

Zeitschrift: Ingénieurs et architectes suisses
Band: 119 (1993)
Heft: 23

Artikel: Etat actuel de la géothermie profonde en Suisse
Autor: Roux, Dominique / Hauber, Lukas
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-78084>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.11.2024

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Etat actuel de la géothermie profonde en Suisse

Par Dominique Roux,
ingénieur conseil
en matière d'énergie
34, route des Eaux-
Belles
1243 Cara-Presinge
et Lukas Hauber,
géologue cantonal
de Bâle-Ville
Bernoullistrasse 16
4056 Bâle

Le présent article a pour objet de faire le point sur le développement de la géothermie profonde en Suisse. Il présente l'état des connaissances géologiques, ainsi qu'une méthodologie pour le développement de projets et une liste des forages réalisés. Une analyse détaillée des coûts de forage et une présentation des principaux paramètres techniques et financiers de ces forages permettent de mieux comprendre les problèmes rencontrés. Des méthodes actuellement à disposition pour l'évaluation de projets du point de vue techno-économique ainsi qu'une opération de géothermie en cours de réalisation à Riehen (BS) sont décrites.

1. Introduction

La géothermie se manifeste sous forme de vapeur (haute enthalpie) ou sous forme d'eau chaude (basse enthalpie). Dans cet article, on se référera uniquement à la géothermie profonde (> 400 m) à basse température, pour la recherche de ressources d'eau chaude à des températures entre 25 et 90 °C, destinées à l'alimentation en chaleur de systèmes de chauffage collectif, avec ou sans pompe à chaleur. Le lecteur qui souhaite approfondir ses connaissances sur les phénomènes liés à la géothermie, peut se référer à une brochure publiée par l'Office fédéral de l'énergie (OFEN)¹.

2. Bref historique de la géothermie profonde en Suisse

Les émanations de chaleur terrestre qui se manifestent à la surface du sol sous forme de phénomènes géologiques, sont utilisées depuis longtemps. Il s'agit du volcanisme, des geysers et des sources thermales, tels qu'on les trouve en particulier en Italie (Lardarello) et en Islande, pour ne considérer que l'Europe. Quant à la mise en valeur de la géothermie à basse température à l'aide de forages, elle s'est surtout développée en France et en Hongrie. Ainsi, le premier forage à des fins balnéothérapeutiques date de 1878 (Budapest) et à ce jour, plus de 1000 forages ont été réalisés en Hongrie pour des applica-

tions dans les domaines du thermalisme, du chauffage, de l'agriculture et de l'industrie. En France, ce développement a démarré grâce aux résultats de forages pétroliers dans le Bassin Parisien et ce sont actuellement plus de 300 000 personnes qui, dans les alentours de Paris, sont chauffées par la géothermie.

Dans notre pays, la Confédération, par l'entremise de l'OFEN, a créé une commission d'experts pour la mise en valeur de l'énergie géothermique et le stockage souterrain de chaleur (KGS), au milieu des années 70. Dotée à l'époque de modestes moyens, cette commission a commencé par répertorier, dans la mesure de leur accessibilité, les résultats de mesures faites non seulement lors d'études géologiques et géotechniques, mais encore dans une certaine de forages pour la prospection pétrolière privée et la recherche de gaz, de sel ou d'eau thermale exécutés en Suisse. C'est ainsi que put être établie, fin 1981, une première carte géothermique – malheureusement encore très approximative – de la Suisse.

Il fallut toutefois attendre 1987, soit après que la Confédération eut décidé de garantir financièrement la couverture du risque de forage géothermique, pour voir lancer les premiers projets, malgré une connaissance souvent limitée de la géologie. Les raisons de ce retard par rapport à d'autres pays sont dues au fait qu'il n'y a pas, en Suisse, de région à volcanisme récent indiquant la présence de sources de chaleur souterraines et que l'histoire mouvementée de notre sous-sol le rend difficile à cerner du point de vue géologique. Sur le plan institutionnel d'autre part, il n'y a pas d'organisme national qui se consacre spécifiquement à la géologie au sens strict. L'OFEN a pour mission de promouvoir et de coordonner le développement des agents énergétiques, principalement indigènes, et c'est la KGS que l'Office consulte pour la promotion et le suivi des travaux concernant la géothermie en Suisse. Dans la mesure des moyens que lui attribue l'OFEN, le rôle de cette commission d'experts consiste en outre à stimuler les administrations locales et les mi-

lieux universitaires.

En complément, la Société suisse pour la géothermie, née de l'initiative de fondateurs privés en 1990, a pour objectif de faire mieux connaître cette forme d'énergie. Elle vise aussi à en promouvoir l'exploitation en Suisse et édite un bulletin. Comme la prospection géothermique n'est pas, dans notre pays, liée à la recherche en géologie, elle n'existe donc que dans le contexte énergétique. Le «droit à l'erreur» s'en trouve d'autant plus limité, mettant souvent les géologues dans une position délicate.

