

La présence de concentrations importantes en eau dissoute (jusqu'à environ 10 % du poids) dans les magmas terrestres est une des caractéristiques spécifiques de notre planète. Plus que tout autre constituant, l'eau modifie en profondeur les propriétés physiques et chimiques des magmas. Elle affecte des processus géologiques fondamentaux comme la fusion partielle, l'ascension, l'éruption, le dégazage et la cristallisation des magmas. C'est un agent essentiel dans le transport et la redistribution des métaux dans les gisements magmatiques-hydrothermaux.



De l'eau dans les magmas

24

LIQUIDE SILICATÉ



Michel Pichavant

DIRECTEUR DE RECHERCHE CNRS
INSTITUT DES SCIENCES DE LA TERRE
D'ORLÉANS, UMR 6113
pichavan@cnr-orleans.fr

Des observations de terrain à la mesure de la concentration en eau des magmas

L'idée que des quantités significatives d'eau puissent être présentes dans les magmas terrestres ne s'est imposée que récemment. Nourrie à l'origine de certaines observations de terrain, pegmatites et manifestations hydrothermales associées aux granites, ou roches migmatitiques interprétées en terme « d'anatexie humide » (fusion partielle en présence d'une phase fluide libre), la notion de magma hydraté est ensuite confortée par les mesures de composition des gaz volcaniques, dont les premières datent du début du XX^e siècle. Toutefois, ce sont surtout les données expérimentales et les développements analytiques qui vont fournir les preuves concrètes. Les premières mesures de solubilité à haute pression établissent la possibilité d'une dissolution de quantités importantes d'eau, jusqu'à plusieurs % poids, dans les liquides silicatés [Goranson (1931)]. La démonstration expérimentale [Tuttle and Bowen (1958)] que la majorité des roches granitiques et rhyolitiques coïncide avec la composition des points minima et eutectiques du système quartz-albite-orthose en présence d'un excès d'eau établit à la fois l'origine magmatique du granite et le caractère fortement hydraté des liquides silicatés impliqués. Par la suite, il faudra le développement d'approches théoriques, principalement thermodynamiques, expérimentales et analytiques combinées, pour quantifier la teneur en eau des magmas

Éruption volcanique du 8 janvier 2010
à Soufrière Hills, Montserrat.

Vulcanian eruption on 8 January 2010,
Soufrière Hills volcano, Montserrat.

© Montserrat Volcano Observatory (MVO).

naturels. Parmi les approches les plus utilisées à l'heure actuelle pour mesurer les concentrations en eau des magmas, mentionnons notamment (1) les méthodes expérimentales basées sur la détermination des équilibres de phases en fonction de la teneur en eau dissoute et (2) les techniques d'analyse directe des inclusions vitreuses piégées dans les phénocristaux des roches magmatiques, avec des méthodes comme la microspectroscopie infra-rouge et, plus récemment, la microspectroscopie Raman.

Les teneurs en eau des magmas naturels

Les données dont on dispose actuellement sont encore très loin de couvrir le spectre complet des magmas naturels. Cette base de données, bien que fragmentaire, montre toutefois clairement que les concentrations en eau dans les magmas terrestres sont variables et dépendent à la fois du type de série magmatique et, au sein d'une même série, de la composition du liquide silicaté. Une compilation récente des données des inclusions vitreuses (*figure 1*) montre que les concentrations en eau les plus élevées (de l'ordre de 10 % poids au maximum) se rencontrent dans les séries magmatiques des zones de subduction. Notons toutefois que des concentrations comparables à ces dernières se trouvent également dans d'autres séries magmatiques, qu'il s'agisse de séries plutoniques à caractère anorogénique avec amphibole exprimée ($H_2O > 5-6$ % poids, [Dall'Agnol *et al.* (1999)]) ou de produits leucogranitiques à biotite et muscovite issus de l'anatexie crustale ($H_2O = 6-8$ % poids, [Scaillet *et al.* (1995)]). Il importe de souligner que les concentrations en eau élevées ne se limitent pas aux compositions de magmas différenciés. Les liquides basaltiques de l'arc des Petites Antilles présentent ainsi des concentrations de l'ordre de 6-8 % poids pour les basaltes alumineux, et autour de 4-5 % poids pour les basaltes primitifs [Pichavant *et al.* (2002 ; 2007)], les valeurs obtenues expérimentalement et par analyse des inclusions vitreuses [Bouvier *et al.* (2008)] étant en bon accord. On voit donc que les magmas basaltiques terrestres peuvent être hydratés même si des différences importantes apparaissent avec le type de lignée magmatique et le contexte géodynamique (*figure 1*). Mentionnons ici la controverse actuelle sur la teneur en eau des liquides parents des komatiites [Arndt *et al.* (1998)], avec la possibilité que des taux de fusion élevés puissent s'expliquer par une fusion partielle hydratée du manteau à l'Archéen.

