Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 101 (1975)

Heft: 22: SIA spécial, no 5, 1975: Chauffage - ventilation - climatisation

Artikel: Utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage des locaux en Suisse: perspectives et problèmes

Autor: Jaffé, Felice / Cuénod, Michel / Vercellini, Roger

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-72587

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 16.07.2025

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

souvent la cause d'une détérioration locale du réseau de distribution.

Parmi les autres facteurs susceptibles d'influencer la corrosion, voire son développement, citons l'état de surface des matériaux en présence (rugosité, inclusions superficielles, etc.).

En résumé, le mécanisme de la corrosion de l'acier galvanisé en présence de cuivre ou de ses alliages est relativement simple. Son évolution dans le temps est plus complexe par suite de l'interférence de nombreux facteurs conduisant, selon les cas, soit à un ralentissement du phénomène, voire même à un bloquage, soit à une détérioration rapide de tout ou partie d'une installation.

3. Moyens de lutte

La lutte contre ce type de corrosion est limitée par des raisons économiques et des raisons de potabilité. En effet, l'eau doit conserver les caractéristiques d'une eau potable, ce qui exclut l'emploi de traitements efficaces (dégazage, désoxygénation, utilisation de certains inhibiteurs). De plus, le coût de l'installation écarte l'emploi de matériaux plus résistants mais chers. Ces restrictions limitent donc les moyens mis à la disposition de l'installateur.

Notre but n'est pas de proposer un remède miracle, qui n'existe pas, mais de donner des conseils afin de diminuer, dans la mesure du possible, les cas de corrosion.

Tout d'abord, *il faut éviter au maximum l'association de métaux différents*. Cela n'est pas toujours possible du fait que la presque totalité des vannes et des robinets sont en laiton ou en bronze, mais leur limitation ainsi que leur substitution partielle par des vannes et robinets construits en d'autres matériaux (acier inoxydable, par exemple) devraient limiter les risques, notamment sur les circuits d'eau froide. Par ailleurs, le problème de la distribution d'eau chaude devrait être « repensé ». L'emploi exclusif de cuivre augmente le prix de l'installation, mais diminue dans une large mesure les dangers de détérioration, donc de remise en état. Une étude de prix de revient tenant compte du matériau, de la pose et des frais d'exploitation serait fort utile en la matière. Une autre réalisation envisageable est celle qui consisterait à n'utiliser que le tube galvanisé et à choisir judicieusement les vannes, robinets et raccords.

Parmi les autres solutions, *la limitation de la température de l'eau en dessous de 60°C* serait souhaitable. Elle éviterait le domaine de changement de polarité du zinc et permettrait une économie.

Les traitements d'eau devraient être faits avec discernement en s'appuyant sur des analyses répétées, et non de façon trop systématique et irrationnelle. Parmi ceux-ci, signalons le traitement aux silicates de sodium, susceptible de prolonger la durée de vie d'un réseau pour autant qu'il soit bien appliqué.

Enfin, *la rationalisation des installations par l'emploi de gaines techniques et la mise en place de témoins permettant de contrôler l'état de la conduite* devraient faciliter la visite et la remise en état à moindre frais.

Adresse de l'auteur :

Michel Colin, chimiste
Département des matériaux
Institut des métaux et des machines
Ecole polytechnique fédérale
Chemin de Bellerive 34
1007 Lausanne

Utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage des locaux en Suisse — Perspectives et problèmes

par FELICE JAFFÉ, MICHEL CUÉNOD et ROGER VERCELLINI, Genève

1. Introduction

La consommation totale d'énergie en Suisse a atteint 190 TWh en 1974.

Le tableau I récapitule la répartition en 1974 des différentes sources d'énergie primaire qui ont été utilisées [16][1].

On peut déduire de ce tableau que le chauffage des locaux et la préparation d'eau chaude sanitaire absorbent environ 45 % de l'énergie consommée en Suisse, et que ce chauffage est presque exclusivement assuré par l'importation de combustible fossile.

Cette énergie de chauffage consommée annuellement correspond à environ 85 TWh, à savoir 73 000 Tcal [2].

En admettant un pouvoir calorifique de 9 Gcal par tonne de fuel, ce chauffage nécessite 8,1 mio de tonnes de fuel. Au prix de 300 fr./t, ce chauffage coûte en combustible environ 2,4 milliards de francs, à savoir environ 400 fr. par habitant et par an.

D'autre part, ce chauffage est une des principales sources de pollution de l'atmosphère de nos villes.

La teneur en soufre du mazout avait été limitée dès le 1er janvier 1974 par le Département fédéral de l'intérieur à 0,3 % en poids pour le fuel léger, et à 1,5 % pour le fuel

TABLEAU I

Répartition de l'utilisation en Suisse des différentes sources d'énergie en 1974 [16]

	En %
Electricité	
— Hydro-électrique	15,2
— Nucléaire	3,2
— Thermique à combustible classique	1,0
Combustibles fossiles	
— Fuel et gaz pour le chauffage [1]	53,2
— Fuel pour le transport	22,7
— Autre (charbon)	3,5
Bois	1,2
Total	100,0

[1] Dont environ 45 % pour le chauffage des bâtiments.

[1] Les chiffres entre crochets se réfèrent à la bibliographie en fin d'article.

[2] Nous rappelons les facteurs de conversions suivant :
Unités d'énergie : 1 Tcal = 10^3Gcal = 10^6 thermies = 10^9kcal = 1162 MWh = 1,162 GWh = 4,1868 TJ ;
Unités de puissance : 1 TW = 10^3GW = 10^6 MW = 860 Tcal/h ;
Unité de flux de chaleur : 1 HFU (Heat flow unit) = 10^{-6} cal/cm^2·s = 41,8 mW/m^2.

lourd. A la suite de la crise du pétrole, ces tolérances ont été supprimées. De nouvelles directives vont être émises.

Les normes qui seront vraisemblablement fixées, et qui correspondent aux teneurs habituelles des huiles de chauffage actuellement distribuées en Suisse, sont les suivantes :

— pour les huiles légères : 0,4 %

— pour les huiles moyennes ou lourdes : 1,75 %

1 kg de soufre se combinant avec l'oxygène correspond à 2 kg d'anhydride sulfureux. Chaque tonne de combustible brut libère donc dans l'atmosphère 6 à 8 kg de SO_2 pour le fuel léger, 30 à 35 kg pour le fuel lourd.

La part très importante de l'énergie nécessaire au chauffage des locaux, assuré aujourd'hui presque exclusivement à partir des combustibles fossiles, et les conséquences défavorables qui en résultent, tant sur notre balance économique que par la dégradation de notre environnement, incitent à rechercher des solutions nouvelles mettant à profit les sources d'énergie non conventionnelles. Parmi celles-ci, figurent en particulier l'énergie solaire et l'énergie géothermique.

Le but de cet article est de définir les possibilités et les limites de cette dernière source d'énergie, en prenant plus particulièrement en considération le cas de la Suisse.

2. Etat actuel de l'utilisation de l'énergie géothermique

Le flux moyen de chaleur terrestre à la surface de la terre est d'environ 60 à 70 mW/m² [15].

