



Réévaluation de l'activité explosive et effusive de grand volume associée à la formation de la caldeira de l'Enclos Fouqué (Piton de la Fournaise).

Par Sandrine Thomas

Encadrant : Laurent Michon, Andréa DiMuro, Patrick Bachèlery

Soutenu le 18 juin 2013 devant un jury composé de :

A. Bouhifd
J.-Y. Cottin
M. Gouhier
T. Hammouda
H. Martin
L. Michon
I. Vlastelic
J-L Paquette (spécialiste)

Table des matières

Remerciements :	2
I. Introduction.....	3
II. Les cendres de Bellecombe et la caldera de l'Enclos Fouqué	5
A- Description des dépôts et dynamismes.....	5
B- Âges des évènements (dépôts explosifs et coulée de lave)	7
C- Question en suspens	9
III. Stratégie d'étude.....	9
A- Etude de terrain	9
B- Caractérisation des niveaux à la loupe binoculaire	9
C- Composition chimique des éléments magmatiques.....	10
D- Datation des charbons de bois par la méthode du ^{14}C	11
IV. Résultats	11
A. Stratigraphie des dépôts explosifs du Piton de la Fournaise.....	11
a) <i>Trous Blancs</i>	12
c) <i>Route du Piton des Tangues</i>	13
d) <i>Parking du Piton des Tangues</i>	14
e) <i>Piton des Basaltes</i>	15
f) <i>Bras de Mahavel</i>	16
g) <i>Piton Bernard</i>	17
h) <i>Piton Sainte Rose</i>	17
i) <i>Petite Carrière</i>	17
B- Compositions géochimiques des éléments magmatiques.....	20
a) <i>Altération des éléments magmatiques</i>	20
b) <i>Niveau à gabbros</i>	21
c) <i>Petite Carrière</i>	23
d) <i>Niveaux magmatiques et à quartz</i>	25
C- Datations au ^{14}C	27
VI. Discussion	27
A- Identification des évènements explosifs.....	27
B- Magmas associés aux explosions	31
C- Dynamismes éruptifs.....	33
D- Âge et formation de l'Enclos Fouqué	33
VII. Conclusion	35

Bibliographie.....	36
Annexes.....	37

Remerciements :

Je voudrais remercier toutes les personnes sans qui ce stage n'aurait pas été possible. Merci à mes trois directeurs : Laurent MICHON, Andrea DI MURO et Patrick BACHELERY. Merci de m'avoir permis de travailler sur ce sujet passionnant, pour votre disponibilité, votre investissement et pour l'expérience que vous m'avez permis d'acquérir au cours de ce stage.

Je remercie Jean-Luc DEVIDAL pour ses conseils à la microsonde électronique et le centre RadioCarbone de Lyon pour leurs datations. Un grand merci aux laboratoires Géosciences de la Réunion, Magmas et Volcans et à l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise pour leur accueil et leurs équipes qui m'auront appris le fonctionnement d'un observatoire et d'un laboratoire.

Je voudrais aussi remercier Carole, pour m'avoir intégrée au laboratoire, proposée de partager ses journées de terrain et de m'avoir conseillée pour la rédaction du rapport et des lettres de motivation. Et surtout, pour avoir partagé mes week end à la loupe binoculaire. Et Giovan pour m'avoir épaulé dans mon travail à la loupe binoculaire pendant deux semaines.

Je voudrais remercier le centre équestre Alti-Merens et tous ses cavaliers, pour m'avoir fait découvrir leur île merveilleuse de la plus belle des manières : à cheval. Merci pour ce week absolument magnifique.

Enfin, c'est à ma mère que vont mes derniers remerciements, pour avoir su gérer la logistique à 10 000 km de distance.

Résumé :

L'Enclos Fouqué est la caldera la plus récente du Piton de la Fournaise (La Réunion). De la forme d'un fer à cheval ouvert sur l'océan Indien, il est polylobé. Les mécanismes de sa formation sont mal connus et encore sujet à débat. Un dépôt cendreux a été associé à la formation de cette caldera : les Cendres de Bellecombe. Deux études de ces cendres ont soulevé des problèmes quand à la datation des dépôts.

Notre étude a donc repris la stratigraphie de ces cendres depuis le domaine distal, hors Plaine des Sables, vers le domaine proximal, dans la Plaine des Sables avec l'affleurement de la Petite Carrière. Nous avons détaillé précisément quelques affleurements clés dans la direction décrite dans la littérature comme étant l'axe de dispersion des Cendres de Bellecombe. Chaque niveau est ensuite analysé à la loupe binoculaire afin d'en caractériser le contenu et de corréliser les niveaux entre eux. A cette analyse microscopique viendra s'ajouter une analyse à la microsonde électronique des éléments magmatiques afin de compléter les études de terrain. Nous avons aussi daté des échantillons de charbon de bois afin de contraindre l'évolution temporelle de la formation de l'Enclos Fouqué.

Nous avons ainsi pu corréliser un niveau à gabbro sur plusieurs affleurements : Trous Blancs, Piton des Tangles, Piton des Basaltes, Bras de Mahavel et Petite Carrière. Ce niveau contient des olivines rarement automorphes, quelques pyroxènes automorphes et des fragments de plagioclase, en plus des gabbros et des petites scories qui ont servi à l'analyse géochimique. Ces analyses révèlent des compositions chimiques différentes d'un niveau à l'autre. Les datations effectuées au cours de cette étude montrent qu'il y a eu une succession 'éruptions entre 3200 ± 75 an BP et 3100 ± 30 ans BP. L'Enclos Fouqué serait donc formé par incrément d'effondrement pendant plusieurs milliers d'années 4745 ± 130 ans BP serait l'âge du début de la formation de la caldera, et nous avons montré qu'un niveau des Cendres de Bellecombe était daté à 3110 ± 30 ans BP. Néanmoins la formation de l'Enclos pourrait être plus longue car ce niveau ne marque pas la fin de cet évènement.

Abstract :

The Enclos Fouqué is the most recent caldera of Piton de la Fournaise volcano (La Réunion Island). A horseshoe rim delimits its extension to the west, south and north, and opens to the Indian Ocean on the eastern side. The mechanisms of its formation are poorly understood and still subject to debate. An ash deposit was associated with the formation of the caldera: the Bellecombe Ash Member. Two studies about the Bellecombe Ash Member caused problems about the dating of deposits.

Our study reconsiders the stratigraphy of these ashes from de distal area, outside the Plaine des Sables, to the proximal area, inside the Plaine des Sables, with the outcrop of Petite Carrière. We have detailed precisely some key outcrops in the direction described in the literature as the dispersion axis of Bellecombe Ash Member. Then each layer is examined under a binocular microscope to characterize the contents and to correlate them. An electron microprobe analysis of magmatic components will be added in order to complete field studies. Several charcoals were dated in order to constrain the temporal evolution of the Enclos Fouqué formation.

We are able to correlate the gabbro layer of several outcrops: Trous Blancs, Piton des Tangles, Piton des Basaltes, Bras de Mahavel and Petite Carrière. This layer contents rare euhedral olivine, few euhedral pyroxene and plagioclase fragments, in addition of gabbros and small scoria which were used in geochemical analyzes. These analyze reveal different chemical compositions from one layer to another. The dating done in this study show that there was a succession of eruptions between 3200 ± 75 years BP and 3100 ± 30 years BP. The Enclos Fouque would be made by increments of collapse for at least several thousand years between 4745 ± 130 years BP and 3110 ± 30 years BP. Nevertheless, the formation of the Enclos Fouqué could be longer because this level does not mark the end of this event.

I. Introduction

La formation des calderas en milieu basaltique pose de nombreux problèmes. Les mécanismes par lesquels ces vastes dépressions se créent sont encore largement discutés. En d'autres contextes, les calderas sont souvent associées à un effondrement de la chambre magmatique sur elle-même suite à une éruption de gros volume (souvent une éruption plinienne mettant en jeu un volume important de magma) qui l'a partiellement vidée. Pourtant, on observe de nombreuses calderas en milieu basaltique que ce soit à Hawaï, sur le Kilauea (McPhie, 1990 ; Swanson, *et al.*, 2012), aux Galapagos, sur Fernandina (Filson, *et al.*, 1973), au Japon sur Miyakejima (Geshi, *et al.*, 2002). Dans le cas de La Réunion, sur le Piton de la Fournaise, la caldera de l'Enclos Fouqué (**fig. 1**), de dimension comparable à celle d'Hawaï (~4,5 km de diamètre, Swanson, *et al.*, 2012), quoique plus grande (13 km x 8 km, Bachèlery, 1981, Mohamed-Abchir, 1996), soulève des questions quant à sa formation.

A toutes ces calderas, on a associé un évènement explosif, que l'on a pu observer pour Fernandina et Miyakejima (Geshi, *et al.*, 2002 ; Filson, *et al.*, 1973), ou dont on a pu enregistrer les dépôts pour le Kilauea ou le Piton de la Fournaise. Si les deux premières ont bien été étudiées, les deux dernières sont toujours sujettes à discussion du fait de leur formation trop ancienne pour avoir été observée. En effet, dans les deux cas, les dépôts associés à la formation de la caldera posent de nombreux problèmes de chronologie. Dans le cas d'Hawaï, le tephra de Keanakāko'i (ou Keanakāko'i Ash Member) a longtemps été associé à l'éruption de 1790 qui aurait été à l'origine de la formation de la caldera au sommet du Kilauea (McPhie, *et al.*, 1990). Une étude récente (Swanson, *et al.*, 2012) a repris la stratigraphie du dépôt en détail et des datations ont été réalisées afin de mieux contraindre dans le temps la mise en place des différents niveaux du tephra de Keanakāko'i. Ces travaux montrent que ce dernier s'est, en fait, déposé sur une période de trois siècles qui se finirait avec l'éruption de 1790, plutôt que lors d'un évènement unique de grande ampleur.

On observe un problème similaire à La Réunion à propos des Cendres de Bellecombe, qui ont été associées à la formation de l'Enclos Fouqué du Piton de la Fournaise. Elles ont été décrites pour la première fois par Bachèlery (1981) comme des cendres se dispersant sur le pourtour de la caldera, jusque dans le fond de la rivière de l'Est. Un certain nombre de datations a été réalisée durant cette étude, et un âge de 4745 ans BP a été obtenu comme étant antérieur aux Cendres de Bellecombe. Reprises par Mohamed-Abchir (1996), leur stratigraphie a été décrite plus finement et surtout leur extension s'est révélée beaucoup plus grande que ce qui avait été initialement décrit par Bachèlery (1981). De plus, des incohérences existent entre les âges proposés pour les dépôts et les formations géologiques associées à la formation de l'Enclos Fouqué. Des résultats acquis en 2011 et 2012, lors d'un projet réévaluation de l'aléa volcanique au Piton de la Fournaise, laissent à penser que l'activité explosive serait plus complexe que ce qui avait été précédemment envisagé.

L'objectif de la présente étude est de reprendre précisément la stratigraphie des Cendres de Bellecombe, en partant du domaine distal et en se rapprochant du point d'émission supposé, afin de reconstruire la structure du dépôt et de faire de nouvelles datations pour mieux contraindre les différents évènements à l'origine de ces dépôts.

Pour cela, nous ferons l'étude détaillée des différents affleurements où sont reconnues les Cendres de Bellecombe afin d'en préciser la stratigraphie et de prélever les charbons de bois pour la datation, quand il sera possible d'en échantillonner. Les échantillons de chaque affleurement seront analysés à la loupe binoculaire afin d'en caractériser le contenu, et de corréliser les niveaux entre eux. Une analyse géochimique des éléments magmatiques à la microsonde électronique viendra compléter les analyses à la loupe binoculaire.

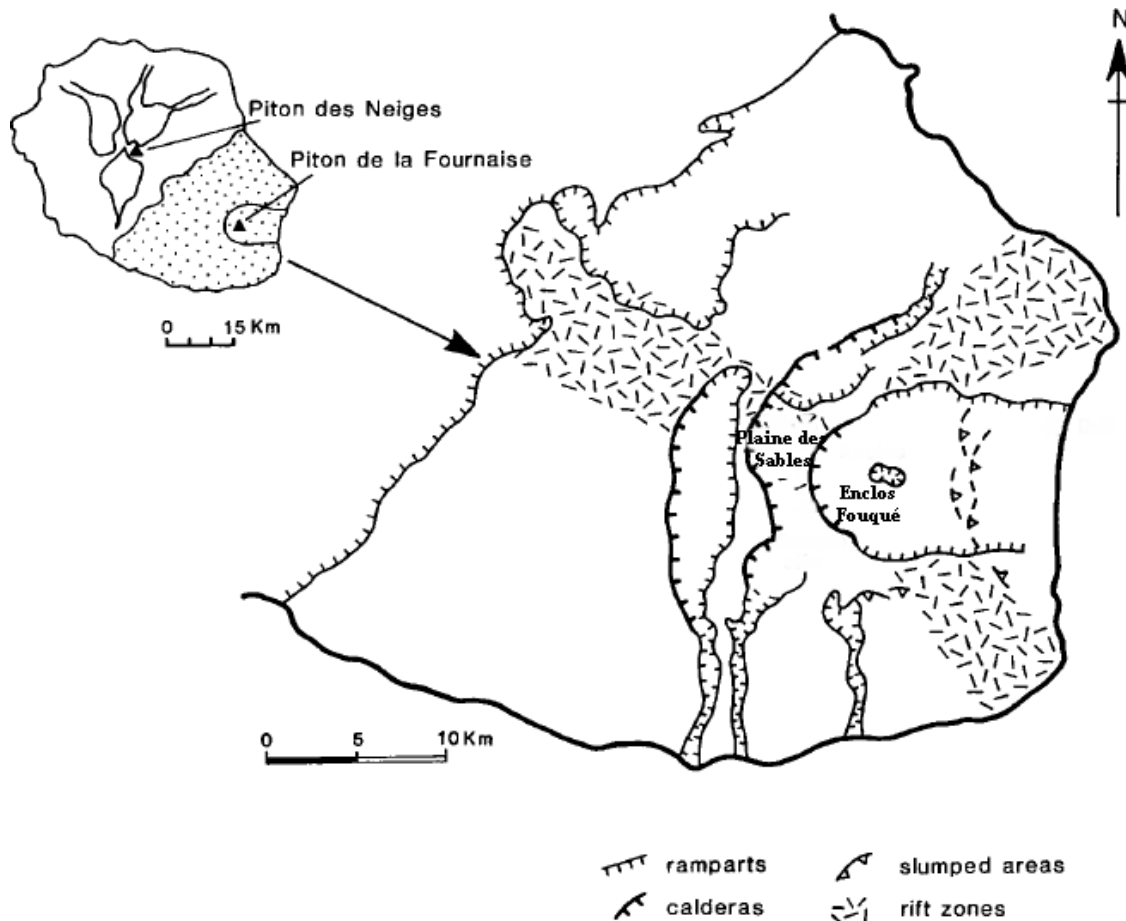


Figure 1 : Localisation de la caldera de l'Enclos Fouqué entaillant la partie sommitale du Piton de la Fournaise.
(d'après Upton, et al., 2000, modifié)

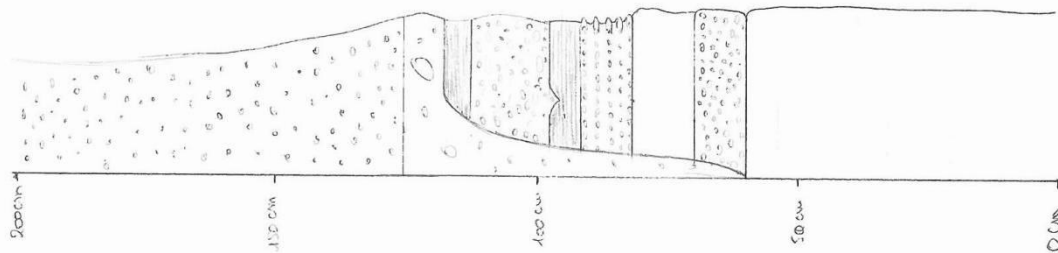
II. Les cendres de Bellecombe et la caldera de l'Enclos Fouqué

A- Description des dépôts et dynamismes

Les Cendres de Bellecombe ont fait l'objet de deux études (Bachelery, 1981 ; Mohamed-Abchir, 1996). Bachelery (1981) a cartographié un dépôt majoritairement cendreux, pouvant contenir des lapilli et des blocs de plus ou moins grande taille sur le pourtour de l'Enclos Fouqué et dans la Plaine des Sables, jusqu'au fond de la rivière de l'Est. Selon lui, les dépôts se limitent à la Plaine des Sables et certains sont plaqués contre le Rempart des Sables. Mohamed-Abchir (1996) a repris l'étude de Bachelery en se concentrant uniquement sur les Cendres de Bellecombe et a montré que ces dépôts se dispersaient plus loin que les Remparts des Sables. Selon lui, les Cendres de Bellecombe se sont déposées sur presque la totalité du massif du Piton de la Fournaise.

Les deux études décrivent un certain nombre d'affleurements similaires. Cependant, un seul est détaillé précisément dans les deux cas : *l'affleurement de la Petite Carrière*. Cet affleurement a été défini comme le stratotype des Cendres de Bellecombe. Il est situé à 500m à l'Est du Demi Piton, dans le creux topographique formé par un ancien cône de scorie. Les deux études ayant été faites à plus de dix ans d'intervalle, les logs issus de ces études présentent quelques différences (**fig. 2**).

LOG CENTRES BELLECOMBE DE BACHELERY (1981)



niveau à lapilli

niveau riche en bloc de matras usés et soles appartenant au cône.
interprété comme des hématites

niveau cendreuse fine

niveau cendreuse et lapilli égrenés, cumulate polyédriques ou péridotiques, lave en
morceaux, lave lapilli accablés, traces de éléments indus

niveau de lapilli égrenés dans une matras cendreuse fine

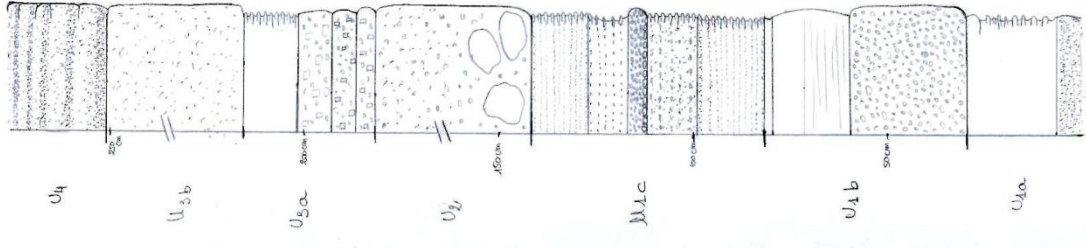
affleurement de bloc fin et cendreuse et de bloc fins, grossier (lapilli, mais lave)

niveau de cendres fines, cumulat galbroque très grossiers, peu d'éléments lavage

niveau cendreuse de lapilli accablés, fragments de gabbro et lave

niveau ayant tendance à contenir des cœurs et noyaux des noyaux de
base élastes (pas de blocs). Blocs fins fusibles, la matras est
cendreuse et homogène des fragments de lave, minéraux et lapilli
grossiers (forte teneur et en petit nombre). Noyaux de lavage qui
appartiennent au cône sous-jacent Gabbro peu fréquents et rare lapilli
accablés

LOG DES CENTRES DE BELLECOMBE DE TONATED-ABCHIR (1988)



affleurement de lavage matras cendreuse grossièrement non homogène, renferme
lapilli et blocs (jusqu'à 20cm). Certaines parties des figures
sont situées à des hauteurs différentes, de sorte que les hauteurs
de base indiquent dans le tableau supérieure au départ. (in ordre par
la petite cendreuse)

niveau matras et noyau matras cendreuse dont l'épaisseur varie dans
-comp. localement (moins de 10cm et plus de 20cm). Un certain
la grossièrement homogène, peu de grossièrement, peut se décomposer
en blocs d'une épaisseur de 10 à 20cm et non homogène. (in ordre
par) et enfin cendreuse en matras lave (de 10 à 20cm) avec égrenés
gabbro

affleurement de lavage cendreuse cendreuse cendreuse et lapilli cendreuse
et des matras

niveau adhésive aux petites matras égrenés légèrement et pièces de lapilli cendreuse
niveau riche en bloc de matras lave et matras, matras cendreuse, lave bloc
niveau cendreuse cendreuse et des matras

niveau matras cendreuse cendreuse lapilli et bloc (jusqu'à 20cm) quand
30-40cm) grossièrement homogène, matras fins et fins matras
cendreuse. Localement on peut distinguer dans les blocs fins matras de
plus grossier et plus homogène, et en blocs de 10 à 20cm et non homogène
laves et lapilli. Et surtout, les cendres, gabbro et
normalement, il contient quelques lapilli cendreuse et lave de base.
(jusqu'à 10 à 20cm)

affleurement de lavage matras cendreuse cendreuse et gabbro cendreuse normalement.

affleurement de lavage matras cendreuse, grossièrement homogène, lavage riche en bloc
en blocs et qui se trouvent des lapilli accablés.

niveau de lavage matras à la base, peu cendreuse, parfois lavage

affleurement de lavage matras cendreuse à grossièrement homogène cendreuse
matras

affleurement de lavage matras cendreuse de gabbro matras à quelques centimètres
d'épaisseur, de sorte que cendreuse normalement et souvent présente des
figures de matras cendreuse.

niveau d'aspect lavage et matras dans la matras matras et lapilli
l'absence et contenu des matras adhésive et homogène de lavage matras
contient des blocs de plus en plus abondants vers le haut. Et dans
le matras, qui ont une forte cendreuse et lavage.
(jusqu'à 10 matras)

niveau matras de lavage accablés cendreuse cendreuse égrenés dans
une matras cendreuse lavage peu abondante

niveau cendreuse-sableux à lavage fine

affleurement de niveau matras et cendreuse avec des matras
cendreuse

niveau matras à cendreuse adhésive

Figure 2 : Logs stratigraphique de l'affleurement de la Petite Carrière P. Bachelery (1981) et A. Mohamed-Abchir (1986).

Mohamed-Abchir (1996) a décrit quatre unités qui correspondraient à quatre phases éruptives différentes rapprochées dans le temps. La première unité (U1, **fig. 2**), qui n'a pas pu être observée par Bachèlery (1981) puisque la carrière n'était alors pas aussi profonde, est la seule qui contient des éléments juvéniles. De plus, il observe un certain nombre d'éléments (pipes de dégazage, balles de boue) dans les dépôts interprétés comme le résultat d'une éruption phréato-magmatique. Cette unité contient un certain nombre d'alternances de lits sableux et cendreaux, présentant des stratifications entrecroisées, interprétée comme le dépôt de déferlantes pyroclastiques successives.

