



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 335 (2003) 1031–1038



Géosciences de Surface

## Argiles et zéolites dans l'altération d'un volcan bouclier en milieu tropical (Le Piton des Neiges, La Réunion)

Laurent Bret<sup>a</sup>, Jean-Lambert Join<sup>a,\*</sup>, Xavier Legal<sup>b</sup>, Jean Coudray<sup>a</sup>, Bertrand Fritz<sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> *Laboratoire des Sciences de la Terre (LSTUR), université de La Réunion, 15, av. René-Cassin, BP 7151, 97715 Saint-Denis Messag cedex 9, île de la Réunion, France*

<sup>b</sup> *Centre de géochimie de la surface (CGS), UMR 7517 ULP–CNRS, École et Observatoire des Sciences de la Terre (EOST), 1, rue Blessig, 67084 Strasbourg cedex, France*

Reçu le 6 janvier 2003 ; accepté le 17 septembre 2003

Présenté par Georges Pédro

---

### Résumé

Le creusement d'une galerie profonde à travers le massif de la Roche-Écrite (île de La Réunion) a permis d'échantillonner les formations anciennes du volcan du Piton des Neiges. L'étude des minéraux d'altération de ces formations fait apparaître d'importantes variations des proportions zéolites/argiles selon leur situation au sein de ce volcan. La forte représentation des zéolites dans les formations bordant les réseaux hydrographiques ou les réseaux de drainage de l'eau souterraine semble due à un processus physicochimique favorisant, en système plus ouvert, la cristallisation des zéolites dans leur compétition avec les argiles secondaires. *Pour citer cet article : L. Bret et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Clays and zeolites in the weathering of a basaltic tropical shield volcano ('Le Piton des Neiges', Reunion Island).** The drilling of a gallery through the Roche-Écrite massif (Reunion Island) allowed to sample the old formations of the 'Piton des Neiges' volcano. The mineralogical study of the alteration products of the formations showed significant variations of the zeolites/clay minerals ratio depending on the location of the rocks in the volcano. The abundance of zeolites in the formation near the surface hydrographic network or the underground water drainage system seems to be due to the physicochemical processes favouring zeolites in more open systems in their competition with secondary clays. *To cite this article: L. Bret et al., C. R. Geoscience 335 (2003).*

© 2003 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* zéolites ; argiles ; volcan ; île de La Réunion ; le Piton des Neiges ; formations anciennes

*Keywords:* zeolites; clays; volcano; Reunion Island; Le Piton des Neiges; old formations

---

\* Auteurs correspondants.

Adresses e-mail : [join@univ-reunion.fr](mailto:join@univ-reunion.fr) (J.-L. Join), [bfritz@illite.u-strasbg.fr](mailto:bfritz@illite.u-strasbg.fr) (B. Fritz).

## Abridged English version

### 1. Introduction

Hydrogeological studies relative to oceanic volcanoes often consider the existence of a poorly permeable substratum located in the central part of the massifs. The opportunity of a tunnel construction (Fig. 1) through the ‘Massif de la Roche-Écrite’ (‘Piton des Neiges’, Reunion Island) allowed to verify such an hypothesis based on previous surface studies or drilling operations [1,3,14,17,19–24].

### 2. Regional geology

The Piton des Neiges is a 3069-m-high (o.m.s.l.) shield volcano (Fig. 1), whose major part is made of sequences of basaltic to differentiated alkaline lavas [1,15,21–24]. The oldest ones in the volcano, dated at more than 2.1 Myr [15], while the most recent ones are dated between 2.1 Myr and 0.43 Myr [1,3,15,21, 24]. The zeolite-rich formations appear in the oldest basaltic volcanic series and have been interpreted as resulting from the alteration of the old formations [1–4,17,19].

### 3. Methods

The tunnel drilling was done using a tunnel-boring machine without any possibility to observe the working face: this operation may be considered as an horizontal coring with a 3.8-m diameter. The petrological studies combined optical microscopy, XRD, SEM, TEM, and electron microprobe [2].

### 4. Results

A synthetic log of measurements and analyses was inferred from petrological and structural data and shows the main structures crossed along the six first kilometres of the gallery (Fig. 1):

- (1) a first kilometre of ‘basaltic filling lava flows’ followed by a scoria cone;
- (2) from kms 1 to 6, occurrence of basalts (0 to 45% olivine or/and pyroxenes phenocrysts), more and more altered and metamorphized, sometimes crossed by brecciated deposits, and often fractured.

