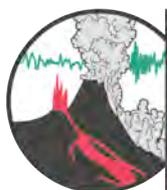




EVALUATION DE L'ALEA VOLCANIQUE A LA REUNION

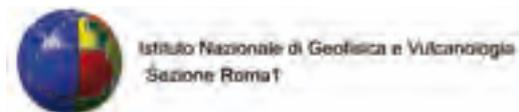
Rapport Final – Année I, St. Denis, 28 février 2012

(Version corrigée le 30 avril 2012)



Observatoire
volcanologique
du **Piton de la Fournaise**

INSTITUT DE PHYSIQUE DU GLOBE DE PARIS



Par : **A. Di Muro, P. Bachelery, P. Boissier, P.A. Davoine, P. Fadda, M. Favalli, V. Ferrazzini, A. Finizola, G. Leroi, G. Levieux, P. Mairine, F. Manta, L. Michon, A. Morandi, R. Nave, A. Peltier, C. Principe, T. Ricci, G. Roult, C. Saint-Marc, T. Staudacher, N. Villeneuve**

1. INTRODUCTION.....	3
Contexte	3
2. ACTIVITE VOLCANIQUE ET SISMIQUE – FREQUENCE ET DISTRIBUTION SPATIALE	4
2.1 L’activité sismique (1998 – 2011)	4
2.2 L’activité éruptive de la période historique (1640-2012).....	7
2.3 L’activité éruptive de la période préhistorique (Bellecombe 4745 BP – 1640 AD).....	9
2.4 Distribution spatiale et temporelle de l’activité éruptive	10
3. L’ACTIVITE ERUPTIVE EFFUSIVE.....	13
3.1 Cartographie des coulées préhistoriques hors Enclos Fouqué sur le massif du Piton de la Fournaise (< 5000 ans).....	13
3.2 Cartographie des coulées historiques dans l’Enclos Fouqué et sur les zones N-E et SE de rift	17
3.2.1 Eruptions historiques anciennes (1640 -1900)	17
3.2.2 Eruptions historiques récentes (1900 - 2010).....	19
3.3 Modélisation de la dispersion des coulées de lave	23
3.3.1. Méthodologie	23
3.3.2. Etapes et réalisation des simulations d’écoulement	25
4. L’ACTIVITE ERUPTIVE EXPLOSIVE.....	31
4.1 Les scénarii.....	31
4.1.1 Explosivité d’origine magmatique	33
4.2 Reconstruction de l’activité du cône sommital du Piton de la Fournaise	40
4.2.1 Les phases de construction du cône sommital	40
4.2.2 L’activité explosive du cône sommital du Piton de la Fournaise : explosions phréatiques et effondrements sommitaux.....	44
5. CHIMIE DES MAGMAS ET DES EMISSIONS GAZEUSES	46
6. PERCEPTION DE L’ALEA VOLCANIQUE A LA REUNION	50
6.1 Introduction	50
6.2 Méthodologie	50
6.3 Résultats	53
6.4 Perspectives	68
7. SYSTEME D’INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE DE L’ALEA	69
7.1 Etat des lieux des données existantes	70
7.2 Caractérisation des données numériques existantes.....	71
7.2 Elaboration de nouvelles données	73
7.3 Intégration des données dans le SIG ArcGIS.....	74
7.4 Processus d’élaboration des géodatabases	75
7.5 Productions cartographiques pour la caractérisation de l’aléa éruptif	76
7.6 Conclusion et perspectives	77
Annexe 1 : Datations des événements éruptifs pre-historiques Post-Bellecombe	81
Annexe 2 : Scénarii éruptifs sur le massif du Piton de la Fournaise associés à des dynamismes de type explosif.	82

1. INTRODUCTION

Contexte

La politique de gestion des risques passe par l'amélioration des connaissances dans le domaine des risques, notamment en matière de scénarios éruptifs du Piton de la Fournaise, la connaissance de ces scénarios permettant de proposer une réponse plus adaptée en matière de gestion de crise.

La connaissance de l'aléa éruptif nécessite une connaissance approfondie de l'histoire du volcan et des phénomènes observés (ou détectés) durant la période géologique récente (derniers 5000 ans). Comme date de référence nous avons retenu celle de l'événement éruptif dit de « Bellecombe » (4745 BP), qui est considéré comme l'événement explosif majeur de la période récente. Sur cette base le projet 'Évaluation de l'aléa volcanique à la Réunion' identifie et quantifie les aléas volcaniques susceptibles de survenir au niveau du Piton de la Fournaise.

L'étude s'est composée des volets suivants :

Volet 1 : Évaluation des scénarios volcaniques par la reprise des données historiques, la réalisation de carottages, de relevés de terrain, d'échantillonnages et leur analyse de laboratoire.

Volet 2 : Réalisation d'une enquête auprès des populations résidentes exposées aux aléas volcaniques afin d'évaluer la perception de ce risque et adapter la stratégie de gestion du risque aux populations concernées.

Volet 3 : Structuration des données dans un SIG et production de cartes communicables synthétisant les données produites dans les volets 1 et 2.

Ce rapport se veut une synthèse de l'état des connaissances sur l'activité volcanique récente du Piton de la Fournaise. Les données fournies n'ont pas de valeur contractuelle et leur interprétation est fondée sur l'avis d'experts de l'IPGP et de ses partenaires.

2. ACTIVITE VOLCANIQUE ET SISMIQUE – FREQUENCE ET DISTRIBUTION SPATIALE

2.1 L'activité sismique (1998 – 2011)

Comme c'est souvent le cas dans les régions volcaniques de faibles contraintes tectoniques, la plupart des foyers sismiques enregistrés à la Réunion sont situés à l'aplomb du cône/cratère sommital du Piton de la Fournaise. Pendant les phases de pause de l'activité éruptive, cette micro-sismicité est caractérisée par < 10 événements par jour de magnitude < 1 (magnitude de durée). La fréquence et la magnitude des séismes croient pendant les phases de réactivation. Des dizaines/centaines d'événements sismiques, dont certains peuvent atteindre une magnitude proche de 3, sont enregistrés lors des phases de réactivation de l'activité volcanique. Au Piton de la Fournaise, la plupart de ces événements micro-sismiques sont localisés à relativement faible profondeur (< 7.5 km sous les cratères sommitaux) sous la zone sommitale du Piton de la Fournaise. La migration de la sismicité (et du magma) entre -7.5 km et la surface a eu lieu en moins de 3 jours en mars 1998 (Battaglia et al., 1998). La plupart des éruptions suivies par l'OVPF depuis son installation en 1979 est associée à une migration de la sismicité à des niveaux plus superficiels (environ 2.5 km).

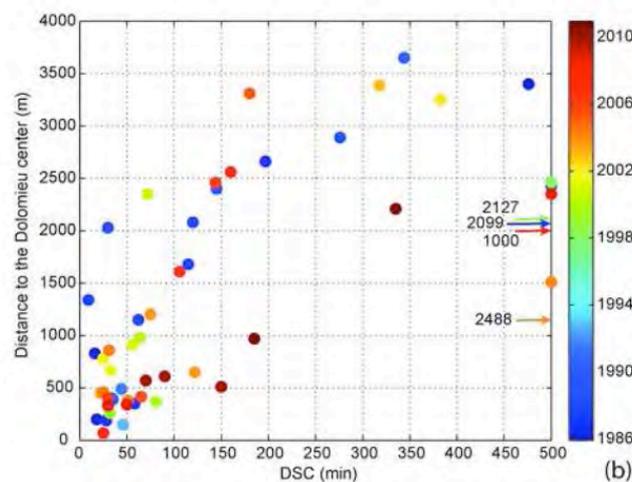


Fig 1 – Relation de proportionnalité entre la distance de la bouche éruptive par rapport au sommet du Piton de la Fournaise et le temps écoulé depuis le début de la crise sismique (Roult et al., 2012). Les éruptions sommitales (distance < 500 m ; potentiellement confinées à l'intérieur du cratère Dolomieu) ont lieu seulement 20-150 minutes après le début de la crise sismique. On observe une augmentation de ce délai suite à l'effondrement du Dolomieu en 2007. Malgré cette tendance récente à l'augmentation du temps nécessaire à l'arrivée du magma en surface, le délai reste très court et potentiellement insuffisant pour permettre une mise en sécurité efficace des personnes éventuellement présentes au sommet du Piton de la Fournaise.

Le délai entre le début de la crise sismique et la sortie du magma est approximativement proportionnel à la distance entre le sommet du Piton de la Fournaise et la bouche éruptive (Fig. 1).

Ce délai croît de quelques dizaines de minutes pour les éruptions sommitales jusqu'à parfois 8 heures pour les éruptions les plus distales, situées à plus basse altitude (Roult et al., 2012).

Deux phases de sismicité profonde (20 ± 10 km sous le niveau de la mer) située hors Enclos ont été documentées dans le secteur ouest du massif du Piton de la Fournaise depuis la mise en place de l'OVPF :

- 26/11/1996 et 23/08/1997 ; ces essaims précèdent d'environ 14 mois la réactivation du Piton de la Fournaise (inactif depuis 1992) le 09/03/1998 (Eruptions des cratères Kapor et Hudson) ; l'essaim de 1996 sera localisé hors Enclos Fouqué, dans le secteur ouest du massif du Piton de la Fournaise, en proximité de Piton Textor.
- 24/08/2007 – 26/11/2007 ; essaim sismique profond dans le secteur du Tampon – Entre Deux ; une partie de cette micro-sismicité accompagne un séisme de magnitude de 3.6 qui sera ressenti par la population sur l'ensemble de l'île de la Réunion. Cette sismicité pourrait avoir une origine tectonique et être en partie liée à l'éruption majeure d'avril 2007.

Ces événements profonds peuvent être comparés à la sismicité associée à la réactivation du volcan espagnol de El Hierro (Iles Canaries ; Fig. 2), situé dans un contexte insulaire basaltique comparable à celui de l'île de La Réunion. Dans le cas de El Hierro, une phase de trois mois (juillet – octobre 2011) de sismicité profonde (20 km sous le niveau de la mer) et de magnitude progressivement croissante dans le temps (jusqu'à M : 4.5) a été associée à une migration verticale (10 km) et latérale importante du magma ; la dernière phase de migration du magma vers la surface a été extrêmement rapide (un jour).

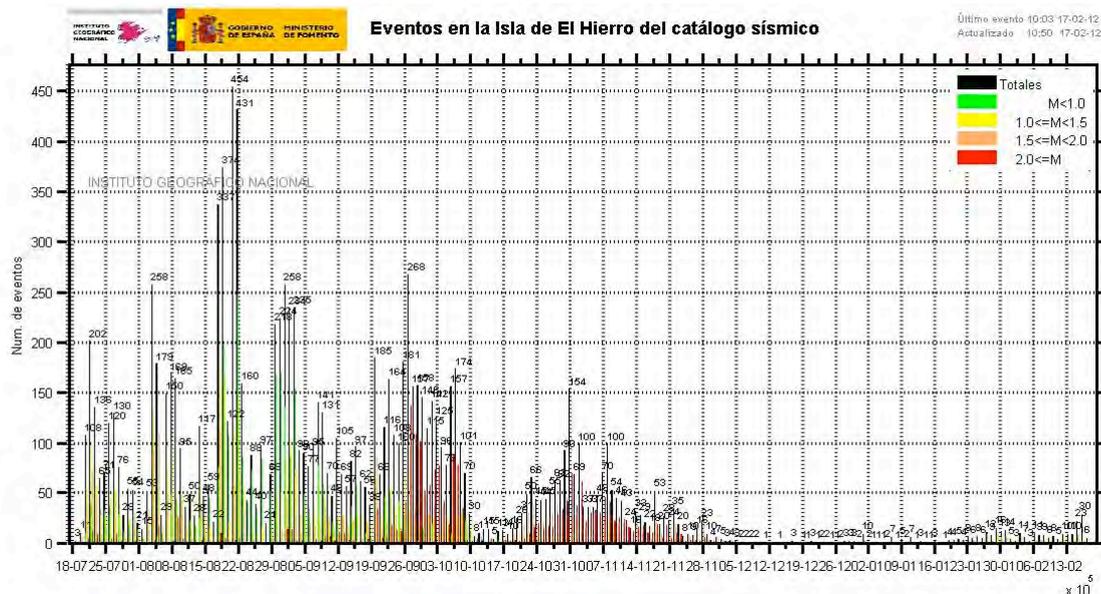


Fig. 2 Evolution du nombre et énergie des séismes associés à l'éruption du volcan el Hierro (Iles Canaries – Espagne) entre juillet 2011 et février 2012. Une séquence sismique semblable (Magnitude max : 4.5) est susceptible d'avoir lieu à l'aplomb du massif du Piton de la Fournaise en cas de remontée de magma profond hors Enclos Fouqué.

De rares événements profonds (< 30/an en moyenne) de faible magnitude ($M < 3$) sont enregistrés au dessous de l'île de la Réunion sur plusieurs secteurs (Grandes Pentès est du Piton de la Fournaise ; Plaine des Cafres ; Massif du Piton des Neiges ; l'Etang Salé ; Saint-Leu ; Saint-Denis), et parfois (une à deux fois par an en moyenne) ressentis par la population. Les mécanismes à l'origine de ces événements, probablement tectoniques, sont aujourd'hui mal compris.

Il convient de citer les événements historiques de 1863 (Intensité épiscopentrale 7 – dommages prononcés), de 1707 (Intensité épiscopentrale 6.5) et de 1751 et 1786 (Intensité épiscopentrale 6 – dommages légers) (Rapport SisFrance, BRGM 53711).

Dans l'ensemble, le risque sismique reste faible à La Réunion.

Le risque majeur proviendrait d'une déstabilisation du flanc est du Piton de la Fournaise (ie la partie située entre les deux « rift zones ») qui pourrait alors affecter toute l'île.

A Hawaii, la déstabilisation du flanc sud du Kilauea est à l'origine de séismes de magnitudes > 7 dont le « Kalapana earthquake » de M7.2 en 1975 (Ma et al. 1999) et les séismes de magnitude 6 sont fréquents. Mais contrairement à Hawaii, les « zones de rift » au Piton de la fournaise, ne sont pas très délimitées et ne semblent pas se prolonger sur de très longues

distances en mer, elles représentent plutôt de larges zones de faiblesses propices à des injections magmatiques latérales ; celles qui donnent lieu aux éruptions hors enclos.

2.2 L'activité éruptive de la période historique (1640-2012)

L'analyse critique des sources documentaires (post 1630) et des enregistrements de l'OVPF (1985 – 2011) a permis de répertorier 238 éruptions (dont 17 incertaines) dans la période 1600 – 2011 (Fig. 3).

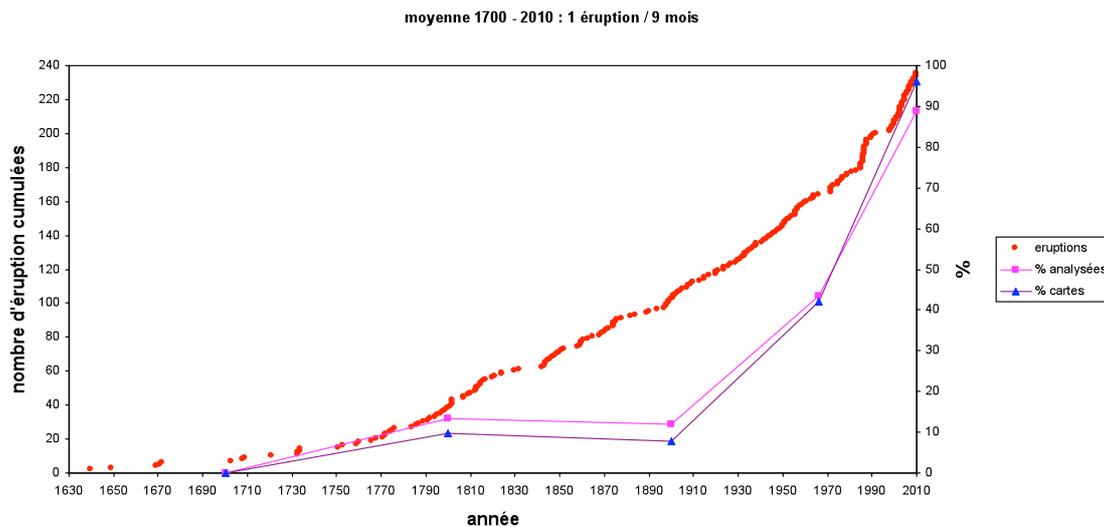


Fig. 3 Comparaison entre nombre cumulé d'éruptions du Piton de la Fournaise depuis 1600 AD (rouge) et le nombre de coulées cartographiées (bleu) et échantillonnées/analysées (violet). Une connaissance très fine de la dispersion des coulées et de leur composition chimique n'est disponible que pour la période 1966-2011 et, en moindre mesure, pour la période 1925-1966.

La connaissance du nombre d'éruptions (ainsi que leur date, distribution et dynamisme) apparaît très incomplète au moins jusqu'à 1708. Des pauses éruptives assez longues (allant jusqu'à 12 ans dans la période 1635-1733) sont certainement le résultat d'un catalogue incomplet pour cette période. La durée maximale des pauses se réduit à 8-10 ans dans la période 1750-1840 pour ensuite se stabiliser à 6 ans dans la période post-1840.

Sur l'époque très récente (post-1925), les pauses sont toujours inférieures à 2 ans, avec l'exception de deux pauses éruptives de longue durée (6 ans chacune) qui ont eu lieu en 1966-1972 et 1992-1998 (Fig. 4).

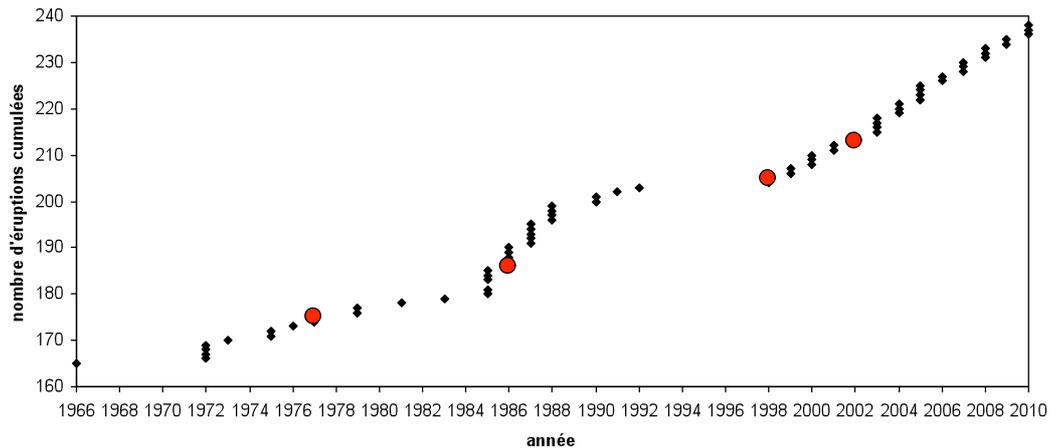


Fig. 4 Evolution de la fréquence éruptive du Piton de la Fournaise dans la période 1966-2010. En rouge les éruptions hors enclos Fouqué de 1977, 1986, 1998 et celle qui a eu lieu à proximité de la falaise nord (2002).

De la même façon que les pauses éruptives montrent une certaine variabilité, le nombre d'éruptions par an (moyenne : 1 éruption / 9 mois) peut varier sensiblement. Dans la période récente, une augmentation sensible du taux éruptif est visible dans entre 1985-2010 (Fig. 4). Entre 4 et 6 éruptions/an auraient eu lieu sur la période 1985-1988. Une partie de cette augmentation pourrait être due à la mise en place des réseaux de surveillance continue de l'OVPF/IPGP depuis 1979. Les suivis continus des paramètres géophysiques et géochimiques ont sans doute permis d'enregistrer des événements de très courte durée, probablement passés inaperçus auparavant. De plus, l'analyse instrumentale a permis de séparer sans ambiguïté les événements les uns des autres, tandis que dans la période pré instrumentale, des éruptions distinctes ont pu être regroupées. Les causes de la variation du nombre d'éruption par an, ainsi que des pauses éruptives restent mal comprises.

L'occurrence de pauses pluriannuelles ne paraît pas être liée de façon simple aux volumes de lave émis, la fréquence des éruptions n'ayant pas changée significativement après les éruptions majeures de 1998 ou de 2007.

L'activité éruptive de plus longue (pluriannuelle) durée a probablement eu lieu entre 1734 et 1751 (ou entre 1751-1794 selon Lenat et Bachelery, 2001), et semble être liée à une activité effusive continue au niveau du sommet du Piton de la Fournaise ; depuis 1985, la durée moyenne des éruptions est d'environ 20 jours, et couvre un intervalle entre 0,3 jours (novembre 2009) et 196 jours (mars 1998). Le volume moyen des coulées de lave depuis

1985 est d'environ 9 Mm³. L'éruption d'avril 2007 (240 Mm³) représente l'événement le plus volumineux répertorié dans la période historique.

2.3 L'activité éruptive de la période préhistorique (Bellecombe 4745 BP – 1640 AD)

Malgré le grand nombre d'éruptions préhistoriques répertoriées hors Enclos Fouqué, sur l'ensemble du massif du Piton de la Fournaise (paragraphe 2.4), seulement une fraction minoritaire a été datée.

Cet aléa peut paraître moins fréquent par rapport à celui lié aux éruptions confinées au sein de l'Enclos Fouqué. Néanmoins, il est important de rappeler que dans la seule période 1977-2010, trois événements éruptifs (1977, 1986, 1998) ont émis des coulées qui se sont propagées hors Enclos et deux éruptions ont eu lieu en proximité des falaises nord (2002) et sud (2007) de l'Enclos Fouqué (Fig. 4). Cette fréquence paraît décroître rapidement à une moyenne de une éruption (hors Enclos sur l'ensemble du massif du Piton de la Fournaise) tous les 40 ans dans les derniers 8 siècles ; encore une fois il s'agit très probablement de l'effet de la décroissance des connaissances avec le temps (Fig. 5).

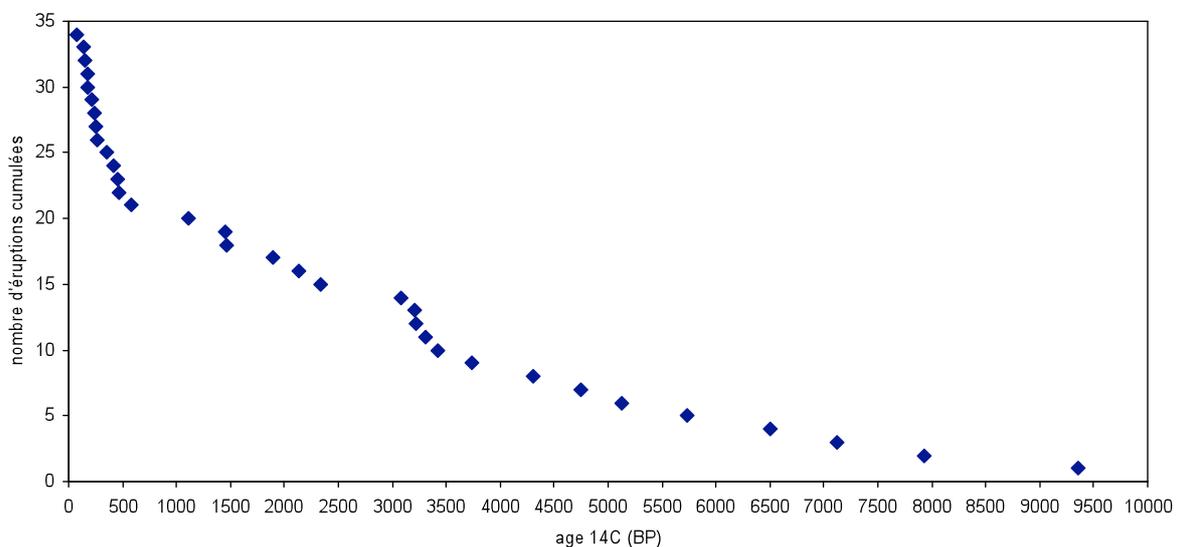


Fig. 5 Nombre cumulé d'éruptions hors Enclos Fouqué datées par plusieurs méthodes radiométriques.

De la même façon, la durée des intervalles entre ces événements susceptibles de toucher des secteurs peuplés est très peu connue. Il nous paraît important de souligner que

les éruptions hors Enclos ne touchent pas que le flanc est du volcan (secteur entre St. Rose et St. Philippe). Les dernières éruptions connues hors Enclos dans le secteur ouest du massif se situent au fond de la Rivière de l'Est (Piton Rouge : 140 ± 90 BP ; Vergniolle et Bachelery, 1982) et en proximité de la falaise des Remparts (Petit Cratère : 470 ± 75 BP ; âge calibré 1515 AD ; Tanguy et al., 2011).

Dans le cadre du projet, 7 nouveaux échantillons de bois carbonisés associés à différentes éruptions explosives ont été envoyés au CDRC (Centre de Datation par le RadioCarbone – Villeurbanne) ; l'intervalle d'âge probable de ces éruptions est compris entre 1100 BP et 3200 BP ; les délais d'analyse étant de 6-8 mois par rapport à la date de réception, seulement trois nouvelles datations sont disponibles au moment de la rédaction de ce rapport. Les nouvelles datations déjà obtenues concernent la séquence de lapillis qui recouvre le rempart nord de l'Enclos Fouqué (série de Partage), qui est ainsi attribuée à une séquence d'éruptions produites entre 2855 BP et 2140 BP.

2.4 Distribution spatiale et temporelle de l'activité éruptive

L'activité éruptive du Piton de la Fournaise est distribuée sur l'ensemble du massif. Elle s'est faite à la faveur de fissures éruptives qui se sont ouvertes sous la pression de magma. Selon la teneur en gaz du magma émis et la durée de l'éruption, l'émission du magma a entraîné ou non la construction d'un cône éruptif. L'analyse combinée des modèles numériques de terrain, des photos aériennes et de différents jeux de cartes géologiques et de fissures éruptives a permis d'établir des cartes de distribution des cônes éruptifs et des fissures éruptives. Ces cartes ont été comparées, pour validation, à des cartes récemment publiées (Bonali et al., 2011).

Ces données confirment une concentration de l'activité éruptive autour du cône actif situé dans l'Enclos Fouqué et dans une moindre mesure sur les flancs sud et nord du volcan, vers Sainte-Rose et Saint-Philippe. L'axe volcanique entre le Piton des Neiges et le Piton de la Fournaise est également bien dessiné. Ce dernier concentre les cônes de plus gros volumes. Au sein de cet axe, la zone située en amont de la rivière des Remparts montre une densité relativement forte. L'activité de cette zone correspond, entre autre, aux éruptions du Petit Cratère au 16^{ème} siècle (1515 AD) et du cratère Commerson (1890 ans BP ; 200 AD). Le

dernier secteur où la densité de cônes est supérieure à la moyenne est localisé sur la côte sud du volcan, à l'embouchure des rivières des Remparts et Langevin.