Les deux études se rejoignent à partir de la deuxième unité de Mohamed-Abchir (U2, **fig. 2**). Cette deuxième unité est massive et a une forte tendance à combler les creux topographiques. Il a été observé à la base de très gros blocs (jusqu'à 80 cm) que Bachèlery n'a pu décrire, seule la partie supérieure de cette unité pouvait alors être observée. Ce dépôt a été décrit sur plusieurs affleurements en dehors de la Petite Carrière, il peut atteindre jusqu'à 6 mètres d'épaisseur au plus proche de l'Enclos Fouqué. Localement, il peut se subdiviser en deux niveaux. La base, plus grossière contient les blocs et des lapillis. Le niveau supérieur contient des lapillis accrétiés et des balles de boues. Cette unité est considérée comme associée à un événement phréatique d'une grande violence.

La troisième unité (U3 ; **fig. 2**) de Mohamed-Abchir se retrouve aussi sur le log de Bachèlery. L'unité U3 est composée de plusieurs niveaux, subdivisés en deux unités, riches en débris gabbroïques, en lapilli ou en minéraux libres. L'unité de base de U3 est interprétée comme étant des retombées aériennes. L'unité supérieure est interprétée comme étant un dépôt de déferlante.

Au-dessus, Mohamed-Abchir n'a pas observé d'autre dépôt mis à part les scories qui recouvrent le secteur (l'unité U4 de Mohamed-Abchir ne se trouve pas à la Petite Carrière). En revanche, Bachèlery décrit deux niveaux de plus avant les scories. Le premier est un niveau de cendres finement litées, le deuxième est interprété comme un niveau de remaniement riche en blocs variés et en scories appartenant au cône sous-jacent.

B- Âges des événements (dépôts explosifs et coulée de lave)

Bachèlery (1981) a effectué un certain nombre de datations des dépôts cendreaux qu'il a cartographié aux alentours de la caldera de l'Enclos Fouqué (**fig. 3**). Ces dépôts cendreaux, qu'il n'a pas toujours associés aux Cendres de Bellecombe ont des âges très différents. Plus les affleurements sont loin de la caldera, plus les âges sont vieux. Les charbons de bois pris pour les datations étaient contenus dans des niveaux de cendres.

Autour du Piton des Tangues, la zone la plus distale où des dépôts ont été datés (Bachèlery, 1981) les charbons sont issus de niveaux cendreaux fins de teinte brune renfermant des lapilli scoriacés. Dans ce secteur, il a été identifié deux niveaux reposant l'un sur l'autre (Piton Textor), ou séparés par un niveau de lapilli scoriacés (Piton des Sables et Piton de Caille). Le premier niveau, très altéré, de teinte brune, contient des cristaux d'olivine et des lapilli scoriacés. Il a été daté à 9355 ± 190 ans BP. Le niveau supérieur, contient beaucoup plus d'éléments (olivine, plagioclase, pyroxène, gabbro, lapilli scoriacé). Il a été daté à 7125 ± 125 ans BP au Piton Textor et 7930 ± 90 ans BP au Piton de Caille. Dans le même secteur, Mohamed-Abchir (1996) a reconnu deux de ses unités : U2 et U3a (le log stratigraphique de la section 35 n'ayant pas été publié dans le manuscrit de la thèse de Mohamed-Abchir, je me suis basée sur les deux cartes d'extension de ces deux unités, p69 pour U2 et p79 pour U3a). Les niveaux qui ont été datés par Bachèlery (1981) correspondent à U3a dans leur contenu (minéraux et fragments de gabbro).

En se rapprochant de la caldera, les points de datation correspondant à des niveaux établis comme appartenant aux Cendres de Bellecombe se situent au pied du rempart des

Sables, sous le Plateau des Basaltes. Bachèlery (1981) a daté un niveau de cendres plaqué contre le Rempart des Sables à 3305 ± 55 ans BP, qui correspond au niveau U3b de Mohamed-Abchir (1996) décrit dans cette zone de la Plaine des Sables.

Par ailleurs, sur le pourtour de la caldera de l'Enclos Fouqué, une étude (Staudacher et Allègre, 1993) a permis de dater des coulées de lave à l'affleurement à partir de la mesure de leur exposition aux rayons cosmogéniques. Les coulées ainsi datées sont recoupées par la structure d'effondrement de l'Enclos Fouqué. Les datations obtenues sur le bord du Rempart de Bellecombe donnent une fourchette entre 2960 ± 490 et 4890 ± 920 ans BP, ce qui est en assez bon accord avec l'âge de 4745 ± 130 ans obtenu par Bachèlery sur un échantillon de bois prélevé sous la première coulée rencontrée en descendant le Pas de Bellecombe (coulée également recoupée par la structure effondrée de l'Enclos Fouqué). Les échantillons les plus jeunes fournissent une limite supérieure pour l'âge de la caldera de l'Enclos Fouqué (Staudacher et Allègre, 1993).

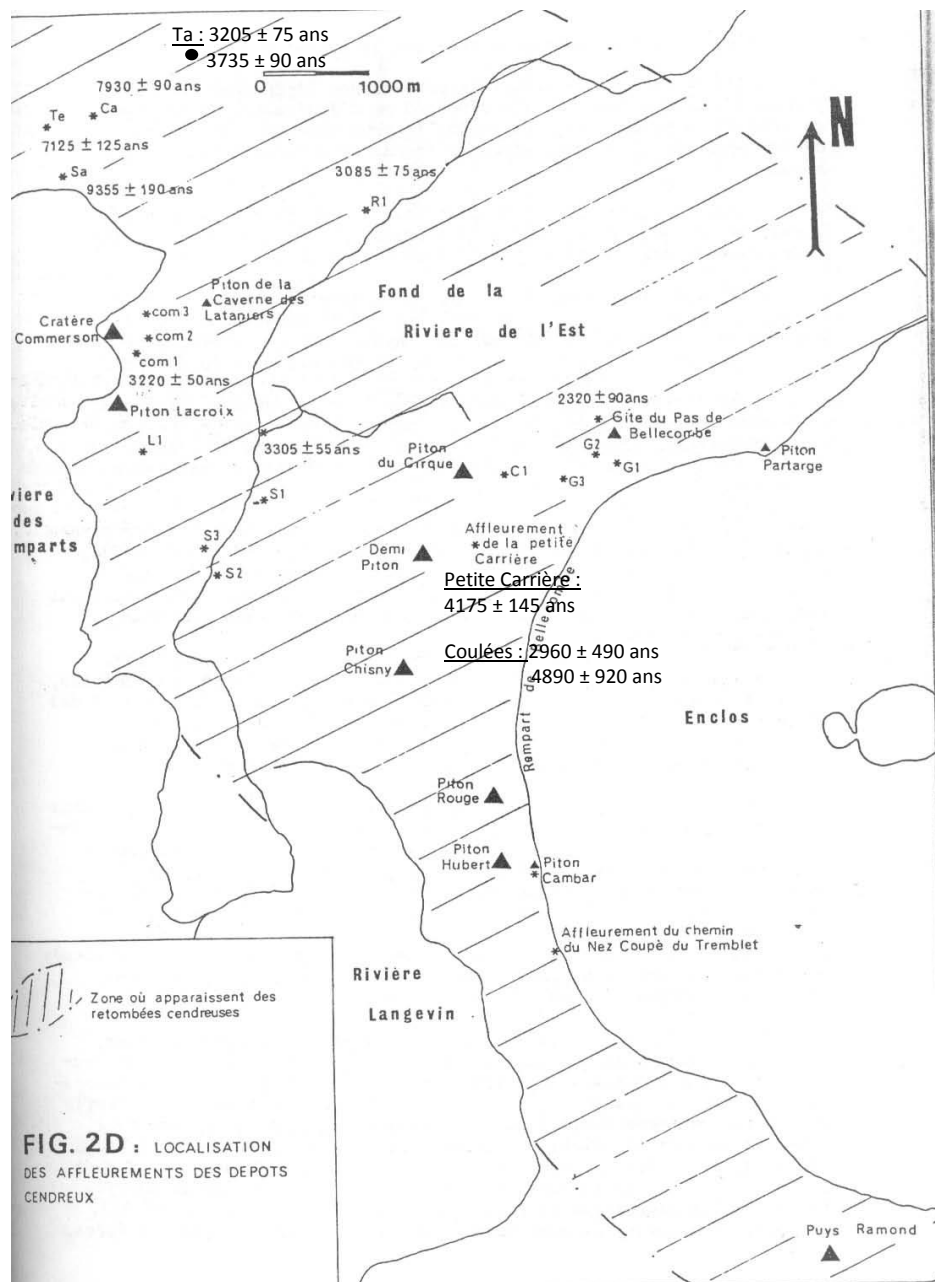


Figure 3 : datations effectuées par P. Bachèlery (1981), mises à jour avec celles obtenues par Vergniolle et Bachèlery (1982) pour le point Ta, par Mohamed-Abchir (1996) pour l'âge à la base de la Petite Carrière et par Staudacher et Allègre (1993) pour les coulées.

C- Question en suspens

Les Cendres de Bellecombe ont donc fait l'objet de plusieurs études qui présentent un certain nombre de points de désaccord. En effet, dans la stratigraphie qui a été établie par Mohamed-Abchir, nous avons vu qu'un de ces niveaux présente des désaccords dans les âges qui le caractérisent. L'objectif est donc de revoir la stratigraphie de ces cendres, et de contraindre les âges des dépôts par de nouvelles datations, afin de déterminer si l'évènement à l'origine du dépôt des Cendres de Bellecombe s'est déroulé sur quelques jours comme l'a proposé Mohamed-Abchir. Ou bien si cet évènement s'est étalé dans le temps, comme ça a été le cas pour le Keanakāko'i Ash Member, sur le Kilauea, Hawaii (Swanson, *et al.*, 2012).

De plus, un certain nombre de niveaux a été interprété comme étant des dépôts de déferlante pyroclastique à la Petite Carrière. Néanmoins si les évènements « Cendres de Bellecombe » ont eu lieu sur une période de temps plus longue que précédemment envisagée, cette interprétation n'est peut-être plus valable. En effet, ces déferlantes pourraient être des remobilisations des dépôts sous-jacents lors de pause dans l'activité éruptive.

Une étude récente (Michon, *et al.*, 2011) a montré que la formation d'une caldera en milieu basaltique se faisait par incrément de déformation séparé par une période de calme éruptif, sur l'exemple de l'éruption du Miyakejima (Japon) en 2000, du Fernandina (Galapagos) en 1968 et de l'éruption de 2007 qui a vidangé le Cratère Dolomieu, sur le Piton de la Fournaise (La Réunion). Les échelles de temps bien que différentes, sont en accord avec ce à quoi on peut s'attendre en suivant l'exemple du Keanakāko'i Ash Member, sur le Kilauea (Swanson, *et al.*, 2012).

III. Stratégie d'étude

A- Etude de terrain

L'objectif principal de l'étude a été de reprendre avec précision la stratigraphie et l'analyse des dépôts, afin de déterminer la structure des Cendres de Bellecombe. Il a donc fallu une étude détaillée des dépôts et déterminer les évènements majeurs, estimer les temps de pauses en reconnaissant les pédogénèses et, quand ils étaient présents, de dater les charbons. Pour cela, l'analyse a d'abord été réalisée dans les zones distales (i.e., celles atteintes par les évènements majeurs) afin de dresser l'architecture de premier ordre de la stratigraphie. Les zones proximales ont ensuite été investiguées pour identifier les évènements éruptifs d'ampleur plus limitée.

Il s'avère qu'un niveau repère évident est le niveau à gabbro nommé U3a par Mohamed-Abchir (1996). Il a été suivi depuis le domaine le plus distal, hors caldera de la Plaine des Sables, jusqu'au domaine proximal, dans la caldera de la Plaine des Sables (**fig. 4**). Cette unité est décrite comme affleurant selon un axe Nord Ouest – Sud Est sur à peu près 10 km de large et 10 km de long.

B- Caractérisation des niveaux à la loupe binoculaire

L'étude en laboratoire a consisté à laver les échantillons dans des tamis afin de retirer la fraction cendreuse et de ne conserver que les éléments de taille supérieure à 500 µm. Les mailles des tamis utilisés avaient des dimensions de 2 mm, 1 mm et 500 µm. Une fois lavés, les échantillons ont été passés à l'étuve pendant 24h à 70°C. Une fois secs, les échantillons ont été analysés à la loupe binoculaire afin de trier les composants. Nous avons cherché à caractériser les composants, leur nature, leur état d'altération, leur proportion relative par rapport aux autres composants, afin de caractériser les niveaux et de les corréler les uns aux

autres. Nous nous sommes particulièrement intéressés aux minéraux et à la présence de gabbro ou d'éléments juvéniles.



Figure 4 : localisation des affleurements étudiés au cours de l'étude.

C- Composition chimique des éléments magmatiques

Quand la présence d'éléments magmatiques était confirmée, des plots ont été réalisés afin d'analyser ces éléments à la microsonde électronique (**fig. 5**). Les compositions chimiques, qui pourront infirmer ou confirmer les corrélations déjà proposées par les analyses à la loupe binoculaire et le terrain. Ces plots ont été réalisés à La Réunion avec une résine Epoxi. Les éléments choisis ont été soigneusement posés dans un moule, sur un scotch double face, dans lequel la résine a été coulée. Les plots ont ensuite été dégazés un quart d'heure sous vide et laissés à l'air pendant 24 heures pour une polymérisation totale de la résine, avant

d'être polis. Cette opération a été effectuée à la main à l'aide de tapis de carbone de grain décroissant (800, 1200, 2400) puis à la polisseuse sur draps imprégnés de poudres diamantées de granulométrie 6 μ m (10 min), puis 3 μ m (5min) et enfin ¼ μ m (5min).

La microsonde est calibrée à partir de standards internes au laboratoire d'analyse. Elle dispose de quatre spectromètres permettant l'analyse élémentaire. Trois programmes ont été utilisés pour les analyses des éléments majeurs des verres et des minéraux. Le premier, *glass*, fonctionne avec un faisceau d'une largeur de 20 μ m et une intensité de courant de 8nA. Il a servi pour les plages de verre assez larges pour l'utiliser. Le deuxième, *glass4*, a servi pour les plages de verre plus petites, le faisceau ne faisant que 10 μ m pour 4 nA. Le dernier programme, *glassmin*, a servi pour les quelques analyses de minéraux, notamment les microlites. Il met en œuvre un faisceau de 1 μ m de diamètre avec une intensité de courant de 15 nA.

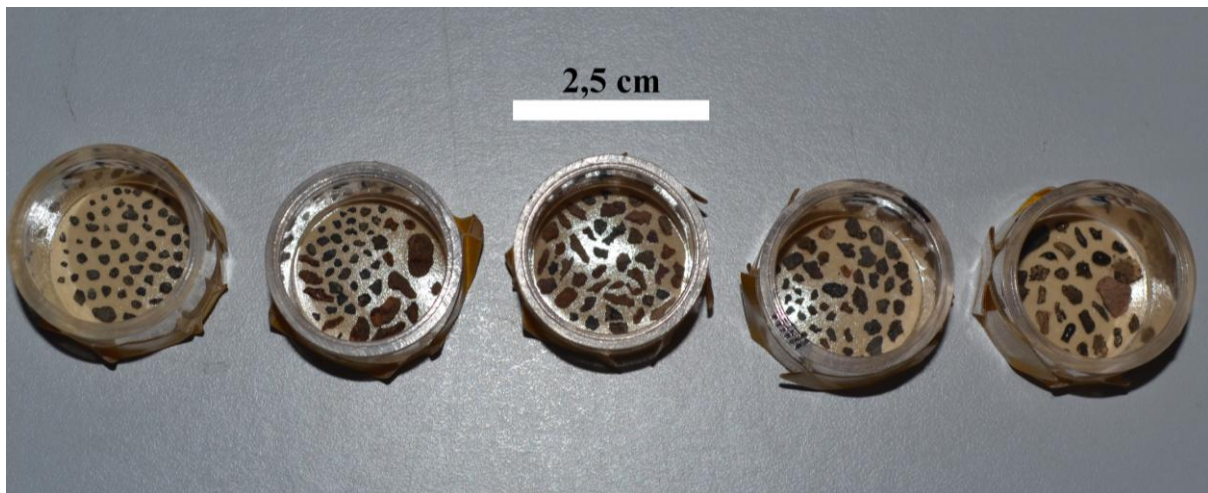


Figure 5 : Eléments magmatiques posés sur scotch double face dans les plots avant d'y couler la résine.

D- Datation des charbons de bois par la méthode du ^{14}C .

Nous avons aussi prélevé des charbons de bois dans les niveaux qui en contenaient afin de pouvoir contraindre l'âge de ces niveaux. Ces charbons ont été ramassés dans du papier aluminium, passés à l'étuve pendant 12h à 35°C, puis triés afin de conserver les charbons les plus propres possible pour ne pas fausser les analyses. Les morceaux de charbons ont ensuite été emballés dans de l'aluminium à nouveau et envoyé au centre de datation RadioCarbone de Lyon pour y être datés par la méthode du ^{14}C . La datation au ^{14}C effectué par ce laboratoire nécessite un échantillon d'au moins 10g de charbon le plus pur possible, afin d'éviter toute contamination par des éléments (racines, radicelles, etc.) qui pourraient rajeunir l'échantillon à dater. Les échantillons prélevés ont donc été soigneusement triés à la pince pour ne garder que le charbon de bois et ainsi avoir les 10g (ou plus, si possible) de charbon de bois nécessaires à l'analyse.

IV. Résultats

A. Stratigraphie des dépôts explosifs du Piton de la Fournaise

Les affleurements étudiés durant ce stage sont décrits ci-dessous en commençant par les zones les plus distales, hors Plaine des Sables, et en se rapprochant du rempart de la caldera de l'Enclos Fouqué.

a) Trous Blancs

Cet affleurement mesure au total 90 cm (Trous Blancs, **fig.4** ; **fig. 6**). Il repose sur une coulée de lave. De la base au sommet, on peut observer :

- un niveau d'une dizaine de centimètres d'épaisseur de sol noir, de granulométrie fine ;
- un niveau de cendres brunes et fines mesurant une trentaine de centimètres d'épaisseur contenant une passée plus sableuse d'une dizaine de centimètres. Cette passée sableuse contient des olivines parfois automorphes, des pyroxènes souvent automorphes et quelques fragments de plagioclase, ainsi que des petits fragments de gabbro et de rares scories rougeâtres, la limite supérieure de ce niveau est une croûte d'oxydation ;
- un niveau brun cendré contenant à sa base une passée très riche en charbon de bois. Ce niveau contient des olivines fragmentées non altérées, des éclats de verre contenant de rares cristaux et de petites ponces rouges et oxydées, ne contenant pas de cristaux. Les charbons de bois de ce niveau ont été échantillonnés pour datation au ^{14}C ;
- un niveau à lapilli contenant de très nombreux fragments vitreux, ce niveau est granoclassé normalement, il mesure 20 cm d'épaisseur. Il se termine également par une croûte d'oxydation (ox, **fig. 6**) ;
- un niveau très blanc et de granulométrie très fine d'une quinzaine de centimètres, possiblement formé par des diatomées.

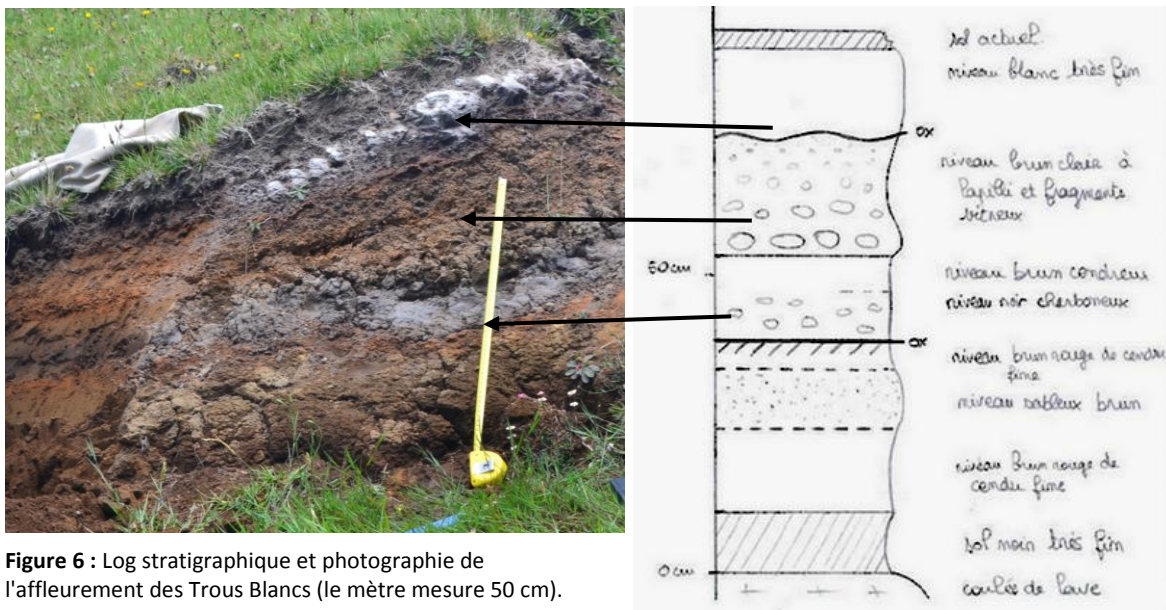


Figure 6 : Log stratigraphique et photographie de l'affleurement des Trous Blancs (le mètre mesure 50 cm).

b) Nez de Bœuf

L'affleurement du Nez de Bœuf (**fig. 7**, Nez de Bœuf, **fig. 4**) se situe en bordure de la route du volcan. D'une épaisseur de 1 m 30, il est composé de deux grandes unités. La première à la base repose sur une coulée de lave, bréchifiée à son sommet. Ce première unité est composé de trois niveaux :

- un premier niveau de cendre fine contenant des bloc pouvant mesurer jusqu'à 20 cm de diamètre ;
- un deuxième niveau sableux gris contenant des petits éléments blancs qui s'avèrent être des agrégats de gypse. L'analyse à la loupe binoculaire montre la présence d'olivine, de plagioclase et de quelques quartz, on y trouve aussi quelques scories oxydées et d'autres noires, ainsi que quelques gabbro ;

- un troisième niveau massif de cendres brun clair, granclassé normalement.