Compte tenu d'une surface totale de 41 300 km², cela correspond pour la Suisse à une puissance de 2600 MW, et à une énergie annuelle potentielle de 22,8 TWh, à savoir environ le cinquième de l'énergie thermique consommée dans notre pays pour le chauffage (en admettant que cette énergie soit pratiquement toute utilisée). Cette puissance est donc relativement faible et présente, pour son utilisation, l'inconvénient d'être généralement très diffuse, tant en ce qui concerne sa localisation que sa densité énergétique.

Le gradient thermique du sol terrestre est, dans nos régions, d'environ 1°C par 30 m de profondeur ; entre 1500 et 2000 m de profondeur, on atteint des températures de 70 à 80°C.

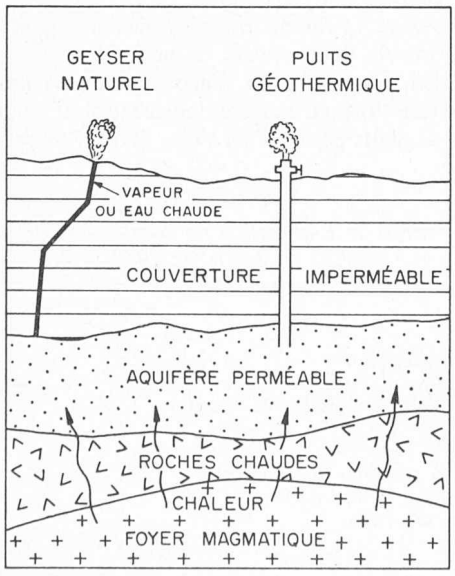

Fig. 1. — Profil d'un gisement géothermique (schématique d'après Teerink) [19].

Dans certaines régions à caractère volcanique, ce gradient thermique peut atteindre des valeurs beaucoup plus élevées, et on peut obtenir des températures de 200 à 300°C, à des profondeurs de 1 à 2 km.

Ainsi que le représente la figure 1, la présence d'un gisement géothermique utilisable pour la production d'énergie implique que les trois conditions géologiques suivantes soient remplies simultanément [6] :

— une chambre magmatique à une profondeur relativement faible (1 à 10 km) ;

— une nappe aquifère dans un réservoir hautement perméable, à une pression artésienne, sinon suffisante pour permettre à l'eau de remonter à quelques centaines de mètres de la surface (pour le cas de gisements d'eau chaude) ;

— une couche imperméable couvrant la nappe aquifère.

Sous ces conditions, on obtient une production naturelle de vapeur et/ou d'eau chaude susceptible d'être captée.

Ces conditions sont remplies dans un nombre relativement restreint de sites, et la figure 2 représente les zones mondiales où l'on constate une activité géothermique importante, zones qui sont souvent celles où se manifeste une activité volcanique et sismique.

TABLEAU II

Récapitulation des puissances électriques installées des centrales géothermiques actuelles ou prévues dans différents pays [8]

	1973 *MW*	*1980* *MW*
Italie	390	405
USA	396	960
Nouvelle-Zélande	192	400
Japon	43	390
Mexique	78	460
URSS	39	144
Islande	20	20
El Salvador	—	30
Taiwan	—	10
Turquie	—	30
Guadeloupe	—	25
Philippines	—	11
Total	1158	2885

Le tableau II récapitule les puissances électriques des centrales géothermiques installées dans différents pays, et celles prévues en 1980 [1, 8, 11, 14].

On voit que la capacité installée de l'ensemble de ces centrales sera multipliée par un facteur 2,5 entre 1973 et 1980. Toutefois, la puissance totale installée à l'échelle mondiale restera faible, puisqu'elle ne représentera que le cinquième seulement de la puissance électrique installée dans le réseau suisse en 1980.

Le tableau III donne les caractéristiques techniques de quelques centrales géothermiques actuellement en exploitation dans le monde [5, 8, 15].

Plusieurs projets d'exploitation de champs géothermiques sont à l'étude dans plusieurs pays, surtout aux Etats-Unis et en Union soviétique [7, 13]. L'un des plus intéressants a pour objet l'exploitation de la vapeur souterraine artificielle (« stimulated »). Il est exécuté à Los Alamos, Nouveau-Mexique, par l'Université de Californie, pour le compte de l'Energy Research and Development Agency (ERDA). Dans ce projet, de l'eau froide est injectée sous pression dans un granite qui se trouve à une profondeur d'environ 2000 m, et à une température de 200°C. Ce granite est ainsi fracturé (« hydraulic fracturation ») et, dans le réservoir artificiel créé, l'eau se transforme en vapeur. Pour exploiter cette vapeur, il suffit d'implanter un deuxième sondage qui intersecte la zone fracturée à une distance