The fracturation is generally sealed by secondary phases and does not increase significantly the permeability of the altered formation.

The important petrological point is the clear decrease of the amount of zeolites from the border toward the core of the volcano (Fig. 2). They appear mainly in highly fractured zones. The abundance of zeolites decreases as the amount of clay minerals increases (smectites, chlorites, interstratified smectite–chlorite phases, etc.).

### 5. Discussion

#### 5.1. Zeolites and clay minerals

The results obtained bring new information on the distribution of zeolites in the centre of the volcanic massifs. They confirm the observations made in the ‘Galerie Salazie Aval’ [14], where the amount of zeolites suddenly decreases after a dyke, which limits a regional aquifer. All these galleries begin in a ‘zeolitized’ zone (‘Rivière des Galets’, Takamaka and ‘Rivière des Pluies’) and the zeolites almost disappear in the centre of the massif.

#### 5.2. Importance of the unsaturated zone

In order to explain the two different types of alteration sequences, with zeolites or clay minerals, one may consider the fact that in some alteration zones the fluid may become disequibrated with respect to local CO<sub>2</sub> [18]: near-surface systems may re-equilibrate with atmosphere by degassing CO<sub>2</sub>, with a consequent pH increase. These conditions will prevail in near-surface zones (surface, valley flaks) and in very permeable and fractured zones. They are clearly in favour of zeolite formation (Fig. 3) as also verified using a geochemical modelling [2].

This model has been validated on the field during the work of the Salazie Amont gallery with the following sequence from outside to inside: altered rocks rich in zeolites and clays and poorly permeable, then crossing of a dyke limiting an aquifer zone, and finally rocks rich in clays and without zeolites (Fig. 4). This competition between clays and zeolites among secondary phases of volcanic altered rocks is in favour of zeolites in non-saturated zones and in favour of clays in saturated zones.

### 5.3. Evolution of the system

The presence of zeolites or clay minerals seem to be clearly controlled by the fact that the considered zones are hydrologically saturated or not, much more than by depth. However the abundance of clay minerals is generally increasing with depth (Figs. 1 and 2), even if zeolites may be present in small amounts.

### 6. Conclusion

It has been shown that the proportion of zeolites/clay minerals in the geological formations from the Piton des Neiges varies depending on the location. Zeolites are abundant in the formations near the hydrological network where the systems are more open to atmosphere and to circulating fluids, while deep reservoirs with more closed conditions seem to favour clay minerals stability.

## 1. Introduction

De nombreux travaux relatifs à l'hydrogéologie des volcans océaniques proposent l'existence d'un substratum peu perméable situé au cœur des massifs [7,8,12]. Cette hypothèse correspond à une contrainte majeure pour les circulations d'eaux souterraines et la compréhension du fonctionnement hydrodynamique des milieux volcaniques. Sa vérification passe par une reconnaissance approfondie de ces terrains et de leur minéralisation secondaire.

La zone étudiée ici correspond au massif de la Roche-Écrite (Fig. 1), qui se situe sur la planète nord du Piton des Neiges (île de La Réunion). La réalisation d'une galerie de plus de 6000 m, à 350 m d'altitude à travers ce massif, a donné l'opportunité d'échantillonner sous plus de 1400 m de recouvrement, et d'accéder aux séries anciennes jusqu'alors décrites uniquement à partir des formations mises à l'affleurement par les grandes rivières ou par quelques forages verticaux réalisés dans les cirques [1,14,17,19,20]. En sus de l'échantillonnage effectué en galerie, les formations mises à l'affleurement par l'érosion ont été explorées en complément des études antérieures [3,17,19,21–24].

## 2. Contexte géologique régional

Le Piton des Neiges est un volcan bouclier basaltique situé au nord-ouest de l'île de La Réunion. Il culmine à 3069 m. Sa partie émergée présente une forme de vaste bouclier de 50 km de diamètre à la base et aux pentes externes de 5 à 10°. La zone centrale est entaillée par trois cirques d'érosion de plusieurs kilomètres de diamètre (Mafate, Cilaos et Salazie).

