Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande
Band: 104 (1978)
Heft: 23

Artikel: La géothermie au Japon
Autor: Vuataz, François-David
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-73562

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: 15.07.2025

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

La géothermie au Japon

par FRANÇOIS-DAVID VUATAZ, Genève

Les manifestations de surface naturelles de l'énergie géothermique ont été utilisées au Japon tout au long de son histoire. Les stations thermales sont très nombreuses et très fréquentées. Du volcanisme actif est développé dans cet archipel, qui forme le bord nord-ouest de la ceinture orogénique du Pacifique. Les champs géothermiques sont en relation très étroite avec le volcanisme quaternaire. Il existe deux types de systèmes géothermiques distincts : ceux qui produisent un mélange d'eau chaude et de vapeur (Otake, Hatchobaru, Onuma) et ceux qui produisent uniquement de la vapeur surchauffée (Matsukawa, Onikobe).

La prospection des champs géothermiques s'effectue avec plusieurs méthodes simultanées. L'étude géologique permet de localiser des zones favorables à la présence d'un champ géothermique telles que les systèmes de failles, les graben, les calderas, les dépressions remplies par des formations quaternaires volcaniques, l'altération hydrothermale des sols. L'application des méthodes géochimiques donne de précieux renseignements sur les températures qui seront rencontrées dans le sous-sol, permet de localiser favorablement les forages, les limites du réservoir et de sa capacité. Les mesures géophysiques et leur interprétation permettent de révéler en profondeur des zones géothermiques actives complètement invisibles en surface. La profondeur d'un réservoir et sa perméabilité peuvent aussi être estimées.

Le forage des puits de vapeur s'effectue généralement avec les méthodes des forages pétroliers. Cependant, la vapeur, la pression, la haute température et l'altération des roches posent des problèmes techniques spécifiques. Des méthodes de télédétection à l'infra-rouge et de mesures précises de température dans les puits sont aussi utilisées. Actuellement cinq centrales géothermiques produisant de l'électricité sont en fonction, totalisant une puissance installée de 90 MW. Cette production est encore modeste, mais des projets ambitieux sont en cours d'exécution, prévoyant environ 350 MW pour 1980 et 50 000 MW d'ici l'an 2000. Quant au coût de cette électricité, il est concurrentiel et même, dans certains cas, inférieur à celui obtenu par des installations thermiques conventionnelles ou nucléaires.

1. Introduction

Les îles japonaises occupent une partie du coin nord-ouest de la ceinture orogénique entourant l'Océan Pacifique, où elles forment un chapelet d'îles en arc entre le 30e et le 45e degré de latitude nord. Ces îles sont localisées dans la zone de bordure entre la croûte continentale et la croûte océanique. Le côté ouest de l'archipel japonais est séparé du continent par les mers marginales d'Okhotsk, du Japon et de Chine Orientale. Du volcanisme actif et d'intenses tremblements de terre ont fréquemment lieu dans tout l'archipel. De plus les ressources géothermiques potentielles sont apparentes : les manifestations naturelles de surface en sont très nombreuses. En effet le pays ne compte pas moins de 196 volcans d'âge quaternaire auxquels sont étroitement associées quelque 18 000 sources thermales dont une centaine ayant une température supérieure à 100°C [3, 4, 5] [1].

C'est pourquoi, depuis l'Antiquité et encore actuellement, l'énergie géothermique est employée à d'autres buts que la production d'électricité [12, 17]. Quelque 1600 stations thermales ou établissements de bains sont notamment en activité du nord au sud du Japon et sont visités annuellement par quelque 100 millions de personnes venant pour se soigner ou dans un but touristique et récréatif.

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

Pour l'agriculture il y a de nombreuses serres de plantes tropicales, de serres chauffées dans les mois d'hiver pour produire des fruits et légumes. L'élevage des anguilles et des poulets dans des installations chauffées par de l'eau chaude naturelle est également assez répandu. Près de Tokyo, dans le Jardin Tropical de Atagawa, on élève 450 crocodiles de 27 espèces différentes, et quelque 4500 espèces de plantes tropicales poussent dans des serres. Les piscines et les serres sont chauffées par la fameuse source thermale d'Atagawa.

A l'exception de la production d'électricité, les utilisations industrielles de l'énergie géothermique sont peu nombreuses : à petite échelle, il existe une usine d'extraction du sel de l'eau de mer dans l'île de Hokkaïdo, et une usine d'extraction de soufre dans l'île de Kyushu. Près de Beppu (Kyushu), on a construit sur des sols fumants des huttes de paille sur le sol desquelles on étend de l'argile (mélange de kaolinite et montmorillonite). Les fumerolles dégageant de l'H_2S percolent à travers l'argile : l'aluminium de l'argile et le H_2S donnent de l'alun ($Al_2(SO_4)_3$) qui est utilisé en médecine.