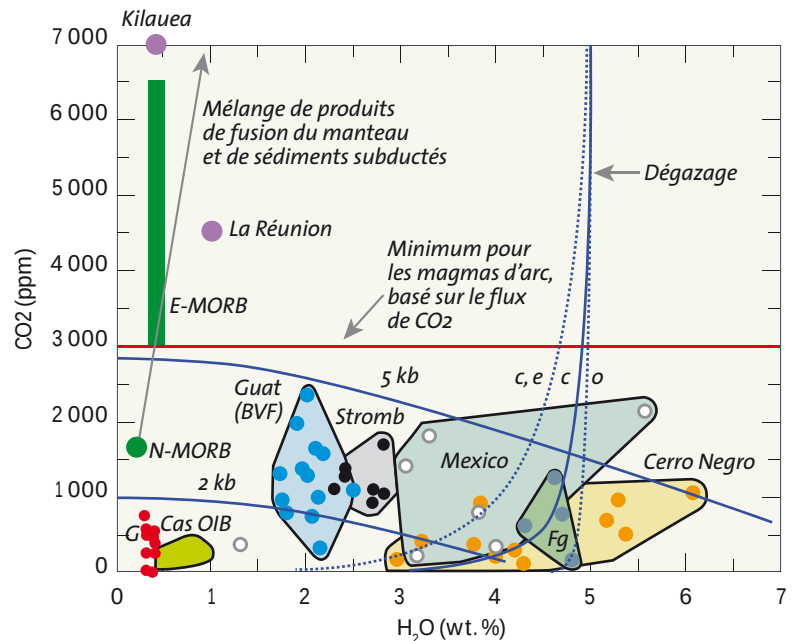


Fig. 1 : Compilation des données de concentration en eau et en CO₂ dans les inclusions vitreuses des basaltes. Données des volcans d'arc d'Amérique Centrale (Fuego, Fg ; Cerro Negro ; Guatemala en arrière du front volcanique, Guat BVF), de la ceinture volcanique trans-mexicaine (Mexico), du Stromboli (Stromb) et du Galunggung (G). À titre de comparaison, les données pour les basaltes océaniques (MORB, point et rectangle), et pour le Kilauea, La Réunion et un basalte de type île océanique de la chaîne des Cascades (Cas OIB) sont figurées.

D'après Wallace (2005).

Fig. 1: Compilation of water and CO₂ concentration data in glass inclusions from basalts. Data for arc volcanoes from Central America (Fuego, Fg; Cerro Negro; Guatemala behind the volcanic front, Guat BVF), from the trans-Mexican volcanic belt (Mexico), Stromboli (Stromb) and from Galunggung (G). For comparison, data for MORBs (dot and rectangle), Kilauea, Reunion Island and for one OIB from the Cascades (Cas OIB) are shown.

From Wallace (2005).