Le sommet de cette unité est remanié sur quelques centimètres et on peut voir quelques stratifications entrecroisées.

La deuxième unité est composée de deux alternances d'un niveau cendreuse vésiculé et d'un niveau de lapilli remanié à patine jaune pour la première alternance et rouge pour la deuxième. L'affleurement est surmonté par un dizaine de centimètres de sol actuel.

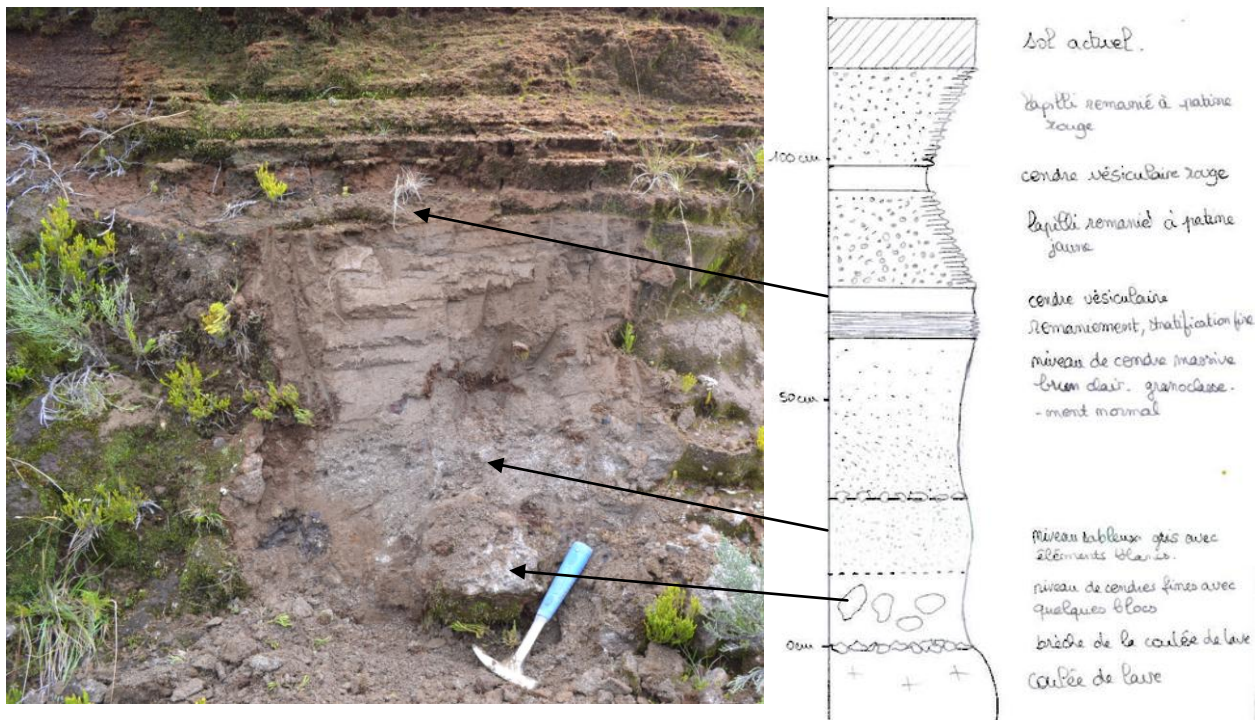


Figure 7 : Photographie et log stratigraphique de l'affleurement du Nez de Boeuf

c) Route du Piton des Tangues.

Mesurant un peu plus d'un mètre, on trouve à la base de cet affleurement (**fig. 8**, Piton des Tangues, **fig.4**) un sol rouge contenant des scories de tailles centimétrique à pluri-centimétrique, de nombreux charbons de bois centimétriques éparpillés dans le niveau et des éléments ponçeux altérés centimétriques. Les charbons de bois ont été datés à 3735 ± 90 ans BP (Vergniolle et Bachèlery, 1982). Nous n'avons pas pu observer la base de ce niveau. Nous ne pouvons donc pas donner son épaisseur. L'observation à la loupe binoculaire montre que ce niveau contient un grand nombre de cristaux parfois automorphes d'olivine, des scories altérées et oxydées, et quelques fragments de végétaux.

Ce niveau est surmonté par notre niveau sablo-cendreuse contenant des éléments de gabbro centimétriques à pluri-centimétriques (2 cm pour le plus gros). Ce niveau est localement remanié à son sommet, et sa base est toujours massive. On peut parfois y observer des lapilli accréionnés de taille pluri-millimétriques. Ce niveau mesure 15 cm d'épaisseur. L'analyse à la loupe binoculaire montre qu'il contient un grand nombre de cristaux automorphes d'olivines et de pyroxènes, souvent automorphes et quelques plagioclases fragmentés.

Le niveau situé au dessus est un sol noir très fin, contenant de nombreux fragments millimétriques à centimétriques de charbons de bois. Un âge de 3205 ± 75 ans BP a été obtenu pour ce niveau (Vergniolle et Bachèlery, 1982).

Enfin, le dernier niveau est un niveau de retombées aériennes. Il est composé d'échardes (lapilli) de verre brun rouge à patine d'altération jaune.

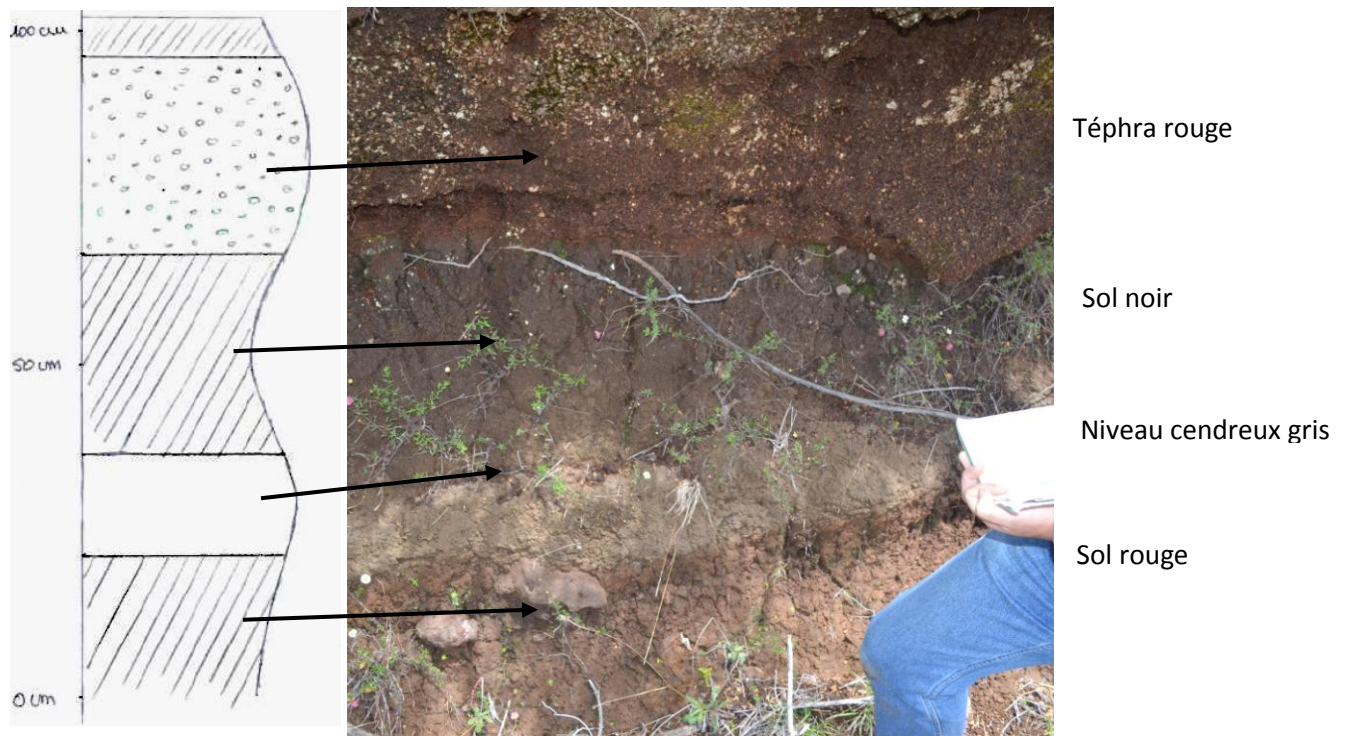


Figure 8 : Log stratigraphique et photographie de l'affleurement sur la route du Piton des Tangués.

d) Parking du Piton des Tangués

L'affleurement du Piton des Tangués mesure 1 m 50 (fig. 9, Piton des Tangués, fig. 4). Nous n'observons pas son substratum. Il est composé de deux unités.

La première est composée d'un niveau sableux gris contenant des blocs pouvant atteindre l'épaisseur du niveau (20 cm). On peut y voir des éléments blancs (gypse). Ce niveau contient des olivines automorphes en grande quantité, des pyroxènes souvent automorphes et quelques quartz automorphes, ainsi que des scories rouges très oxydées. La deuxième unité mesure 90 cm. Elle est composée de deux niveaux. Le premier est brun rouge et contient beaucoup d'éléments lithiques (des scories rouges et des éléments très altérés). Ce niveau mesure une dizaine de centimètres. Le deuxième niveau mesure 80 cm et contient des scories rouges, de petits blocs (5 cm), des éléments altérés et des charbons de bois éparpillés dans tout le niveau. L'analyse à la loupe binoculaire montre la présence d'olivine fragmentées peu nombreuses et de petite taille (entre 1 mm et 500 μm).

Cet affleurement est surmonté par une trentaine de centimètre de sol actuel.

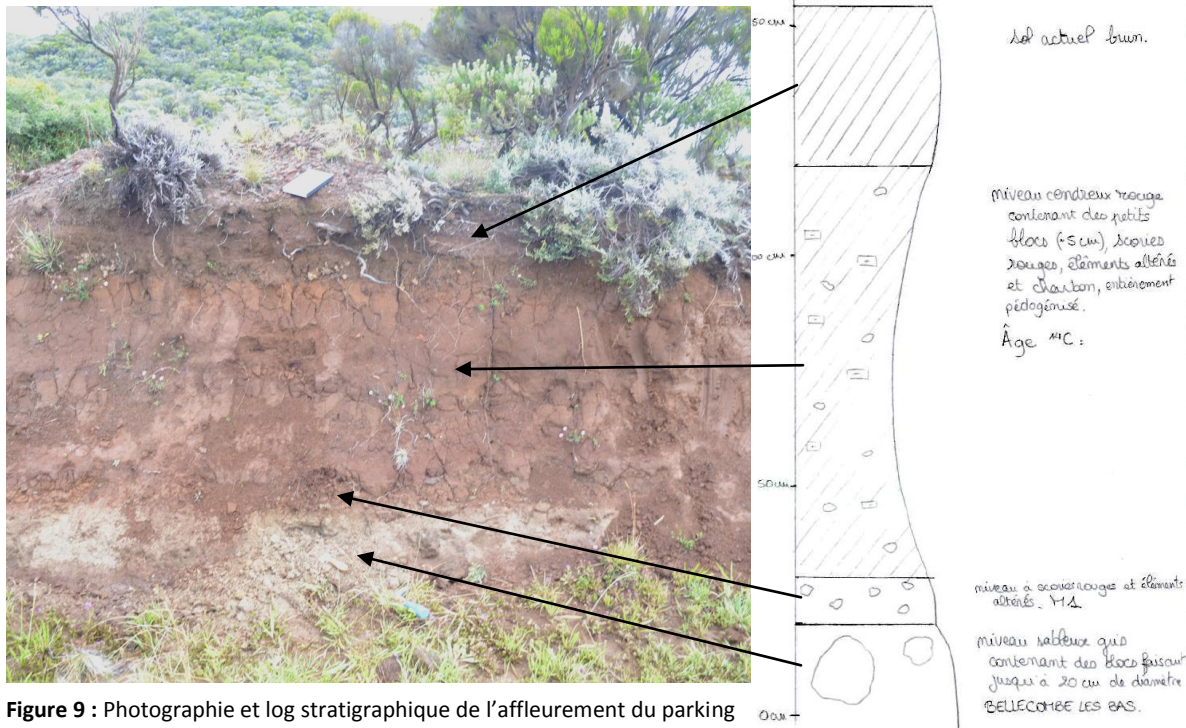


Figure 9 : Photographie et log stratigraphique de l'affleurement du parking du Piton des Tangués

e) Piton des Basaltes

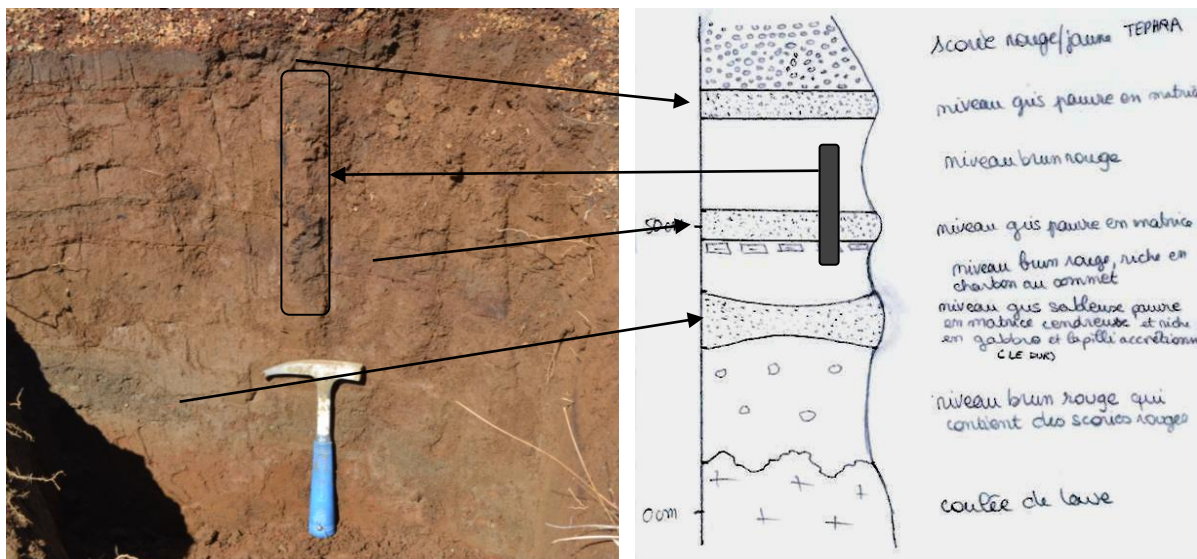


Figure 10 : Photographie et log stratigraphique de l'affleurement du Piton des Basaltes

L'affleurement (fig. 10, et Piton des Basaltes, fig. 4) repose sur une coulée de lave. Du bas vers le haut, on trouve :

- un niveau brun rouge qui contient de nombreuses scories rouges de quelques centimètres pour les plus grosses. L'étude à la loupe binoculaire montre la présence d'olivines en grande quantité, quelques pyroxènes et des rares plagioclases. On y trouve aussi de petites scories rouges, des fragments vitreux très altérés et des gabbros, ainsi que quelques charbons de bois, ce niveau mesure une vingtaine de centimètres ;
- un niveau gris sableux, pauvre en matrice cendreuse, contenant des olivines fraîches et automorphes, des pyroxènes souvent automorphes, et quelques rares plagioclases souvent

cassés, ainsi que des minéraux magnétiques. On y trouve aussi de très rares petites scories rouges et des fragments de gabbro, ce niveau mesure une dizaine de centimètres ;

- un niveau brun rouge, d'une dizaine de centimètres, riche en charbons (qui ont été prélevés pour les datations), contenant des olivines automorphes, des pyroxènes souvent automorphes et des plagioclases cassés, on y trouve aussi des scories très oxydées en abondance et des fragments vitreux très altérés, ainsi que des fragments de gabbro dans lesquels on peut remarquer des différences dans la taille des cristaux. Certains sont microgrenus (cristaux de l'ordre de la centaine de micromètres), d'autres ont une texture grenue avec des cristaux de plusieurs centaines de micromètres à un millimètre ;

- un niveau sableux gris très pauvre en matrice contenant exactement la même chose que le premier niveau gris ;

- un niveau brun rouge, contenant des olivines automorphes, des pyroxènes automorphes, des plagioclases fragmentés, et des éléments magnétiques, ainsi que quelques scories et fragments de gabbro. Une grosse racine carbonisée recoupe ce niveau et les précédents. Elle a été prélevé pour datation au ^{14}C , ainsi que les quelques charbons qui étaient éparpillés dans le niveau ;

- un niveau gris sableux pauvre en matrice, contenant des olivines automorphes, des pyroxènes automorphes, des plagioclases fragmentés, des éléments qui présentent une aimantation et quelques fragments vitreux frais.

f) Bras de Mahavel

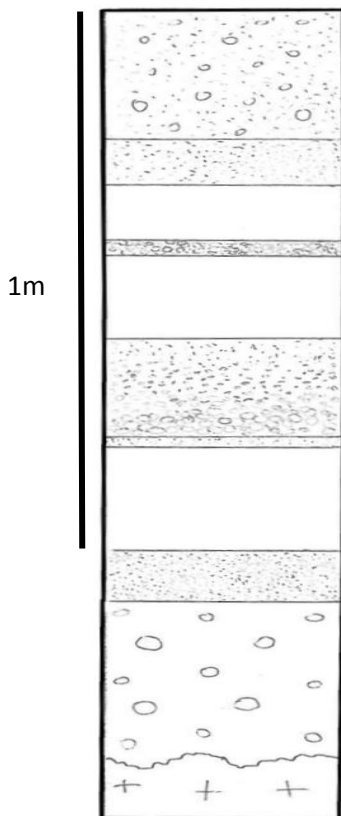


Figure 11 : Log stratigraphique de l'affleurement du Bras de Mahavel.

L'affleurement du Bras de Mahavel (**fig. 11** et Bras de Mahavel sur la **figure 4**) se situe en bordure de falaise, en bordure de la rivière des Remparts. L'affleurement repose sur une coulée de lave.

Le premier niveau, en partant du bas, est un niveau à scories altérées pluri-centimétriques. L'analyse à la loupe binoculaire a montré la présence de quartz automorphes, de fragments de plagioclase et de rares olivines également fragmentées et altérées, ainsi que quelques petits éléments magnétiques.

Le deuxième niveau est riche en olivines, parfois automorphes, qui sont visibles directement sur l'affleurement. De granulométrie cendreuse grossière, il contient des pyroxènes automorphes et des plagioclases cassés. On peut y trouver de rares éléments magmatiques altérés millimétriques.

On trouve au dessus la séquence de la Crête Langevin décrite par Di Muro, *et al* (2012). Cette séquence commence par un niveau de cendres fines et brunes contenant des charbons de bois et de petites scories rouges.

Ce niveau est surmonté par un fin niveau de cendres noires très riche en charbon. On trouve au dessus un niveau à scories noires (pouvant mesurer jusqu'à 6 cm de diamètre). Ce niveau contient des fragments de lave dense et des olivines millimétriques. On peut y observer un granoclassement normal.

Au dessus, ce trouve une unité séparée en trois niveaux : le premier est un niveau à lapilli centimétriques baignant dans une matrice cendreuse, ce niveau contient beaucoup de racines. Le deuxième est un niveau de retombée aérienne de scories brun-rouge. Le dernier est un niveau identique au premier.

Ces trois niveaux sont surmontés par un niveau de cendres noires contenant des lapillis vésiculés infra-centimétriques.

Le dernier niveau est brun et contient des lapillis bruns dans une matrice cendreuse.

g) Piton Bernard

L'affleurement se situe un peu au Nord du Piton Bernard (Piton Bernard, **fig. 4**), sur le flanc Sud du Piton de la Fournaise. Épais de presque 1 m, il contient beaucoup d'éléments altérés de 5 cm de diamètre pour les plus grands. Il contient quelques quartzs, des plagioclases en petite quantité ainsi que des olivines et des éléments magnétiques. Aucun minéral n'est automorphe à l'exception des quartz. On y trouve aussi quelques petits gabbros comportant des traces d'oxydation.

h) Piton Sainte Rose

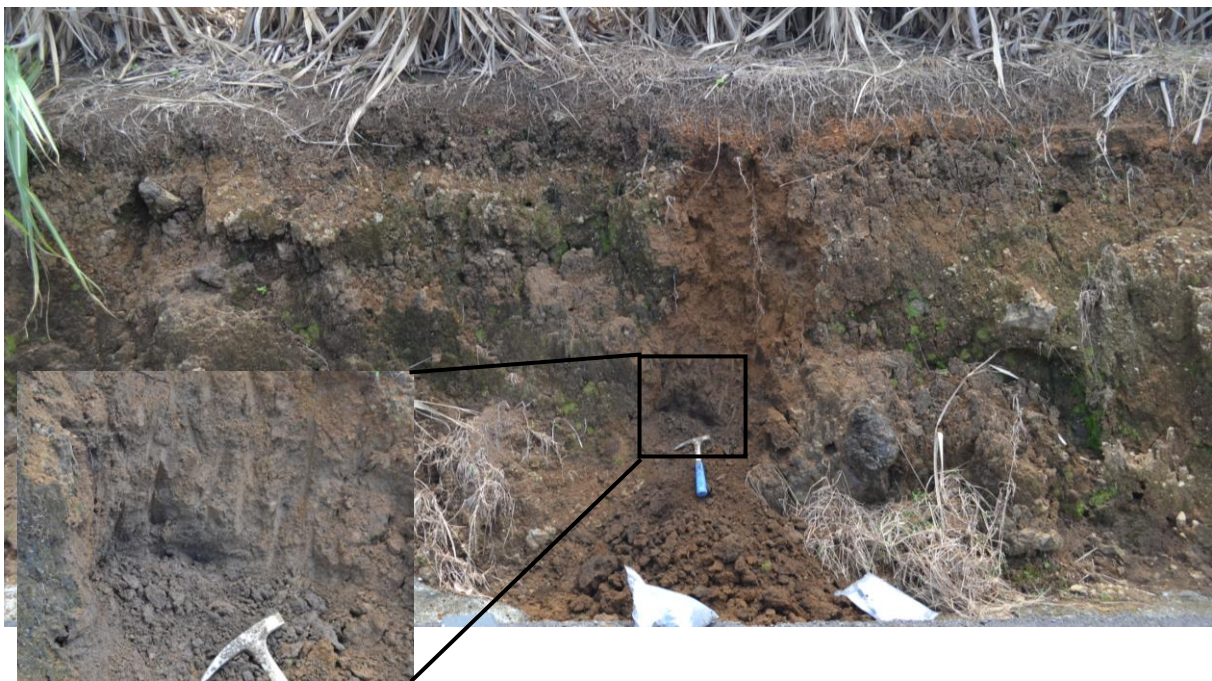


Figure 12 : Photographie de l'affleurement du Piton Sainte Rose, avec un grossissement du niveau à quartz.