A titre de comparaison, dans un pays comme la France, la géothermie a pris son essor au moment de la crise pétrolière de 1973. Les projets ont pu se baser sur la connaissance précise d'aquifères profonds particulièrement favorables: soit des niveaux de température élevés et de grands débits, repérés grâce à une recherche pétrolière approfondie effectuée par des sociétés nationales. Parallèlement, une agence pour la maîtrise de l'énergie a été créée avec d'importants moyens de subventionnement à une époque où de nombreuses cités satellites de Paris ont vu le jour.

3. Développement et projets de forages réalisés

3.1 Le sous-sol suisse

L'exploitation de la géothermie est basée sur le fait que les températures augmentent en allant vers le centre de la terre jusqu'à 4000 °C environ. En partant de la surface vers la profondeur, on mesure un gradient de température moyen de 3 °C pour 100 m. Selon les régions, cette moyenne accuse des écarts positifs ou négatifs. Ainsi, des anomalies positives se présentent dans la région de Bâle (fossé rhénan), aux environs de Baden, Zurich et Schinznach, dans la partie saint-galloise de la vallée du Rhin et dans la vallée du Rhône en Valais. A l'opposé, on rencontre des gradients inférieurs à la moyenne sur le versant nord du front des Alpes.

Un forage géothermique recherchera de l'eau, la plus chaude possible, circulant dans des aquifères. Les types d'aquifères varient très fortement selon les couches géologiques. On dis-

¹ Voir bibliographie en fin d'article

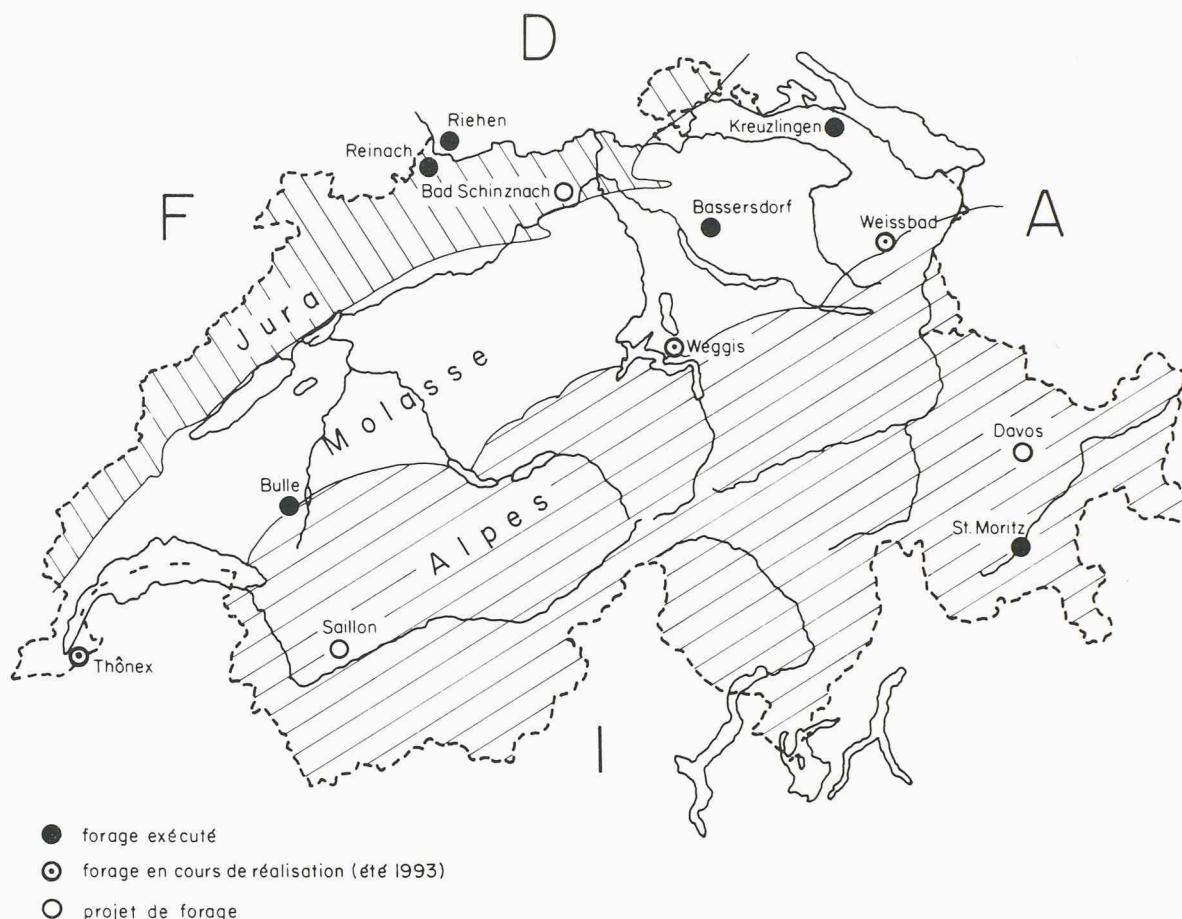


Fig. 1. — Emplacements des forages exécutés, en cours de réalisation ou en projet en Suisse