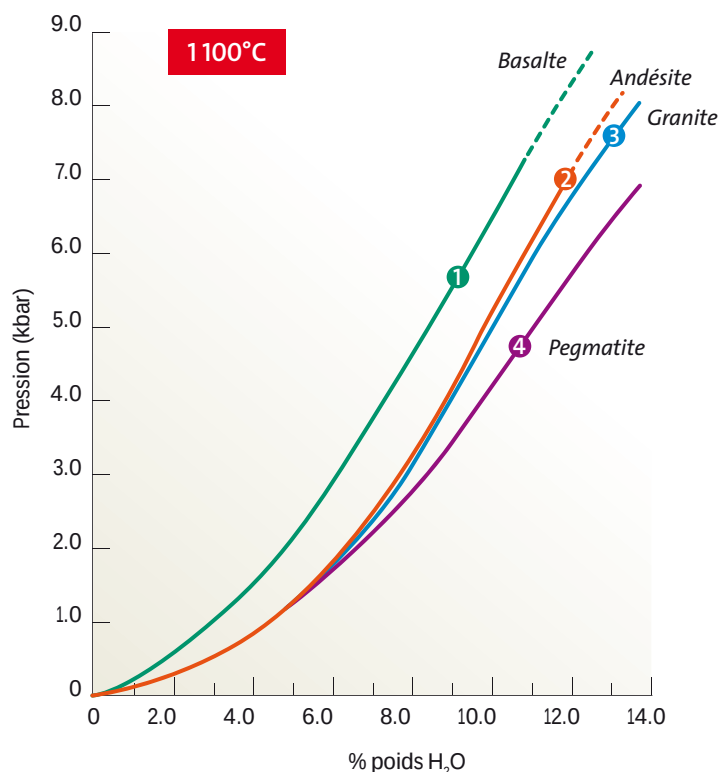
Les concentrations en eau les plus élevées (de l'ordre de 10 %) se rencontrent dans les séries magmatiques des zones de subduction.

Fig. 2 : Variation de la concentration en eau dissoute en fonction de la pression pour différents liquides silicatés de composition (1) basaltique, (2) andésitique, (3) granitique et (4) pegmatitique.
Données à 1100 °C et à l'équilibre avec une phase vapeur composée essentiellement d'eau pure (définition de la solubilité de l'eau). Les données montrent le rôle essentiel de la pression et, dans une moindre mesure, de la composition du liquide sur la solubilité de l'eau.

D'après Burnham (1979).

Fig. 2: Variation of dissolved water concentration versus pressure for various silicate melts of (1) basaltic, (2) andesitic, (3) granitic and (4) pegmatitic composition. Data at 1100°C and at equilibrium with excess vapour (definition of the solubility of water). The data show the critical influence of pressure and, to a lesser extent, of melt composition on the solubility of water.

From Burnham (1979).



Ces données soulignent le contraste important entre les concentrations en eau des liquides magmatiques naturels, telles qu'elles peuvent être évaluées à partir des approches expérimentales ou analytiques modernes, et les concentrations en eau conventionnelles, obtenues à partir de méthodes globales de géochimie en roche totale. Ce contraste est évidemment pour l'essentiel imputable au caractère généralement fortement dégazé (et donc déshydraté) des roches magmatiques, en particulier des roches plutoniques. La concentration en eau d'une grano-diorite contenant 10 % poids d'amphibole est environ vingt fois inférieure à celle du liquide silicaté à partir duquel ce minéral a cristallisé. Ceci souligne les limitations de l'utilisation des données en roche totale pour estimer la concentration en eau des magmas naturels. Dans le même ordre d'idées, certains indicateurs minéralogiques comme la présence de minéraux hydroxylés dans l'assemblage des phases (amphibole ou biotite) sont à manipuler avec précaution. L'approche expérimentale nous renseigne que la cristallisation de liquides silicatés fortement hydratés n'est pas toujours susceptible de fournir ces phases hydroxylées dont la stabilité dépend de plusieurs paramètres. Par ailleurs, l'amphibole peut cristalliser à partir de clinopyroxène en conditions subsolidus et la muscovite être secondaire dans de nombreux granites. Ces considérations soulignent la principale difficulté quand on aborde la question de l'eau dans les magmas, à savoir l'estimation précise des concentrations impliquées, dans la mesure où l'empreinte des conditions lors de l'évolution magmatique est en grande partie effacée dans les stades finaux de la cristallisation.