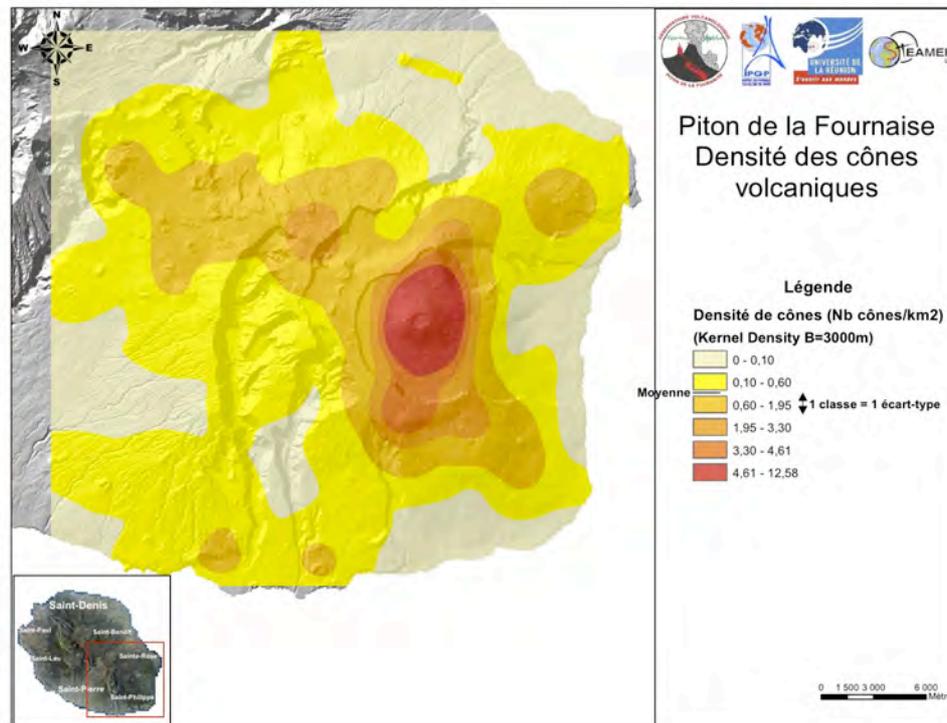


Fig. 6 : Carte de densité des cônes éruptifs à l'échelle du massif du Piton de la Fournaise

En utilisant des critères morphologiques tels que la présence de structures d'érosion dans les cônes, deux catégories de cônes ont été distinguées: les cônes anciens (pre-Bellecombe) et les cônes récents. Les cônes anciens sont essentiellement répartis sur les flancs ouest et sud du volcan alors que les cônes récents sont concentrés autour et au sein de l'Enclos Fouqué, selon les zones de concentration décrites ci-dessus (Figure 6). Cependant, cette analyse des cônes éruptifs doit être pondérée pour plusieurs raisons : le taux de recouvrement par des coulées de lave et par d'autres cônes étant plus important dans la zone sommitale, la probabilité de conserver à l'affleurement des cônes anciens est faible ; De plus, l'étude du volume des cônes montrant une diminution de la taille moyenne des cônes en se rapprochant de la zone sommitale, le recouvrement des cônes est d'autant plus facilité.

Le problème du recouvrement des sources d'émission magmatique est également crucial pour les sites d'éruptions où la dynamique a été uniquement effusive, sans construction de cône éruptif de taille significative. Ce phénomène semble être

particulièrement fréquent pour les éruptions hors-Enclos, comme en 1708, en 1986 ou lors de l'éruption ayant produit la coulée du Brûlé du Baril.

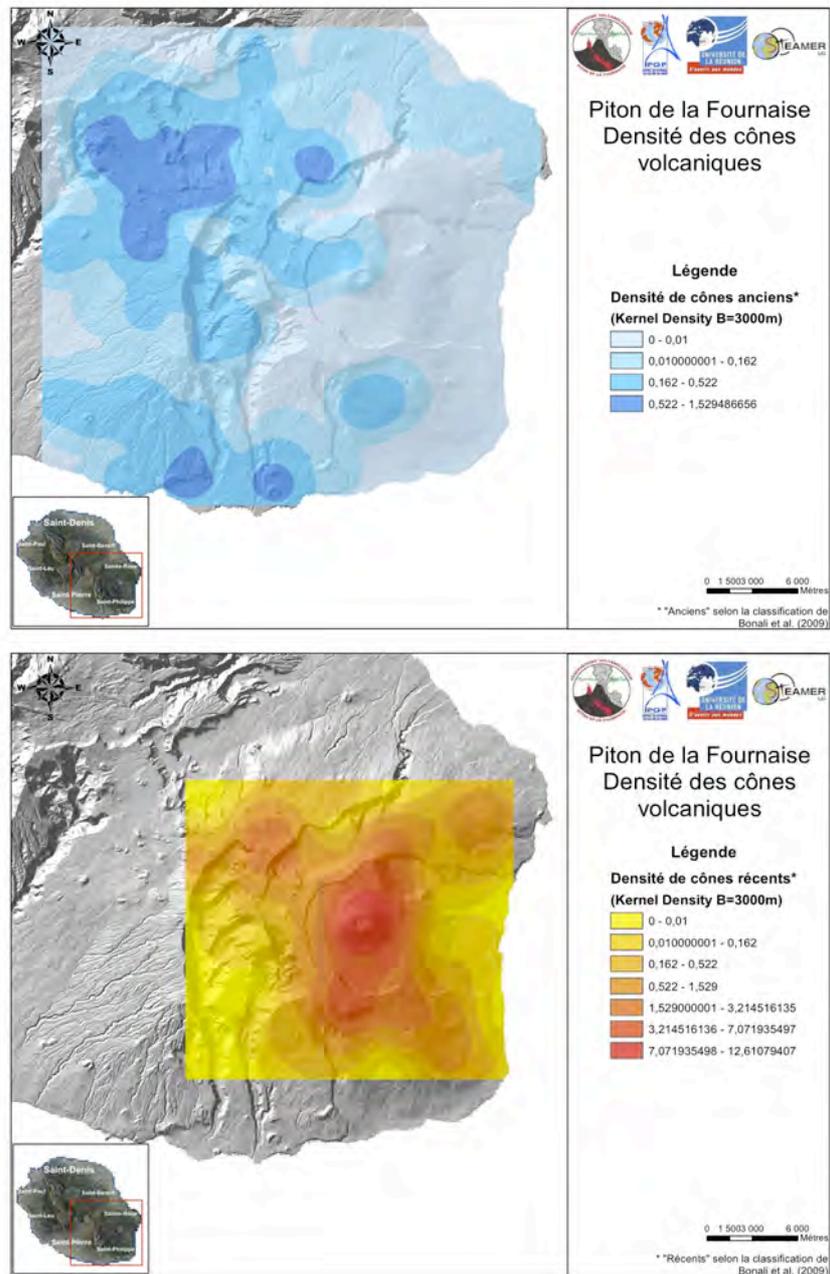


Fig. 7 : Carte de densité des cônes éruptifs anciens (haut, bleu ; 60 – 6 kyr) et récents (bas, rouge : <6 kyr).

3. L'ACTIVITE ERUPTIVE EFFUSIVE

3.1 Cartographie des coulées préhistoriques hors Enclos Fouqué sur le massif du Piton de la Fournaise (< 5000 ans)

Les travaux antérieurs ont montré l'existence d'éruptions datées de quelques centaines d'années ou quelques milliers d'années sur les pentes externes du Piton de la Fournaise. Cela concerne, bien entendu, les secteurs en amont de Saint-Philippe/Le Tremblet et Bois Blanc/Ste Rose qui constituent les secteurs actifs durant la période historique (voir la carte des coulées historiques), mais également des régions situées à l'ouest de l'Enclos Fouqué, telles que la Plaine des Sables, la Plaine des Palmistes ou la Plaine des Cafres.

Une synthèse générale des diverses cartographies réalisées est en cours (voir Figure 12). Dans le cadre du projet, des levés ont été regroupés et comparés. Des compléments de travaux ont été réalisés et une saisie numérique des contours a été effectuée. Pour chaque événement, outre l'information cartographique, l'âge (relatif ou absolu, si disponible) et la nature pétrographique des laves sont précisés. Ce travail implique une longue phase de compilation et de recouplement.

Parmi ces coulées, certaines sont très récentes et relèvent du fonctionnement actuel du Piton de la Fournaise (derniers 5.000 ans). C'est le cas des coulées issues du secteur de la Plaine des Sables et de la Plaine des Remparts, dont certaines ont fait l'objet dans le cadre de cette étude d'une approche particulière (Piton Chisny par exemple). Les coulées de ce type, bien qu'é émises en domaine d'altitude, constituent une menace pour les villes situées en zone littorale du fait des importants volumes de magma émis et de la canalisation des coulées dans les vallées. Les coulées du Piton Chisny, dans la rivière Langevin (environ 1100 ans BP) et du cratère Commerson, dans la rivière des Remparts (environ 1890 ans BP) en sont les meilleurs exemples (Figure 8).



Fig. 8 : Levé géologique de l'extrémité de la coulée issue du cratère Commerson, environ 1890 ans BP (Cartographie P. Mairine). Cette coulée (en vert), émise à près de 2000 m d'altitude a parcouru tout le lit de la rivière des Remparts pour venir se jeter en mer à l'emplacement actuel de la ville de Saint-Joseph. Son âge très récent fait des éruptions de ce type une menace actuelle pour les villes du massif de la Fournaise.

Notre cartographie, montre également bien que des éruptions peuvent démarrer depuis des événements situés à basse altitude (moins de 1000 m). L'éruption d'avril 2007 bien que localisée dans le Grand Brûlé est de ce type. Certaines, comme celle du Piton Nelson (260 BP) dans les hauts de Bois Blanc, sont récentes mais pas encore précisément datées. D'autres plus anciennes, sont très fréquentes dans la partie sud de l'île, comme le Piton de l'Entonnoir dans les hauts de Saint-Joseph dont l'éruption est estimée à 20.000 ans environ (Figure 9).



Fig. 9 : Levé géologique de la coulée du Piton de l'Entonnoir, environ 20.000 ans (Cartographie P. Mairine).

La Plaine des Palmistes et, dans une moindre mesure, la Plaine des Cafres sont également le lieu d'épanchement de coulées récentes (quelques milliers d'années). Leur cartographie est bien avancée mais, ici également, leur âge reste mal connu.

Les coulées présentes dans les hauts de Saint-Pierre et du Tampon proviennent des nombreux cônes présents dans la Plaine des Cafres. Leur âge varie de quelques dizaines de milliers d'années à quelques milliers d'années. L'une des coulées les plus récentes est celle provenant des « Trous blancs », en aval du « Nez de Bœuf » (Figure 10). Cette coulée dont l'âge est estimé approximativement à 6000 ans a parcouru plus de 15 km pour se jeter en mer à l'emplacement actuel de Saint-Pierre.

Dans la Plaine des Palmistes (Figure 11), les coulées les plus récentes proviennent du flanc nord-est du Piton de la Fournaise ou d'événements localisés dans la Plaine des Palmistes elle-même comme le Puy de l'Etang pour lequel un âge d'environ 5730 ans a été obtenu.

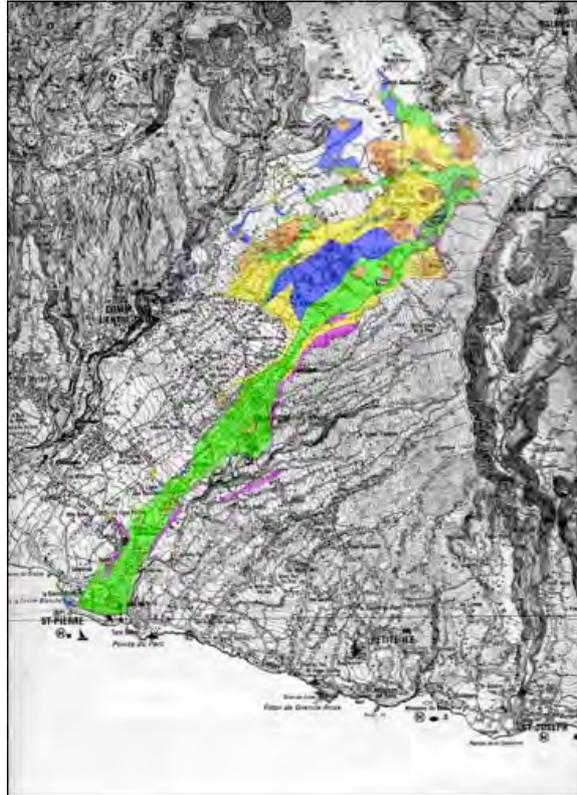


Fig. 10 : Levé géologique de la coulée des « Trous Blancs » (en vert) recouvrant les secteurs Plaine des Cafres - Tampon – Saint Pierre (Cartographie P. Mairine). Age possible environ 6000 ans.

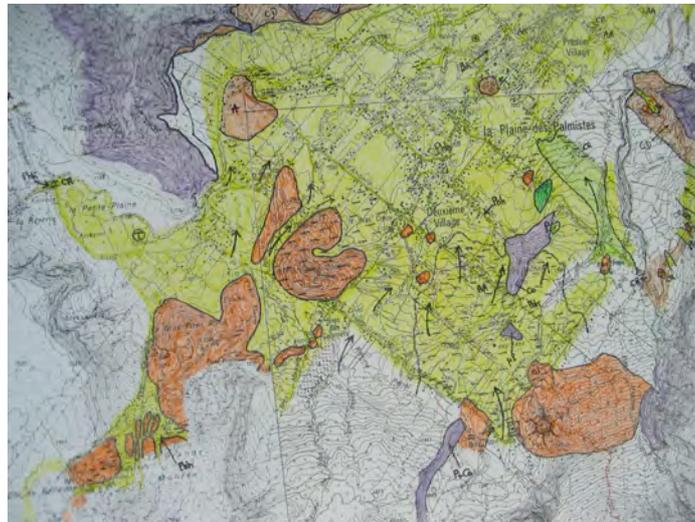


Fig. 11 : Extrait du levé géologique de la Plaine des Palmistes (Cartographie Delcamp, Vinet, Welsch). En marron les cônes ; en vert les coulées de lave.

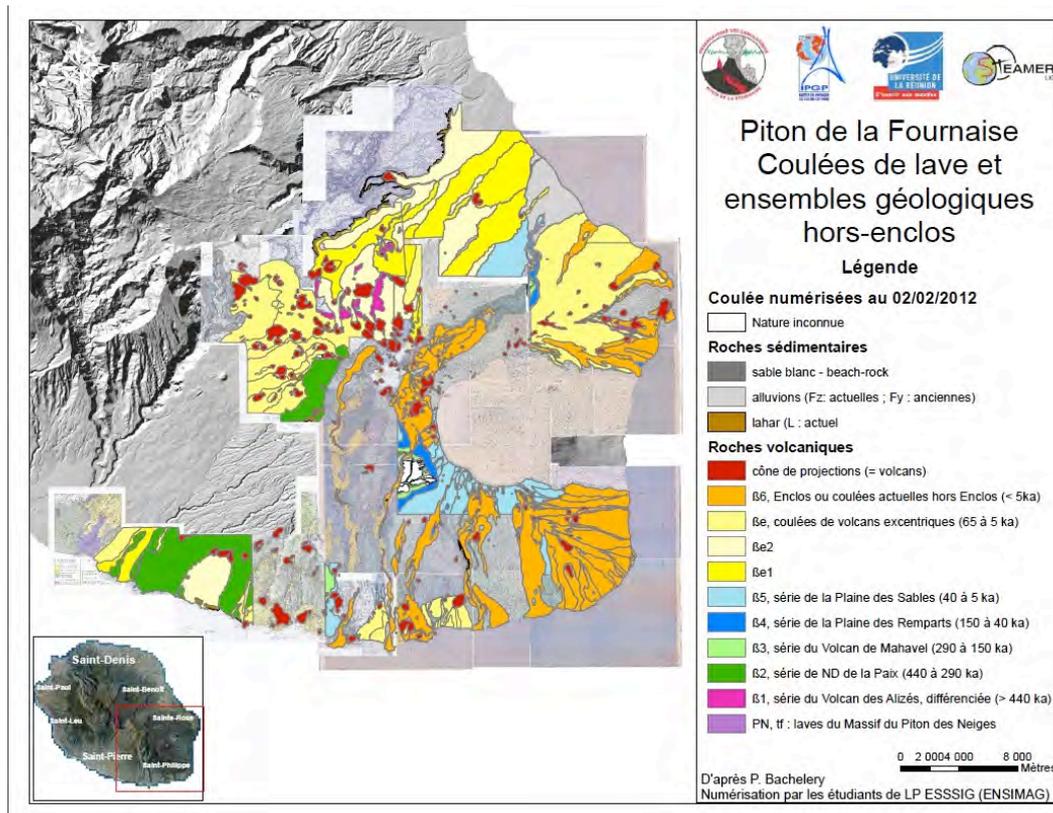


Fig. 12 : Etat actuel de la synthèse des coulées hors Enclos récentes (orange < 5000 ans) réalisée à partir des levés antérieurs (P. Mairine, P. Bachelery et coll.) sur le massif du Piton de la Fournaise.

Cette cartographie élargit considérablement la vision que l'on peut avoir de l'activité du Piton de la Fournaise. Si l'activité actuelle (éruptions sommitales et au sein de l'Enclos Fouqué) constitue le « fonctionnement de base » du volcan, des éruptions de plus grande ampleur et situées en d'autres localités peuvent avoir lieu de façon espacée dans le temps. Les éruptions que nous avons décrites ici sont de cet ordre. Leur faible fréquence (de centennale à pluri centennale) ne doit pas cacher le fait que leurs produits menacent des zones fortement habitées.

3.2 Cartographie des coulées historiques dans l'Enclos Fouqué et sur les zones N-E et SE de rift

3.2.1 Eruptions historiques anciennes (1640 -1900)

Toutes les éruptions de la période historique se sont déroulées à partir de points de sortie de la lave situés soit dans l'Enclos Fouqué, soit hors Enclos sur les flancs nord-est et sud-est (Fig. 13).

Une base de données exhaustive a été établie pour ces éruptions par la compilation des différents catalogues disponibles dans la littérature. Ces catalogues sont pour l'essentiel constitués à partir de témoignages et descriptions.

Au Piton de la Fournaise, la chronologie des éruptions est relativement bien établie pour le 20^e et le 21^e siècle. En particulier, les événements laviques majeurs ayant atteint le littoral sont bien cartographiés et ne présentent pas de problème d'identification sur le terrain tant dans le « Grand Brûlé » que hors-Enclos. Il n'en est pas de même pour les 18^e et 19^e siècles pour lesquels la chronologie et la cartographie des éruptions ne sont pas connues avec une précision suffisante. Parmi les coulées émises à cette époque, celles issues de fissures éruptives ouvertes à l'extérieur de la caldeira de l'Enclos, plus rares et plus proches des zones alors habitées, sont les mieux identifiées.

Dans l'Enclos, les cartographies sont très imprécises voire inexistantes pour les coulées antérieures au 20^e siècle.

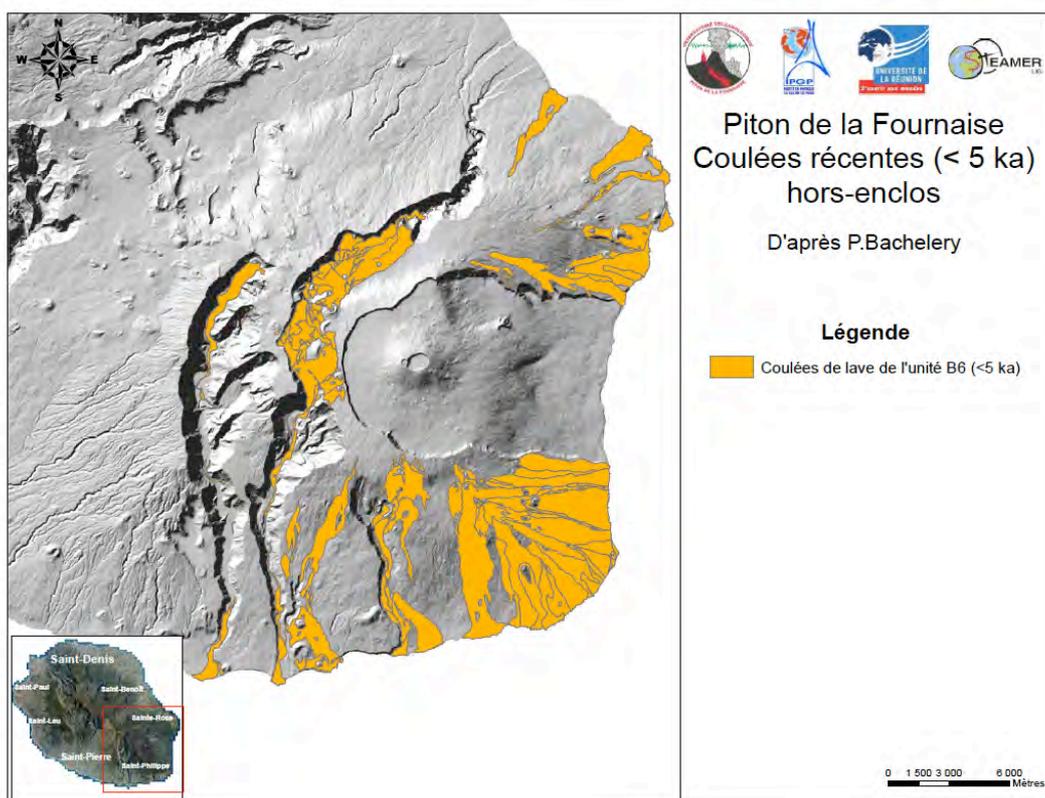


Fig. 13 : Synthèse cartographique des coulées émises hors-Enclos durant les cinq derniers millénaires, réalisée à partir des levés antérieurs (P. Mairine, P. Bachelery et coll.) sur le massif du Piton de la Fournaise. D'autres laves (non datées) pourraient se situer dans le secteur de la Plaine des Palmistes.

Hors-Enclos, la localisation de certaines coulées est connue avec une précision toute relative. Les trajets empruntés par les laves ont été précisés par les mesures effectuées sur le terrain. Ces coulées, dans leur dynamisme, sont très semblables à celles émises au 20^e siècle.

Antérieurement à 1640, date de l'implantation humaine à La Réunion, aucune éruption n'est répertoriée, même si les récits laissés par les premiers « visiteurs » du volcan montrent hors Enclos des zones décrites comme récemment envahies par les laves. C'est le cas des « brûlés » du Baril ou de Mare Longue, près de Saint-Philippe, ou encore de la zone autour du village de Bois Blanc. Pour ces secteurs, une étude fine des formations est encore nécessaire. Elle n'a pas été réalisée dans le cadre de cette première année d'étude. Elle passe en particulier par une recherche systématique de bois carbonisés afin de bien contraindre la chronologie de ces événements qui sont déterminants dans l'appréciation du risque dans ces régions.

Certains de ces événements datés par bois carbonisés ou d'âge historiquement connu ont servi de support à l'établissement d'une courbe de variation séculaire du champ magnétique. Cette courbe permet de situer chronologiquement d'autres événements ou de discuter la véracité des âges ou dates proposés, sur la base de leurs propriétés magnétiques. Ces travaux sont synthétisés dans l'article « *Archeomagnetism of Piton de la Fournaise: Bearing on volcanic activity at La Réunion Island and geomagnetic secular variation in Southern Indian Ocean, Tanguy J.C., Bachèlery P., Le Goff M., Earth and Planetary Science Letters, 2011* ».

3.2.2 Eruptions historiques récentes (1900 - 2010)

Le Piton de la Fournaise est un volcan particulièrement actif en ce qui concerne le nombre des éruptions. Depuis 1900, 136 éruptions ont été reportées. Si les informations sur le nombre, volume et emplacement au début du dernier siècle sont probablement moins précises en ce qui concerne les éruptions de faible intensité et de volume de lave émis, les éruptions de forte ampleur n'ont certainement pas échappé à la population, les lueurs et les retombées sont généralement visibles de loin, particulièrement de l'est, même pour des éruptions de faible intensité.

Éruptions dans l'Enclos	133
Éruption hors Enclos	3 (1977, 1986, 1998)
Éruptions sur le cône sommital	17
Éruptions coupant la RN3	12 (dont 9 depuis 1976)
Éruptions arrivant à la mer	10 (dont 7 depuis 1977)
Éruptions (totales)	136

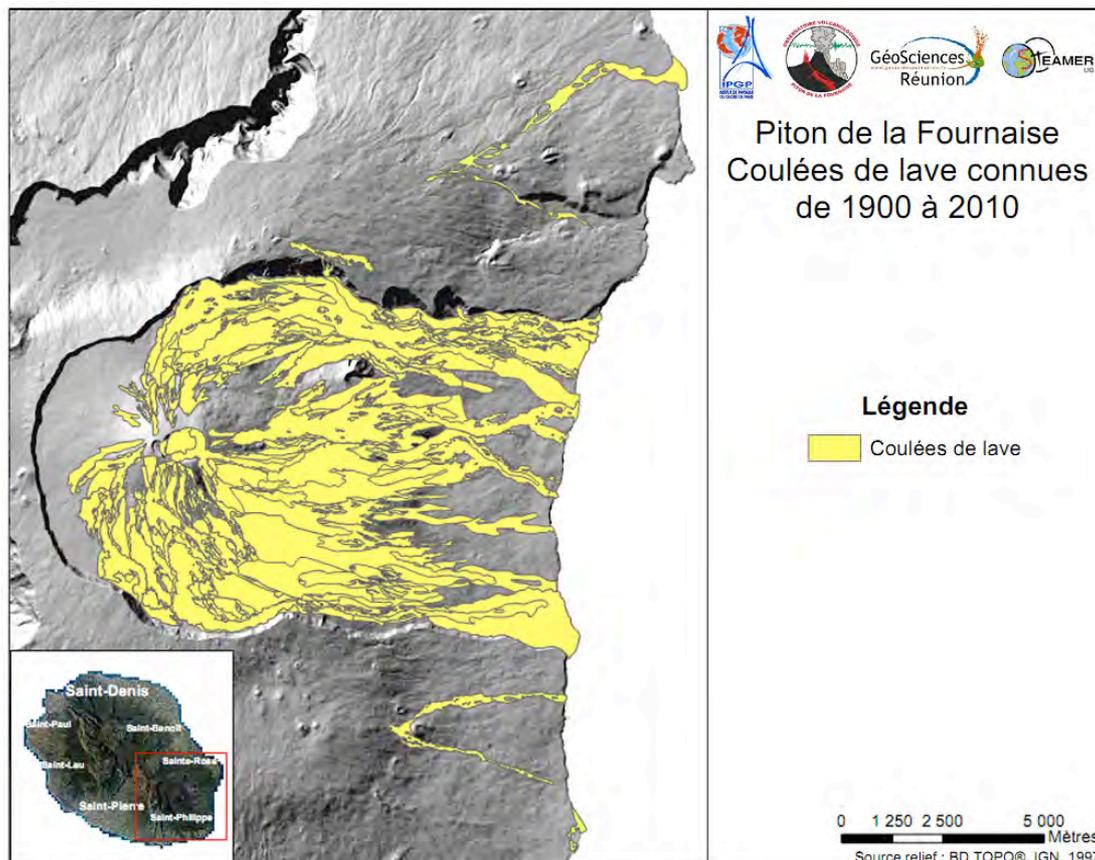


Fig. 14 : Coulées de lave qui ont recouvert environ deux tiers de l'Enclos Fouqué entre 1900 et 2010. Trois éruptions (1977, 1986 et 1998) se sont déroulées hors enclos au cours de cette période (synthèse OVPF). Dans un cas (2002) le dyke s'est propagé en partie sous la falaise nord ouest (évacuation du village de Bois Blanc).

Cent trente six éruptions ont été reportées depuis 1900, dont seulement 3 hors Enclos Fouqué, en 1977 dans la « rift zone » au nord-est et en 1986 dans la « rift zone » au sud-est. Une série de fractures de faible longueur se sont produites au dessus de la Plaine des Osmondes pendant l'éruption de 1998.

Les éruptions durent entre quelques heures comme par exemple en avril 1917 (<1 journée), juillet 1986 (7 h) ou novembre 2005 (10h) et plusieurs mois comme en 1931 (5,8 mois), 1956 (6,2 mois) en 1998 (6,5 mois). Au total la période éruptive en 110 années s'élève à 3430 jours. La durée moyenne est de l'ordre de 31 jours par éruption.