tingue différents modes de circulation de l'eau dans le sous-sol, selon qu'il s'agit d'un milieu poreux (sable, grès, conglomérats, alluvions), d'un milieu fissuré (roches fissurées, diaclasées, tectonisées, telles que calcaires et dolomites, mais aussi roches cristallines comme le granite, le gneiss) ou encore, d'un milieu fissuré karstique (Jura, domaine helvétique des Alpes). Contrairement au Bassin Parisien, où les conditions géologiques sont assez simples, en Suisse, il est nécessaire de mettre en évidence des aquifères à des profondeurs favorables. Or, cela suppose en règle générale, de procéder à des forages ad hoc (exception faite des informations pouvant être obtenues dans le cadre de travaux entrepris pour des tunnels à grande profondeur, tels que ceux prévus pour Alptransit et le Simplon, par exemple). Quant au risque d'échec inhérent à ce procédé de prospection, il peut être dû à divers facteurs incluant l'erreur de pronostic, une perméabilité insuffisante de la roche, un gradient de température trop faible ou une chimie de l'eau défavorable, entre autres. Il est donc essentiel d'entreprendre toutes les investigations préliminaires possibles depuis la surface avant de décider d'une implantation de forage. La

probabilité de réussite d'un forage géothermique reste cependant comparable à celle d'un forage pétrolier: une réussite pour dix tentatives, voire vingt dans certaines régions du monde.

Finalement, il ne faut pas perdre de vue qu'il n'y a pas de relation entre les caractéristiques géologiques d'un site (débit et température, minéralisation) et l'utilisation de son potentiel géothermique (consommateurs de chaleur). C'est seulement si ces deux aspects ont été jugés favorables qu'un investissement important peut être justifié pour réaliser un forage.

3.2 Les aspects du montage d'une opération géothermique

Une opération de géothermie comprend certaines particularités qu'il importe de mentionner.

Comment aborder un avant-projet d'exploitation géothermique?

Le promoteur doit s'assurer de trois conditions préalables essentielles, à savoir:

- la meilleure connaissance possible des données géologiques et des aquifères cibles,
- l'identification des utilisateurs potentiels de chaleur réellement intéressés,

— la disposition d'un emplacement de forage situé à proximité des utilisateurs et pour lequel une autorisation peut être accordée.

Deux stades d'étude sont nécessaires pour obtenir ces informations: une étude préliminaire esquisse le projet et, dans le cas favorable, une étude d'avant-projet vise alors à le préciser en déterminant ses caractéristiques de base et son dimensionnement. Les aspects techniques et financiers d'une telle entreprise ont fait l'objet d'une publication de l'OFEN. Pour autant que les conclusions de l'avant-projet soient positives, le montage financier doit donc être suffisamment avancé pour engager les dépenses relatives au forage. Comme il s'agit généralement d'utiliser la géothermie à des fins de chauffage collectif, ce montage fera souvent appel à des crédits publics, généralement soumis à des consultations populaires.

Etude préliminaire

Cette étude doit inclure:

- les objectifs géologiques et aquifères visés avec un résumé de la situation géologique,
- la définition des utilisateurs potentiels et de leurs besoins énergétiques,

- l'évaluation du potentiel géothermique, comparée aux besoins définis,
- l'estimation préliminaire de l'ensemble des investissements.

Il est essentiel de fixer, dès le départ, les objectifs de la prospection géologique. Ceux-ci doivent en effet être bien définis car chaque zone productrice potentielle peut avoir un débit différent.

Etude d'avant-projet

Au stade de l'étude d'avant-projet, il faut en particulier effectuer les examens suivants:

- affiner le plus possible l'appréciation de la situation géologique, afin de limiter les risques de forage et pronostiquer au mieux le couple température-débit attendu;
- approfondir les connaissances géologiques pour améliorer les pronostics, si on réalise que les données disponibles sont insuffisantes (par ex. réflexion sismique complémentaire et réinterprétation des données existantes);
- déterminer les caractéristiques techniques du forage à réaliser ainsi que son coût (y compris les mesures géophysiques dans le

Tableau 1

Lieu	Canton	Dates	Type d'aquifère recherché
Riehen 1+2	Bâle-Ville	1987-1989	Aquifères en milieux fissurés karstiques et fracturés (Muschelkalk)
Kreuzlingen	Thurgovie	1988-1989	Aquifère poreux (Mollasse)
Reinach	Bâle-Campagne	1988-1990	Aquifères en milieux fissurés karstiques et fracturés (Muschelkalk)
St.-Moritz	Grisons	1991	Aquifère fissuré (Cristallin)
Bulle	Fribourg	1992	Aquifère poreux (Mollasse)
Bassersdorf	Zurich	1992-1993	Aquifère poreux (Mollasse)

puits, les tests, analyses et essais de stimulation);

- préciser les besoins de chaleur et préparer un concept de chauffage (centrale de chauffe avec pompes à chaleur et chauffage d'appoint pour couvrir la pointe);
- réaliser une étude paramétrique pour évaluer le montant des investissements et le coût spécifique de la chaleur en fonction de différents couples température-débit.