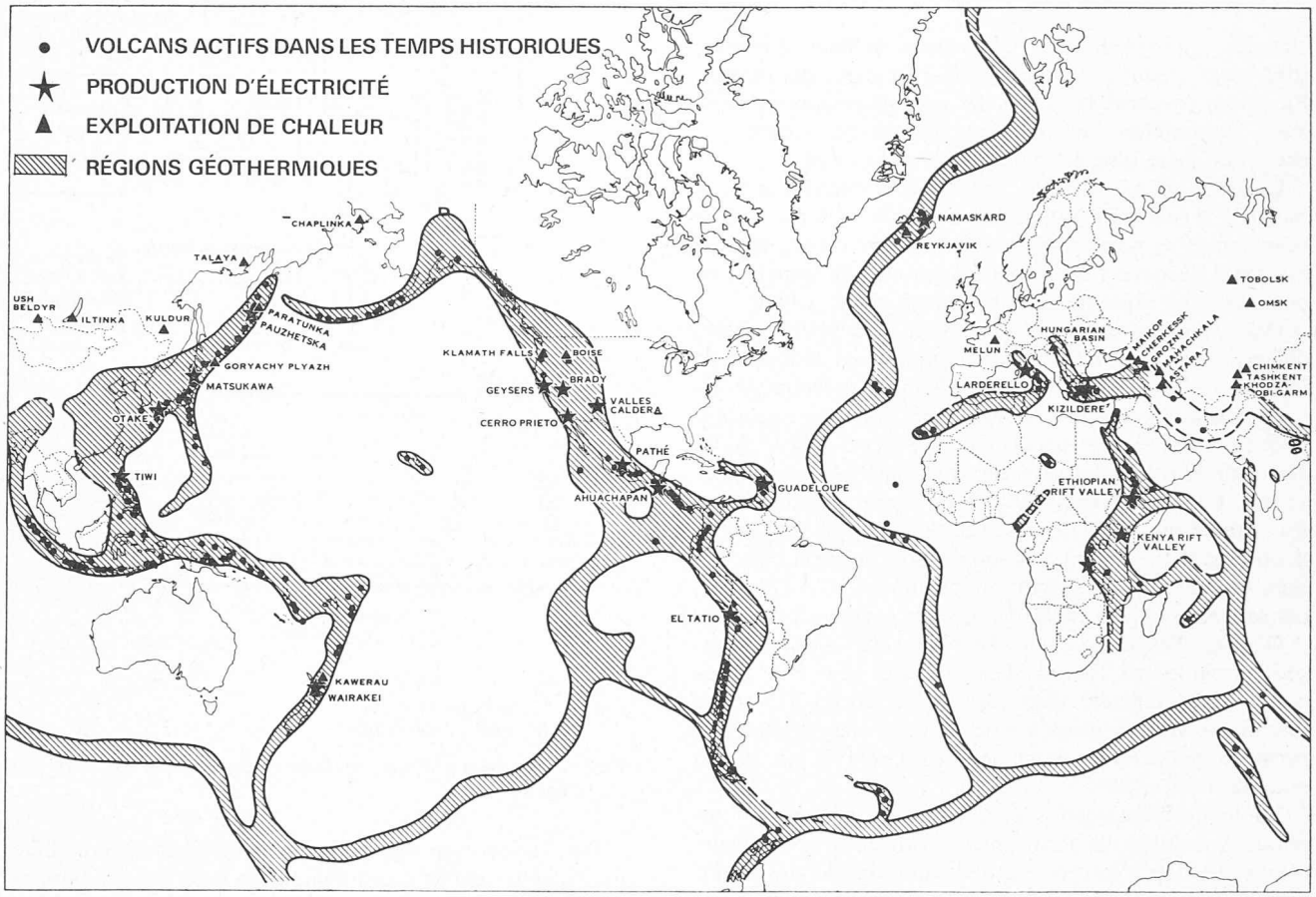

Fig. 2. — Zones mondiales d'activité géothermique [10].

TABLEAU III

Caractéristiques techniques principales de quelques centrales géothermiques en service dans le monde en 1972 [5, 8, 15]

Pays et lieux	Température du réservoir	Profondeur moyenne des puits	Production		Puissance installée		Remarques
			Vapeur	Eau chaude	Capacité brute totale	Puissance électrique	
	°C	m	t/h	t/h	MW	MW	
Larderello (Italie)	245	1000	3500	—	2630	365	Vapeur
Monte Amiata (Italie)	150					26	Haute teneur en gaz naturel
The Geysers (USA)	245	(150) 1000 (2800)	25-160	—	3000	298	Vapeur
Matsukawa (Japon)	230	1100	208	—	130	20	Vapeur
Wairakei (Nouvelle-Zélande)	260	> 500	1000	4000	1620	192	Eau chaude avec jusqu'à 25 % de vapeur
Broadlands (Nouvelle-Zélande)	280	1300	—	1100	350		Idem
Kizildere (Turquie)			—	1200	220		Idem
Cerro Prieto (Mexique)	300 (390)	1500	—	1850	560	75	Idem
Pathé (Mexique)						0,5	Idem
Otake (Japon)	200	500	37	540	240	12	Idem
Namafjall (Islande)	280	900	—	400 *		3	Idem
Pauzhetska (URSS)	200	600	—	60 *		5	Idem
Ahuachapan (El Salvador)	230	1000	—	320 *	250		Idem
					Total	996,5	
Islande	140	800 à 1800		1800	540	Chauffage de locaux, 40 % de la population	
Hongrie	85 à 110	1000		1000	550	Idem	Szeged, 1200 appartements
USA	60 à 100	30 à 300			6	Idem	
Nouvelle-Zélande	150	10 à 300				Idem	
France	75	1800		100		Idem	Melun, 3000 appartements
URSS	45 à 50				130	Idem	
						* Par puits	

préalablement calculée du premier. Apparemment, ce projet est à un stade assez avancé, puisqu'une centrale électrique pilote d'une capacité de 60 MW est prévue pour 1976 [17].

Il est certain que, si de l'énergie géothermique peut être produite de cette façon à des prix compétitifs, l'approvisionnement en énergie de nombreux pays en serait alors profondément changée, car des zones de roches sèches et

chaudes, à une profondeur de quelques milliers de mètres, sont assez fréquentes dans plusieurs parties du monde. En ce qui concerne la Suisse, les renseignements actuellement disponibles dans ce domaine ne permettent pas encore de juger d'un tel mode de mise en valeur.

Les sites se prêtant à la fourniture d'énergie géothermique à basse température (70 à 80°C) sont par contre beaucoup plus nombreux et, dans un certain nombre de cas, on a découvert des nappes d'eau chaude souterraines pouvant être exploitées pour du chauffage urbain.

Des exploitations de ce genre sont déjà réalisées dans différents pays, en particulier en France, en Hongrie, en Islande, en Nouvelle-Zélande et en Union soviétique [3, 4].

En Suisse, la prospection des sources d'énergie géothermique n'a pas encore été entreprise de façon systématique. Des sources thermales dans certains sites, tels que Baden, Lavey, Loèche, Ragaz, Schinznach, prouvent que notre sol contient également des réserves d'eau chaude. Toutefois, là où elles se présentent, ces sources sont utilisées dans des buts curatifs, et non pour du chauffage. D'autre part, ces sources sont éloignées des grandes agglomérations.

D'après l'expérience de l'exploitation d'installations géothermiques en Islande, l'eau chaude peut être transportée sans difficulté dans des tuyaux ayant l'isolation thermique voulue jusqu'à une distance de 50 km, les pertes de température étant de l'ordre de 1°C par 10 km pour de l'eau à 90°C.

Vu les investissements relativement importants qu'implique le captage de l'eau chaude située en profondeur, cette utilisation n'était pas justifiée du point de vue économique avec les coûts de combustibles fossiles, tels qu'ils étaient en vigueur avant la crise de l'énergie. C'est ce qui explique le peu d'intérêt accordé jusqu'à présent à l'exploitation de cette forme d'énergie primaire. La situation se présente aujourd'hui différemment, et il est à prévoir qu'avec l'épuisement progressif des ressources en combustible fossile, l'utilisation systématique de l'énergie géothermique sera toujours plus justifiée.

3. Principe de l'utilisation de l'énergie géothermique pour le chauffage urbain

Pour extraire la chaleur disponible dans le sous-sol, une possibilité est de forer deux puits dans des roches aquifères, puits inclinés dont les extrémités supérieures se trouvent proches l'une de l'autre, et les extrémités inférieures éloignées de quelques centaines de mètres ; on pompe l'eau chaude du premier puits, on en extrait la chaleur par des échangeurs, puis on réinjecte l'eau refroidie dans le deuxième puits.

Ainsi que le montre le schéma donné par la figure 3, le fonctionnement d'une telle installation est, dans les grandes lignes, le suivant :

L'eau extraite du sol à 70°C est envoyée dans un échangeur de chaleur EC1, d'où elle ressort à une température qui peut varier entre 40°C et 60°C selon la quantité de chaleur absorbée par le circuit de chauffage. L'eau du circuit secondaire de cet échangeur est conduite dans une chaudière électrique ou à combustible fossile qui en élève la température de 65°C à 90°C, puis est envoyée dans l'installation de chauffage d'où elle revient à une température d'environ 40°C. Au lieu d'une chaudière, on peut envisager d'utiliser une pompe à chaleur.

L'échangeur de chaleur EC2 est en parallèle avec l'échangeur EC1 ; son circuit secondaire alimente le circuit d'eau chaude sanitaire, muni d'un réservoir d'eau chaude calorifugé.