2. Quelques dates importantes dans l'utilisation de l'énergie géothermique

Le Japon étant pauvre en ressources énergétiques telles que le charbon, le pétrole et l'uranium, on peut comprendre pourquoi des recherches sur l'énergie géothermique dans le but de produire de l'électricité ont déjà commencé peu après la première guerre [13, 14].

1918 Le vice-amiral M. Yamauchi entreprend un relevé préliminaire des zones géothermiques du Japon.

1919 Il fore un puits à Beppu (île de Kyushu) et obtient de la vapeur.

1925 Une turbine produisant 1,12 kW est installée, utilisant la vapeur du puits mentionné plus haut.

1948 Installation d'une turbine produisant 3-8 kW dans la péninsule de Izu (île de Honshu).

1954-56 La Kyushu Electric Power Co. fait quatre forages de 300 à 900 m de profondeur à Otake (île de Kyushu).

1958 Début des forages à Matsukawa (nord de l'île de Honshu).

1961 Fondation de la « Japan Geothermal Energy Association ».

1966 Entrée en fonction de la première centrale géothermique : Matsukawa (20 000 kW).

3. Aperçu géologique en relation avec les zones géothermiques

Le Japon a été formé par des mouvements de la croûte relativement jeunes depuis le milieu du Tertiaire, comme d'autres parties de la zone circum Pacifique. Sur la base des nombreuses sources de données on peut distinguer les périodes orogéniques suivantes [15] :

0. Pré-Silurien (mal connue).

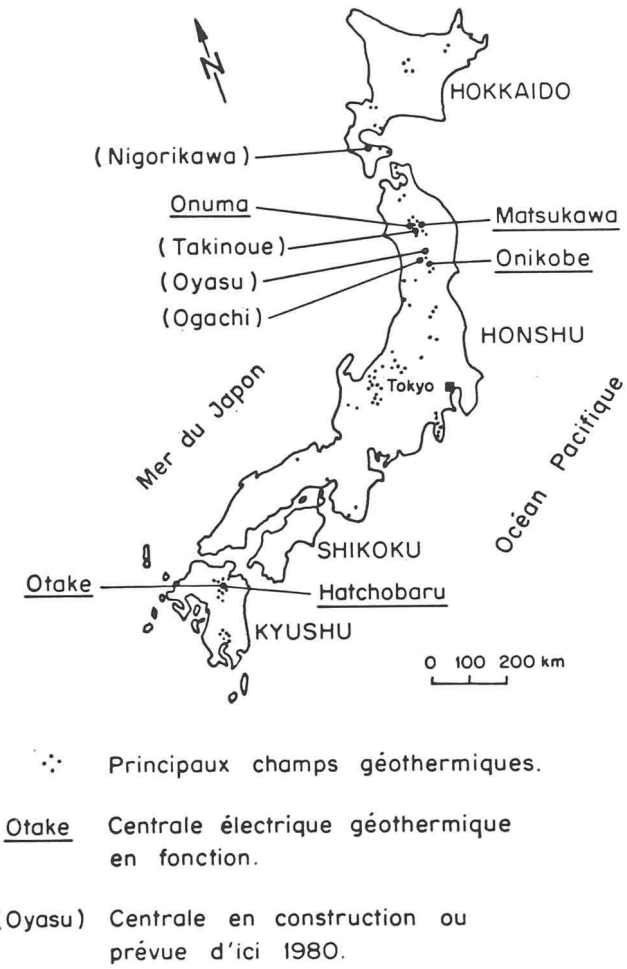

Fig. 1. — Distribution des principaux champs géothermiques du Japon [24].

1. Période paléo-tectonique : fin du Paléozoïque jusqu'au début du Mésozoïque.
2. Période méso-tectonique : Mésozoïque jusqu'au Cénozoïque.
3. Période néotectonique : Cénozoïque tardif.

Il y a de nombreuses sources chaudes et zones géothermiques au Japon et leur distribution est étroitement reliée avec la structure géologique et les provinces tectoniques du Néogène. Celles-ci peuvent être résumées comme suit [23] :

a) zone de tufs verts incluant des bassins sédimentaires ;

b) zone de roches plutoniques du Tertiaire supérieur ;

c) zone de bassins sédimentaires plio-quaternaires ;

d) zone volcanique quaternaire.

(Voir figure 1.)

Chaque zone a ses propres types d'activités géothermiques, mais celles qui peuvent être l'objet d'un développement économique se trouvent principalement dans les tufs verts et le volcanisme quaternaire.

