

# Géothermie et théories métallogénétiques

Giorgio MARINELLI \*

## RESUME

*Deux domaines des Sciences de la Terre, la géothermie et la gîtologie, étudient depuis longtemps quelques problèmes semblables par des approches et des méthodes différentes et dans des buts tout à fait indépendants.*

*Un examen, même préliminaire, de la production scientifique récente en ces domaines, amène à constater que la géothermie et l'étude des gîtes hydrothermaux sont en train de se développer par des voies parallèles qui ne se rencontrent que rarement et presque par hasard.*

*Un exemple typique de ces différentes optiques est discuté dans cette note. Il s'agit des hypothèses qui concernent l'origine et la circulation en profondeur des eaux chaudes et salées liées à la mise en place et au refroidissement des stocks magmatiques. On examine la possibilité qu'un recyclage par convection thermique dans un système magmatique ouvert soit à la base de la formation de nombreux gisements hydrothermaux. Cela semble valable surtout dans des systèmes où des stocks acides et légers pénètrent des séries volcaniques ou volcano-sédimentaires.*

## ZUSAMMENFASSUNG

*Erdwärme und Lagerstättenkunde sind Wissenschaften, die sich mit der Erde bzw. seit langer Zeit mit einigen ähnlichen Problemen befassen, an die sie mit unterschiedlichen Methoden herangehen und deren Zielsetzungen ganz unabhängig voneinander sind.*

*Eine noch so vorläufige Untersuchung der neulichen wissenschaftlichen Produktion auf diesen Gebieten führt zu der Feststellung, daß die Erdwärme sowie die Untersuchung der hydrothermalen Lagerstätten zur Zeit Parallelbahnen verfolgen, die sich nur ganz selten und beinahe zufällig treffen.*

## SAMENVATTING

*Twee domeinen van de Aardwetenschappen, de geothermie en de « gîtologie », bestuderen sedert geruime tijd enkele gelijkaardige problemen door verschillende benaderingen en methodes en met volkomen onafhankelijke doeleinden.*

*Een onderzoek, zelfs voorlopig, van de recente wetenschappelijke produktie in deze domeinen leidt tot de vaststelling dat de geothermie en de studie van de hydrothermale afzettingen zich gelijklopend ontwikkelen en mekaar slechts zelden en bijna per toeval ontmoeten.*

*Een typisch voorbeeld van deze verschillende standpunten wordt in dit bericht besproken. Het zijn de hypothesen betreffende de oorsprong en de dieptecirculatie van warm en zout water verbonden met de intrusie en de koeling van de magmatische stocks. Men onderzoekt de mogelijkheid dat een recyclage door thermische convectie in een open magmatisch systeem ten grondslag zou liggen aan de vorming van talrijke hydrothermale afzettingen. Dit blijkt geldig te zijn vooral in systemen waar zure en lichte stocks vulkanische of vulkanisch-sedimentaire reeksen binnendringen.*

## SUMMARY

*Two branches of the earth sciences — geothermics and the study of ore deposits — have for a long time been examining certain similar problems using different approaches and methods, and with entirely independent aims.*

*Even a cursory view of the information recently obtained in these fields leads to the conclusion that the studies of geothermal phenomena and of hydrothermal deposits are developing along parallel lines, meeting only rarely — and that by chance.*

\* Professeur, Istituto di Mineralogia e Petrografia, Università degli Studi di Pisa, 53, Via Santa Maria - 56100 Pisa - Italia.

*Ein typisches Beispiel für diese verschiedenen Zielsetzungen wird in dieser Notiz erörtert. Es handelt sich um Hypothesen betreffend die Herkunft und den Umlauf in der Tiefe von Warm- bzw. Salzwasser, verbunden mit dem Einsatz sowie dem Abkühlen der magmatischen Stöcke. Vielleicht besteht die Möglichkeit, daß eine Kreislaufbewegung durch Wärmeumwälzung in einem offenen magmatischen System der Bildung zahlreicher hydrothermalen Lagerstätten zugrundeliegt. Es hat den Anschein, daß dies vor allen Dingen bei den Systemen zutrifft, wo leichte und saure Stöcke in vulkanische oder vulkanisch-sedimentäre Reihen eindringen.*

*One typical example of these different viewpoints is discussed in this note, namely, the hypotheses as to the origin and the circulation at depth of the hot saline waters associated with the deposition and cooling of the magmatic stocks. The article further examines the possibility that recycling — due to thermal convection in an open magmatic system — underlies the formation of many hydrothermal deposits. This hypothesis appears to hold good primarily in systems where light, acid stocks penetrate into volcanic or volcano-sedimentary deposits.*

En 1970, les Nations Unies avaient organisé à Pise (Italie) un symposium sur les développements et l'utilisation des ressources géothermiques. Les quelque 200 contributions présentées à ce symposium (plus de 2.000 pages), dont environ un tiers concerne les systèmes hydrothermaux, ont paru dans trois volumes de la revue « Geothermics ».