Soutien pouvant être obtenu de la Confédération

Dans la mesure des disponibilités, la Confédération peut accorder une aide

financière en deux volets: une subvention de 25% du coût du forage à titre d'encouragement et une couverture du risque comprise dans une fourchette de 50 à 75% du montant non subventionné. Pour obtenir cette aide, le promoteur doit adresser à l'OFEN, une requête basée sur les résultats de l'étude d'avant-projet. La couverture du risque est assujettie à deux conditions limites de puissance thermique à la sortie du forage: une puissance (déterminée par le débit et la température) définissant le seuil de succès et une autre, inférieure, appelée seuil d'échec. Au-dessous de ce dernier, la couverture du risque est entièrement

Tableau 2. Résumé comparatif des coûts de cinq forages géothermiques

Description	RIEHEN doublet 1547 / 1247 m	REINACH 1 forage 1793 m	KREUZLINGEN 1 forage 655 m	ST-MORITZ 1 forage 1600 m	BULLE 1 forage 800 m
Plate-forme de forage	1 032 226.-	433 997.-	20 493.-	802 370.-	18 000.-
Travaux de forage	3 362 928.-	2 094 722.-	694 933.-	1 424 171.-	501 461.-
Diagraphies (mesures géophysiques)	345 643.-	234 904.-	48 194.-	212 833.-	23 000.-
Essais pompage court	213 552.-	594 939.-	10 237.-	105 061.-	0
Essais pompage long	599 447.-	202 965.-	97 791.-	0	0
Direction travaux	383 419.-	317 690.-			15 000.-
			134 208.-	717 960.-	
Suivi géologique	107 864.-	149 826.-			80 500.-
Coûts accessoires:	139 051.-		6 978.-		32 169.-
Analyses		12 512.-		9 636.-	
Taxes		43 437.-			
Provisions (divers et imprévus)	5 521.-	5 910.-	0	103 414.-	62 192.-
Intérêts bancaires	./.	24 162.-			
Total	6 165 232.-	4 090 902.-	1 012 834.-	3 375 445.-	741 322.-
Dépassements de crédit %	4,5	46,8	10,5	5,5	-5,3

versée, au-dessus du seuil de succès elle est caduque et entre les deux seuils, on parle de succès partiel avec versement d'une partie de la couverture du risque en fonction de la puissance disponible. Tous ces aspects sont décrits en détail dans des directives établies par l'OFEN.

3.3 Forages géothermiques profonds exécutés ou en projet

Le tableau 1 présente un aperçu des forages géothermiques réalisés à ce jour en Suisse. Deux d'entre eux (Riehen et Bassersdorf) sont des succès; celui de Kreuzlingen est un succès partiel et les trois autres sont considérés comme des échecs. Les cinq premiers projets sur cette liste ont fait l'objet d'une analyse du détail des coûts de forage, ainsi que d'une comparaison sur les plans techniques et financiers (voir ci-dessous).

Trois forages seront réalisés en 1993, à Weissbad (AI), Weggis (LU) et Thônex (GE), et trois autres sont actuellement projetés à Davos (GR), Saillon (VS) et Schinznach Bad (AG). La figure 1 illustre l'emplacement de ces divers projets.

4. Coût des forages géothermiques profonds

Les coûts des cinq premiers forages réalisés en Suisse sont détaillés au tableau 2. Pour certains postes, celui-ci fait apparaître des différences très importantes, notamment dues à des dépassements de budget pour des travaux supplémentaires non prévus dans le programme initial. Il faut également noter que les montants relatifs à Riehen se rapportent à deux forages (doublet). Quant à l'ordonnance des différents postes du tableau, elle appelle quelques commentaires.

Plates-formes de forage et installations

Dans le cas de Riehen, il a fallu prendre des dispositions extrêmement sévères pour l'installation de la plate-forme, car elle se trouvait dans une zone de protection des eaux souterraines. A St.-Moritz, la topographie alpine a entraîné l'exécution du forage sur une pente, d'où une augmentation notable du coût. Il s'agit là, en fait, de

