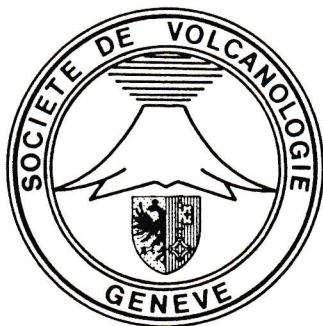


Société de Volcanologie Genève

Case postale 298

CH-1225 CHENE-BOURG

CCP 12-16235-6



Informations (avril 1988)

Voyages

** La société de Volcanologie Genève organise, du 6 au 13 septembre 1988, un voyage sur l'Etna dont le thème sera:

*
* "A LA DECOUVERTE DE L'HISTOIRE GEOLOGIQUE DE L'ETNA" *
*

Il reste encore quelques places, profitez-en! Délai d'inscription 24 avril 1988.

** GEOSCOPE propose, en collaboration avec L.A.V.E. (L'Association Volcanologique Européenne), les voyages suivants:

- l'île de la Réunion, du 20.5 au 3.6 ou du 29.10 au 12.11 1988, Fr 3450.-
- Rwanda-Zaire: les volcans d'Afrique, du 14.6 au 28.6 1988, Fr 3700.-
- les volcans des Canaries, du 11.7 au 23.7 1988, Fr 2550.-
- les volcans en Indonésie, du 3.8 au 24.8 1988, Fr 5050.-
- à la découverte des volcans d'Auvergne, du 18.6 au 25.6 et du 3.9 au 10.9 1988, Fr 1100.-

Réduction pour les membres de la SVG. Tous ces voyages sont guidés par des spécialistes de grande renommée. Informations et documentations gratuites sur demande à: GEOSCOPE, Case Postale 165, 1211 Genève 8, tél.: 022/57-28-58.

** AVENTURE & VOLCANS propose:

- volcans des îles éoliennes, 15 jours, départs 15.5, 12.6, 3.7, 17.7, 31.7, 14.8, 4.9 1988, prix 7990 FF (+ Etna 8990 FF)

- la trilogie des volcans actifs: Etna, Vulcano, Stromboli, 8 jours, départs 8.5, 5.6, 28.8, 18.9, 25.9, 2.10 1988, prix 5990 FF
- volcans de l'île de la Réunion, 15 jours, départs 27.3, 1.5, 12.6, 28.8, 18.9, 2.10, 30.10 1988, prix 13800 FF
- Equateur: la route des volcans, 23 jours, départs 6.8 et 3.9 1988, prix 18750 FF
- volcans du Chili, 21 jours, départ 31.10 1988, prix 19600 FF

Pour tous renseignements supplémentaires, écrire à AVENTURE & VOLCANS, De Saint-Cyr Tanguy, chemin de l'Echo, 69270 Fontaines Saint Martin, France, tél. 78 22 43 76.

Réunions

Nous vous rappelons que les membres de la SVG se réunissent tous les deuxièmes lundi de chaque mois (prochaines séances le 9.5 et 13.6) à la:

**Maison de Quartier de St Jean
rue de St Jean 39-41
Genève**

Ces réunions débutent à 20h.00 et sont agrémentées de projections de diapositives et quelquefois de cassettes vidéo. Vous êtes cordialement invités à y participer activement.

Nous espérons vous voir nombreux! A bientôt!!

Société de Volcanologie Genève

Case postale 298

CH-1225 CHENE-BOURG

CCP 12-16235-6



SVG Informations, No 4, 1988

La géochimie des eaux volcaniques. Un moyen d'étude et de surveillance des volcans actifs.

par S. BIGOT

[Il y a déjà plusieurs semaines, S. Bigot, chercheur au CNRS, du laboratoire de géochimie comparée et systématique de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris, nous a fait parvenir cet article. Il nous présente son domaine de recherche, qui est une voie originale dans le domaine de la surveillance des volcans, grâce à l'étude de la composition chimique des eaux sortant des volcans.]

Nous remercions vivement l'auteur de l'effort qu'il a fait pour nous donner un texte qui soit accessible à tous pour présenter son domaine d'étude.

Pour des raisons techniques nous avons placé en début d'article quelques courtes définitions de termes (marqués par des astérisques dans le texte), qui doivent faciliter la lecture.