En consultant (d'une façon non systématique, précisons-le) quelques revues spécialisées dans le domaine des gîtes hydrothermaux pour les années 1973, 1974 et 1975, je n'ai pu trouver ne serait-ce qu'une seule référence bibliographique à l'une quelconque des notes présentées à ce colloque international de géothermie.

Mon travail aurait-il été plus exhaustif et aurais-je dès lors trouvé quelques références à cette réunion : cela n'aurait guère changé grand-chose à la triste constatation que deux domaines tels que la géothermie et la métallogénie hydrothermale, quoiqu'ils aient d'importants points en commun, se développent le long de voies tellement parallèles qu'ils ne se rencontrent que rarement et presque par hasard.

La constatation de ce développement parallèle et apparemment séparé par des cloisons étanches m'a convaincu que des réflexions sur l'état des connaissances dans le domaine de la géothermie et dans celui des gisements hydrothermaux pourraient avoir quelque utilité et permettre d'aborder certains problèmes de la métallogenèse d'un point de vue un peu différent de celui que l'on prend d'habitude, et qui pourrait se révéler fécond.

Depuis plus d'un siècle, les hypothèses métallogénétiques associent étroitement concentration des minéraux de métaux lourds et intrusions magmatiques. Ce rapprochement au départ était strictement pragmatique : la plupart des gisements métallifères se trouvaient en effet à proximité de massifs intrusifs et leur fréquence diminuait en s'éloignant de ces derniers.

Plus tard, les études portant sur la cristallisation fractionnée des magmas en profondeur et sur les af-

finités géochimiques vinrent renforcer les observations et les hypothèses et conduisirent à une théorie métallogénique « orthodoxe ». Celle-ci attribuait aux fluides résiduels de la cristallisation magmatique opérée en profondeur la quasi-totalité des gisements dans lesquels l'accumulation de phases solides contenant les métaux lourds résultait de la précipitation aux dépens de solutions aqueuses circulantes.

Cette théorie, que l'expression heureuse et un peu méchante de K.B. Krauskopf qualifie de « populaire », est toujours à la base de la plupart des hypothèses métallogénétiques des gîtes hydrothermaux.

En effet, les recherches modernes qui attribuent à certains gisements stratiformes une origine sédimentaire n'ont pas changé les postulats de la théorie hydrothermale par le seul abandon de la présomption de l'unitarisme génétique.

Le stade aigu de la polémique entre « magmatistes » et « sédimentaristes », que le manichéisme de certains chercheurs avait parfois transformée en lutte pour arracher des gisements à l'hypothèse rivale, est à présent apaisé, mais on risque par contre une radicalisation des deux théories.

Des résultats importants ont été atteints ces dernières années dans le domaine de la chimie et de la thermodynamique des solutions hydrothermales. Un départ pragmatique et très objectif — l'étude des inclusions fluides — permet de constater que les sels les plus répandus et les plus abondants en profondeur sont les chlorures (Roedder, 1972). Que ces inclusions, très fréquentes dans les minéraux quelle que soit leur origine, contenaient souvent des microcristaux de sel gemme et de sylvite, on le savait dès la fin du siècle dernier, mais le manque de techniques adéquates pour les analyser avait empêché d'en évaluer l'importance.

Les rapports Cl/F/OH dans les minéraux oxhydrilés, tels que la hornblende, la biotite et l'apatite, ont montré que les fluides magmatiques étaient également salés (Parry, 1972 ; Roegger et al., 1974).

Conduites dans le but de savoir si une plus forte salinité des fluides dans les massifs intrusifs correspondait à des minéralisations plus importantes, ces recherches signifiaient une acceptation implicite de l'hypothèse que ces fluides salés étaient d'origine magmatique.

Cette hypothèse d'ailleurs était soutenue plus ou moins explicitement par plusieurs chercheurs (Holland, 1972 Rye et Sawkins, 1974 ; Whitney, 1975), cependant que d'autres auteurs esquivait le problème.

L'hypothèse d'une origine non magmatique des fluides métallogénétiques s'est imposée ces dernières années seulement grâce aux travaux sur les isotopes stables, surtout ceux de l'hydrogène et de l'oxygène. Ainsi, Shapper et Taylor (1974) soutiennent que, pendant le refroidissement d'un massif intrusif, il y a un mélange entre fluides magmatiques et superficiels ; Ohmoto et Rye (1974) suggèrent que le gisement classique de Kuroko au Japon a été engendré par circulation convective d'eau de mer et cela, pour la partie tant stratiforme que filonienne de ce dépôt. Il faut rappeler que l'idée de la circulation convective d'eau de mer chaude avait été déjà envisagée par Bartholomé (1969) pour expliquer les grands phénomènes d'albitisation. D.E. White, qui jadis penchait pour une origine magmatique (1957), essaie de faire une classification des fluides hydrothermaux (1974). Selon cet auteur, il y aurait cinq classes différentes de fluides : météoriques, océaniques, « connés évolués », métamorphiques et magmatiques ; ceux d'un gisement hydrothermal feraient partie de l'une ou de l'autre classe ou résulteraient d'un mélange de deux ou plusieurs classes de fluides. A mon avis, il s'agit là d'une tentative peu prudente, car, comme tout le monde le sait, « *natura non facit saltus* ».