Il convient de noter que des concentrations en eau de l'ordre de 5 voire de 10 % poids dans les magmas terrestres représentent des valeurs tout à fait considérables quand on les exprime en grandeurs molaires. À titre d'exemple, dans un liquide silicaté de composition albitique ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) contenant 10 % poids d'eau dissoute, 34 % des unités silicatées seront hydroxylées (calculs faits sur la base d'un oxygène dans la formule chimique et en supposant que l'eau se dissout uniquement sous la forme d'espèces hydroxylées OH). Il est clair que de telles concentrations vont nécessairement conduire à des modifications extrêmement marquées dans la spéciation (à l'échelle atomique) et la structure du silicate fondu. On comprend mieux l'influence considérable de l'eau sur les propriétés physiques et chimiques des magmas (*cf. ci-après*). Enfin, il est important de bien faire la distinction entre concentration en eau d'un liquide silicaté (l'eau est un constituant chimiquement dissous dans la structure du silicate fondu) et concentration en eau d'un magma, système polyphasé pouvant comprendre un liquide silicaté (qui peut être partiellement hydraté), une phase gazeuse (généralement constituée en majorité d'eau et dans une moindre mesure de CO₂ et d'espèces soufrées) et des phases cristallisées pouvant être soit anhydres soit hydroxylées.

“L'eau exerce une influence considérable sur la cinétique de cristallisation.”

Rôle de l'eau sur les propriétés physiques et chimiques des liquides silicatés

L'eau exerce une influence considérable sur la viscosité, la conductivité électrique, la température de début de cristallisation, la nature de l'assemblage de phases apparaissant dans la course de cristallisation, la diffusivité chimique des cations, la cinétique de cristallisation, pour ne citer que quelques propriétés essentielles des silicates fondus. Il est important de préciser que, dans ce qui suit, le rôle de l'eau sera uniquement considéré *via* les modifications apportées aux propriétés du silicate fondu. Les caractéristiques des systèmes magmatiques multiphasés (mousses, émulsions) ne seront pas abordées ici.

L'influence de l'eau sur la viscosité (*figure 3*) est emblématique des modifications concernant les propriétés physiques. L'addition d'eau conduit à des abaissments de la viscosité de plusieurs ordres de grandeur, d'autant plus importants que la température décroît, du liquide stable jusqu'au liquide surfondu. Les abaissments de viscosité les plus importants sont observés pour les premiers 2 ou 3 % poids d'eau ajoutés. Les données dont on dispose maintenant sur la viscosité des liquides magmatiques hydratés montrent que l'effet de l'eau varie en importance avec la composition. L'abaissement de la viscosité est d'autant plus marqué que le liquide silicaté est polymérisé (granites, rhyolites). Pour les compositions dépolymérisées (basaltes), la diminution de la viscosité est moins importante, les données pour l'andésite (*figure 3*) illustrant un cas intermédiaire.

Tout aussi marquée est l'influence de l'eau sur les propriétés chimiques des liquides silicatés. L'abaissement des températures liquidus (de début de cristallisation) en présence d'eau dissoute est une des caractéristiques les mieux établies par les expérimentations, que ce soit pour des systèmes simples ou pour des compositions de liquides silicatés naturels. Là encore, des différences existent dans le détail sur l'importance des modifications introduites par la présence d'eau, ces dernières tendant à être plus importantes pour les compositions de liquides silicatés granitiques ou rhyolitiques que pour les basaltiques. Ces différences de « susceptibilité » des liquides silicatés vis-à-vis de l'eau dissoute sont bien illustrées par les données expérimentales dans le système diopside-anorthite (*figure 4*). Le constituant anorthite du liquide silicaté est fortement affecté par la présence