**anion: atome ou groupe d'atomes portant une charge électrique négative provenant de la dissociation par électrolyse (séparation électrique) d'un composé.*

**cation: idem avec charge positive.*

**aquifère: qui porte, qui contient de l'eau.*

**diagramme triangulaire: représentation graphique pratique de la composition d'un élément (roches, eaux, etc) en considérant 3 paramètres constitutifs, dont la somme est ramenée à 100.*

**halogène: se dit du chlore et des éléments chimiques de la même famille.*

**hydrique: relatif à l'eau.*

**hydrosphère: partie liquide de la croûte terrestre (opposé à la lithosphère).*

**isotope: éléments chimiques identiques ne différant que par les masses de leurs atomes.*

**météorique (eau): eau de pluie.*

**pH: coefficient caractérisant l'acidité ou la basicité d'un milieu.*

**pyroclastique: ensemble de roches volcaniques fragmentées.*

**volatilité: qualité de se transformer en vapeur.]*

LA GÉOCHIMIE DES EAUX VOLCANIQUES

Un moyen d'étude et de surveillance des volcans actifs

Un volcan est constitué de laves, de cendres, de gaz... et d'eau. Cette eau joue un rôle important dans le dynamisme des éruptions volcaniques. D'une part, la violence d'une éruption, son explosivité, dépend de la richesse en eau du magma. D'autre part, la présence de nappes phréatiques dans l'édifice entraîne, lors de l'ascension du magma, des surpressions considérables qui provoquent une intense fracturation, pouvant aller jusqu'à l'explosion paroxysmique. De nombreux cycles éruptifs commencent par ce type d'éruption, dite phréatique. Elle constitue parfois la seule manifestation du volcan.

Mais l'eau a aussi un autre rôle, moins visible: c'est un excellent véhicule d'échange chimique. L'eau est omniprésente sur les volcans, extrêmement mobile. Elle lessive les roches (magma ou cendres), dissout les produits volatils, condense les gaz magmatiques. Sa composition chimique est le reflet des nombreuses interactions qu'elle a subies sous la surface, souvent à grande profondeur. L'importance de ces interactions est liée, plus ou moins étroitement, à l'activité volcanique. On dispose ainsi d'un moyen d'auscultation permettant de caractériser un système volcanique, d'en suivre l'évolution et, peut-être, d'en prévoir le comportement.

La géochimie des eaux

Qu'est-ce que la géochimie des eaux? Quelles sont les paramètres que l'on étudie? Comment les représente-t-on?

Le terme "géochimie" fut créé en 1838 par un suisse: C.F.Schönbein. La géochimie est une science qui traite de l'abondance des éléments sur la terre, de leur distribution et de leur migration en vue d'aboutir à des lois générales de comportement de la matière. La géochimie des eaux (ou hydrogéochimie) traite plus particulièrement du comportement des éléments dans l'hydrosphère*

Parmi les éléments en solution on distingue: les majeurs, les mineurs, les traces et les isotopes.* Dans une eau naturelle, les éléments majeurs représentent 95 à 98% de la composition chimique totale. Ils comprennent les cations*: calcium (Ca^{2+}), magnésium (Mg^{2+}), sodium (Na^+) et potassium (K^+) et les anions*: bicarbonate (HCO_3^-), chlorure (Cl^-) et sulfate (SO_4^{2-}). L'analyse de ces sept éléments et leur abondance relative permet de caractériser une eau.

naturelle. Ces données sont représentées dans des diagrammes triangulaires* qui constituent une sorte de carte d'identité des eaux étudiées (figure 1). A ces paramètres s'ajoutent la mesure du pH,* représentatif de l'acidité du milieu, et celle de la température.