La recherche dans le domaine de la géothermie date d'une vingtaine d'années à peine. Utilisée pendant un demi-siècle dans un seul endroit au monde, en Toscane, trop longtemps la géothermie n'a stimulé l'activité intellectuelle que de quelques chercheurs locaux (Marinelli, 1963). Les fluides chauds (dont on exploitait l'acide borique au cours du siècle passé, et dont on utilise l'énergie pour la production d'électricité depuis le début de ce siècle-ci) étaient tout naturellement pour tout le monde d'origine magmatique, par analogie avec les gisements hydrothermaux. En effet, la concentration élevée en acide borique de la vapeur semblait indiquer une parenté flagrante avec la richesse en tourmaline des produits ultimes de la cristallisation des granites.

Le premier modèle théorique du champ géothermique de Larderello (Goguel, 1953) fut formulé un demi-siècle après qu'eut été réalisé le premier essai de production d'électricité par vapeur naturelle (1904). Ce modèle envisageait une circulation convective d'eau d'origine superficielle, réchauffée en

profondeur par la chaleur d'une intrusion magmatique probable.

En 1961, à la Conférence des Nations Unies sur les sources nouvelles d'énergie tenue à Rome, Facca et Tonani (1961) présentèrent un modèle complet, géologique et géochimique, d'un système géothermique qui acceptait les idées de Goguel sur la circulation convective des fluides chauds et leur origine superficielle. A cette conférence, les partisans d'une origine magmatique des eaux venues droit des profondeurs à la surface étaient nombreux, peut-être majoritaires. Neuf ans plus tard, au Symposium de Pise, les « magmatistes » avaient complètement disparu !

L'hypothèse d'une origine profonde des fluides géothermiques achoppait sur l'aspect volumétrique du problème (exiguïté de l'apport éventuel d'eau magmatique dans des formations rocheuses superficielles imprégnées d'eaux de pluie infiltrée; Marinelli, 1963), sur la géochimie (Tonani, 1970) et surtout sur les rapports isotopiques (références in ; White, 1974).

Comme le but de la recherche géothermique est d'exploiter l'énergie des fluides chauds, il faut se préoccuper de leur renouvellement et donc essayer d'en connaître la provenance.

En acceptant une origine superficielle des fluides géothermiques (du moins de la partie aqueuse de ces fluides) et une origine magmatique de la source de chaleur qui alimente la convection thermique, il semble difficile d'accepter un modèle où le magma avec ses composants fluides serait isolé du système hydrothermal à fluides d'origine superficielle.

L'échange thermique entre roches chaudes (à faible conductivité et à faible chaleur spécifique) et fluides aqueux relativement froids (eux aussi mauvais conducteurs et — de surcroît — à chaleur spécifique élevée) n'est possible que par des surfaces de contact gigantesques. Si cette surface de contact était réduite à la seule superficie externe d'un massif intrusif, l'échange serait insignifiant.

Ce simple exemple remet en cause un postulat de la géologie : les systèmes magmatiques en dissipation thermique, conduisant à la formation des roches magmatiques et des fluides résiduels, physico-chimiquement et thermodynamiquement considérés comme systèmes isolés du point de vue chimique, le sont-ils réellement pendant leur mise en place et leur refroidissement ?

Plusieurs faits suggèrent que le système magmatique est d'ordinaire un système ouvert en ce qui concerne l'échange de fluides. Ces échanges interviennent aussi bien avec le magma fondu que durant sa cristallisation fractionnée et cela jusqu'au refroidissement complet.

Voici quelques arguments en faveur de cette hypothèse, et tout d'abord une considération magmatologique.

Les produits de l'activité volcanique sous-marine quel qu'en soit le genre (hyaloclastites, pillows, coulées), montrent que les magmas basaltiques figés par le contact soudain avec l'eau de mer forment parfois des verres semblables aux obsidiennes et qu'on appelle tachylites. Celles-ci contiennent parfois des cristallites mais jamais de vrais cristaux, ce qui démontre que le magma basaltique avait atteint la surface à l'état complètement liquide.

En 1928 déjà, N.L. Bowen avait fait remarquer qu'un magma granitique en équilibre avec des phases solides ne peut dissiper que sa seule chaleur de cristallisation. Tout le monde à présent accepte l'hypothèse que les basaltes sont engendrés par fusion partielle du manteau, lequel contient des phases solides (olivine, pyroxènes et spinelles) semblables, si non tout à fait identiques, à celles qui se forment par la suite dans les basaltes par cristallisation fractionnée. Il est dès lors évident que les basaltes ne peuvent se refroidir sans cristalliser. Ceci vaut pour les endroits où les basaltes se forment et sont donc en équilibre avec les phases solides du manteau, mais a fortiori cela doit valoir aussi pendant la remontée vers la surface où, dans un système isolé du point de vue chimique, il ne semble pas possible de s'éloigner de la courbe du solidus.