Dans la zone des tufs verts, il existe un gradient géothermique élevé alors que dans la zone volcanique quaternaire, on a des phénomènes de volcanisme actif, tels que des sources chaudes à haute teneur en acide chlorhydrique ou sulfurique, ce qui causera de graves problèmes de corrosion des matériaux en cas d'une future utilisation de l'énergie géothermique.

Il faut mentionner qu'il existe deux types principaux de systèmes géothermiques : les systèmes produisant de l'eau chaude et de la vapeur (wet steam), dits mixtes et ceux à vapeur dominante (dry steam) [33]. Parmi les champs géothermiques découverts jusqu'à présent, ceux de systèmes à eau chaude sont environ vingt fois plus fréquents que ceux à vapeur sèche [24].

Dans le système géothermique à eau-vapeur, le fluide se trouvant dans la roche en profondeur n'est que de l'eau, dont la température, à cause de la haute pression, peut être bien au-dessus du point d'ébullition en surface. Avec la chute de pression lors de la remontée, une partie de l'eau se transforme en vapeur. Dans le monde, les champs géothermiques les plus connus produisant un mélange eau-vapeur (wet steam) sont Wairakei et Broadlands (Nouvelle-Zélande), Rift Valley (Ethiopie), Kizildere (Turquie), Cerro Prieto (Mexico), El Tatio (Chili), Ahuachapan (El Salvador), Salton Sea (USA), Otake, Hatchobaru et Onuma (Japon).

Dans le système géothermique à vapeur dominante, le fluide se trouvant dans la roche en profondeur est un mélange d'eau et de vapeur. Avec la diminution de la pression, la chaleur contenue dans les roches sèche le fluide jusqu'à saturation d'abord, puis devient de la vapeur surchauffée. Les champs géothermiques produisant de la vapeur sèche (dry-steam) sont beaucoup moins nombreux : Larderello (Italie), The Geysers (USA), Matsukawa et Onikobe (Japon) [8].

3.1 *Description géologique des champs géothermiques produisant de l'électricité*

3.1.1 *Zone géothermique de Onikobe (nord-est du Japon)* [34]

Il s'agit d'un bassin de 7 km sur 9 km constitué par des roches volcaniques et sédimentaires tertiaires ainsi que des dépôts de lacs volcaniques quaternaires sur un socle de granite et de tufs verts tertiaires. Les sédiments et les roches volcaniques sont des roches argileuses, des conglomérats et une série volcanique complexe comprenant des tufs, des agglomérats et des laves. L'une des roches volcaniques quaternaires, la dacite, fait intrusion dans la partie méridionale du bassin. Il y a beaucoup de failles correspondant pour la plupart à une zone de fracture par enfoncement du socle (graben). Des sources chaudes et des fumerolles jaillissent des sédiments lacustres qui se sont déposés dans les parties effondrées du graben. On présume que deux principales failles conduisent la vapeur ou l'eau chaude vers le haut, que le niveau supérieur altéré du complexe volcanique sert de couverture imperméable et que la zone fracturée du complexe volcanique et des tufs verts forment le réservoir pour la vapeur.

3.1.2 *Zone géothermique de Matsukawa (nord-est du Japon, Park National de Hachimantai)* [22]

Proche du volcan actif Iwate, cette zone est couverte par les débris des coulées de lave du volcan Marumori ainsi que par l'andésite de Matsukawa, d'âge quaternaire. La base de roches quaternaires n'affleure pas dans cette zone, excepté dans deux petits secteurs. Les roches réservoir de vapeur ont été déterminées par des méthodes géophysiques et des sondages : il s'agit de tufs soudés et de schistes argileux. Cette région est caractérisée par une topographie de caldera et par la présence étendue de roches altérées. Malgré cela, les manifestations thermiques sont faibles, à l'exception de quelques sources chaudes (40-70°C) qui sortent des roches altérées (fig. 2).