On distingue, sur ce volcan, une période basaltique à la base d'une série de laves différenciées. Cette étude ne porte que sur cette période basaltique, qui correspond aux laves les plus anciennes émises, mais également à la majeure partie du volume du volcan.

Dans la période basaltique, deux unités sont distinguées par les auteurs [1,3,15,21,24].

L'unité inférieure, d'âge supérieur à 2,1 Ma [15], qui affleure dans le fond des cirques, est constituée de formations très altérées, entièrement zéolitisées, qui présentent en alternance différents faciès lithologiques, souvent intimement imbriqués les uns dans les autres, et qui sont interprétés différemment selon les auteurs [1,3,19,21–24]. L'unité supérieure a été datée [15] entre plus de 2,1 Ma et 430 000 ans.

Les formations zéolitisées ont été abondamment décrites à la Réunion [1,3,17,19], où elles apparaissent dans les séries volcaniques anciennes visibles à l'affleurement, uniquement dans les lits profonds des grandes rivières. Ces zéolites ont donc logiquement été interprétées comme résultant de l'altération des formations anciennes et représentant les constituants secondaires essentiels des formations anciennes et profondes.

## 3. Méthodes

Le creusement de la galerie étant réalisé avec un tunnelier, il n'a pas été possible d'avoir un contact visuel avec les terrains excavés. Ce creusement peut être assimilé à un forage destructif d'un diamètre de 3,8 m creusé horizontalement sur une longueur de plus de 6000 m. La reconnaissance géologique des formations traversées a donc été faite par échantillonnage des déblais ou *cuttings* produits.

La détermination de la pétrologie des échantillons a été faite [2] au microscope optique (évaluation visuelle des pourcentages en volume des minéraux par com-

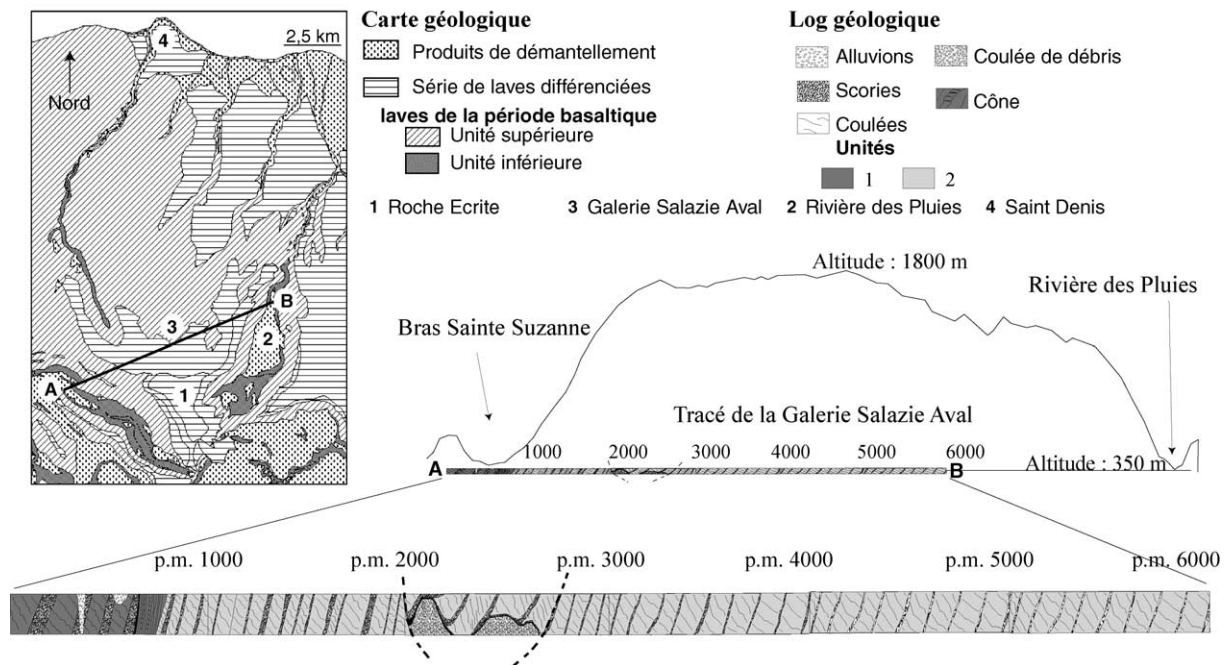


Fig. 1. Situation de la galerie Salazie Aval et log géologique.