En effet, la diminution de pression qui — à température constante — amènerait le magma à la surchauffe, est compensée par la diminution de température due à la dissolution d'autres phases solides, à la détente adiabatique, à la viscosité, mais surtout à la dissipation thermique au contact des parois plus froides du chenal de remontée. Dans la partie haute de ce conduit, il y a de plus le refroidissement provoqué par la séparation et la détente de la phase gazeuse.

De l'avis de tous les spécialistes (Green et Ringwood, 1967 ; O'Hara, 1968), ces pertes thermiques se produisent aux dépens d'une cristallisation plus ou moins importante. Comme par contre les tachylites basaltiques (aussi bien que les obsidiennes acides) montrent que les magmas qui les ont engendrés se trouvaient au-dessus de leurs courbes de solidus, l'explication la plus simple est que ce faux « surchauffage » résulte de l'injection de fluides non « juvéniles ».

Pour les massifs intrusifs, la possibilité que le système magmatique soit ouvert en ce qui regarde les fluides, peut être envisagée sur la base de la salinité des inclusions fluides (Roedder, 1972). Si les stocks intrusifs sont d'origine anatectique, il est difficile d'admettre que de grandes quantités de chlore (comme de n'importe quel autre élément ou composé volatil d'ailleurs) suivent le cycle complet, du sédi-

ment au magma, à travers tous les stades du métamorphisme. Il est de loin plus probable que les chlorures réagissent avec les silicates bien avant la zone d'anatexis pour former des feldspaths, tandis que le chlore est repoussé vers le haut.

Bien différentes sont les conditions dans le cas des massifs intrusifs liés aux magmas calco-alcalins des arcs insulaires et des cordillères. Si l'on accepte l'hypothèse selon laquelle l'origine de ces magmas est liée à la fusion partielle d'un manteau hydraté (Kushiro, 1970) et que cette hydratation dérive de la remontée de l'eau piégée dans la partie superficielle de la plaque lithosphérique en subduction (McBirney, 1970), il est certain aussi que le chlore remontera de la zone de Benioff qui comprend l'ancien fond océanique imprégné d'eau de mer. Il est quand même difficile de supposer que, dans les massifs intrusifs qui sont des différenciés légers de la série calco-alcaline, ce chlore donne des concentrations de chlorures dans l'eau magmatique de loin plus élevées que celles qu'on trouve dans l'eau de mer (Roedder, 1972). En effet, la teneur moyenne en chlore des roches calco-alcalines (Brehler et Fuce, 1974) est relativement importante (200 ppm) par rapport aux roches magmatiques d'autres origines, mais il faut considérer que les magmas des arcs insulaires sont très riches en eau et donc il suffit de moins de 2 % H<sub>2</sub>O pour abaisser dans ces magmas le rapport Cl/H<sub>2</sub>O au-dessous de celui de l'eau de mer.

Quant aux massifs intrusifs de différenciation de magmas subcrustaux (granites alcalins et hyperalcalins surtout), il est difficile d'attribuer une origine profonde à leur contenu en chlore. Si les magmas subcrustaux étaient riches en cet halogène, l'eau de mer aurait été de plus en plus salée pendant l'évolution de la Terre, or cela n'est vraiment pas évident.

Pour conclure, il semble donc peu probable que, dans un système magmatique isolé, les eaux résiduelles soient très riches en chlorures, mais il y a d'autres arguments qui plaident en faveur d'un système ouvert et pour une origine non magmatique des eaux salées.

Si l'on prend en considération les conditions de stabilité des couples adulaire-paragonite et albite-muscovite dans le système K<sub>2</sub>O-Na<sub>2</sub>O-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>-H<sub>2</sub>O en présence de quartz (Orville, 1963 ; Mayer et Hemley, 1967), on voit (fig. 1) que le couple adulaire-paragonite est stable, même dans des solutions où la concentration du potassium est très faible par rapport au sodium. En outre, le champ de stabilité de l'adulaire augmente avec la diminution de la température. Puisque le couple albite-muscovite est de loin plus fréquent dans la nature parmi les produits de transformation hydrothermale, il faut que les solutions chaudes soient beaucoup plus riches en sels de sodium que de potassium. Or, les seules eaux où le rapport K/(K + Na) 10 soit suffisamment bas pour

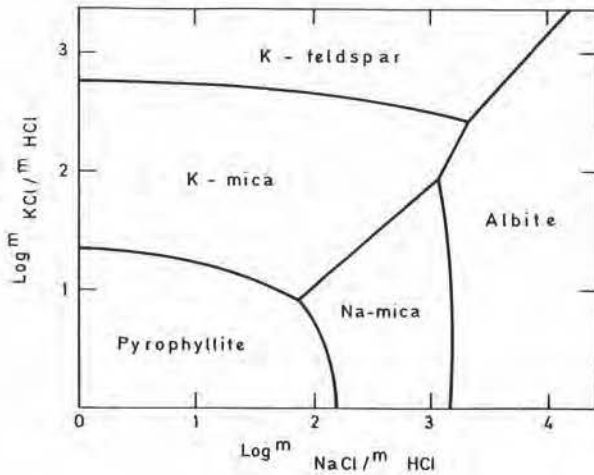


Fig. 1. — Diagramme d'équilibre dans le système  $K_2O - Na_2O - Al_2O_3 - SiO_2 - H_2O$  à  $400^\circ C$ , 15.000 psi de pression totale et en présence de quartz (d'après Mayer et Hemley, 1967).