71% des éruptions du Piton de la Fournaise se produisent sur le flanc est. 17% se déroulent exclusivement dans le Dolomieu et seulement 13% débutent par des fissures dans le Dolomieu, qui progressent ensuite vers le flanc du cône sommital. Contrôlées par la topographie, les coulées de lave qui sortent des fissures sur le flanc du Piton de la Fournaise s'incurvent ensuite vers l'est, où elles progressent dans les Grandes Pentes et le Grand Brûlé suivant l'intensité et la durée de éruption. Seule la partie nord-nord-ouest de l'Enclos Fouqué entre le Pas de Bellecombe et le sommet est relativement épargnée de coulées récentes. Il convient néanmoins de signaler l'éruption (non datée) de cratère Sery dans ce secteur.

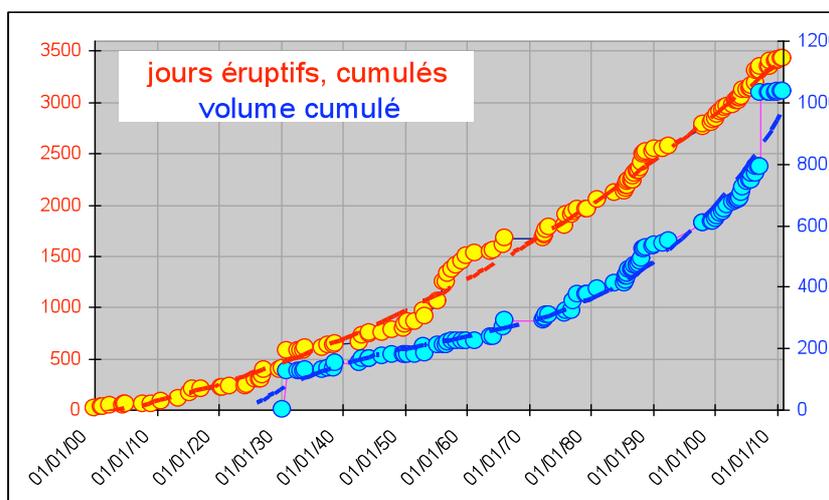
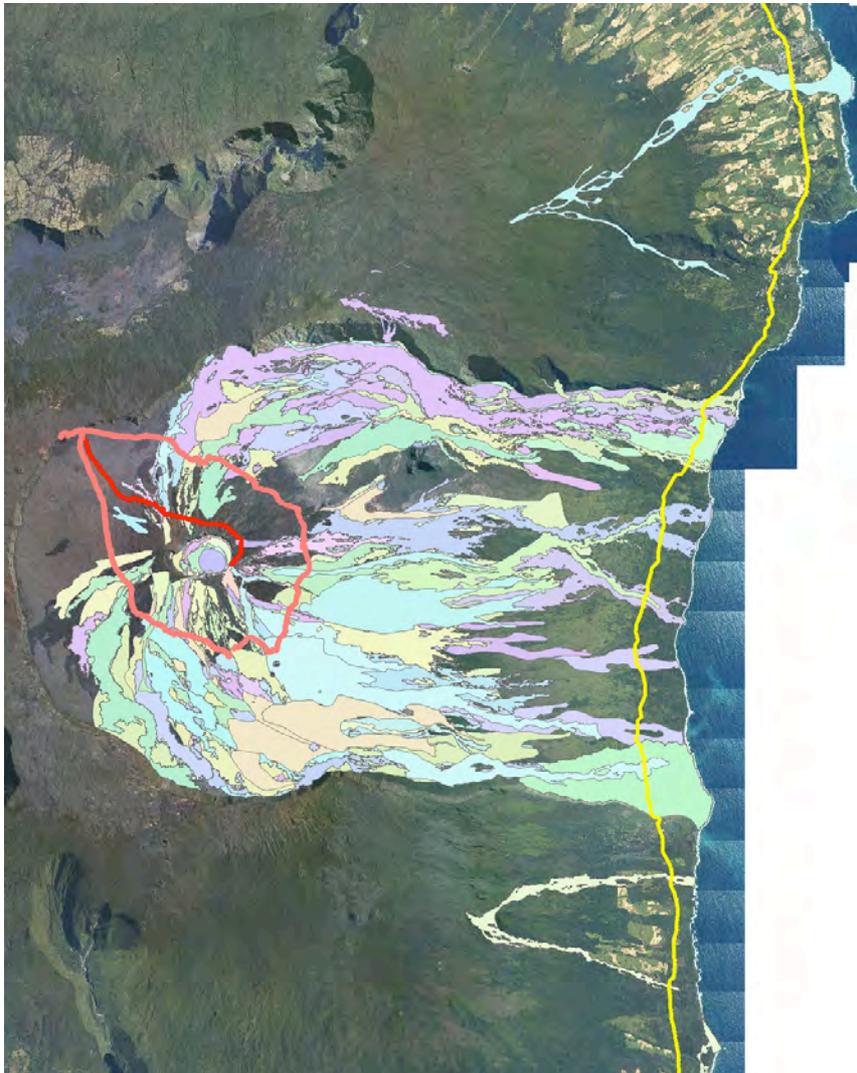


Fig. 15 : Fonction de répartition des éruptions

Depuis 1930, 10^9 m^3 (1 km^3) de lave ont été émis. Cette valeur est un minimum, puisque dans les années 1930 à 1960 de nombreuses émissions de petit volume n'ont pas été cartographiées. Dans les 50 dernières années, le volume estimé est de $810 \times 10^6 \text{ m}^3$ pour 76 éruptions. La moyenne est de 10^7 m^3 par éruption ou $13 \times 10^6 \text{ m}^3$ par an. Les volumes émis

dans chaque éruption varient énormément, entre $0.1 \times 10^6 \text{m}^3$ pour l'éruption du novembre 2009 et $240 \times 10^6 \text{m}^3$ pour l'éruption exceptionnelle d'avril 2007.



La RN3 a été coupée 12 fois par des coulées de laves en 1931, 1943, 1961, 1976, 1977, 1986, 2001, Jan. 2002, Nov. 2002, 2004, 2005 et 2007. Un total de 7700 m de la RN2 dans le Grand Brûlé a été recouvert en 110 ans

Depuis 1900, dix coulées ont atteint la mer, 1931, 1943, 1961, 1977 (Piton Ste Rose), 1986 (St Philippe), Jan. 2002, Nov. 2002, 2004, 2005 et 2007.

Fig. 16 : Distribution des coulées de lave émises depuis 1900 par le Piton de la Fournaise. Ligne orange : sentier de Rivals-Kapor ; ligne rouge : sentier d'accès au sommet du PdF.

Le tracé du nouveau sentier vers le point de vue dans le Dolomieu au sommet du Piton de la Fournaise a été coupé 8 fois par des coulées en 110 ans (même si le sentier n'existe que depuis peu). Le sentier vers Rivals (sud-ouest du cône sommital) a été coupé 11 fois et le sentier vers le Piton Kapor (nord du cône sommital) 7 fois. Le sentier dit « de secours », qui contourne le cône sommital à environ 1950 à 2200 m altitude a été traversé 40 fois par des coulée (Fig. 16).

3.3 Modélisation de la dispersion des coulées de lave

3.3.1. Méthodologie

L'ensemble de ce travail s'appuie sur une collaboration avec M. Favalli (INGV de Pise, Italie) qui a apporté ici l'expertise méthodologique validée dans de nombreux exemples scientifiques valorisés par de nombreuses publications, notamment sur les coulées de l'Etna (dont Favalli et al., 2009a et 2009b ; Chirico et al., 2009).

Afin de prédire les zones d'écoulement de lave nous employons le code numérique DOWNFLOW, qui a déjà été utilisé dans des applications à l'Etna et au Nyiragongo (Favalli et al. 2005, 2006). Les deux principaux paramètres du code sont largement décrits dans les documents mentionnés ci-dessus. Ils permettent de simuler une évolution de la trajectoire suivant la plus grande pente de la topographie elle-même fournie par un Modèle Numérique de Terrain. Nous avons volontairement utilisé ici le MNT au PAS de 25 m réalisé par l'IGN en 1997 même s'il existe un MNT mieux résolu aujourd'hui. Cela est lié au fait que nous validons le code et certains paramètres en entrée en simulant des coulées qui se sont réellement mises en place. Or nous ne pouvons simuler des coulées de lave que si elles ne sont pas présentes dans la topographie sous formes figées.

Le premier paramètre (ΔH) représente le maximum de perturbation verticale (positive ou négative) appliquée au hasard de la topographie au cours de chaque calcul de trajectoire. Il représente en somme le relief que la coulée peut franchir ou combler.

Le second paramètre (N) représente le nombre maximum d'itérations de calculs de trajectoires exécutées à partir de l'événement.

Le rôle des deux paramètres du modèle ΔH et N dans les calculs du modèle est indiqué dans Favalli et al. (2006).

Ce qui est pertinent ici par rapport au comportement des coulées de lave réelles, est le remplissage de dépressions topographiques et le franchissement des obstacles par les coulées de lave. Dans la pratique, avec seulement deux paramètres le modèle est capable de décrire la variété et la richesse des comportements de coulées de lave, qui, dans le monde réel dépend de façon complexe de la rhéologie et des propriétés thermiques de lave, ainsi

que tous les autres paramètres importants tels que le débit, le substrat, la mise en place de tunnels, de bouches éphémères.

Le grand avantage du modèle réside dans sa simplicité associée à sa capacité de rendre compte des caractéristiques de base de la propagation des coulées de lave.

Cette approche, qui est intrinsèquement probabiliste, garantit un calcul très rapide et permet un très grand nombre de simulations.

En revanche, le manque d'équation physique ne permet pas la définition des quantités qui sont essentielles pour l'étude des risques à échelle fine. Le modèle n'est destiné à produire qu'une analyse des voies probables d'écoulement de lave.

De façon à affiner ce modèle, une analyse statistique des coulées de lave a été réalisée pour définir une longueur maximum longitudinale. Ainsi, nous imposons une «distance d'arrêt ». Pour ce faire, une estimation a priori de la longueur de coulée de lave de chaque événement a été nécessaire. Ces estimations ont été faites avec le concours de la production des cartes de coulées présentées ci avant.

3.3.2. Etapes et réalisation des simulations d'écoulement

Validation du paramètre ΔH

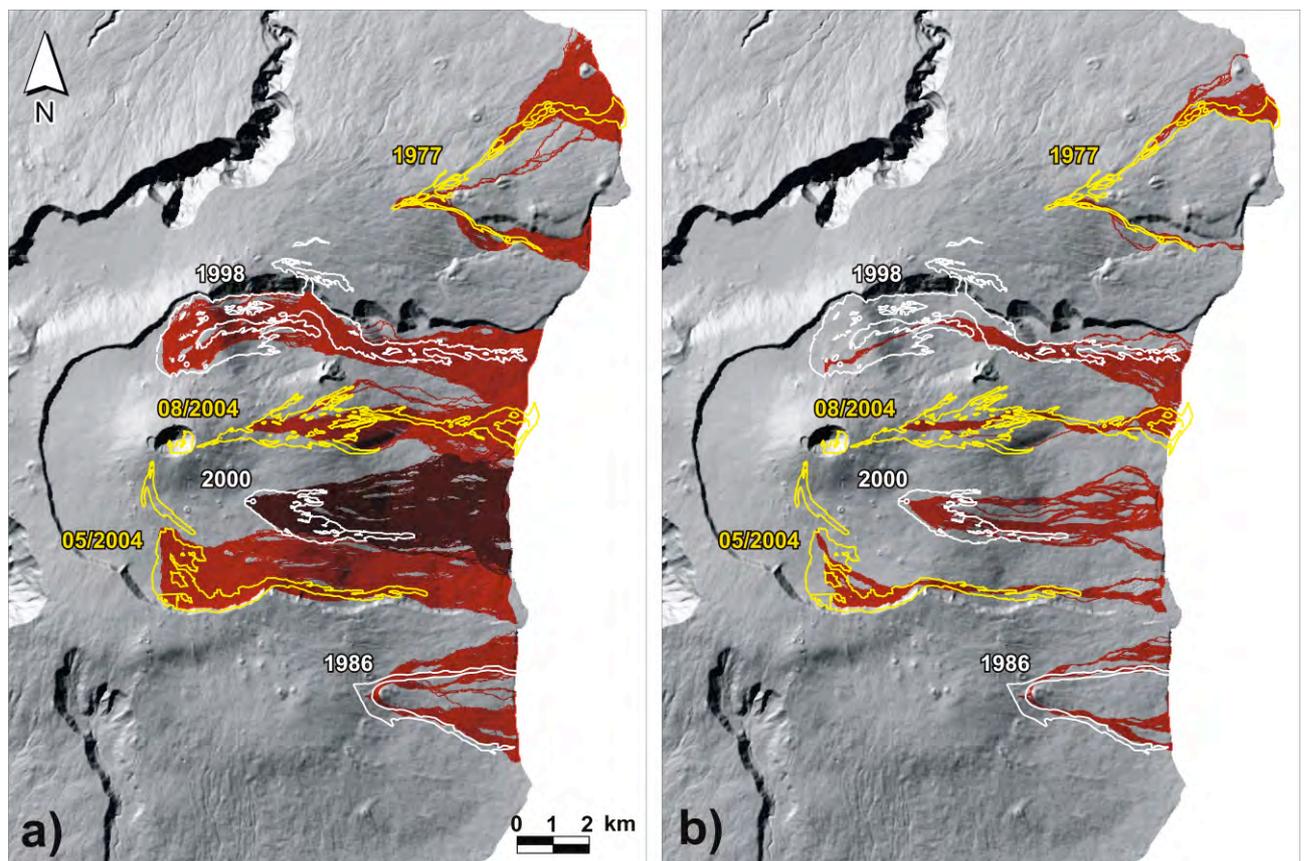


Fig. 17. Comparaison de la valeur de Δh pour 6 coulées de laves passées. Simulations réalisées avec DOWNFLOW a) $\Delta h = 2.5$ m et b) $\Delta h = 0.8$ m.

Les résultats des six simulations montrent 1) que la résolution du MNT n'est pas satisfaisante 2) que Δh à 2,5 m reproduit le mieux la partie amont de la coulée. Cette valeur correspond effectivement aux valeurs d'épaisseur de coulées observées.

Simulations dans l'enclos

Sur la base de la carte des densités de cônes nous avons réalisé, tout d'abord dans l'enclos, des simulations, en localisant les points d'émissions sur des régions considérées comme à forte probabilité d'occurrence. Ce paramètre est établi directement en fonction de la densité de cônes et de fissures.

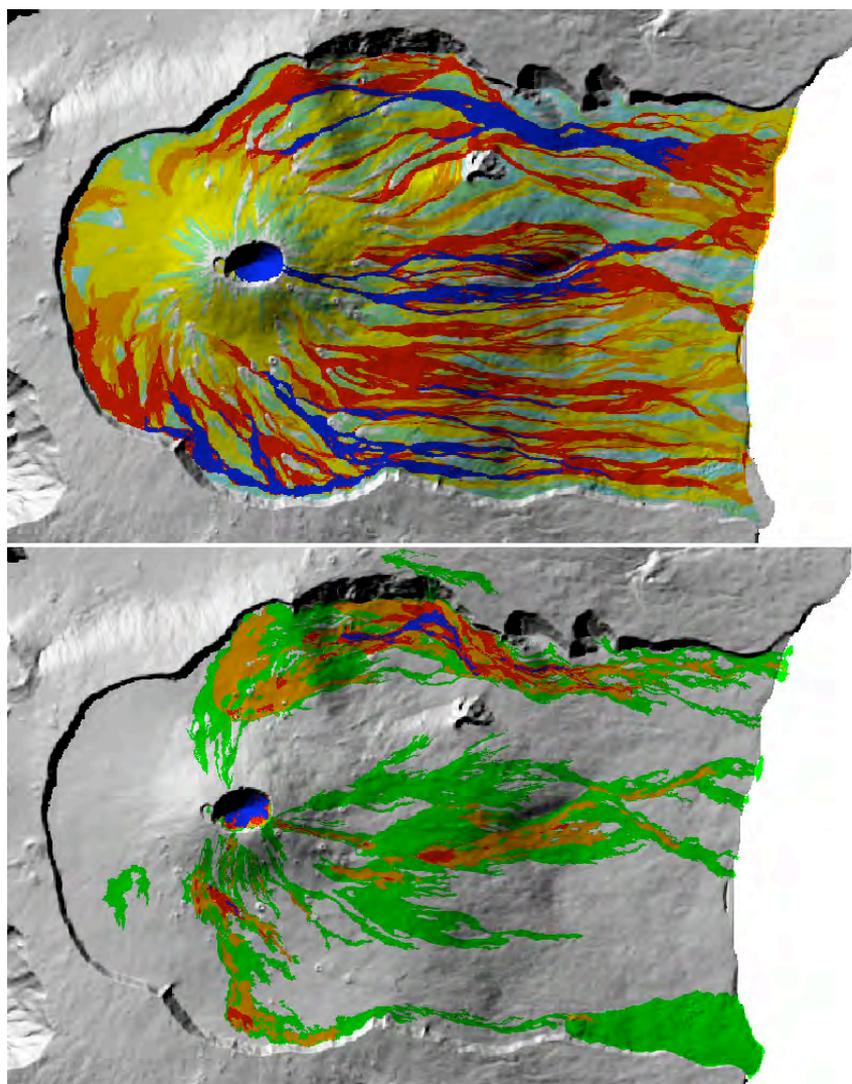


Fig. 19. En haut : simulation d'éruptions à partir des cônes et fissures déjà ouverts dans le passé dans l'enclos (voir § 2.4.2). En bas, cartographie des coulées émises entre 1998 et 2010. La densité de recouvrements décroît dans l'ordre bleu – rouge – orange – vert - jaune.

Simulations sur l'ensemble du massif

Nous appliquons ici une pondération directement liée à un calcul d'occurrence des événements.

Ainsi, en recoupant l'ensemble des bases de données, nous avons dans le cadre de cet exercice considéré que l'enclos connaissait 1,6 éruptions par an, les rift zones NE et SE 0,023 éruption par an et le reste du massif 0,001 éruption par an. Les résultats présentés dans les autres paragraphes de ce rapport montrent que le dernier chiffre est sous-estimé.

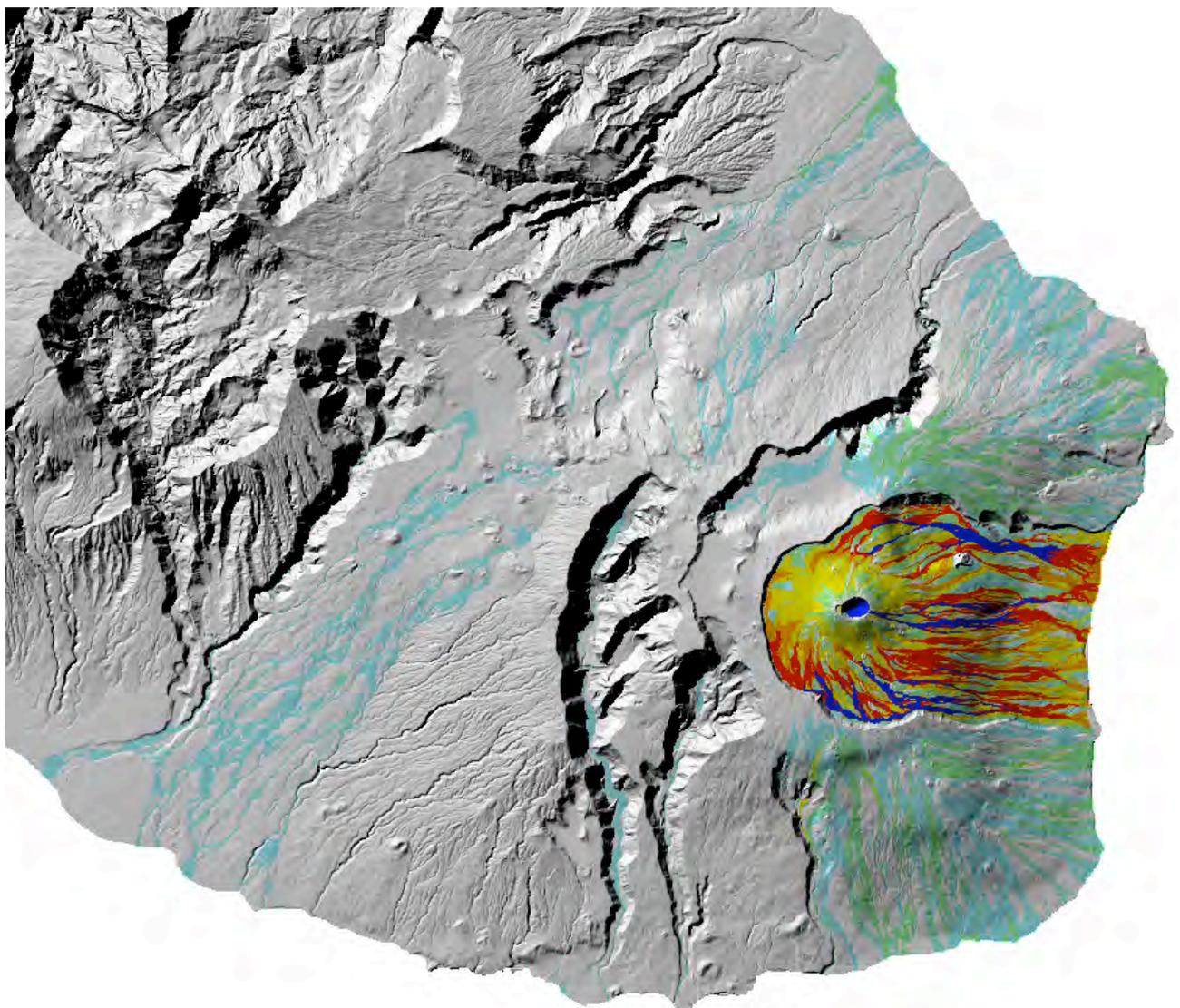


Fig. 20. Carte de simulations de coulées pondérées par les probabilités d'ouvertures d'événements (Probabilité décroissante dans la séquence bleu - rouge - orange - vert - jaune - azur).

Ainsi nous obtenons les résultats produits dans la figure 20. Il est très clair que les fortes densités prédominent dans l'enclos car c'est là que se déroule le plus grand nombre d'éruptions.

Carte des risques

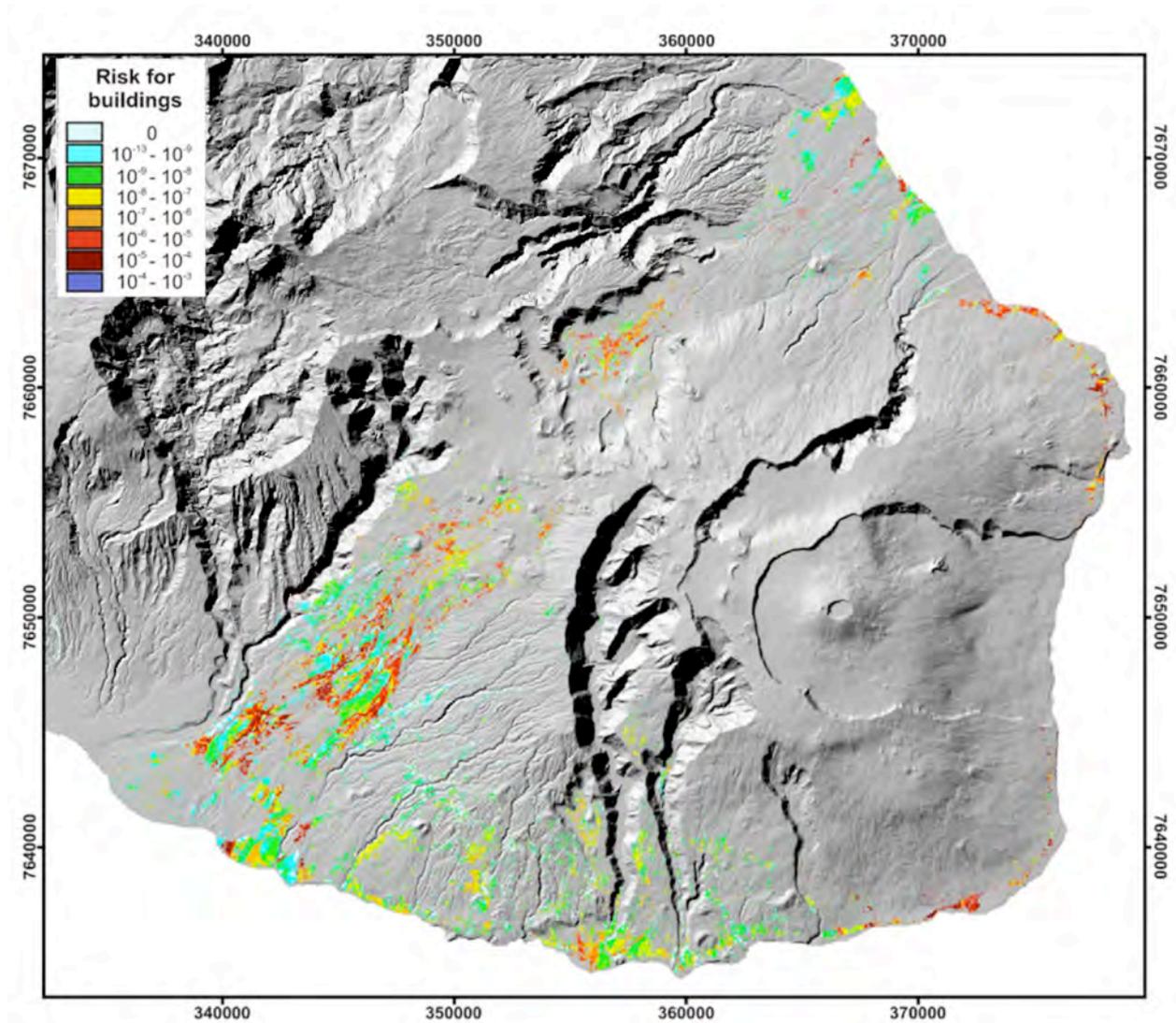


Fig. 21. Carte de risque d'exposition de l'habitat aux coulées de lave. Rouge : risque élevé.

Les différents calculs réalisés sur un plateforme SIG permettant l'obtention des figures 20 et 21 ont été réalisés sur le domaine (MNT) tel qu'il apparaît. Il en découle que dans le cadre d'une étude sur le Piton de la Fournaise, nous simulons des écoulements sur le Piton des Neiges. En réalité cette opération est nécessaire pour éviter des effets de bords (ou perturbations aux limites du domaine). Sur la figure 20 rien de cela ne transparait car la pondération appliquée fait que les coulées qui sont à l'interface PDF/PDN sont quasi -

transparentes dans notre charte graphique. En revanche sur la figure des simulations non pondérées les coulées sont visibles.

Dans un souci de simplification, le Piton Des Neiges a été masqué sur la figure 21.

En nous appuyant sur les données fournies par l'IGN dans le cadre de la BD TOPO, en toute première approximation, une carte des risques d'exposition des bâtiments (sans distinction de typologies) aux laves peut être produite (Fig. 21).

Ce travail présente une première étape vers une cartographie exhaustive du risque lié aux coulées de lave.

L'enclos dans son ensemble montre une très forte exposition à l'aléa coulée de lave, mais l'inexistence d'un risque. Cela est simplement lié au fait que d'une part les informations liées à la fréquentation de cette zone par les randonneurs n'ont pas été intégrées et que nous n'avons pas pris en compte non plus les routes ou les sentiers. Or la RN2 est très fréquentée. Cette route a été coupée à de très nombreuses reprises dans un passé récent occasionnant des problèmes de circulation et des surcoûts de livraison qui pourraient être modélisés.