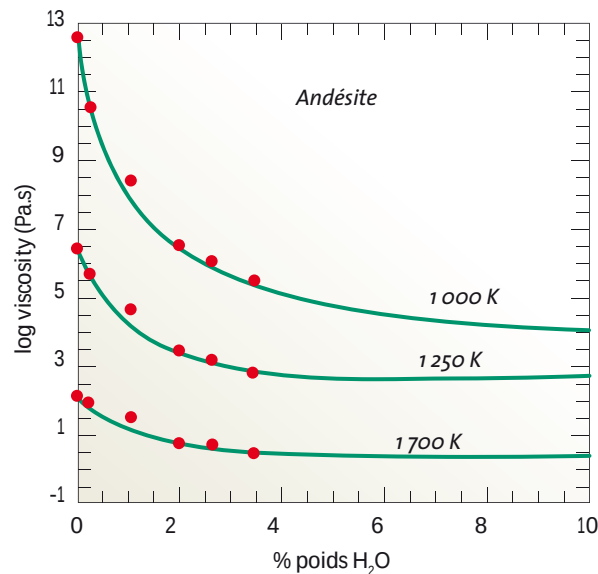


Fig. 3 : Variation de la viscosité d'un liquide silicaté de composition andésitique en fonction de la teneur en eau dissoute à différentes températures.

D'après Mysen et Richet (2005).

Fig. 3: Variation in the viscosity of an andesite melt with the amount of dissolved water at different temperatures.

From Mysen and Richet (2005).

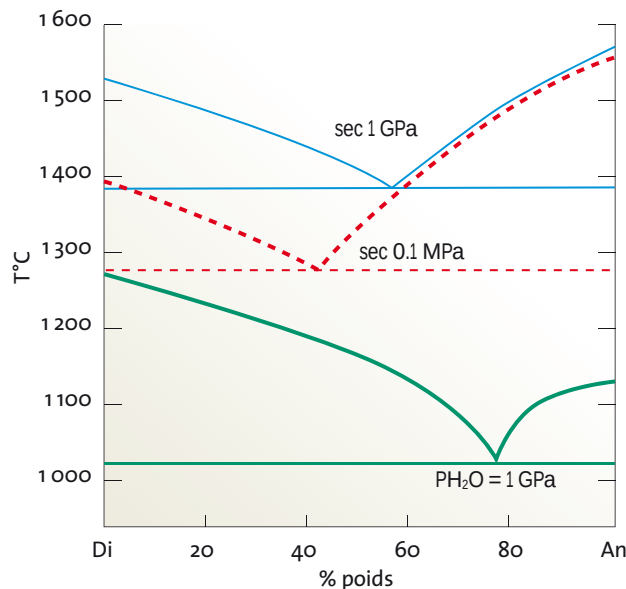


Fig. 4 : Diagramme de phases du système diopside (Di) – anorthite (An) (1) à sec à 0,1 MPa (1 atmosphère), (2) à sec à 1 GPa et (3) avec un excès d'eau à 1 GPa ($PH_2O = P_{totale}$).

D'après Winter (2001).

Fig. 4: Phase diagram of the diopside (Di) – anorthite (An) system for (1) dry conditions at 0.1 MPa (1 atmosphere), (2) dry conditions at 1 GPa and (3) wet conditions at 1 GPa ($PH_2O = P_{total}$).

From Winter (2001).



◀ **Ponces de l'activité récente du complexe volcanique de l'île de Pantelleria (Italie). Ce dépôt résulte du dégazage et de la fragmentation d'un magma hydraté dans le conduit.**

Pumice stone from recent activity in the volcanic complex on Pantelleria Island (Italy).

This deposit results from the degassing and fragmentation of water-rich magma in the conduit.

© M. Pichavant.

d'eau, comme le montre l'abaissement très important de la température liquidus de l'anorthite à 1 GPa (environ 375 °C), et le rétrécissement très net du domaine de cristallisation primaire de l'anorthite en conditions saturées en eau. En comparaison, le constituant diopside est beaucoup moins affecté par l'addition d'eau. Ce type d'interaction « sélective » de l'eau vis-à-vis des différents constituants du liquide silicaté est à l'origine de l'effet modificateur de H₂O sur les diagrammes de phases, propriété qui peut être directement exploitée pour la détermination précise des concentrations en eau des magmas naturels.

Quelques implications pour le système Terre

L'importance des modifications apportées aux propriétés physiques et chimiques des magmas confère à l'eau un rôle particulier dans de nombreux processus pétrogénétiques tels que la fusion partielle, les mécanismes d'ascension, de mise en place et d'éruption, dans le dégazage et la cristallisation des magmas.