stabiliser le couple adulaire-muscovite dans l'intervalle  $400^\circ C - 200^\circ C$  sont celles de surface, qui sont en équilibre avec les sédiments ( $K/K + Na$ . 10 dans l'eau de mer = 0,2, dans les eaux de surface = 1,7) et cela à cause du phénomène bien connu d'adsorption de l'ion potassique par les colloïdes et les minéraux argileux des sédiments. Dans les eaux en équilibre avec les roches magmatiques par contre, ce rapport sera plus élevé, probablement compris entre 3,2 et 3,4, moyenne des roches magmatiques. Ce dernier rapport détermine la stabilité du couple adulaire-paragonite.

Ces considérations permettent de supposer que les eaux de surface, surtout celles ayant la composition de l'eau de mer ou avec une salinité encore plus grande, jouent un rôle très important dans la genèse des gisements hydrothermaux.

Venons-en au problème de la circulation des fluides. Le modèle géothermique accepté par tout le monde admet le recyclage convectif des fluides chauds. Ce modèle peut expliquer la genèse de quelques types de gisements hydrothermaux d'une façon plus simple que d'autres hypothèses et avec un rendement thermodynamique plus élevé. Tenons compte d'abord du fait que les facteurs qui peuvent jouer un rôle important dans la précipitation des minéraux hydrothermaux sont la température, la pression hydrostatique aussi bien que celle de certains composants volatils, la réaction avec les roches traversées et les variations d'activité de l'oxygène. Tout cela peut faire varier le pH, l'Eh et les conditions de solubilité en conditionnant la formation des phases solides (Barnes et Czamanske, 1967).

Lorsque, dans un système hydrothermal à flux unidirectionnel ascendant, des fluides chauds saturés en quelque composé utile (par exemple, en ZnS) deviennent sursaturés suite à la variation d'un ou de

plusieurs des facteurs cités ci-dessus, la formation d'un gisement important demandera une quantité de fluide gigantesque. La sursaturation en ZnS provoquera en effet la précipitation d'une faible quantité de blende, tandis que la plus grande partie du ZnS sera perdue.

Dans un modèle convectif par contre, on pourra arriver par recyclage à la précipitation de la plus grande partie du ZnS contenu dans un système hydrothermal avec une consommation infime de fluide. Dans le cycle convectif, il y aura en effet une dissolution en bas, un transport et une précipitation en haut qui se poursuivra jusqu'au refroidissement du système. Rappelons que les études sur la circulation des fluides dans les champs géothermiques (Tonani, 1970) ont montré qu'il y a souvent, dans la partie haute du système convectif, un « flashing » de vapeur associé à des teneurs importantes de gaz. Ceci peut évidemment favoriser un dépôt massif de minerais. Pour donner un exemple, à Salton Sea, en Californie, un sondage amène en surface de la vapeur associée avec 50,4 litres/s d'une saumure très chaude contenant 319 g/litre de sels (Werner, 1970). Cette saumure (tableau I), riche surtout en chlorures de Na, Ca et K, contient, entre autres, 970 ppm de Zn : à débit constant, ce puits aurait produit en 1000 ans 1.283.000 tonnes de zinc...

Dans un système convectif souterrain, une bonne partie de ce zinc en solution se serait déposée progressivement par recyclage, et aurait donné un gisement, tandis que, dans un système unidirectionnel, la plus grande partie de ce métal aurait été perdue par dilution dans les eaux de surface ou directement par les sources thermales. La précipitation du ZnS à partir d'une solution saline par simple baisse de température est en effet très faible (Anderson, 1975).

Un exemple récent de recyclage d'eau thermale peut être tiré de la saumure qui sort d'un sondage foré près de Cesano, à une vingtaine de kilomètres au nord de Rome (Calamai et al., 1975). Programmé pour recherches d'énergie géothermique, ce sondage est localisé dans l'enceinte d'un « maar » typique (que Calamai et al. appellent « petite caldera ») engendré par l'éruption explosive d'un magma très riche en leucite, normal dans la province quaternaire potassique sous-saturée de la côte tyrrhénienne de l'Italie.

Après quelques centaines de mètres de produits pyroclastiques, le sondage a traversé sur 700 m une brèche explosive dont la partie volcanique était tout à fait propylitisée. Ensuite le sondage a été poursuivi jusqu'à 1439 m dans un flysch de type ligure, assez calcaire surtout là où le sondage a été arrêté. Dans ce flysch calcaire, on a trouvé une saumure chaude ( $210^\circ C$ ) associée à la vapeur.