Dans le même ordre d'idée, il est nécessaire de qualifier un risque prenant en compte l'exposition des bâtiments «stratégiques» et l'ensemble des réseaux.

4. L'ACTIVITE ERUPTIVE EXPLOSIVE

4.1 Les scénarii

L'analyse des produits d'éruptions historiques et préhistoriques a permis de définir 5 types de scénarii associés avec une quelque composante explosive (Table 3 ; voir Annexe pour les détails de chaque scénario) ;

Scénarii	Explosivité	Fréquence observée
1	Strombolienne (projection de scories/bombes balistiques)	annuelle
2a	Petites fontaines (<10 - 50 m) de lave sur petite(s) fracture(s)	annuelle
2b	Grandes fontaines (> 100 m) de lave sur grande(s) fracture(s)	pluriséculaire
3a	Grande fontaine de lave (> 100 m) – courte durée (< 1mois)	centennale
3b	Grande fontaine de lave (> 100 m) – moyenne durée (plusieurs mois)	pluriséculaire
3c	Grande fontaine de lave (> 100 m) – longue durée (années)	pluriséculaire
4a	Phréatique faible	pluriannuelle
4b	Phréatique violente	centennale
5a	Phréato-magmatique faible	pluriannuelle
5b	Phréato-magmatique violente	(pluri)-séculaire ?
5c	Phréato-magmatique très violente	pluriséculaire

Tous les dépôts observés montrent une décroissance très rapide de l'épaisseur et de la taille des particules en s'éloignant du centre d'émission (Fig. 22) et donc restent difficiles à tracer sur des longues distances.

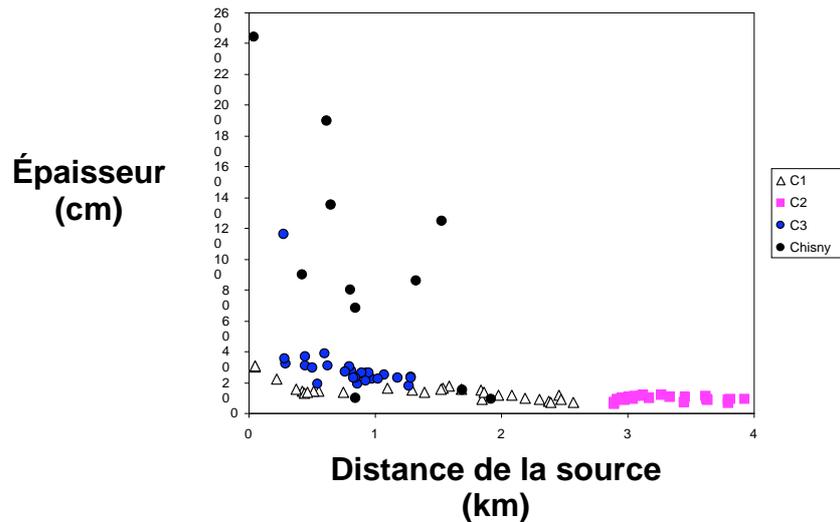


Fig 22 Variation de l'épaisseur des couches de lapillis et cendres émises lors des éruptions de la séquence dite de « Partage (C1, C2 et C3) » et de Chisny (phase1).

L'épaisseur des couches de lapillis accumulées par les éruptions majeures repérées (Éruptions de Partage : environ 2300 BP et Chisny : environ 1100 BP) devient < 10 cm à une distance d'environ 2-3 km de la bouche éruptive. Au-delà de cette distance, on peut encore tracer des niveaux centimétriques de cendres fines souvent jusqu'à environ 5 - 6 km de distance du centre d'émission.

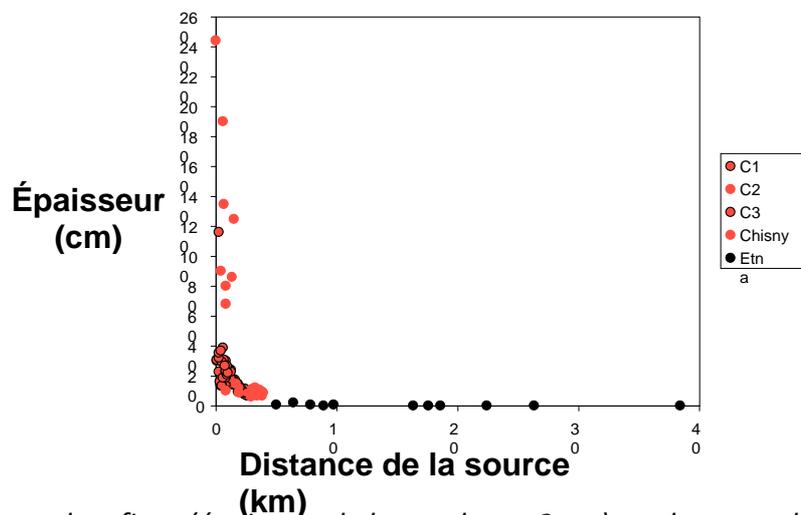


Fig. 23 Dispersion de cendres fines (épaisseur de la couche : < 2 cm) par les panaches associés aux grandes fontaines de lave de l'Etna (éruptions de 2001, 2006 et 2007 ; Andronico et al., 2008a,b ; 2009). Les cendres de l'Etna ont été tracées à plus de 50 km. Ces cendres ont été transportées par des panaches situés à une altitude de 1 - 2 km au dessus du volcan, alimentés par des fontaines de lave qui ont atteint 400 m d'hauteur.

Dans le cas du Piton de la Fournaise, la capacité de dispersion des cendres à plus large échelle (Fig. 23) est liée d'un coté au mécanisme de fragmentation (phréato-magmatique, phréatique ou magmatique) et donc à la quantité de matériaux fins émis à la bouche et de l'autre à la vitesse des vents dominants pendant les éruptions, plutôt qu'à l'intensité de l'éruption elle-même. Celle-ci reste, dans l'ensemble, modeste.

4.1.1 Explosivité d'origine magmatique

Les **scenarii de faible explosivité** (type 1 : projections ballistiques Stromboliennes ; type 2a : petites fontaines de laves de quelques dizaines de mètres, souvent émise par une ou plusieurs courtes fractures) sont sans doute les plus fréquents (fréquence annuelle) et sont associés aux émissions de coulées de lave détaillées dans le chapitre 3.

Ce faible degré d'explosivité se traduit dans la dispersion de scories et lapillis sur des distances limitées (dizaines/centaines de mètres) et émet très peu de matériaux fins (Fig. 24). Les gaz émis peuvent atteindre des concentrations importantes en proximité des bouches éruptives.

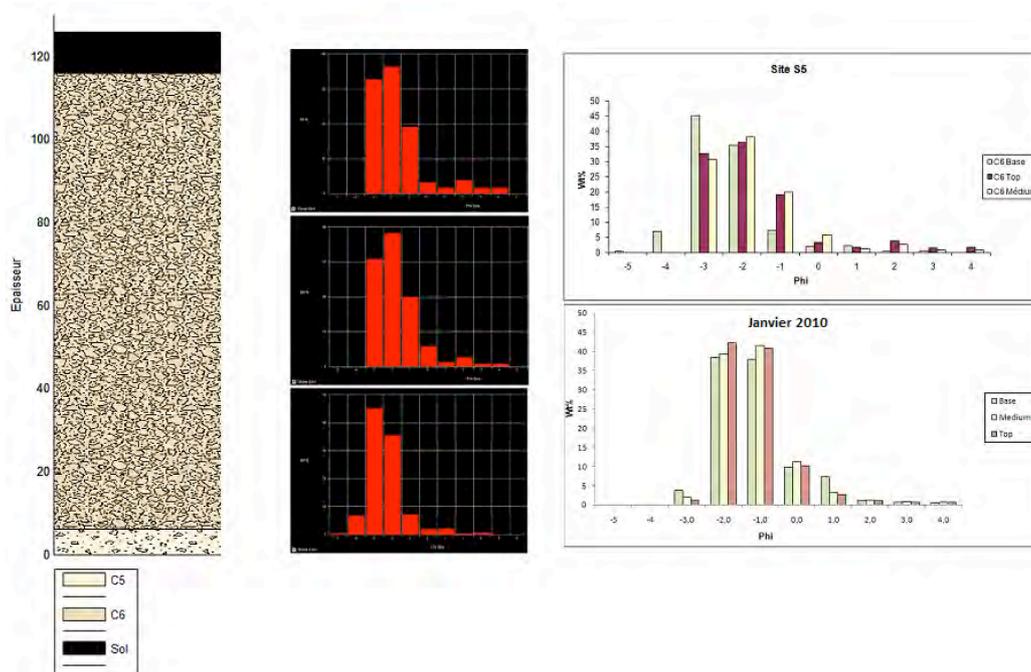


Fig 24 Granulométrie (X : $\phi = \log_2(\text{mm})$; Y : % poids) des dépôts de scories accumulés par les éruptions de i) **Janvier 2010** (échantillonnés à 100 m de distance de la bouche éruptive) et ii) **C3 de Partage** – 2140 BP (échantillonnés à 450 m de la bouche éruptive). L'éruption de Janvier 2010 a eu lieu dans la falaise ouest du Dolomieu. Au début, l'écoulement de lave a

été alimenté par 7 fontaines (hauteur < 30 m) alignées sur une fracture de 60 m de long (scénario type 2a) (Fig. 25). Le dépôt de scorie de Janvier 2010 a eu une dispersion très limitée (rayon d'environ 150 m autour de la source), tandis que le dépôt C3 (scénario 3b), peut être tracé sur une étendue de plusieurs kilomètres.



Fig 25 Alignement de fontaines de lave de petite taille (< 30 m) sur fracture (Janvier 2010) (Source OVPF)

L'éruption de fontaines de lave capable d'atteindre plusieurs centaines de mètres de hauteur soit le long d'une ou plusieurs fractures (type 2b) soit au niveau d'une source (cône) presque ponctuelle (type 3) est probablement un phénomène relativement rare à la Réunion.

L'exemple de référence pour le scénario 3b est représenté par l'activité qui a eu lieu au début (2-6 avril) de l'éruption débutée le 2 avril 2007 (hauteur fontaines : 100-200 m ; Staudacher et al., 2009). Globalement, on peut considérer que les phases d'émission de fontaines (violentes ou faibles) ont lieu pendant la phase initiale de ce type d'éruption et on considère que leur hauteur va décroître assez rapidement par la suite.

L'éruption de 2007 illustre très bien la possibilité de créer et mélanger plusieurs types de panaches éruptifs pendant une même éruption (Tulet et Villeneuve, 2011). En effet, l'éruption d'avril 2007 est caractérisée par la présence simultanée de a) petits panaches phréatiques (<1 km de hauteur) émis lors de l'effondrement du sommet du Piton de la Fournaise (scénario type 4a), b) grandes fontaines de lave alimentées par les bouches éruptives du Tremblet située 590 m au dessus du niveau de la mer (scénario type 3a) et c) panaches de vapeurs et cendres d'origine phreato-magmatique, produites par l'interaction entre lave et eau de mer (scénario type 5a). Dans le cas de 2007, les panaches de vapeurs et l'aérosol riche en SO₂ ont atteint 5 - 10 km au dessus du niveau de la mer et ont eu une

dispersion régionale (Tulet et Villeneuve, 2011) ; de plus, les émissions gazeuses, notamment de SO₂, ont eu un impact notable au niveau local et régional, avec plusieurs dépassements des seuils d'alerte définis par le Ministère de l'Environnement (Bhugwant et al., 2009). Par contre, les émissions de lapillis et cendres (au niveau du Dolomieu, du cône du Tremblet ou au niveau du cône littoral) n'ont eu qu'une dispersion très limitée (<1-3 km de distance par rapport au centre d'émission) ; une dispersion beaucoup plus importante, par contre, a été observée pour les filaments vitreux très légers (cheveux de Pelé) qui ont été transportés sur des dizaines de kilomètres par rapport à la source d'émission (Tremblet). Les émissions de cheveux de Pelé sont difficiles à tracer dans les éruptions plus anciennes, en raison de leur faible résistance à l'érosion et à leur dispersion dans l'environnement.

La production de grandes fontaines de lave de plusieurs centaines de mètres sur des durées variables entre plusieurs mois (scenario 3b) et plusieurs années (scenario 3c) a eu lieu plusieurs fois dans l'histoire du Piton de la Fournaise.

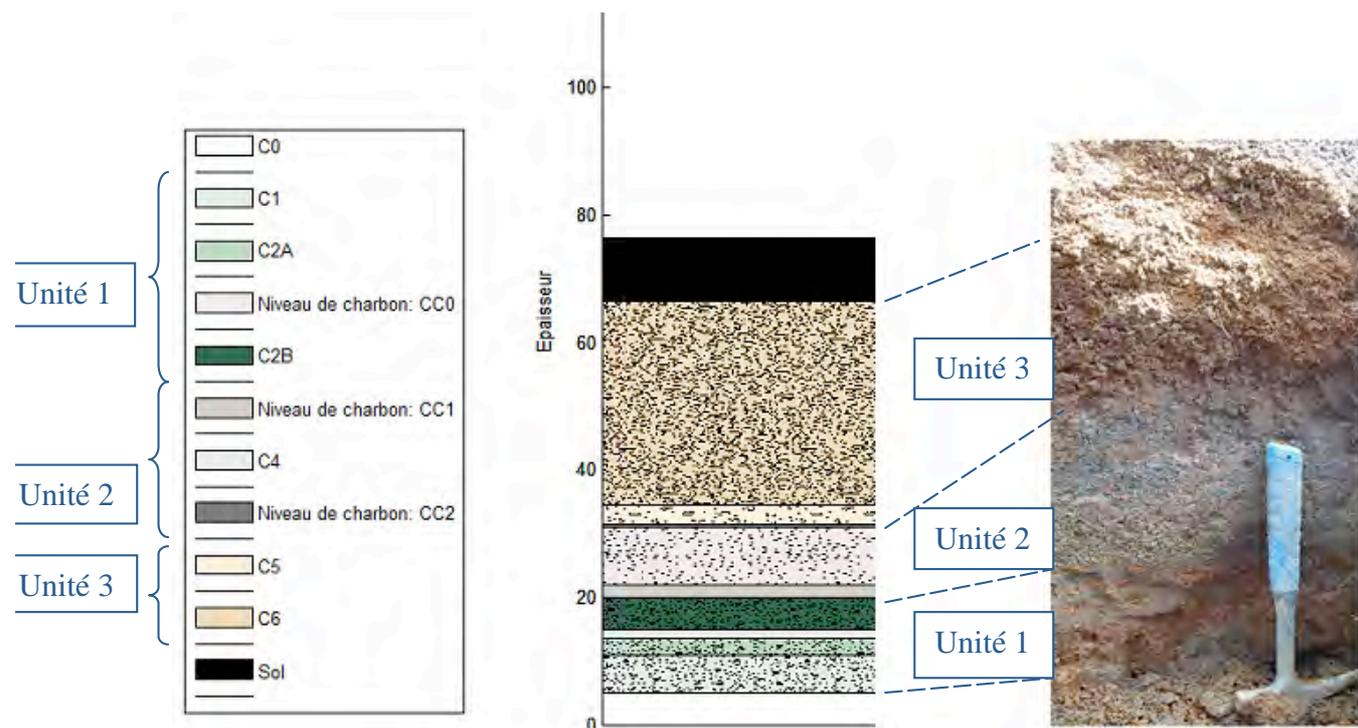


Fig. 26 Log stratigraphique de la séquence éruptive de Partage (2855 – 2140 BP) Unité 3 : lapillis scoriacés (éruption magmatique); unité 2 : lapillis denses (éruption phréatique) ; unité 1 : niveaux de cendres fines (éruptions phreato-magmatiques) ; on remarquera la présence systématique de niveaux de charbon entre chaque unité éruptive ; Les épaisseurs sont en centimètres.

Un exemple possible du scénario 3b est représenté par l'éruption du niveau C3 de la série de Partage (Fig. 26). Le niveau C3 est représenté par une couche de scories et lapillis de taille décroissante entre la base et le toit. La bouche éruptive semble se situer en proximité du cône de Formica Leo, près du bord nord-ouest de l'Enclos Fouqué.

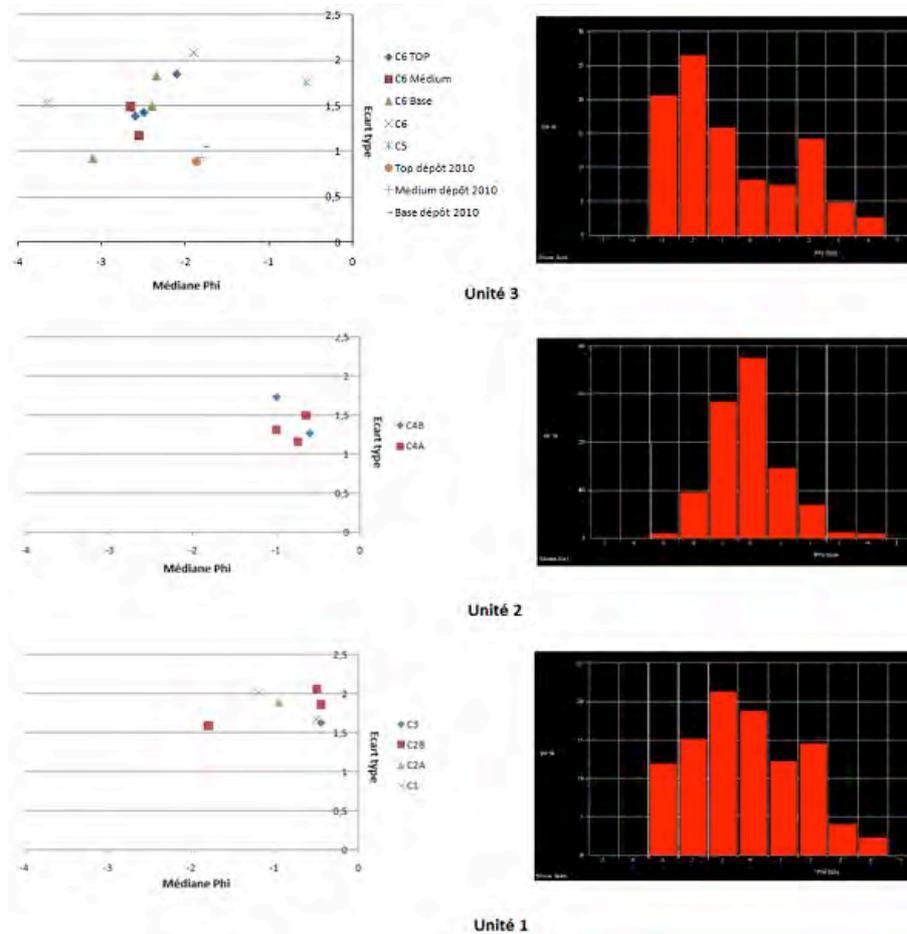


Fig. 27 Granulométrie (Mediane et Ecart type) des dépôts de scories magmatiques (Unité C3), cendres phréatiques (Unité C2) et cendres phréato-magmatiques (Unité C3) de la séquence de Partage. Dans les histogrammes (% poids) la granulométrie est mesurée en unités phi.

D'autres exemples des scénarii 3b et 3c peuvent sans doute être trouvés pendant les phases effusives les plus intenses de construction du cône sommital du Piton de la Fournaise, détaillées dans le paragraphe suivant (4.2).

Une contrainte très forte sur le faible degré d'explosivité de l'activité du Piton de la Fournaise et la faible capacité de dispersion des cendres au niveau régional est donnée par la série de 6 carottages (entre 3 et 8.5 m). Les sites choisis ont été la Plaine des Sables (PDS1 et PDS2), le bord du petit lac de Piton de l'Eau (PDE1 et PDE2), le marais au sein du cratère de Piton dans le Bout (PLB) et le bord du grand lac de barrage de Grand Etang (GDE)

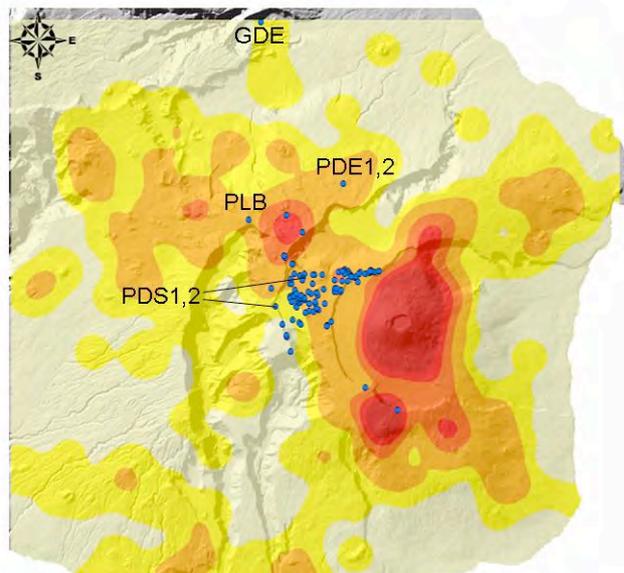


Fig. 28 Localisation des carottages et des levés de terrain pour l'étude des couches de lapillis et cendres émises par l'activité éruptive du Piton de la Fournaise.

Les carottages dans la Plaine des Sables (Fig. 29), intégrés avec les levés de terrain, permettent d'identifier deux phases explosives (phase 1 et phase 2) de l'activité de Chisny. La phase 1 est probablement le résultat d'une activité de grandes fontaines de lave étalées sur une série de fractures en partie située entre les cônes de Chisny et du Demi-Piton. Cette couche peut être suivie à l'extérieur de la Plaine des Sables, mais décroît rapidement d'épaisseur et granulométrie (Fig. 22). La phase 2 est vraisemblablement liée à la construction de l'édifice du Chisny et à une dispersion moindre, confinée au sein de la Plaine des Sables.

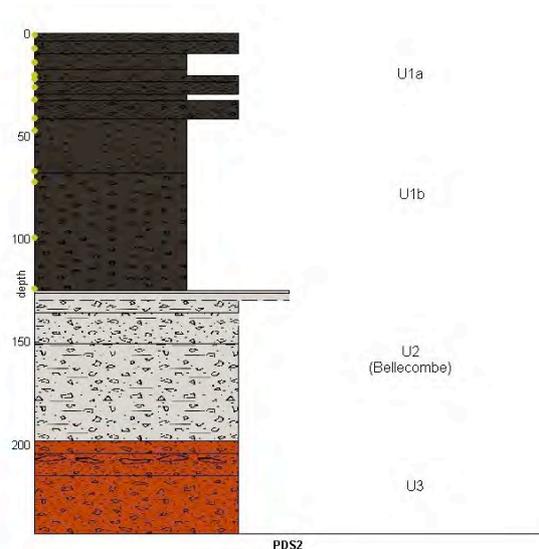


Fig. 29 Log stratigraphique du carottage PDS2 – Plaine des Sables (Rouge : scories rouges ; Gris : cendres grises de Bellecombe ; noir : lapillis émis par la phase 1 de Chisny). Les épaisseurs sont en centimètres.

Les sites de Piton dans le Bout (Fig. 29), Piton de l’Eau (Fig. 30), et Grand Etang (Fig. 31) ont été choisis par leur âge probable pré-Bellecombe. Ces sites étaient donc susceptibles de préserver des traces d’une activité explosive récente post-Bellecombe. Les carottages ont confirmé l’attribution chronologique des cônes de Piton dans le Bout et de Piton de l’Eau par l’identification des cendres de Bellecombe. Le niveau de Bellecombe n’a pas été reconnu dans le carottage de Grand Etang. Dans les deux sites plus rapprochés au Piton de la Fournaise, des couches de lapillis vitreux post-Bellecombe ont été identifiées. L’épaisseur et la taille des grains décroît entre les sites PLB et PDE. Les observations morphologiques (binoculaire) ne permettent pas de corréler entre elles ces couches ou de les attribuer à d’autres éruptions connues de la Plaine des Sables ou du Piton de la Fournaise. Une source locale (Secteur du Piton des Basaltes – Plaine des Sables) reste la plus probable. Des analyses chimiques des fragments vitreux sont en cours pour permettre une meilleure corrélation des niveaux avec les autres dépôts échantillonnés.

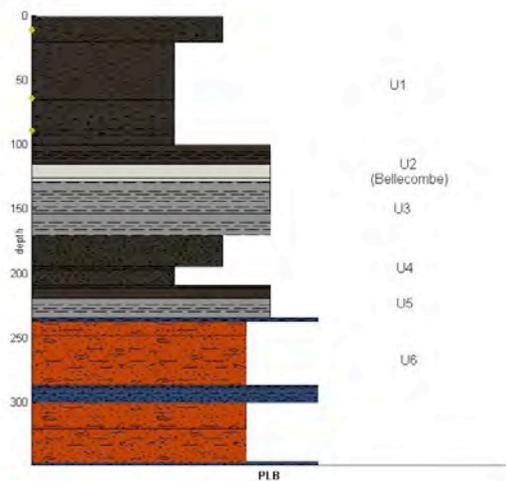


Fig. 30 Log stratigraphique du carottage PLB – Piton dans le Bout (Rouge : scories rouges ; Blanc : cendres grises de Bellecombe ; noir : lapillis d'éruptions magmatiques). Les épaisseurs sont en centimètres.

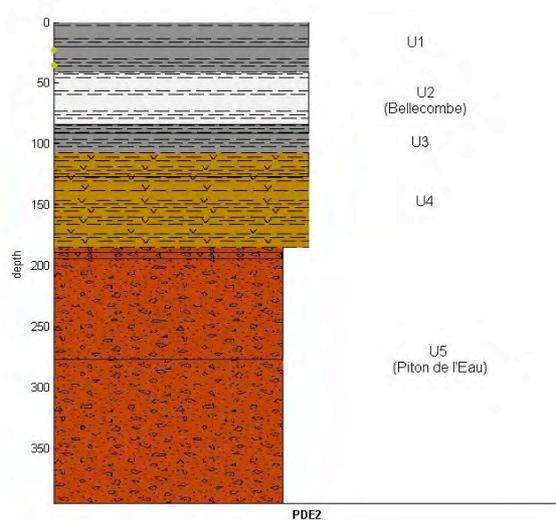


Fig. 31 Log stratigraphique du carottage PDE – Piton de l'eau (Rouge : scories rouges ; Orange : sol ; Blanc : cendres grises de Bellecombe ; gris : lapillis d'éruptions magmatiques). Les épaisseurs sont en centimètres.

Le carottage effectué dans le site le plus éloigné (Grand Etang ; environ 18 km du sommet du PdF) n'a pas identifié des couches de lapillis. Le carottage a traversé environ 4 m de matériaux fins de type limoneux, avant de pénétrer dans les matériaux scoriacés et laviques d'un des cônes du Grand Etang. L'examen à la binoculaire n'a pas pu identifier de fragment vitreux ou scoriacé dispersé dans la matrice fine limoneuse.

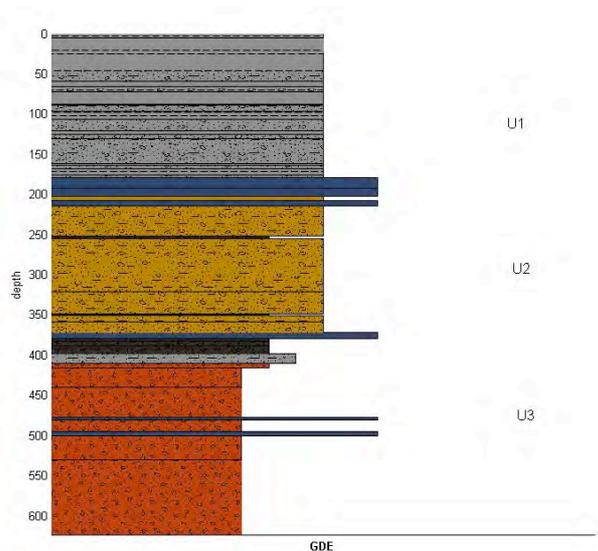


Fig. 32 Log stratigraphique du carottage GDE – Grand Etang (Rouge : scories rouges ; Bleu : laves ou fragments de laves; orange : limons avec pédogenèse; gris : limons sans pédogenèse ; Les épaisseurs sont en centimètres.