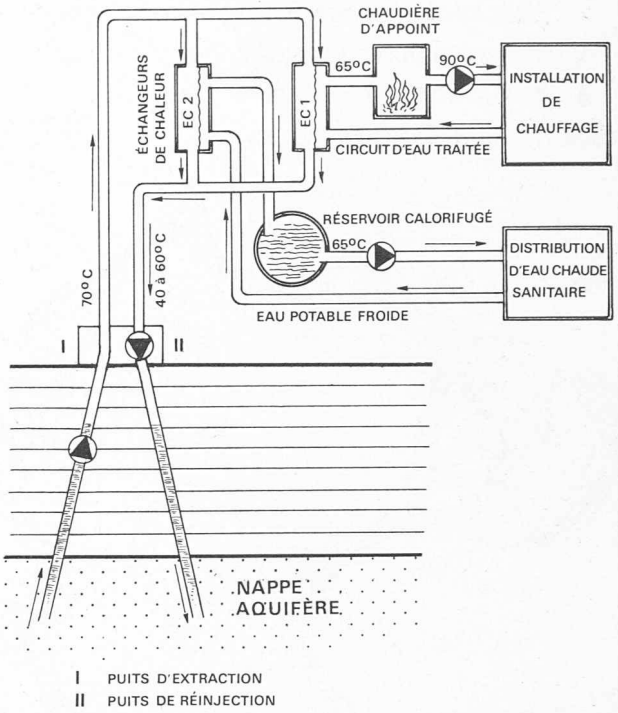

Fig. 3. — Schéma d'une centrale géothermique destinée au chauffage urbain.

Des vannes non représentées sur ce schéma permettent de régler les débits d'eau chaude en fonction des besoins en chaleur.

Le détail des installations de chauffage collectif et de distribution de l'eau chaude sanitaire n'est pas représenté sur ce schéma. Ces installations sont du type usuel.

L'eau extraite du sol est souvent chargée en sels minéraux, tels que chlorure de sodium, et en hydrogène sulfuré. Des précautions sont donc à prendre pour protéger le circuit primaire des échangeurs de chaleur contre la corrosion, les incrustations et les dépôts.

Ce mode d'extraction de la chaleur, utilisé pour du chauffage urbain, pose une série de problèmes dont nous nous proposons de passer en revue successivement les aspects techniques, puis les aspects économiques.

4. Ressources géothermiques en Suisse

4.1 *Connaissances actuelles*

L'étude des ressources géothermiques de Suisse en est à ses débuts, et les renseignements sur ce sujet ne sont pas suffisants pour évaluer le potentiel exact du pays ou, encore moins, pour concentrer des études de détail sur une région spécialement favorable. La figure 4 récapitule les données géothermiques encore fragmentaires qui ont été recueillies en Suisse. Les rares déterminations de flux de chaleur effectuées donnent des résultats relativement hauts, près de 50 % plus élevés que la moyenne mondiale. D'autre part, la température de la roche à 1 km de profondeur, telle qu'elle a été calculée sur la base des renseignements disponibles à la suite de sondages de sociétés pétrolières, est assez encourageante, et n'est que peu inférieure à celle connue dans le bassin Pannonique de Hongrie, dans lequel l'eau chaude est utilisée avec succès pour le chauffage urbain et les cultures vivrières.

Une opinion souvent répandue est que toute manifestation géothermique anormale doit être en liaison avec des phénomènes de volcanisme. Cette association est réalisée très fréquement, mais tel n'est pas le cas en Suisse, pays

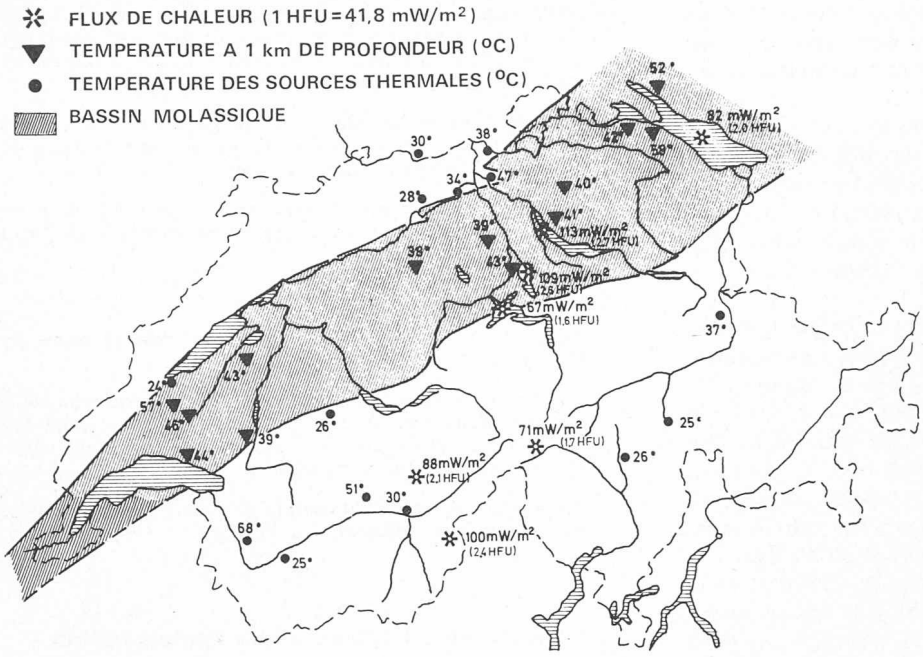

Fig. 4. — Données géothermiques en Suisse [14, 16].

pratiquement dépourvu de toute manifestation volcanique récente (à l'exception d'un minuscule filon volcanique à Ramsen, dans le canton de Schaffhouse).

On connaît aussi des champs géothermiques potentiels et exploités, dans lesquels la chaleur est en liaison avec des zones de plissements donnant naissance aux chaînes de montagne ou zones orogéniques (Pyrénées, bassin Pannonique de Hongrie, Caucase, etc.). La position de la Suisse, au cœur et dans l'avant-pays de l'orogénèse alpine, semble donc expliquer les valeurs de flux de chaleur et de températures assez hautes qui ont été mesurées jusqu'à maintenant.

Dans l'état actuel de nos connaissances, la présence en Suisse de champs géothermiques à vapeur sèche ou à mélange vapeur-eau utilisables pour la production d'énergie électrique est peu probable. Par contre, il n'est pas exclu que des champs géothermiques à eau chaude existent dans le sous-sol de notre pays, comme la présence de nombreuses sources thermales le démontre partiellement.

En tenant compte de cette situation, que des études ultérieures peuvent remettre en cause, on peut envisager, en Suisse, deux grandes lignes de recherche aboutissant à la découverte de champs géothermiques à eau chaude, pouvant vraisemblablement produire des quantités d'eau chaude suffisantes pour des projets de chauffage parfaitement viables :

— *Sources thermales :* Nous ne faisons que les mentionner pour mémoire dans cet article, en nous réservant la possibilité de revenir sur ce sujet à une autre occasion.

— *Aquifères profonds chauds :* Ces aquifères (ou nappes aquifères, c'est-à-dire renfermant de l'eau) ne sont pas rares dans les cuvettes sédimentaires synclinales de nombreux pays, et sont déjà exploités en France et en Hongrie. Il est vraisemblable que l'on puisse en découvrir aussi en Suisse, sans pouvoir cependant prévoir pour le moment l'emplacement des puits de production ni leur capacité optimale.