La composition de cette saumure (tableau II) montre, entre autres, un énorme excès de sulfates par

Tableau I

Composition en ppm de la saumure chaude (300° C environ)  
sortant des sondages géothermiques de Salton Sea, Californie  
(d'après Werner, 1971)

Na	51.000	Fe	3.200	NO <sub>3</sub>	35
K	25.000	Mn	2.000	PO <sub>4</sub>	—
Li	300	Al	450	HCO <sub>3</sub>	—
Rb	169	SiO <sub>2</sub>	> 110	As	15
Cs	20	Cl	185.000	Pb	104
NH <sub>4</sub>	482	F	18	Zn	970
Ca	40.000	Br	146	Cu	10
Mg	730	B	520	Ag	1
Sr	750	SO <sub>4</sub>	56		
Ba	200	H <sub>2</sub> S	~ 1		309.877

Tableau II

Composition en ppm de la saumure chaude (210° C)  
du sondage « Cesano I » (20 km au nord de Rome)  
(d'après Calamai et Al., 1975)

Na	78.930,00	As	8,30	HCO <sub>3</sub>	5.850,00
K	48.350,00	Cu	0,012	SO <sub>4</sub>	163.290,00
Li	380,00	Zn	0,04	Cl	42.850,00
Rb	450,00	Pb	0,01	H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub>	15.160,00
Cs	80,00	Co	0,02	F	100,00
Ca	105,00	Ni	0,02	SiO <sub>2</sub>	132,00
Mg	12,00	Hg	0,001		
NH <sub>4</sub>	87,00	U	0,04		356.000,00
Fe	0,70	Ba	0,10		
Mn	0,10	Sr	0,09		

rapport aux chlorures, une quantité inhabituelle de potassium et l'absence absolue de H<sub>2</sub>S. Pour expliquer la grande quantité de sulfates, Calamai et al. (1975) font appel aux évaporites du Trias ; c'est en effet dans ces couches d'anhydrite que se trouvent, 100 km plus au nord, les petits champs géothermiques du Monte Amiata. Outre que la présence de ces évaporites en profondeur n'est pas certaine dans la zone de Cesano, les travaux sur la solubilité du CaSO<sub>4</sub> (Reznikov et Aleinikov, 1953) montrent (fig. 2) que, dans l'eau à haute température, cette solubilité est extrêmement basse (36 mg/litre de CaSO<sub>4</sub> à 240° C et seulement 7 mg/litre à 350° C).

Ne pouvant donc accepter que les sulfates de la saumure du sondage de Cesano dérivent de l'anhydrite d'une série évaporitique, l'explication la

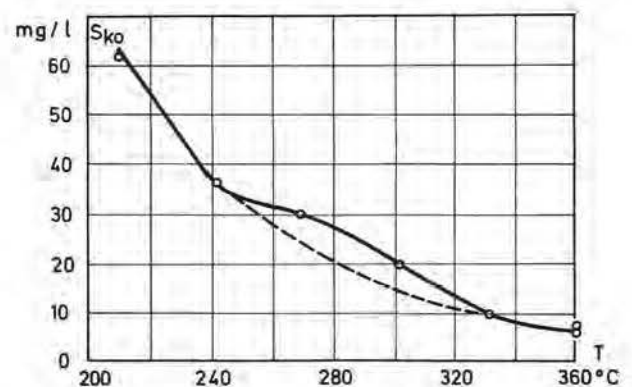


Fig. 2. — Solubilité du CaSO<sub>4</sub>, entre 200 - 360°C (données expérimentales)  
(d'après Reznikov et Aleinikov, 1953)

plus logique semble celle de l'oxydation de l' $H_2S$  dans un système convectif ouvert en haut aux eaux de surface et au milieu atmosphérique grâce à la grande perméabilité initiale des produits pyroclastiques et de la brèche explosive. Rappelons que, dans la région volcanique au nord de Rome, il y a de grandes quantités de soufre qui, en association avec des sulfures de fer, imprègne les produits pyroclastiques. La genèse de ces gisements, dont quelques-uns sont en exploitation, est indiscutablement liée à l'oxydation de l' $H_2S$  : phénomène encore actif en plusieurs endroits. Une hypothèse pareille rend nécessaire un modèle à circulation convective, sans laquelle on ne pourrait jamais oxyder complètement le  $S^{-2}$  à  $S^{-6}$  dans les eaux de profondeur. Les données de Calamai et al. (1975) prouvent que l' $H_2S$  était présent dans le fluide initial, car les volcanites propylitisées rencontrées par le sondage sont riches en pyrite ; des phénomènes classiques de « self-sealing » (Facca et Tonani, 1967) ont protégé ce minéral d'une oxydation ultérieure.