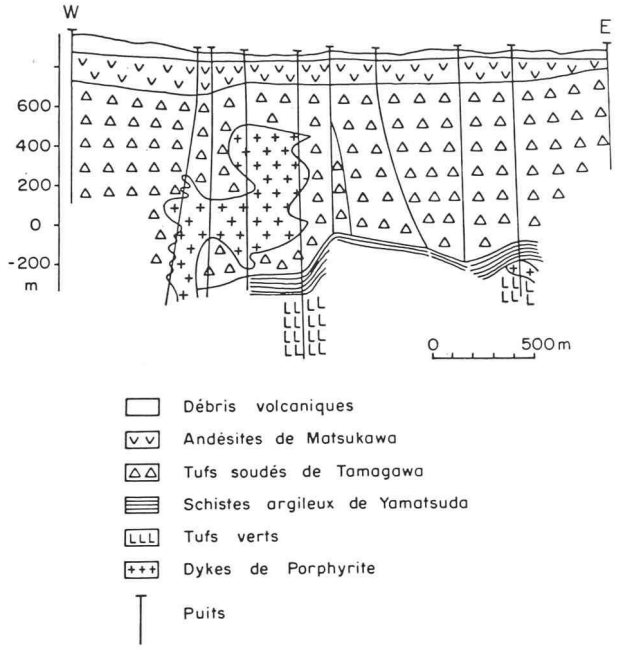

Fig. 2. — Profil géologique du champ géothermique de Matsukawa [29].

3.1.3 *Zone géothermique d'Onuma (nord-est du Japon, Parc national de Hachimantai)*

Cette région consiste essentiellement en laves et roches pyroclastiques plio-quaternaires qui couvrent le groupe de base, tufs verts du Miocène : ce sont des grès, des conglomérats, des tufs bréchiques et des agglomérats propylitiques. Les roches du Miocène inférieur jusqu'au Pliocène appartiennent au cycle volcanique acide : dacite de Tamagawa et coulées de lave andésitique à deux pyroxènes. Les formations supérieures sont des sédiments lacustres et des laves quaternaires. De nombreuses sources thermales sont observées dans cette région ainsi que des fumerolles, solfatares et zones d'altération. La couche géologique servant de réservoir pour la vapeur et l'eau chaude est représentée par les tufs verts et les tufs soudés du Pliocène.

3.1.4 *Zone géothermique de Otake et Hatchobaru (sud du Japon, île de Kyushu)* [36]

A proximité du groupe volcanique de Kujyu, cette région se trouve à une altitude d'environ 1000 m et forme un bassin entouré de plusieurs dômes volcaniques. La base de la série est le groupe de roches Kusu du Miocène composé principalement de tufs, conglomérats, grès et roches argileuses avec de fréquentes intercalations de lits de diatomites.

L'activité volcanique quaternaire se subdivise en deux séries complexes :

Complexe volcanique Kujyu : andésite à hornblende du Pléistocène moyen à Holocène.

Complexe volcanique Hohi : andésite à deux pyroxènes du Pléistocène inférieur.

Le complexe de Kujyu surmontant le tout forme des dômes de laves et est intercalé par la coulée de ponce Handa. Dans la partie médiane du complexe de Hohi, d'une épaisseur de 900 m au moins, est intercalé une épaisse couche de tufs bréchiques qui forment un réservoir d'eau et de vapeur captif, utilisé depuis 10 ans par la centrale de Otake. Au début des années 1970 on a découvert à Hatchobaru par des sondages plus profonds un deuxième réservoir en dessous du complexe volcanique Hohi, dans des tufs et conglomérats du groupe Kusu.

Il y a plusieurs failles à tendance nord-ouest ayant une étroite relation avec l'emplacement des sources thermales, des fumerolles et des zones altérées (fig. 3).

4. Prospection des ressources géothermiques

De nombreux travaux menés à terme surtout dans ces quinze dernières années permettent de définir la méthodologie de la prospection géothermique telle qu'elle est généralement pratiquée d'une façon souvent originale au Japon.

