale et mélanges avec des eaux souterraines froides dans la gorge de la Dala à Leukerbad (Valais, Suisse). – *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, ce volume.*
- PAHUD D., VUATAZ F.-D. & BIANCHETTI G. 1993 : Refroidissement de la roche dans le tunnel de Simplon. Modélisation par calcul analytique. – *Ing. et Arch. Suisses, 25: 490-498.*
- TACHER L., ROUILLER J.-D. & ZWAHLEN F. 1993 : Marées terrestres dans l'aquifère captif du Massif cristallin des Aiguilles Rouges (région de Lavey-les-Bains, Suisse). – *Bulletin du Centre d'Hydrogéologie, ce volume.*
- VERGAIN J. 1991 : Etude hydrogéologique et géochimique des eaux thermales de Val d'Illiez (Valais, Suisse). – *Dipl. spécialisation hydrogéologie CHYN/CRSFA, non publié.*
- VUATAZ F.-D. 1982 : Hydrogéologie, géochimie et géothermie des eaux thermales de Suisse et des régions alpines limitrophes. – *Matér. Géol. Suisse, sér. Hydrol, 29, 174 p.*
- WEBER R. 1990 : La géothermie en Suisse. Gisements et possibilités d'utilisation. – *Office. Fédéral de l'Energie, 40 p.*

2. RAPPORTS DU CRSFA NON PUBLIÉS

- CRSFA/88.08 1988 : Programme Géothermoval. Termes de références concernant la recherche, l'évaluation et la mise en valeur des ressources géothermiques en Valais.
- CRSFA/89.15 1989 : Programme Géothermoval. Régions Evionnaz-Collonges-St-Maurice. Rapport intermédiaire.
- CRSFA/89.22 1989 : Programm Géothermoval. Region Simplon. Zwischenbericht.
- CRSFA/89.36 1989 : Programm Géothermoval. Region Brigerbad-Visp. Zwischenbericht.
- CRSFA/89.37 1989 : Programm Géothermoval. Region Brig-Naters. Zwischenbericht.
- CRSFA/91.17 1991 : Evaluation de l'impact hydrogéologique du tunnel de base du Lötschberg sur les sources thermales de Leukerbad et Brigerbad, phase I. Rapport pour le Bundesamt für Verkehr/BAV/BLS.
- CRSFA/91.38 1991 : Programme Géothermoval. Requête auprès du NEFF pour la réalisation de forages profonds.
- CRSFA/92.02 1992 : Programme Géothermoval. Rapport final, Synthèse de la Phase I.
- CRSFA/92.03 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°1. Région St-Maurice.
- CRSFA/92.04 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°2. Région Martigny (Bovernier).

VUATAZ & AL. : PROGRAMME GÉOTHERMOVAL

- CRSFA/92.05 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°3. Région Saillon.
- CRSFA/92.06 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°4. Région Sion.
- CRSFA/92.07 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°5. Région Brigerbad-Visp.
- CRSFA/92.08 1992 : Programm Géothermoval. Phase I, Schlussbericht, Heft Nr. 6. Region Simplon (Brig-Naters).
- CRSFA/92.18 (1992): Programme Géothermoval. Phase I. Forage de reconnaissance à Epinassey (St-Maurice).
- CRSFA/92.22 1992 : Programme Géothermoval. Requête pour la couverture du risque de forage géothermique adressée à l'OFEN.
- CRSFA/92.24 1992 : Programme Géothermoval. Requête pour le financement d'un forage géothermique à Saillon. Complément à la requête du NEFF.
- CRSFA/92.25 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°7. Région de Val d'Iliez.
- CRSFA/92.25A 1992 : Programme Géothermoval. Phase I, rapport final, fascicule N°8. Région du Val de Bagnes.
- CRSFA/92.25B 1992 : Programm Géothermoval. Phase I, Schlussbericht, Heft Nr.9. Region Oberwald (Furkatunnel).
- CRSFA/93.13 1993 : Evaluation de l'impact hydrogéologique du tunnel de base du Lötschberg sur les sources thermales de Leukerbad. Etude hydrogéologique de détail des sources thermales de Leukerbad. Rapport AlpTransit. Phase II.