Quant à la grande richesse en potassium (aussi bien qu'en Rb et Cs) de cette saumure, il semble évident qu'elle provient du lessivage des produits volcaniques fort potassiques. Comme dans les laves leucitiques de la région, le rapport  $K/K + Na$ . 10 est en moyenne supérieur à 6, tandis que celui de la saumure chaude est de 2,7 et, comme la teneur en chlore est quand même fort élevée, il est probable que le fluide de Cesano soit de l'eau « connée » d'origine marine dans laquelle s'est dissous (et ensuite oxydé) du sulfure d'hydrogène d'origine plus profonde.

La proportion des métaux lourds dans cette saumure est très faible, ce qui prouve que la circulation convective est limitée à une partie assez superficielle de la croûte et, de surcroît, que les laves leucitiques sont pauvres en ces éléments. Une autre hypothèse pourrait être que les métaux lourds se sont déjà déposés avec la pyrite dans la brèche propylitisée, dont aucune étude sérieuse n'a encore été faite.

Quoi qu'il en soit, ces réflexions sur les systèmes magmatiques ouverts et sur l'importance des massifs intrusifs plutôt comme source de chaleur pour amorcer des systèmes de convection que comme source d'éléments chimiques pour alimenter les fluides hydrothermaux, peuvent servir de point de départ à des échanges d'idées et de connaissances entre spécialistes de géothermie et de métallogénèse.

REFERENCES

ANDERSON G.M., 1975. Precipitation of Mississippi Valley - Type ores. *Ec. Geology*, vol. 70, p. 937-942.  
 BARNES H.L., CZAMANSKÉ G.K., 1967. Solubilities and transport of ore minerals. Dans : H.L. Barnes, *Geochemistry of hydrothermal ore deposit*, p. 334-381.

BARTHOLOME P., 1969. Sur le cycle géochimique et plus spécialement le cycle du sodium. *Ann. Soc. Géol. Belgique*, vol. 92, p. 5-35.  
 BREHLER B., FUCE R., 1974. Chlorine. *Handbook of Geochemistry*, vol. II/4, p. 17-A à 17-O.  
 CALAMAI A., CATALDI R., DALL'AGLIO M., FERRARA G.C., 1975. Preliminary report on the Cesano hot brine deposit (Northern Latium, Italy). *Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources*, San Francisco (sous presse).  
 FACCA G., TONANI F., 1961. Natural steam geology and geochemistry. *United Nations Conf. on New Sources of Energy*, Roma. G/67.  
 FACCA G., 1967. The self-sealing Geothermal Field. *Bull. Volc.*, t. 30, p. 271-273.  
 GOGUEL J., 1953. Le régime thermique de l'eau souterraine. *Annales des Mines*, vol. 10, p. 3-32.  
 GREEN D.H., RINGWOOD A.E., 1967. The genesis of basaltic magmas. *Contr. Mineral Petrology*, vol. 15, p. 103-190.  
 HEMLEY J.J., MEYER C., HODGSON C.J., TATCHER A.R., 1967. Sulfide solubilities in alternation-controlled systems. *Science*, vol. 158, p. 1580-1582.  
 HOLLAND H.D., 1972. Granites, solutions and base metal deposits. *Ec. Geology*, vol. 67, p. 281-301.  
 KUSHIRO I., 1970. Systems bearing on melting of the upper mantle under hydrous conditions. *Carnegie Inst. Washington Yearbook*, vol. 68, p. 240-245.  
 MARINELLI G., 1963. L'énergie géothermique en Toscane. *Ann. Soc. Géol. Belg.*, t. 85, Bull. n. 10, p. 417-438.  
 MARINELLI G., 1969. Some geological data on geothermal areas of Tuscany. *Bull. Volcanologique*, vol. 33, p. 319-333.  
 MAYER C., HEMLEY J.J., 1967. Wall rock alteration. In : H.L. Barnes, *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*, p. 166-235.  
 MCBIRNEY A.R., 1969. Compositional variation in cenozoic calc-alkaline suites of Central America. *Proceedings of the andesite conference. State of Oregon. Dpt. Geol. Mineral Industries*, Bull. n. 65, p. 185-189.  
 O'HARA M.J., 1968. The bearing of phase equilibria studies in synthetic and natural systems on the origin and evolution of basic and ultrabasic rocks. *Earth Sc. Rev.*, vol. 4, p. 69-133.  
 OHMOTO H., RYE R.O., 1974. Hydrogen and oxygen isotopic compositions of fluid inclusions in the Kuroko deposit, Japan. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 947-953.  
 ORVILLE P.M., 1963. Alkali ion exchange between vapor and feldspar phases. *Am. Jour. Sci.*, vol. 261, p. 201-237.  
 PARRY W.T., 1972. Chlorine in biotite from Basin and Range plutons. *Ec. Geology*, vol. 67, p. 972-975.  
 REZNIKOV M.I., ALEINIKOV G.I., 1953. Solubility of calcium sulfate in water at high temperature. *Trudy Moskovskogo Energ. Inst.*, vol. 11, p. 198-205.  
 ROEDDER E., 1972. Data of Geochemistry, 6th Ed. - Composition of fluid inclusions. *U.S. Geol. Survey, Prof. Paper 440 - JJ*.  
 ROEGGER J.S., LOGSDON M.J., YOUNG H.S., BARR H.B., BORCSIK M., HOLLAND H.D., 1974. Halogens in apatite from the Providencia area, Mexico. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 220-240.  
 RYE R.O., SAWKINS F.J., 1974. Fluid inclusion and stable isotope studies on the Casapalca Ag-Pb-Zn-Cu deposit, Central Andes, Peru. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 181-205.  
 SHEPPARD S.M.F., TAYLOR H.P., 1974. Hydrogen and oxygen isotope evidence for the origin of water in the Boulder batholith and the Butte ore deposit, Montana. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 926-946.  
 SOURIRAJAN S., KENNEDY G.C., 1962. The system  $H_2O-NaCl$  at elevated temperatures and pressures. *Am. Jour. Sci.*, vol. 260, p. 115-141.