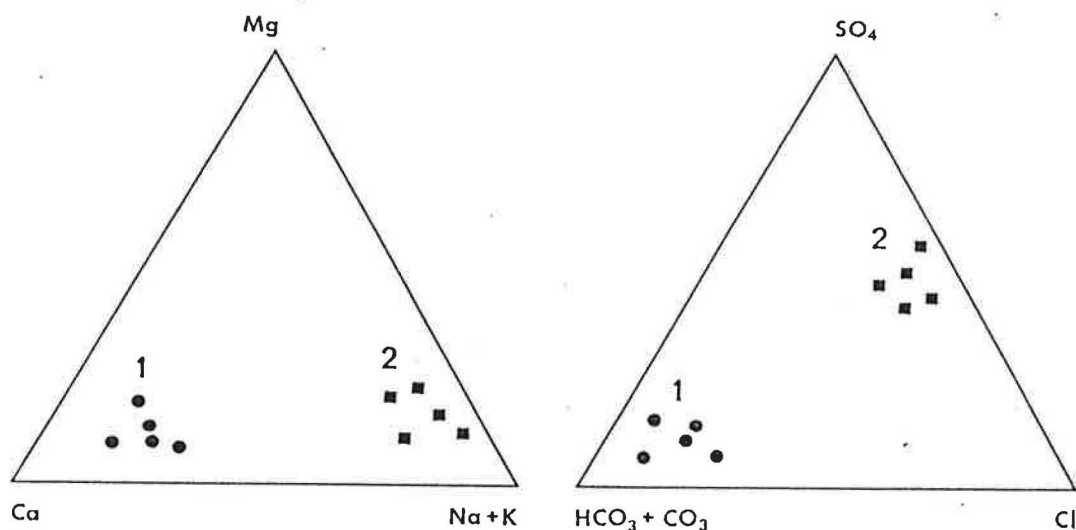


Figure 1: Représentation en diagrammes triangulaires de l'analyse chimique de deux types d'eaux naturelles.

- 1: eaux issues de terrains calcaires, type bicarbonaté calcique.
- 2: eaux volcaniques, type sulfaté-chloruré sodique.

L'étude hydrogéochimique des volcans

L'étude hydrogéochimique d'une zone volcanique consiste tout d'abord à dresser un inventaire de l'ensemble des sources situées sur les flancs du volcan et dans un large périmètre autour de l'édifice. Une étude géologique et hydrogéologique détaillée, menée conjointement, permet de replacer ces émergences dans leur contexte et d'établir de possibles relations avec le volcan ou les terrains sur lesquels il repose. Chaque source fait l'objet d'un échantillonnage. La mesure de la température et du pH est réalisée in situ. Plusieurs prélèvements sont effectués, sous des conditionnements différents, et stockés pour analyse. Celle-ci peut être réalisée en partie sur place, dans un

laboratoire de terrain. L'essentiel des dosages est cependant mis en oeuvre au retour de la mission. Les résultats d'analyses obtenus permettent d'établir une répartition des compositions chimiques en relation avec leur localisation dans la zone volcanique.

Cette étude va permettre de répondre à deux questions essentielles concernant le fonctionnement hydrogéochimique des volcans. Comment s'établissent les circulations de l'eau dans ces édifices? Quels types d'interactions chimiques subissent les eaux dans le système?

La circulation de l'eau dans les volcans

Les premières observations concernant la répartition des sources et leurs caractéristiques physiques, température et minéralisation, posent d'emblée le problème du fonctionnement hydrique * du volcan. Pourquoi observe-t-on, sur un même édifice, une coexistence entre des eaux froides ($T^{\circ} < 20^{\circ}C$) et peu minéralisées et des eaux chaudes sursaturées en éléments dissous, parfois distantes de quelques centaines de mètres seulement. Pourquoi la majorité des sources froides est-elle concentrée à la périphérie du volcan? Existe-t-il une relation entre les sources chaudes, proches du sommet, et les fumerolles. Comment expliquer la présence de sources thermales loin du sommet?

L'étude hydrogéochimique de nombreux volcans, possédant des caractéristiques diverses, a permis de proposer un mode de fonctionnement, un modèle, qui rende compte de l'ensemble des observations effectuées. Ce modèle, qui s'appuie sur des considérations géologiques et hydrogéologiques, s'articule de la manière suivante:

Quelles sont les sources d'alimentation en eau? Comment s'effectue l'infiltration? Quels trajets empruntent les eaux jusqu'aux émergences?

L'alimentation

Les édifices volcaniques constituent, le plus souvent des reliefs majeurs dans leur environnement géographique. Il en résulte des perturbations dans les circulations atmosphériques provoquant des précipitations, généralement élevées, sur l'ensemble de l'édifice. Ces précipitations constituent l'essentiel de l'alimentation en eau des volcans. L'analyse du deutérium (isotope de l'hydrogène) en solution montre que les apports en eau juvénile (eau du magma)

dépasse rarement 5%. Dans les systèmes insulaires, ou proche des côtes, les eaux profondes peuvent être contaminées par de l'eau de mer.