4.2 Reconstruction de l'activité du cône sommital du Piton de la Fournaise

4.2.1 Les phases de construction du cône sommital

Le cône sommital du Piton de la Fournaise domine la caldeira de l'Enclos Fouqué de près de 400 m. L'activité actuelle du Piton de la Fournaise montre combien les éruptions et intrusions dans ce secteur, directement à l'aplomb de la chambre magmatique superficielle, ont une place prépondérante dans le fonctionnement du volcan. La construction du cône sommital reflète donc ce que fut l'activité éruptive et intrusive de la Fournaise au cours des derniers siècles, voire du dernier millénaire.

L'effondrement de plus de 300 m de profondeur intervenu lors de l'éruption latérale d'Avril 2007 nous permet d'observer des formations profondes dans les parois de ce cône, formations jusqu'alors inaccessibles à l'observation. Cette information géologique permet de compléter les écrits laissés par les premiers observateurs du volcan (depuis 1700 environ), et ainsi fournit les éléments de base pour une interprétation de ce qu'a pu être l'activité éruptive associée à la construction du cône sommital.

Dans le cadre de ce projet, deux éléments primordiaux peuvent être déduits de la reconstitution de l'édification du cône sommital : (i) quels furent les grands cycles de

construction de la zone centrale du volcan au cours des derniers siècles ? (ii) Quelle furent les phases d'activité les plus violemment explosive et quel a pu être leur impact ?

- Grands cycles de construction

a / La mise en place du Champ de Lave de l'Enclos Fouqué et la période « Dolomieu »

L'activité de la zone sommitale telle quelle fut décrite par les observateurs du volcan depuis le 18^e siècle montre une alternance de phases d'effondrement à l'origine de la formation de nouveaux cratères ou de l'approfondissement des cratères existants, et de phases de remplissage par l'accumulation de coulées émises depuis des fissures. Les phases d'effondrement sont parfois associées à des explosions phréatiques ou phréatomagmatiques. Cet aspect de l'activité sera décrit à part, (par. 4.2.2)

Dans la période historique, l'évènement effusif le plus marquant fût la mise en place du « Champ de Lave de l'Enclos Fouqué », formation qui aujourd'hui encore occupe largement l'ouest et le nord de l'Enclos Fouqué et du cône sommital. Cette formation fut mise en place par des émissions à faible débit, probablement entre 1751 et 1794, sans manifestation explosive de grande envergure (Lénat et al., 2001). La formation du cratère Dolomieu (pris ici dans un sens large) est étroitement associée à cet évènement. L'activité de ce cratère (effondrements et remplissages) se prolonge jusqu'à nos jours.

b / Le cratère « Pré-Bory » et le bouclier du Bory

Antérieurement à la période historique, et donc à la période « Dolomieu », l'activité est focalisée au niveau du cratère Bory et du bouclier du Bory dont la construction paraît uniquement associée à des manifestations effusives. Ce bouclier forme la zone sommitale actuelle, couronnée par le cratère Bory partiellement comblé de coulées épaisses. Le bouclier du Bory vient terminer le comblement par de petites coulées fluides de type 'pāhoehoe' d'une grande structure cratérique que nous nommerons cratère « Pré-Bory », comparable par sa taille au Dolomieu actuel, dont la trace est discernable dans les pentes nord-ouest du cône sommital et la bordure nord visible dans la paroi du Dolomieu (Figure 28). Ce cratère est largement rempli de plusieurs séquences de coulées épaisses, avec peu de niveaux inter stratifiés de retombées pyroclastiques. De ces éléments, nous déduisons que son activité a du être semblable à l'activité actuelle du Dolomieu.

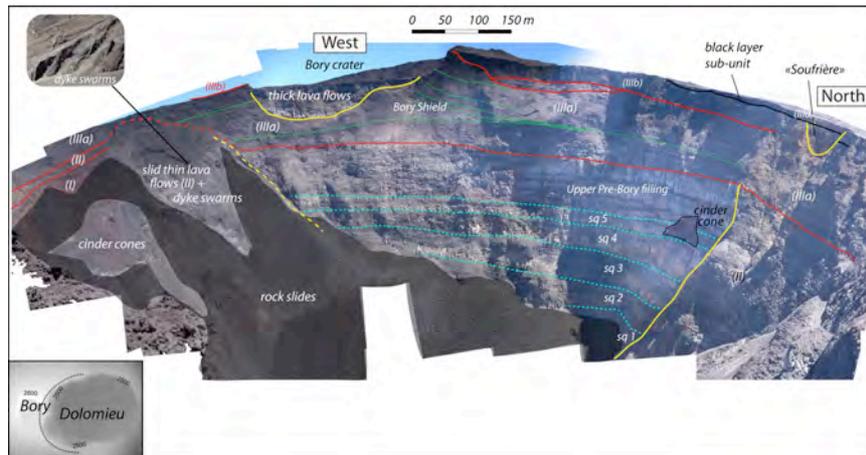
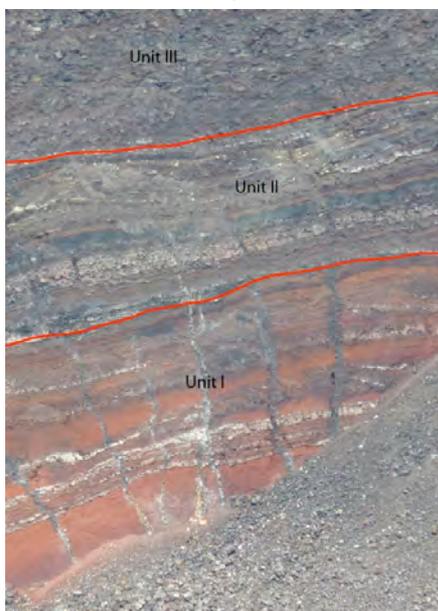


Fig. 33 : Vue de la paroi ouest du cratère Dolomieu (Figure extraite d'un article soumis à *Bulletin of Volcanology* – Peltier, Massin, Bachèlery, Finizola). Les formations comblant le paléo cratère « Pré-Bory » sont particulièrement visibles. Elles sont surmontées d'une unité appelée bouclier du Bory (Unité IIIa), constituée de fines coulées de lave. Le cratère Bory, lui même partiellement comblé de coulées épaisses, constitue le sommet de ce bouclier. Sur les pentes du bouclier du Bory, vers le nord sont présentes les formations historiques dont les coulées du Champ de Lave de l'Enclos Fouqué (IIIb). De part et d'autre du cratère « Pré-Bory » apparaissent des formations plus anciennes majoritairement constituées de coulées (Unité II) ou des formations pyroclastiques (unité I).

c / Les unités anciennes : charpente du cône terminal

Ce cratère recoupe des formations qui, du haut vers la base, évoluent depuis un ensemble à coulées dominantes vers un ensemble de formations à horizons pyroclastiques dominants. Cet empilement, essentiellement observable de part et d'autre du cratère « Pré-Bory », vient charpenter la morphologie actuelle du cône sommital. Il peut être subdivisé en trois unités (Figure 34).



Bory », vient charpenter la morphologie actuelle du cône sommital. Il peut être subdivisé en trois unités (Figure 34).

Fig. 34 : Détail de la paroi sud-ouest du cratère Dolomieu. Les formations de l'unité I, dont la coloration rouge dominante traduit la richesse en matériaux pyroclastiques scoriacés, est surmontée de l'unité II, formée d'une alternance de coulées diverses et de niveaux pyroclastiques bruns, puis de l'unité III constituée des fines coulées du bouclier du Bory (Photo : P. Bachèlery).

L'unité de base (unité I) est une unité essentiellement constituée d'une succession de niveaux rougeâtres de projections scoriacées oxydées, mêlées à quelques coulées de lave. De très nombreuses injections (dykes) arment cette unité. Cette unité est interprétée comme la trace d'un grand appareil (cône strombolien ?) qui a occupé le sommet du volcan il y a plusieurs centaines d'années (aucune précision ne peut être apportée sur son âge à ce stade de l'étude). Le fonctionnement d'un tel appareil peut être associé à une éruption de longue durée et de grande envergure, avec des phases explosives magmatiques (scenarii type « 3 »). Un exemple actuel peut être trouvé dans le fonctionnement du cratère « Pu'u' O' o » au Kilauea à Hawaii.

L'unité II est formée d'une série de coulées fines et épaisses avec plusieurs niveaux épais de retombées pyroclastiques scoriacées et quelques niveaux pyroclastiques à blocs caractéristiques de dépôts d'explosions phréatomagmatiques (scenarii type « 5 »). La partie haute de l'unité II (unité III) est essentiellement constituée de coulées de lave, marquant ainsi une transition depuis une activité dominée par les phases explosives (unité I) vers une activité plus effusive (haut de l'unité II) qui va précéder l'effondrement du cratère « Pré-Bory ».

La connaissance de l'activité du cône sommital est déterminante afin d'appréhender la dynamique éruptive du Piton de la Fournaise durant les derniers siècles. Le fonctionnement actuel, avec des éruptions au dynamisme essentiellement effusif et une activité récurrente d'effondrement en zone sommitale, peut être prolongé dans le temps jusqu'à la période ayant précédé la formation du cratère « Pré-Bory ». Antérieurement à cela, les formations observées montrent que le fonctionnement au sommet fût marqué par une dynamique plus violente avec des épisodes éruptifs plus explosifs. Des travaux complémentaires sont nécessaires pour en préciser les modalités, les effets éventuels et établir une chronologie pour ces événements.

4.2.2 L'activité explosive du cône sommital du Piton de la Fournaise : explosions phréatiques et effondrements sommitaux

Deux faits notables nous ont mené à soulever le problème des éruptions explosives sommitales et de leur relation avec les effondrements sommitaux de type cratère en puits ou caldera. Premièrement, des panaches des cendres ont été observés lors de la formation d'effondrements sommitaux, comme en 1961 et 2007 (Figure 35 a). Deuxièmement, des blocs anguleux et massifs de taille variable recouvrent la zone sommitale du Piton de la Fournaise (Figure 35 b).

a-



b-



Fig. 35 : a- Panaches de cendres associés aux éruptions de 1961 et de 2007. Chacun des événements s'est accompagné de la formation d'une structure d'effondrement. b- Dépôt de blocs résultant d'explosions phréatiques sommitales récentes (XVIII siècle). La taille maximale des blocs est de 1,8 m de diamètre.

Pour comprendre l'origine et la dynamique de ces événements, nous avons cartographié les blocs péri-cratériques grâce une mosaïque d'images aériennes de haute résolution (pixel entre 5-10 cm de coté), reconstitué une carte des cratères d'effondrement reconnus et/ou décrits dans des récits historiques et mis en relation la dynamique éruptive, la localisation des éruptions et l'occurrence d'explosions phréatiques.

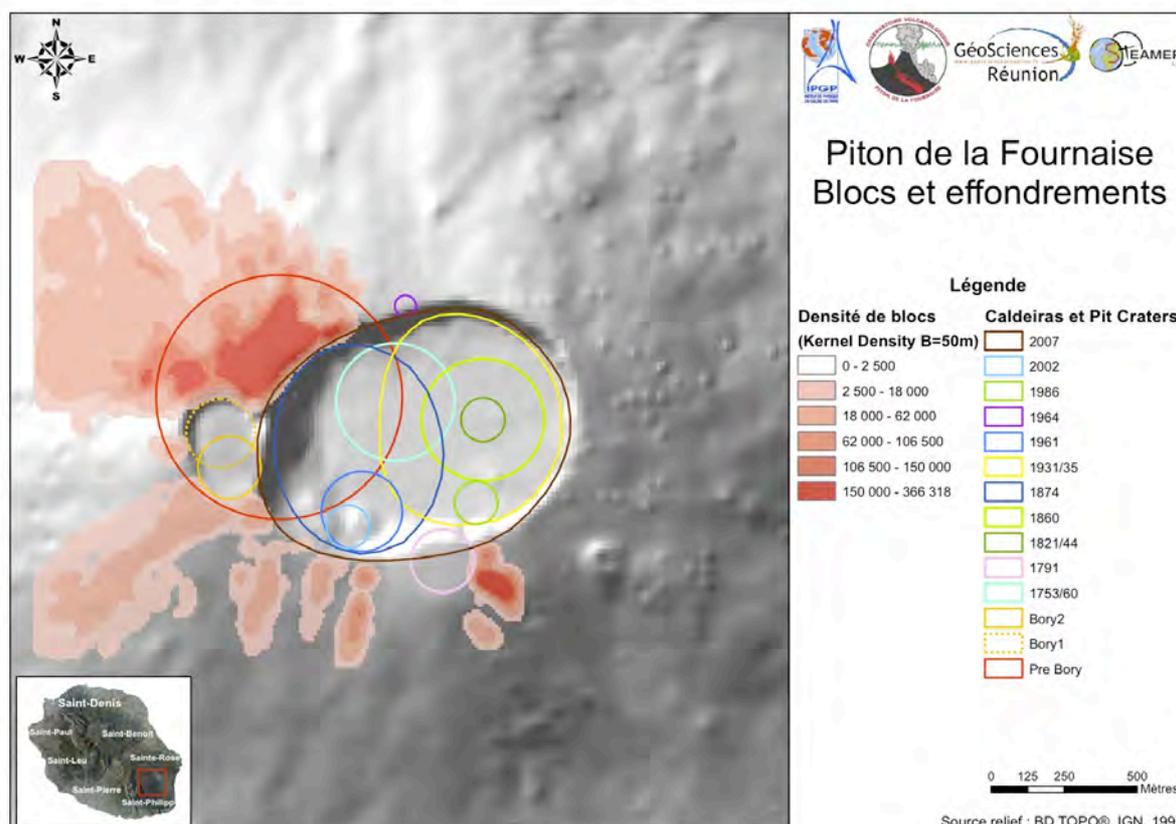


Fig. 36 : Carte de répartition (1) des blocs liés aux explosions phréatiques récentes (représentation en densité de blocs) et (2) des structures d'effondrements reconnues pour la période récente, i.e. post 1753.

La cartographie des blocs apporte trois enseignements majeurs. 1- Elle montre une distribution spatiale totalement asymétrique caractérisée par une abondance de blocs dans la moitié occidentale et une absence dans le secteur est. Cette répartition s'explique par un recouvrement généralisé du dépôt de blocs par des coulées de lave dans le secteur oriental et contraint à quelques coulées de lave étroites dans la partie sud. 2- Deux maxima de densité de blocs sont observés dans le quart NW de la zone sommitale et à l'est du cratère de 1791 (Figure 36). Ces deux maxima étant spatialement distincts, ils proviennent de

sources différentes situées dans la partie NW du Dolomieu pour le secteur sommital NW et dans la partie sud du Dolomieu pour le maximum situé à proximité du cratère de 1791.

L'absence de bloc dans le secteur est indiquée que la dynamique associée à des effondrements de grande ampleur comme ceux de 1931/35 et de 2007 n'est vraisemblablement pas celle qui a mené aux explosions phréatiques à dépôt de blocs étendu.

La carte des effondrements sommitaux de type cratère en puits et calderas révèle une relative dispersion des zones effondrées. Parmi des structures, deux types différents ont pu être distingués. 1- Les cratères en puits et/ou calderas associés à des éruptions latérales. La formation de ces cratères, quelle que soit leur taille, s'accompagne parfois d'émission de cendres et de rares blocs. Appartiennent à cette catégorie les cratères de 1821/1844, 1874 et suivants. La récurrence de tels événements est pluri-annuelle. 2- Les cratères en puits associés à une activité magmatique sommitale, continue et pluri-annuelle. Ces cratères dans lesquels se concentre une activité magmatique de type lac de lave se révèlent être associés à des explosions phréatiques violentes avec émission de blocs recouvrant la zone sommitale. La récurrence de ces explosions est centennale.

5. CHIMIE DES MAGMAS ET DES EMISSIONS GAZEUSES

Les magmas basaltiques émis par le Piton de la Fournaise ont une composition chimique relativement peu variable, et on peut notamment les différencier par i) la quantité d'olivine (qui peut atteindre 50 vol% dans les si dites « oceanites ») et ii) l'importance de minéraux tels le plagioclase et le pyroxène dans la séquence de cristallisation.

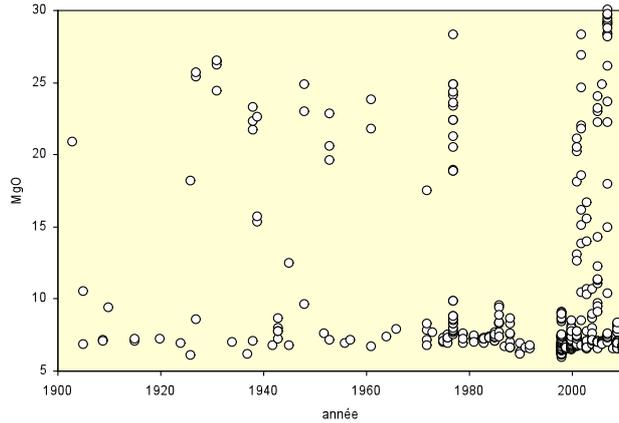


Fig. 37-a : Bi-modalité de la composition des laves (MgO directement proportionnel à la quantité l'olivine) émises par le Piton de la Fournaise dans la période 1900-2010. Les données sont assez exhaustives pour la période 1966-2010, mais moins complètes pour la période plus ancienne.

Malgré une quelque variabilité minéralogique, ces magmas contiennent toujours une quantité de faible à modérée d'éléments volatils dissous (<2.5% en poids). Le composant principal à la fois des gaz émis pendant les éruptions (la température du magma et des gaz associés varie dans la gamme 1200 – 1050 °C) et des fumerolles sommitales (gaz de basse température < 100 °C) est toujours l'eau. Sa teneur dans les magmas est toujours inférieure à 1,6 (magmas profonds) – 0.9 % en poids (magmas superficiels).

Le soufre représente le deuxième composant, émis sous forme de SO₂ dans les gaz à haute température et de H₂S dans les fumerolles à basse température.

Le champ fumerollien le plus actif et persistant se trouve confiné à l'intérieur du cratère sommital Dolomieu et est caractérisé par un faible débit et des températures proches de celle d'ébullition de l'eau. Par contre des champs fumerolliens de moyenne température (< 300 °C) peuvent aussi se développer au sein des coulées de lave d'épaisseur pluri-métrique (ex coulée de 2007). Ces champs peuvent avoir une durée de vie décennale.

La faible teneur en gaz (notamment en eau) de ces magmas est en bon accord avec leur explosivité modérée déduite par l'analyse des produits éruptifs et de l'activité historique.

Dans l'ensemble, on peut schématiquement distinguer les magmas par leur profondeur (pression) de stockage avant éruption et donc par la quantité et la composition de leur charge gazeuse :

H₂O > SO₂ > F > Cl > CO₂ "magmas de basse pression"

H₂O > SO₂ > CO₂ > F > Cl « magmas profonds »

	Magmas "profonds"	Magmas "de basse pression"	Gaz (haute température)	Gaz (faible température)
massique				
H ₂ O/CO ₂	13	78	61	74
H ₂ O/SO ₂	4	3	24	
CO ₂ /H ₂ S				81
CO ₂ /SO ₂	0,61	0,07	0,60	
S/F	2,7	2,3	nd	nd
S/Cl	6,4	4,3	nd	nd
molaire				
C/S	0,90	0,10	0,89	59,94

Il paraît important de souligner que si les basaltes du Piton de la Fournaise émettent toujours des quantités significatives d'eau et de soufre, les émissions de carbone sont corrélées avec la profondeur de stockage pré-éruptive du magma. De plus, les basaltes du Piton de la Fournaise émettent des quantités assez faibles en halogènes (Cl, F) pendant leur remontée. Ces éléments ne sont émis en quantités significatives que très tardivement, notamment pendant la phase fumerolienne post-éruptive.

Les magmas « superficiels », globalement appauvris en gaz représentent le type dominant émis par l'activité (effusive ou faiblement explosive) du cône sommital du Piton de la Fournaise. Les magmas « profonds » avec une charge gazeuse plus importante ont été émis à la fois à l'intérieur de l'Enclos Fouqué (Hudson, 1998 ; certains échantillons de novembre 2002) et dans le secteur ouest (ex Piton des Cailles). Le nouvel échantillonnage effectué dans ce projet sur les produits hors Enclos émis à l'ouest du Piton de la Fournaise permettra de préciser si les magmas « profonds » représentent le type dominant émis dans ce secteur. Les laves et les scories émises par l'activité récente dans la Plaine des Sables (33 échantillons) sont en cours d'analyse (CRPG-Nancy). Les laves émises hors Enclos le long des rifts NE et SE (Secteurs St. Rose – St. Philippe) résultent vraisemblablement de la propagation latérale à basse pression d'un magma qui débute son injection sous le sommet du Piton de la Fournaise. En revanche, le lien entre les éruptions du secteur ouest (notamment des magmas profonds) et l'activité sommitale, reste à préciser. Les analyses préliminaires des scories échantillonnées dans la Plaine des Sables permettent de

différencier ces matériaux de ceux qui sont d'habitude émis par le Piton de la Fournaise (Fig. 37). De plus, chaque éruption semble avoir une « signature » identifiable.

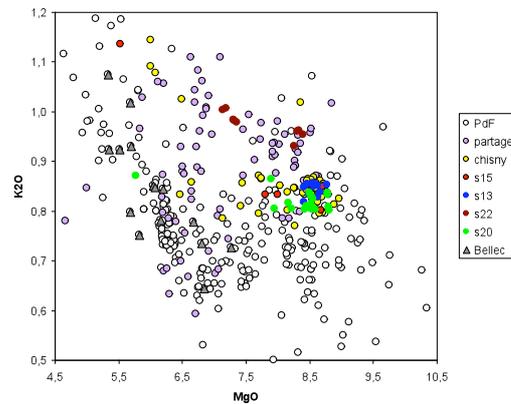


Fig. 37 b : *Composition chimique des verres dans les produits pyroclastiques (scories) de la Plaine des Sables (en couleur), comparée avec celle du Piton de la Fournaise (points blancs). Les couches de lapillis des sections (s) 15, 13, 22 (secteur du Demi-Piton) et 20 (secteur du Chisny) correspondent à des niveaux qui affleurent dans la Plaine des Sables.*

Ces analyses seront très utiles dans la corrélation des couches de lapillis et cendres émises par les différentes sources et contribueront à la compréhension du lien entre l'activité sommitale et l'activité latérale du Piton de la Fournaise

6. PERCEPTION DE L'ALEA VOLCANIQUE A LA REUNION

6.1 Introduction

Dans les stratégies d'atténuation des risques, la communication et l'information scientifique jouent un rôle important, aussi bien pendant de longues périodes d'inactivité qu'en cas de crise éruptive aigüe. Des recherches axées sur la compréhension et la perception par le public, des risques volcaniques pendant les crises éruptives ou les périodes de repos, ont mis en évidence l'importance d'une conception de programmes de sensibilisation et d'éducation fondés sur une connaissance réelle et détaillée des besoins de la population concernée. Une meilleure connaissance de la perception par les populations des risques auxquels elles sont susceptibles d'être exposées, constitue la base indispensable à l'élaboration de stratégie d'éducation et de prévention adaptées. Dans ce cadre l'étude de la perception du risque volcanique conduit à La Réunion, a pour objectif de fournir des éléments quantitatifs pour une politique de réduction du risque volcanique.

6.2 Méthodologie

L'enquête effectuée à La Réunion est la seconde plus importante jamais réalisée sur la perception du risque volcanique, après celle conduite sur le Vésuve, par les mêmes auteurs. L'outil choisi pour ce travail est un questionnaire, parce qu'il est le moyen le plus approprié de faire participer un échantillon suffisamment représentatif de la population, et pour couvrir la plupart des critères d'intérêt (le lieu de résidence, le niveau d'éducation, l'expérience des crises volcaniques, la condition sociale, l'âge, le sexe).

Dans le cadre de cette étude, un total de 2000 questionnaires a été distribué. Ce nombre a été calculé en relation directe avec le nombre des résidents de chaque ville, avec un minimum de 60 questionnaires par ville. Le plan de distribution des questionnaires a également pris en compte les aspects tels que, la proximité de la ville par rapport au volcan du Piton de la Fournaise, et l'implication des communautés dans certaines situations d'urgence volcaniques.

Le questionnaire, contenant 43 questions, a été élaboré à partir principalement de ceux déjà développés et testés dans des recherches similaires menées récemment en Italie (Barberi et al., 2008) mais avec une adaptation aux particularités de La Réunion.

Les thématiques examinées par cet outil de recherche sont les suivants:

- Connaissance des dangers et des phénomènes attendus ;
- Les mesures de perception des risques tels que la probabilité et la gravité potentielle des effets d'une éruption ;
- Sentiment d'auto-efficacité ;
- Connaissance du plan de préparation;
- Perception de la préparation et de la confiance dans les informations émises par les autorités et les scientifiques ;
- Évaluation du niveau de l'information reçue sur les risques volcaniques et le plan d'urgence;
- Les sources d'information et les méthodes préférées pour recevoir ces informations ;
- Sens de la communauté ;
- Diverses questions d'ordre démographique.

Ce questionnaire contient une majorité de questions d'opinion basées sur une échelle d'appréciation (échelle de Likert) déclinée en cinq modalités, allant de « tout à fait d'accord » à « pas du tout d'accord ». Ce type de question vise à mesurer les attitudes ou les réactions des répondants. Des questions ouvertes ont aussi été utilisées afin de disposer de données qualitatives.

Afin de faciliter la saisie des données, le questionnaire a été conçu pour être lu à l'aide des méthodes ICR (Intelligent Characters Recognition) et OMR (Optical Marks Recognition).

Passation des questionnaires

La recherche a prévu une première phase (Septembre-Novembre 2011) de préparation pour la présentation du projet, l'identification des partenaires de terrain ainsi que la programmation de l'enquête. L'idée étant de diffuser les questionnaires via les établissements d'enseignement, il a été rédigé un accord avec le Rectorat.

La distribution des questionnaires et leur collecte ont eu lieu entre Novembre 2011 et Février 2012. L'objectif est de couvrir une grande variété de groupes d'âge et un autant de d'hommes et de femmes.

Les questionnaires ont été distribués dans différents points:

- Dans les établissements secondaires, collèges et lycées, de chaque ville et/ou de quartier en collaboration avec les enseignants. Les élèves ont été également invités à faire remplir les questionnaires par leurs parents.
- Dans les mairies, en particulier les Centres Communaux d'Action Social - CCAS,
- Auprès des associations locales et associations de quartier.

2000 questionnaires ont été distribués dans les 24 communes de l'île de La Réunion (Tableaux 1, 2, 3).

#	Commune	Nombre questionnaires
1	Bras-Panon	60
2	Cilaos	60
3	Entre-Deux	60
4	L'Etang Salé	60
5	La Plaine des Palmistes	90
6	La Possession	60
7	Le Port	70
8	Le Tampon	150
9	Les Aviron	60
10	Petite-île	70
11	Saint André	90
12	Saint Benoit	70
13	Saint Denis	150
14	Saint Joseph	80
15	Saint Leu	60
16	Saint Louis	90
17	Saint Paul	130
18	Saint Philippe	110
19	Saint Pierre	130
20	Sainte Marie	60
21	Sainte Rose	110
22	Sainte Suzanne	60
23	Salazie	60
24	Trois Bassins	60
		2000

Tab.1 : Répartition du nombre de questionnaires distribués

Dans le cadre de cette enquête, 61 entités différentes ont été contactées (écoles, mairies et associations), dont les principales sont reportées dans le Tableau 2.