Le magmatisme d'arc fournit une remarquable illustration de ces processus. Les zones de subduction sont un contexte géodynamique d'importance clé pour la formation de la croûte continentale, dont la composition dans le cas de la Terre est très particulière. Bien que certains aspects des processus à l'origine de la croûte continentale soient encore en discussion, il est clair que des mécanismes de fusion partielle hydratée, soit de sources mantelliques, soit de mélanges de roches basaltiques et sédimentaires subductées, sont impliqués. L'abaissement préférentiel des températures de cristallisation du plagioclase par rapport à celles des pyroxènes

“ Les séries magmatiques d'arc reflètent le caractère hydraté des magmas et des liquides. ”



Water in Magma

The idea that significant amounts of water can be present in terrestrial magmas is relatively new. Initially based on field observations, the concept of hydrous magma was first supported during the last century by volcanic gas data.

Later, decisive proof was brought by experimental results and analytical measurements. Today, precise quantification of the water concentration in natural magmas has become the challenging task. To achieve this goal, modern approaches include experimental phase equilibria and the direct analysis of water in glass inclusions. Although the current database is not yet complete, available data stress the variability of water concentrations in terrestrial magmas. Many magmatic series, either from plutonic or volcanic environments, are relatively water-rich. Basaltic compositions from subduction zone settings can have water concentrations exceeding 5 wt %. When recast in mole fractions, these concentration data show that water in melts can be present in the same range of concentrations as silicate units, explaining its dramatic influence on the physical and chemical properties. For example, water can lower the viscosity of silicate melts by several orders of magnitude. The liquidus temperatures of silicate melts can be depressed by several hundreds of degrees. As a consequence, water exerts a specific influence on a wide range of petrogenetic processes such as partial melting, ascension, emplacement and eruption of magmas on Earth, as well as on magma crystallization, degassing and transfer of metals towards magmatic-hydrothermal ore deposits.

“*La cristallisation de magmas hydratés libère des quantités importantes d'eau.*”

et de l'olivine en présence d'eau (figure 4) conduit à des liquides résiduels appauvris en constituants ferromagnésiens et enrichis en Ca et Al, deux caractéristiques chimiques importantes de la lignée calco-alcaline et de la croûte continentale dans son ensemble.

Les séries magmatiques d'arc se distinguent aussi par des assemblages de phases spécifiques, qui reflètent le caractère hydraté des magmas et des liquides silicatés impliqués. L'amphibole peut ainsi apparaître dans la course de cristallisation dès les compositions basaltiques évoluées. La conséquence directe est une augmentation très importante de la teneur en silice des liquides résiduels, avec l'obtention de liquides dérivés typiques de la composition des roches intermédiaires de la série calco-alcaline (andésite basaltique, andésite, dacite). À titre de comparaison, dans le cas des séries basaltiques pauvres en eau, les lignées de différenciation ne montrent des enrichissements en silice (couplés avec une importante augmentation de la concentration en fer) que très tardivement, pour des taux de cristallisation importants. La plupart des roches andésitiques récentes en contexte d'arc provient donc de la différenciation de liquides basaltiques hydratés. Il convient toutefois de distinguer ici le cas des adakites, roches intermédiaires qui sont interprétées comme des produits de fusion partielle de sources metabasaltiques subductées et dont les signatures en éléments traces sont spécifiques.

Les mécanismes d'ascension, de mise en place et d'éruption des magmas d'arc se distinguent par des manifestations explosives typiques (produits pyroclastiques, dômes de lave) qui traduisent le caractère hydraté des magmas et dont la variabilité est imputable à la complexité des modalités de dégazage, ces derniers impliquant essentiellement l'eau mais aussi les autres constituants volatils présents. Certains constituants des phases fluides magmatiques (soufre) jouent un rôle important dans le contrôle de la chimie de l'atmosphère, ainsi que dans les processus de transfert des métaux vers l'encaissant. Le magmatisme d'arc est en effet