L'infiltration

L'infiltration dépend essentiellement de la nature des terrains traversés. Les terrains volcaniques sont généralement très perméables. Les laves massives ont une perméabilité de fissures. Les pyroclastites* ont une perméabilité d'interstices. Seules les cendres fines peuvent, sous l'action de l'altération, constituer des niveaux imperméables.

Les circulations

On peut distinguer, schématiquement, deux types de circulation (figure 2). Une partie des précipitations s'infiltré rapidement dans l'édifice, atteint le soubassement (souvent sédimentaire) sur lequel repose le volcan. La différence de perméabilité entraîne un écoulement des eaux vers la périphérie. Les émergences sont situées au contact sédiments-formations volcaniques. Ce processus s'applique également aux aquifères*perchés, isolés par un plancher de cendres altérées, imperméables. Une autre partie emprunte le réseau de fractures

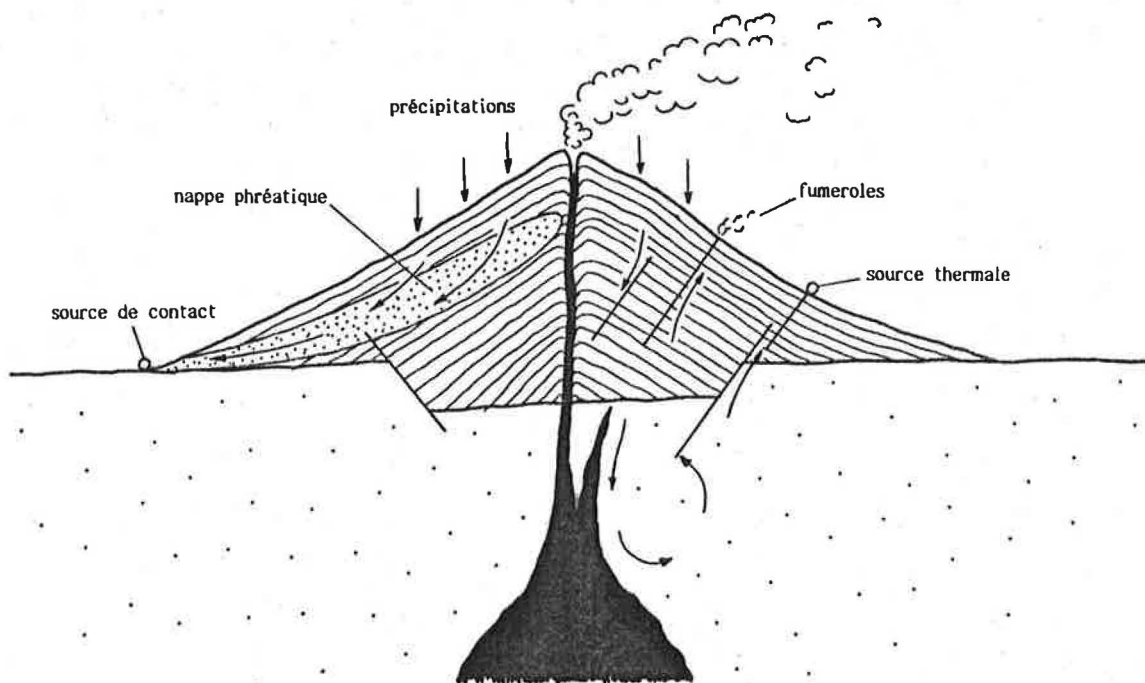


Figure 2: Circulation de l'eau dans les volcans

qui entaille le coeur du volcan, atteint des zones plus profondes où elle subit un réchauffement, et suit un mouvement ascensionnel le long des failles donnant naissance à des sources chaudes, ou des fumerolles si la température dépasse 100°C.

Pendant leur parcours à travers l'édifice, les eaux météoriques * vont entrer en contact avec les matériaux et les produits constitutifs du volcan. Des mécanismes d'échanges vont entrer en jeu, contribuant à modifier progressivement la composition chimique de ces eaux.

Les échanges chimiques au coeur du volcan

La comparaison entre les résultats d'analyse chimique des eaux prélevées sur différents volcans met en évidence deux constatations majeures. Les eaux volcaniques ont des compositions tout-à-fait particulières qui les distinguent radicalement des autres eaux naturelles. D'autre part, elles présentent des caractéristiques extrêmement hétérogènes sur un même édifice.