Fig. 1. Location map of the Salazie Aval gallery and geological log.

paraison avec une charte graphique), et en associant différentes méthodes d'analyses (DRX, MEB, microsonde électronique, MET).

Un log synthétique, constitué à partir des données pétrologiques et structurales, représente les six premiers kilomètres de la galerie et fait apparaître les structures traversées (Fig. 1).

#### 4. Résultats

Les structures traversées sont relativement simples :

- (i) le premier kilomètre est constitué de coulées basaltiques épaisses relativement peu altérées, suivies par un cône scoriacé ;
- (ii) puis vient une série allant du p.m. 1000 à 6000 (p.m.  $X$  est la distance métrique  $X$  séparant le point considéré de l'entrée de la galerie), constituée par des basaltes (contenant de 0 à 45% en volume de phénocristaux d'olivines et/ou de pyroxènes) de plus en plus altérés et métamorphisés ; entre les p.m. 2000 et 3000, cette série est

traversée par un paléo-talweg, caractérisé par des dépôts bréchiques de type « coulée de débris » observés sur près d'un kilomètre. Cet ancien talweg est maintenant rempli par de vieilles coulées altérées. Elles peuvent être rattachées à la séquence basaltique inférieure.

La fracturation dans le massif est importante du p.m. 1500 à 6000. Cependant, cette fracturation est colmatée par la minéralisation secondaire, et la perméabilité globale de la série reste faible : cette perméabilité,  $K \cong 10^{-7} \text{ m s}^{-1}$ , a été mesurée par des essais d'injection [9] effectués sur le site d'entrée de la galerie. À l'opposé, les formations qui bordent le rempart (versant sub-vertical de la vallée), bien que peu fracturées, présentent des fentes à l'origine de venues d'eau non négligeables, qui contrastent avec leur quasi-inexistence dans le reste de l'ouvrage. Cela résulte vraisemblablement de la décompression de ces formations, amenées à l'affleurement et/ou à la proximité du rempart.

## Teneurs en minéraux secondaires

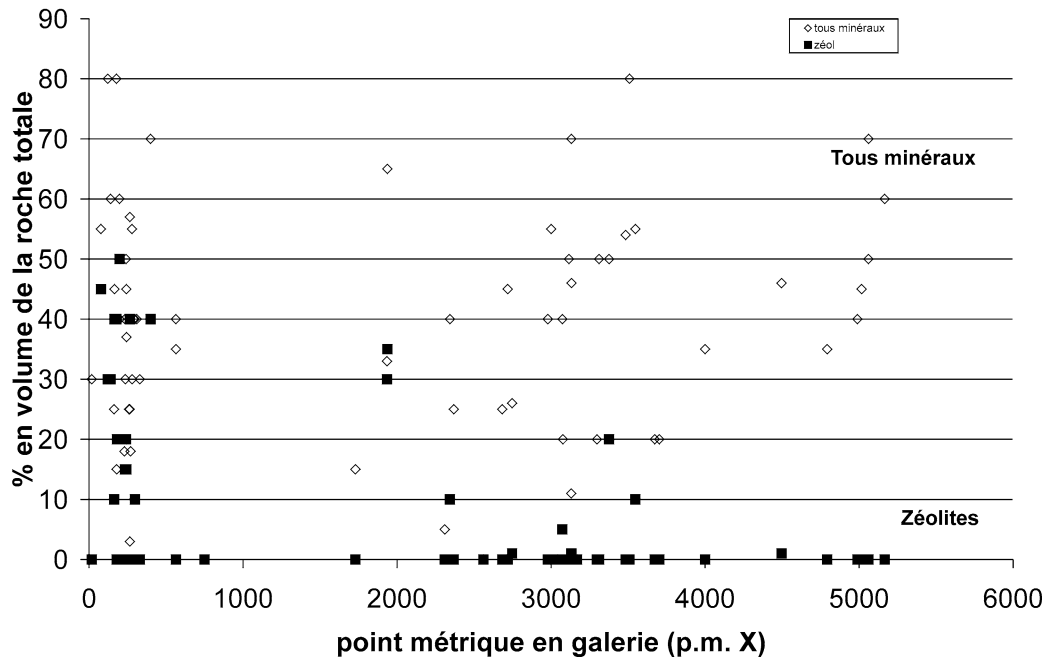


Fig. 2. Teneur en minéralisations secondaires et en zéolites dans le massif de La Roche-Écrite.