4.2 *Aquifères profonds chauds*

Comment faut-il étudier des aquifères de ce type ? Rappelons pour mémoire que, dans une première approximation, l'eau et le pétrole sont des fluides assez semblables, ce qui permet d'appliquer aux nappes d'eau profondes les méthodes classiques et bien connues de la prospection pétrolière. A l'avenir, une collaboration avec les sociétés pétrolières semble donc désirable.

Les sondages de prospection pétrolière traversent les aquifères profonds, qui sont localisés exactement, mais sans autres études de détail.

En effet, la présence d'un aquifère profond n'est généralement d'aucun intérêt dans la prospection pétrolière, et son étude ralentit l'avancement d'un sondage, ce qui se traduit par une augmentation du prix total [1]. Pour étudier une nappe fluide dans le sous-sol, constituée soit d'eau soit de pétrole, il faut arrêter le forage et procéder à des tests assez longs de débit, pression, température, à des analyses chimiques, etc.

Cependant, la raison principale du manque d'intérêt des sociétés pétrolières pour les aquifères profonds venait, dans le passé, du fait que ceux-ci n'avaient aucune valeur économique, et restaient une « curiosité » de la nature, ou même une nuisance, car ils augmentaient les difficultés techniques de forage. Si, par contre, l'eau chaude est ou peut devenir facilement une matière première d'importance calorifique réelle, il sera plus facile de financer son étude au cours d'un sondage pétrolier. Il est possible qu'à l'avenir les sociétés pétrolières désirent entreprendre des études de ce type à leur compte Si tel n'était pas le cas, l'Etat ou les collectivités locales pourraient subventionner les périodes de « stand-by » du forage en échange de certains droits sur l'eau chaude ainsi découverte et exploitée par la suite. Des accords de ce type seront certainement de plus en plus employés à l'avenir [2].

Naturellement, les sondages pétroliers ne sont pas toujours implantés à l'endroit où une installation géothermique devrait se trouver. Cependant, ils sont d'une très grande utilité, car ils donnent à un prix très bas des renseignements précieux sur la nature et la position d'un aquifère souterrain pratiquement toujours inconnu. Il faut ensuite laisser aux géologues le soin et la responsa-

[1] Un sondage pétrolier d'une profondeur de 1000 à 3000 m coûte en moyenne Fr. 700.— au mètre. On peut prévoir que, d'ici à 1980, trois à cinq nouveaux sondages pétroliers au minimum seront menés à terme en Suisse.

[2] Mentionnons en passant que, dans de nombreux pays, le problème de la propriété légale de la vapeur ou de l'eau chaude souterraine a été à l'origine de nombreux conflits, et a nécessité la mise en œuvre d'une législation complémentaire à celle en vigueur ou même l'adoption d'une législation entièrement nouvelle (19).

bilité de délimiter l'étendue de la nappe découverte et de prévoir si un forage de production d'eau chaude à une distance déterminée d'un forage de reconnaissance a des chances réelles de succès.

L'exploitation d'un aquifère profond ne pose pas de problèmes techniques particulièrement difficiles. La pression à laquelle l'eau se trouve en profondeur varie de cas en cas, de sorte qu'on ne peut pas prévoir si l'eau doit être pompée à la surface ou si, par contre, elle sortira librement sous pression artésienne, ce deuxième cas étant d'ailleurs assez rare.

La réinjection de l'eau utilisée dans la nappe profonde dont elle est extraite, au moyen d'un puits foré spécialement dans ce but et équipé d'une pompe de refoulement, est de plus en plus courante. Naturellement, l'Etat veille à éviter que le réseau des eaux superficielles puisse être pollué par des quantités parfois importantes d'eau chaude, presque toujours chargée de sels minéraux nuisibles à l'agriculture et à l'équilibre délicat des écosystèmes. D'autre part, le volume d'un aquifère exploité n'est pas infini ; il est donc préférable de recharger celui-ci et de le garder ainsi à pression constante. Il faut quand même mentionner que la recharge d'eau n'est pas pratiquée dans les champs géothermiques importants de Larderello (Italie) et Wairakei (Nouvelle-Zélande), et qu'aucun dommage irréversible de l'environnement n'a encore été signalé en surface dans ces régions.

Une question qui est souvent posée dans ce contexte est celle de la durée d'exploitation d'un champ géothermique souterrain à une température constante, ou, en d'autres termes, de la durée possible de son exploitation. Dans des cas relativement simples, dans lesquels un seul puits de production est couplé à un seul puits de réinjection, on peut déterminer cette durée à l'aide d'abaques établies pour un champ géothermique donné dont on connaît la capacité calorifique de la roche du réservoir et des épontes, ainsi que la conductivité thermique de ces dernières. Dans le cas de réservoirs plus complexes, avec un nombre de puits supérieur à deux, on peut utiliser des modèles numériques de simulation [2].

Enfin, l'expérience accumulée dans des champs géothermiques, exploités parfois depuis des dizaines d'années, indique que la chute de la température de la vapeur et/ou de l'eau chaude due à l'exploitation du réservoir est négligeable, de l'ordre de quelques degrés centigrades. On admet généralement qu'un champ géothermique, d'une importance moyenne, bien exploité, possède une durée d'un à plusieurs siècles.

4.3 *Programme de recherche*

La mise en valeur de l'énergie géothermique en Suisse nécessite de nombreuses études géologiques, géothermiques et géophysiques, techniques et économiques ; ces études sont à coordonner avec les interprétations de sondages de l'industrie pétrolière et devraient porter en particulier sur les points suivants :

1) *Prospection*

— mesures du gradient géothermique dans les forages profonds, et établissement d'une carte du pays avec la courbe géoisotherme à un kilomètre de profondeur, telle qu'elle existe déjà en Europe de l'Est [18]. Cette carte doit être préparée avec la collaboration des pays limitrophes de la Suisse, les données de subsurface ne s'arrêtant pas aux frontières nationales,

— mesures de flux de chaleur dans les sondages disponibles, les galeries et les lacs,

— établissement de profils géophysiques par les méthodes vibrosismiques, géoélectriques et magnétotelluriques, ainsi que leur interprétation pour la mise en évidence d'éventuelles anomalies géothermiques,

— mesures de microsismicité, et établissement de cartes à zones de forte microsismicité, zones qui vont souvent de pair avec des zones d'anomalies géothermiques,

— forages de reconnaissance, avec mesures de débit, de pression, de température, de composition chimique de l'eau souterraine, etc.

2) *Evaluation*

— calcul du réservoir géothermique souterrain et essais de production dans une usine pilote,

— examen des différents moyens pour amener l'eau chaude à la température voulue et pour la distribution de cette eau aux usagers : chaudière avec combustible fossile ou chaudière électrique, pompe à chaleur,

— étude économique de l'utilisation de l'énergie géothermique, par rapport aux autres sources d'énergie.

5. Exemple de chauffage d'une agglomération

5.1 *Bilan énergétique*

Nous avons admis comme base d'étude préliminaire qu'une agglomération d'environ 5000 habitants était chauffée à partir d'une installation géothermique constituée de deux puits d'un diamère de 20 cm, permettant d'obtenir un débit de 100 m^3/h. Nous avons admis, d'autre part, que l'eau à la tête du puits avait une température de 70°C, et était réinjectée à une température minimale de 40°C. Ces données sont voisines de celles de la centrale géothermique de chauffage en exploitation à Melun depuis 1969 [9, 12], et dont les caractéristiques sont données par le tableau IV.