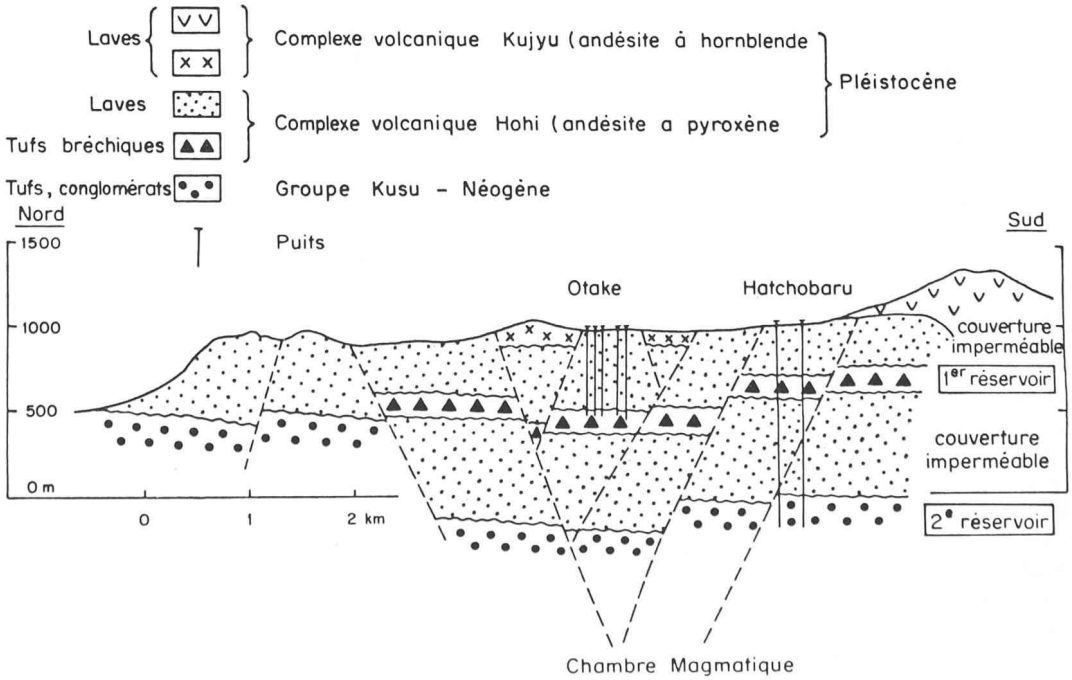

Fig. 3. — Profil géologique des zones géothermiques de Otake et Hatchobaru (7th IGTCGE).

Dans le but de décider si une zone géothermique peut avoir un développement économique, il est nécessaire d'acquérir des informations sur la structure géologique, la température en profondeur, la quantité ainsi que les propriétés chimiques du fluide géothermique.

S'il n'y a que des données fragmentaires sur la région considérée, il convient de commencer par étudier les manifestations de surface pour identifier les zones géothermiques et de sélectionner des champs pour une prospection plus détaillée. Dans ce cas l'investigation géothermique peut comprendre par les phases suivantes [24] :

a) Relevé de reconnaissance :
compilation de cartes géologiques,
cartes de distribution des fumerolles et des sources chaudes dans la zone géothermique,
échantillonnage et analyse des eaux thermales,
cartes de distribution des manifestations géothermiques obtenues par un relevé infra-rouge.

b) Relevé détaillé :
relevé géologique de détail (échelle 1 : 5000 ou 1 : 10 000),
relevé hydrogéologique,
mesure du flux de chaleur du sol,
prospection géophysique (résistivité électrique, sismique, gravimétrie, magnétisme, micro-sismique),
analyses chimiques des gaz et des eaux thermales,
relevé des températures du sous-sol dans des forages peu profonds (1, 10, 30, 100 m).

c) Forage des puits de prospection :
logs géologiques,
logs électriques,
logs de température,
mesure de la vitesse du fluide,
mesure de la pression au fond du puits,
mesure du niveau de la nappe aquifère,
mesure de la température et de la pression à l'orifice,
analyses chimiques de la vapeur et de l'eau.

d) Forage des puits de production :
mêmes opérations que pour les puits de prospection, les puits de production ont cependant un diamètre plus important.

Ces quatre étapes successives dans le temps peuvent être groupées en trois grandes méthodes de prospection : la prospection géologique, géochimique et géophysique [13].

4.1 *La prospection géologique*

Contrastant avec les champs géothermiques de Larderello (Italie) et des Geysers (USA), ceux du Japon sont situés dans des zones volcaniques. Les manifestations de surface, telles que les sources chaudes, les fumerolles et les zones d'altération, sont des indicateurs très importants [26].

Quand une roche subit une altération hydrothermale, les minéraux primaires se transforment en argile, et, par dissolution des matériaux solubles, la perméabilité de la roche augmente. Une zone altérée montre que la roche a subi le passage de l'eau chaude ou de la vapeur dans le passé. Par exemple à Otake (île de Kyushu) la zone d'altération s'étend sur un kilomètre de l'est à l'ouest et sur trois kilomètres du sud au nord. De nombreuses roches altérées ont été formées dans l'épaisseur des andésites à pyroxène du complexe Hohi, principalement par l'action de solutions hydrothermales, acides ou faiblement alcalines. Les roches altérées sont classées en cinq types selon l'altération des minéraux et la valeur du pH des solutions actives [6]. Il faut noter également qu'une zone altérée est tri-dimensionnelle : il est théoriquement démontré qu'en milieu homogène la zone d'altération est plus large dans la partie supérieure que dans la partie inférieure [35].