	Questionnaires distribués
Établissements scolaires (32)	1139
Dont Collège (22)	830
Dont Lycée (10)	309
Mairie (20)	565
Association (9)	296
2000	

Tab. 2 : Répartition des questionnaires selon les institutions sollicitées

En ce qui concerne la distribution des questionnaires dans les établissements scolaires, les principales données sont reportées dans le Tableau 3.

	Questionnaires distribués aux élèves	Questionnaires distribués aux parents
Collège	479	351
Lycée	188	121
	667	472

Tab.3 : Répartition des questionnaires selon le type d'établissement scolaire

6.3 Résultats

Caractéristiques de l'échantillon

Sur les 2000 questionnaires distribués, 1220 (61%) ont été récoltés, et parmi ces derniers 1204 ont été jugés utilisables (Tab.4).

#	Commune	Nbre de questionnaires
1	Bras Panon	38
2	Cilaos	53
3	Entre Deux	32
4	Etang Salé	37
5	Plaine des Palmistes	33
6	La Possession	25
7	Le Port	25
8	Tampon	103
9	Avirons	36
10	Petit ile	41
11	St André	67
12	St Benoit	46
13	St Denis	68
14	St Joseph	40
15	St Leu	59
16	St Louis	70
17	St Paul	50
18	St Philippe	94
19	St Pierre	91
20	Ste Marie	42
21	Ste Rose	55
22	Ste Suzanne	48
23	Salazie	43
24	Trois Bassins	8
		1204

Tab4 : Répartition du nombre de questionnaires valides

Le pourcentage d'hommes et de femmes, calculé sur le nombre de réponses disponibles (N=1125), résulte être respectivement de 38,6% et de 61,4%.

L'âge des personnes sondées varie de 10 à 98 ans, avec une moyenne de 27,2 ans et une déviation standard de 16,4. En ce qui concerne le niveau d'instruction, 4,2% ont une instruction se limitant au primaire, 45,7% ont une instruction de collège, et 32,5% sont diplômés au lycée et 17,6% sont en possession d'un diplôme de Master, et personne est en possession d'un titre universitaire supérieur (Fig. 1).

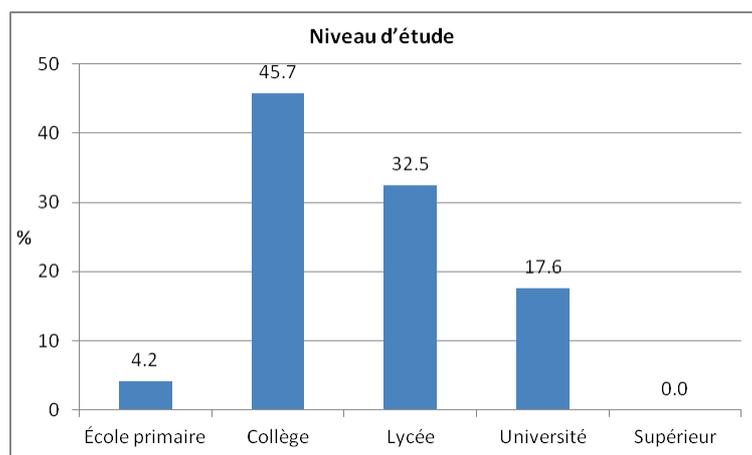


Fig. 38: Répartition du nombre de réponses selon le niveau de diplôme (Nombre de réponses (N) = 1153)

Conscience et perception du risque, sentiment d'auto efficacité :

Un des premiers objectifs du questionnaire a été d'évaluer la conscience du risque auprès des populations. Pour cela, il a été demandé aux personnes interrogées quels sont les phénomènes naturels, les plus fréquents à la Réunion, en les classant sur une échelle numérotée de 1 à 7, ie du plus au moins préoccupant.

Ainsi, le phénomène naturel apparaissant comme le plus préoccupant pour 44,9% des réponses obtenues est le glissement de terrain, alors que les éruptions volcaniques apparaissent comme le phénomène naturel le plus préoccupant uniquement pour 6,2% des réponses obtenues. Par rapport à cette réponse, il est à noter qu'un pourcentage plus important (10,6%) considère les éruptions volcaniques comme le phénomène naturel le moins préoccupant.

La figure 39.b met en confrontation les deux communes, Saint Philippe et Sainte Rose) qui ont eu dans un passé récent (respectivement 1986 et 1977) l'expérience d'éruptions volcaniques, avec en particulier des coulées de lave sur leur territoire, et le reste des 22 autres communes de l'île de La Réunion qui n'ont pas été touchées par ce type de phénomène. Concernant les risques naturels les plus préoccupants, il apparaît une différence significative dans trois domaines : (1) les « tremblements de terre », dont la perception est liée ici à l'activité volcanique, et donc une crainte accrue due à la proximité des communes de Saint Philippe et Sainte Rose du Piton de La Fournaise et des potentiels centres éruptifs. On note également une différence très significative pour les thématiques (2) des « glissements de terrain » moins préoccupantes pour les communes de Saint Philippe et Sainte Rose et (3) des « autres risques naturels » plus importants pour les communes de Saint Philippe et Sainte Rose (Fig.2a-2b).

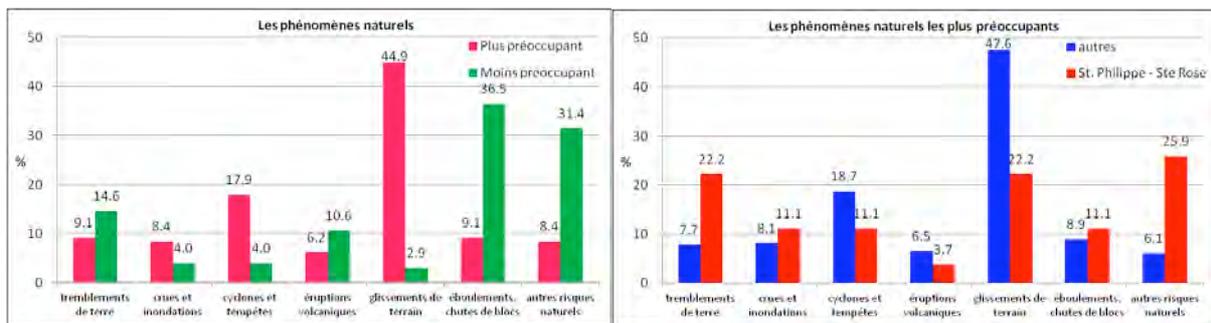


Fig. 39a: N=274

Fig. 39b: N autres=246; N St. Philippe-Ste Rose= 28

A la question est-ce qu'un événement volcanique pourrait menacer votre propre lieu de résidence, 29% des personnes interrogées ont une réponse neutre tandis que 26,4% considèrent cette possibilité, et 24,3% indiquent reconnaître une possible menace de leur propre territoire de résidence.

Il apparaît donc que plus de 50% des personnes reconnaissent vivre sur un territoire potentiellement vulnérable par le risque d'une éruption. En comparant les réponses des résidents des communes de St Rose et St Philippe avec celles du reste des répondants, on note une nette augmentation dans la reconnaissance de son propre territoire comme étant exposé à un risque volcanique. Toutes les réponses se basent sur une échelle de Likert de 5 points. Cette échelle (du nom du psychologue américain Rensis Likert) est une échelle de mesure répandue dans les questionnaires psychométriques. La personne interrogée exprime

son degré d'accord ou de désaccord vis-à-vis d'une affirmation. L'échelle contient en général cinq ou sept choix de réponse (cinq dans notre cas) qui permettent de nuancer le degré d'accord. Les chiffres les plus élevés indiquent toujours un accord plus prononcé pour l'affirmation, comme suit (Fig.3a):

1. Pas du tout d'accord
2. Pas d'accord
3. Ni en désaccord ni d'accord
4. D'accord
5. Tout à fait d'accord

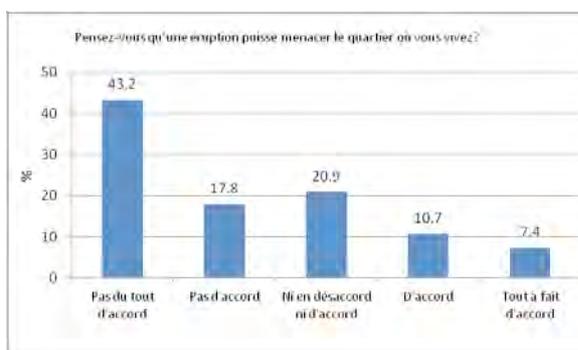


Fig. 40a: N=1159

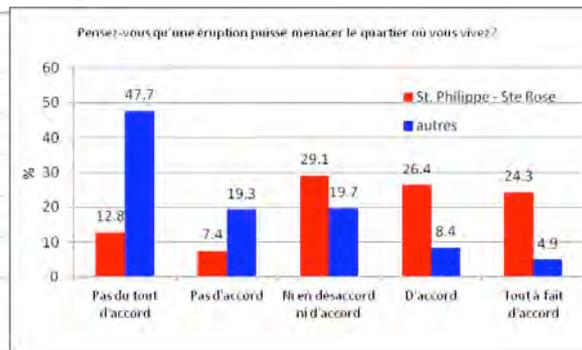


Fig.40b: N autres=1011; N St. Philippe - Ste Rose= 148

Perception du risque

La Perception du risque est un terme général qui contient plusieurs éléments liés à la vision que chacun de nous a d'un danger et du risque résultant pour lequel nous sommes exposés. Ces éléments comprennent l'inquiétude ressentie en rapport à un événement catastrophique, et la perception de la gravité des conséquences d'un tel événement. Une série de questions dans le questionnaire a été élaborée pour définir cette perception complexe. En premier lieu, les résidents ont été invités à exprimer leur niveau de préoccupation à l'égard d'un événement éruptif, ainsi que la gravité de leurs conséquences pour la ville en général, pour eux-mêmes et leurs familles. Là encore, les réponses sont toutes dans une échelle de Likert à 5 modalités avec les réponses aux chiffres les plus élevés indiquant une plus grande probabilité perçue et une plus grande perception également de la gravité des conséquences d'une éruption, et une plus grande préoccupation au sujet d'un événement possible. En particulier, 52,7% de l'échantillon total de la population se dit ne pas

être (19,0%) ou être légèrement (33,7%) préoccupé, tandis que seulement 24,8% (14,3% et 10,5%) montrent des niveaux de préoccupation supérieurs.

La comparaison des réponses des résidents spécifiques aux communes de Saint Philippe et Sainte Rose avec le reste de l'échantillon de la population montre une préoccupation significativement plus importante (Fig.4).

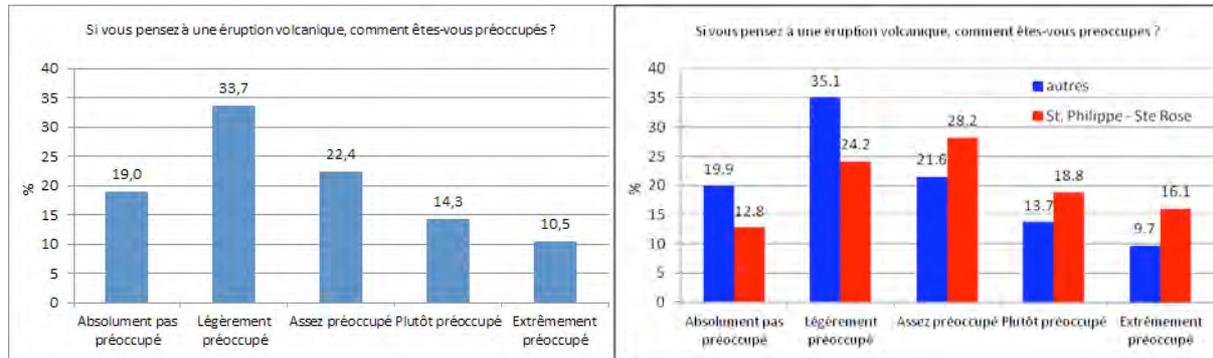


Fig. 41a: N=1178

Fig.41b: N autres=1029; N St. Philippe-Ste Rose= 149

Sur les conséquences qu'une éruption volcanique aurait sur eux-mêmes et leurs familles, respectivement, 27,1% et 25,9% des répondants indiquent une conséquence légère ou modérée, 16,4% prévoient des conséquences sans gravité, tandis que 20,6% définissent des conséquences graves possibles. Pour 10% de la population, l'impact d'une éruption sur son propre territoire pourrait être extrêmement grave.

Fait intéressant, les résidents des communes les plus exposées aux risques volcaniques, ont une perception de la gravité nettement supérieure à l'échantillon global de la population (Fig.5a-5b).

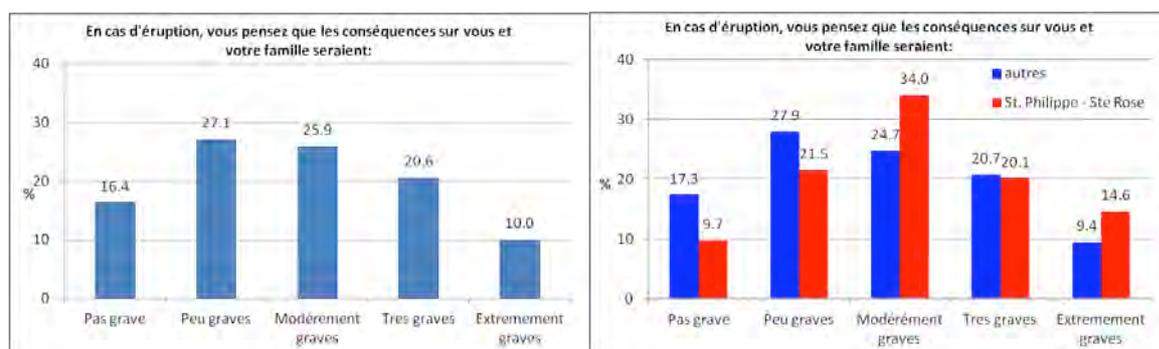


Fig. 42a: N=1155

Fig.42b: N autres=1011; N St. Philippe-Ste Rose= 144

Quant à la gravité des conséquences d'une possible éruption au niveau du quartier de résidence, on note la même tendance, avec des conséquences de peu (24,3%) à modérément sévère (24,1%), avec là aussi, 10% des répondants qualifiant d'extrêmement grave l'impact d'une éruption sur son propre quartier.

Là aussi, la comparaison avec les résidents des deux communes les plus exposées au risque volcanique, confirme la perception accrue de la gravité de l'impact d'une future éruption possible (Fig.6a-6b)

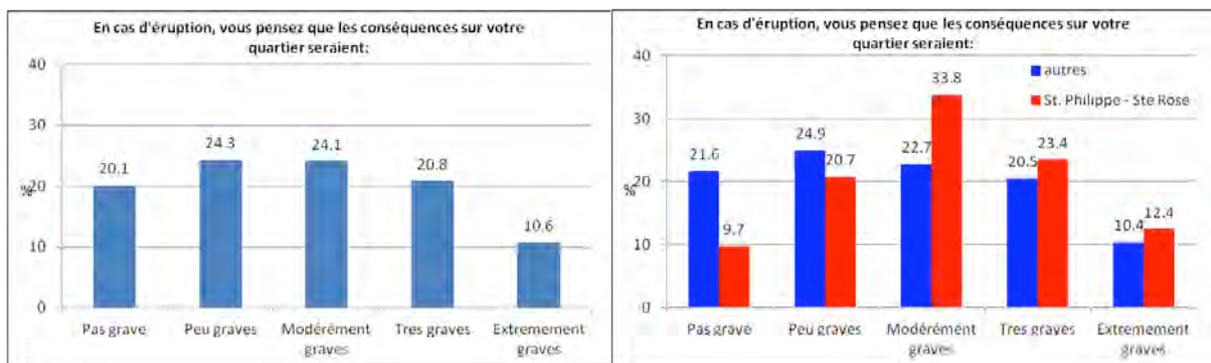


Fig. 43a: N=1167

Fig.43b: N autres=1022; N St. Philippe-Ste Rose= 145

Associé à la perception du risque, il y a également le fait de reconnaître les phénomènes volcaniques potentiellement dangereux pour son propre territoire. Une partie du questionnaire a donc été spécifiquement orientée vers les phénomènes volcaniques qui seraient problématiques sur leur territoire. Diverses questions d'opinion utilisant une échelle de Likert et pour lesquels les chiffres les plus élevés indiquent un impact majeur de ce phénomène, ont été élaborées

Les phénomènes majoritairement référencés sont les gaz volcaniques (moyenne 2,69 / 5) et les nuages de cendres (moyenne 2,59 / 5).

La comparaison des résidents de Saint Philippe et Sainte Rose par rapport à l'échantillon global montre une plus grande considération de l'activité sismique parmi les éventuels phénomènes dangereux attendus (Fig.7; Fig. 8a-8b).

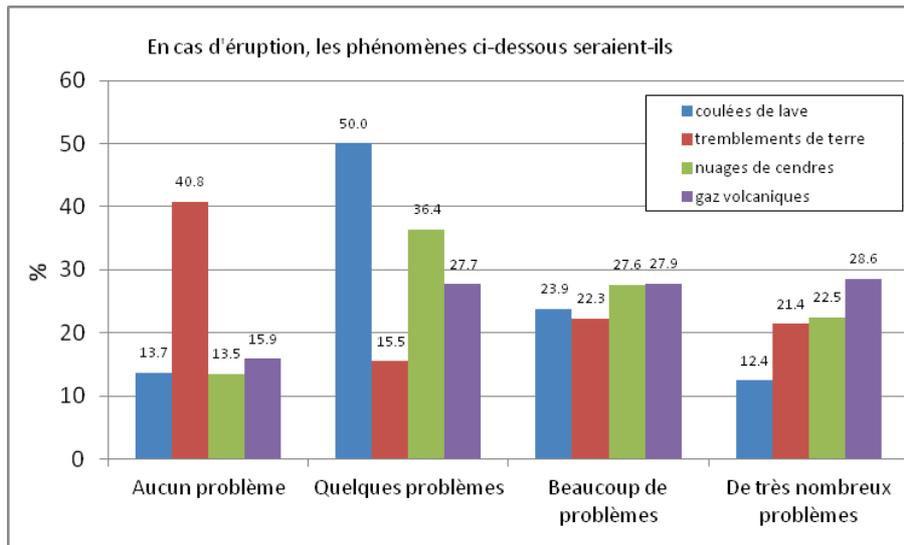


Fig. 44: N=1150

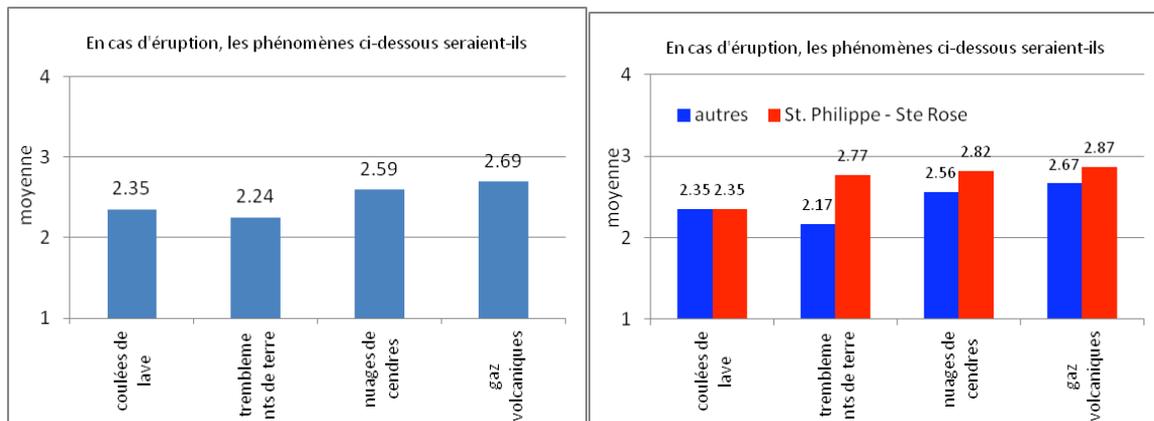


Fig. 45a: N=1150

Fig.45b: N autres=1007; N St. Philippe-Ste Rose= 143

Auto-efficacité

L'auto-efficacité est reconnue comme une variable importante pour déterminer si une population à risque serait en mesure de prendre des mesures d'auto-protection.

Il donc a été demandé aux résidents d'évaluer la capacité personnelle de se protéger contre les effets d'une éruption, et la capacité de faire face à une situation de crise volcanique.

La première évaluation, avec des réponses sur une échelle de 5 points, et des chiffres les plus élevés qui représentent le plus fort sentiment d'auto-efficacité dans la protection, a montré que près de 50% des répondants se considèrent comme étant capables de se protéger eux et leur famille d'une menace volcanique. Ce pourcentage est encore plus élevé

en tenant compte des seuls habitants des deux communes les plus exposés aux risques volcaniques (Fig.9a-9b).

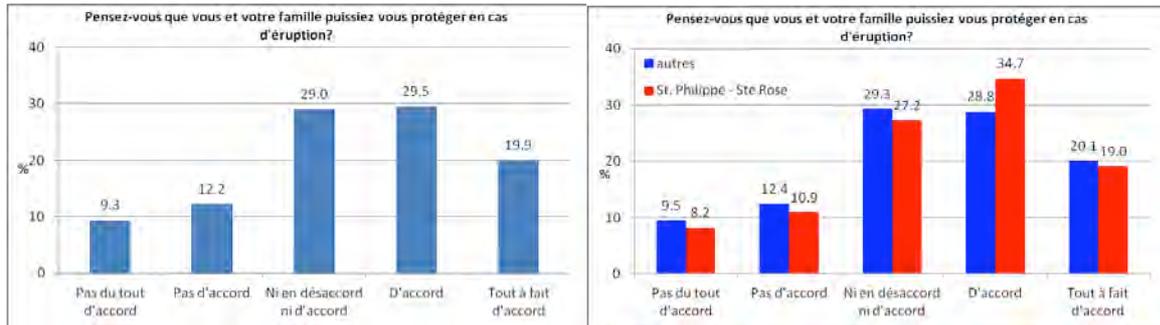


Fig. 46a: N=1169

Fig.46b: N autres=1022; N St. Philippe-Ste Rose= 147

Par ailleurs, lorsqu'il a été demandé d'évaluer l'aptitude personnelle et celle de sa propre famille à faire face à une situation de crise volcanique, plus de 40 % de l'échantillon total se considère comme étant non préparé. Ce pourcentage diminue légèrement lorsque l'on considère seulement les résidents des villes de Saint Philippe et Sainte Rose, plus exposés au risque volcanique (Fig.10a-10b)

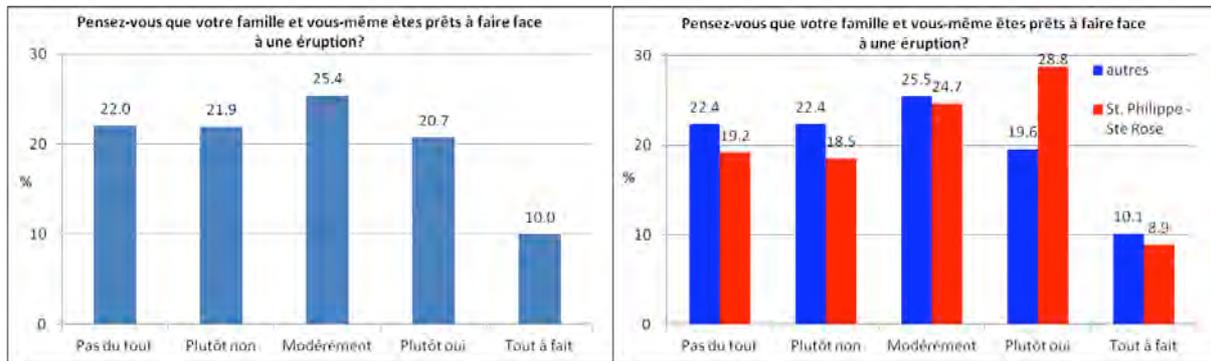


Fig. 47a: N=1182

Fig.47b: N autres=1036; N St. Philippe-Ste Rose= 146

Connaissance du risque

Pour évaluer le niveau de connaissance du risque volcanique il a été demandé de dresser la liste des volcans présents sur l'île et d'indiquer lequel pourrait constituer une menace pour sa propre commune

La majorité de l'échantillon (68,4%, N = 731) nomme les complexes volcaniques du Piton de la Fournaise et du Piton des Neiges, 29% seulement indique le Piton de la Fournaise comme étant le seul volcan de l'île, alors que seulement 1,3% ne mentionne que le Piton des Neiges, et 62,8% des répondants décrivent potentiellement dangereux ces deux volcans

Lorsqu'on leur a demandé d'indiquer d'où viendrait une éventuelle menace volcanique pour leur propre commune, 60,9% indiquent le Piton des Neiges comme le plus probable. Ceci montre une bonne connaissance de leur région mais indique également des notions incomplètes sur le risque volcanique potentiel à l'île de La Réunion (Fig.11).

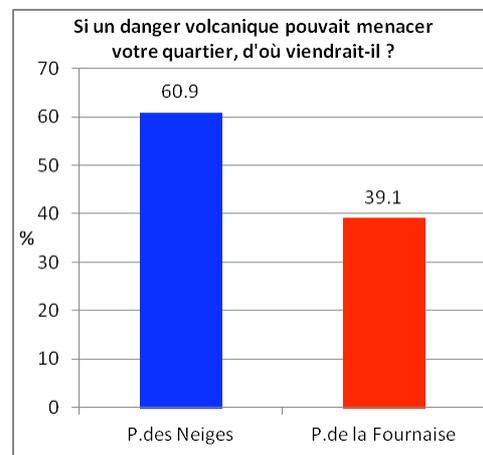


Fig. 48: N=688

Connaissance des plans de secours spécialisés et confiance dans les mesures de gestion de crise

Certaines questions ont eu pour but de demander aux habitants s'ils étaient au courant du Plan de Secours Spécialisé Volcan, de sonder le degré de confiance qu'ils ont dans le succès de l'évacuation prévue par ce Plan et d'envisager l'utilité des exercices préparatoires à une situation de crise éruptive.