un important pourvoyeur de substances minérales et d'éléments métalliques (Au, Cu, Ag, Mo...). Ici, l'eau intervient à plusieurs titres. Tout d'abord, sa capacité de contrôler la structure des liquides silicatés affecte l'incorporation et la concentration au stade magmatique des éléments métalliques. Ceci peut conduire dans certaines conditions favorables (de composition et structure du liquide silicaté, et des paramètres rédox) à la genèse de magmas spécialisés qui constituent de véritables pré-concentrations pour certains éléments métalliques. Ensuite, la cristallisation de magmas hydratés va pouvoir libérer des quantités importantes d'eau et de fluides dans la périphérie des corps magmatiques. Ces systèmes magmatiques-hydrothermaux (la phase fluide étant principalement d'origine magmatique) vont être susceptibles de transférer le stock métal, de le redistribuer et le redéposer sous la forme de gisements porphyriques et épithermaux. Toutefois, bien que l'eau intervienne de façon déterminante dans ces processus de concentration et de transfert des éléments métalliques, il est clair que d'autres constituants volatils sont impliqués de façon active dans la genèse de ces gisements métalliques en contexte d'arc. C'est le cas en particulier du soufre dont le rôle dans les mécanismes de complexation des métaux est critique. En tant que constituant volatil majeur, l'eau a une influence déterminante sur l'ensemble de la gamme des processus pétrogénétiques, et les données dont on dispose maintenant permettent d'en mieux cerner les différents effets. Mais, les progrès réalisés dans notre connaissance de l'influence de l'eau peuvent être vus comme une étape vers la nécessaire prise en compte du rôle de l'ensemble des constituants volatils majeurs dans les processus magmatiques. ■

Bibliographie : Arndt N., Ginibre C., Chauvel C., Albarède F., Cheadle M., Herzberg C., Jenner G., Lahaye Y. (1998) – Were komatiites wet? *Geology*, 26, 739-742. Bouvier, A.-S., Metrich, N., Deloule, E. (2008) – Slab-derived fluids in magma sources of St. Vincent (Lesser Antilles Arc): volatile and light element imprints. *J. Petrol.* 49, 1427-1448. Burnham, C.-W. (1979) – The importance of volatile constituents. In: Yoder, H. S. Jr. (ed.), *The evolution of igneous rocks*, Princeton University press, 437-482. Dall'Agnol, R., Scaillet, B., Pichavant, M. (1999) – An experimental study of a lower proterozoic A-type granite from the Eastern Amazonian craton, Brazil. *J. Petrol.*, 40, 1673-1698. Goranson, R.-W. (1931) – The solubility of water in granitic magmas. *Am. J. Sci.*, 22, 481-502. Mysen, B.-O., Richet, P. (2005) – Silicate glasses and melts, properties and structure. Elsevier, *Developments in Geochemistry* 10, 544 p. Pichavant M., Martel C., Bourdier J.-L., Scaillet B. (2002) – Physical conditions, structure and dynamics of a zoned magma chamber: Mount Pelée (Martinique, Lesser Antilles Arc). *J. Geophys. Res.*, 107, 10.1029/2001JB000315. Pichavant M., Macdonald R. (2007) – Crystallization of primitive basaltic magmas at crustal pressures and genesis of the calc-alkaline igneous suite: experimental evidence from St Vincent, Lesser Antilles arc. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 154, 535-558. Scaillet, B., Pichavant, M., Roux, J. (1995) – Experimental crystallization of leucogranite magmas. *J. Petrol.*, 36, 663-705. Tuttle, O.-F., Bowen, N.-L. (1958) – Origin of granite in the light of experimental studies in the system NaAlSi₃O₈-KAlSi₃O₈-SiO₂-H₂O. *Geol. Soc. Am. Mem.* 74. Wallace, P.-J. (2005) – Volatiles in subduction zone magmas: concentrations and fluxes based on melt inclusion and volcanic gas data. *J. Volc. Geotherm. Res.*, 140, 217-240. Winter, J.-D. (2001) – Principles of igneous and metamorphic petrology. Prentice Hall. 697 p.