Souvent les régions géothermiques sont localisées le long d'une zone de dépression (graben), le long de failles ou d'un rift, créés principalement durant le Quaternaire inférieur et étroitement associés à du volcanisme actif (Otake, Aso, Kirishima, dans l'île de Kyushu et Onuma au Nord de l'île de Honshu). Ces dépressions sont généralement remplies par d'épaisses formations quaternaires souvent à séquence volcanique dominante, sous laquelle se trouvent parfois des sédiments du Tertiaire inférieur. Des formations perméables telles que les tufs pyroxlastiques et les tufs bréchiques, constituent des aquifères. Les laves imperméables et les tufs soudés par contre jouent le rôle de couverture imperméable s'ils ne sont pas altérés. Des failles majeures, parallèles ou subparallèles aux failles bordant les côtés de la dépression, sont fréquentes dans ces champs géothermiques. Quelques-unes sont d'âge quaternaire et probablement encore actives.

Des intrusions volcaniques acides et des formations de caldera (Onikobe) sont également d'un grand intérêt dans la prospection des zones géothermiques : elles compliquent la structure géologique par les failles et les fissures qui les entourent et qui développent fortement les voies de passage pour les fluides hydrothermaux.

Sur la base des caractères géologiques (et indépendamment du fluide produit), les zones géothermiques peuvent être classées en trois types :

a) Type aquifère :
L'eau chaude ou la vapeur montant à travers les failles et fissures est retenue dans des couches perméables à extension horizontale. Des laves diaclasées, des tufs bréchiques poreux et fracturés ou des grès y jouent le rôle de réservoir.

b) Type fracture :
L'eau ou la vapeur est contenue dans des fissures ou cassures développées dans une zone fracturée par l'activité des failles.

c) Type mixte :
Dans ce type, le réservoir géothermique est composé par la combinaison des aquifères et des fractures.

4.2 *La prospection géochimique*

Les paramètres géochimiques d'un nouveau champ géothermique doivent être examinés dans le premier stade d'un projet. La géochimie est la méthode utilisée pendant la plus grande partie d'un programme de prospection ; de plus elle permet de discerner rapidement un champ géothermique prometteur. La mesure et l'analyse des paramètres les plus courants (Cl, SO_4, HCO_3, H_2S, pH) sont suffisantes lors d'une première approche. Les sources et fumerolles de grand débit et haute température sont à retenir pour un échantillonnage représentatif.

Pour appliquer la géochimie à la prospection géothermique, il faut tenir compte des deux systèmes géothermiques : le système à eau-chaude et celui à vapeur-dominante. Le comportement géochimique des substances de forte et faible volatilité diffère beaucoup selon l'état physique du fluide dominant. Beaucoup de composants sont utilisables dans l'évaluation des systèmes à eau-chaude, alors que seuls quelques constituants volatiles sont significatifs dans le système à vapeur-dominante.

4.2.1 *Systèmes à eau-chaude (wet steam)* [11]

Ces eaux contiennent la plupart des constituants souterrains ordinaires, dans des proportions très variables selon leur température. Par exemple, la concentration en ions chlore est très utilisée durant la prospection préliminaire : pour cela on construit sur une carte des lignes d'isovaleurs de la concentration des ions Cl d'une région, que l'on peut comparer avec les données géophysiques ou géologiques. Le chlore et le bore sont des éléments qui, une fois solubilisés et libérés des roches, ne rentrent pas facilement dans des structures minérales secondaires. Pour cette raison, le rapport atomique Cl/B est pris en considération dans l'étude de la circulation et de la provenance des eaux thermales. Si les rapports Cl/B d'une région donnée sont semblables, il s'agit d'un aquifère ou d'un flux commun, alors que s'ils montrent des variations importantes, on est en présence de plusieurs aquifères dans cette région. Un rapport Cl/B faible indique dans le système aquifère la présence d'une épaisse formation sédimentaire ou d'andésites. L'emploi d'un rapport atomique de ce type élimine les effets de dilution et d'évaporation des eaux chaudes, rendant possible une comparaison des eaux des sources échantillonnées sur une grande surface.

L'amonium et l'iodure dans les sources ont des comportements différents qui, dans certains cas, aident à élucider la géologie profonde. Une haute concentration des deux constituants signifie que les sources sont alimentées par des eaux profondes associées à des sédiments. Cependant il faut utiliser ces données avec précaution car une haute teneur en iodure peut être causée par une contamination organique proche de la surface. D'autre part la vapeur chauffant des eaux de surface peut augmenter la teneur en ammoniaque. De l'eau chaude contenant du CO_2 est capable de réagir durant la migration avec la roche qu'elle traverse pour former des bicarbonates. La teneur en bicarbonates peut donc donner des indications sur la perméabilité et le genre de roches rencontrées entre l'aquifère et la surface ainsi que la distance parcourue par l'eau. Les sources qui sont alimentées le plus directement par l'aquifère contiennent le moins de bicarbonates.