D'où provient l'enrichissement en sodium et en chlorure observé sur la plupart des volcans? Pourquoi les eaux proches du sommet sont-elles dominées par les sulfates? Comment expliquer la présence d'eaux carbonatées à la périphérie de certains édifices? Pourquoi certaines eaux sont-elles peu minéralisées?

Comme pour l'étude des circulations, la géochimie des eaux permet de proposer un modèle qui tienne compte à la fois des observations de surface et de la connaissance théorique des mécanismes d'échanges au coeur du volcan. Ce modèle s'appuie, bien sûr, sur les échanges dus aux apports magmatiques. Mais nous verrons qu'ils n'expliquent pas tout.

Les échanges d'origine magmatique

Quels sont les mécanismes d'échanges? Existe-t-il des zones privilégiées? Quels sont les éléments chimiques concernés?

A une profondeur de quelques kilomètres, l'apport thermique engendré par le magma entraîne un mouvement ascensionnel des eaux par convection. Dans ce domaine des hautes pressions et hautes températures, les émanations magmatiques sont dominées par des halogènes*alcalins (NaCl, KCl) accompagnés d'acide chlorhydrique (HCl). Ces composés, extrêmement solubles, passent en solution en

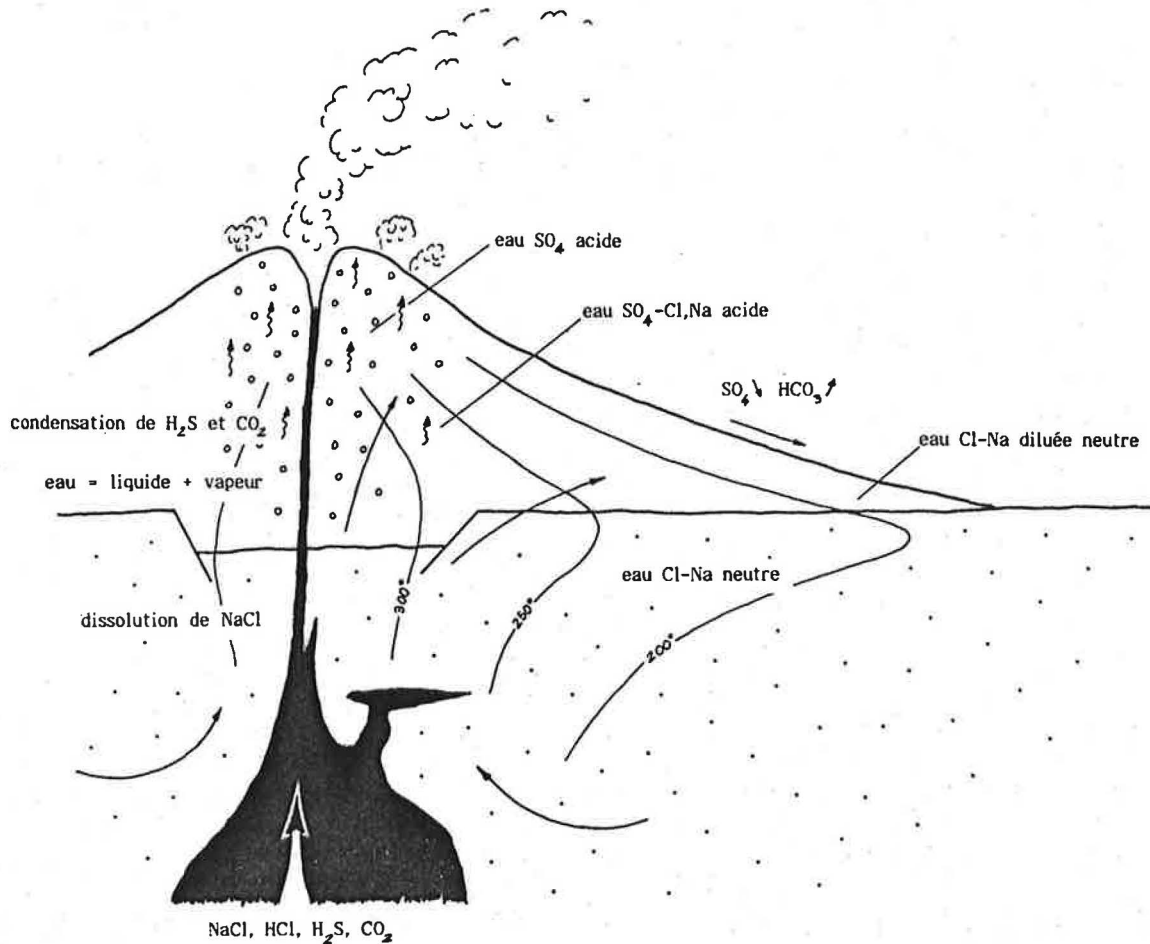
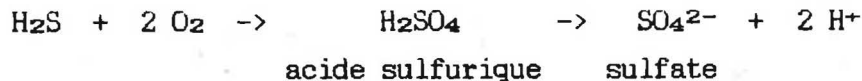