Fig. 2. Secondary mineralizations and zeolites in the Roche-Écrite massif.

Il y a, dans le premier kilomètre, une quantité importante d'argiles et de zéolites (en moyenne 40 % de zéolites et 60 % de minéraux secondaires). Il s'agit là de faciès identiques à ceux qui sont accessibles à l'affleurement et qui ont été décrits par de nombreux auteurs [3,17,19].

Du point de vue pétrologique, ce qui est remarquable, c'est la nette diminution de la présence des zéolites constatée au cours du premier kilomètre de cet ouvrage (Fig. 2). Largement représentées dans le premier kilomètre, elles voient leur teneur relative diminuer de manière importante dans le cœur du massif. Elles réapparaissent à proximité du paléo-talweg, et dans une zone très intensément fracturée.

Les zéolites semblent donc progressivement moins représentées, au profit d'une présence plus marquée des argiles, essentiellement représentées dans les échantillons étudiés par des smectites (dont saponite dominante), des chlorites et des interstratifiés smectite/chlorite.

## 5. Discussion

### 5.1. Zéolites et/ou argiles

Les résultats de l'étude de cette galerie apportent des éléments nouveaux quant à la répartition des faciès zéolités [19] à l'intérieur des massifs. L'observation d'une importante diminution des zéolites à l'intérieur du massif infirme le modèle couramment admis [19] d'une large régionalisation des formations zéolités dont la géométrie a souvent été proposée sur la base d'une simple extrapolation des affleurements observés dans les remparts. L'analyse des logs géologiques établis sur d'autres ouvrages profonds (forages et galeries) permet de confirmer, à plus grande échelle, les observations faites dans la galerie Salazie Aval (absence totale de zéolites dans le forage profond du Grand-Brûlé [14]). Ainsi, sur le début du suivi de la galerie Salazie Amont (Fig. 4), les zéolites (phillipsite, chabazite, thomsonite et mésolite) sont

fortement représentées (30 à 50 % en volume) dans les premiers 100 m des coulées d'océanites pahoehoe : au p.m. 210, elles disparaissent brutalement après un dyke qui limite un aquifère d'ampleur régionale, argilisé mais dépourvu de zéolites.

Ces résultats mettent en évidence deux faits remarquables. D'une part, ces galeries débutent toutes dans des zones, bordant les grandes rivières, intensément zéolitisées (respectivement la Rivière des Galets, Takamaka [4] et la Rivière des Pluies), et la progression de la galerie dans le massif s'accompagne d'une quasi-disparition des zéolites. D'autre part, les zéolites réapparaissent dans le massif à la faveur de paléovallées ou de zones de drainage (galerie Salazie Aval, galerie Mafate [4], galerie Takamaka [10]).

### 5.2. Le rôle de la zone désaturée

Par ailleurs, les eaux profondes riches en  $\text{CO}_2$  magmatique et qui se sont déjà enrichies en alcalins, quand elles passent en milieu désaturé (en zone interne ou externe du volcan), se mettent en équilibre avec l'atmosphère [18]. Ainsi, elles libèrent du  $\text{CO}_2$ , avec remontée du pH, ce qui favorise la cristallisation de zéolites au détriment des argiles qui, elles, sont pauvres en alcalins. Cette hypothèse a été renforcée par les résultats d'une modélisation numérique [2] qui montre que la zéolitisation est favorisée, par rapport à l'argilisation, par la remontée du pH (au-dessus de 7), la richesse en alcalins de la solution et la baisse de température (de 40 à 20 °C, par exemple).

Il existe également, dans les formations qui bordent les grandes rivières, des fissures et des fentes dues à leur décompression à la suite du creusement rapide d'une rivière profonde. Cette porosité nouvelle permet des circulations d'eau en provenance des aquifères de la planète et du ruissellement, qui mobilisent chimiquement et mécaniquement les argiles, l'ensemble libérant l'espace favorable à la cristallisation de zéolites (Fig. 3).