Des cartes d'isoconcentrations de SiO_2, SO_4, HCO_3, et d'isovaleurs de Na/K, Na/Li, etc. donnent de précieux renseignements sur les circulations d'eau, les limites du réservoir et la localisation des forages de prospection.

4.2.1.1 *Calculs de la température en profondeur*

Pendant toute la prospection et l'utilisation d'un champ géothermique, il est très important de connaître la température du réservoir et ses variations. Dans un réservoir géothermique, l'eau en profondeur a une certaine composition chimique équilibrée par la pression et la température régnant dans les roches environnantes. Lors de la remontée de cette eau par une fissure, jusqu'au tubage d'un puits ou jusqu'à la surface s'il s'agit d'une source, la température du fluide peut diminuer au contact des roches froides ou par dilution avec des eaux de subsurface. L'équilibre chimique de l'eau change moins rapidement que sa température, ce qui permet d'admettre que les concentrations en sels dissous ou les rapports des concentrations (s'il y a dilution) n'ont pas encore changé au moment de l'échantillonnage. Au moyen des diagrammes d'équilibre des ions en solution (géothermomètres), on peut estimer la température de l'eau thermale dans le réservoir.

4.2.1.2 *Principaux géothermomètres quantitatifs et qualitatifs*

SiO_2 : montre l'équilibre du quartz et des autres phases de la silice à haute température. C'est le meilleur indicateur s'il n'y a pas de dilution ou de précipitation après refroidissement.

Na/K : généralement significatif pour des rapports entre 20/1 et 8/1 et pour quelques systèmes en dehors de ces limites. Un rapport faible indique une température élevée.

Na-K-Ca : expression calculant les rapports Na/K et Ca/Na et donnant de meilleurs résultats que le seul rapport Na/K [2].

Na/Ca : un rapport élevé est l'indice de hautes températures.

Ca et HCO_3 : qualitativement utile pour les eaux à pH neutres ; la solubilité du $CaCO_3$ diminue avec l'augmentation de la température.

Mg ; Mg/Ca : des valeurs faibles de Mg ou du rapport Mg/Ca indiquent une haute température en profondeur.

$Cl/(HCO_3 + CO_2)$: des rapports élevés dénotent une température élevée.

Cl/F : le rapport augmente avec la température, mais une forte teneur en Ca empêche une application quantitative.

Cl : calcul des dilutions entre les eaux à haute teneur et celles à faible teneur.

Dépôts siliceux de sinters : indication sûre d'une température (actuelle ou passée) plus élevée que 180°C.

Dépôts de travertins : indication d'une basse température sauf si l'eau bicarbonatée a été en contact avec des calcaires après refroidissement.

4.2.1.3 *Estimation des températures dans deux réservoirs aquifères* (tableau I)

Ces températures calculées à l'aide de trois géothermomètres différents montrent une bonne concordance dans les résultats.

TABLEAU I

Températures calculées pour les champs géothermiques de Otake et Hatchobaru

Zone	Otake				Hatchobaru				
Puits n°	7	8	9	10	1	2	3	4	6
T SiO_2 (°C)	214	225	243	238	290	245	275	281	270
T Na/K (°C)	210	218	224	215	282	285	293	287	282
T Na-K-Ca (°C)	240	233	246	240	292	273	293	295	289

4.2.1.4 *Géochimie isotopique*

L'analyse isotopique des eaux thermales est aussi utile qu'en hydrogéologie des aquifères froids : elle permet de connaître l'origine de l'eau, son parcours, son mélange éventuel avec d'autres eaux et son âge. De plus, par l'étude expérimentale de l'équilibre du fractionnement isotopique de l'oxygène entre le sulfate dissous et l'eau à des températures différentes [19], on a pu établir une équation permettant de connaître la température à partir de la teneur en ^{18}O. On obtient une assez bonne correspondance avec les résultats obtenus en utilisant les géothermomètres SiO_2 et Na/K.

4.2.2 *Systèmes à vapeur dominante (dry steam)* [10]

Malgré des manifestations de surface nombreuses (fumerolles, mares de boue, volcans de boue, sols acides lessivés, zones d'altération, sols fumants) les indicateurs de température en profondeur ont manqué jusqu'à maintenant pour les systèmes à vapeur dominante.

L'analyse de la vapeur des fumerolles donne une indication approximative de la vapeur ou de l'eau qui sera obtenue lors du forage, notamment les rapports gaz-vapeur CO_2/H_2S, CO_2/CH_4 et CO_2/H_2. Une haute teneur en gaz signale un système à vapeur dominante.