Il en résulte que 80,4% déclarent ne pas être au courant du plan qui sera mis en œuvre par les autorités en cas de crise volcanique. Ce pourcentage reste **plutôt** élevé (63,8%), même pour les résidents à Saint Philippe et Ste Rose. De plus, près de 30% de l'échantillon des personnes sondées ne savent pas ce que le plan prévoit pour les évacuations, pourcentage qui reste autour de 20% pour les résidents de Saint-Philippe et Sainte-Rose, bien qu'ils aient vécu deux fois une évacuation partielle lors de crises éruptives (Fig.12; Fig.13a-13b)

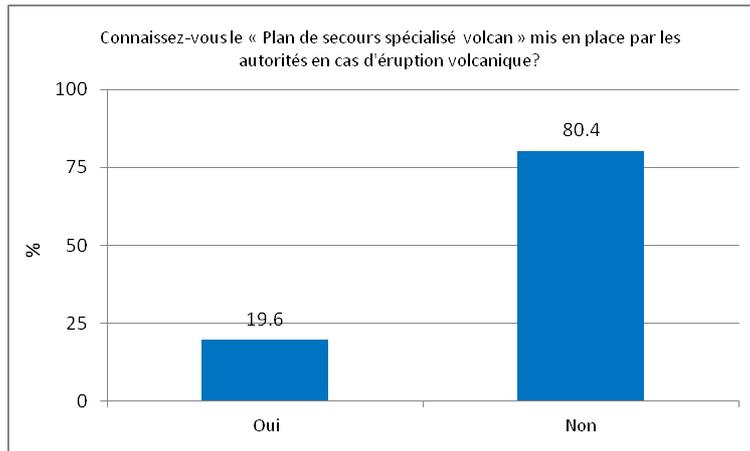


Fig. 49: N=896

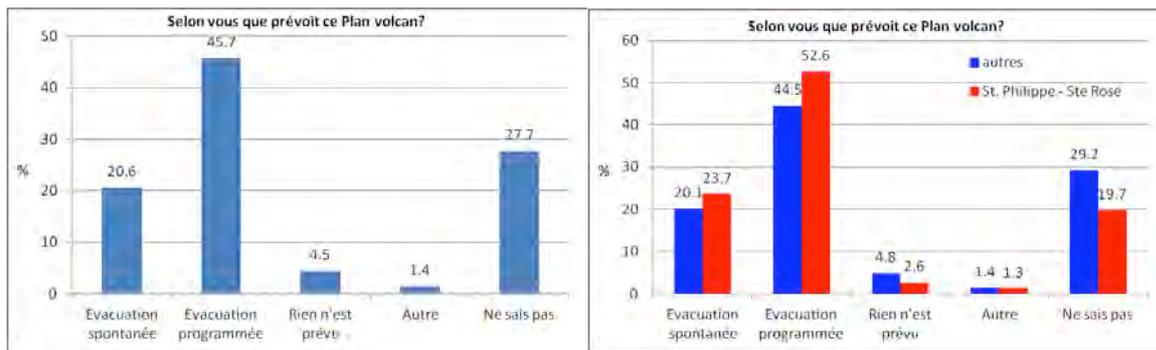


Fig. 50a: N=494

Fig.50b: N autres=418; N St. Philippe-Ste Rose= 76

En ce qui concerne le succès dans l'évacuation de la population que prévoit le plan, l'échantillon se veut nettement confiant, avec plus de 80% des répondants indiquant une confiance modérée et totale (Fig.14a-14b).

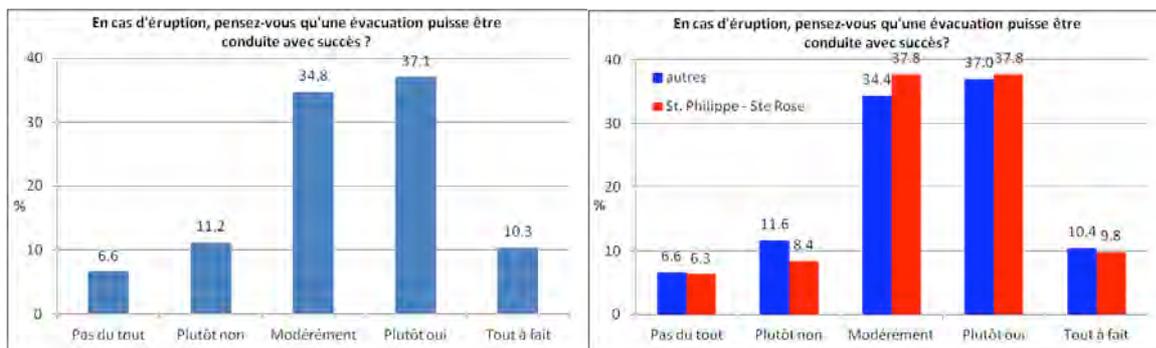


Fig. 51a: N=1170

Fig.51b: N autres=1027; N St. Philippe-Ste Rose= 143

Un autre résultat intéressant est le pourcentage élevé égal à 77,8% des répondants qui reconnaît l'utilité d'exercices de simulation liés à une future crise éruptive (Fig.15).

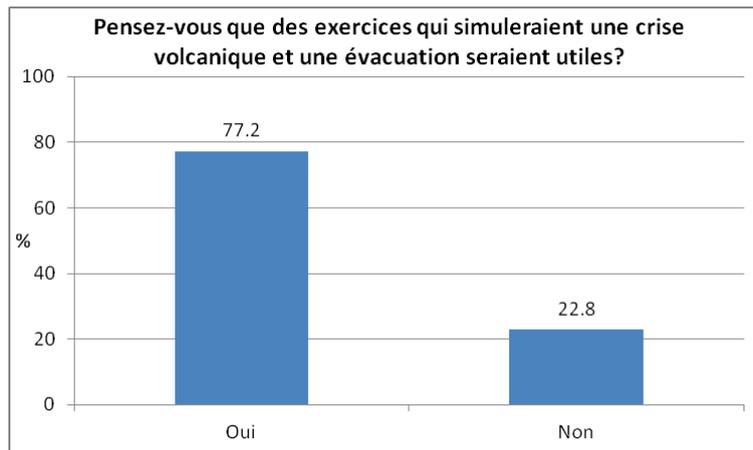


Fig. 52: N=937

Confiance dans les autorités et dans l'information reçue par les autorités et l'Observatoire

Certaines questions ont été posées afin d'évaluer la perception par les habitants de l'état de préparation des autorités locales et de la protection civile pour faire face à une situation de crise éruptive. Les résultats indiquent une bonne évaluation de la préfecture et, dans une moindre mesure, de la Mairie. Plutôt faible, est, en rapport, l'évaluation de la préparation personnelle (Fig:16).

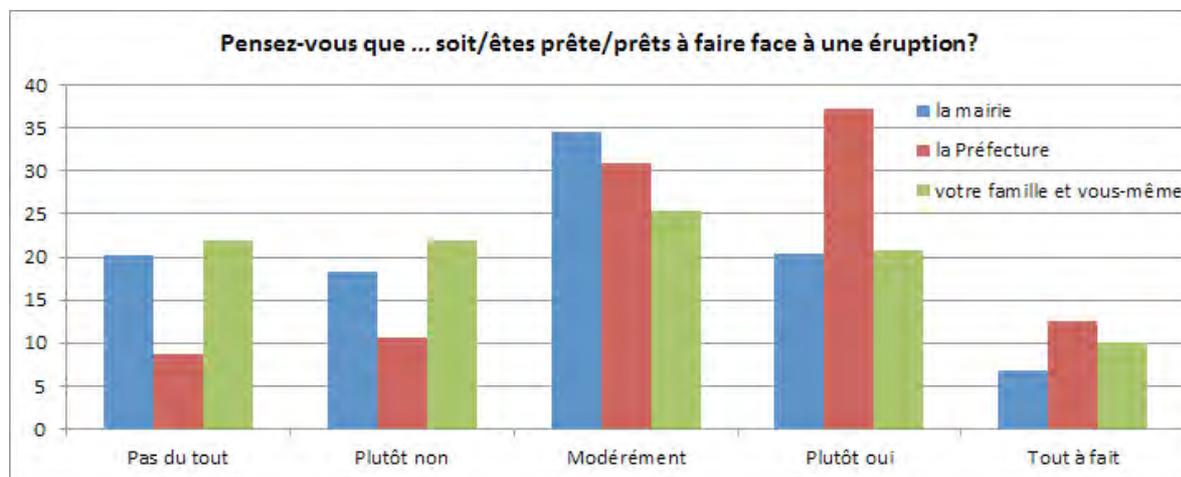


Fig. 53: N=1174

En outre, afin d'identifier l'institution la mieux évaluée pour fournir des informations précises, il a été demandé d'exprimer sa confiance dans l'information divulguée sur le risque volcanique, respectivement, par l'Observatoire Volcanologique, la préfecture et la protection civile, les élus locaux et les médias. L'Observatoire Volcanologique s'avère être la source la plus fiable d'information, suivie par les médias et les autorités locales (Fig.17a-17b; Fig.18).

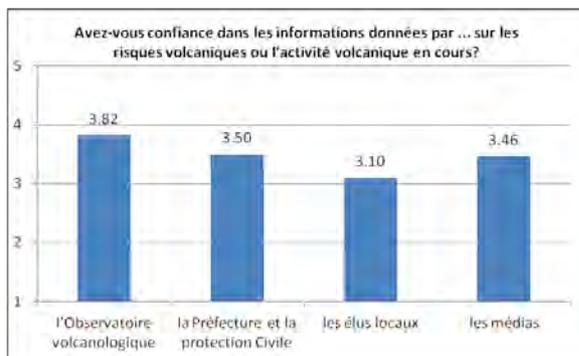


Fig. 54a: N=1159

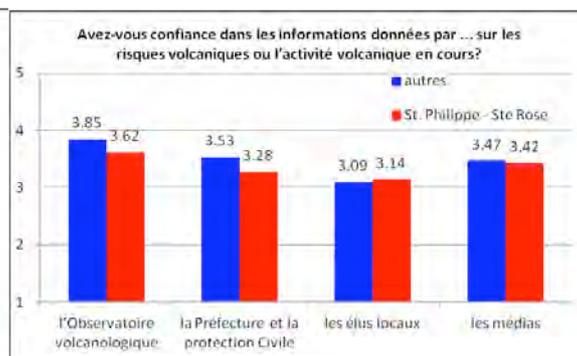


Fig.54b: N autres=1019; N St. Philippe-Ste Rose= 140

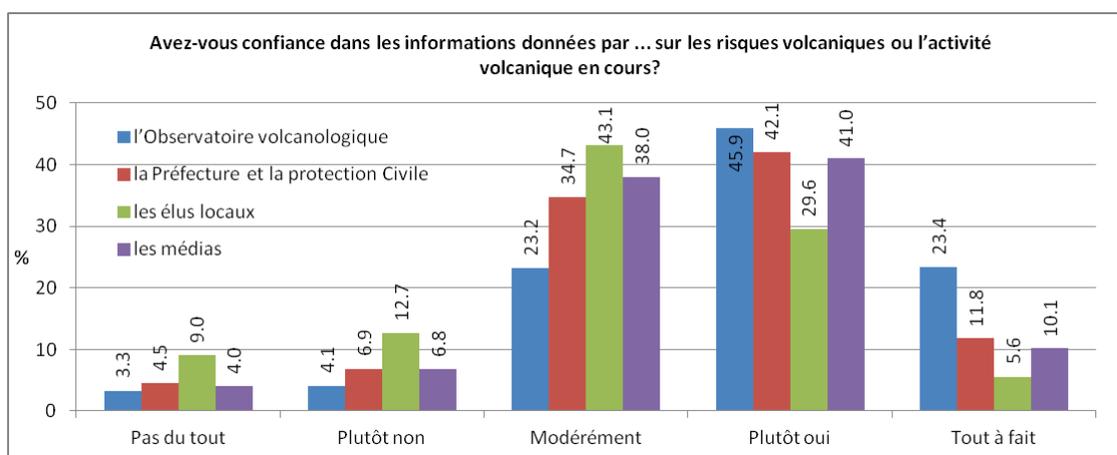


Fig. 55: N=1159

Information sur le risque volcanique

En ce qui concerne l'évaluation que les résidents font de l'information reçue sur les risques volcaniques, la majorité des répondants (47,3%) estime qu'elle est suffisante. Cependant, il faut également prendre en compte le pourcentage élevé de ceux qui considèrent le manque d'information sur le risque volcanique (34,6%) voir même l'information inexistante sur cet aspect (3,7%) (Fig.19).

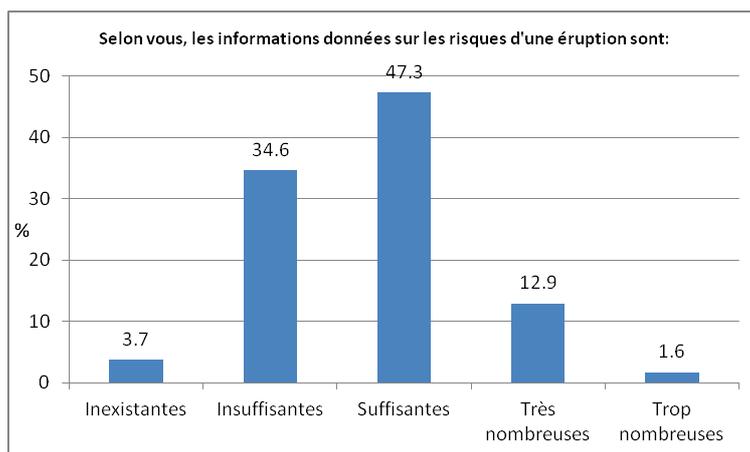


Fig. 56: N=1166

Lorsqu'il a été demandé de quelles sources les personnes interrogées avaient reçu la majorité de l'information sur les risques volcaniques, il est clair que le rôle reconnu comme prédominant est celui de la télévision et la radio.

Certaines données sont à méditer, comme le faible pourcentage reçu pour l'école et l'Observatoire volcanologique, qui se révèle être même inférieur à celui de la famille et amis comme source d'information reçue (Fig.20).

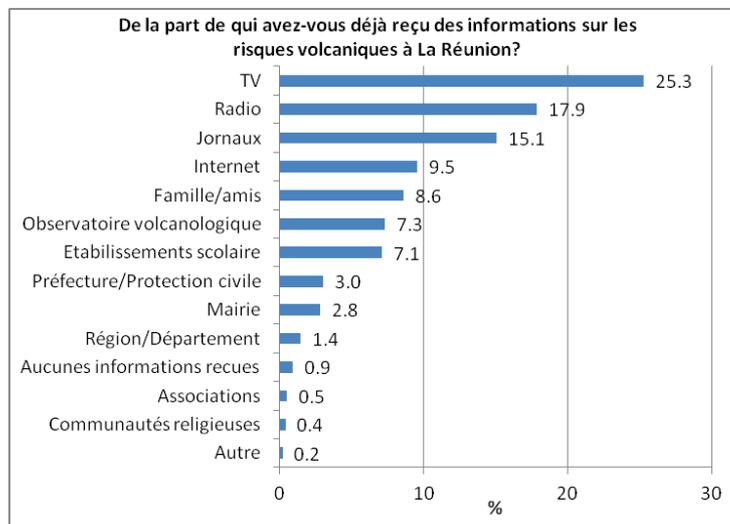


Fig. 57: N=1166

Les mêmes canaux principaux d'information sont énumérés en tant que favoris dans le futur, pour recevoir des informations sur les risques volcaniques (Fig.21).

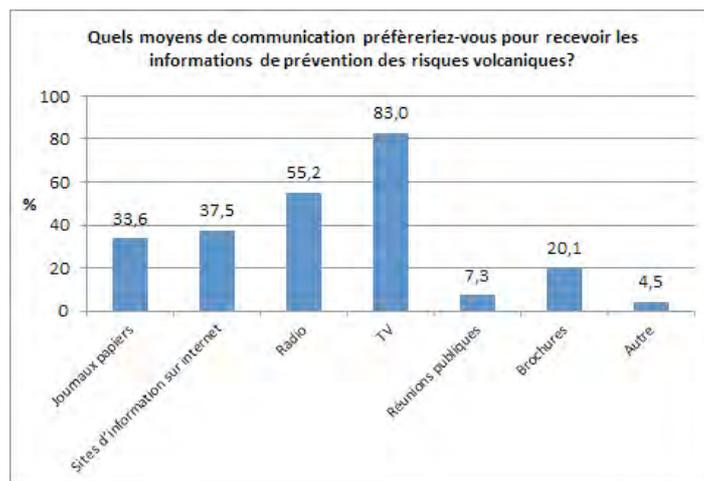


Fig. 58: N=1139

En ce qui concerne les institutions et les canaux d'information préférés pour recevoir de l'information officielle sur le *Plan de Secours Spécialisé Volcan* dans une situation de crise éruptive, une fois de plus, l'Observatoire Volcanologique est majoritaire (50,1%), suivie par la Mairie (42,7%), la Préfecture et la Protection Civile (29,9%), puis la Région et Département (17,4%). Les canaux d'information préférés sont la télévision et la radio, avec respectivement 80,2% et 65,6% des répondants. Il est à retenir également que près de 30% ont indiqué internet (Fig.22a-22b).

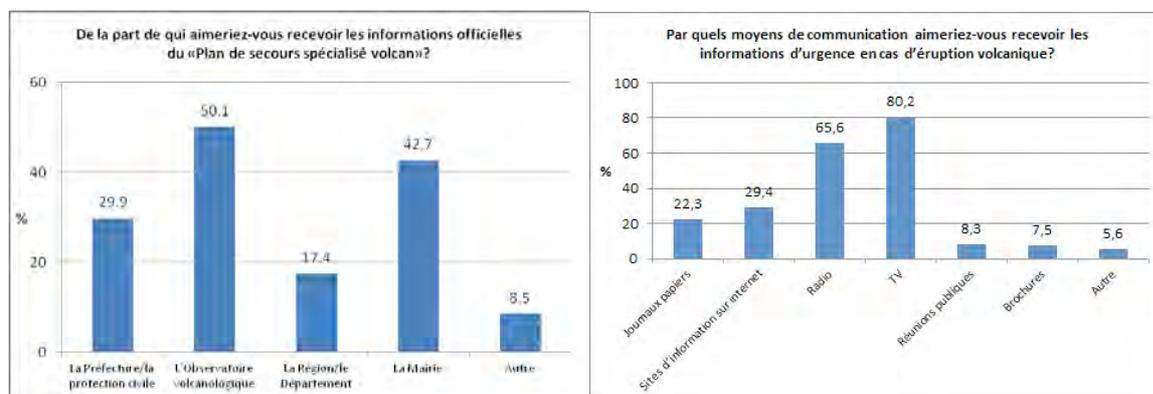


Fig. 59a: N=1125

Fig.59b : N=1175

Sens de la communauté

La définition du sens de la communauté a été fondée sur 18 points établis pour l'échelle italienne du sens de la communauté (Prezza et al., 1999). Ces 18 points ont été posés dans ce questionnaire, avec des scores allant d'un minimum de 1 à un maximum de 4, les chiffres les plus élevés indiquant un lien plus fort à l'égard de leur communauté. La moyenne pour l'ensemble de l'échantillon est de 2,84, avec un écart type de 0,42.

La commune avec les niveaux significativement les plus élevés du sentiment de communauté est Le Port (3,13) ainsi que les communes de Cilaos et de Salazie (3,01). Le résultat le plus faible (celui de Trois Bassins), ne doit toutefois pas être interprété comme significatif, puisque seulement 3 répondants ont rempli les 18 points prévus dans l'échelle du sens de la communauté. Les autres communes ne diffèrent pas significativement l'une de l'autre (Fig.23).

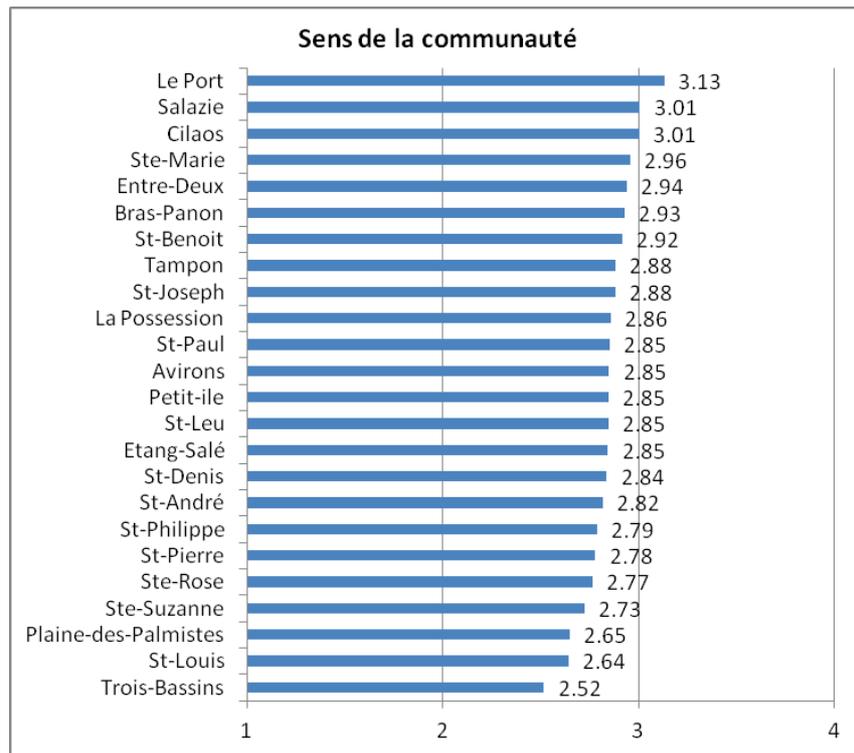


Fig. 60: Sens de la communauté par commune (N=890)

Conclusion

Les résultats de cette étude ont montré les paramètres clefs à considérer pour une meilleure préparation à une future gestion de crise éruptive. En particulier, l'information sur le risque volcanique évalué comme faible ou inexistante par un pourcentage important des répondants, doit être pris en considération pour définir les moyens les plus efficaces de diffusion de ces informations. Pour ce faire, il sera opportun de favoriser l'utilisation des moyens télévisés et radios qui sont apparus comme largement préférés par les habitants. En outre, divers supports d'information devront être produits de manière orientée pour simplifier le message informatif, et atteindre divers contextes sociaux.

L'école, et les établissements scolaires en général, devront être mieux et plus impliqués dans ces actions.

Un autre résultat extrêmement intéressant est la méconnaissance quasi-totale du Plan de Secours Spécialisé Volcan, qui appelle à une plus grande implication des institutions concernées, pour accroître une politique de préparation de la population à une future crise éruptive.

L'Observatoire Volcanologique, sur la base du consensus et de la confiance qu'ont exprimé les personnes ayant répondu à ce questionnaire devrait être amené à jouer un rôle de premier plan de l'information à divulguer, et aussi pour la coordination des actions d'éducation - information à mettre en œuvre prochainement à La Réunion.

6.4 Perspectives

Les résultats statistiques et de recoupement des réponses sont actuellement en cours d'analyse avancée et feront prochainement l'objet d'un rapport plus détaillé. Ces résultats mettront en évidence les paramètres clefs à considérer pour une meilleure gestion de crise future.

Sur la base des très bons résultats obtenus au cours de cette première année en pourcentage de réponse retour auprès des écoles (collèges et lycées), il est envisagé au cours de la seconde année de compléter cette étude auprès des écoles n'ayant pas été contactées en 2011. Il est également envisagé de réaliser une étude particulière au niveau des aires les plus exposées au risque volcanique.

7. SYSTEME D'INFORMATION GEOGRAPHIQUE POUR LA CARTOGRAPHIE DE L'ALEA

La connaissance de l'aléa éruptif nécessite de s'appuyer sur l'analyse spatiale des données décrivant l'activité du volcan et les phénomènes observés. Ces données sont relatives aux fissures éruptives, aux coulées, aux cônes, aux téphras (blocs, cendres ...), aux séismes liés aux éruptions, ainsi qu'aux fractures. Elles doivent être collectées, structurées et intégrées dans un système d'information géographique pour pouvoir être cartographiées et faire l'objet de traitements d'analyse spatiale en vue de la cartographie de l'Alea. Certaines données avaient déjà été collectées et numérisées, d'autres ont dû être collectées ou construites à partir de relevés de terrain, de photos interprétations, de cartes papiers ou de documents issus d'enquêtes en archives.

L'OVPF ayant au préalable acquis le logiciel SIG ArcGIS, c'est donc cette solution qui a été retenue. La mise en place du SIG a un double objectif :

- Permettre aux différents contributeurs de disposer de données structurées pour mener leurs analyses
- Capitaliser les données élaborées issues des analyses effectuées lors des différentes tâches

La méthodologie suivie pour atteindre cet objectif est la suivante :

- Etat des lieux des données existantes et identification des données manquantes
- Elaboration d'un modèle de données définissant les données nécessaires à la caractérisation de l'aléa éruptif
- Harmonisation et mise à jour des jeux de données existants
- Intégration des données issues du Référentiel à Grande Echelle de l'IGN (BD Topo, MNT, Ortho-photo)
- Elaboration des jeux de données manquants et intégration dans le SIG
- Réalisation des productions cartographiques représentant les différents aspects du phénomène éruptif
- Intégration des données produites lors des différentes tâches

7.1 Etat des lieux des données existantes

Le tableau ci-après présente une synthèse des données existantes en début de projet.

Jeux de données		Sources	Format	Origines	Commentaires
Coulées	Après 1972	OVPF/IPGP	Numérique Fichier shp **	Relevés terrains / Photo- interprétation MNT	Incomplet / Champs des variables incomplets ou non renseignés / Géométrie des coulées variables
	1931-1984	Géosciences Réunion	Numérique Fichier Mif/Mid **	Numérisation à partir de cartes papiers (carte des coulées)	Pas de données attributaires associées / Géométrie des coulées incomplètes. Numérisation de la partie apparente des coulées.
	1800-1979	OVPF /IPGP	Calques / cartes Papiers *	Non précisé	Qualité et précisions des documents variables. Informations lacunaires et ambiguës
	Avant 1800 Hors Enclos	Géosciences Réunion Autres	Cartes papiers / dessins	P. Bachelery LGR Bibliographie / documents d'archives non précisés	
Cônes		Géosciences Réunion	Numérique Fichier Mif/Mid	Photo-interprétation	Géométrie ponctuelle. Jeu incomplet en cours d'élaboration
		OVPF/IPGP	Calques / cartes Papiers (1 calques par éruption)	Non précisé	Qualité et précisions des documents variables. Informations lacunaires ambiguës
		OVPF/IPGP	Numérique Fichier Shp	Non précisé	Qualité et précisions des documents variables. Informations lacunaires ambiguës
Fissures	Après 1972 Dans l'Enclos	OVPF/IPGP	Numérique Fichier shp	Relevés terrains / Photo- interprétation MNT	Incomplet / Champs des variables incomplets ou non renseignés / Géométrie des coulées variables
	Avant 1972	OVPF/IPGP	Calques / cartes Papiers	Non précisé	Qualité et précisions des documents variables. Informations lacunaires et ambiguës
Fractures	Après 1972	OVPF/IPGP	Numérique Fichier shp	Relevés terrains / Photo- interprétation MNT	Incomplet / Champs des variables incomplets ou non renseignés / Géométrie des coulées variables
	Au niveau du sommet	OVPF/IPGP			
Eruptions	Avant 1972	OVPF/IPGP	Numérique Fichier Ascii	Archives Réseau d'enregistrements	En cours d'élaboration Les données issues du Global Volcanism Program ne sont pas directement exploitable
	Après 1972	OVPF/IPGP	Descriptions textuelles	Archives / Global Volcanism Program http://www.volcano.si.edu	
Blocs		Géosciences réunion	Numérique Surfeur / données raster	Relevés terrains / Photo- interprétation MNT	Format difficilement inter- opérable
Séismes		OVPF/IPGP	Numérique Fichier Ascii	Stations sismiques	

* Pour chaque éruption, les cônes, les fissures et les coulées ont été dessinées à la main

** Fichier shp : format SIG ArcGIS / Fichier Mif_Mid : format SIG MapInfo

Tableau : Données volcanologiques décrivant les phénomènes éruptifs du Piton de la Fournaise : état des lieux en début de projet

Certaines données se présentent sous format numérique, d'autres se présentent sous la forme de tableaux de données, de textes ou d'images, insérés dans des références bibliographiques, ou sous forme d'archive et ne sont donc pas directement intégrables sous ArcGIS. Les données numériques correspondent à des couches d'information géographique de type SIG ; d'autres sont dans des formats Ascii ou des formats propriétaires et leur intégration sous ArcGIS nécessitent des traitements informatiques spécifiques.

7.2 Caractérisation des données numériques existantes

Comme le montre le tableau 1, les jeux de données existants sont dispersés, très hétérogènes, de qualités variables et incomplètes :

Dispersion des données existantes: certaines données sont détenues par l'OVPF, d'autres par le Laboratoire Géosciences Réunion, voire par d'autres institutions (Smithsonian Institut...).