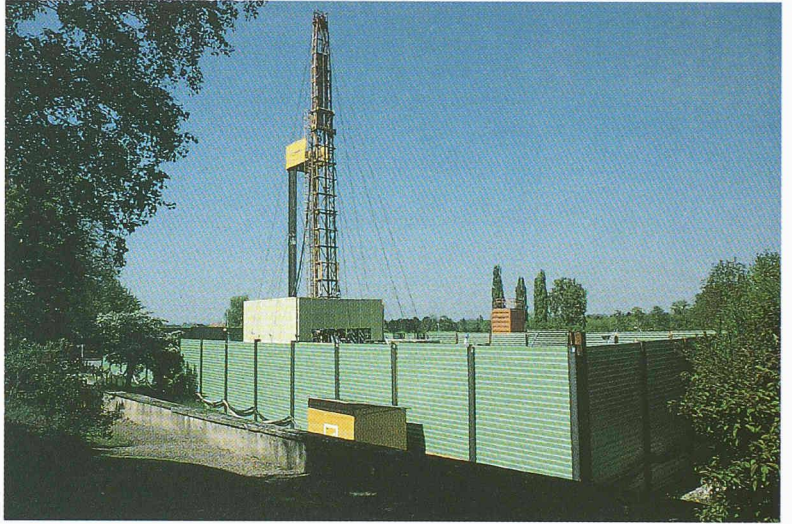


Fig. 2. – Vue du forage de Riehen en cours d'exécution

Projet de Riehen

Riehen est une commune comptant environ 20 000 habitants située au nord de Bâle. Le Conseil municipal a décidé de faire appel à la géothermie pour son approvisionnement énergétique en 1986. Deux forages ont été réalisés dans la période 1987-1989. Le doublet peut produire un débit de 20 l/s, à une température de 62°C. La centrale de chauffe et le réseau de distribution de chaleur sont en cours d'exécution et la mise en service est prévue en hiver 1993-94. La ressource géothermique sera exploitée par deux groupes chaleur-force à gaz, couplés à des pompes à chaleur électriques. Un groupe de chaudières à mazout assurera la pointe de la demande de chaleur.

L'équivalent d'approximativement 5000 habitants (logements et industrie) seront à terme chauffés par la géothermie, procurant une économie d'énergie et d'émissions polluantes dans l'air d'environ 50%.

Le coût de la chaleur produite sera d'environ 20 ct./kWh avec amortissement du forage et des installations de surface disposées dans un tissu urbain très dense. Le coût à la charge de l'utilisateur sera comparable à celui d'une installation traditionnelle, car une partie des frais d'investissement sont couverts par des fonds publics.

l'installation la plus chère dans la liste, bien que des mesures anti-bruit n'aient pas été nécessaires, vu l'absence d'habitations aux alentours (le montage de protections anti-bruit à proximité de quartiers d'habitation est onéreux). Les faibles coûts des plates-formes de Kreuzlingen et de Bulle s'expliquent par la mise en œuvre de petites foreuses n'utilisant que peu de place; de plus, les terrains disponibles étaient favorables et déjà partiellement aménagés.

Travaux de forage

Les coûts des différents forages dépendent de la profondeur de prospection. Cette relation n'est toutefois pas linéaire, car plus la profondeur de la cible est importante, plus le diamètre de l'attaque de forage doit être grand. Les coûts sont aussi fonction de la disponibilité des équipements et les heures d'immobilisation sont plus chères pour de grandes foreuses.

Diagraphies

Les diagraphies (mesures géophysiques) fournissent des renseignements sur l'état du forage à l'avancement. L'on dispose ainsi, d'un contrôle de qualité du travail exécuté. De plus, ces mesures permettent d'affiner les connaissances géologiques et hydrogéologiques, notamment sur l'emplacement des venues d'eau et la disposition des couches géologiques. L'importance de la campagne de mesure est fonction de la nature du sous-sol: plus les conditions sont complexes, plus le programme de mesures doit être élaboré, alors que pour des forages peu profonds dans des couches géologiques régulières, un programme réduit est suffisant.

Essais de pompage

Des différences importantes apparaissent dans les coûts des essais de pompage. Il faut tout d'abord pouvoir déterminer si l'on est en présence

La géothermie

La géothermie provient de la désintégration naturelle d'isotopes de longue durée, qui sont contenus principalement dans les zones continentales. Il s'agit des isotopes suivants:

Uranium²³⁸, Uranium²³⁵, Thorium²³³ et Potassium⁴⁰.

La chaleur encore présente provenant de ces désintégrations est estimée à 12×10^{30} Joule, soit 38×10^{10} TWh (Terawatts-an).

1 km³ de roche chaude peut produire par refroidissement de 100 °C une puissance électrique d'environ 30 MW pendant une période de 30 ans.

L'augmentation de la chaleur (=gradient) en partant de la surface vers la croûte terrestre est en moyenne de 3 °C pour 100 m. Des écarts positifs se rencontrent principalement dans des régions volcaniques et on a observé des températures allant jusqu'à 1000 °C dans des secteurs proches de la surface, à Hawaii notamment. A l'inverse, des écarts négatifs se trouvent dans les continents géologiques âgés, comme par exemple l'Afrique du Sud, où à une profondeur de 3 km on enregistre seulement 60 °C. Enfin, dans des masses sédimentaires épaisses, comme celles du versant nord du front des Alpes, on rencontre aussi des gradients géothermiques inférieurs à la moyenne.