Ce modèle a pu être vérifié, in situ, lors du creusement de la galerie Salazie Amont. Les 200 premiers mètres creusés étaient intensément zéolitisés et argilisés, et ne présentaient aucune venue d'eau. Puis, au p.m. 200, l'ouvrage a traversé un dyke qui limitait un aquifère important où les zéolites étaient absentes et les argiles présentes (Fig. 4). Ici abondantes à l'affleurement, les zéolites restaient concentrées dans la zone

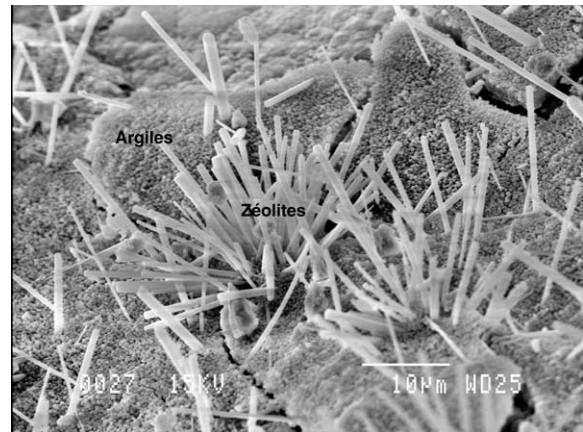


Fig. 3. Nucléation de zéolites – mésolite :  $(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{Ca},\text{Na}_2)$  – sur fond d'argiles floconneuses dans un échantillon en provenance d'un rempart.

Fig. 3. Zeolites nucleation – mésolite:  $(\text{Si}_3\text{Al}_2)\text{O}_{10}(\text{Ca},\text{Na}_2)$  – mids of flaky clays in a sample taken from a 'rempart' (a steep cliff).

désaturée limitée par la présence d'un dyke et elles disparaissent dans la partie saturée en avant du dyke. Ces formations zéolitisées sont donc comprises entre un aquifère limité par un dyke et la rivière des pluies qui les draine.

La concurrence argiles–zéolites, largement favorable aux argiles dans la zone saturée, s'inverse en faveur des zéolites dans les zones désaturées. Le mécanisme invoqué correspond à un lessivage des argiles dans les zones décomprimées des remparts, associé à une substitution par des zéolites qui se développent alors dans la porosité libérée. Ce mécanisme est observé en lame mince (Fig. 3).

### 5.3. Évolution du système

Le fait que les zéolites apparaissent dans les zones désaturées, aussi bien dans des zones profondes (drainées par un niveau scoriacé, par des fractures ou par des dykes) que superficielles, n'est pas en contradiction avec l'abondance des argiles en profondeur. En effet, on pourrait penser que les zéolites formées dans les zones superficielles restent prédominantes au cours de leur enfouissement, bien que la cristallisation des argiles devienne de plus en plus importante. Mehegan et al. [16] ont montré en Islande que la minéralisation secondaire précoce peut être redissoute au cours de l'enfouissement, remplacée par des minéraux de plus

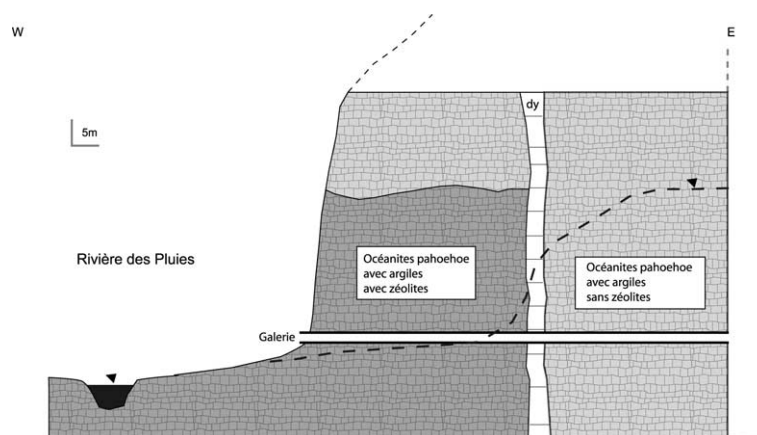


Fig. 4. Localisation de la zone à zéolites par rapport à un dyke (dy) dans les océanites et du niveau piézométrique estimé (▼).