L'affleurement (**fig. 12**, Piton Sainte Rose, **fig. 4**) se situe au bord de la route des radier partant de Piton Sainte Rose vers Bois Blanc. La base est constituée par une coulée de lave. Au dessus, on peut observer un niveau gris d'un vingtaine de centimètres. Ce niveau contient des olivines rarement automorphes, des plagioclases fragmentés et quelques quartz automorphes, ainsi que des éléments magnétiques, qui s'aimantent sur la pince lors du tri et des petits gabbros. On y trouve aussi des petites scories noires et de rares gabbros.

i) Petite Carrière

L'affleurement de la Petite Carrière est le plus proximal (Petite Carrière, **fig. 4**). Il se trouve dans un creux topographique. L'affleurement repose sur un cône de scorie. Un niveau sableux d'un centimètre sépare le cône de l'affleurement. Il se subdivise en 10 unités (BAM 1 à 10, **fig. 13 A et B**).

BAM 1, à la base, se divise en trois sous unités :

- la partie basale est massive et moule le relief du cône de scories. Ce sont des lapilli accrétonnés (**fig. 13 D**) qui remplissent les creux topographiques, puis le niveau devient massif. L'épaisseur est donc variable, du centimètre à quelques centimètres pour le plus épais.
- la partie médiane est un niveau cendreuse grossier présentant des lamines, avec l'apparition de quelques « pipes » de dégazage (**fig. 13 C**), coupées net par le niveau supérieur. L'épaisseur du niveau est variable, mais globalement, elle est moitié moins épaisse que la partie basale.
- la partie supérieure contient des pipes sur toute sa hauteur, elle se termine par un fin niveau de cendres fines de 0,5 cm d'épaisseur, recoupé par l'érosion.

BAM 2 est un niveau de 10 cm d'épaisseur composé d'une succession de fines lamines de quelques millimètres qui alternent avec des niveaux cendreuse de 0,5 cm d'épaisseur.

BAM 3 se divise en deux parties. La partie basse (2,5 cm) est très vésiculée et est composée de sable fin. La partie supérieure est d'épaisseur équivalente mais elle est moins vésiculée. L'interface entre les deux parties voit apparaître des scories rouges qui se retrouvent concentrées au sommet de la partie supérieure. Ce niveau est ocre.

BAM 4 est très similaire à la base de BAM 1. Ce niveau contient beaucoup de lapilli accrétonnés.

BAM 5 est un niveau à fines lamines (millimétriques) et à lapilli accrétonnés baignant dans une matrice de cendres grossières. La stratification est marquée par de petites dunes. Ce niveau mesure entre 6 et 8 cm d'épaisseur.

BAM 6 ressemble à BAM 3. On peut tout de fois noter la présence plus importante de scories grossières. L'enrichissement en scories rouges semble moins important étant donné la couleur moins ocre de ce niveau.

BAM 7 est une alternance de niveau de remobilisation à sable et bloc de 5 cm d'épaisseur.

BAM 8 est composé de quatre niveaux :

- la base est un niveau très riche en blocs (60%, majoritairement des scories de 8 cm de diamètre). Ce niveau mesure entre 15 et 20 cm d'épaisseur. On y observe des lapilli accrétonnés inférieurs à 1 cm et la présence de verre basaltique dans une matrice boueuse.
- le deuxième niveau contient des blocs dans une matrice cendreuse. On y observe la présence de balle de boue également.
- le troisième niveau est pauvre en bloc et légèrement stratifié. La matrice est boueuse avec des lapilli accrétonnés inférieurs à 1 cm.
- le niveau supérieur renferme peu de petits blocs (3 cm au maximum) et a une matrice boueuse. Il contient dans sa partie supérieure un niveau à balle de boue pouvant mesurer jusqu'à 3-4 cm de diamètre. On voit apparaître progressivement vers le haut des fragments de basalte, des olivines et des gabbros qui sont isolés dans ce niveau. Le contact supérieur est sinueux et parfois remplis de blocs scoriacés.

BAM 9 est composé de cinq niveaux :

- un niveau stratifié de 4 cm d'épaisseur à lapilli accrétonnés, éléments lithiques (essentiellement gabbro et olivine), il y a très peu de matrice.

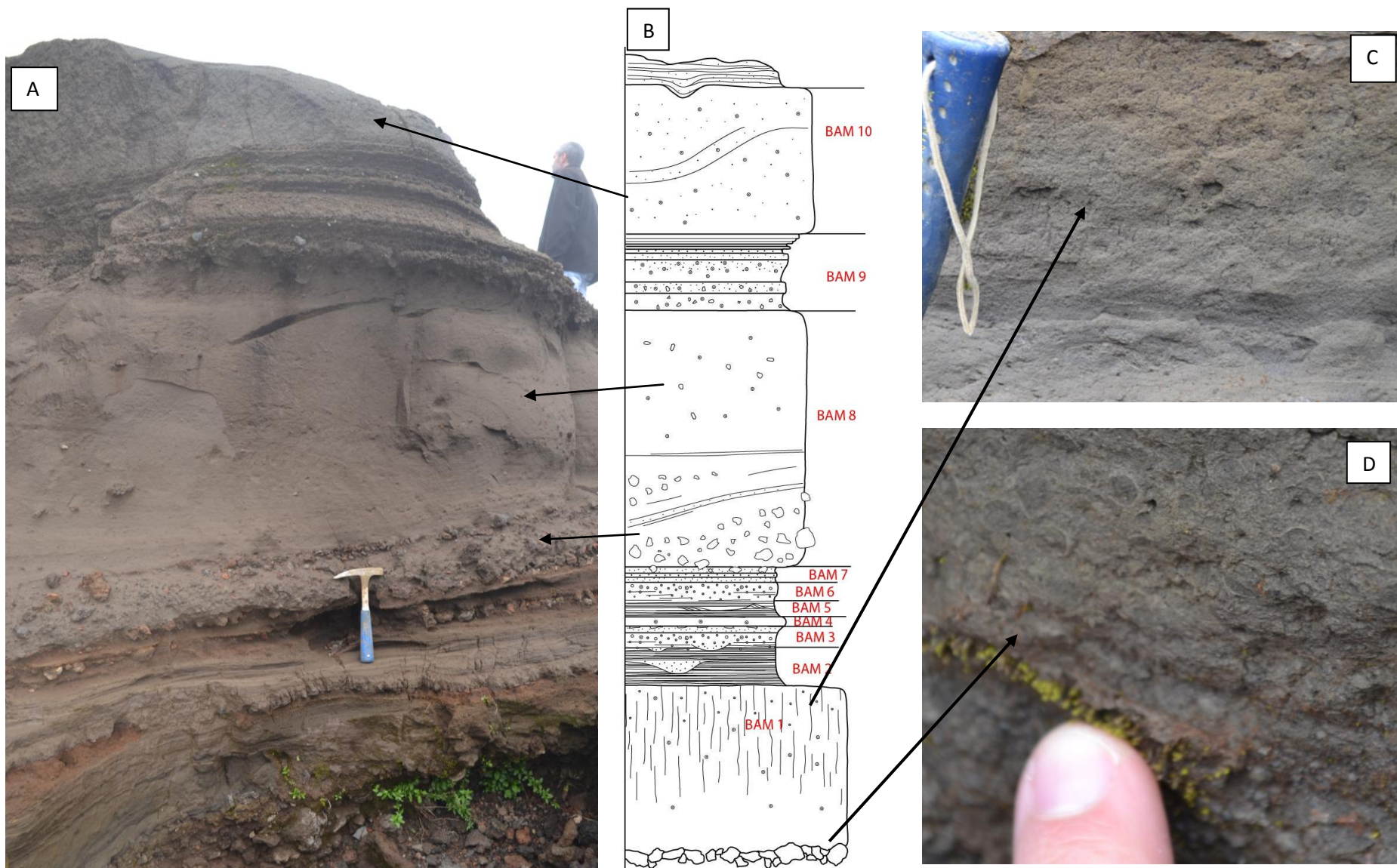


Figure 13 : Photographie (A) et log (B) de l'affleurement de la Petite Carrière. BAM 1 n'apparaît pas sur la photo car elle a été prise à une extrémité de la Petite Carrière et le niveau est biseauté. C : grossissement sur les « pipes » de dégazages de BAM 1. D : grossissement des lapilli accréionnés de BAM 1.

- un niveau de 6 cm d'épaisseur, plutôt stratifié, présentant un granoclassement inverse puis normal, où la matrice est plus importante. On y observe les mêmes éléments lithiques que dans le niveau précédent.
- un niveau de 2 cm identique au premier, où la matrice est de nouveau peu présente.
- un niveau de 2 cm identique au deuxième, où la matrice est très présente.
- un niveau de 6 cm d'épaisseur où la matrice est peu présente, ce niveau est composé de 8 petits lits.

Globalement, sur l'ensemble de BAM 9, on observe une diminution de la taille des éléments de la base au sommet.

BAM 10 est un niveau épais composé d'une partie basse avec stratification frustre. Le niveau supérieur étant plus grossier et non stratifié.

B- Compositions géochimiques des éléments magmatiques

a) Altération des éléments magmatiques

Lorsque des éléments magmatiques étaient présents dans les dépôts, ils ont été prélevés. Ces fragments ont été triés, lavés et montés en plots pour être analysés à la microsonde électronique. Seuls les éléments majeurs ont été analysés pour les verres volcaniques. Les analyses se sont révélées pour la plupart difficiles car les verres étaient en partie, voire totalement pour certains, oxydés (**fig. 14**).

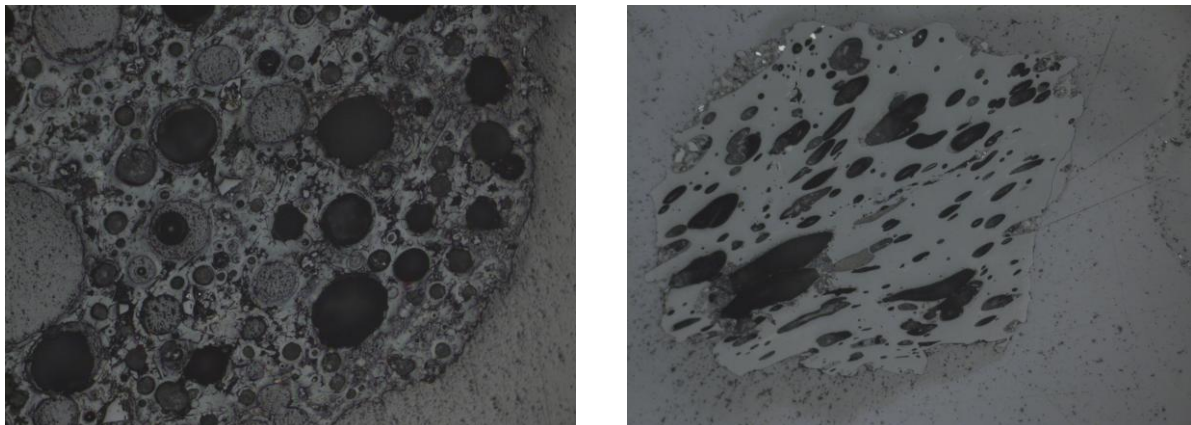


Figure 14 : Exemple de verre entièrement palagonitisé, à gauche, et un verre sain, à droite.
(Photographies prises au microscope optique en lumière réfléchie).

Lorsque cela a été possible, les verres ont été analysés. Les résultats ainsi obtenus ont été triés afin de ne conserver que les analyses avec un total supérieur ou égal à 97% et plus. La présence d'eau dans ces verres peut expliquer que les analyses à la microsonde ne donnent que rarement des totaux supérieurs à 99% en poids d'oxyde.

Les produits d'altération sur certains échantillons ont été analysés afin de connaître leur composition chimique. Ces produits sont composés essentiellement de SiO_2 (entre 13 et 15 wt%), de TiO_2 (entre 11 et 12 wt%) et de FeO (entre 32 et 37 wt%). Ce sont donc des compositions d'hydroxyde de fer, qui est une altération classique en climat humide et chaud et très répandue dans les produits de surface du Piton de la Fournaise (discussion personnelle avec P. Bachèlery).

b) Niveau à gabbros

Des niveaux à gabbro ont été reconnus dans les affleurements décrits précédemment. Quand ces niveaux contenaient des éléments magmatiques, ces éléments ont été montés en plots pour être analysés à la microsonde électronique. Les compositions de ces éléments qui ont pu être analysées, ont été répertoriées dans un digramme alcalins-silice (**fig. 16**). Les verres ont une composition basaltique pour les échantillons du Bras de Mahavel, du Piton des Tangues et du Piton des Basaltes ($47 \text{ wt\%} < \text{SiO}_2 < 50 \text{ wt\%}$, $3 \text{ wt\%} < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 4 \text{ wt\%}$).

La **figure 16** montre les compositions en éléments majeurs en fonction des teneurs en MgO (wt%). Hormis une petite variation (jusqu'à 1% en poids) en MgO, tous les verres magmatiques analysés pour ces échantillons ont des compositions très proches en éléments majeurs. Seuls les échantillons collectés dans le niveau du Piton des Tangues présente une anomalie en MgO. En effet, les analyses à la microsonde de ce niveau montrent des teneurs en magnésium systématiquement plus élevées que celles observées pour les autres niveaux. Néanmoins, pour les autres majeurs, ce niveau présente une plus légère variation de ses concentrations.

Les trois niveaux du Piton des Basaltes ont des compositions chimiques assez proches pour être considérées comme identiques.

Le niveau qui a été associé à Bam9 pour l'affleurement de Mahavel présente deux groupes de chimie différente. Le premier moins riche en magnésium et globalement plus riche en éléments majeurs que le deuxième.

La **figure 15** exprime le rapport $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs MgO. BAM 9 est dans le champ du groupe différencié décrit par Lénat, *et al.*, 2012. Les échantillons du Piton des Basaltes et Mahavel se situent non loin du le champ des basaltes cotectique (SSB, Albarède, *et al.*, 1997) de cette même étude. Le Piton des Tangues se situe dans le champ du groupe anormal. Tous les niveaux ont des compositions très similaires à celles observées pour les SSB définis dans l'étude d'Albarède, *et al.* (1997), excepté le Piton des Tangues. Ce niveau est plus calcique et moins alumineux que les autres et sensiblement plus magnésien (**fig. 15**). Les concentrations en Mg obtenus pour les tephres de Piton des Tangues sont parmi les plus magnésiennes connues de la Fournaise pour des laves aphyriques (Lénat, *et al.*, 2012). Ceci témoigne du caractère relativement primitif de ces liquides.

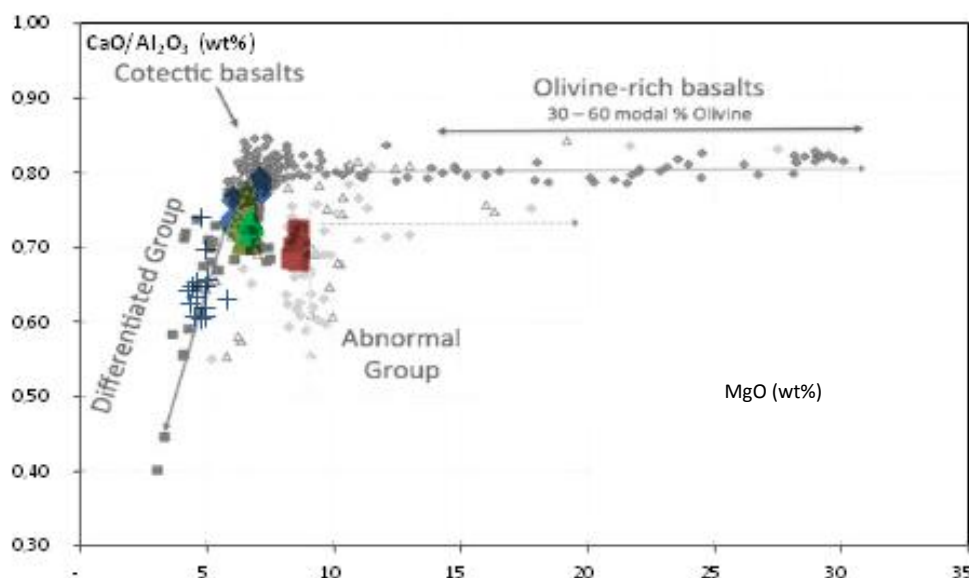


Figure 15 : Diagramme $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs MgO des verres des niveaux à gabbro, modifié depuis Lénat, *et al.* 2012. (Légende voir figure 15)

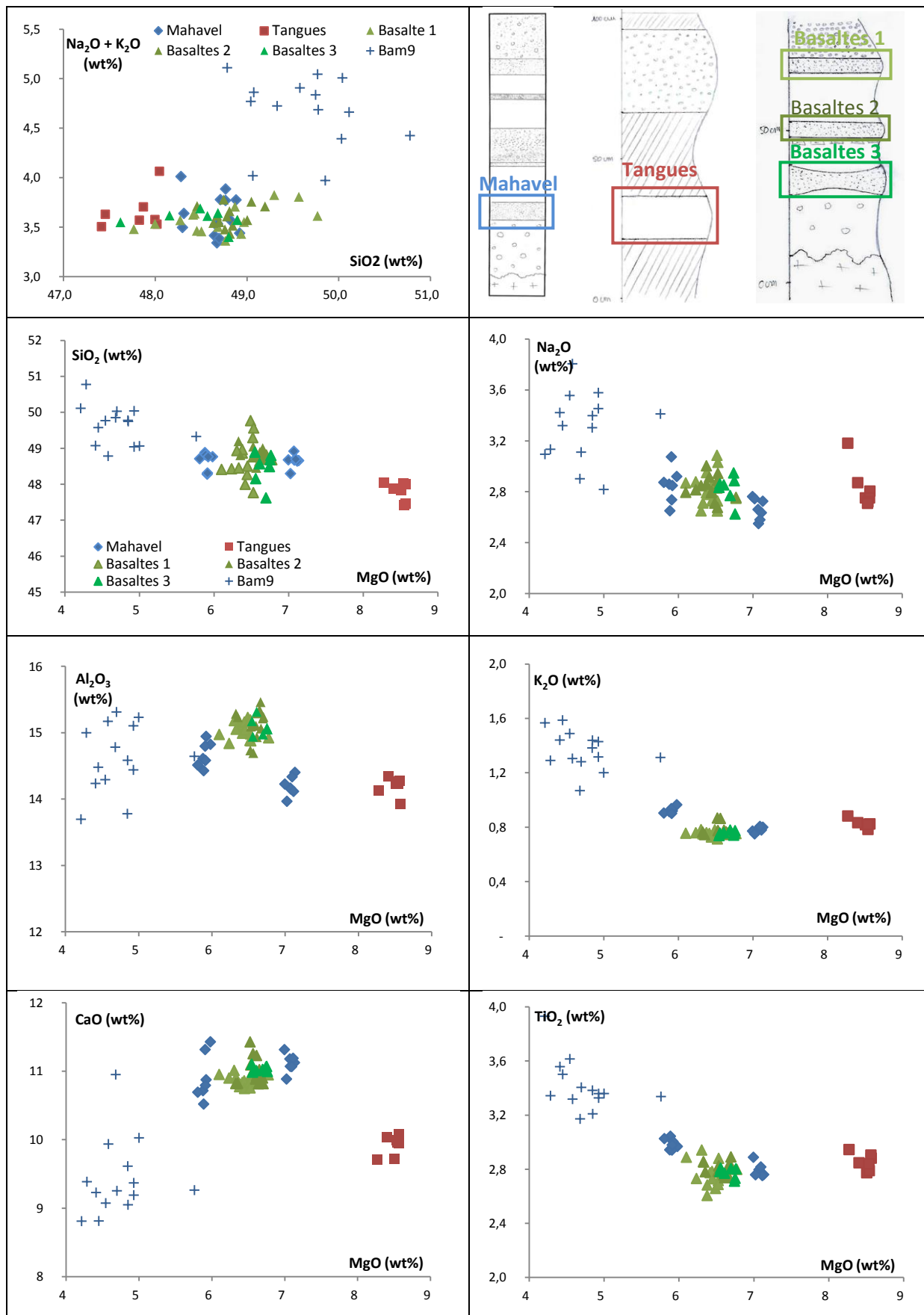


Figure 16 : Diagrammes de variations des éléments majeurs vs MgO wt% pour les verres des niveaux à gabbros.

c) Petite Carrière

Seuls les niveaux renfermant des fragments magmatiques ont été échantillonnés à la Petite Carrière. Les compositions des verres ont été répertoriées dans le diagramme alcalins-silice de la **figure 18**. De manière générale, tous les niveaux échantillonnés et analysés à la Petite Carrière ont des compositions basaltiques. Trois ensembles sont toutefois distingués. Le premier regroupe les niveaux BAM 1 et BAM 3. Les compositions sont comprises entre 48 et 49 wt% pour SiO_2 et entre 3 et 4 wt% pour les alcalins pour BAM 1 et entre 2,5 et 5 wt% pour BAM 3. On observe des compositions similaires pour BAM 3, avec une plus grande variabilité en alcalins ($2,5 \text{ wt}\% < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 5 \text{ wt}\%$). Le deuxième ensemble regroupe BAM 8 et BAM 9, à la limite entre le champ des basaltes et celui des trachy-basaltes. Les teneurs en silice varie de 49 wt% à 51 wt%, avec des concentrations en alcalin entre 4 et 5 wt%. Enfin, le troisième ensemble est composé de BAM 6, qui présente la plus grande variabilité aussi bien en silice ($48 \text{ wt}\% < \text{SiO}_2 < 50 \text{ wt}\%$) qu'en alcalins ($3 \text{ wt}\% < \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O} < 7,5 \text{ wt}\%$).