Les éléments volatils (Hg, As, B) contenus dans l'eau de condensation des fumerolles ont été transportés avec la vapeur depuis les niveaux profonds par vaporisation. La teneur en mercure (haute volatilité et dosage très précis) est le meilleur indicateur de prospection pour des zones profondes à haute température. Les géothermomètres basés sur les rapports de concentration des phases vapeur et eau pour Hg, As et B, doivent être utilisés avec prudence pour les calculs de la température en profondeur, car les concentrations trouvées ne correspondent pas toujours aux concentrations théoriques dues au processus complexe de la séparation eau-vapeur. Cependant de nombreuses observations suggèrent qu'un fort système géothermique possède de hautes teneurs en éléments volatils. De plus les isoconcentrations de mercure dans les roches altérées sont généralement reliées aux structures géologiques et notamment aux failles (fig. 4).

4.3 *La prospection géophysique*

Les expériences de prospection géophysique pour la mesure des paramètres physiques de la terre indiquent que ces méthodes sont utilisables dans la localisation d'une zone géothermique et du site de forage où l'on doit produire de la vapeur et de l'eau chaude en quantité économique.

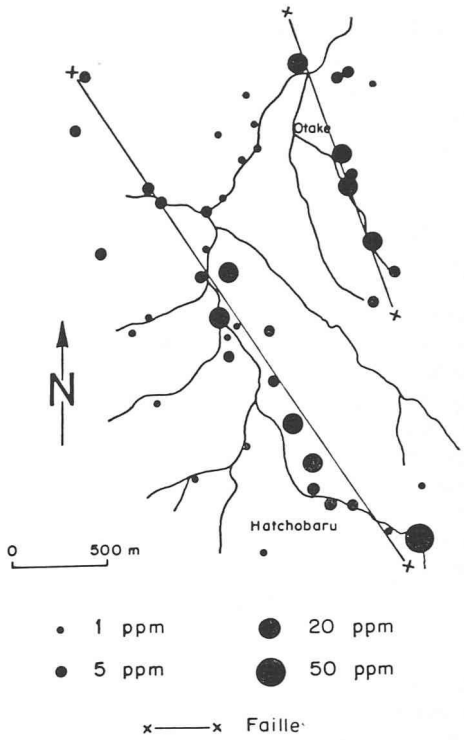

Fig. 4. — Distribution du mercure dans les roches altérées des zones géothermiques de Otake et Hatchobaru [10].

Les méthodes de prospection géophysique se classent en 5 groupes : gravimétrie, magnétisme, électricité, sismique et méthodes de température [28].

4.3.1 *Gravimétrie*

Cette méthode est largement employée dans la prospection à grande échelle des structures souterraines. Ces mesures sont basées sur l'existence d'anomalies dans l'attraction gravifique produites par des différences de densité des formations et structures géologiques. Il s'agit plus d'une méthode qualitative, et il n'est pas possible de discuter les structures souterraines du simple point de vue d'une grande ou petite anomalie de gravité. Cependant une anomalie négative peut révéler, dans une zone volcanique, l'existence d'une caldera ou d'un graben, et une anomalie positive peut suggérer la présence d'une intrusion ou d'un horst. La partie centrale de l'île de Kyushu s'étendant de la baie de Beppu jusqu'au volcan Aso forme un district de faible gravité, dans lequel se trouve la zone du champ géothermique d'Otake (−50 mgal) et celle du volcan Aso (−35 mgal). *(à suivre)*

Bibliographie

Dictionnaire de chimie allemand-français, par *R. Cornubert.* — Un vol. 16×24 cm, 226 pages, Editions Bordas, Dunod Paris, troisième édition, nouveau tirage 1977.

Cet excellent dictionnaire concerne le vocabulaire général de la chimie pure et fait face aux éléments des sciences voisines, la physique, la physicochimie, la biochimie, dans la mesure où le jeune chimiste peut en avoir besoin. En revanche, ce lexique ne s'intéresse pas au langage des divers aspects des fabrications chimiques.

Il a été conçu dans l'idée de permettre aux chimistes de suivre les exposés généraux et les discussions qui peuvent en découler. Si la précision dans la traduction est nécessaire pour tout scientifique, elle est plus importante encore pour le chimiste car la négligence d'un terme, une confusion sur un mot, une expression ou une locution, peuvent entraîner des conséquences parfois graves.

Le volume débute par des indications générales d'ordres linguistique, typographique et grammatical, suivies de considérations générales sur le vocabulaire chimique allemand.

On trouvera en annexe, à la fin du dictionnaire, sous une forme condensée mais très claire, les principales abréviations rencontrées dans les textes chimiques de langue allemande, une liste des principaux verbes irréguliers allemands qui se rencontrent dans les textes chimiques, ainsi que les déclinaisons.