Fig. 4. Location of the zeolite zone with respect to a dyke (dy) in the oceanites and of the estimated piezometric level (▼).

haute température. D'autre part, les formations, avant de s'enfouir n'ont peut-être pas été dans des conditions permettant la précipitation de minéraux secondaires (peu de fluides, temps d'exposition court, composition chimique peu favorable, etc.). Enfin, dans les paragenèses profondes à dominante argileuse, les zéolites ne sont pas totalement absentes, mais la teneur en argiles est très largement supérieure à celle des zéolites.

Dans le cas de la galerie Salazie Aval, le bombement observé lors de l'interpolation des surfaces de phases I et II à l'intérieur du massif, à partir des données cartographiques, s'explique probablement par un gradient de température croissant mis en évidence à l'aide des faciès minéralogiques [2].

## 6. Conclusion

Nous avons montré qu'il existe des variations des proportions zéolites/argiles au sein des formations du Piton des Neiges, selon leur situation dans le massif. La forte représentation des zéolites dans les formations bordant les réseaux hydrographiques ou les réseaux de drainage de l'eau souterraine, serait due à un processus physico-chimique favorisant la cristallisation des zéolites jusqu'alors en compétition avec les argiles (et les saponites en particulier).

Cette connaissance nouvelle des conditions de formation des zéolites et des argiles devrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique

et hydrochimique des zones désaturées bordant les réservoirs profonds, mais aussi de mieux comprendre l'histoire du mur imperméable de ces réservoirs. En effet, si la présence d'un substratum peu perméable, en relation avec un niveau conducteur géophysique profond, est effectivement proposée sur toute l'île [5,12], en revanche, son origine est diversement envisagée. Selon les auteurs, elle résulte, soit de l'extension régionale de formations bréchiques volcaniques [6], soit encore du développement de phases chloriteuses néoformées [11]. La réalisation d'une galerie Salazie aval dans les formations les plus profondes de l'île a permis de mettre en évidence l'argilisation du cœur du massif volcanique. Si cette minéralisation argileuse corrobore bien le modèle hydrogéologique régional proposé sur les massifs volcaniques de la Réunion [13], l'approche dynamique des processus de cette minéralisation constitue un cadre nouveau pour la compréhension du contexte hydrogéologique du massif. L'évolution temporelle du système hydrogéologique volcanique apparaît liée à l'argilisation progressive du mur de la nappe. Dans ce schéma, la nappe de base profonde dans un massif actif se rapproche progressivement de la surface topographique, au fur et à mesure du développement de l'altération. Enfin l'existence d'un substratum argileux formant le mur de la nappe régionale contribue aussi à améliorer notre analyse du rôle significatif du contexte hydrogéologique au regard de la dynamique des grands glissements de flancs pouvant affecter les volcans boucliers.