Sur les diagrammes exprimant les teneurs en éléments majeurs en fonction des teneurs en MgO (**fig. 18**), les compositions des verres sont relativement homogènes. BAM 1 est le seul niveau à avoir des compositions homogènes et très resserrées. BAM 3 présente plus de variabilité en MgO, mais reste dans les compositions des majeurs données par BAM 1. BAM 8 et BAM 9 présentent aussi des compositions en majeurs quasi identiques. Seul BAM 6 montre une grande variabilité dans ses compositions en alcalins (le Na_2O présentant la plus grande variabilité).

La **figure 17** exprime le rapport $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs MgO. On observe une évolution vers les séries différenciées définies par Lénat, *et al*, 2012, au cours du temps pour les niveaux de la Petite Carrière.

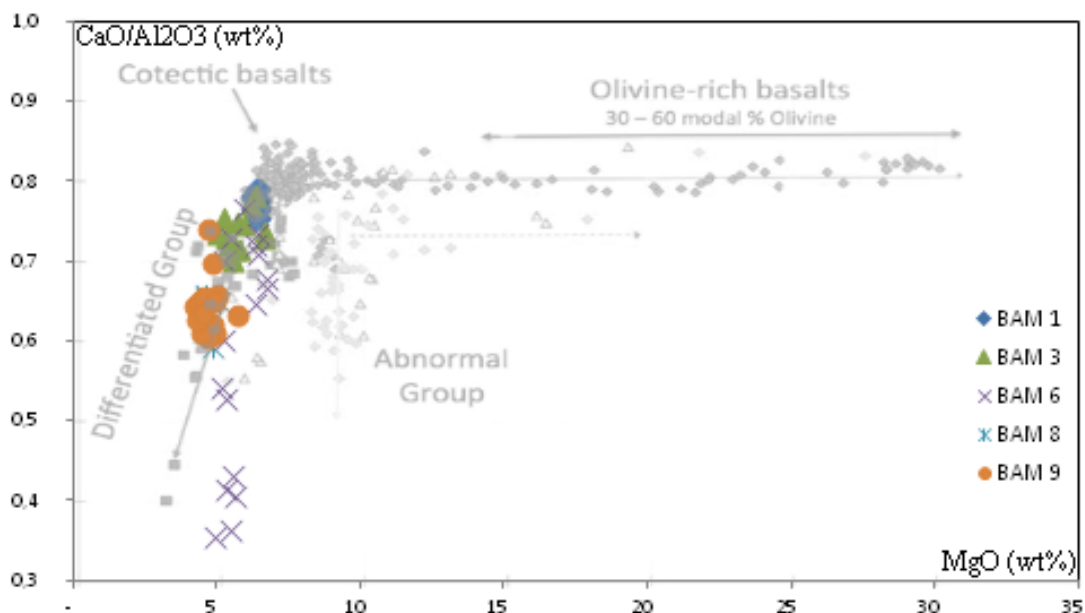


Figure 17 : Diagramme $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs MgO des verres des niveaux à gabbro, modifié depuis Lénat, *et al*, 2012. (Légende voir figure 18)

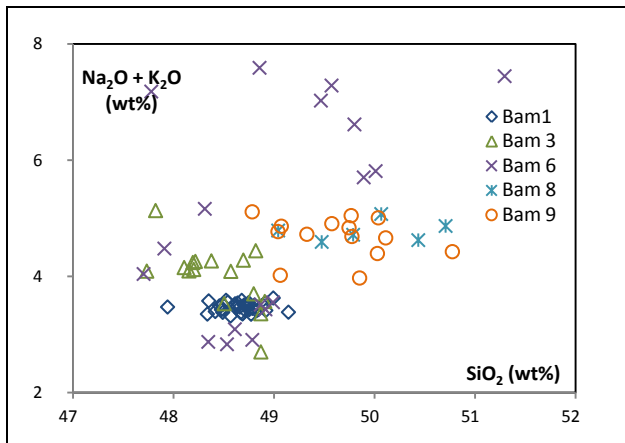
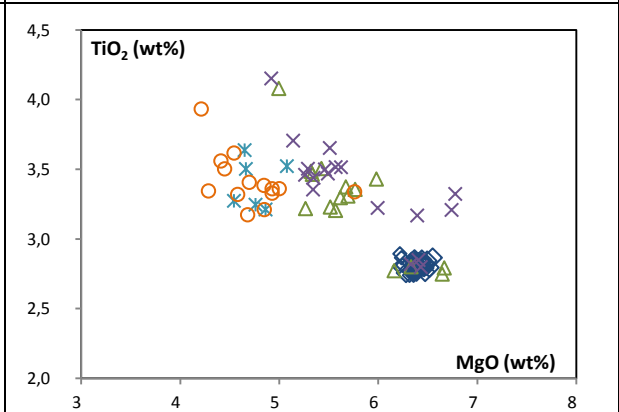
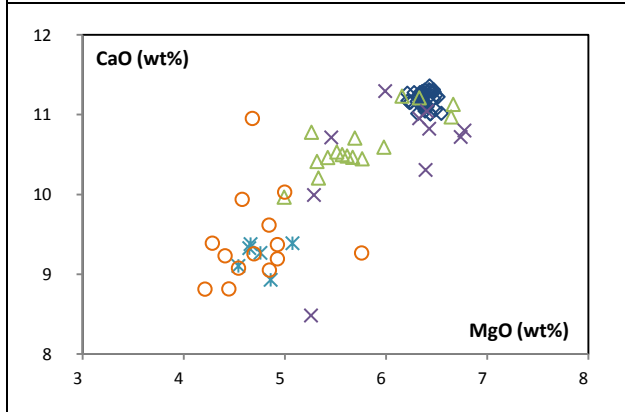
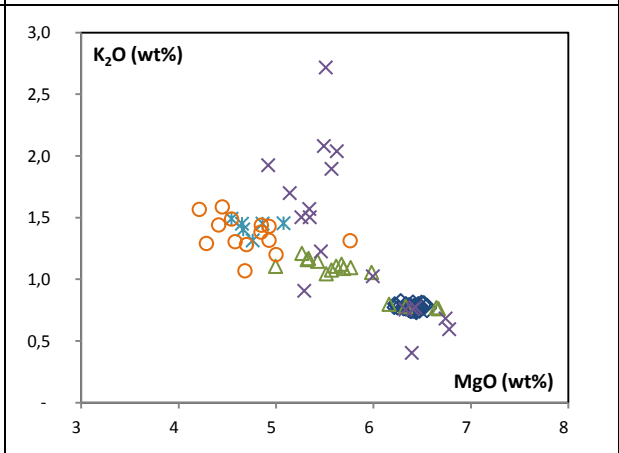
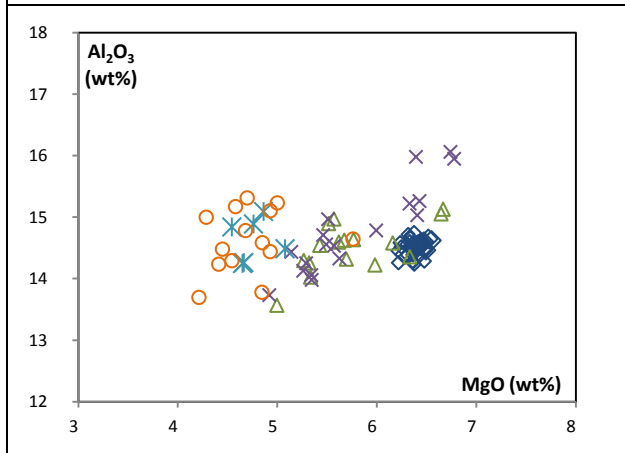
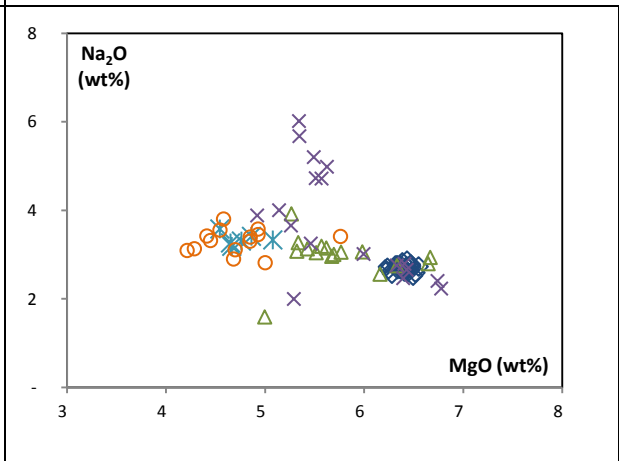
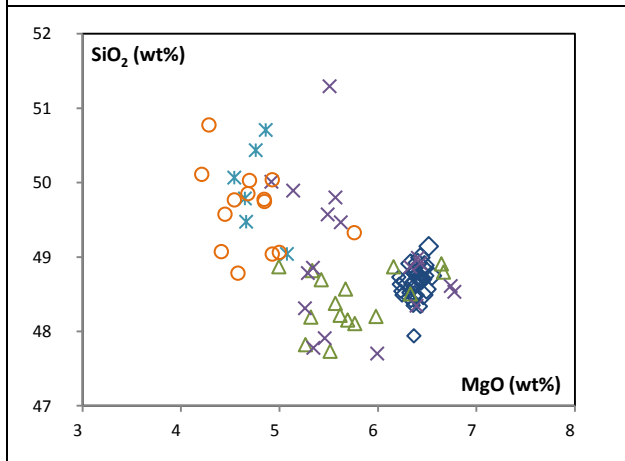


Figure 7 : Diagramme montrant la variation des éléments majeurs en fonction des teneurs en MgO (wt%) dans les verres des niveaux identifiés à la Petite Carrière.



d) Niveaux magmatiques et à quartz

Les unités à quartz ne sont pas corrélées entre elles, puisqu'elles sont trop différentes dans leur contenu et dans leurs aspects sur le terrain. Néanmoins, les compositions chimiques de ces niveaux, au moins en éléments majeurs, ne sont pas si éloignées les unes des autres (**fig. 20**).

Les compositions des tephres magmatiques du Piton des Basaltes, comme pour les niveaux à gabbro précédent, sont très proches les unes des autres, bien qu'une légère variabilité puisse être observée, surtout pour la silice, le sodium, l'aluminium et le magnésium.

Le niveau analysé pour le Piton des Tangues diffère par leur chimie. Un premier pauvre en magnésium, sodium et calcium, et riche en silice, potassium et dans une moindre mesure en aluminium. Le deuxième groupe est composé de deux points isolés riches en magnésium, en sodium, dans une moindre mesure en potassium. Ces deux points ont des teneurs en titane équivalentes à celles retrouvées dans les fragments magmatiques du Piton des Basaltes, des teneurs légèrement plus fortes en potassium et plus faibles en calcium.

Des fragments vitreux (Tangues + TB, **fig. 20**) ont été confiés à P. Bachèlery pour être analysés à la microsonde afin de caractériser les éruptions locales identifiées au dessus des dépôts identifiés comme appartenant au niveau à gabbro. Ces niveaux, constitués de retombées purement magmatiques de lapilli, pris au Trou Blanc (TB - niveau à lapilli) et au Piton des Tangues (tephra), ont des compositions identiques, et très proches d'un des points isolés analysés dans le niveau du niveau à cendres et lapillis du Piton des Tangues.

La **figure 19** montre que les compositions des niveaux magmatiques du Piton des Basaltes sont proches des compositions des basaltes cotectique de Lénat, et al, 2012 (SSB d'Albarède, *et al*, 1997). Les lapillis du Piton des Tangues et des Trou Blancs ont plutôt des compositions du groupe anormal. Les verres du niveau à quartz du Piton des Tangues ont des compositions chimiques entre le groupe différencié et le groupe anormal.

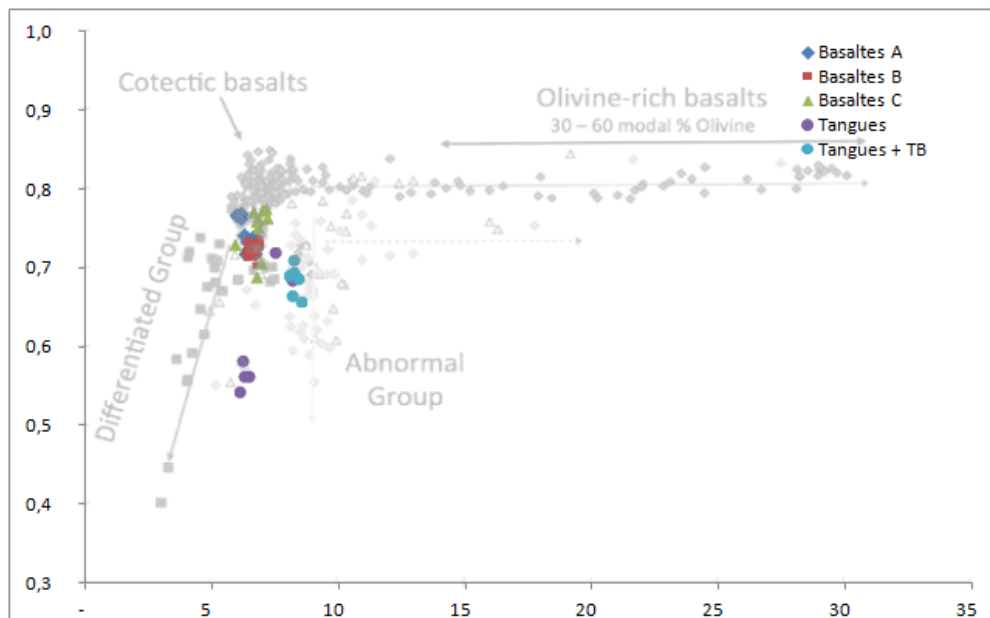


Figure 19 : Diagramme exprimant le rapport $\text{CaO}/\text{Al}_2\text{O}_3$ vs MgO , des verres des niveaux magmatiques du Piton des Basaltes, du niveau à quartz du Piton des Tangues et des lapillis du Piton des Tangues et des Trou Blancs, modifié depuis Lénat, *et al.*, 2012.

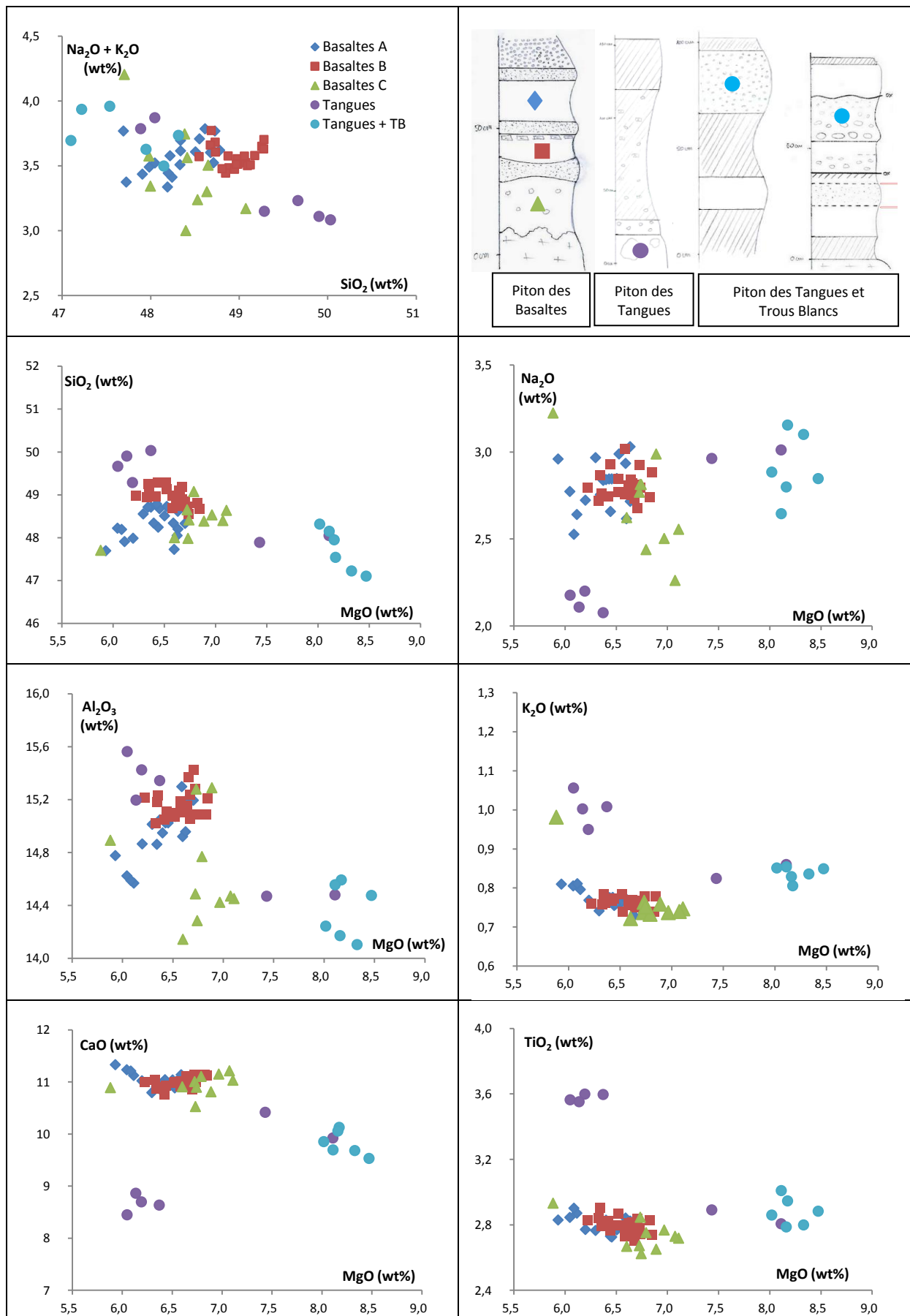


Figure 20 : diagramme montrant la variation des éléments majeurs en fonction des teneurs en MgO (wt%) dans les verres du niveau à quartz du Piton des Tangues, les niveaux magmatiques du Piton des Basaltes et les niveaux à lapilli du Piton des Tangues et Troux Blancs.

C- Datations au ^{14}C

Sur les six échantillons de bois carbonisés envoyés au centre RadioCarbone (Lyon) pour la datation au ^{14}C , quatre ont été datés lors de la rédaction du rapport.

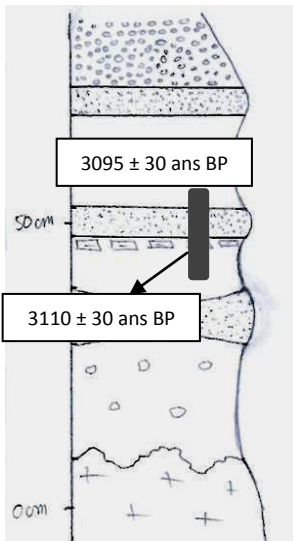


Figure 21 : localisation des niveaux datés par la datation au ^{14}C au Piton des Basaltes.

Le niveau à charbon de l’affleurement des Troux Blancs a été daté à 1495 ± 30 ans BP, ce qui donne un âge calibré entre 440 et 642 ap. J.-C.

Plusieurs niveaux ont été datés au Piton des Basaltes. Leur localisation sur l’affleurement est montrée en **figure 21**.

La racine recoupant plusieurs niveaux au Piton des Basaltes a donné un âge de 3110 ± 30 ans BP, ce qui donne un âge calibré de -1447 à -1304 av. J.-C.

Et le premier niveau à charbon du Piton des Basaltes³⁵ a donné un âge de 3095 ± 30 ans BP, ce qui donne un âge calibré -1434 à -1274 av. J.-C.

Un deuxième affleurement au Piton des Basaltes a été daté. Il se compose à sa base d’un niveau d’une trentaine de centimètres de cendre fines brun rouge contenant des charbons de bois. Le sommet de cet affleurement est identique au sommet du premier l’affleurement : un niveau gris sableux surmonté par les lapillis rouges. Enfin, un autre niveau à charbon a été daté à proximité de l’affleurement du Piton des Basaltes. Ce niveau donne un âge de 3060 ± 35 ans BP (-1417 à -1216 av. J.-C.).

VI. Discussion

A- Identification des évènements explosifs

Le **tableau 1** récapitule les analyses à la loupe binoculaire des contenus des différents niveaux étudiés. Certains de ces niveaux sont identiques dans leur contenu. Ils peuvent alors être corrélés entre eux (**fig. 22**). On peut distinguer deux grands ensembles : les niveaux à gabbro et pyroxène et les niveaux à quartz.

L’analyse des niveaux à gabbros et à pyroxène (en gras dans le **tableau 1**) montre que ces niveaux contiennent des olivines en abondance qui sont pour certaines automorphes dans les petites fractions (entre 1 mm et $500 \mu\text{m}$). La présence de plagioclase, en débris, ne s’observe que dans ces mêmes petites fractions. Les rares pyroxènes qui ont pu être trouvés étaient automorphes. Certaines olivines noires du fait de leur richesse en oxyde, étaient indiscernables des pyroxènes fragmentés, il a donc fallu se fier aux formes cristallographiques des minéraux automorphes.

Quelques rares éléments magmatiques, sous forme de minuscules scories, ont été trouvés dans les fractions 1-2 mm et 1 mm et $500 \mu\text{m}$. Ces petites scories sont rouges et ne contiennent pas de minéraux visibles. Elles ont été mises de côté afin d’être analysées à la microsonde électronique.

Enfin, les gabbros observés macroscopiquement sur les affleurements sont aussi présents dans les fractions plus petites sous forme de petits fragments solitaires.

Tableau 1 : Tableau récapitulatif des analyses à la loupe binoculaire (gab = gabbro, qtz = quartz). Les niveaux en gras correspondent aux niveaux à gabbro et à pyroxène, en italique aux niveaux à quartz, et en police normale aux niveaux magmatiques.