Figure 3: Structure chimique d'un système géothermal actif

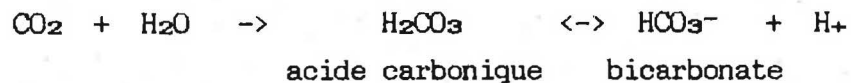
donnant naissance à des eaux riches en chlorures (Cl), sodium (Na) et potassium (K). Celles-ci peuvent rejoindre directement la surface sans subir d'autres apports magmatiques. Elles peuvent également se diluer dans des eaux souterraines superficielles.

Au voisinage de l'intrusion magmatique, à un ou deux kilomètres de la surface en moyenne, l'eau atteint son point d'ébullition dans la relation pression-température. Dans cette zone se produit un transfert des gaz magmatiques (H_2 , CH_4 , CO_2 , H_2S) dans la phase vapeur. Cette phase migre alors indépendamment jusqu'à la surface pour former des fumerolles. Lors de son ascension, elle peut rencontrer des eaux souterraines froides dans lesquelles les gaz solubles (CO_2 , H_2S) vont se condenser. Dans cet environnement, l'oxydation de H_2S produit des eaux sulfatées acides selon la réaction:



Selon l'hydrologie du système en surface, ces types d'eaux peuvent se mélanger et donner des types mixtes, sulfatés-chlorurés acides.

Enfin, le gaz carbonique CO_2 se dissout dans les nappes phréatiques superficielles en donnant des eaux riches en bicarbonates, selon la réaction:



Ces apports, s'ils jouent un rôle prépondérant dans l'acquisition en éléments dissous des eaux volcaniques, ne rendent pas entièrement compte des compositions observées. En particulier, pourquoi le calcium et le magnésium, dont on sait que les composés ne sont pas suffisamment volatils pour quitter le magma, sont-ils enrichis dans ces eaux. Ces apports impliquent un autre type d'échange. Des études expérimentales d'interactions eau-roche ont montré que la concentration en éléments majeurs était entièrement contrôlée par des réactions dépendantes de la température. Ces réactions expliquent les compositions obtenues.

Les échanges avec l'encaissant induits par l'intrusion magmatique

Ces échanges sont, dans une certaine mesure, indépendants de la nature du magma et du niveau d'activité du système. Ils résultent de l'apport thermique engendrée par l'intrusion magmatique. L'élévation importante de la température, ajoutée au mouvement des fluides, entraîne des interactions eau-roche extrêmement vigoureuses. Ces interactions sont encore accentuées par l'acidité du milieu, due à la condensation des gaz magmatiques. Il en résulte une altération importante des silicates constituant les roches volcaniques et la libération de silice (SiO_2), de calcium, de magnésium, de sodium et de potassium. Les études expérimentales ont montré que la teneur en ces éléments, ou leur rapport, permettait de calculer la température à laquelle se sont effectués les échanges (géothermomètres).

Enfin, à ces deux grands processus d'échanges entre les eaux et le volcan, s'ajoutent des apports locaux liés au contexte géographique et géologique dans lequel le volcan s'est mis en place.

Les échanges dus à l'environnement du volcan

On a vu que les eaux des volcans insulaires, ou proche des côtes, pouvaient subir des contaminations par l'eau de mer. Il en résulte un enrichissement en Na, Cl et SO₄. D'autre part, lors de leur circulation en profondeur, les eaux volcaniques peuvent entrer en contact avec les terrains sédimentaires sous-jacents. La présence d'un soubassement riche en gypse (CaSO₄), en sel (NaCl), introduit des modifications, parfois très sensibles, des compositions observées. Cependant, ces contaminations restent des cas d'espèces et peuvent être prises en compte localement.