## Références

- [1] G. Billard, P.M. Vincent, Cartes géologiques de la France – La Réunion, en collaboration avec P.M. Vincent, 4 feuilles 1:50 000, 1974.
- [2] L. Bret, Minéralogie et géochimie des séries anciennes du Piton des Neiges : modélisation et implications hydrogéologiques, thèse, université de La Réunion, 2002, 183 p.
- [3] L. Chevallier, Structure et évolution du volcan «Piton des Neiges», île de la Réunion. Leurs relations avec les structures du bassin des Mascareignes–océan Indien occidental, thèse d'État, université de Grenoble, 1979, 187 p.
- [4] M. Courteaud, Irrigation du littoral ouest, La Galerie Mafate, géologie et venues d'eau, rapport du département de La Réunion, Bureau de l'eau, 1993, 52 p.
- [5] M. Courteaud, M. Ritz, B. Robineau, J.-L. Join, J. Coudray, New geological and hydrogeological implications of the resistivity distribution inferred from audiomagnetotellurics over La Fournaise young shield volcano (Reunion Island), *J. Hydrol.* 203 (1997) 93–100.
- [6] M. Courteaud, M. Ritz, M. Descloîtres, B. Robineau, Electromagnetic mapping of subsurface formations over the lower northeast rift zone of Piton de la Fournaise volcano, Reunion Island: geological and hydrogeological implications, *J. Environ. Eng. Geophys.* 2 (3) (1998) 181–187.
- [7] F. Fernandopullé, J. Vos, E. De la Moneda, L. Medina, Groundwater resources of the Island of Grand Canaria, in : Symposium international sur l'hydrologie des terrains volcaniques, mars 1974, îles Canaries, Espagne, 1974, pp. 1119–1149.
- [8] J.-L. Folio, Distribution de la perméabilité dans le massif du Piton de la Fournaise : apport à la connaissance du fonctionnement hydrogéologique d'un volcan-bouclier, thèse, université de la Réunion, 2001, 148 p. + annexes.
- [9] J.-L. Folio, J.-L. Join, J. Coudray, Hydraulic conductivities estimation in a recent shield volcano: Piton de la Fournaise, Réunion island, Indian Ocean, in : Proc. Model Care 99, Int. Conf. on Calibration and Reliability in Groundwater Modelling, 1999, pp. 413–418.
- [10] R. Fontaine, II Takamaka, Galerie d'amenée, mémoire géologique, Direction scientifique, Bouygues, 1987, 21 p. + annexes.
- [11] J.-L. Hoareau, Étude de la minéralisation des eaux au contact de la série magmatique différenciée de l'île de la Réunion, approche expérimentale et numérique, université de la Réunion, thèse, 2003, 215 p.
- [12] J.-L. Join, J. Coudray, Caractérisation géostructurale des émergences et typologies des nappes d'altitude en milieu volcanique insulaire (île de la Réunion), *Geodyn. Acta* 6 (4) (1993) 243–254.
- [13] J.-L. Join, J. Coudray, Using Principal Components Analysis and Na/Cl ratios to trace ground water circulation in a volcanic island. Reunion Island example, *J. Hydrol.* 190 (1997) 1–18.
- [14] P. Lerebourg, Étude du forage du Grand-Brûlé (Piton de la Fournaise, île de la Réunion) : lithostratigraphie, pétrologie, minéralogie primaire et secondaire. Conséquences sur l'évolution volcano-structurale du massif du Piton de La Fournaise, thèse, université Paris-11, Orsay, 1987, 198 p.
- [15] I. Mc Dougall, The geochronology and evolution of the young volcanic island of Reunion, Indian Ocean, *Geochim. Cosmochim. Acta* 35 (1971) 261–288.
- [16] J. Mehegan, P.L. Robinson, J.R. Delaney, Secondary mineralisation and hydrothermal alteration in the Reydarfjörður drill core, Eastern Iceland, *J. Geophys. Res.* 87 (B8) (1982) 6511–6524.
- [17] P. Nativel, Volcans de la Réunion. Pétrologie. Faciès zéolites (Piton des Neiges). Sublimés (Piton de La Fournaise), thèse d'État, université Paris-Sud, 2 vols, 1978, 510 p.
- [18] E. Nicolini, P. Olive, J. Coudray, C. Jusserand, Circulation des eaux dans le massif du Piton de La Fournaise (île de La Réunion) et leur contamination par des fluides d'origine magmatique, *C. R. Acad. Sci. Paris, série II* 312 (1991) 535–542.
- [19] J.-P. Rancon, Hydrothermal history of Piton des Neiges volcano (Reunion Island, Indian Ocean), *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 26 (1985) 297–315.
- [20] P. Rocher, Nouveau schéma d'évolution volcano-structurale du massif du Piton des Neiges (île de la Réunion), *Géologie de la France* 2–3 (1988) 157–162.
- [21] B.G.J. Upton, W.J. Wadsworth, Geology of Reunion Island, Indian Ocean, *Nature* 207 (1965) 151–154.
- [22] B.G.J. Upton, W.J. Wadsworth, The basalts of Reunion Island, Indian Ocean, *Bull. Volcanol.* 29 (1966) 7–24.
- [23] B.G.J. Upton, W.J. Wadsworth, Early volcanic rocks of Reunion and their tectonic significance, *Bull. Volcanol.* 33 (1969) 1246–1268.
- [24] B.G.J. Upton, W.J. Wadsworth, Aspects of magmatic evolution on Reunion Island, *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A* 271 (1972) 105–130.