- TAYLOR H.P., 1974. The application of oxygen and hydrogen isotope studies to problems of hydrothermal alteration and ore deposition. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 843-883.
- TONANI F., 1970. Geochemical methods of exploration for geothermal energy. *Geothermics*, Special Issue 2, vol. 2, Part 1, p. 492-515.
- WERNER H.H., 1970. Contribution to the mineral extraction from supersaturated geothermal brines, Salton Sea area, California. *Geothermics*, Special Issue 2, vol. 2, Part 2, p. 1651-1655.
- WHITE D.E., 1957. Thermal waters of volcanic origin. *Geol. Soc. America Bull.*, vol. 68, p. 1637-1657.
- WHITE D.E., 1974. Diverse origins of hydrothermal ore fluids. *Ec. Geology*, vol. 69, p. 954-973.
- WHITNEY J.A., 1975. Vapor generation in a quartz-monzonite magma : a synthetic model with application to porphyry copper deposits. *Ec. Geology*, vol. 70, p. 346-358.

## DISCUSSION

### G.C. AMSTUTZ

- 1) La théorie de formation de gisements de  $Fe_3O_4$  par des basaltes a été proposée déjà par M. Sokolow il y a environ 20 ans.
- 2) J'aimerais corriger un peu l'interprétation historique donnée par M. Marinelli : Au cours des dernières 10 à 15 années, on n'a pas combattu la théorie hydrothermale « per se ». On a seulement montré que l'extrapolation de cette théorie aux gisements stratiformes sans aucune manifestation magmatique n'est en général pas justifiée. On a donc dû éliminer presque complètement le type de gisement téléthermal.
- 3) La recherche scientifique ne consiste pas en la recherche d'une théorie seule qui explique tous les phénomènes. Il s'agit plutôt d'examiner toutes les possibilités et d'évaluer les probabilités pour chaque cas individuel.

### G. MARINELLI

Je remercie le Prof. Amstutz de l'information bibliographique. Quant aux gisements stratiformes, je suis tout à fait d'accord que la théorie hydrothermale n'a pas été mise en question dans les polémiques sur l'origine non magmatique de ces dépôts.

C'est justement à cause de cela que — en plaisantant dans l'exposé oral — j'ai appelé « guerre coloniale » cette controverse. En effet, à la suite de cette guerre, la théorie magmatique avait seulement perdu des « colonies » (les gisements téléthermaux).

Tout à fait d'accord aussi sur la pluralité des hypothèses génétiques, car il n'est pas possible de ranger toutes les concentrations naturelles de minéraux utiles dans un schéma géologique et géochimique unitaire.

### P. BARTHOLOME

On parle dans la littérature soviétique de solutions transmigmatiques. Si effectivement il est possible que de l'eau entre dans une colonne magmatique à la base et en ressorte au sommet après avoir été transférée de la base au sommet par diffusion ou autrement, alors la quantité de solutions magmatiques (au sens large) peut être extrêmement grande par rapport au volume des roches magmatiques. Mais y a-t-il des preuves ou des indices qu'un tel transfert se produit ?

### G. MARINELLI

Depuis les expériences classiques de R.W. Gorranson sur la solubilité et la mobilité des fluides dans les magmas, beaucoup de chercheurs ont supposé une migration de ces fluides vers les parties plus hautes d'une colonne magmatique.

Cela pourrait se réaliser par une « convection biphase », comme l'a suggéré R.A. Daly, mais seulement dans des systèmes à basse pression, où les fluides peuvent se séparer du magma par vésiculation.

Dans les systèmes magmatiques profonds, seul un modèle proche de celui d'une « diffusion » d'ions est possible ; cela a été envisagé par Saukov en 1933 et ensuite par plusieurs géochimistes soviétiques. Moi aussi, j'ai été jadis un partisan enthousiaste de cette espèce de chromatographie des composés plus mobiles des magmas et j'y crois encore, mais je les considère comme des phénomènes marginaux qui ne peuvent pas changer grand-chose dans la composition chimique des magmas. L'insuffisance de données empêche d'évaluer l'importance d'une diffusion éventuelle de grandes quantités de fluides ; des raisons magmatologiques invitent quand même à la prudence.