L'agglomération prise comme exemple est constituée par un mélange d'anciens et de nouveaux immeubles, avec des villas et des blocs locatifs, totalisant 1 600 logements et un volume construit d'environ 500 000 m^3.

Pour les conditions climatiques correspondant à celles du canton de Genève, la puissance calorifique globale P pour le chauffage s'élève, dans le cas particulier de cette agglomération, à 11,3 Gcal/h, à savoir 13 MW ou 8,2 kW par logement.

La quantité Q annuelle de chaleur nécessaire au chauffage des locaux se calcule au moyen de l'expression suivante :

$$Q = \frac{24(\mathrm{h})\ G_t\ (^\circ\mathrm{C}\cdot j)\cdot y\cdot P\,(\mathrm{Gcal/h})}{20-t_e\ (^\circ\mathrm{C})} \quad (\mathrm{Gcal/an})$$

t_e = température extérieure

G_t et « y » dépendent des conditions climatiques locales et du mode d'exploitation du chauffage.

Dans le cas particulier de Genève :

G_t = 3 270 (°C·j) et $y = 0{,}6$; il en résulte que

Q = 18 200 Gcal/an,

Il faut encore ajouter la chaleur nécessaire à la préparation d'eau chaude, qui peut être estimée en moyenne à 0,8 Gcal/an par habitant, répartie également tout au long de l'année, ce qui conduit à une puissance calorifique pour 5 000 habitants, de 4 000 Gcal/an, environ, soit une moyenne sur l'année de 0,47 Gcal/h.

La chaleur brute Q_f susceptible d'être retirée tout au long de l'année du forage, pour un débit de 100 m^3/h et une

TABLEAU IV

Caractéristiques de la centrale géothermique de chauffage urbain de la ville de Melun (France) [9, 12)

Profondeur des puits	1800 m
Ecartement des puits à leur base	900 m
Débit d'eau chaude par forage (sous pression artésienne)	100 m³/h
Température de l'eau :	
— Extraction	70°C
— Réinjection	30 à 60°C
Puissance calorifique maximale extraite	4 Gcal/h
Chaudière additionnelle alimentée au mazout, élevant la température de	60 à 90°C
Puissance calorifique totale nécessaire	34 Gcal/h
Nombre d'appartements chauffés	3000
Caractéristiques de la pompe de refoulement pour un débit de 60 à 100 m³/h	10 à 15 kg/cm²
Proportion de l'énergie calorifique fournie par l'installation géothermique	2/5
Capacité du réservoir calorifique pour la distribution d'eau chaude sanitaire	250 m³

TABLEAU V

Estimation des investissements supplémentaires nécessités par la réalisation d'un aménagement géothermique de chauffage urbain

	Mio de fr.
Réalisation et aménagement de 2 puits de 1800 m de profondeur [1]	3
Pompes, échangeurs de chaleur, tuyauterie et équipement divers	2
Achats de terrains, frais de concession, frais financiers et frais d'étude	1
Total	6

[1] Sans compter les frais de prospection et de développement.

température de l'eau de 70°C à l'extraction et 40°C à la réinjection, est la suivante :

$$Q_f = 100\ \text{m}^3/\text{h}\ (70-40)°\text{C}\ 1000\ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 1\ \frac{\text{kcal}}{\text{kg°C}} \cong 3\ \text{Gcal/h}.$$

La température moyenne du mois de janvier à Genève (mois le plus froid) est d'environ 0°C, ce qui correspond à une puissance calorifique moyenne de 8 Gcal/h pendant ce mois.

La figure 5 montre la variation annuelle de la puissance calorifique moyenne mensuelle nécessaire au chauffage des locaux et à la préparation d'eau chaude sanitaire. Sur cette figure, la surface finement hachurée représente l'énergie calorifique utile extraite du réservoir géothermique au cours de l'année pour les besoins de l'agglomération en admettant un rendement global de 0,9. Durant l'été, l'énergie géothermique à disposition dépasse la consommation de l'agglomération et n'est donc utilisée que partiellement ; l'eau restituée à l'aquifère par le puits de réinjection le sera donc à une température supérieure à 40°C. En revanche, durant l'hiver, l'énergie géothermique disponible est insuffisante pour couvrir les besoins en chaleur et une source d'appoint est nécessaire, sous la forme d'une chaudière électrique ou à combustible fossile, ou encore d'une pompe à chaleur. La puissance de cette source d'appoint, dans le cas particulier examiné, doit être capable de fournir la pointe de 11,3 Gcal/h et doit donc être de l'ordre de 11,3 − 2,7 = 8,6 Gcal, soit environ le triple de la puissance calorifique extraite du sous-sol.

Les deux surfaces différemment hachurées de la figure 5 représentent l'énergie fournie annuellement par le réservoir

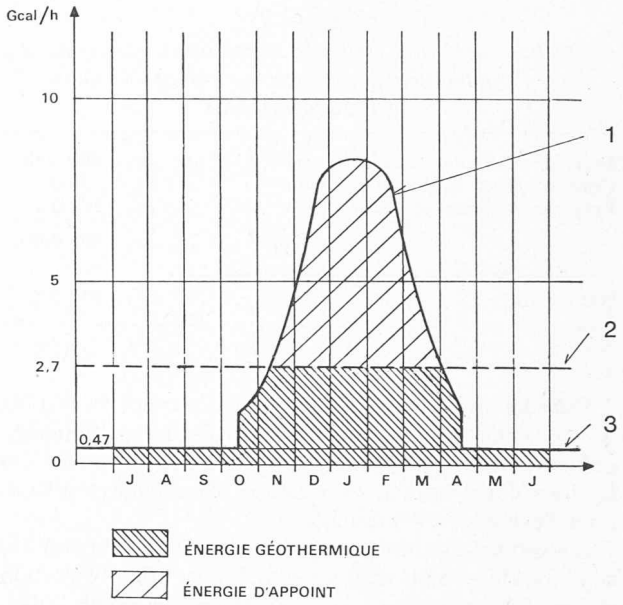

Fig. 5. — Répartition annuelle des puissances calorifiques nécessaires aux besoins d'une agglomération d'environ 5000 habitants.

1 Puissance calorifique totale nécessaire à l'agglomération
2 Puissance géothermique utile disponible
3 Puissance nécessaire à la préparation d'eau chaude sanitaire

géothermique et respectivement par la source de chaleur d'appoint. Leur comparaison montre que l'énergie géothermique permet de couvrir approximativement 50 % de la consommation annuelle totale de l'agglomération.