Echantillons	Trous Blancs	Nez de Bœuf	Tangues -qtz	Tangues - qtz	Tangues - gab	Tangues - gab	Tangues - gab	Mahavel - qtz	Mahavel - qtz	Mahavel - gab	Piton Bernard	Piton Bernard
olivine	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
état	cassée, parfois automorphe	<i>cassée, parfois automorphe</i>	<i>cassée, parfois automorphe, oxydée</i>	<i>cassée, parfois automorphe</i>	cassée, parfois automorphe	cassée, parfois automorphe	cassée, parfois automorphe	<i>altéré, cassée</i>	<i>rare, cassé, altérée</i>	cassée, parfois automorphe	<i>très altérée, pas automorphe</i>	<i>rarement automorphe, parfois altéré</i>
pyroxène	+				+	+	+			+		?
état	automorphe				automorphe	automorphe, scorie rouge	automorphe			automorphe		
plagioclase	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
état	cassé	<i>cassé</i>	<i>cassé</i>	<i>cassé</i>	cassé	cassé	cassé	<i>pas automorphe</i>		cassé		
quartz		+	+	+				+	+		+	+
état		<i>automorphe</i>	<i>automorphe</i>	<i>automorphe</i>				<i>cassé pour certains</i>				
magnétite								+				+
état								<i>automorphe</i>				<i>automorphe</i>
scorie	+	+	+		+	+	+			+	+	
état	oxydée, pas clair	<i>certaines oxydées, d'autres noires</i>	<i>oxydée</i>		oxydée	oxydée	oxydée			oxydée	<i>lie de vin</i>	
liquide							+			+		
état							trace d'oxydation			peu altéré		
gabbro	+	+			+	+	+					+
état	frais	<i>frais</i>				frais	frais					
gypsite / zeolite		+	+	+					?		?	?
état		<i>frais</i>	<i>frais</i>	<i>frais</i>								

Echantillons	<i>Piton Sainte Rose</i>	Basaltes 1	Basaltes A	Basaltes 2	Basaltes B	Basaltes 3	Basaltes C	BAM1	BAM3	BAM6	BAM8	BAM9
olivine	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
état		fraiche, rarement automorphe						fragmenté	pâle, fragmenté	rare	fragmenté	fragmenté
pyroxène		+	+	+	+	+	+				+	+
état		automorphe									fragmenté	fragmenté
plagioclase	+	+	+	+	+	+	+		+		+	+
état							seulement à la plus petite fraction		fragmenté		fragmenté	fragmenté
quartz	+											
état	<i>automorphe</i>											
magnétite	+	+	+	+		+	+					
état	<i>automorphe</i>	automorphe	automorphe	automorphe			seulement à la plus petite fraction					
scorie	+		+	+	+	+	+			+	+	+
état	<i>noire</i>		oxydée // gris-brun		oxydée, très abondante	très rare, ac mrx	très abondantes			gris/rouge	gris/brun	rare
liquide		+	+	+	+		+	+	+	+	+	+
état		frais		frais	très altéré		très altéré	frais	oxydé	rare	frais, rare	rare
gabbro	+		+	+	+	+	+				+	+
état	<i>altéré</i>		agrégat plg-px	frais	différence dans la taille des ctx à l'int						fragmenté	frais
gypse / zeolite	+								?	?		
état	<i>Blanc, petite boule</i>											

L'analyse à la loupe binoculaire des niveaux à quartz (en italique dans le **tableau 1**) montre que ces niveaux contiennent des cristaux d'olivines souvent altérés et rarement automorphes, des fragments de plagioclase et des cristaux presque toujours automorphes de quartz. On y trouve aussi des éléments magnétiques qui s'aimantent sur la pince lors du tri. Ces niveaux contiennent de petites scories très différentes d'un niveau à l'autre, elles sont parfois noires, parfois rouges oxydées, et des petits gabbros. Des végétaux (petites feuilles) ont été trouvés dans un niveau du Piton des Tangues. Mais la caractéristique principale de ces niveaux est la présence de gypsite sous forme de petite boule blanche friable. Ces éléments de gypsite peuvent se voir directement sur les affleurements sous forme de petits points blancs millimétriques.

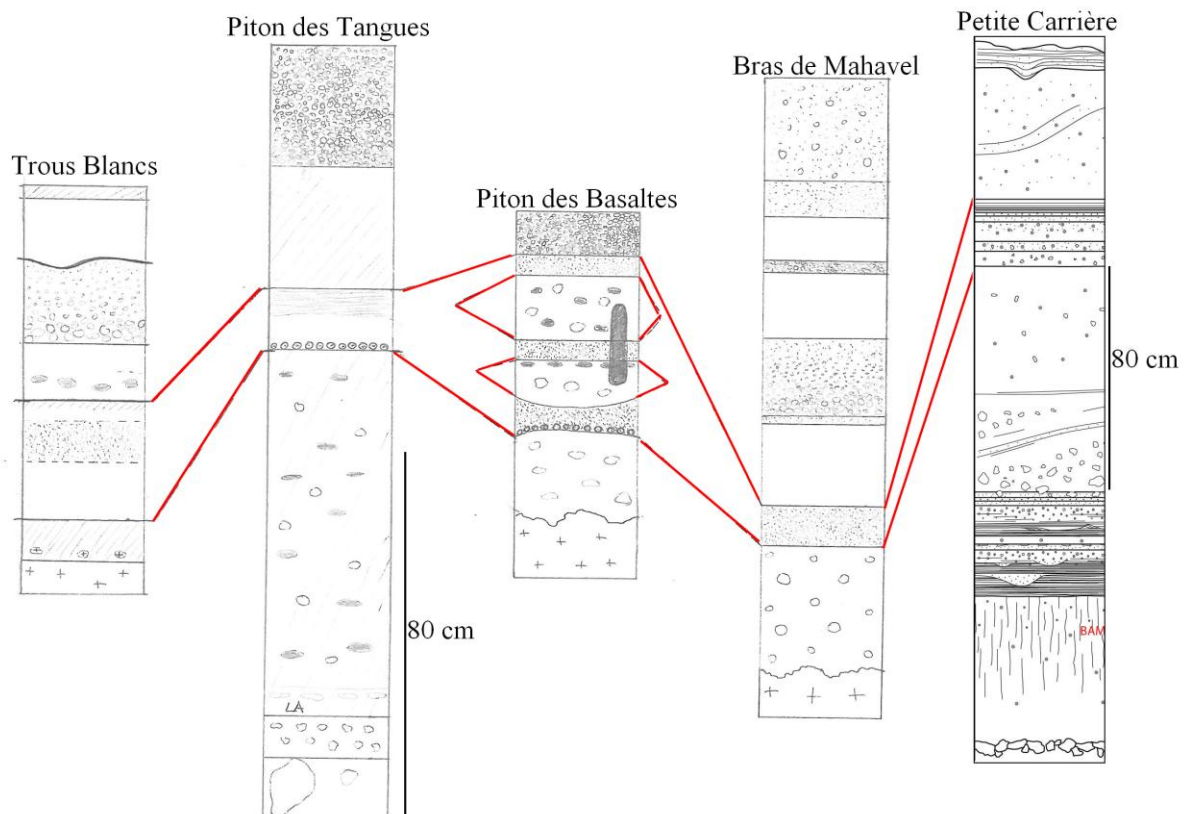


Figure 22 : Correlations proposées entre les niveaux à gabbro, associés à BAM9 (l'échelle du Piton des Tangues est aussi valable pour Trous Blancs, Piton des Basaltes et Bras de Mahavel).

Sur la base des observations de terrain et de l'analyse des dépôts à la loupe binoculaire, une première corrélation peut être proposée concernant le niveau à gabbro (**fig. 22**). Le niveau sableux des Trous Blancs est ainsi relié au niveau sableux du haut de l'affleurement du Piton des Tangues, puis aux niveaux sableux du Piton des Basaltes, au niveau à olivine du Bras de Mahavel et enfin au niveau BAM 9 dans le domaine proximal (affleurement de la Petite Carrière).

Les datations effectuées au cours de stage sont en accord avec celles obtenues par Vergniolle et Bachèlery (1982) et avec la corrélation établie. Elles montrent que le niveau à gabbro est multiple et qu'il se serait déposé au cours d'une succession d'éruptions entre 3100 et 3200 ans BP.

B- Magmas associés aux explosions

Les compositions chimiques obtenues à la microsonde électronique ne sont pas en accord avec les corrélations établies sur le terrain. En effet, si les trois niveaux du Piton des Basaltes montrent des compositions homogènes entre elles, ainsi qu'avec les échantillons du Bras de Mahavel, les échantillons du Piton des Tangues sont plus riches en magnésium, tout en conservant des teneurs en éléments majeurs dans le même ordre de grandeur que les autres niveaux (**fig. 16**). Les différences observées sont significatives. Elles indiquent que le magma échantillonné dans le niveau du Piton des Tangues est un magma qui aurait cristallisé moins d'olivine et qui serait donc moins différencié.

De plus, les compositions de ces niveaux ne peuvent être rattachées à BAM 9 car il est plus alcalin et moins magnésien (**fig. 23**). Le magma émis lors de l'éruption à l'origine de BAM9 est donc plus différencié que celui émis pour les niveaux qui ont été corrélés dans le domaine distal.

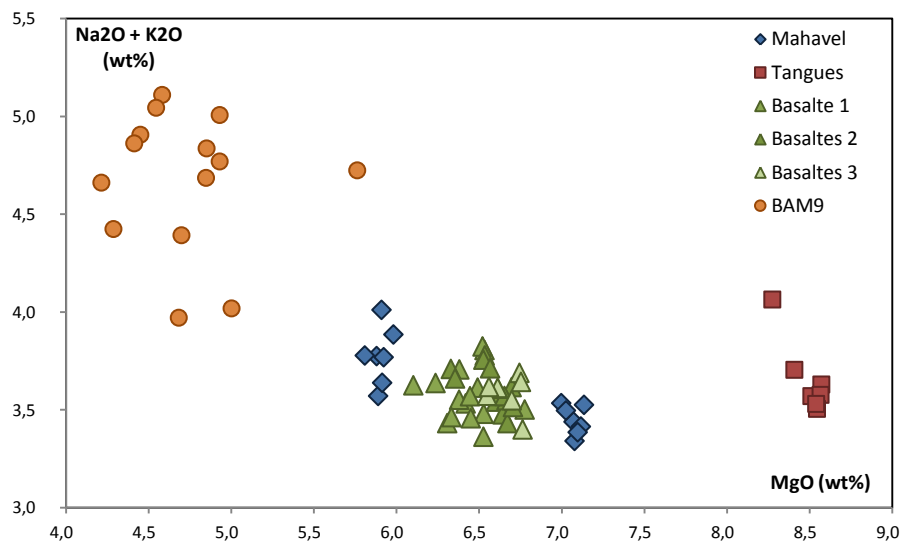


Figure 8 : Diagramme exprimant les alcalins en fonction de la teneur en MgO (wt%) pour l'unité à gabbro.

Aucun des niveaux qui avaient précédemment été corrélés à BAM9 n'est en fait corrélable en considérant la composition chimique des fragments magmatiques contenus dans ces niveaux. En effet, le niveau correspondant à BAM9 au Piton des Tangues est beaucoup trop riche en magnésium. Cette différence ne peut être expliquée par un effet de l'altération.

Une explication pourrait être que les niveaux en distal ne correspondent pas à notre niveau de référence mais à un niveau inférieur. En effet, les compositions chimiques sont plus en accord si on prend comme niveau de référence BAM1 (**fig. 24**).

Il n'y a néanmoins pas de gabbro dans la partie basse de la Petite Carrière. De plus, les datations montrent que ce niveau est mille ans plus vieux que nos niveaux à gabbro. Il a en effet été daté à 4175 ± 145 ans BP (Mohamed-Abchir, 1996). Deux hypothèses peuvent alors être émises :

1/ Il peut ne pas y avoir de gabbro dans les niveaux qui ont été échantillonnés. Les gabbros remarquables sur les affleurements seraient en fait venus s'y déposer après avoir été érodés d'un niveau qui se trouverait plus haut.

2/ Les verres prélevés ne sont pas représentatifs de l'éruption qui est à l'origine du dépôt. En effet, les verres ont pu être arrachés au conduit lors d'une éruption phréatique, et ne représenteraient donc pas le magma de l'éruption.

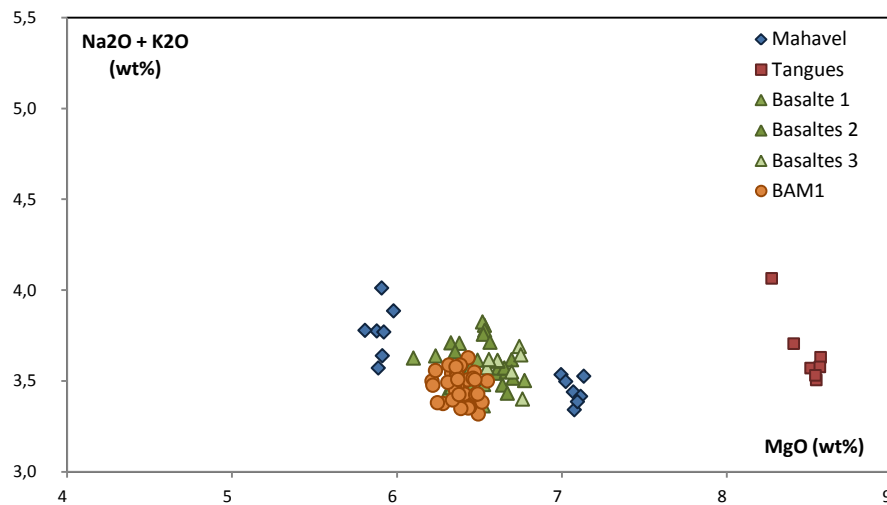


Figure 24 : Diagramme exprimant les teneurs en alcalins en fonction des teneurs en MgO (wt%) pour les niveaux à gabbro et le niveau BAM 1.

La deuxième hypothèse semble la plus probable, au moins dans le cas du Piton des Tangués. En effet si on exprime les compositions des verres analysés et les compositions obtenues pour le niveau du Piton des Tangués dans un même diagramme (**fig. 25**), on observe que ces compositions sont identiques. Les éclats de verre, pourtant très altérés, du niveau à gabbro ont des compositions montrant qu'ils ne sont pas issus de l'éruption à l'origine du dépôt, mais auraient été inclus dans le dépôt lors de l'éruption du Piton des Tangués, ou que l'éruption du Piton des Tangués a commencé par une phase explosive à l'origine du dépôt cendreux observé à l'affleurement du Piton des Tangués, puis a évolué vers une éruption plus effusive pour déposer le tephra purement magmatique. Cette éruption aurait donc déposé un niveau de tephra magmatique ayant une large répartition géographique puisqu'il semble également présent, sur la base de sa composition chimique, à l'affleurement du Trou Blanc.

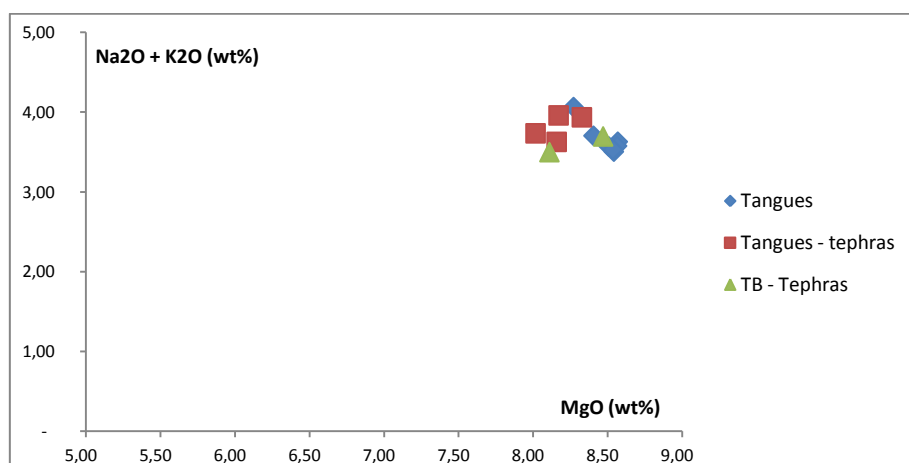


Figure 25 : diagramme alcalins vs MgO (wt%) pour les échantillons analysés par P. Bachèlery et le niveau à gabbro du Piton des Tangués.

Les échantillons de la Petite Carrière montrent une tendance à la différenciation. On observe en effet dans les concentrations des différents éléments majeurs analysés une

augmentation de la teneur en SiO₂ (de 47,5 wt% pour les compositions plus primaires et les plus vieilles – BAM1, jusqu'à 51 wt% pour les plus jeunes et les plus évoluées – BAM9), une diminution de celle du MgO (de 6,5 wt% pour les plus vieilles et moins évoluées à 4 wt% pour les plus jeunes et les plus évoluées).

Si on compare avec les compositions des verres interstitiels des fragments gabbroïques et périclétique analysés par Upton, *et al* (2000) et les compositions des verres de la Petite Carrière obtenues lors de ce stage, on constate que les évolutions sont les mêmes. En effet, les compositions obtenues ici se retrouvent dans les domaines de l'évolution des séries différenciées du Piton des Neiges (Upton and Wadsworth, 1972b, in Upton, *et al*, 2000), qui sont similaires à celles du Piton de la Fournaise (Upton, *et al*, 2000).

C- Dynamismes éruptifs

L'affleurement de la Petite Carrière est le seul où la totalité des dépôts associés aux événements des Cendres de Bellecombe est présent. C'est à partir de cet affleurement que les Cendres de Bellecombe ont été décrites pour la première fois et nommées (Bachelery, 1981). La première unité que nous avons décrite (BAM 1, **fig. 13**) contient à sa base des lapilli accrétonnés et on peut voir apparaître le long de cette unité des « pipes » de dégazage en grande quantité, nous indiquant la présence importante d'eau lors de la mise en place de ce dépôt. Néanmoins, cela ne permet de conclure quant au mode de mise en place de ce dépôt (Best, 1989). De plus, l'analyse du dépôt a révélé la présence d'une grande quantité de matériel magmatique (pluri-millimétrique à centimétrique). Ceci nous indique une éruption phréato-magmatique (Mohamed-Abchir, 1996). Les éléments magmatiques sont présents dans toute la partie basse de la Petite Carrière, jusqu'au niveau BAM 6, ce qui correspond à l'unité U1 décrite par Mohamed-Abchir (1996). Au-delà, aucun élément magmatique n'a été décrit (Mohamed-Abchir, 1996).

Néanmoins, des éléments magmatiques ont été trouvés dans BAM 8 (niveau qui correspondrait à l'unité U2 de Mohamed-Abchir, 1996) et BAM 9 (U3a de la même étude). Cela peut remettre en question l'évolution de l'événement éruptif décrit dans la littérature selon laquelle après une phase phréato-magmatique, on passe à une phase purement phréatique de l'éruption à l'origine des Cendres de Bellecombe. Néanmoins, les éléments magmatiques analysés dans les niveaux BAM 8 et BAM 9 ont des compositions chimiques dans le prolongement des autres niveaux (excepté BAM6) dans une séquence évoluant par cristallisation fractionnée, bien que les aspects sur le terrain de ces retombées soient très différents. BAM8 est, en effet, un niveau de cendre massive contenant à sa base des blocs pluri-centimétriques. BAM9 est une succession de niveaux où la matrice cendreuse est abondante alternant avec des niveaux où la matrice est beaucoup moins présente.

D- Âge et formation de l'Enclos Fouqué

Il a été communément admis jusque là que les Cendres de Bellecombe se sont déposées au cours d'un seul événement éruptif à l'origine de la formation de l'Enclos Fouqué. Mohamed-Abchir (1996) a daté un bois non carbonisé à la base de l'affleurement de la Petite Carrière à 4175 ± 145 ans BP, en accord avec l'âge obtenu (4745 ± 130 ans BP) par Bachelery (1981) sous une coulée directement recouverte par les Cendres de Bellecombe. Il ne décrit aucune pause (discontinuité ou surface d'érosion) entre ses différentes unités. Ce qui tendrait à montrer que l'événement à l'origine des Cendres de Bellecombe a eu lieu sur quelques heures à quelques jours. Néanmoins, notre étude montre qu'il y a des pauses de plus

ou moins longues périodes. En effet, notre niveau à gabbro peut-être corrélé à la base de l'unité U3 décrite par Mohamed-Abchir. Or, ce niveau, au Piton des Tangués, est entouré par deux niveaux datés 3735 ± 90 ans BP et 3205 ± 75 ans BP, ce qui indiquerait un écart d'au moins 1000 ans entre le début des éruptions (base de la Petite Carrière) et le milieu de la Petite Carrière (niveau à gabbro, U3). De plus, ces niveaux sont entourés par des niveaux plus ou moins pédogénisés, indiquant là encore des pauses dans les événements éruptifs.

Il a déjà été montré sur d'autres volcans basaltiques (Miyakejima, Japon, Fernandina, Galapagos, Kilauea, Hawaï) que les calderas se formaient par incrément d'effondrement (Michon, *et al.*, 2011). Néanmoins, ces calderas sont beaucoup plus petites que l'Enclos Fouqué (1,5 km de diamètre pour Miyakejima, et 5 x 6 km pour Fernandina contre 9 x 13 km pour l'Enclos). De même, dans le cas du Kilauea (Hawaï), la caldera a été interprétée comme résultant de la coalescence de « pit craters » (MacDonald, 1965), et le plus gros effondrement aurait eu lieu lors de l'éruption latérale de 1790 (McPhie, *et al.*, 1990) ou à cause de la charge d'un complexe de cumulat à la base de la chambre magmatique (Walker, 1988). Une étude récente, Swanson, *et al.*, 2012, a montré que cette dernière éruption marquerait la fin de l'effondrement de la caldera, et que le dépôt associé à cet effondrement se serait déposé sur 300 ans. Ce modèle ne peut toute fois pas s'appliquer à l'Enclos Fouqué car ses dimensions sont plus grandes que celle du Kilauea (3 x 4,5 km). De plus, aucune éruption sous marine n'a été observée, qui pourrait vidanger le réservoir magmatique et qui pourrait correspondre à une éruption latérale similaire à celles observées pour Hawaï, les Galapagos ou le Japon.

Une hypothèse a été avancée afin d'expliquer les dimensions hors normes de l'Enclos Fouqué par rapport aux autres calderas observées en milieu basaltique : la déformation d'un système hydrothermal sommital (Cecchi, *et al.*, 2005, Michon and Saint Ange, 2008, Bachèlery and Michon, 2010) sous le cône principal. Néanmoins cette hypothèse est toujours débattue, et l'origine de l'effondrement de la caldera de l'Enclos Fouqué encore mal connue.

Les Cendres de Bellecombe se sont déposées sur au moins 1500 ans, si on considère l'âge obtenu sur bois carbonisé dans la descente du Pas de Bellecombe (Bachèlery, 1981) et les âges qui entourent le niveau à gabbro au Piton des Tangués. De plus, on remarque que l'affleurement de la Petite Carrière présente ce qu'on peut comparer à des alternances. On peut, en effet, voir dans la succession des dépôts deux phases ayant le même enchaînement des dépôts : une base massive de cendres avec des évidences de la présence d'eau lors du dépôt (lapilli accréionnés et « pipes » pour BAM 1, petites balles de boue centimétriques et matrice boueuse pour BAM 8) et un sommet de dépôts de déferlante ou du remaniement (BAM 2 à 7, BAM 9). On peut émettre l'hypothèse que BAM 10 soit une base massive, et que les niveaux de déferlante ou de remaniement ont été érodés. Ceci pourrait s'expliquer par l'effondrement successif des trois lobes composant l'Enclos Fouqué.