Les jeux de données existants sont hétérogènes, ce qui rend difficile leur intégration dans un système d'information géographique ainsi que leur exploitation. L'hétérogénéité concerne aussi bien 1) la façon dont sont structurées et modélisées les données : dans certains cas, une coulée est représentée sous la forme d'un seul polygone, dans d'autres cas de plusieurs polygones (chaque polygone représentant les différents bras de la coulée) ; parfois un polygone représente l'ensemble des coulées qui se sont produites pendant une même éruption ; les cônes sont, dans certains jeux de données, représentés par leur localisation géographique, dans d'autres par leur surface. 2) les formats de fichiers dans lesquels sont stockées les données ; plusieurs formats coexistent pour des jeux de données d'une même thématique (Certaines coulées numérisées ou certains cônes sont dans un format ArcGIS (shp), d'autres en format MapInfo (Mif/Mid) ; d'autres jeux de données sont en format txt. 3) les variables et les modalités des variables utilisées pour caractériser les objets étudiés. Par exemple au sein d'un même jeu de données, la date peut être exprimée selon différents formats et différents niveaux de granularité (01/02/2001 ou février 2001 ...), ou bien les noms de lieux ne coïncident pas entre les différents jeux de données ; les noms des variables ne sont pas forcément les mêmes entre les différents jeux de données et ne sont pas forcément cohérents entre eux.

Les données volcanologiques comportent de nombreuses valeurs manquantes, et sont parfois imprécises: la localisation n'est pas toujours exprimée par des coordonnées géographiques, ou par des noms de lieu géo-référencé, mais parfois simplement de façon

relative (à l'ouest de) ou de façon approximative « Sur le flanc ouest de Bory », un même lieu peu avoir plusieurs toponyme; la date d'une éruption est d'autant plus imprécise que l'on remonte dans le temps ; Les dates ou les heures de début et de fin d'éruption ne sont pas toujours pas renseignées. L'imprécision concerne aussi la représentation des objets de surface comme le tracé d'une coulée ou les contours d'un cône. Parfois, selon les sources, nous disposons de plusieurs tracés ou de plusieurs localisations pour un même objet. Par ailleurs, les niveaux de généralisation ou de précision des tracés sont très différents, ce qui rend difficile la comparaison entre les coulées (dans certains cas le tracé d'une coulée est très grossier; dans d'autres il est particulièrement précis). D'autres données sont *incertaines*, c'est à dire qu'il existe un doute sur la validité de la donnée elle même (par exemple, « fissure probable » lorsque la fissure a été recouverte par la lave). Certaines imprécisions peuvent entraîner des ambiguïtés : par exemple la modalité « 28-29 mars 1953 » qui représente la date d'une coulée peut signifier que la coulée s'est produite le 28 et le 29 mars et a donc durée 2 jours, ou qu'il existe un doute sur la date exacte de la coulée.

L'hétérogénéité des données, a pour conséquence une incohérence entre les jeux de données. L'incohérence peut concerner la date (date de début et de fin d'éruption, date d'ouverture de fissures ...), mais aussi la position ou la forme d'éléments morphologiques (cônes, fissures, coulées...); Ces incohérences rendent difficile la mise en relations des différents jeux de données. Un important travail d'harmonisation et d'homogénéisation de ces données a donc été réalisé.

L'homogénéisation des données et la mise en cohérence des jeux de données ont donc nécessité :

- **L'élaboration d'un modèle de données représentant la façon dont les données devront être structurées dans le SIG** (figure 61). La diversité des sources de données et des méthodes de production de la donnée nous conduit à intégrer dans le modèle de données les méta-données qui permettent de donner des informations sur la donnée elle-même.
- **L'analyse des jeux de données et la comparaison entre eux, afin d'identifier les incohérences et les erreurs**
- **La collecte des données manquantes au moyen de recherches bibliographiques ou d'autres sources de données**
- **La mise à jour des données attributaires associées à chaque couche d'information**

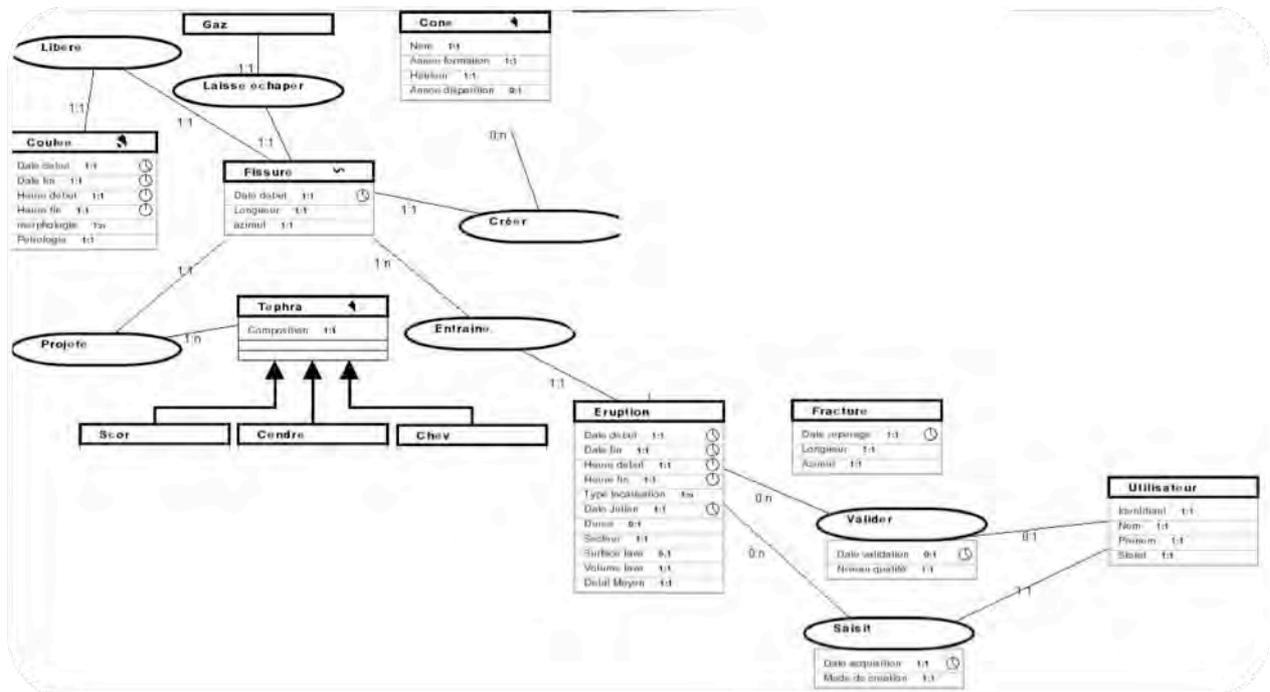


Fig. 61 : Modélisation des données volcanologiques

7.2 Elaboration de nouvelles données

L'élaboration de nouvelles a consisté à

- La numérisation des coulées, sur la période 1800-1979, et qui n'existaient pas dans les fichiers de coulées de l'OVPF ou de Géosciences Réunion. Cette numérisation concernent généralement des coulées dans l'enclos et a été faite à partir de cartes papiers ou de calques.
- La numérisation des coulées hors-enclos à partir de cartes papiers (carte des coulées hors enclos de P. Bachelery) ou de photo-interprétation sur les secteurs les plus proches de l'Enclos (Secteur de la Plaine des Sables ...)
- La numérisation des cônes, dans et hors enclos, à partir de photo interprétation (Laboratoire Géosciences Réunion), de numérisation de cartes papiers, et des fichiers de coulées
- La numérisation des fissures à partir de photo interprétation (Laboratoire Géosciences Réunion), de numérisation de cartes papiers, et des fichiers de coulées
- La numérisation des blocs à partir de photo-interprétation (Laboratoires Géosciences Réunion)

Ces données nouvellement créées ont fait l'objet d'une validation par comparaison entre les différentes couches d'information géographiques (cônes / coulées / fissures), par observation sur le terrain et par connaissances d'experts (Chercheurs de l'OVPF et du Laboratoire géosciences Réunion).

7.3 Intégration des données dans le SIG ArcGIS

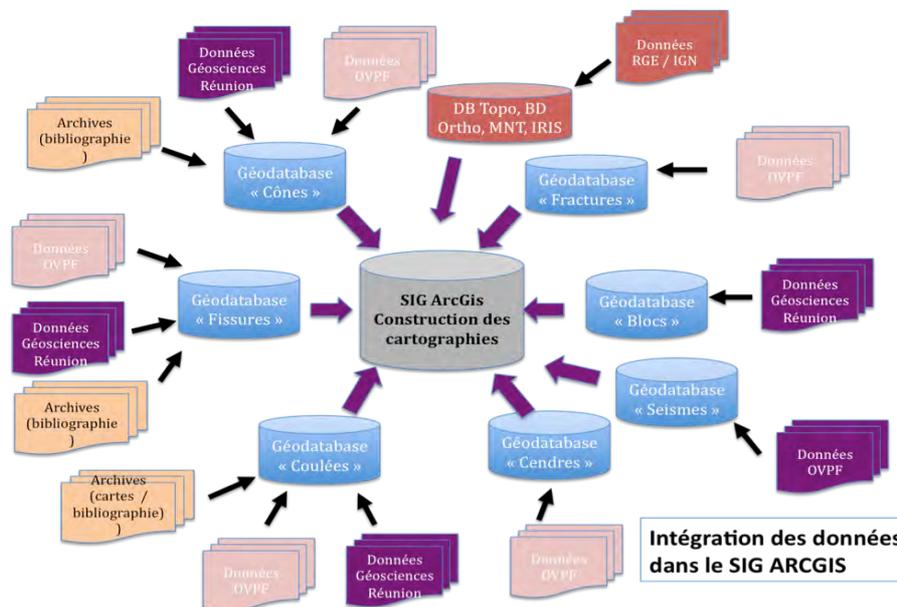


Fig. 62 : Intégration des données volcanologiques dans le SIG ARCGIS de l'OVPF

Les données ont été intégrées dans le SIG ArcGIS. Elles sont structurées en couches d'information géographique et en tables pour les données attributaires selon le format ArcGIS. L'ensemble des couches d'information géographique relatives à un même thème (coulée, cônes, fissures, fractures, blocs, cendres, séismes) est regroupé dans une géodatabase spécifique (format ArcGIS). Pour les événements récents, les différentes couches sont reliées entre elles au moyen de la date d'éruption. Pour les événements anciens, les liens entre les différents phénomènes éruptifs s'effectuent par superposition des couches.

Sont inclus dans le SIG les données géographiques de références (RGE IGN) de la BD Topo de l'IGN, l'ortho photo, le MNT de l'Île de la Réunion, ainsi que les contours des îlots IRIS 2000 de l'INSEE.

7.4 Processus d'élaboration des géodatabases

Les figures 62, 63, 64 et 65 présentent le processus d'intégration des données dans les géodatabase « Coulées », « Cônes » et « Fissures ». L'idée est de préserver la généalogie des données produites.

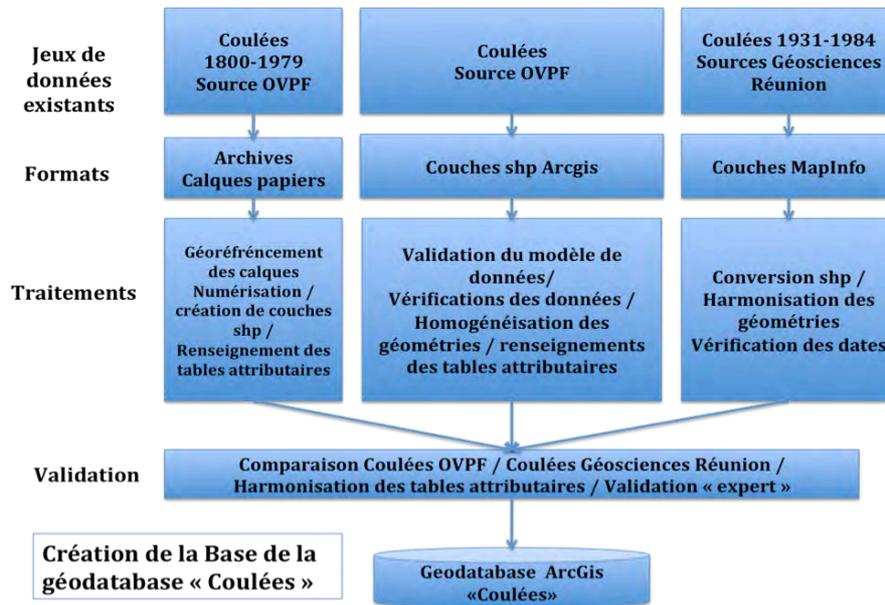


Fig. 63 : Processus d'élaboration et d'intégration des jeux de données « Coulées » dans la Géodatabase

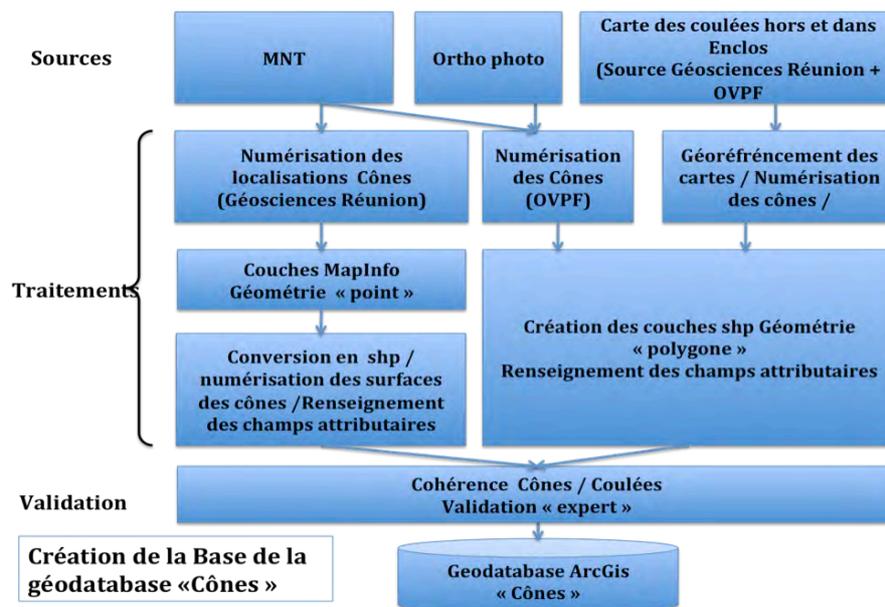


Fig. 64: Processus d'élaboration et d'intégration des jeux de données « Cônes » dans la Géodatabase

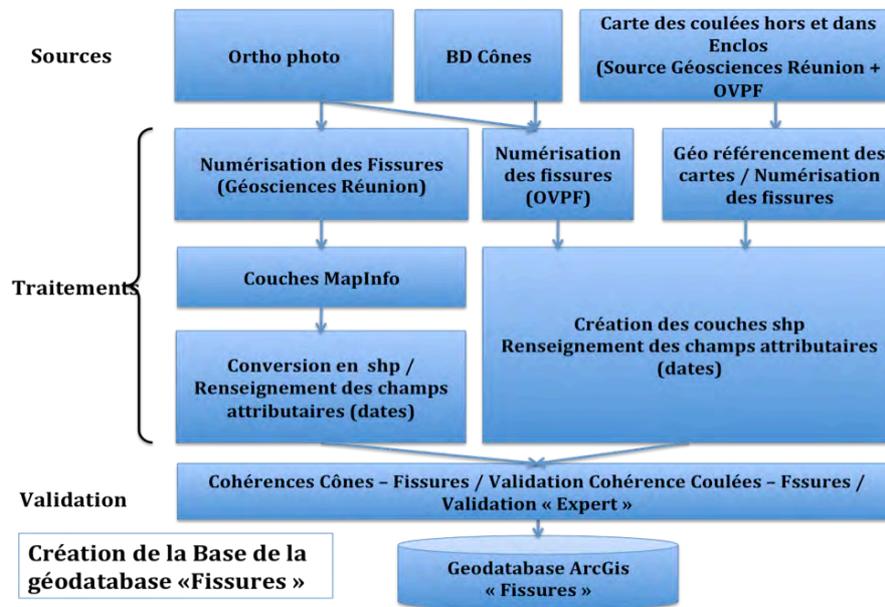


Fig. 65: Processus d'élaboration et d'intégration des jeux de données « Fissures » dans la Géodatabase

Les données « Blocs », « Fractures » et « Séismes », faisant l'objet d'une seule source de données, leur processus d'élaboration est relativement simple. En revanche, les données « blocs » et « séismes » ont nécessité un traitement informatique spécifique en vue de leur intégration dans le SIG ArcGIS.

7.5 Productions cartographiques pour la caractérisation de l'aléa éruptif

Une fois les données harmonisées et intégrées dans les différentes géodatabase, différentes productions cartographiques, nécessaires à la caractérisation de l'aléa éruptif ont été élaborées. La figure 66 présente l'organigramme des productions cartographiques réalisées. Ces dernières sont présentées en annexes sous forme d'atlas.

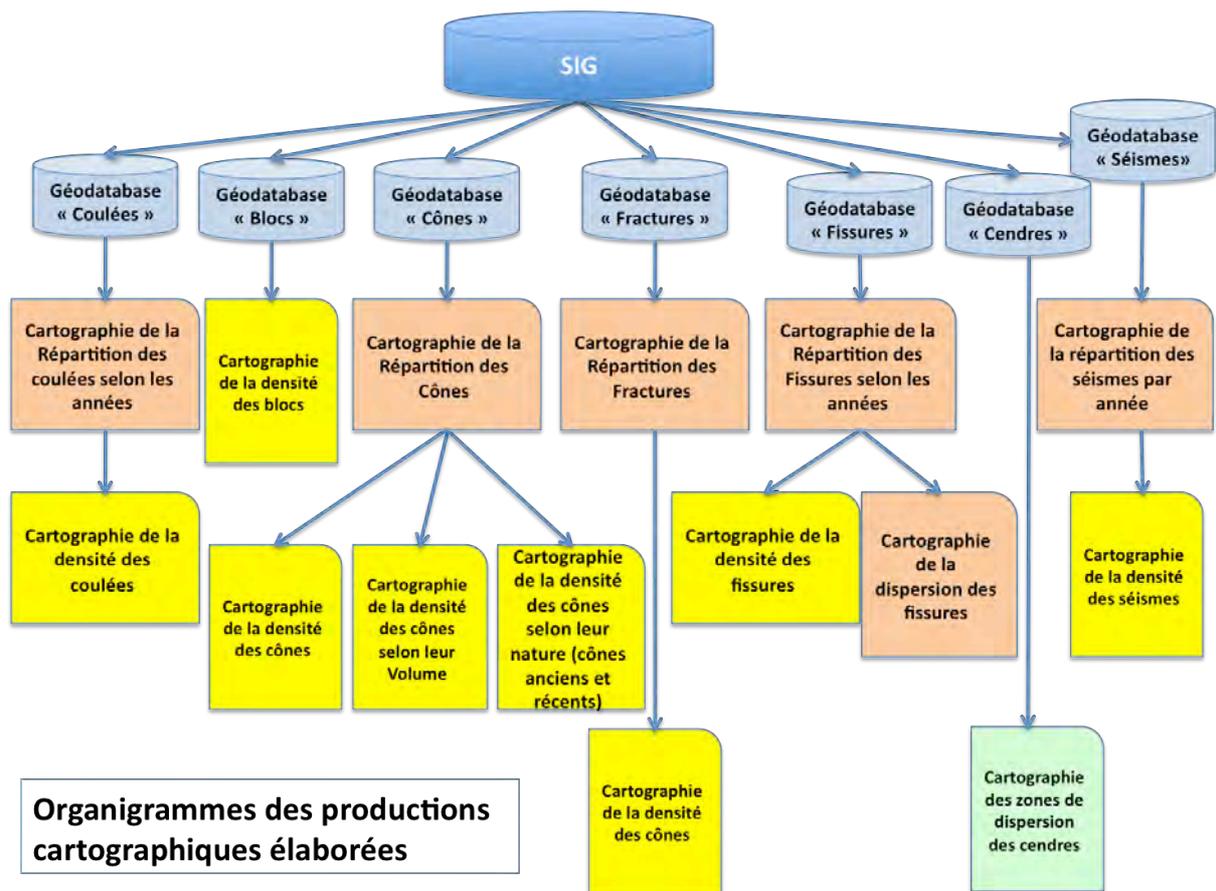


Fig. 66 : Productions cartographiques pour la caractérisation de l'aléa éruptif du Piton de la Fournaise.

7.6 Conclusion et perspectives

La mise en place du SIG à l'OVVF a permis de mettre en évidence la complexité et la disparité des données volcanologiques, leur caractère multidimensionnel (données géographiques temporelles ou historiques), hétérogène et multidisciplinaire, rendant ainsi délicat leur intégration dans le SIG. Ce travail a été aussi l'occasion de rassembler et d'homogénéiser une importante masse de données initialement dispersées dans différents organismes intéressés par l'étude des phénomènes éruptifs. Pour une bonne analyse du risque volcanique et de sa gestion il est donc nécessaire :

- De poursuivre l'effort de structuration et d'harmonisation des différents jeux de données ;
- De poursuivre l'effort de complétude des valeurs manquantes notamment à travers des recherches en archives

- De renseigner l'origine des jeux de données et d'intégrer les méta-données en accord avec la directive INSPIRE. Ceci est particulièrement important aussi bien dans une démarche d'analyse, de capitalisation que de diffusion des données.
- A partir des documents anciens issus d'archives, de construire la base de données historiques des éruptions anciennes.
- D'assurer l'interopérabilité du SIG avec les autres bases de données de l'OVPF (Géochimie, séismes ...)
- De faciliter l'accès aux informations volcanologiques par les différents acteurs du risque
- Faciliter la production cartographique et les traitements liés à la caractérisation de l'aléa
- Mettre en place des spécifications et des procédures pour l'acquisition des données lors des prochaines éruptions, de tel sorte que ces nouvelles données soient en accord avec les BD constituées.

Par ailleurs, une base de données historiques permettant la capitalisation des données relatives aux éruptions passées et issues des recherches bibliographiques a été initiée. Le rôle des bases de données historiques pour la gestion des risques étant reconnu, il serait pertinent de poursuivre le développement d'un tel outil.

Remerciements :

On remercie Cyprien Alexandre, stagiaire, étudiant ainsi que les autres étudiants de la Licence Professionnelle Etudes Statistique et Système d'Information Géographique de l'université Pierre Mendès France, Grenoble, promotion 2011-2012 pour la numérisation et la structuration des données (Léa Beligne, Adrien Laurent-Dray, Gaspard Legrand, Yves-Laurent Ngbesso, Bernardo Moreno, Antoine Tarel) et Robin Davoine, étudiant en Licence 1 de Géographie, Université de Lyon III pour la numérisation des données (coulées des calques).

Références bibliographiques

- Andronico D., Cristaldi A., Del Carlo P., Taddeucci J. (2008)**, *shifting styles of basaltic explosive activity during the 2002-03 eruption of Mt Etna Italy*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 13 p
- Andronico D., Scolo S., Cristaldi A., Ferrari F. (2008)**, *Monitoring ash emission episodes at Mt Etna: The 16 November case study*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 12p
- Andronico D., Spinetti C., Cristaldi A., Buongiorno MF. (2009)**, *Observations of Mt Etna volcanic ash plumes in 2006: An integrated approach from ground-based and polar satellite NOAA-AVHRR monitoring system*, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 13 p
- Mohamed-Abchir A. (1996)**, *Les cendres de Bellecombe : un évènement explosif majeur dans le passé récent du Piton de la Fournaise, Ile de la Réunion*, Thèse de l'Université de Paris VII, 235p
- Bachelery P. (1999)**, *Le Fonctionnement des Volcans-Boucliers. Exemple des volcans de la Réunion et de la Grande Comore*, Mémoire de l'Université de la Réunion, 685 p
- Bachelery P. (1981)**, *Le Piton de la Fournaise (Ile de la Réunion). Etude Volcanologique, Structurale et Pétrologique*, Thèse de l'Université de Clermont Ferrand, 217p
- Battaglia, J., Ferrazzini, V., Staudacher, T., Aki, K., Cheminée, J.L. (2005)** Pre-eruptive migration of earthquakes at the Piton de la Fournaise volcano (Réunion Island). Geophysical Journal International, 549-558
- Bhugwant, C., Siéja, B., Bessafi, M., Staudacher, T., Eormier, J. (2009)** Atmospheric sulfur dioxide measurements during the 2005 and 2007 eruptions of the Piton de la Fournaise volcano: implications for human health and environmental changes. Journal of Volcanology and Geothermal Research, 208-224.
- Chirico GD, Favalli M, Papale P, Boschi E, Pareschi MT (2009)** Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, D.R.C. 2. Hazard reduction in urban areas. Bull Volcanol 71:375-387
- Bughwant et al., 2009
- Favalli M, Pareschi MT, Neri A, Isola I (2005)** Forecasting lava flow paths by a stochastic approach. Geophys Res Lett 32 doi: 10.1029/2004GL021718
- Favalli M, Chirico GD, Papale P, Pareschi MT, Coltelli M, Lucana N, Boschi E (2006)** town of Goma, Nyiragongo volcano, Democratic Republic of Congo. J Geophys Res 111 doi: 10.1029/2004JB003527
- Favalli M, Chirico GD, Papale P, Pareschi MT, Boschi E (2009)** Lava flow hazard at Nyiragongo volcano, D.R.C. 1. Model calibration and hazard mapping. Bull Volcanol, 71: 363_374.
- Fretzdorff S., Paterne M., Stoffers P., Ivanova E. (2000)**, *Explosive activity of the Réunion Island volcanoes through the past 260,000 years as recorded in deep-sea sediments*, Springer-Verlag, 12p
- Lénat J.F., Bachèlery P., Desmulier F. (2001)**. Genèse du champ de lave de l'Enclos Fouqué : une éruption d'envergure exceptionnelle du Piton de La Fournaise (Réunion) au 18e siècle. Bull. Soc. Géol. France, t 172, n°2, p. 177 - 188.
- Ma, K.-F., H. Kanamori, and K. Satake (1999)**, Mechanism of the 1975 Kalapana, Hawaii, earthquake inferred from tsunami data, *J. Geophys. Res.*, 104(B6), 13,153–13,167, doi:10.1029/1999JB900073.

- Roult, G., Peltier, A., Taisne, B., Staudacher, T., Ferrazzini, V., Di Muro, A., and the OVPF team (2012)** A new comprehensive classification of the Piton de la Fournaise activity spanning the 1985-2010 period. Search and analysis of short-term precursors from a broadband seismological station. Submitted to Journal of Volcanology and Geothermal Research
- Siebert L. & Simkin T. (1994)**, *Volcanoes of the world*, Geoscience Press & Smithsonian Institution, 349p
- Staudacher, T., Ferrazzini, V., Peltier, A., Kowalski, P., Boissier, P., Catherine, P., Lauret, F., Massin, F. (2009)** The April 2007 eruption and the Dolomieu crater collapse, two major events at Piton de la Fournaise (La Réunion Island, Indian Ocean). *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184: 126-137
- Staudacher T., Ruzié L., Peltier A. (2008)**, *Historique des éruptions du Piton de la Fournaise de 1998 à 2007*, 90p
- Tanguy JC. , Bachelery P., LeGoff M. (2011)**, *Archeomagnetism of Piton de la Fournaise: Bearing on volcanic activity at la Réunion Island and geomagnetic secular variation in Southern Indian Ocean*, *Earth Planetary Science Letters*, 8p
- Tulet P. and Villeneuve N., 2011.** Large scale modeling of the transport, chemical transformation and mass budget of the sulfur emitted during the April 2007 eruption of Piton de la Fournaise. *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 4533-4546, 2011.
- Vergnolle et Bachelery 1982
- Villeneuve N., Bachelery P. (2006)**, *Revue de la Typologie des éruptions au Piton de la Fournaise, processus et risques volcaniques associés*, *Revue européenne de géographie*, 26p