En admettant un rendement thermique global de :

— 0,9 pour le système de chauffage géothermique,

— 0,65 pendant les six mois d'hiver et 0,5 pendant les six mois d'été (production d'eau chaude sanitaire) pour le système de chauffage conventionnel utilisant le fuel, et en tenant compte d'un pouvoir calorifique du fuel de 9 Gcal/t, il résulte que l'utilisation de l'énergie géothermique que l'on peut tirer d'un puits tel que décrit ci-dessus permet d'économiser annuellement les quantités approximatives de fuel suivantes :

	t de fuel
— pendant les 6 mois d'hiver :	
$3\ (\text{Gcal/h}) \times 4380\ (\text{h}) \times \frac{0{,}9}{0{,}65} \times \frac{1}{9\ \text{Gcal/t}} =$	2070
— pendant les 6 mois d'été :	
$0{,}47\ (\text{Gcal/h}) \times 4380\ (\text{h}) \times \frac{0{,}9}{0{,}5} \times \frac{1}{9\ \text{Gcal/t}} =$	410
Total du fuel économisé :	2480 t
	arrondi à 2500 t

5.2 *Aspect économique*

Une centrale géothermique de quartier nécessite en premier lieu la même infrastructure qu'une installation traditionnelle de chauffage urbain centralisé et présuppose l'existence de cette infrastructure ; une chaudière est également nécessaire pour couvrir les pointes, et la capacité de cette chaudière est pratiquement la même qu'en l'absence d'une centrale géothermique.

Le tableau V récapitule une première estimation des investissements supplémentaires que la réalisation d'une centrale géothermique implique, et le tableau VI donne une estimation des frais annuels d'exploitation et des économies possibles du fuel. En admettant un prix du fuel de 300 fr/t et 2500 t de fuel économisé, on obtient une économie annuelle d'environ 2500 × 300 = 750 000 fr.

TABLEAU VI

Estimation des frais annuels supplémentaires nécessités par l'exploitation d'un aménagement géothermique de chauffage urbain

Frais de capital et d'amortissement (15 %)	Fr.	900 000.—
Consommation d'énergie électrique	Fr.	50 000.—
Frais de personnel et d'entretien	Fr.	100 000.—
Total . . .	Fr.	1 050 000.—
Economie de combustible (au coût actuel de 300 fr/t fuel)	Fr.	750 000.—

Dans les investissements, ne sont pas compris les frais de recherche, de développement et de réalisation des sondages qu'une première réalisation comporte inévitablement, ni les frais d'une installation classique de chauffage urbain, dont l'existence est présupposée.

Ces estimations montrent qu'au stade actuel du coût du combustible, et sans tenir compte des frais de prospection et de développement, les économies de combustible, qu'une installation géothermique pour le chauffage urbain permettrait de réaliser, pourraient couvrir près de ¾ des charges annuelles supplémentaires. Toutefois, il est prématuré de tirer des conclusions définitives à ce sujet, avant qu'un certain nombre d'investigations et de travaux de développement, tels que définis au paragraphe 4.3, ne soient entrepris.

Ce bilan a été établi en admettant que la qualité de l'eau extraite du réservoir géothermique nécessiterait deux circuits séparés avec échangeur de chaleur ; si, comme cela est le cas en Islande, cette eau peut être envoyée directement dans les circuits de chauffage, il en résulte une importante économie.

D'autre part, il n'est pas exclu que le coût du combustible, qui a doublé en deux ans, continue à augmenter à plus ou moins longue échéance. L'énergie géothermique pourrait alors devenir économiquement plus intéressante. Il faut en outre mettre en balance les autres avantages indirects de cette utilisation non polluante, et entièrement autonome en ce qui concerne la source de son ravitaillement.

Avant les hausses de combustible intervenues ces deux dernières années, il est certain que l'utilisation de l'énergie géothermique pour du chauffage urbain n'était pas rentable, ce qui explique les faibles efforts de développement effectués dans ce domaine. Ce n'est que dans le cas où l'eau chaude jaillissait du sous-sol, ou affleurait le sol en quantité suffisante que dans certains cas, comme en Islande, aux USA, en Hongrie, elle a été mise à profit dans ce but. La hausse du combustible intervenue depuis lors présente le problème sous un jour nouveau, bien qu'il ne soit pas encore possible, en l'état actuel des connaissances, de conclure de l'intérêt économique de cette nouvelle source d'énergie primaire.

Avec les hypothèses prudentes à la base de l'exemple présenté dans cet article, la chaleur qu'on peut retirer d'un puits permet de couvrir environ 50 % des besoins de chaleur d'un quartier de 5000 habitants. En admettant que d'ici 1990, 20 puits géothermiques soient installés et mis en exploitation en Suisse, ils permettraient de couvrir les besoins en chaleur équivalents à 50 000 personnes, à savoir environ le 1 % de la population suisse, ce qui correspond à environ 0,5 % des besoins énergétiques du pays.

Cet apport est relativement modeste mais ne doit pas être négligé. Il deviendra sans doute plus important avec les perfectionnements en cours de la technologie géothermique encore peu développée.

Cet article se limite à l'étude de l'utilisation de l'énergie géothermique à faible enthalpie pour le chauffage urbain. Cependant il y a lieu de rappeler que ce type d'énergie trouve déjà de nombreuses autres applications importantes ayant prouvé leur intérêt économique. Parmi celles-ci on peut mentionner les suivantes : production d'électricité, traitements médicaux dans stations de cure, cultures vivrières en serre, chauffage des sols en hiver (routes, aéroports, etc.), conditionnement d'air, production de sel gemme et d'autres sels pour l'industrie chimique, production d'eau potable, production d'eau lourde, industrie du bois et du papier, industries alimentaires, etc.

6. Conclusion

L'épuisement, dans un avenir prévisible, des ressources en combustibles fossiles et les inconvénients actuels de l'utilisation massive de ces combustibles, tant sur notre environnement que sur notre économie, rendent nécessaire la recherche de solutions de remplacement. L'utilisation de l'énergie géothermique est l'une d'entre elles, dont les possibilités et les limites doivent être appréciées dans leur juste perspective. Elle constitue une source d'énergie pratiquement inépuisable, utilisable sur place et sans répercussion défavorable sur l'environnement, à condition que son exploitation soit gérée avec attention.

La mise en valeur de cette source d'énergie primaire pour du chauffage urbain présuppose l'existence d'un système centralisé de chauffage de quartier et implique des travaux de recherche et de développement définis dans les chapitres précédents, tant sur le plan géologique que technologique et économique.

Pour mener à bien ces travaux, il est souhaitable qu'une collaboration étroite s'instaure en Suisse entre les pouvoirs publics, Ecoles polytechniques, Universités, géologues, bureaux d'étude, sociétés pétrolières, entreprises de sondages et fournisseurs d'équipements spécialisés. Le problème se pose non seulement en Suisse, mais dans de nombreux pays, et l'expérience et le know-how acquis par des développements en Suisse sont susceptibles d'être mis à profit ailleurs. Les domaines de la géologie et de la production de l'énergie sont parmi ceux où les milieux industriels et scientifiques de notre pays ont été traditionnellement actifs. Il s'agit cependant, pour notre pays, de ne pas prendre de retard dans ce domaine particulier que constitue la mise en valeur de l'énergie géothermique. Qu'il nous suffise de dire que, dans les pays limitrophes de la Suisse, l'énergie géothermique est exploitée d'une façon accélérée en Italie et en France et que les études de base sont assez avancées pour une exploitation imminente en Allemagne et en Autriche.

Les investissements à consentir pour des études et recherches, en vue de la mise en valeur de l'énergie géothermique, peuvent s'avérer ultérieurement comme particulièrement rentables. Les risques que constituent ces investissements sont à mettre en regard des avantages que l'on peut en retirer à longue échéance.