Les formations de caldera en milieu basaltique sont fréquentes dans l'évolution des systèmes volcaniques, mais peu se sont formées lors d'éruption historique. Néanmoins, elles présentent un danger non négligeable pour les populations vivant sur ces volcans. Dans le cas de La Réunion, le risque d'un effondrement est toujours présent. En effet, la caldera de l'Enclos Fouqué est la troisième du Piton de la Fournaise (Bachèlery, 1981). Il y avait eu précédemment la caldera « primitive », puis la caldera de la Plaine des Sables toutes deux polylobées elles aussi. Bachèlery avance l'hypothèse que les calderas se sont formées lentement, par incréments. Il suggère l'existence de réservoirs magmatiques de grande taille à grande profondeur. De plus, la taille des calderas diminue au cours du temps, suggérant une migration vers la surface des réservoirs magmatiques et d'une diminution de sa taille, en plus de migrer vers l'Est.

Beaucoup plus récemment, l'éruption d'avril 2007 a vidangé le cratère Dolomieu au sommet du Piton de la Fournaise. Les données acquises au cours de cette éruption ont confirmé que ce cratère était le résultat d'une succession rapide d'évènement d'effondrement (Michon, *et al.*, 2007, Michon, *et al.*, 2009).

VII. Conclusion

Nous avons étudié les Cendres de Bellecombe en combinant une étude de terrain précise et une étude géochimique des verres contenus dans différents niveaux. Nous avons ainsi pu déterminer que le niveau à gabbro s'étendait jusque loin dans le domaine distal, c'est-à-dire en dehors de la Plaine des Sables. On retrouve, en effet, ce niveau jusqu'aux des Troues Blancs, à l'Ouest de la Rivière des Remparts. Ce niveau est riche en minéraux libres, tel que l'olivine, le pyroxène et le plagioclase, chacun étant présent sous forme de fragments, rarement automorphe, voire jamais pour le plagioclase. Il contient aussi des petites scories plus ou moins oxydées et altérées. Nous n'avons malheureusement pas pu faire correspondre les analyses géochimiques aux corrélations effectuées sur le terrain. Deux hypothèses ont alors été émises afin d'expliquer ce désaccord : soit les gabbros sont en fait des éléments issus de l'érosion de niveaux supérieurs et se seraient accumulés sur et dans les niveaux que nous avons analysés, soit ce sont les verres qui ne sont pas représentatifs de l'éruption à l'origine du dépôt et auraient été arraché au conduit lors de cette éruption. On peut aussi suggérer la présence de plusieurs niveaux à gabbro.

Nous avons aussi repris la chimie des niveaux identifiés comme magmatique à la Petite Carrière. La chimie de ces niveaux montre une tendance à la différenciation au cours du temps (augmentation des teneurs en SiO₂ et en alcalins, diminution des teneurs en MgO). Nous avons aussi montré que la partie haute contenait aussi des éléments magmatiques (présence de verre dans les niveaux BAM 8 et BAM 9).

Enfin, nous avons montré la présence d'un certain nombre de niveaux à quartz, un peu partout sur le massif du Piton de la Fournaise, qui ne sont pas associés aux Cendres de Bellecombe.

Néanmoins, il reste beaucoup de travail à faire sur les Cendres de Bellecombe. Notamment pour déterminer pourquoi la chimie ne correspond pas aux corrélations faites sur la base des observations de terrain. De plus, il serait intéressant d'élargir le terrain étudié. Nous avons, en effet, travaillé sur une seule direction de dispersion des dépôts, bien que nous ayons été sur le pourtour du massif pour vérifier la présence de niveaux pouvant être associés aux Cendres de Bellecombe (Piton Saint Bernard, Piton Sainte Rose).

Bibliographie

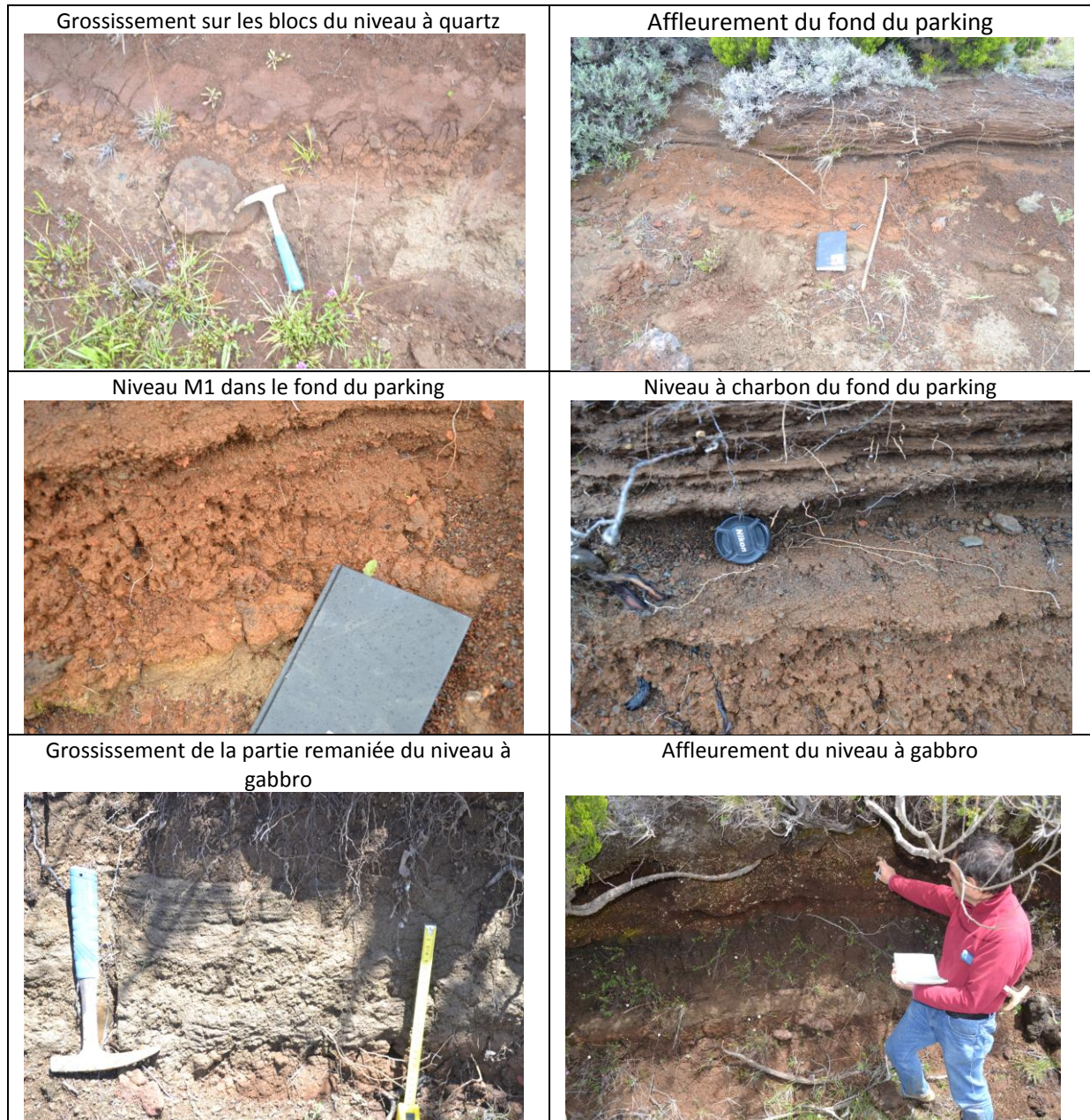
- Albarède, F., Luais, B., Fitton, G., Semet, M., Kaminski, E., Upton, B. G. J., Bachèlery, P., and Cheminée, J.-L.**, 1997, *The geochemical regimes of Piton de la Fournaise volcano (Réunion) during the last 530 000 years*, *Journal of petrology*, 38, 2, pages 171-201.
- Bachèlery, P.**, 1981, *Le Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion), étude volcanologique, Structurale et pétrologique*. Thèse, univ. Clermont-Fd.
- Bachèlery, P., and Michon, L.**, 2010, *The Enclos caldera : how did it form ?*, workshop on collapse calderas, La Réunion.
- Best, J.**, 1989, *Fluidization pipes in volcanoclastic mass flows, Volcan Hudson, Southern Chile*, *Terra Nova*, vol.1, issue 2, pp.203-208, doi:10.1111/j.1365-3121.1989.tb00353.x.
- Boivin, P., Bachèlery, P.**, 2009, *Petrology of 1977 to 1998 eruptions of Piton de la Fournaise, La Réunion Island*, *JVGR*, n°184, pp.109-125.
- Cecchi, E., Van Wyk de Vries, B., Lavest, J. M.**, 2005, *Flank spreading and collapse of weak-cored volcanoes*, *Bull. Volcanol.*, 67, 72-91, doi:10.1007/s00445-004-0369-3.
- Filson, J., T. Simkin, and L.-K. Leu**, 1973, *Seismicity of a caldera collapse: Galapagos Islands 1968*, *J. Geophys. Res.*, 78, 8591–8622, doi:10.1029/JB078i035p08591.
- Geshi, N., T. Shimano, T. Chiba, and S. Nakada**, 2002, *Caldera collapse during the 2000 eruption of Miyakejima Volcano, Japan*, *Bull. Volcanol.*, 64, 55–68, doi:10.1007/s00445-001-0184-z.
- MacDonald, G. A.**, 1965, *Hawaiian calderas*, *Pac. Sci.*, 19, 320-334.
- McPhie, J., Walker, G. PL., Christiansen, R. L.**, 1990, *Phreatomagmatic and phreatic fall and surge deposits from explosions at Kilauea volcano, Hawaii, 1790 A.D.: Keanakakoi Ash Member*, *Bull. Volcanol.*, vol.52, 334-354.
- Michon, L., Staudacher, T., Ferrazzine, V., Bachèlery, P., Marti, J.**, 2007, *April 2007 collapse of Piton de la Fournaise : a new example of caldera formation*, *Geophys. Res. Lett.*, vol 34, L21 301, doi:10.1029/2007GL031248.
- Michon, L., et Saint Ange, F.**, 2008, *Morphology of Piton de la Fournaise basaltic shield volcano (La Réunion Island) : characterization and implication in the volcano evolution*, *J. Geophys. Res.*, 113, B03203, doi:10.1029/2005JB004118.
- Michon, L., Villeneuve, N., Catry, T., Merle, O.**, 2009, *How summit calderas collapse on basaltic volcanoes : new insights from the April 2007 caldera collapse of Piton de la Fournaise volcano*, *JVGR*, 184, 138-151.
- Michon, L., Massin F., Famin V., Ferrazzini V., Roult G.**, 2011, *Basaltic calderas: collapse dynamics, edifice deformation, and variations of magma withdrawal*. *Journal of geophysical research*, Vol. 116, B03209, doi:10.1029/2010JB007636.
- Mohamed-Abchir, A.**, 1996, *Les cendres de Bellecombe : un évènement majeur dans le passé récent du Piton de la Fournaise, Ile de la Réunion*. These, univ. Diderot.
- Staudacher, T., and Allègre, C. J.**, 1993, *Ages of the second caldera of Piton de la Fournaise volcano (Reunion) determined by cosmic ray produced ³He and ²¹Ne*, *Earth and Planetary Science Letters*, 119, 395-404, Elsevier Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Swanson, D. A., Rose, T. R., Fiske, R. S., McGeehin, J. P.**, 2012, *Keanakāko‘i Tephra produced by 300 years of explosive eruptions following collapse of Kīlauea’s caldera in about 1500 CE*, *JVGR*, 215-216, 8–25.

Vergniolle et Bachèlery, 1982, *rapport interne de l'Observatoire Volcanologique du Piton de la Fournaise*.

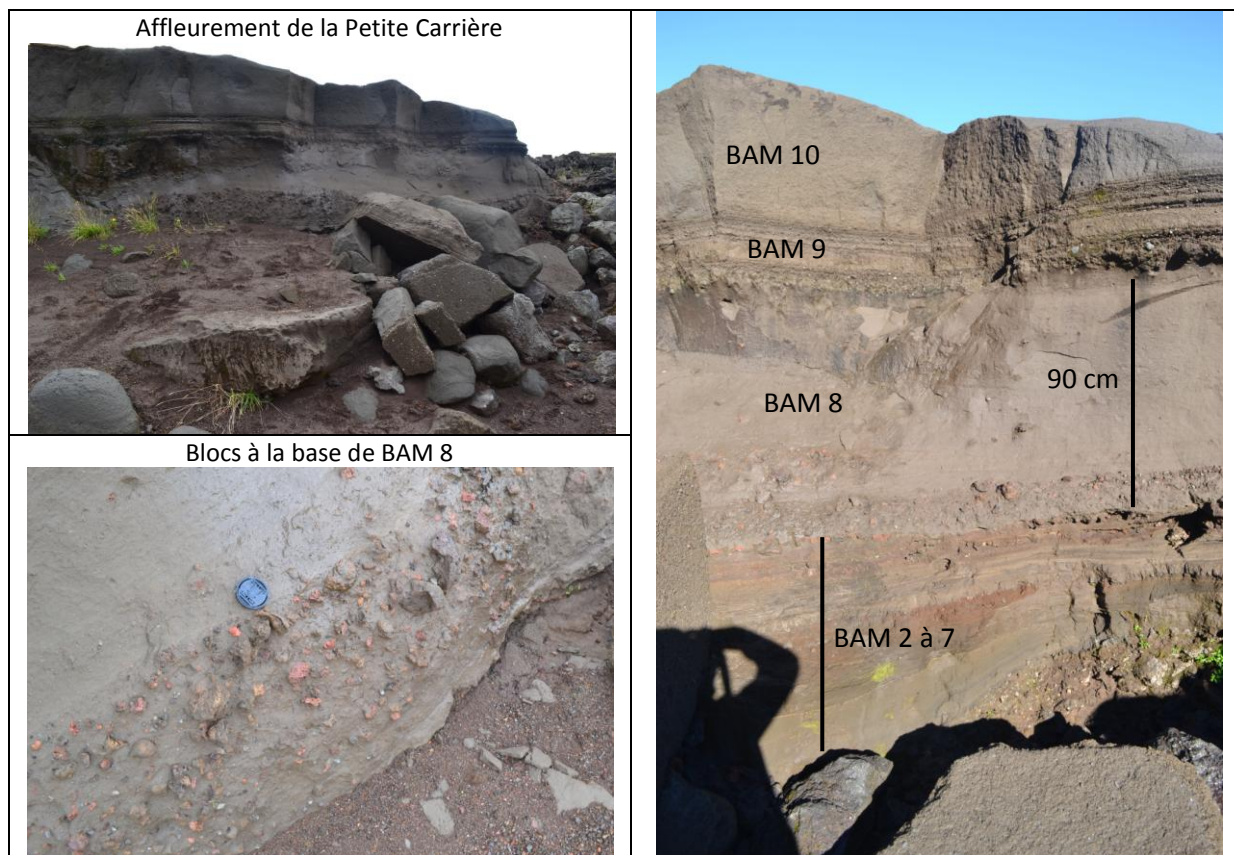
Walker, G. P. L., 1988, Three Hawaiian calderas: an origin through loading by shallow intrusion, *J. Geophys. Res.*, 93, 14 773-14 784.

Annexes

1 - Planche de photographies du Piton des Tangues.



2 – Planche de photographies de la Petite Carrière



4- Tableau de données microsonde pour la Petite Carrière

	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1
SiO ₂	48,92	48,91	48,99	48,49	48,75	48,67	48,57	48,66	48,75	48,70	48,49	48,64	48,68	48,89	49,14	48,75	48,69	48,69	48,83
TiO ₂	2,80	2,83	2,83	2,83	2,81	2,76	2,84	2,81	2,86	2,79	2,80	2,80	2,77	2,76	2,79	2,83	2,85	2,85	2,76
Al ₂ O ₃	14,54	14,56	14,54	14,55	14,51	14,39	14,46	14,71	14,62	14,56	14,58	14,48	14,51	14,60	14,65	14,55	14,59	14,59	14,39
FeO	10,93	11,18	10,86	10,84	10,93	11,17	10,70	10,71	10,57	10,97	10,89	10,58	10,71	10,99	10,91	10,85	10,78	10,78	10,51
MnO	0,18	0,20	0,11	0,15	0,16	0,23	0,18	0,13	0,17	0,18	0,16	0,29	0,25	0,16	0,18	0,25	0,08	0,08	0,17
MgO	6,41	6,33	6,43	6,37	6,47	6,28	6,49	6,37	6,55	6,43	6,46	6,36	6,39	6,47	6,52	6,41	6,44	6,44	6,36
CaO	11,19	11,22	11,30	11,17	11,31	11,28	11,24	11,11	11,02	11,31	11,28	11,29	11,31	11,20	11,22	11,10	11,01	11,01	11,21
Na ₂ O	2,62	2,76	2,86	2,67	2,78	2,57	2,53	2,70	2,73	2,73	2,73	2,77	2,83	2,74	2,59	2,66	2,60	2,60	2,62
K ₂ O	0,79	0,78	0,76	0,77	0,77	0,81	0,79	0,77	0,77	0,77	0,78	0,77	0,76	0,76	0,79	0,76	0,75	0,75	0,79
P ₂ O ₅	0,38	0,31	0,30	0,39	0,33	0,29	0,31	0,28	0,31	0,36	0,35	0,37	0,36	0,30	0,24	0,42	0,27	0,27	0,36
Total	98,76	99,09	98,99	98,23	98,82	98,43	98,12	98,25	98,35	98,82	98,53	98,34	98,55	98,89	99,04	98,60	98,06	98,06	97,99

	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1
SiO ₂	48,61	48,34	48,73	47,94	48,77	48,79	48,52	48,64	48,54	48,42	48,49	48,71	48,48	48,35	48,84	48,46	48,81	48,69	48,83
TiO ₂	2,87	2,79	2,80	2,81	2,85	2,74	2,74	2,89	2,86	2,85	2,81	2,79	2,86	2,75	2,79	2,77	2,77	2,85	2,76
Al ₂ O ₃	14,28	14,38	14,46	14,52	14,45	14,46	14,72	14,26	14,59	14,66	14,52	14,29	14,24	14,28	14,46	14,39	14,58	14,59	14,39
FeO	10,56	10,68	10,67	10,46	10,68	10,91	10,69	10,67	10,80	10,63	11,10	10,84	11,16	10,89	10,39	10,77	10,44	10,78	10,51
MnO	0,17	0,20	0,11	0,21	0,14	0,08	0,23	0,13	0,16	0,21	0,16	0,11	0,22	0,24	0,07	0,35	0,12	0,08	0,17
MgO	6,37	6,43	6,21	6,37	6,39	6,36	6,32	6,22	6,23	6,34	6,25	6,48	6,38	6,36	6,49	6,31	6,37	6,44	6,36
CaO	11,23	11,36	11,27	11,09	11,05	11,28	11,01	11,17	11,15	11,28	11,16	11,29	11,24	11,25	11,06	11,16	11,14	11,01	11,21
Na ₂ O	2,75	2,59	2,73	2,69	2,61	2,69	2,82	2,67	2,76	2,61	2,61	2,66	2,66	2,81	2,65	2,73	2,74	2,60	2,62
K ₂ O	0,78	0,76	0,77	0,79	0,74	0,76	0,77	0,80	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,75	0,79
P ₂ O ₅	0,37	0,34	0,44	0,39	0,32	0,36	0,38	0,43	0,34	0,29	0,36	0,39	0,30	0,37	0,28	0,35	0,36	0,27	0,36
Total	97,99	97,86	98,19	97,27	97,99	98,43	98,20	97,89	98,24	98,07	98,23	98,31	98,31	98,06	97,81	98,05	98,09	98,06	97,99

	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM1	BAM3	BAM3
SiO ₂	48,61	48,34	48,73	47,94	48,77	48,79	48,52	48,64	48,54	48,42	48,49	48,71	48,48	48,35	48,84	48,46	48,81	48,11	48,22
TiO ₂	2,87	2,79	2,80	2,81	2,85	2,74	2,74	2,89	2,86	2,85	2,81	2,79	2,86	2,75	2,79	2,77	2,77	3,36	3,30
Al ₂ O ₃	14,28	14,38	14,46	14,52	14,45	14,46	14,72	14,26	14,59	14,66	14,52	14,29	14,24	14,28	14,46	14,39	14,58	14,64	14,60
FeO	10,56	10,68	10,67	10,46	10,68	10,91	10,69	10,67	10,80	10,63	11,10	10,84	11,16	10,89	10,39	10,77	10,44	11,54	11,50
MnO	0,17	0,20	0,11	0,21	0,14	0,08	0,23	0,13	0,16	0,21	0,16	0,11	0,22	0,24	0,07	0,35	0,12	0,23	0,12
MgO	6,37	6,43	6,21	6,37	6,39	6,36	6,32	6,22	6,23	6,34	6,25	6,48	6,38	6,36	6,49	6,31	6,37	5,77	5,62
CaO	11,23	11,36	11,27	11,09	11,05	11,28	11,01	11,17	11,15	11,28	11,16	11,29	11,24	11,25	11,06	11,16	11,14	10,45	10,48
Na ₂ O	2,75	2,59	2,73	2,69	2,61	2,69	2,82	2,67	2,76	2,61	2,61	2,66	2,66	2,81	2,65	2,73	2,74	3,06	3,15
K ₂ O	0,78	0,76	0,77	0,79	0,74	0,76	0,77	0,80	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	1,10	1,11
P ₂ O ₅	0,37	0,34	0,44	0,39	0,32	0,36	0,38	0,43	0,34	0,29	0,36	0,39	0,30	0,37	0,28	0,35	0,36	0,54	0,47
Total	97,99	97,86	98,19	97,27	97,99	98,43	98,20	97,89	98,24	98,07	98,23	98,31	98,31	98,06	97,81	98,05	98,09	98,78	98,56