d'un succès ou d'un échec de forage; dès qu'un échec peut être établi, l'essai de pompage sera interrompu. A Bulle, un tel essai n'a même pas été effectué et à St.-Moritz, l'essai de pompage long a été annulé. A l'inverse, en cas d'indices de succès, les essais de longue durée sont mis en œuvre en vue d'obtenir la confirmation de ce succès; il s'agit en l'occurrence d'établir si le débit et la température se maintiennent pendant deux à trois semaines sans augmentation du rabattement. A Riehen, les coûts se sont avérés très élevés, car le rejet dans le réseau d'eau de surface ou dans des canalisations n'était pas possible. On a alors dû installer une conduite provisoire d'environ 1 km entre les deux puits de Riehen 1 et 2, et combiner l'essai de pompage avec celui de réinjection. Dans les coûts des essais, sont aussi compris les essais de stimulation, qui ont pour but d'augmenter la porosité moyenne de l'aquifère cible autour du forage. A Riehen, une acidification a en outre été effectuée pendant l'essai de pompage de courte durée pour augmenter le débit, et à Kreuzlingen elle a été réalisée à l'occasion de l'essai de longue durée. Reinach représente un cas particulier: dans le cadre de l'essai de courte du-

rée on y a procédé à des stimulations (acidification et fracturation hydraulique) et l'essai de longue durée a néanmoins été effectué pour confirmer les résultats négatifs de ce forage. Celui-ci a par ailleurs duré 2 mois, car en raison du faible débit, il a fallu s'assurer que l'on avait entièrement pompé l'aquifère et non les eaux souillées injectées en cours de forage et à l'occasion des tests de stimulation, tous travaux qui expliquent le coût élevé des essais de pompage.

Direction des travaux et suivi géologique

Les coûts liés à ce poste dépendent de l'importance de l'opération, de la durée des travaux et de la complexité de la situation géologique et englobent en outre les activités déployées pour l'obtention des crédits et les relations publiques. Lorsque la géologie est complexe, les coûts sont élevés; il importe alors de faire appel à des ingénieurs ayant une très bonne

connaissance du sous-sol local et à des spécialistes de forages profonds dans le but de réduire ces frais.

Coût total des forages

De manière générale, les budgets ont été bien respectés grâce aux provisions d'usage pour divers et imprévus. Par contre à Reinach, le dépassement a été important, principalement pour les raisons invoquées (protections anti-bruit et complexité des essais de pompage) et par le fait qu'un seul des deux forages prévus a finalement été réalisé.

5. Données techno-économiques des forages

Le tableau 3 présente une comparaison des principales données techniques et financières relatives aux cinq premiers forages réalisés en Suisse. Si leur confrontation se passe en principe de commentaires, quelques remarques peuvent toutefois s'avérer intéressantes.

Tableau 3. Comparaison des données techno-économiques de cinq forages

Rubrique	RIEHEN	REINACH	KREUZLINGEN	ST-MORITZ	BULLE
Type de forage	doublet vertical	forage vertical	forage vertical	forage vertical	forage vertical tubage 500 m
Longueur totale forage (m)	1547/1247	1793	655	1600	800
Coût total forage (Fr.)	6 165 232.-	4 090 902.-	1 012 834.-	3 375 445.-	741 322.-
Coût linéaire forage (Fr./m)	2207.-	2282.-	1546.-	2110.-	927.-
Température fond puits (deg.)	67/54	72	30	50	30
Débit pompé (1/s)	20/14	0,1	3,7	0,3	0,08
Minéralisation totale (g/l)	18,2/14,2	43,6		13,8	
Essais de pompage	essais de production suppl. coûteux	acidification hydrofrac	acidification étude approfondie		
Succès/Echec	succès	échec	succès partiel	échec	échec
Puissance forage (kW)	4760	26	309	47	7
Coût spécifique est. (Fr./kW)	1295.-		3280.-		
Type d'aquifère	fissuré	fissuré	poreux	fissuré	poreux
Conditions du site	zone d'habitation de forte densité	bordure de zone d'habitation	zone d'habitation de forte densité	site en altitude	zone agricole
Année(s) de forage	1987-89	1989-90	1988-89	1991	1992

La géothermie en Suisse

Types d'exploitation à ce jour:

- sources thermales utilisées à des fins balnéothérapeutiques
- applications de chauffage en relation avec des établissements de bains (Lavey-les-Bains et Zurzach)
- nombreuses sondes thermiques à faible profondeur

Etat des connaissances

(informations, données et mesures individuelles provenant de:)

- forages pétroliers
- forages de la CEDRA
- mesures dans des tunnels et galeries (principalement des tunnels ferroviaires comme le Simplon, le tunnel de base du Hauenstein, Grenchenberg, etc.)
- forages géothermiques déjà réalisés

Objectifs:

- collecte systématique de données
- analyse des aménagements d'eau et des systèmes de circulation
- forages cibles dans des régions très propices (en même temps, éviter des forages dans des régions défavorables)
- support de projets géothermiques grâce à des mesures d'incitation financière

Avantages:

- utilisation d'une énergie alternative
- procédé favorable à l'environnement (pas d'émissions polluantes dans l'air et les eaux)
- exploitation ne faisant appel à aucune combustion
- accumulation d'expériences qui seront bienvenues en temps de pénurie d'énergie
- diversification des ressources

Difficultés:

- coûts d'exploitation élevés (forages profonds)
- minéralisation des eaux souvent forte (corrosion)
- pronostics de réussite difficiles à établir
- énergie de base (nécessite souvent un chauffage d'appoint)
- coût élevé du réseau de distribution (systèmes de chauffage collectif)

Critère 1: coût spécifique du forage

Ce critère est le plus simple à appliquer. La condition du succès est évaluée selon un coût spécifique du forage exprimé en fr./kW. Il s'agit donc de diviser le coût de cette prospection par la puissance thermique disponible à la sortie du forage. Pour maintenir l'exploitation de la chaleur escomptée à un prix raisonnable, ce coût spécifique ne doit pas dépasser 2000 fr./kW pour un forage. On utilise les équations suivantes pour effectuer le calcul:

I_{f1} [fr.] = coût total du forage et des tests sans aide financière de la Confédération;

$P_{géo}$ [kW] = $4,18 \times D \times (T_s - T_r)$, où D = débit en l/s et T_s et T_r sont respectivement les températures de sortie du forage et de rejet, après utilisation;

le rapport $I_{f1}/P_{géo}$, en fixant arbitrairement T_r à 10 °C, donne le coût spécifique du forage.

Critère 2: coût spécifique de la chaleur à la sortie du forage

Ce critère a pour objectif de pouvoir comparer ce coût avec celui d'autres agents énergétiques utilisés pour le chauffage ou avec d'autres sources froides pour les pompes à chaleur. Outre les équations appliquées pour le critère 1, il faut aussi définir:

I_{f2} [fr.] = coût des essais de production et de la boucle géothermique primaire;

H = nombre d'heures de fonctionnement par an équivalent à pleine charge (condition standard pour un chauffage collectif: $H = 2200$ h/an, en notant bien que ce chiffre peut être plus que doublé dans certains cas, atteignant $H = 5000$);

A = annuité de l'investissement (pour un amortissement sur 20 ans à un taux d'intérêt de 7%/an: $A = 9,4\%/an$);

B = frais annuels fixes pour l'exploitation et l'entretien (typiquement: $B = 3,0\%/an$);

on peut alors calculer le coût spécifique de la chaleur à la sortie du forage (CS) par l'équation:

$$CS \text{ [fr./MWh]} = (I_{f1} + I_{f2}) \times (A + B) / (P_{géo} \times H).$$

Pour ce critère 2, les valeurs de T_s et T_r sont les températures à l'entrée et à la sortie de la centrale de chauffe. Elles sont en général différentes de celles utilisées pour déterminer le critère 1.

Exemple de Riehen (valeurs tirées du projet)

Critère 1: $I_{f1} = 6\,165\,232$ fr. et $P_{géo} = 4760$ kW

Le rapport $I_{f1}/P_{géo}$ donne donc un coût spécifique du forage de 1295 fr./kW pour un doublet, ce qui est nettement au-dessous de la valeur maximale admise.

Critère 2: $I_{f2} = 3\,702\,900$ fr., $P_{géo} \times H = 16\,000$ MWh/an et $A + B = 0,124/an$. Selon l'équation donnée pour déterminer le coût spécifique de la chaleur

Ainsi, en comparant les coûts linéaires des forages, une distinction se dessine entre, d'une part, les trois forages les plus profonds (soit Riehen, Reinach et St.-Moritz) et, d'autre part, ceux de Kreuzlingen et de Bulle. Cela étant, le coût linéaire pratiquement identique des trois forages les plus profonds relève plutôt d'une coïncidence, vu les disparités importantes des valeurs du tableau 2, les conditions très diverses d'implantation des plates-formes et un écart de quatre ans entre le premier et le troisième de ces forages. A St.-Moritz en particulier, les économies dues à l'absence d'habitations à proximité de la plate-forme et à un minimum d'essais de pompage réalisés sont contre-balançées par les frais supplémentaires liés au travail en altitude et à des coûts de suivi géologique notoirement élevés. Les forages moins profonds de Kreuzlingen et Bulle présentent des coûts linéaires nettement plus faibles, notamment en raison de l'utilisation de foreuses de plus petite taille. Quant à la différence entre 1546.-/m pour Kreuzlingen et 927.-/m pour Bulle, elle s'explique par trois facteurs: des contextes locaux totalement différents (site urbain dans le cas de Kreuzlingen et zone agricole à Bulle), une acidification pratiquée à Kreuzlingen pour stimuler le débit, et un forage tubé seulement jusqu'à 500 m de profondeur à Bulle, du fait qu'il était sec à ce niveau.

Précisons encore que la minéralisation de l'eau du forage de St.-Moritz s'étant avérée trop forte pour être rejetée dans l'environnement, il aurait fallu un doublet si le premier forage avait réussi.

En ce qui concerne le coût spécifique du forage exprimé en fr./kW, on se rapportera au chapitre suivant, qui traite des critères d'évaluation.