L'application à la surveillance et à la prévision volcanologique

Dans quelle mesure une composition chimique donnée reflète-t-elle une contribution du magma? Quels sont les éléments chimiques les plus représentatifs des apports d'origine profonde? Comment évoluent-ils en période éruptive?

En raison de la diversité de structure des édifices volcaniques, chaque système a un comportement qui lui est propre. Cependant, de l'ensemble des observations réalisées on peut tenter de dégager un certains nombres de points communs. On a vu que les éléments en solution pouvaient avoir trois origines: les gaz et les produits volatils magmatiques, les roches volcaniques et l'environnement (eau de mer, sédiments). On a vu, d'autre part, que l'essentiel de la composition chimique d'une eau était défini par les ions Cl, SO₄, HCO₃, Na, K, Ca et Mg. En faisant totalement abstraction des apports liés à l'environnement, qui sont extrêmement variables selon les édifices, on peut dresser un bilan de l'origine et du comportement de ces éléments en solution, en relation avec l'activité volcanique.

Calcium et magnésium

La volatilité* des composés chimiques de ces éléments, à haute température, n'est pas suffisante pour expliquer leur départ du magma. On considère qu'ils proviennent exclusivement de l'altération des roches volcaniques. Ces éléments peuvent fournir des indications sur le taux d'altération des roches encaissantes. Le rapport Ca/Mg est utilisé pour caractériser la nature des roches lessivées.

Sodium et potassium

Leurs composés avec les éléments halogènes (chlorure, fluorure, iode, bromure) sont volatils à haute température (300°C environ). Les ions Na et K proviennent, d'une part du dégazage du magma, d'autre part du lessivage des roches encaissantes. Ils sont caractéristiques des zones volcaniques mais ne peuvent être utilisés pour des prévisions à court terme. Le géothermomètre Na/K est fréquemment utilisé pour déterminer la température des échanges en profondeur.

Carbonates

Ils résultent de la dissolution du gaz carbonique CO₂. Leur origine est donc principalement magmatique. On peut noter, cependant, un possible équilibre avec le CO₂ atmosphérique dans les zones superficielles. Les carbonates sont difficiles à interpréter. Dans les zones actives, en raison du pH très acide des solutions, les carbonates sont sous forme d'acide carbonique et le plus souvent absents des bilans ioniques. Dans les zones périphériques, les carbonates sont rapidement limités en solution par la précipitation de calcite (CaCO₃) qui consomme l'excès de CO₂.

Sulfates et chlorures

Ils proviennent de la condensation des gaz volcaniques acides (H₂S, HCl) et sont essentiellement d'origine magmatique. Leur concentration en solution est le reflet, plus ou moins direct, de l'activité volcanique. Ces éléments sont donc parfaitement adaptés à la surveillance volcanologique. Ainsi, le dégazage du magma qui précède, puis accompagne, une éruption va se traduire par une augmentation de la teneur en chlorures et en sulfates dans les eaux volcaniques.

De plus, on peut utiliser le rapport SO₄/Cl pour suivre l'évolution d'un système. Cette méthode d'interprétation s'appuie sur l'hypothèse, généralement admise, selon laquelle le chlore serait plus soluble que le soufre dans le magma. En d'autres termes, lors du dégazage, le soufre s'échappe plus facilement du magma que le chlore. Une augmentation de SO₄ traduit donc l'arrivée d'un magma frais, peu dégazé. On constate, en effet, un accroissement de l'émission de SO₄ pendant les périodes explosives. Les rapports SO₄/Cl faibles correspondent aux périodes inactives.

Conclusion

La volcanologie connaît un essor considérable depuis quelques dizaines d'années. Cette accroissement notable des connaissances dans ce domaine résulte d'une meilleure compréhension des phénomènes à l'échelle terrestre, de l'amélioration des techniques d'investigation, de l'augmentation des observations de terrain et du développement de nouvelles méthodes de recherche.

La géochimie des eaux fait partie de ces voies nouvelles. Elle fournit des informations qui enrichissent l'interprétation des phénomènes et permettent d'aller plus avant dans la compréhension et la modélisation des processus.