	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM3	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6
SiO ₂	48,57	47,74	48,19	48,16	48,82	48,20	48,38	48,70	47,82	48,87	48,51	48,80	48,91	48,87	48,61	48,35	48,53	47,70	48,99
TiO ₂	3,37	3,23	3,49	3,31	3,46	3,43	3,20	3,50	3,22	2,77	2,80	2,79	2,75	4,08	3,21	3,17	3,32	3,22	2,85
Al ₂ O ₃	14,63	14,90	14,26	14,32	14,03	14,22	14,97	14,54	14,30	14,58	14,36	15,13	15,05	13,57	16,06	15,98	15,95	14,79	15,03
FeO	11,54	11,03	11,74	11,24	11,23	11,26	11,40	11,58	11,95	10,83	10,72	10,65	10,64	14,20	11,35	12,22	11,49	11,60	10,63
MnO	0,21	0,26	0,15	0,26	0,21	0,18	0,24	0,22	0,23	0,09	0,17	0,11	0,20	0,17	0,19	0,17	0,24	0,15	0,19
MgO	5,67	5,52	5,32	5,69	5,33	5,98	5,57	5,43	5,27	6,16	6,33	6,67	6,65	5,00	6,74	6,39	6,78	5,99	6,41
CaO	10,46	10,53	10,41	10,71	10,20	10,59	10,50	10,46	10,78	11,23	11,21	11,13	10,97	9,96	10,72	10,31	10,80	11,29	11,04
Na ₂ O	2,96	3,04	3,08	3,00	3,27	3,06	3,19	3,13	3,92	2,56	2,75	2,94	2,80	1,59	2,41	2,47	2,23	3,02	2,79
K ₂ O	1,12	1,05	1,16	1,09	1,17	1,06	1,08	1,15	1,21	0,80	0,78	0,76	0,77	1,11	0,68	0,40	0,60	1,02	0,76
P ₂ O ₅	0,45	0,39	0,55	0,44	0,53	0,47	0,46	0,55	0,48	0,33	0,32	0,32	0,38	0,64	0,38	0,43	0,45	0,41	0,38
Total	99,00	97,69	98,35	98,22	98,27	98,46	98,99	99,26	99,17	98,22	97,95	99,30	99,12	99,19	100,34	99,88	100,39	99,20	99,08

	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM6	BAM8	BAM8	BAM8	BAM8	BAM8	BAM8
SiO ₂	48,92	48,87	47,91	48,79	48,86	47,78	49,80	49,47	49,57	50,01	48,31	51,30	49,89	49,48	49,79	50,71	50,44	50,07	49,04
TiO ₂	2,80	2,82	3,50	3,50	3,35	3,44	3,52	3,51	3,47	4,15	3,46	3,65	3,70	3,50	3,64	3,21	3,25	3,27	3,52
Al ₂ O ₃	15,26	15,22	14,71	14,25	14,06	13,98	14,54	14,33	14,56	13,73	14,13	14,97	14,44	14,26	14,25	15,09	14,89	14,84	14,49
FeO	10,96	10,69	10,97	12,43	12,21	12,08	12,28	12,35	12,97	14,24	11,95	12,82	11,62	12,17	11,20	10,90	11,06	11,86	12,02
MnO	0,24	0,10	0,28	0,20	0,15	0,26	0,23	0,21	0,18	0,08	0,16	0,12	0,12	0,20	0,11	0,15	0,29	0,44	0,14
MgO	6,43	6,33	5,46	5,29	5,34	5,35	5,57	5,62	5,49	4,92	5,26	5,51	5,14	4,66	4,65	4,86	4,76	4,54	5,08
CaO	10,82	10,95	10,71	9,99	5,83	7,37	6,25	5,81	5,27	4,88	8,48	2,84	7,82	9,38	9,33	8,93	9,27	9,10	9,39
Na ₂ O	2,66	2,76	3,25	2,00	6,02	5,68	4,72	4,99	5,20	3,89	3,66	4,73	4,00	3,19	3,26	3,41	3,31	3,58	3,33
K ₂ O	0,77	0,76	1,23	0,91	1,57	1,50	1,90	2,04	2,08	1,93	1,50	2,72	1,70	1,40	1,45	1,45	1,32	1,49	1,45
P ₂ O ₅	0,32	0,26	0,54	0,47	0,49	0,51	0,44	0,41	0,48	0,62	0,48	0,47	0,52	0,66	0,54	0,50	0,64	0,64	0,58
Total	99,18	98,76	98,57	97,84	97,89	97,94	99,23	98,74	99,28	98,45	97,40	99,12	98,95	98,90	98,21	99,22	99,22	99,85	99,04

	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9	BAM9
SiO ₂	50,11	50,04	49,75	50,03	49,58	50,78	49,06	49,07	49,78	49,85	48,78	49,77	49,04	49,33		
TiO ₂	3,93	3,33	3,21	3,41	3,50	3,34	3,36	3,56	3,38	3,17	3,32	3,62	3,36	3,34		
Al ₂ O ₃	13,70	15,11	14,59	15,31	14,48	15,00	15,23	14,24	13,78	14,78	15,17	14,29	14,44	14,65		
FeO	12,39	10,84	10,99	10,72	11,66	10,39	11,45	11,08	11,80	10,70	10,80	11,92	10,98	11,87		
MnO	0,22	0,26	0,19	0,16	0,04	0,11	0,25	0,26	0,14	0,31	0,32	0,25	0,17	0,11		
MgO	4,21	4,93	4,85	4,70	4,45	4,29	5,00	4,41	4,85	4,68	4,58	4,54	4,93	5,76		
CaO	8,81	9,19	9,05	9,25	8,81	9,39	10,03	9,23	9,61	10,95	9,94	9,07	9,37	9,26		
Na ₂ O	3,09	3,58	3,40	3,11	3,32	3,13	2,82	3,42	3,30	2,90	3,81	3,56	3,45	3,41		
K ₂ O	1,57	1,43	1,44	1,28	1,59	1,29	1,20	1,44	1,38	1,07	1,31	1,49	1,32	1,31		
P ₂ O ₅	0,70	0,56	0,50	0,58	0,54	0,65	0,57	0,59	0,62	0,49	0,52	0,55	0,51	0,62		
Total	98,73	99,26	97,95	98,55	97,97	98,37	98,98	97,30	98,65	98,91	98,54	99,07	97,57	99,66		

5- Tableau de données microsonde pour les niveaux à gabbro

	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Mahavel	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues
SiO ₂	48,77	48,92	48,67	48,66	48,68	48,64	48,70	48,88	48,82	48,71	48,77	48,28	48,30	48,31	47,83	47,46	47,87	48,00	47,41	
TiO ₂	2,97	2,80	2,78	2,76	2,89	2,75	2,82	2,94	3,04	3,03	3,01	2,94	2,76	2,98	2,77	2,88	2,85	2,91	2,79	
Al ₂ O ₃	14,83	14,17	14,15	14,40	14,23	14,12	14,34	14,61	14,43	14,51	14,95	14,80	13,97	14,58	14,23	13,93	14,35	14,28	14,27	
FeO	10,91	11,38	10,82	11,00	11,09	11,29	11,13	11,16	10,89	10,72	11,08	11,01	10,68	11,02	11,76	11,93	11,61	11,83	11,79	
MnO	0,14	0,18	0,23	0,21	0,20	0,17	0,16	0,22	0,04	0,11	0,16	0,02	0,18	0,15	0,25	0,20	0,22	0,28	0,16	
MgO	5,98	7,07	7,08	7,13	7,00	7,11	7,10	5,88	5,89	5,81	5,92	5,91	7,02	5,91	8,51	8,57	8,41	8,57	8,54	
CaO	11,43	11,18	11,07	11,13	11,32	11,19	11,07	10,72	10,52	10,69	10,88	11,32	10,89	10,79	9,73	10,08	10,04	9,95	9,96	
Na ₂ O	2,92	2,66	2,55	2,73	2,76	2,64	2,58	2,86	2,65	2,87	2,85	3,07	2,75	2,74	2,75	2,81	2,87	2,75	2,72	
K ₂ O	0,97	0,78	0,79	0,80	0,77	0,78	0,81	0,92	0,92	0,90	0,92	0,94	0,75	0,90	0,82	0,82	0,83	0,83	0,78	
P ₂ O ₅	0,43	0,34	0,32	0,34	0,28	0,29	0,38	0,36	0,35	0,33	0,36	0,36	0,37	0,41	0,32	0,27	0,38	0,31	0,44	
Total	99,32	99,48	98,47	99,16	99,21	98,99	99,06	98,55	97,55	97,69	98,88	98,65	97,67	97,81	98,96	98,94	99,42	99,70	98,87	

	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tang - lapilli	Tang - lapilli	Tang - lapilli	Tang - lapilli	TB - lapilli	TB - lapilli
SiO ₂	48,02	48,05	48,87	48,41	49,77	49,57	47,77	48,00	48,97	48,68	48,27	48,50	48,43	48,31	47,54	47,95	47,22	47,10	48,15	
TiO ₂	2,84	2,95	2,68	2,89	2,66	2,88	2,72	2,77	2,61	2,80	2,78	2,73	2,73	2,86	2,95	2,79	2,80	2,88	3,01	
Al ₂ O ₃	14,23	14,13	15,06	14,97	15,23	14,88	14,98	14,99	15,11	14,92	15,16	15,05	14,84	14,24	14,59	14,17	14,10	14,48	14,56	
FeO	11,61	11,07	10,14	10,10	10,52	10,62	10,72	10,34	9,59	10,14	10,28	10,50	10,93	12,09	11,61	12,31	11,71	11,76	12,31	
MnO	0,13	0,21	0,24	0,02	0,05	0,24	0,13	0,09	0,06	0,25	0,20	0,05	0,11	-	0,15	0,06	-	0,22	0,13	
MgO	8,54	8,27	6,38	6,10	6,49	6,53	6,53	6,42	6,38	6,77	6,44	6,45	6,23	8,02	8,17	8,16	8,33	8,47	8,11	
CaO	10,00	9,71	10,78	10,95	10,79	10,84	10,93	10,84	10,82	10,95	10,86	10,75	10,90	9,86	10,13	10,06	9,68	9,53	9,70	
Na ₂ O	2,71	3,18	2,95	2,87	2,83	3,03	2,73	2,78	2,79	2,75	2,84	2,73	2,88	2,88	3,15	2,80	3,10	2,85	2,65	
K ₂ O	0,82	0,88	0,76	0,76	0,78	0,78	0,75	0,75	0,76	0,75	0,73	0,73	0,76	0,85	0,81	0,83	0,84	0,85	0,85	
P ₂ O ₅	0,31	0,36	0,30	0,44	0,31	0,46	0,30	0,30	0,25	0,34	0,29	0,34	0,39	0,42	0,48	0,20	0,37	0,44	0,38	
Total	99,22	98,81	98,16	97,51	99,43	99,82	97,56	97,28	97,32	98,36	97,86	97,82	98,20	99,54	99,57	99,32	98,15	98,57	99,84	

(Tang – lapilli = lapilli du Piton des Tangues analysés par P. Bachèlery ; TB – lapilli = lapilli des Trous Blancs analysés par P. Bachèlery)

	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 1	Bas. 2	Bas. 2
SiO ₂	48,87	48,41	49,77	49,57	47,77	48,00	48,97	48,68	48,27	48,50	48,43	49,30	48,76	48,94	48,45	48,67	48,63	48,76	49,20
TiO ₂	2,68	2,89	2,66	2,88	2,72	2,77	2,61	2,80	2,78	2,73	2,73	2,69	2,69	2,94	2,85	2,89	2,76	2,75	2,86
Al ₂ O ₃	15,06	14,97	15,23	14,88	14,98	14,99	15,11	14,92	15,16	15,05	14,84	14,88	15,19	15,18	15,05	15,22	15,11	15,32	15,29
FeO	10,14	10,10	10,52	10,62	10,72	10,34	9,59	10,14	10,28	10,50	10,93	10,08	10,20	10,32	10,90	10,65	10,36	10,28	10,78
MnO	0,24	0,02	0,05	0,24	0,13	0,09	0,06	0,25	0,20	0,05	0,11	0,18	0,08	0,11	0,20	0,12	0,20	0,23	0,11
MgO	6,38	6,10	6,49	6,53	6,53	6,42	6,38	6,77	6,44	6,45	6,23	6,52	6,52	6,31	6,33	6,70	6,60	6,64	6,33
CaO	10,78	10,95	10,79	10,84	10,93	10,84	10,82	10,95	10,86	10,75	10,90	10,84	10,76	11,01	10,91	10,90	10,89	10,82	10,82
Na ₂ O	2,95	2,87	2,83	3,03	2,73	2,78	2,79	2,75	2,84	2,73	2,88	3,09	2,65	2,65	2,71	2,86	2,80	2,71	2,94
K ₂ O	0,76	0,76	0,78	0,78	0,75	0,75	0,76	0,75	0,73	0,73	0,76	0,74	0,71	0,78	0,75	0,76	0,75	0,77	0,77
P ₂ O ₅	0,30	0,44	0,31	0,46	0,30	0,30	0,25	0,34	0,29	0,34	0,39	0,34	0,43	0,44	0,29	0,36	0,33	0,41	0,37
Total	98,16	97,51	99,43	99,82	97,56	97,28	97,32	98,36	97,86	97,82	98,20	98,65	97,99	98,69	98,46	99,13	98,41	98,69	99,46

	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 2	Bas. 3	Bas. 3	Bas. 3	Bas. 3	Bas. 3	Bas. 3	Bas. 3
SiO ₂	48,81	48,81	48,75	48,84	48,70	48,90	49,00	48,78	49,05	48,46	48,80	48,49	48,57	47,62	48,68	48,89	48,16
TiO ₂	2,83	2,78	2,83	2,82	2,75	2,76	2,74	2,74	2,78	2,78	2,80	2,71	2,77	2,80	2,73	2,78	2,81
Al ₂ O ₃	15,06	15,24	15,09	15,24	15,46	15,29	15,34	14,93	14,74	14,70	15,05	15,05	15,32	14,97	15,08	15,18	14,94
FeO	10,85	10,45	10,32	10,24	10,50	10,38	10,50	10,38	10,59	11,00	10,66	10,36	10,47	10,54	10,71	10,72	10,60
MnO	0,14	0,17	0,17	0,19	0,05	0,15	0,09	0,19	0,27	0,24	0,08	0,17	0,13	0,13	0,16	0,24	0,08
MgO	6,67	6,35	6,53	6,70	6,66	6,61	6,65	6,61	6,52	6,57	6,76	6,74	6,61	6,70	6,75	6,55	6,56
CaO	10,92	10,82	11,09	10,82	10,99	10,94	11,02	11,23	11,43	11,26	11,00	11,06	11,01	11,03	11,07	11,10	10,99
Na ₂ O	2,68	2,92	3,00	2,76	2,79	2,80	2,82	2,83	2,89	2,85	2,63	2,95	2,85	2,77	2,89	2,83	2,86
K ₂ O	0,76	0,75	0,77	0,76	0,76	0,77	0,76	0,78	0,87	0,87	0,78	0,74	0,76	0,78	0,76	0,74	0,76
P ₂ O ₅	0,37	0,32	0,32	0,41	0,27	0,35	0,35	0,37	0,35	0,27	0,39	0,37	0,37	0,35	0,39	0,31	0,41
Total	99,10	98,60	98,88	98,78	98,94	98,95	99,27	98,84	99,48	98,98	98,95	98,66	98,86	97,70	99,22	99,34	98,17

6- Tableau de données microsonde pour les niveaux magmatiques et le niveau à quartz du Piton des Tangues

	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A	Bas. A
SiO ₂	47,69	47,91	48,22	48,19	47,72	48,51	48,24	48,20	47,98	48,55	48,73	48,71	48,68	48,78	48,34	48,05	48,61	48,33	48,34
TiO ₂	2,83	2,87	2,85	2,90	2,80	2,77	2,73	2,82	2,77	2,77	2,79	2,81	2,73	2,80	2,83	2,77	2,78	2,81	2,84
Al ₂ O ₃	14,78	14,57	14,62	14,59	14,92	15,08	15,10	15,20	14,87	15,01	15,07	15,05	15,02	15,02	14,95	14,96	15,19	15,19	15,30
FeO	10,99	11,21	10,61	10,83	10,44	10,26	10,21	10,53	10,31	10,59	10,86	10,56	10,31	10,56	10,48	10,36	10,23	10,35	10,37
MnO	0,34	0,21	0,11	0,11	0,24	0,24	0,23	0,21	0,17	0,15	0,14	0,11	0,12	0,12	0,17	0,12	0,20	0,15	0,18
MgO	5,93	6,11	6,05	6,09	6,60	6,50	6,44	6,64	6,20	6,30	6,53	6,37	6,45	6,43	6,40	6,63	6,63	6,70	6,59
CaO	11,33	11,13	11,24	11,21	11,03	11,04	10,96	11,06	11,02	10,80	10,89	10,87	10,90	11,04	10,98	10,91	10,92	11,03	11,14
Na ₂ O	2,96	2,64	2,77	2,53	2,62	2,85	2,66	2,72	2,72	2,97	2,99	2,84	2,85	2,84	2,84	2,77	3,03	2,76	2,93
K ₂ O	0,81	0,80	0,81	0,81	0,76	0,76	0,76	0,73	0,77	0,74	0,78	0,78	0,76	0,78	0,77	0,75	0,76	0,75	0,76
P ₂ O ₅	0,43	0,34	0,31	0,35	0,41	0,35	0,37	0,29	0,40	0,38	0,26	0,45	0,35	0,36	0,42	0,32	0,33	0,43	0,37
Total	98,09	97,78	97,57	97,60	97,53	98,37	97,69	98,39	97,21	98,25	99,03	98,54	98,17	98,74	98,18	97,64	98,68	98,51	98,82

	Bas. A	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. B
SiO ₂	48,71	48,88	48,73	48,99	48,88	49,18	48,67	48,98	49,07	49,06	48,85	48,81	49,09	48,73	49,26	48,95	49,28	49,13	48,97
TiO ₂	2,84	2,70	2,78	2,73	2,81	2,78	2,74	2,83	2,79	2,82	2,84	2,83	2,75	2,81	2,91	2,84	2,87	2,80	2,82
Al ₂ O ₃	14,86	15,06	15,28	15,12	15,11	15,23	15,21	15,22	15,23	15,37	15,42	15,09	15,15	15,11	15,18	15,02	15,10	15,07	15,05
FeO	10,89	10,38	10,32	10,67	10,68	10,60	10,82	10,88	10,58	10,44	10,42	10,98	10,41	10,76	10,90	10,82	10,49	10,81	10,29
MnO	0,18	0,24	0,24	0,14	0,22	0,27	0,01	0,21	0,22	0,17	0,23	0,24	0,14	0,28	0,18	0,19	0,24	0,11	0,22
MgO	6,34	6,67	6,72	6,58	6,62	6,67	6,85	6,22	6,35	6,66	6,70	6,83	6,65	6,64	6,34	6,33	6,52	6,52	6,42
CaO	10,91	10,91	11,14	11,02	10,97	10,96	11,12	10,99	10,90	11,04	10,86	11,14	11,11	10,99	10,87	11,05	10,98	10,99	10,77
Na ₂ O	2,75	2,73	2,92	2,76	2,81	2,81	2,88	2,79	2,76	2,82	2,68	2,74	2,75	2,84	2,87	2,72	2,85	2,77	2,75
K ₂ O	0,77	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77	0,78	0,76	0,76	0,76	0,77	0,74	0,75	0,77	0,78	0,76	0,78	0,74	0,77
P ₂ O ₅	0,38	0,26	0,43	0,41	0,39	0,33	0,22	0,34	0,34	0,36	0,35	0,38	0,28	0,34	0,37	0,45	0,37	0,38	0,37
Total	98,64	98,59	99,33	99,16	99,24	99,61	99,30	99,22	99,03	99,49	99,12	99,78	99,08	99,26	99,66	99,12	99,48	99,32	98,42

	Bas. B	Bas. B	Bas. B	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Bas. C	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues	Tangues
SiO ₂	48,68	48,55	49,28	47,98	48,65	48,53	48,64	49,08	48,41	48,38	47,70	48,00	48,40	50,03	49,28	49,66	49,90	47,89	48,05	
TiO ₂	2,77	2,75	2,77	2,85	2,67	2,77	2,72	2,75	2,62	2,65	2,93	2,67	2,73	3,60	3,60	3,56	3,55	2,89	2,81	
Al ₂ O ₃	15,19	15,08	15,11	15,28	14,49	14,42	14,45	14,77	14,28	15,29	14,89	14,14	14,47	15,34	15,42	15,56	15,20	14,47	14,48	
FeO	10,44	10,57	10,53	10,56	11,13	11,24	10,85	10,99	10,92	9,98	10,38	11,07	11,04	11,80	11,71	11,77	11,87	11,94	11,21	
MnO	0,21	0,12	0,27	0,18	0,05	0,13	0,21	0,23	0,13	0,28	0,20	0,41	0,08	0,19	0,16	0,14	0,25	0,04	0,11	
MgO	6,58	6,74	6,44	6,73	6,72	6,97	7,11	6,79	6,74	6,89	5,88	6,60	7,07	6,37	6,19	6,05	6,14	7,43	8,11	
CaO	10,91	11,00	10,93	10,53	11,01	11,15	11,03	11,11	10,90	10,81	10,89	10,91	11,22	8,64	8,70	8,45	8,86	10,42	9,93	
Na ₂ O	3,02	2,79	2,93	2,81	2,77	2,50	2,56	2,44	2,81	2,99	3,22	2,62	2,26	2,08	2,20	2,18	2,11	2,96	3,01	
K ₂ O	0,76	0,78	0,77	0,76	0,74	0,74	0,75	0,73	0,75	0,76	0,98	0,72	0,74	1,01	0,95	1,06	1,00	0,82	0,86	
P ₂ O ₅	0,34	0,38	0,33	0,36	0,27	0,30	0,41	0,47	0,36	0,30	0,37	0,42	0,33	0,45	0,34	0,26	0,47	0,49	0,29	
Total	98,89	98,76	99,37	98,05	98,50	98,75	98,72	99,36	97,95	98,33	97,45	97,56	98,34	99,50	98,56	98,69	99,35	99,36	98,85	

(Bas. A, B, C = niveaux magmatiques du Piton des Basaltes)

7- Erreurs sur les mesures de microsonde électronique (2s)

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅
Petite Carrière, Piton des Basaltes, Mahavel, Piton des Tangues	0,38	0,09	0,64	0,43	0,11	0,16	0,18	0,40	0,05	0,19
Basaltes 1 + niveau à quartz du Piton des Tangues	0,53	0,13	0,78	0,58	0,17	0,22	0,24	0,54	0,07	0,28