6. Coût spécifique de la chaleur d'origine géothermique

6.1 Critères d'évaluation du coût de la géothermie à la sortie du forage

Pour l'évaluation des requêtes en vue d'obtenir une aide financière de la Confédération, l'OFEN a défini deux critères d'évaluation.

géothermique à l'entrée de la centrale de chauffe, on aboutit ainsi à un montant de 7,65 ct/kWh. A titre comparatif, pour du mazout à 400 fr/t, ce même coût spécifique est de 4,0 ct./kWh. En introduisant une subvention de 25% pour l'f1, le coût de la géothermie serait alors ramené à 6,45 ct./kWh. Quant au coût total de la chaleur, y compris l'ensemble des installations auxiliaires (pompes à chaleur, groupes de chaleur-force, chaudière d'appoint et réseau de distribution), il est de l'ordre de 20 ct./kWh dans l'opération de Riehen (34 000 MWh/an produits, dont 45% fournis par la géothermie).

6.2 GEOTHERM: un logiciel d'assistance pour l'avant-projet

Le logiciel *GEOTHERM* a été développé dans le but d'évaluer l'investissement à consentir et le coût spécifique de la chaleur, lors d'une étude d'avant-projet pour le chauffage à distance d'une agglomération à partir de la géothermie. Il permet de calculer ces paramètres en fonction de différents couples température-débit avec une précision suffisante, pour évaluer l'intérêt d'un projet sans avoir à le définir de façon très détaillée à ce stade. Ce logiciel, disponible auprès d'INFOSOLAR, est en fait une feuille de calcul fonctionnant dans un tableur du marché.

GEOTHERM est basé sur un modèle d'équations linéaires, représentant l'investissement pour les différentes composantes des systèmes et les coûts annuels provenant de l'annuité de ces composantes, les frais fixes d'entretien et d'exploitation et les frais variables relatifs au coût des agents énergétiques d'appoint. Le coût spécifique de la chaleur comprend l'ensemble des coûts annuels, divisé par la quantité des besoins annuels de chaleur.

En fixant une puissance nominale par habitant-équivalent, c'est la puissance de la ressource disponible qui va déterminer la taille de l'agglomération que l'on pourra chauffer, et inversement, pour une agglomération donnée, c'est sa taille qui dictera la puissance de la ressource géothermique à trouver pour permettre d'assurer ses besoins en chaleur.

Tous les paramètres d'entrée du logiciel, à l'exception de ceux que l'on veut introduire, ont été déterminés, soit par le calcul, soit à partir d'informations ou encore d'éléments tirés de projets réalisés. Il n'est donc pas nécessaire de les rassembler à nouveau. Il va sans dire que l'utilisateur peut modifier ces valeurs selon les particularités d'un projet, son expérience et, enfin, des conditions économiques prévalentes.

Pour étudier un cas, il faut fixer la puissance de la ressource géothermique via quatre paramètres géothermiques: profondeur de forage, débit, gradient et température de rejet. Il faut aussi fixer les paramètres économiques: le taux d'intérêt et le coût des agents énergétiques.

Le logiciel calcule alors la puissance à la sortie de la centrale, les besoins annuels de chaleur, l'investissement total et le coût spécifique de la chaleur, rendant possible la comparaison avec d'autres agents énergétiques susceptibles de satisfaire la même demande.

7. Conclusions

Les possibilités d'exploitation géothermique profonde en Suisse sont encore mal connues. La nature de notre sous-sol est, en effet, complexe, et une prospection n'a débuté que depuis 1987 sous l'égide de l'Office fédéral de l'énergie. La ressource géothermique n'étant pas considérée comme une priorité en Suisse parmi

les alternatives possibles pour l'approvisionnement du pays, les moyens financiers sont relativement limités et le droit à «l'échec» inhérent à une prospection du sous-sol y est semblait-il plus restreint que dans d'autres pays.

Un projet géothermique doit cependant être abordé avant tout dans l'optique de l'usage de la chaleur éventuellement trouvée: la densité de la demande et les alternatives d'approvisionnement en sont les paramètres principaux.

Il est hautement probable que le sous-sol suisse recèle un potentiel géothermique exploitable même sans pompes à chaleur. Les questions relatives à son ampleur et aux possibilités d'y recourir de manière économiquement viable ou politiquement défendable sont encore en suspens et le resteront vraisemblablement jusque vers l'an 2000.

Pour terminer, les auteurs tiennent à remercier ici l'OFEN, qui a mis à leur disposition l'information nécessaire à la rédaction de cet article.

Bibliographie sommaire

1. Office fédéral de l'énergie: «La géothermie en Suisse, gisements et possibilités d'utilisation», Office fédéral des imprimés du matériel, Berne, 1990
2. Agence française pour la maîtrise de l'énergie: «Guide du maître d'ouvrage en géothermie», Bureau des recherches géologiques et minières, Orléans, 1983
3. VARET, J.: «Géothermie basse énergie, usage direct de la chaleur», Masson éd., 1982
4. HAUBER, L.: «Ergebnisse der Geothermiebohrungen Riehen 1 und 2, sowie Reinach im Südosten des Rheingrabens», *Geol. JB*, Hannover, E 48, 1991, pp. 167-184