Dans l'état actuel de la technologie géothermique, encore à ses débuts, et sans présumer du résultat d'une étude plus approfondie qui reste à faire, l'appoint énergétique en Suisse de cette nouvelle source d'énergie est bienvenu mais paraît assez faible. Un calcul très prudent indique que dans une première phase il sera de l'ordre du pourcent des besoins globaux du pays. Toutefois, si les nouvelles technologies telles que la fracturation hydrau-

lique en cours de développement dans plusieurs pays conduisent aux résultats escomptés par de nombreux spécialistes, les perspectives de l'utilisation de l'énergie géothermique se présenteraient sous un jour beaucoup plus favorable également en Suisse. D'autre part, dans de nombreux pays, notamment du tiers monde, dépourvus de ressources énergétiques traditionnelles mais dotés d'un potentiel géothermique certain, l'impact de ce type d'énergie sera déterminant et mérite donc d'être pris en considération dès aujourd'hui en tenant compte de ses multiples possibilités d'application.

Certes, l'énergie géothermique est encore chère et, à court terme, peu concurrentielle vis-à-vis de celle produite à partir des sources traditionnelles, en particulier à partie du fuel à son prix actuel. Mais on ne pourra jamais assez souligner que l'on commettrait une erreur lourde de conséquences en attendant que les prix des combustibles fossiles montent pour commencer et pour mener à bien les travaux de recherche et de développement indispensables à la connaissance du potentiel géothermique de la Suisse. D'ailleurs, cet attentisme serait d'autant plus regrettable qu'il irait à l'encontre de la volonté de diversification de nos sources d'énergie locales et importées, volonté qui a été souvent exprimée par nos autorités politiques, par de nombreux secteurs de l'industrie privée et par des organismes représentant sans doute la grande majorité des consommateurs suisses.

BIBLIOGRAPHIE

[1] ARMSTEAD, C. M. : *Geothermal Energy. Review of Research and Development*, Earth Sciences Series 12, Unesco Paris, 186 p., 1973.

[2] DELBOS, L. : *La géothermie en France*. Bulletin du bureau de recherches géologiques et minières, 2e série, section 2, supplément au nº 1, 24 p., 1975.

[3] EINARSSON, S. S. : *Utilization of Low Enthalpy Water (for Space Heating, Industrial, Agricultural and Other Uses)*. Geothermics, vol. 1, special issue 2, p. 112-121, 1970.

[4] EINARSSON, S. S. : *Geothermal Space Heating and Cooling*. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1975, in press.

[5] FEHR, A. : *Geothermische Energiegewinnung — Möglichkeiten in der Schweiz*. Office fédéral de l'économie énergétique. Rapport non publié, 14 p., 24.1.1975.

[6] JAFFÉ, F. : *Geothermal Energy : A Review*. Bull. Schweiz. Petroleum. Geol., V. 38, nº 93, 1971.

[7] KRUGER, P. and OTTE, C. : *Geothermal Energy, Resources, Production, Stimulation*. Stanford University Press, Stanford, 360 p., 1973.

[8] MARINELLI, G. : *L'énergie géothermique*. La Recherche, nº 49, p. 827-838, octobre 1974.

[9] MAUGIS, P. : *Exploitation d'une nappe d'eau chaude souterraine pour le chauffage urbain dans la région parisienne*. Annales des Mines, p. 135-142, mai 1971.

[10] MEIDAV, T. : *Geothermal Opportunities Bear Close Look*. Oil and Gas Journal, May 1974.

[11] MUFFLER, L. J. P. : *Geothermal Resources*. US Geol. Survey, Prof. Paper 820, p. 251-261, 1973.

[12] PEREZ, R. : *L'énergie solaire et l'énergie géothermique, Réalisations actuelles en France et possibilités futures*. Energie und Umwelt, Luft und Wasser, Band 6S, Brunner Verlag, Zurich, p. 313-325, 1974.

[13] POLAK, B. G. : *The Possibilities and Application of Geothermal Energy*. Idem, p. 346-365, 1974.

[14] RYBACH, L. : *Geothermische Energie*. Bull. Ass. Suisse des Electriciens 66, p. 257-261, 5, 8 mars 1975.

[15] RYBACH, L. : *Geothermik, allgemeine und angewandte Aspekte*. Neue Zürcher Zeitung, Forschung und Technik, Nr. 75, p. 47-48, 2. April 1975.

[16] RYBACH, L. and JAFFÉ, F. : *Geothermal Potential in Switzerland*. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1975, in press.

[17] SMITH, M. C. and AL. : *Man-made Geothermal Reservoirs*. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, 1975, in press.

[18] STEGENA, L. : *Geothermal Map of Eastern Europe*. Geothermics, vol. 1, nº 4, p. 140, 1972.

[19] TEERINK, J. R. : *Water and Power from Geothermal Resources in California*. State of California Bull. 190, 52 p., 1974.

Publication reçue après la rédaction de l'article :

BUCHI, U. P. : *Wasser und Energiegewinnung aus der oberen Meeresmolasse und dem Mesozoikum*, Institut für bauwissenschaftliche Forschung, Stiftung Kolbrunner/Rodio, nº 34, mai 1975, Verlag Leemann, Zurich.

Adresse des auteurs :
Felice Jaffé, professeur
Département de minéralogie de l'Université
13, rue des Maraîchers
CH 1211 Genève 4
Michel Cuénod, dr ès sc. techn.
Roger Vercellini, ing. SIA
Société Générale pour l'Industrie
71, avenue Louis-Casaï
CH 1216 Cointrin/Genève

Bibliographie

Ingenieurbaustoffe, par *H.-W. Reinhardt*. Editions Wilhelm von Ernst, Berlin, 1973. — Un volume de 270 pages, 237 figures, 17,5×24,5 cm, relié.

Les matériaux à la disposition de l'ingénieur sont de plus en plus nombreux, notamment les matières plastiques. Leurs propriétés étant fort diverses, leur mise en œuvre rationnelle suppose des connaissances approfondies. Cela a du reste conduit à une spéculation au niveau des études. L'ouvrage de M. Reinhardt vise à donner au praticien de la construction tous les éléments des matériaux les plus usuels, notamment leurs propriétés mécaniques et une description de leur comportement à la rupture. Il constitue donc un ouvrage de référence qui sera fréquemment consulté, ainsi qu'une bonne introduction pour les étudiants ingénieurs.

Extrait de la table des matières :

Einführung in das mechanische Verhalten der Baustoffe. — Stahl. — Aluminium und Aluminiumlegierungen. — Kunstoffe. — Holz. — Beton. — Leichtbeton.

Ecole polytechnique fédérale de Lausanne

Conférences

Les prochaines conférences (en anglais) organisées par l'Institut de la construction métallique seront présentées par M. le professeur A. N. Sherbourne, Université de Waterloo, professeur invité à l'Ecole polytechnique, Département de génie civil, en salle 212 du laboratoire des matériaux pierreux, 32, chemin de Bellerive.

Mercredi 29 octobre, 10 h. 15 : Postbuckling Behaviour of Plane and Stiffened Plates in compression.

Mercredi 12 novembre, 10 h. 15 : Plastic Collapse of Shallow Shells under combined Stresses.

Mercredi 26 novembre, 10 h. 15 : Low cycle Fatigue of Ductile Structures.

Mercredi 10 décembre, 10 h. 15 : Optimum Design of Steel Beam to Column Connections in Buildings.